



Engelbert Schramm

**Energierückgewinnung
aus Abwasser:
Technologien für die Zukunft**

Engelbert Schramm

Energierückgewinnung aus Abwasser: Technologien für die Zukunft

Zu diesem Text

Aufbauend auf einer Literaturanalyse wird der derzeitige technische Entwicklungsstand im Bereich der Energierückgewinnung aus dem Siedlungsabwasser skizziert. Neben der Wärmerückgewinnung, die sowohl im Kanalnetz als auch dezentral in Gebäuden möglich ist, wurde die Biogasgewinnung sowohl auf Aerobkläranlagen als auch in Anaerobanlagen und die anschließende Aufbereitung der Klärgase in Erdgasqualität ebenso diskutiert wie die Nutzung von Schlämmen als Brennmaterial. Die Darstellung des derzeitigen Entwicklungsstandes half dabei, mögliche Entwicklungsaufgaben zu identifizieren, die einerseits vordringlich erlauben könnten, Abwasser künftig als Energieressource zu betrachten, und deren Lösung andererseits besonders innovative Leistungen erfordern. Die Entwicklungsaufgaben wurden thesenhaft zugespitzt, um so anschließend in einer Delphi-Befragung überprüft zu werden.

About this text

Based on a literary analysis the current technical state of development in the field of energy recovery from sewage and urban waste water is being outlined. Besides heat recovery which is possible both for the sewer system and decentralised in the buildings, the extraction of bio-gas was presented with respect to aerobic sewage plants as well as anaerobic treatment plants. The subsequent conversion of sewage gas into inert gas was also considered as well as the usage of sludges as fuel. The presentation of the current state of development helped to identify possible development tasks which on the one hand swiftly allow to consider waste water as a source of energy and the tackling of which is on the other hand calling for particularly innovative efforts. The development tasks were subsumed thesis-like so that they can be assessed in a subsequent Delphi-survey.

ISOE-Diskussionspapiere, Nr. 30
ISSN 1436-3534

Engelbert Schramm

Energierückgewinnung aus Abwasser: Technologien für die Zukunft

Herausgeber:
Institut für sozial-ökologische Forschung (ISOE) GmbH
Hamburger Allee 45
60486 Frankfurt am Main

Frankfurt am Main, 2008

Inhalt

Abkürzungsverzeichnis	7
1 Vorwort	9
2 Problemlage	9
3 Stand der Technik	11
3.1 Zentrale Wärmerückgewinnung im Kanalnetz bzw. hinter der ARA	12
3.2 Semi-zentrale und inhäusige Wärmerückgewinnung	14
3.3 Biogasverwertung nach anaerober Abwasserbehandlung	15
3.4 Biogasverwertung bei Faulturmtechnologie und Abwasserverregnung	17
3.5 Biogaseinspeisung in das Erdgasnetz	20
3.6 Klärschlammverbrennung	21
3.7 Schlamm Trocknung und andere Verfahren zur Gewinnung von Brennstoffen	23
4 Innovationspotentiale 2050	24
4.1 Gewinnung verbesserter Brennstoffe durch Schlamm Trocknung	24
4.2 Fortentwicklung der Wärmetauscher	25
4.3 Optimierung der Wärmepumpen	27
4.4 Energieoptimierung der Abwasserreinigung und ihrer Verfahren	28
4.5 Optimierung der Klärgasgewinnung in Anaerobverfahren	29
4.6 Optimierung der Gasausbeute durch Ko-Vergärung	30
4.7 Elektrisch-thermische Verwertung des Klärgases: Entwicklung zur Serienreife	31
4.8 Entwicklung der mikrobiell-chemoelektrischen Verwertung von Abwasser	34
4.9 Optimierung der Reinigung und Weiterverarbeitung biogener Gase	35
4.10 Integrierte Infrastrukturplanung	36
5 Zukunftsvisionen	36
5.1 Nutzung der Abwasserwärme	37
5.2 Klärschlämme als Brennstoff	37
5.3 Energieoptimierung der ARA	37
5.4 Steigerung der Biogasausbeute durch Ko-Vergärung	37
5.5 ARAs als Energieversorger	38
5.6 Methanherstellung aus Klärgas	38
5.7 Bio-Brennstoffzellen	38
6 Literatur	39

Abkürzungsverzeichnis

ARA	– Abwasserreinigungsanlage
BHKW	– Blockheizkraftwerk
BRICS	– Brasilien, Russland, Indien, V.R. China, Republik Südafrika
BWP	– Bundesverband WärmePumpe e.V.
COP	– Leistungszahl (Coefficient Of Performance)
CSB	– Chemischer Sauerstoff-Bedarf
DBU	– Deutsche Bundesstiftung Umwelt
DN	– Nennweite (Diameter Nominal)
DVGW	– Deutscher Verein des Gas- und Wasserfachs e.V
DWA	– Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V
EAWAG	– Eidgenössische Anstalt für Wasserversorgung, Abwasserreinigung und Gewässerschutz
EEG	– Gesetz für den Vorrang von Erneuerbaren Energien
EG	– Einwohnergleichwerte
FNR	– Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe
GTZ	– Gesellschaft für technische Zusammenarbeit
JAZ	– Jahresarbeitszahl
kW _{el}	– Kilowatt elektrische Leistung
MW _{th}	– Megawatt thermische Leistung
KWK	– Kraft-Wärme-Kopplung
MCFC	– Schmelzkarbonatbrennstoffzelle (Molten Carbonate Fuel Cell)
MPa	– MegaPascal (= 10 bar)
PAFC	– Phosphorsäurebrennstoffzelle (Phosphoric Acid Fuel Cell)
PEM	– Polymerelektrolytbrennstoffzelle (Proton Exchange Membrane Fuel Cell)
SWS	– stationäre Wirbelschicht
TASi	– Technische Anleitung Siedlungsabfall
TS	– Trockensubstanz
UASB	– Upflow Anaerobic Sludge Blanket
VSA	– Verband Schweizer Abwasserfachleute
ZWS	– zirkulierende Wirbelschicht

1 Vorwort

Die Rahmenbedingungen der Siedlungswasserwirtschaft ändern sich. Wo früher Industrialisierung und Wirtschaftswachstum, Bevölkerungszuwachs sowie Vertrauen in scheinbar unbegrenzte Energieressourcen und in eine riesige Pufferkapazität des Naturhaushalts zum Aufbau der modernen Wasserinfrastruktur geführt haben, führen heute technische Neuerungen dazu, dass über einen Paradigmenwechsel nachgedacht wird. Wo früher die Städte als Durchflussreaktoren benutzt wurden, durch die große Wassermengen geleitet wurden, um Schmutz und störende Materialien aufzunehmen und abzutransportieren, wird heute über die Verwirklichung des Kreislaufprinzips nachgedacht.

Orientiert an Verfahrensalternativen, die in der Industrierwasserwirtschaft und an Sonderstandorten (z.B. der Passagierschifffahrt) Einzug gehalten haben, ist es möglich geworden, Abwasser als Sekundärrohstoff zu behandeln. In der hier veröffentlichten Untersuchung soll es nicht darum gehen, die Erfolgsbedingungen für einen derartigen Paradigmenwechsel zu untersuchen. Vielmehr war die Studie ein erster Schritt, um im Verbundvorhaben „Wasser 2050: Nachhaltige wasserwirtschaftliche Systemlösungen – künftige Chancen für die deutsche Wasserwirtschaft“ eine Delphi-Befragung durchzuführen, in der ab Dezember 2007 Fachleute aus Wirtschaft und Wissenschaft an einer Technologievorschau beteiligt wurden. Auf dieser Untersuchung werden weitere Ergebnisse des Projekts aufbauen, die im Laufe des Jahres 2009 vorgestellt werden und das Ziel haben, der Wirtschaft im Wassersektor größere Gewissheit über Innovationsrichtungen zu geben.

Das Verbundvorhaben „Wasser 2050“ wird vom Institut für sozial-ökologische Forschung gemeinsam mit dem Fraunhofer Institut für Systemtechnik und Innovationsforschung und dem Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung durchgeführt und vom Bundesministerium für Bildung und Forschung finanziert (Förderkennzeichen 02WT0820).

Der Autor bedankt sich für Anregungen und inhaltliche Unterstützung beim Forschungsteam, insbesondere bei Dr. Harald Hiebl, Dr. Dr. Christian Sartorius und Dr. Thomas Kluge sowie bei Frau Dr. Verena Höcke vom Projektträger Karlsruhe des BMBF. Die Verantwortung für den Inhalt dieses 2007 abgeschlossenen Diskussionspapiers liegt alleine beim Autor.

2 Problemlage

Die Lagerstätten von Braun- und Steinkohle, Erdöl sowie Erdgas, die heute zentral zur Energiegewinnung herangezogen werden, werden sich in den nächsten Jahrhunderten weitgehend erschöpfen. Eine frühzeitige Umstellung auf andere Energieträger, insbesondere auf Solarenergie, Wind bzw. nachwachsende Rohstoffe, ist daher für die Sicherung der Energie- und Rohstoffversorgung der Menschheit unablässig (WBGU 2003).

Mit der Ratifizierung des Kyoto-Protokolls hat sich die Bundesrepublik Deutschland zur Reduzierung von Treibhausgasen verpflichtet: Bis zum Jahr 2010 sollen die nationalen Treibhausgasemissionen um 21% gegenüber 1990 reduziert werden. Damit dieses Ziel erreicht werden kann, müssen Verfahren der Energieerzeugung, die zu einer Verringerung des Kohlendstoffdioxid-Ausstoßes beitragen, eine breite Anwendung erfahren.

Der größte Stoffstrom, der derzeit durch die menschlichen Siedlungen organisiert ist, ist der Wasser-/Abwasserstrom (Baccini/Oswald 1998). Die dort mitgeführten „Energievorräte“ werden bisher in den Planungen zur Sicherung der zukünftigen Energieversorgung nicht angemessen beachtet.

Durch die Rückgewinnung von Wärme aus Abwasser kann einmal erzeugte Wärme wieder verwendet und damit ein zusätzlicher Kohlenstoffdioxid-Ausstoß vermieden werden. Grundsätzlich ist dabei die Menge an thermischer Energie, die sich in Form von Abwärme aus dem Abwasser gewinnen lässt, energiepolitisch auf Dauer kaum weiter vernachlässigbar. Wird einem Kubikmeter Abwasser ein Grad Wärme entzogen, so lassen sich daraus im Idealfall etwa 1,5 kWh gewinnen. Die so aus dem Abwasser gewinnbare Wärme reicht in Deutschland vom Angebot her aus, um jedes zehnte Gebäude mittels effizienter Wärmepumpen-Technologie beheizen zu können (Schmidt/Kobel o.J.). Außerdem ist in den im Abwasser transportierten bzw. gelösten Stoffen auch ein erheblicher chemischer Energiegehalt enthalten, der bei entsprechender Gestaltung der wassertechnologisch induzierten Abbau- bzw. Gewinnungsprozesse ebenfalls teilweise (zurück)gewonnen werden kann.

Die Energieerzeugung aus nachwachsenden Rohstoffen gewinnt aufgrund steigender Preise für Erdöl, Erdgas und Kohle derzeit immer mehr an Bedeutung. Mit der Novellierung des EEG 2005 wurde in Deutschland ein sogenannter Bonus für nachwachsende Rohstoffe eingeführt, durch den für Elektrizität, die ausschließlich durch Nutzung nachwachsender Rohstoffe erzeugt wird, eine erhöhte Vergütung festgeschrieben ist: Ein deutliches Signal für eine verstärkte Nutzung biogener Produkte (insbesondere solcher aus der Landwirtschaft) bei der Energieerzeugung. Bereits jetzt steigt die Anzahl von Biogasanlagen im ländlichen Raum kontinuierlich an. Zugleich werden aber die Bezugspreise für Biomasse immer teurer. Technologien, welche einen möglichst hohen Energieertrag aus der Biomasse sicherstellen, sind damit nicht mehr alleine aus Umweltaspekten, sondern zunehmend auch aus ökonomischen Gesichtspunkten relevant.

Die konventionelle Abwasserplanung und -behandlung berücksichtigt bisher in ihren Prozessen die im Kommunalabwasser transportierte Biomasse als potentiell nutzbare Energieressource ebenso wenig wie die im Abwasser enthaltene Wärme. Vielmehr ist sie aufgrund einer aeroben Prozessführung so ausgelegt, dass für die Durchführung der Abwasserbehandlung noch zusätzliche Energie von außen benötigt wird: Denn die biologische Reinigung von Siedlungsabwässern in aeroben Ver-

fahren erfordert künstliche Belüftung. Neben einer guten Reinigungsleistung zeichnet sich das Aerobverfahren damit durch seine Energieintensität aus, die einen hohen Anfall an Klärschlämmen nach sich zieht. Eine systematische energetische Verwertung der behandelten bzw. entstehenden Biomasse ist in der Regel nicht beabsichtigt. Wo es zu einer Teilverwertung kommt, geschieht das zunächst häufig alleine aus Entsorgungsgesichtspunkten heraus (Klärschlammverbrennung nach TASI). Eine rationelle Nutzung der im kommunalen Abwasserstrom enthaltenen Energieressource findet, von wenigen Ausnahmen abgesehen, bisher nicht statt. Letztlich benötigt die konventionelle Abwasserbehandlung einerseits Fremdenergie für die Durchführung ihrer Prozesse; andererseits werden die im Abwasser enthaltenen, im Prinzip sehr gut nutzbaren Energieressourcen Abwärme und Biomasse im Wesentlichen nicht erschlossen.

3 Stand der Technik

Die meisten zu einer Gewinnung von Energie aus dem Siedlungsabwasser geeigneten Technologien sind in der deutschen Siedlungswasserwirtschaft kaum realisiert. Grundsätzlich sind zwei verschiedene Ansatzpunkte für die Energierückgewinnung aus Abwasser denkbar, die sich je nach örtlichen Bedingungen teilweise nur als Alternativen nutzen lassen: Zum einen geht es um Verfahren zur Wiedernutzbarmachung der thermische Energie eines den Prozess verlassenden Massenstromes (Wärmerückgewinnung), zum anderen um die Verwertung der im Abwasser enthaltenen chemischen Energie.

Bei der Wärmerückgewinnung kann die im Abwasser enthaltene Wärmelast mit Wärmetauschern abgeschöpft und mit Hilfe von Kraftwärmemaschinen genutzt werden. Patente auf Wärmepumpen gehen zurück bis auf die ersten Jahre des 20. Jahrhunderts (diverse Patentanträge 1910 sowie von Zoelly 1912). Die erste große Wärmepumpenanlage ging 1938 in Zürich in Betrieb, mit dem Wasser der Limmat als Wärmequelle. Die von Escher Wyss hergestellte Kraftwärmemaschine besorgte die Heizung mehrerer Gebäude der Stadtverwaltung von Zürich („Amtshäuser“). Zürich entschied sich damals – am Vorabend des 2. Weltkrieges – aus Autarkiegründen gegen eine Heizung mit fossilem Öl. Eine mit Wärme aus dem Gewässer gespeiste Wärmepumpenanlage liefert seither – unterstützt von einem Elektrokessel für Spitzenbelastungen – im Winter Wärme und im Sommer Kälte für die Raumheizung und die Lüftungsanlage der Gebäude. Ähnlich kann auch aus Abwasser Wärme gewonnen werden, was insbesondere in der Industrierwasserwirtschaft z.T. bereits weitgehend realisiert wird.

Bezogen auf das kommunale Abwasser ist es grundsätzlich an verschiedenen Stellen möglich, thermische Energie aus dem Abwasser zurückzugewinnen – sowohl im Bereich der Hausinstallationen als auch (zentral oder semi-zentral) im Bereich der Siedlungswasserwirtschaft. Grundzüge eines technischen Regelwerks für die Abwasserwärmerückgewinnung im Bereich der Siedlungswasserwirtschaft sind in der

Schweiz aufbauend auf Untersuchungen der EAWAG in Absprache mit dem VSA entwickelt worden (vgl. Ryser Ingenieure AG 2005: 7). Die Abwasserwärmenutzung ist grundsätzlich erprobt. Alleine in der Schweiz sind mehr als 50 Anlagen, z.T. seit mehreren Jahrzehnten realisiert. In Skandinavien werden mehrere Großanlagen von mehreren MW Leistung betrieben und auch in Deutschland und Österreich werden die ersten Wärmepumpenanlagen dieser Art realisiert. Die Stadt Vancouver beschloss 2006, dass das Olympische Dorf für die Winterspiele 2010 mit Abwasser beheizt und gekühlt werden wird.

Hinsichtlich der Nutzbarmachung der im Siedlungsabwasser enthaltenen chemischen Energie steht die energetische Verwertung der im Abwasser transportierten Biomasse mit chemo-thermischen Verfahren im Vordergrund. Auch hier sind die grundlegenden Verfahren bekannt und teilweise realisiert. Ein spezielles technisches Regelwerk für diese Form der Energierückgewinnung steht noch aus. Alleine ein Spezialfall (die anaerobe Behandlung von Aerob-Schlämmen im „Faulturm“ mit Verwertung des anfallenden Faul- oder Biogases) ist bisher in einem breiteren Umfang durchgesetzt; auch die sich daran anschließende thermische bzw. elektrische Verwertung der Faulgase kann als in den Grundzügen etabliert gewertet werden: Eine thermo-elektrische Nutzung des anfallenden Gases erfolgt dabei vornehmlich in BHKW-Anlagen. Diese Verwertungstechnologie ist heute als Stand der Technik anzusehen.

3.1 Zentrale Wärmerückgewinnung im Kanalnetz bzw. hinter der ARA

Durch das gegebene Temperaturniveau des Abwassers ist eine Direktnutzung nicht effizient realisierbar. Kraftwärmemaschinen (Wärmepumpen) bringen unter Ausnutzung des thermo-dynamischen Kreisprozesses die aus dem Abwasser abgeschöpfte Wärmeenergie von einem niedrigen auf ein höheres, für Heizzwecke nutzbares Energieniveau. Auf diese Weise kann nach dem Abschöpfen von Abwasserwärme ein nutzbares Temperaturniveau von wenigstens 50°C erreicht werden. Geeignete Wärmeverbraucher sind größere Gebäude oder Quartiere im Leistungsbereich von 150 kW bis ca. 2 MW (sowohl für die Bereitstellung von Heizwärme als auch für die Warmwasserbereitung). Für die Bereitstellung von Prozesswärme ist die Abwasserwärmerückgewinnung dagegen nicht geeignet.¹

Im Anwendungsbereich Abwasser wurden die ersten Anlagen zur Wärmerückgewinnung in der Schweiz schon vor über 30 Jahren realisiert; sie werden bis heute erfolgreich betrieben. Die Wärme kann dabei entweder aus der Kanalisation (vor der ARA) abgeschöpft werden oder erst hinter der ARA.

Wird die Wärme hinter der ARA dem Kläranlagenablauf entnommen, so wird weder die Funktion der Kanalisation noch die der ARA beeinträchtigt. Früher wurde in der

¹ Die optimale Ladetemperatur für Prozesswärme beträgt <70°C.

Schweiz vor allem diese Variante realisiert und die Wärme mit einem Nahwärmeverbund zu Einsatzorten in der Umgebung transportiert. Bei größeren Distanzen wird dabei das System der „kalten Fernwärme“ angewendet, d.h. die Temperatur wird auf dem ursprünglichen Niveau belassen, weshalb auch unisolierte kostengünstige Leitungen verwendet werden können. In den (semi-zentralen) Heizzentralen der zu versorgenden Gebäude wird dann die benötigte Wärmemenge der „kalten Fernwärme“ entzogen und mit Wärmepumpen auf ein höheres Temperaturniveau angehoben, um zur Grundlastversorgung beizutragen (Anwendungsbeispiel Muri im Aargau, vgl. Ryser Ingenieure AG 2005: 5). In den meisten Fällen wird eine bivalente Anlage eingesetzt, so dass an den kältesten Tagen ein zusätzlicher Kessel für die Erzeugung der Spitzenlast die Temperaturen weiter anheben kann. Liegen die Abnehmer nahe bei der ARA, so kann die Heizzentrale mit der Wärmepumpe auf der Kläranlage installiert und die Gebäude von dort mit dem System der warmen Fernwärme versorgt werden. Überschüssige Abwärme kann dann auf der ARA weiter genutzt werden und wird insbesondere zur Beheizung von Faulbehältern verwendet. Der Einsatz von Wärmetauschern in den Kläranlagen wird bereits vielerorts praktiziert (Keicher et al. 2004: 21).

Auch die Kanalvariante hat sich bewährt, wie eine Anlage belegt, die in Basel seit mehr als 20 Jahren ohne nennenswerte Störungen betrieben wird. Wärmerückgewinnung aus Abwasser mittels eines in die Kanalisation eingebauten Wärmetauschers ist beispielsweise in der Schweiz an ca. 1.000 Standorten theoretisch möglich und wurde bereits an mehreren Orten erfolgreich realisiert. Derzeit sind Wärmetauscher der schweizerischen Firma Rabtherm GmbH handelsüblich, die bis zu 3 m lang sind. Mehrere Module werden (zwischen 20 und bis zu 200 m Länge) hintereinander geschaltet und entweder bei neuen Kanälen bzw. bei Auswechslungen von Kanälen als vorgefertigte Bauteile komplett mit dem Abwasserrohr (Mindest-Durchmesser DN 800) eingebaut oder in bestehende Kanäle nachträglich installiert. Wo das nicht möglich ist, werden Wärmetauscherplatten aus Chromstahl in den bestehenden Kanal gelegt.

Die Wärmetauscher bestehen aus einer Edelstahlschale und drei darunter liegenden Zwischenmediumsrohren aus Kunststoff. Über diese Rohre wird das wärmeaustauschende Medium (Wasser oder Sole) zwischen Wärmetauscher und der Wärmepumpe transportiert. Leistungszahlen bis JAZ 4 sind bei Kondensationstemperaturen von 60°C erreichbar.

Mitarbeiter der EAWAG haben die Folgen der Wärmeentnahme aus dem Kanal für den Betrieb nachgeschalteter Kläranlagen anhand einer Analyse von Messdaten aus der ARA Werdhölzli in Zürich untersucht und Faustzahlen für die Installation eines Wärmeaustausches in der Kanalisation entwickelt.² Diese Faustzahlen sind konser-

² Voraussetzungen für die Installation eines Wärmetauschers in der Kanalisation sind Abwassertemperaturen von normalerweise über 15°C, Kanalisationsrohre mit einem Durchmesser von 1 m oder mehr und Abwasservolumenströme bei Trockenwetter von mindestens 20 L/s bis 40 L/s. Da die Ni-

vativ ausgelegt. Für Deutschland hat die DBU einen Planungs-Leitfaden aufgelegt (vgl. Ryser Ingenieure AG 2005).

Dem durchschnittlich 15°C warmen Abwasser wird je nach kommunaler Satzung Wärme bis auf eine Temperatur von 5°C entzogen. Voraussetzung für einen zuverlässigen Betrieb ist eine kontinuierliche Abwassermenge. Das setzt voraus, dass das zu versorgende Objekt an einer großen Kanalisationsleitung gebaut wird. Nach Erfahrungen aus der Schweiz arbeitet eine zentrale Wärmepumpe ab einem durchschnittlichen Mindestdurchfluss von 15 l/s wirtschaftlich.

3.2 Semi-zentrale und inhäusige Wärmerückgewinnung

Dezentral, direkt beim „Erzeuger“ eine Anlage zur Rückgewinnung der Wärme zu installieren, kann wegen der vergleichsweise hohen Temperatur des Abwassers zwar vorteilig sein, ist aber wegen der in der Regel stark periodisch anfallenden und relativ geringen Wassermengen problematisch. Insbesondere bei großen Gebäuden – beispielsweise Hotels oder Krankenhäuser mit konstantem Abwasseraufkommen, Wäschereien o.ä. – kann jedoch eine Wärmerückgewinnung direkt im Gebäude sinnvoll sein.

Andernfalls wird das Abwasser in einem außerhalb der Gebäudehülle liegenden Schacht zentral gesammelt, wobei ihm mit einem Wärmetauscher die Energie entzogen wird. Die tageszeitlichen Schwankungen der Abwassermenge können dadurch gepuffert werden, so dass das System semi-zentral (>25 Wohneinheiten oder adäquate Wassermenge) einsetzbar ist. Die Strecken zwischen Gebäudehülle und Schacht sind sehr kurz und die Verluste an die Umgebung minimal. Bei dieser Einsatzmöglichkeit kann – anders als in der Kanalisation – nur die Abwärme des Abwassers genutzt werden; Erdwärme wird hier nur in einem bescheidenem Umfang mit abgeschöpft.

Bei Bau- oder Sanierungsvorhaben mit entsprechendem Abwasservolumen – wie Hotels, Krankenhäuser, Pflege- und Altenheime, Sauna- und Wellness-Einrichtungen, Bäder und Sportanlagen sowie Industrie mit Prozessabwärme (Prozessabwasser und Kühlabwasser) kann diese semi-zentrale Gewinnung von Abwärme aus dem Abwasser vorteilhaft sein und wird mittlerweile häufiger realisiert. Teilweise kann dort durch die Rückgewinnung der Abwasserwärme mittels Wärmetauscher und

trifikation der durch die Abwassertemperatur am stärksten beeinflusste Prozess in einer Kläranlage ist, wurde ein Nomogramm entwickelt, aus dem der Zusammenhang zwischen der Abwassertemperatur in der ARA, der Nitrifikationssicherheit und dem totalen Wirkungsgrad der Stickstoffelimination für die wichtigsten Betriebsparameter im stationären Betrieb herausgelesen werden kann (vgl. Wanner 2004).

Wärmepumpe der Warmwasserbedarf sogar im vollen Umfang gedeckt werden. Die Wartung ist für diese Fälle teilweise automatisiert.³

Für Einfamilienwohnhäuser und kleine Mehrfamilienhäuser sind die bisher skizzierten Anlagen unter den derzeitigen Rahmenbedingungen unwirtschaftlich, weil der technische Aufwand für die Rückgewinnung von der Objektgröße prinzipiell unabhängig ist. Aufgrund der steigenden Preise für Energie und für Wasser ändern sich jedoch die ökonomischen Rahmenbedingungen. Bereits heute werden zu einer in-häusigen wirtschaftlichen Nutzung der Wärmelast des Abwassers erste Fertiganlagen angeboten, beispielsweise die Wärmerückgewinnungsanlage ThermoCycle®WRG des österreichischen Anbieters Forstner. Diese bezieht sich alleine auf den Grauwasserteilstrom Dusch- bzw. Badeabwasser, der üblicherweise mit einer Temperatur von etwa 35°C in den Abfluss geht. Pro Kubikmeter Duschabwasser sollen 16 kWh Wärmeenergie zurückgewonnen werden (4/5 der nutzbaren Wärmelast dieses Teilstroms). Diese Gratiswärme wird zur Vorwärmung des Boilerwassers genutzt und erlaubt dort eine Ersparnis von bis zu 50% der Heizenergie bzw. erlaubt den energieneutralen Betrieb der Grauwasseranlage (Rothenberger 2003: 77). Nach einer mechanischen Vorreinigung und dem Wärmetausch wird das Grauwasser in der Anlage biologisch zu Klarwasser aufbereitet und desinfiziert.

Das Dolder-Heizsystem aus der Schweiz ermöglicht hingegen die Rückgewinnung der Gesamt-Abwasserwärme und die Zuführung der Energie an die Warmwasserbereitung bzw. an das Heizsystem. Kombinationen mit dem Be- und Entlüftungssystem über Startabsorber sind dabei möglich.

3.3 Biogasverwertung nach anaerober Abwasserbehandlung

Anaerobe Bakterien sind wirkungsvolle Destruenten; in Abwesenheit von Sauerstoff bauen sie organische Substanzen nahezu vollständig zu Mineralstoffen, Wasser und Biogas (Methan und Kohlendioxid) ab. Diese anaeroben Faulungs- bzw. Abbauprozesse verlaufen bei konstant höheren Temperaturen besonders effektiv. Diese Bedingung ist am ehesten in tropischen und subtropischen Ländern anzutreffen.

Die anaerobe biologische Behandlung von Siedlungsabwasser hat im Vergleich zu aeroben Verfahren den Vorteil einer günstigen Energiebilanz bei deutlich niedrigerem Anfall von Klärschlamm. Beim Einsatz der Anaerobtechnologie im Kommunalabwasserbereich ist nicht nur der Prozessenergiebedarf wesentlich geringer; darüber hinaus kann das anfallende wasserdampfgesättigte Faul- bzw. Klärgas, das zu etwa 65–75% aus dem energetisch hochwertigen Methan besteht und eine Form von Biogas darstellt, anschließend verwertet werden. Weitere Bestandteile dieses Biogases

³ Um Verschmutzungen zu beseitigen, wird der im Schacht integrierte Filter einmal am Tag automatisch zurückgespült. Alle 3 bis 4 Jahre fällt eine weitergehende Säuberung der Wärmetauscher durch einen Kanalreiniger an, welcher den Schacht von außen durch die Serviceöffnungen reinigt.

sind neben Methan und Kohlendioxid in Spuren vorliegende Gase, insbesondere Sauerstoff, Stickstoff und Schwefeldioxid; je nach Zusammensetzung des Abwassers und der Prozessführung auf der ARA können daneben aber auch Kohlenwasserstoffe, Siliziumverbindungen sowie Chlor- und Fluorverbindungen anfallen.

Aufgrund der in der Biomasse gespeicherten chemischen Energie ergibt sich rein rechnerisch eine Gasproduktionsrate von 0,35 m³ Methan/kg CSB. Da jedoch die organische Substanz nicht vollständig abgebaut und ein Teil des Gases aufgrund von Verlusten nicht genutzt werden kann, ergeben sich in der Praxis selbst bei bewusster Steuerung des Prozesses in Richtung hoher Gasproduktion niedrigere Erträge.

Das erzeugte Biogas kann zur Deckung des internen Energiebedarfs, aber aufgrund der anfallenden Menge auch zur Versorgung externer Verbraucher genutzt werden. In diesem Fall wird es zum Antrieb von Kraftmaschinen oder zur Wärmeerzeugung in Feuerungsanlagen eingesetzt. Nach spezifischer Aufbereitung wird es auch als hochwertiges Brenngas mit Erdgasqualität genutzt (prinzipiell kann es auch stofflich, z.B. für chemietechnische Synthesen, verwertet werden).

Die Anaerobtechnologie ist im Abwasserbereich grundsätzlich etabliert. Ihre ökologische und ökonomische Vorteilhaftigkeit ist zumindest für Einzelfälle nachgewiesen. In der industriellen Abwasserreinigung (insb. in der Lebensmittelindustrie) ist die Anaerobtechnologie auf breiter Basis im Einsatz. Im Bereich der kommunalen Abwasserreinigung steht der Einsatz der Anaerobtechnologie noch am Anfang (mit Ausnahme der Schlammfaulung, s.u.). Überwiegend Festbett- und Schlammbett-Reaktoren, die auch im Siedlungsabwasserbereich einsetzbar sind, werden von etablierten Produzenten (z.B. Linde AG) angeboten. Der UASB-Reaktor ist der am meisten eingesetzte Reaktortyp.

Anaerobe Kleinkläranlagen sind vor allem in China und in Kolumbien weit verbreitet. In China waren Ende des Jahrtausends bereits 36.000 modifizierte „Faultanks“ installiert, die jeweils für den Anschluss mehrerer Haushalte geeignet sind und über eine Gasfassung sowie zunehmend auch über eine Gasnutzung verfügen. In Kolumbien sind mehr als tausend kleine kombinierte und modular aufgebaute Abwasserreinigungssysteme, die einen Anaerobfilter enthalten, im Einsatz. Dort wird das entstehende Biogas bisher nicht genutzt.

Planung und Errichtung direkter anaerober Abwasserreinigungsanlagen zeigen bei Abwassertemperaturen oberhalb 18°C auch für Großanlagen (mehrere 100.000 EG) steigende Tendenz. UASB-Anlagen mit Durchsätzen von 30.000–70.000 m³/d wurden vor allem in Brasilien und Indien errichtet. Die größten Anlagen haben Durchsätze um 100.000 m³/d und behandeln Abwasser von über 400.000 EG (z.B. Veracruz/Mexiko; Atuba Sul/Brasilien; Puerto la Cruz/Venezuela). Waren die Systeme der 80er Jahre oft noch mit Mängeln behaftet, weisen Anlagen jüngerer Datums eine befriedigende Qualität bezüglich Effizienz und Konstruktion auf. Verbesserun-

gen bei der Anlagenkonzeption und den verwendeten Baumaterialien haben dazu beigetragen, dass mit einer längeren Lebensdauer und weniger Emissionen zu rechnen ist. Die Anaerob-„Technologie hat einen Reifegrad erreicht, der eine breitere Anwendung möglich und sinnvoll erscheinen lässt“ (TBW 1998: 99).

Sofern für das Biogas keine andere Nutzungsmöglichkeit besteht, wird in der Regel eine Verstromung mit dem Ziel der Einspeisung in das Energieverteilungsnetz stattfinden. Bei Verstromung in einem BHKW wird zudem die Abwärme genutzt.⁴

Hohe Niederschläge verursachen bei Mischsystem und anaerober Siedlungsabwasserbehandlung Probleme. Solange häusliche Abwässer und Niederschlagswasser in einem Kanalsystem erfasst werden, steigt die zu behandelnde Abwassermenge und variiert saisonal. Eine zu starke Verdünnung kann den wirtschaftlichen Betrieb der Anaerobanlagen in Frage stellen. Konzentriertere Abwässer aus trockenen Gebieten (z.B. Nordbrasilien oder Marokko), aber auch aus nicht-planifizierten Urbanisierungen (Slumgebiete usw.) können erlauben, dass sowohl Kanalnetz als auch Behandlungsanlage kleiner dimensioniert werden und daher geringere Kosten anfallen. Die gleiche Planungsmaxime gilt bei Einsatz von Vakuumtoiletten.⁵ In diesen Fällen kann das konzentriertere Toilettenabwasser anaerob zu Biogas umgesetzt werden; zusätzlich kann zur Erhöhung des Wirkungsgrades organischer Hausmüll in zerschredderter Form mitgegeben werden.⁶ In der Modellsiedlung Lübeck-Flintenbreite wird das bei der anaeroben Behandlung anfallende Biogas im BHKW direkt zur Strom- und Wärmeversorgung genutzt. Die bei der KWK anfallende Wärme wird dort für die Hygienisierung und für die Temperierung der Biogasanlage genutzt.

3.4 Biogasverwertung bei Faulturmtechnologie und Abwasserverregnung

Tendenziell etabliert ist die anaerobe Behandlung der bei im Aerobverfahren auf der ARA anfallenden Faulschlämme. Der durch den aeroben Abbau der Abwasserinhaltsstoffe entstehende Biomassezuwachs wird dabei in Faultürmen und anderen Faulbehältern⁷ unter anoxischen Bedingungen durch anaerobe Bakterienstämme zu Faulschlamm und Biogas abgebaut. Bei dieser Verfahrenskombination auf der ARA (aerobe Abwasserbehandlung mit anschließender anaerober Schlammfaulung) ist der Ertrag an Methangas geringer als bei Verfahren mit anaerober Hauptbehandlung des Rohabwassers.

⁴ Gas-BHKWs werden in einem elektrischen Leistungsbereich von 0,05 bis 1,5 MW angeboten. Der Wirkungsgrad liegt von der Modulgröße abhängig zwischen 29% (kleine Anlagen) und 40% (große Anlagen). Auch hier sind deutliche Kostendegressionen mit steigender Modulgröße zu beobachten.

⁵ Vakuumtoiletten werden heutzutage hauptsächlich in Schiffen, Zügen und Flugzeugen verwendet, wo das Spülvolumen sogar auf 0,2 Liter reduziert werden kann.

⁶ Vgl. auch das Merkblatt ATV-DVWK-M 372 (Technische Rahmenbedingungen für die Vergärung biogener Abfälle).

⁷ Im weiteren Text wird vereinfachend von Faulturm gesprochen.

In kommunalen Klärwerken wird zumeist sowohl der Primär- als auch der Sekundärschlamm anaerob behandelt. Eine intensivierte Vorklämung mit dem Ziel einer erhöhten Entnahme organischer Substanzen vor der biologischen Stufe (die dann auch nicht mehr durch die Zuführung von Sauerstoff in Biomasse überführt werden braucht) erleichtert eine hohe Ausbeute von Biogas. Während für Überschussschlämme aus schwach belasteten Abwasserreinigungsanlagen anaerobe Abbauraten zwischen 30 und 40% bekannt sind, lassen sich die organischen Feststoffe aus Primärschlämmen zu 55–60% abbauen. Die in der Praxis in der Regel zu behandelnden Mischschlämme liegen im Wirkungsgrad dazwischen.

An die Stelle der zunächst üblichen Abfackelung des Faulgases tritt regelmäßig die energetische Verwertung, die jedoch von verschiedenen Faktoren abhängig ist, insbesondere sind dies:

- Energieinhalt,
- Verunreinigungen als Quelle möglicher problematischer Emissionen,
- Wasserdampfgehalt,
- korrosive Eigenschaften,
- Schwefelgehalt,
- Schwankungen in der Gaszusammensetzung.

Potentiell kann der Strombedarf zur Abwasserbelüftung mit ausgereiften Verstromungs- bzw. BHKW-Anlagen durch die eigene Elektrizitätserzeugung gedeckt werden. Erste technische Regeln hierzu sind vorhanden.⁸ Allerdings kann die elektrothermische Nutzung von Faulgasen aus der Turmbiologie bisher nicht zu einer nach außen exportierbaren Energiegewinnung verwendet werden. Die installierten Anlagen können derzeit im besten Fall energie-neutral gefahren werden – meistens werden zwischen 30% und 70% der auf der ARA benötigten elektrischen Energie produziert, während der Wärmebedarf des Faulturm-Prozesses voll abgedeckt wird.

Im Klärwerk Köln-Rodenkirchen hat Technische Beratung Energie GmbH, Duisburg, im Auftrag von Rheinenergie bzw. Stadtentwässerungsamt Köln die erste PAFC-Brennstoffzellen-Anlage in Europa in Betrieb genommen, die aus dem in der Turmbiologie anfallenden Biogas Strom und Wärme in einer KWK erzeugt. PAFC-Zellen wurden von UTC (vormals ONSI), welche die PAFC zur Marktfähigkeit entwickelt hat, in Serie gefertigt. Weltweit wurden etwa 200 Anlagen mit einer kumulierten Leistung von 40 MWel installiert. Wie alle Brennstoffzellen produziert sie Strom durch Oxidation eines Brenngases. Als Oxidationsmittel kann Luft oder reiner Sauerstoff eingesetzt werden. Es müssen keine Reingase verwendet werden. Gemische mit Kohlendioxid stellen bei der PAFC im Gegensatz zu den meisten anderen Brennstoffzellentypen kein Problem dar. Allerdings führt der durch das Kohlendioxid ge-

⁸ Insbesondere die Merkblätter ATV-DVWK-M 264 (Messung des Durchflusses von Biogas aus der anaeroben Stabilisierung von Klärschlamm), ATV-DVWK-M 363 (Herkunft, Aufbereitung und Verwertung von Biogasen).

gebene hohe Inertgasanteil zu einem niedrigeren Heizwert und damit zu einem Absenken von Anlagenleistung und Wirkungsgrad. Der PAFC-Typ arbeitet bei vergleichsweise niedrigen Temperaturen und ist mit einem Platin-Katalysator ausgestattet.

Im Unterschied zu Erdgas verändert sich aufgrund der unterschiedlichen Zusammensetzung des Abwassers die chemische Zusammensetzung von Klärgas ständig; insbesondere schwankt der Methan-Anteil. Da die in dem Gas enthaltenen Schwefel- und Halogenverbindungen selbst in geringen Konzentrationen die katalytischen und chemischen Prozesse in der Brennstoffzelle stören, ist eine Klärgas-Reinigungsstufe vorgeschaltet. Dort wird das Gasgemisch in zwei Stufen vor- bzw. tiefgekühlt und getrennt; in einer nachgeschalteten Adsorptionsstufe mit Aktivkohle- und Partikelfilter wird das Biogas weiter konditioniert. Mit 40.000 Betriebsstunden gehört die PAFC-Zelle in Köln-Rodenkirchen zu den weltweit erfolgreichsten Pilotprojekten zur Erprobung von Brennstoffzellen. Der Probetrieb wird noch bis 2010 andauern (vgl. Stahl 2006).

Allerdings hat der Hersteller des PAFC-Brennstoffzellen-Typs 2002 die Herstellung bzw. weitere Entwicklung eingestellt: Hauptgrund war dabei „die mangelnde Aussicht auf weitere Steigerung der wirtschaftlichen Leistungsfähigkeit des Konzepts. Bei Investitionskosten von 4.000 €/kW_{el} und einem elektrischen Wirkungsgrad von 40% ist die PAFC technisch und – trotz bestehender Serienfertigung – in diesem Leistungsbereich auch ökonomisch weder zu den aktuell dominierenden motorischen BHKW noch gegenüber den künftigen Hochtemperaturbrennstoffzellensystemen konkurrenzfähig. Notwendig wäre zudem ein technologischer Sprung, der mit einer deutlichen Erhöhung des elektrischen Wirkungsgrades in Richtung 45% einhergehen würde, um gegenüber den deutlich preiswerteren Motor-BHKW einen Vorteil auf der Betriebskostenseite zu erreichen. Selbst in diesem Fall müssten die Investitionskosten durch apparative Vereinfachung des Systems, für die es derzeit keine konkreten Ansatzpunkte gibt, weiter deutlich sinken“ (Blesl et al. 2006: 29).

Im Klärwerk Kohlfurth des Wupperverbandes (seit 2003), in Ahlen (seit 2005) und in Moosburg (ab Herbst 2007) werden MCFC-Brennstoffzellen vom Typ „Hot Module®“ des Ottobrunner Herstellers CFC Solutions eingesetzt, um die Faulgase aus der Turmbiologie aufzuarbeiten. Auch Brennstoffzellen dieses Typs können generell mit definierten Gasgemischen arbeiten. Bei Einsatz von Biogas wird hier die durch das Kohlendioxid verursachte Inertgasproblematik mit einer Absenkung von Anlagenleistung und Wirkungsgrad teilmäßig kompensiert. Denn bei der Direkt-Brennstoff-Zelle (MFCF) dienen Karbonat-Ionen als Übertragungsmedium für den Luftsauerstoff von der Kathoden- zur Anodenseite. Diese Brennstoffzelle benötigt daher zur Bildung der Karbonat-Ionen Kohlendioxid auf der Kathodenseite. Der hohe Kohlendioxid-Anteil im Brennstoff verbessert folglich die Kinetik in der Zelle und gleicht einen Teil der Leistungs- und Wirkungsgradverringerung aus. Grundsätzlich ist die MCFC-Technologie für die Verstromung von Biogas geeignet, da das Kohlendioxid

auf der Kathodenseite die Bildung der Karbonat-Ionen unterstützt. Die hohe Temperatur der Nutzwärme in der Brennstoffzelle erlaubt die industrielle KWK, insbesondere die Erzeugung von Prozessdampf und Strom (was konventionell den Einsatz von Gasturbinen erforderte). Die DWA hat bereits ein Merkblatt zum „Einsatz von Brennstoffzellen auf Kläranlagen“ (M 299) erarbeitet.⁹

In Braunschweig wird ab Herbst 2007 aus Biomasse, die auf den Rieselfeldern der dortigen ARA erzeugt wird und in die die Nährstoffe aus der Abwasserverregnung eingehen, Biogas gewonnen, das dann getrocknet und über eine Pipeline in ein 20 km entferntes BHKW zur Verstromung und Wärmezeugung transportiert wird. Aufgrund des in dieser Verwertungskaskade vergleichsweise bescheidenen Wirkungsgrades wird dieses Verfahren nicht vertieft betrachtet (vgl. Lühring/Walter 2007).

3.5 Biogaseinspeisung in das Erdgasnetz

Biogas wird derzeit hauptsächlich über KWK-Anlagen einer Nutzung zugeführt. Die energetische Effizienz der Biogasnutzung in KWK-Anlagen wird durch die eingeschränkte Nutzbarkeit der KWK-Wärme beeinträchtigt, da bei vielen Biogasanlagen kein geeigneter Wärmeverbraucher vorhanden ist. Größere ARAs mit Faultürmen bzw. mit einem umfassenderen Anaerobverfahren haben jedoch einen erheblichen Anfall an Biogas, so dass so nur eine teilweise Nutzung möglich ist bzw. sonst ohne weitere Nutzung des Gases ein erheblicher Anteil abgefackelt werden muss. Für anaerobe Großkläranlagen bietet daher die Aufbereitung des Biogases zur Einspeisung ins Erdgasnetz eine Alternative, welche eine räumliche Entkopplung von Biogasproduktion und energetischer Nutzung gestattet. Entsprechende ARAs gehen daher teilweise dazu über, das produzierte Gas als Methan über das Erdgasnetz weiterzuvertreiben. Allerdings ist das Interesse an der Einspeisung von Biogas in das Erdgasnetz nicht alleine durch die eingeschränkte Nutzbarkeit der KWK-Wärme bedingt, sondern vor allem aufgrund der Liberalisierung des Gasmarktes stark gestiegen.

Als erste Kläranlage der Schweiz speist seit Januar 2005 die ARA Region Luzern ihr nach Erdgasparametern gereinigtes Klärgas ins Erdgasnetz. Das auf einer von Rütgers Carbo-Tech hergestellten Anlage konditionierte Methan aus dieser ARA wird zur Betankung von Erdgasfahrzeugen verwendet (Hunziker et al. 2005). In der Schweiz sind weitere große Biogasaufbereitungsanlagen für die ARA Region Bern und die ARA Birsfelden¹⁰ (Basel) geplant. Während in Schweden und in der Schweiz die Technologie der Einspeisung schon durchgeführt wird, wird sie in Deutschland derzeit nur im Pilotmaßstab erprobt.

⁹ Da ein hoher Wirkungsgrad und das hohe Temperaturniveau bereits bei kleinen MCFC-Leistungseinheiten realisiert werden können (ab ca. 200 kW), sind auch kleinere, z.T. sogar dezentrale Einheiten umsetzbar.

¹⁰ Allerdings hat sich in Birsfelden der deutsche Sterling SIHI-Konzern als kontraktierter Anlagenhersteller für die Biogas-Aufbereitung im Juli 2007 kurzfristig zurückgezogen. Vgl. Onlinereports 2007.

Die Qualität und Beschaffenheit des einzuspeisenden Methans hat der Deutsche Verein des Gas- und Wasserfaches e.V. (DVGW) im Arbeitsblatt G 260 geregelt. Um aus dem Faulgas das Methan nach den entsprechenden Parametern aufzubereiten, sind Verfahrensschritte und -techniken notwendig, die im Prinzip schon seit langem bekannt sind.

In den konventionellen Biogas-Aufbereitungsanlagen, die von großen Anlagenherstellern schlüsselfertig errichtet und zumeist von der ARA betrieben werden, umfasst die Reinigung und Konditionierung des Klärgases mehrere Verfahrensschritte. Üblicherweise wird zur Entschwefelung eine Gaswäsche eingesetzt und anschließend zur Abtrennung des begleitenden Kohlendioxids eine Druckwechsel-Adsorptionsanlage mit Membranreinigung und Verflüssigung des Begleitgases. Neben dem Druckwechsel-Adsorptionsverfahren hat sich auch die Druckwasserwäsche zur Gasaufbereitung praktisch bewährt.

3.6 Klärschlammverbrennung

Im Aerobverfahren gewonnener Klärschlamm kann auch hinsichtlich der thermisch verwertbaren Energie als Ressource betrachtet werden. Prinzipiell ist es einerseits möglich, den Schlamm als Beischlagstoff bei der Verbrennung zuzusetzen; außerdem kann er in speziellen Verbrennungsanlagen energetisch verwertet werden.

In Deutschland bestehen umfangreiche Erfahrungen zur Mitverbrennung von Klärschlamm. Generell gelten dabei die folgenden Anforderungen: Bei der Mitverbrennung von Klärschlamm sollen Lagervolumen und Lagerzeit durch eine ausgereifte Logistik möglichst gering gehalten werden. Dabei ist die Überwachung der Methankonzentration in der Abluft der Vorratsbehälter und gegebenenfalls deren Inertisierung oder ein regelmäßiger Luftaustausch zur Verhinderung einer Methangasexplosion Stand der Technik. Die Mitverbrennung von Klärschlamm in Kohlekraftwerken wird auf eine möglichst effiziente Energiegewinnung hin ausgerichtet. Zur Verbesserung des Wirkungsgrades wird zuvor zumeist eine Trocknung oder wenigstens eine Entwässerung ($TS > 25\%$) des Schlammes vorgenommen. Aufgrund der im Schlamm mitgeführten und in die Verbrennungsanlage eingetragenen Schadstoffe sind zusätzlich zu den durch Grenzwerte geregelten Schadstoffen auch die Konzentrationen von polychlorierten Biphenylen, polychlorierten Benzolen, polychlorierten Phenolen und die Summe der polyzyklischen Aromaten bzw. die jeweiligen Einzelsubstanzen im Rauchgas zu überwachen.

Vor 1998 war die Mitverbrennung von Klärschlamm in Kohlefeuerungsanlagen ohne Relevanz. Im Jahr 2005 bestanden in 26 Kraftwerken Verbrennungskapazitäten in Höhe von knapp 700.000 t TS/a.

Kohlegefeuerte Großkraftwerke ($> 100 \text{ MW}_{el}$) arbeiten heute überwiegend mit einer Staubfeuerung oder mit einer ZWS mit nachgeschaltetem Dampfkraft-Prozess. Der

Dampfkraft-Prozess zeichnet sich durch hohe Frischdampf-Drücke ($> 18 \text{ MPa}$) und -Temperaturen ($> 530^\circ\text{C}$) aus. Kondensationsturbinen oder Entnahme-Kondensationsturbinen mit niedrigem Abdampfdruck kommen ebenso zum Einsatz wie mehrere Anzapfvorwärmstufen. Zur Vergrößerung des elektrischen Wirkungsgrades erfolgt eine ein- oder zweifache Zwischenüberhitzung des Dampfes. Aus der Anlagengröße resultieren geringe spezifische Verluste und hohe Teilwirkungsgrade der Kessel und Turbinen und somit hohe Gesamtwirkungsgrade. Die Vorteile der Mitverbrennung von Klärschlamm in kohlegefeuerten Großkraftwerken liegen in der Ausnutzung der sehr hohen elektrischen Wirkungsgrade von 40–42%.

ZWS-Kraftwerke können aufgrund eines sehr breiten Brennstoffbandes Klärschlämme ohne größere Umbauten verarbeiten. Die geringe Zahl von ZWS-Kraftwerken steht dieser Verwertungsform im Weg. Meist kommen in großen Kohlekraftwerken Staubfeuerungen zum Einsatz. Niedrige Zusatz-Investitionskosten begünstigen bei Staubfeuerungsanlagen die Mitverbrennung von Schlämmen. Allerdings ist der Aufwand zur Brennstoffaufbereitung (Trocknung) der Mitverbrennung von Klärschlamm als Restriktion zu betrachten. Die in Steinkohlekraftwerken zur Verfügung stehende Restwärme kann nur bedingt zur Trocknung verwendet werden und gestattet dann nur einen Klärschlammanteil von 2–3% (auf TS bezogen).

Seit 1980 wird in Deutschland Klärschlamm in Müllverbrennungsanlagen mitverbrannt. Diese Anlagen haben die gleichen Standards für die Rauchgasreinigung wie Monoverbrennungsanlagen für Klärschlamm zu erfüllen. Derzeit verbrennen acht Anlagen 47.000 t TS/a, die entweder (bei entwässerten Schlämmen) über einen Wurfbeschicker zugeführt werden oder (bei vollgetrockneten Schlämmen) über die direkte Zugabe zum anderen Brenngut bzw. durch Einblasen in den Feuerraum.

Da Klärschlammrückstände (z.B. Asche und Schwermetalle) weder die Porenstruktur noch die Scherbenqualität von Ziegelsteinen negativ beeinflussen, wurde auch versucht, die Schlämme in Ziegeleien als Brennstoff mitzuverwenden. Allerdings kommt es bei derartigen Anwendungen wegen der frühzeitigen Abspaltung von leichtflüchtigen brennbaren Bestandteilen zu Geruchsproblemen, wenn keine ausreichende Rauchgasreinigung vorhanden bzw. der Klärschlamm nicht zuvor getrocknet, granuliert und entgast wird. Insbesondere Zementfabriken mit Klinkerherstellung verbrennen relevante Klärschlamm-mengen (85.000 t TS/a, mit zunehmender Tendenz).

Im Weiteren besteht die Möglichkeit der Vergasung, die fast ausschließlich im Sekundärrohstoff-Verwertungszentrum Schwarze Pumpe betrieben wird. Hierbei wird (in Brikettform gepresstes) Trockengranulat aus Klärschlamm im Festbettvergaser pyrolysiert. Das entstehende Synthesegas wird anschließend gereinigt und zur Stromerzeugung verwendet oder aber (sinnvoller) für chemisch-technische Synthesen, beispielsweise zur Herstellung von Methanol, eingesetzt.

Das EEG fördert durch entsprechende Tarifierungen die Monoverbrennung stark. Monoverbrennungsanlagen haben den Vorteil, dass sie – besonders auch im Bereich der Rauchgasreinigung – auf die Schadstoffe im Klärschlamm ausgelegt werden können.¹¹ Je nach Brennstoff und Leistungsbedarf werden konventionell Rost-, SWS- und ZWS-Feuerungen mit nachgeschaltetem Dampfkraft-Prozess eingesetzt.

Monoverbrennungen sind (z.T. wesentlich) kleiner dimensioniert. Im unteren Leistungsbereich werden bevorzugt Rostfeuerungen eingesetzt. Wirtschaftlich können ZWS-Feuerungen erst ab 20–25 MW_{th} betrieben werden. Aufgrund der Wärmeauskopplung wird mit Gegendruck-Turbinen oder Entnahme-Kondensationsturbinen gearbeitet. Auf Anzapfungen wird aus wirtschaftlichen Gründen oft verzichtet. Bei einigen Anlagen kommt eine Vorwärmstufe zum Einsatz. Bei Tecon wird zunächst der Klärschlamm in einer stationären Wirbelschicht erst bei 650°C vergast, bevor die organischen Bestandteile anschließend bei 850°C verbrannt werden. Nach dem Konzept von Andritz wird der Klärschlamm bei > 850°C in einem Zyklonofen verbrannt. Pyromex verwendet zur Entgasung des Klärschlammes bei 1.200–1.700°C einen Hochtemperaturreaktor und UC Prozesstechnik ein Drehrohr zur Pyrolyse bei 700°C.

2005 wurden in Deutschland 17 kommunale Monoklärschlammverbrennungsanlagen mit einem Durchsatz von knapp 380.000 TS/a betrieben; hinzu kommen sieben Anlagen der Chemie- bzw. Pharmaindustrie. Ihre Anlagenkomponenten weisen im Vergleich zum Großkraftwerksbau durch die kleinere Bauweise höhere spezifische Verluste auf; daher erreichen der Kessel und die Turbine nur durchschnittliche Wirkungsgrade. Als Vorteile semi-zentraler Anlagen wird aber die hohe Brennstoffausnutzung durch KWK gewertet. Die Nachteile dieser Anlagen liegen in den hohen spezifischen Investitionskosten, die von der Effizienz des Prozesses stark abhängig sind. Auch aufgrund des in Deutschland erreichten hohen Standes der Rauchgasreinigung werden künftig kleinere Anlagen zur Monoverbrennung kommunaler Klärschlämme nicht mehr errichtet.

3.7 Schlamm Trocknung und andere Verfahren zur Gewinnung von Brennstoffen

Vor einer thermischen Verwertung muss bei den meisten Verfahren der Klärschlamm entwässert bzw. getrocknet werden. Dabei sind die Kontakttrocknung (z.B. Scheibentrockner, Dünnschichttrockner), Konvektionstrocknung (z.B. Bandtrockner, Trommeltrockner) und Strahlungstrocknung (z.B. solare Trocknung) die gängigsten Verfahrensprinzipien; sie können als Stand der Technik beschrieben werden. Daneben gewinnt die gleichfalls erprobte integrierte Trocknung im Ofen bei der Mitverbrennung im Kohlekraftwerk zunehmend an Bedeutung.

¹¹ Die Kombination der Mono-Verbrennung von Klärschlamm mit einer Phosphatrückgewinnung ist nach der erweiterten Ökobilanz des IFEU (Fehrenbach 2006) der direkten landwirtschaftlichen Verwertung ökologisch überlegen.

Hinsichtlich der Trocknungsanlage besteht eine große Auswahlmöglichkeit unter unterschiedlichen Typen. Dabei werden auch verschiedene Energieträger zur Trocknung eingesetzt: Zahlreiche Referenzanlagen in Deutschland (z.B. Bredstedt) verwenden beispielsweise Solarenergie. Die für den Export bestimmte Anlage KULT der Hanshuber AG basiert ebenso wie die von Tecon Engineering auf einer Kombination (solare Strahlung und Abwärme). Andritz setzt ausschließlich Abwärme ein, Pyromex Pyrolysegas und Abwärme und UC Prozesstechnik Pyrolysegas und Erdgas (vgl. Institut für Kreislaufwirtschaft 2005).

4 Innovationspotentiale 2050

Im Folgenden werden ausgewählte Entwicklungsaufgaben diskutiert, die einerseits derzeit vordringlich erscheinen und deren Lösung andererseits besonders innovative Leistungen erfordern. Das zweite Auswahlkriterium wurde herangezogen, weil sich Exportchancen für die deutsche und vermutlich ebenso für einen Teil der europäischen Wasserindustrie im Technologiebereich vorrangig im Bereich der Hoch- und Spitzentechnologie eröffnen. Aufgrund der globalen Arbeitsteilung können eher robuste Technologien mit bereits hoher Anwendungsreife aus den BRICS-Ländern heraus vermutlich wettbewerbsfähiger vertrieben werden. Im Folgenden wird daher beispielsweise darauf verzichtet, für die relativ weit entwickelte Klärschlammverbrennung noch weitere Innovationspotentiale darzustellen. Aus dem gleichen Grund werden die Innovationspotentiale für die Biogasverwertung aus robusten Kleinkläranlagen in Anaerobtechnologie nicht weiter angesprochen.

4.1 Gewinnung verbesserter Brennstoffe durch Schlamm Trocknung

Bezogen auf die Trocknung von Klärschlamm werden bisher drei Gegenstandsbereiche benannt, die einer Verbesserung bedürfen: Zunächst ist die Energieeffizienz der bisherigen Verfahren stark optimierungsbedürftig. Weiter lassen die teilweise bisher noch üblichen Öfen zur Trocknung von Klärschlamm Dämpfe mit organischen Bestandteilen entstehen, die zu erheblichen Geruchsbelästigungen, aber auch zu toxischen Gefährdungen führen und sogar ein Explosionsrisiko umfassen können. Drittens können bei einem Feststoffanteil zwischen 40 und 50% die Substanzen beim Trocknungsprozess in eine plastische Phase übergehen, die aufgrund der resultierenden Schmierigkeit die Behandlung in den Trocknern schwieriger macht und verfahrenstechnische Innovationen erfordert.

Alternativ wäre es ferner über eine Gefriertrocknung möglich, Brennstoffe aus dem Klärschlamm zu gewinnen. Durch Mitnutzung von Speiseölabfällen ist es so möglich, feste Brennstoffe mit hohem Energiegehalt zu gewinnen (vgl. Peregrina et al. 2006). Derartige Verfahren sind bisher technisch noch nicht erprobt worden.

4.2 Fortentwicklung der Wärmetauscher

Bei der Nutzung von Wärmetauschern im Kanalnetz ist eine Reihe von praktischen Problemen zu berücksichtigen. Insbesondere ist dem Problem der Verschmutzung der in die Kanalisation eingebauten Wärmetauscher Aufmerksamkeit zu widmen. Konventionelle Wärmetauscher (Platten/Rohrbündel) verstopfen nicht nur durch Feststoffe (Fäkalien), sondern auch durch Fette, welche sich an den abgekühlten Tauscherwänden ablagern. Zudem müssen die Systeme auch unempfindlich sein gegenüber Gegenständen, welche eigentlich nicht ins Abwasser gehören wie Küchenabfälle, Windeln und dergleichen. Die derzeit üblichen Wärmetauscher kommen mit diesen Belastungen gut zurecht.

Dagegen ist das Problem des „Foulings“ nicht gelöst: Fließt Abwasser über den Wärmetauscher, so bildet sich dort schon nach einigen Tagen ein Biofilm aus, der mehrere 100 Mikrometer dick sein kann. Der Biofilm wirkt dabei als wärmeisolierende Schicht und reduziert so die Leistung der Energierückgewinnung. Nach 18 Tagen verringert sich die Leistung im Extremfall auf 50% der ursprünglichen Leistung. Bisher ist ein ökosystemares Verständnis des Foulings nur in ersten Ansätzen vorhanden. Es ist nicht genau geklärt, wie die Fouling- bzw. Biofilmbildung von der Zusammensetzung des Abwassers abhängt. Seitens der Forschung sollten daher Abwassereigenschaften identifiziert werden, die der daraus resultierenden Verschmutzung des Wärmetauschers entgegenwirken bzw. diese fördern.

Da sich durch ein Fouling der Wirkungsgrad des Wärmeaustauschers erheblich verringert, sind Maßnahmen zur Reduktion der Verschmutzung zu entwickeln. Zwei Strategien kommen dabei konventionell zur Anwendung. Im ersten Fall wird der Wärmetauscher in Abhängigkeit der Abwasserqualität periodisch gereinigt. So lässt sich die Einbuße bei der Energiegewinnung in Grenzen halten; es entsteht jedoch ein vergleichsweise hoher Wartungsaufwand, der sich zunächst finanziell in höheren Betriebskosten niederschlägt, aber aufgrund der Standzeiten der Anlage auch zu einer Verringerung der Wärmerückgewinnung führen kann. Im zweiten Fall wird auf eine Reinigung in kurzen Zeitintervallen verzichtet und versucht, die Einbuße der Energiegewinnung durch eine Vergrößerung der Wärmetauscherfläche zu kompensieren (was zugleich höhere Investitionskosten voraussetzt). Welche der beiden Lösungen gewählt wird, kann anhand von Kostenüberlegungen unter Berücksichtigung der Abwasserqualität ermittelt werden.

Anstelle der Reinigung der Wärmetauscher mit Chemikalien oder von Hand ist nach dem bisherigen Wissensstand (Wanner 2004, 2005) bei Wärmetauschern in der Kanalisation die gezielte Variation der Fließgeschwindigkeit des Abwassers möglich; sie hat sich als effektive Maßnahme zur Regeneration der Leistung verschmutzter Wärmetauscher erwiesen. Durch eine Erhöhung der Abwasser-Strömungsgeschwindigkeit auf 1 m/s in Schwallspülungen oder dauerhaft lassen sich zwischen 70 und 80% der Leistungen dauerhaft erzielen. Zwar gibt es Kanalisationssysteme, in denen Stauwehre zur Steuerung des Abflusses vorhanden sind. Im Allgemeinen werden

jedoch Schwallspülungen durch Einstau während Tageszeiten mit tiefem Energiebedarf als problematisch angesehen, weil sich in den Stauphasen vermehrt Gase bilden können und es auch zu Korrosionsschäden an den Kanalrohren kommen kann. Entsprechend wären zur Regeneration der Wärmetauscher andere Techniken für die Schwallspülung zu entwickeln.

Auch durch eine veränderte Gestaltung der Oberfläche des Wärmeaustauschers kann eine Biofilmbildung behindert werden. Dies gilt sowohl für Schikanen, die jedoch durch die im Abwasser mitgeführten Fremdstoffe rasch zerstört werden als auch für Beschichtungen der Oberfläche. Nach den bisherigen Erfahrungen scheint eine feinere und aufwendigere Oberflächenbearbeitung das Anhaften von Mikroorganismen eher zu begünstigen. Eine Teflon-Beschichtung verhindert zwar die Biofilmbildung, erodiert aber selbst durch im Abwasser mitgeführten Sand und Kies.

Diese Sachverhalte machen deutlich, dass hier ein potentielles Einsatzgebiet für neue Werkstoffe liegt. Durch Einsatz neuer Materialien ließe sich dauerhaft eine hohe Leistungsfähigkeit der Wärmetauscher erreichen. In den letzten Jahren hat in der Materialforschung die Entwicklung von Werkstoffen erhebliche Fortschritte gemacht. Angesichts der dort mittlerweile bestehenden Innovationsmöglichkeiten könnten Werkstoffe mit hoher Lebensdauer entwickelt werden, die sich einerseits nicht durch die im Abwasser transportierten Partikel abreiben lassen, aber andererseits aufgrund ihrer (feineren) Oberflächeneigenschaften der Ausbildung eines Biofilms von anhaftenden Mikroorganismen entgegenwirken. Ebenso könnte es mit Methoden der Nanotechnologie möglich werden, auf den Wärmetauschern zu gegen Abrieb beständigen Oberflächengestaltungen zu kommen, mit denen das vorbeiströmende Wasser so verwirbelt wird, dass sich dort keine durchgängigen Biofilme bilden können.

Die Inhaltsstoffe von Siedlungsabwasser können u.U. nicht nur mechanisch die Wärmetauscher angreifen, sondern auch in chemischer Hinsicht korrosiv wirken und damit das Material der Wärmetauscher angreifen. Aus diesen Gründen werden bisher die im Kanalnetz befindlichen Wärmetauscher mit Oberflächen aus veredelten Metallen gefertigt.

Eine Effizienzsteigerung wird vermutlich durch eine Vergrößerung der Oberfläche der Wärmetauscher begünstigt, z.B. aufgrund einer Segmentierung der Wärmetauscher. Hierbei stößt die Verwendung von Metallen an Grenzen. Die bereits dargestellte Entwicklung und Verwendung von neuen Werkstoffen könnte zu einem Ersatz der bisher eingesetzten Metalle führen und zu besser formbaren Oberflächen und zur Verwendung von Oberflächenformen mit höherem Wirkungsgrad führen. Auf diese Weise können möglicherweise auch die Produktions- bzw. Vertriebskosten vermindert werden; auch könnte die Verwendung neuer Materialien eventuell zu einer weiteren Erhöhung der Nutzungsdauer der Wärmetauscher beigetragen.

Nanotechnologisch lassen sich thermo-elektrische Materialien entwickeln, aus denen möglicherweise die Generatoren der Wärmetauscher aufgebaut werden können.

Grundsätzlich kann es darüber hinaus sinnvoll sein, wenn Maßnahmen zu einer Verringerung der Wartungsdauer (z.B. aufgrund einer selbsttätigen Wartung des Wärmetauschers) entwickelt und praktisch erprobt werden.

Insbesondere für den innerhäuslichen Einsatzbereich (Abschöpfung von thermischer Energie aus dem Dusch-/Badezimmer-Abwasser-Teilstrom, aber auch für die Teilströme aus Wasch- und Geschirrspülmaschine) wird noch erheblicher Entwicklungsbedarf gesehen. Bezogen auf das Abschöpfen von Wärme aus mehreren Teilströmen fehlen z.T. noch die geeigneten Elemente.

4.3 Optimierung der Wärmepumpen

Die Wärmepumpen-Technologie ist im Grundsatz ausgereift und wird mit zunehmendem Erfolg eingesetzt. Dennoch sind noch weitgehende Optimierungen möglich und für eine nachhaltige Verwendung erforderlich: Denn die heutige beste Effizienz von Wärmepumpen kann nach Ansicht von Fachleuten noch erheblich gesteigert und evtl. sogar verdoppelt werden. Eine weitere Verbesserung der Kompressoren etwa durch Einführung hocheffizienter Elektroantriebe ist erwünscht. Innovationspotentiale liegen hier beispielsweise in der Verwendung von Turbokompressoren. Turbokompressoren, die bisher vor allem im höheren Leistungsbereich eingesetzt werden, weisen höhere isentropische Wirkungsgrade¹² auf als Kolbenkompressoren. Klein-Turbokompressoren könnten daher – insbesondere für semi- bzw. dezentrale Lösungen – entwickelt werden.

Kurz- und mittelfristig liegen noch Innovationspotentiale in der Erhöhung der Effizienz durch Kombination mit verbesserten Wärmetauschern und anderen Komponenten (insbesondere Steuerungen).

Bezogen auf inhäusige Anlagen ist die Steigerung der Effizienz bei der kombinierten Raumheizung und Warmwasserbereitung sowie die Entwicklung von Testmethoden zur Beurteilung derartiger Systeme erforderlich. Aus grundsätzlichen Erwägungen heraus sollte dabei möglichst viel Wärme aus verschiedenen Wärmequellen (Abwasser, Raumluft, Erdsonde usw.) genutzt werden.

Die Entwicklung von Komponenten und Wärmepumpen zum Betrieb mit natürlichen Arbeitsmedien wird vermutlich auch für den Anwendungsbereich Abwasser von Interesse sein. Die von der Forschung bereitgestellten Methoden zur Pulsbreitenmodulation und zur Betriebsdiagnose in kostengünstigen Wärmepumpenreglern

¹² Bleibt die Entropie bei einem Prozess konstant, so kann dieser Prozess als isentrop charakterisiert werden.

werden bei einer technischen Weiterentwicklung vermutlich auch für die zur Wärmerückgewinnung aus Abwasser einsetzbaren Maschinen zu einer Erhöhung des Wirkungsgrades und zur Erhöhung der Wirtschaftlichkeit bzw. zu einer Senkung der Betriebskosten beitragen.

In langfristiger Perspektive bestehen zentrale F- & E-Aufgaben in der Optimierung der Exergie (also des Anteils der Gesamtenergie des Systems, der Arbeit verrichten kann). Bei inhäusigen Anlagen wird die gesamtenergetisch angepasste Integration von Wärmepumpen-Systemen in die Gebäude weiter effizienzsteigernd wirken. Innovationspotentiale liegen dabei auch in der Kopplung mit solartechnischen Elementen, in der Nutzung von saisonalen Speichern (z.B. über Erdwärme) und im Antrieb der Wärmepumpe mit Energie von regenerativen Brennstoffen.

4.4 Energieoptimierung der Abwasserreinigung und ihrer Verfahren

Als Ziel der Entwicklung sind energieoptimierte Kläranlagen zunehmend in der Ingenieurtechnik akzeptiert. Energieoptimierung bezieht sich bei ARAs einerseits auf einen relativ geringen Stromverbrauch der Anlage, andererseits auf eine deutliche Erhöhung des Anteils an Eigenstromerzeugung bei Berücksichtigung der Energieherkünfte. Untersuchungen an bestehenden Kläranlagen zeigen große Energiesparpotentiale, in Einzelfällen sogar Kosteneinsparungen von mehr als 50% auf.

Bezogen auf die Entwicklung der ARAs steht derzeit die weitere Erforschung von Wegen zur energieautarken Kläranlage im Mittelpunkt, d.h. die Herausforderung, die Prozesse auf der ARA möglichst ohne Bezug von Fremdenergie zu betreiben. „Hierbei sind v.a. Verfahrenskonzepte der Abwasserreinigung mit geringem Energiebedarf noch unzureichend erforscht“ (Keicher et al. 2004: 120). Hier sei auf die spezielle Ausarbeitung zu den Anaerobverfahren der Abwasserreinigung verwiesen.

Bezogen auf zahlreiche einzelne ARA-Anlagenkomponenten sind derzeit Entwicklungen zur Energieoptimierung im Gang; beispielsweise gilt dies für Membranfilter (Rotationsscheibenfilter ermöglichen eine energieoptimierte Filtrationstechnik). Die Kombination von unterschiedlichen Verfahren erlaubt auch im Bestand eine Energieoptimierung.

Eine signifikante Energieoptimierung ist im Bereich der Abwassereinigung möglich, wenn Ansätze wie 1. die verstärkte Nutzung von Anaerobtechniken, 2. der Einsatz von Festbettssystemen und 3. die Minderung des Energieaufwandes für die peripheren Einrichtungen nebeneinander verfolgt werden. Beispielsweise lassen sich diese drei Ansätze in einem System, bestehend aus einem wärmetechnisch optimierten Emscherbrunnen, einem Anaerobfilter, einem de-nitrifizierenden Festbettreaktor sowie einem Nitrifikationstropfkörper, kombinieren. Entsprechende Entwicklungsarbeiten sind im in halbtechnischen Versuchen durchgeführt worden. Anaerobfilter lassen sich zur energetisch günstigen Vorbehandlung auch relativ gering belasteter

Substrate, wie z.B. kommunales Abwasser, erfolgreich einsetzen. Im Zusammenwirken mit einer ebenfalls energetisch günstig gestalteten aeroben Nachreinigung kann der Energiebedarf für die Abwasserreinigung insgesamt um mindestens 70% im Vergleich zur simultanen aeroben Stabilisierung vermindert werden (vgl. DBU 2000).

Der Einsatz von (klassischen, aber auch von neu kombinierten) Anaerobverfahren bei der Abwasserreinigung ist aus unterschiedlichen Gründen teilweise schwieriger zu beherrschen als der der Aerobtechnologie. Nach den Erfahrungen der GTZ (TBW 1998: 59) arbeiten bisher die in Entwicklungs- bzw. Schwellenländern betreuten Anlagen mit Anaerobverfahren „nur selten dauerhaft und mit optimalen Prozessführungsbedingungen“. Für die Gewährleistung eines nachhaltigen Betriebs von kommunalen Anaerob-Kläranlagen scheint es deshalb erforderlich, geeignete technische Standards (Wartungspläne, Kontroll- und Steuerungsstrategien, Vorgaben für die dauerhafte Betriebsdokumentation) und Personalaus- und -fortbildungsprogramme zu entwickeln. Energiebedarf und Prozessstabilität bei der anaerob-biologischen Abwasserreinigung lassen sich mit Hilfe lernender Modelle (z.B. Fuzzy-Logik-Technik, neuronale Netze) optimieren.

„Auch bei der Ermittlung der Investitions- und Betriebskosten von energiesparender Anlagentechnik besteht noch erheblicher Forschungsbedarf.“ Im Weiteren sind Analysen des Energieverbrauchs sowohl hinsichtlich thermischer als auch elektrischer Energie von ARAs „in möglichst hoher zeitlicher Auflösung nach Verbrauchergruppen mit dem Ziel der Bestimmung von Richtwerten sowohl aus ökologischen als auch aus ökonomischen Aspekten ein vielversprechendes Forschungsgebiet.“ Erst auf der Grundlage entsprechender Erhebungen kann die „Korrelation zwischen erforderlichen anlagentechnischen Investitionen und damit erreichbaren Energiesparpotentialen auf Kläranlagen ermittelt werden“ (Keicher et al. 2004: 120).

4.5 Optimierung der Klärgasgewinnung in Anaerobverfahren

Bisherige Erfahrungen zur anaeroben Behandlung von Siedlungsabwässern zeigen, dass der Abbau von organischen Kohlenstoffverbindungen besonders bei Abwässern mit niedrigen Temperaturen ($< 20^{\circ}\text{C}$) oft nur ungenügend zur Biogasproduktion beiträgt (diese Effekte können durch Abwässer mit geringerer CSB-Konzentration noch verstärkt werden). Insbesondere gelingt es nicht, im Reaktor einen ausreichenden Gasaustrag zu erzeugen. Vielmehr bleibt das erzeugte Faulgas überwiegend in der flüssigen Phase und tritt erst zu einem späteren Zeitpunkt, z.B. im Gewässer, unkontrolliert aus. Statt wie beabsichtigt die Energieausnutzung aus dem Abwasserstrom zu erhöhen, trägt eine solche unkontrollierte Methangasemission zum Treibhauseffekt bei. Daher sind Verfahren zu entwickeln, mit denen bei extremen Randbedingungen die Methanausbeute im Reaktor erhöht werden kann. Beispielsweise könnten neu zu entwickelnde anaerobe Belebmembranverfahren im Vakuumbetrieb

dazu führen, dass sich auch bei niedrigeren Prozesstemperaturen die Biogasausbeute soweit erhöht, dass eine energetische Nutzung des Biogases technisch möglich wird.

Mittelfristig erfordert eine Standardisierung und Weiterentwicklung des Biogasprozesses, dass die Vorgänge im Innern des Reaktors transparent und steuerbar werden. Geeignete „selbst-lernende“ Modelle können die Prozessführung erleichtern. Für eine solche Steuerung von Biogas-Fermentationen kann der Einsatz optischer Sensoren und neuronaler Netze sinnvoll sein: So ist mit der Software „Anaero-Control“ die am Institut für Angewandte Mikrobiologie am Interuniversitären Forschungsinstitut für Agrarbiotechnologie Tulln in Österreich entwickelt wurde, eine Optimierung der biochemischen Vorgänge im Reaktor prinzipiell möglich. Im Laborversuch ergeben sich erhöhte Prozessstabilität und Biogasausbeuten. Die Problematik liegt in der Praxis bisher darin, dass für eine derartige Prozessführung täglich mehrfach verschiedene Parameter (z.B. CSB, TS und organische Trockensubstanz im Zulauf bzw. im Reaktor ebenso wie die Biogasproduktion und deren Methangehalt) gemessen werden müssen. Die Erhebung und Analyse der Messdaten verursacht Kosten, die sich möglicherweise erst bei größer dimensionierten Anlagen rentabel erweisen. Insbesondere für kleinere ARAs besteht daher noch Entwicklungsbedarf, um dort einsetzbare robuste Alternativen für die elektronische Steuerung der Biogasproduktion zu realisieren. Einige Biogasanlagenbauer bieten für landwirtschaftliche Anwendungen bereits Systeme an, die ein Minimum an Prozesskontrolle und Einflussnahme ermöglichen. Der Transfer in die Siedlungswasserwirtschaft steht noch aus.

4.6 Optimierung der Gasausbeute durch Ko-Vergärung

Seit etwa zehn Jahren zielen Entwicklungen insbesondere auf die Erhöhung der Gasausbeuten und eine Verbesserung der Wirtschaftlichkeit durch eine Ko-Vergärung weiterer Substrate mit dem Abwasser ab: Der Ertrag an Biogas ist bei Vergärung von Bio-Abfällen, Flotationsfetten und nachwachsenden Rohstoffen im Vergleich zu Siedlungsabwasser wesentlich höher. Auch durch die Mitverarbeitung dieser Substrate auf Kläranlagen kann die spezifische Gasproduktivität ihrer Faulgask Gewinnung erheblich gesteigert werden (vgl. FNR 2000: 93, Sosnowski et al. 2003). Parallel zu den laufenden praktischen Versuchen auf geeigneten ARAs ist es sinnvoll, zunächst den Chemismus auch reaktionskinetisch genauer zu klären, so dass sich die Gasausbeute durch bewusste Zugabe von biogenen Abfällen usw. möglichst exakt steuern lässt. Dies bedeutet evtl. auch, dass es hier noch zu verfahrenstechnischen Innovationen kommt; möglicherweise sind quasi-kontinuierliche Verfahren Batch-Verfahren auch hinsichtlich der produzierten Gasmenge überlegen (vgl. Sosnowski et al. 2003).

Grundsätzlich zeigen die bisherigen Versuche mit Ko-Substraten auf ARAs, dass die meisten Abfälle mit geringem Zusatzaufwand mitverarbeitet werden können und in den meisten Fällen (ausgenommen Fette) kaum Behinderungen im Kläranlagenbetrieb bestehen. Im Einzelfall sind aber Geruchsprobleme und Ablagerungen in den

Leitungen sowie Reinigungen der Kammerfilterpressen zu bewältigen. Bei den bisherigen Betriebsversuchen zur Ko-Vergärung ließen sich erhebliche Steigerung der Faulgas- und Energieproduktion durch Zugabe von Ko-Substraten realisieren. Dabei kam es regelmäßig auch zu einer Steigerung des Methananteils, so dass ein energiereicheres Biogas erzeugt wird, wobei unter Umständen allerdings auch ein erhöhter Anteil von Siliziumverbindungen stören kann (vgl. van Felde et al. 2005, Schmelz 2007).

Grundsätzlich lässt sich die Anlagentechnik für die Ko-Vergärung weiter optimieren: Ko-Fermentationsanlagen unterscheiden sich von herkömmlichen Anaerobanlagen vor allem darin, daß die Ko-Substrate aufgrund möglicher Störstoffe und einer von Siedlungsabwasser abweichenden Konsistenz zunächst in einer spezifischen Aufbereitungsstrecke konditioniert werden, bevor sie vor der Beschickung des Anaerob-Reaktors gut mit dem Abwasser vermischt werden. Die Aufbereitungssequenz besteht in der Regel aus einer Zerkleinerung, einer Störstoffabtrennung und evtl. auch einer Hygienisierung, sofern seuchenhygienisch bedenkliche Stoffe, wie z. B. Speisereste oder Flotatfette, verarbeitet werden sollen. Die Reihenfolge der Einzelkomponenten und deren Technik hängt im Wesentlichen von der Art der verarbeiteten Substrate ab. Großtechnische Versuche für geeignete Abfallfraktionen sind zudem anlagenspezifisch durchzuführen. Bei den künftigen Entwicklungen ist zu berücksichtigen, dass Abwasserreinigung und Gewässerschutz der Anlagenhauptzweck bleiben.

4.7 Elektrisch-thermische Verwertung des Klärgases: Entwicklung zur Serienreife

Im Bereich der kommerziell erhältlichen BHKWs können mit Gas-Ottomotoren die höchsten Wirkungsgrade erzielt werden. Sie erreichen elektrische Wirkungsgrade von 35–40% (bis zu 43% bei Anlagen im MW-Bereich). Alternativ zu konventionellen Gas-Motoren ist in der KWK der Einsatz von Mikrogasturbinen¹³, Stirling-Maschinen¹⁴ oder Brennstoffzellen¹⁵ möglich, die alle einen theoretisch höheren Wir-

¹³ Die Mikrogasturbine ist eine serienreife Maschine zum Einsatz in der dezentralen Energieversorgung im Leistungsbereich unter 200kW_{el}. Sie ist eine kleine schnelllaufende Gasturbine mit niedrigen Brennkammerdrücken und Temperaturen. Ein wichtiger Unterschied zu den in Großkraftwerken eingesetzten Gasturbinen ist der Rekuperator, ein Wärmetauscher in dem die komprimierte Verbrennungsluft durch die heißen Abgase der Turbine vorgewärmt wird (dadurch wird der Wirkungsgrad der Mikrogasturbine erhöht). Die Verbrennungsluft tritt über den Generator in die Mikrogasturbine ein und kühlt diesen dabei. Anschließend wird die Luft im Radialverdichter auf etwa 4 bar komprimiert. Im Rekuperator wird sie durch die heißen Abgase vorgewärmt. In der Brennkammer kommt der Brennstoff hinzu und wird gezündet. Die heißen Verbrennungsgase werden in der Turbine entspannt und treiben so Verdichter und Generator an. Nachdem die Abgase einen Teil ihrer Wärmeenergie im Rekuperator abgegeben haben, verlassen sie die Mikrogasturbine in Richtung Abgaswärmetauscher bzw. Kamin. Sie kann so als Prozesswärme genutzt werden.

¹⁴ Das Prinzip des Heißgas- oder Stirlingmotors beruht auf der Ausdehnung des Gases beim Erhitzen und seiner anschließenden Kontraktion beim Abkühlen. Der Stirlingprozess arbeitet zwischen zwei Temperaturniveaus; die erzielbare Leistung bzw. der Wirkungsgrad hängen sowohl vom Niveau der Wärmezufuhr als auch von dem der Wärmeabfuhr ab. Die Erhitzertemperatur wird durch die möglichen Werkstoffe auf etwa 700°C begrenzt. Die Kühltartemperatur wird aber bei KWK zumeist von

kungsgrad haben, aber nur mit entschwefeltem bzw. gefiltertem Biogas betrieben werden können (vgl. Thomas 2007). Der Einsatz dieser Maschinen könnte die Wirtschaftlichkeit von BHKW folglich weiter steigern. Für eine Effizienzsteigerung hinsichtlich der Stromerzeugung werden derzeit Stirlingmotor und Brennstoffzellen in Pilotvorhaben geprüft. Der Einsatz von Gasturbinen ist nach den bisherigen Erkenntnissen nur für größere Leistungsbereiche (um 200 kW_{el}) interessant, insbesondere wenn die Turbinen weiter optimiert werden.¹⁶ Der serienmäßige Einsatz von Brennstoffzellen in diesem Anwendungsgebiet wird voraussichtlich erst mittelfristig möglich sein, auch wenn allgemein geschätzt wird, dass der Durchbruch zu einer Massenanwendung von Brennstoffzellen unmittelbar bevorsteht.

Um die biogenen Gase aus dem Abwasser optimal zu verwerten, müssen diese Verwertungstechnologien z. T. noch zur Marktreife entwickelt werden. Das betrifft einerseits die Verwertung des Klärgases. Hierzu besteht noch erheblicher Anpassungsbedarf der Innovationen. Andererseits wird es erforderlich sein, die noch vorhandenen Kostensenkungspotentiale auszuschöpfen, um eine konkurrenzfähige Energieerzeugung aus dem Abwasser zu erlauben. Dabei ist von der Notwendigkeit der Kostensenkung nicht nur der Bereich der Erzeugung, sondern bezogen auf die KWK-Technologie auch der Bereich der Wärmeverteilung betroffen. Bei allen Anwendungen mit einem höherem Leistungsumfang ist zusätzlich das Problem der sinnvollen Nutzung der bei der Verstromung anfallenden großen Abwärmemengen zu lösen.

Am Beispiel der Brennstoffzellentechnologie werden im Folgenden die Innovationspotentiale vertieft: Aufgrund des Entwicklungsstopps für die PAFC-Technologie wird hier zunächst die MCFC-Technologie weiterzuentwickeln sein. Die Zuverlässigkeit der MCFC-Zellen hat sich im Probetrieb als befriedigend ergeben. Auch ist keine frühzeitige Degradation aufgetreten, so dass der Einsatz anderer Materialien (aus diesem Grund) nicht erforderlich ist.

Die ursprünglich angestrebten elektrischen Wirkungsgrade von 50% in der Erprobung für Wechselstromanwendungen konnten in der MCFC-Technologie jedoch

den vorgegebenen Temperaturen der Wärmekreisläufe bestimmt. In Pilot- und Demonstrationsvorhaben wurden Stirling-Anlagen mit elektrischen Leistungen bis zu 150 kW realisiert. Die Wirkungsgrade der Stromerzeugung liegen zwischen 7 und 28%. Entwicklungs- und Forschungsbedarf besteht bei Stirlingmotoren zum einen auf Seiten der Konstruktion und der Materialwahl, um die geforderte Haltbarkeit bei minimierten Herstellkosten darstellen zu können. Auch die dauerhafte Abdichtung der unter hohem Druck stehenden Arbeitsräume stellt teilweise noch ein Problem dar.

¹⁵ Eine Brennstoffzelle ist eine galvanische Zelle, die die chemische Reaktionsenergie eines kontinuierlich zugeführten Brennstoffes und eines Oxidationsmittels in elektrische Energie wandelt. Die Energie zur Stromproduktion wird mit den Brennstoffen zugeführt.

¹⁶ Nachteil der Mikrogasturbinen ist der mit ca. 28% relativ geringe elektrische Wirkungsgrad. Auch liegt der Gesamtwirkungsgrad mit ca. 82% häufig etwas unter dem von Gas-Otto- und Zündstrahlmotoren liegt. Die Investitionskosten liegen verglichen mit leistungsäquivalenten, auf Motoren basierenden Biogas-Nutzungskonzepten um 15 bis 20% höher. Es wird allerdings eine Kostensenkung erwartet, wenn Mikrogasturbinen in Großserien hergestellt werden. Bisher werden Erfahrungen aus dem Deponiegasbetrieb übertragen.

bisher nicht erreicht werden; nachgewiesen sind lediglich 47%. Bei den Investitionskosten liegt dieser Brennstoffzellentyp noch um etwa den Faktor vier bis fünf von den Zielen des Marktes entfernt, so dass ein großer Optimierungsbedarf besteht. Nach der Analyse zum Entwicklungsstand (Blesl 2006) lässt sich durch Serienfertigung alleine in einem akzeptablem Zeitraum das Kostenziel nicht realisieren. Vielmehr werden im erheblichem Umfang apparative Vereinfachung des Anlagenschemas und weitere Verbesserungen, bspw. auch bei der Materialauswahl, erforderlich. Dabei müssen zusätzliche Kostensenkungspotentiale aktiviert werden.

Dagegen lässt sich die Anlagensteuerung voraussichtlich verhältnismäßig einfach an dieses Entwicklungsziel anpassen: Sie soll die anwendungsseitigen Anforderungen an das Brennstoffzellensystem umsetzen und zugleich die Anlagensicherheit gewährleisten. Zur Anlagensteuerung werden in den bisher im Probetrieb der MCFC-Zellen eingesetzten Prototypen Werte von 90 Messstellen kontinuierlich erfasst, ausgewertet und entsprechende Reaktionen über ein eingespeichertes Steuerprogramm veranlasst. Bei Umstellung auf Serienfertigung ist eine erhebliche Reduktion der Anzahl der Messstellen (auf zehn) beabsichtigt, wodurch sich die gesamte Kybernetik des Systems wesentlich vereinfacht.

Über die Rahmendaten zum Personal- und Wartungsbedarf der betrachteten Brennstoffzellen im Dauer- und Regelbetrieb liegen bisher keine wissenschaftlich gesicherten Erkenntnisse vor. Da jedoch technische Brennstoffzellen generell höhere Anforderungen an die Reinheit des einzusetzenden Brennstoffes stellen, folgt aus den Zellen einerseits eine erhöhte Anforderung an die Konditionierung des biogenen Gases, andererseits aber auch Entwicklungsbedarf hinsichtlich der Regeneration der Zellen und ihrer Bestandteile (vgl. FNR 2000).

Wieweit überhaupt und besonders für dieses Anwendungsgebiet funktionsfähige und für einen großtechnischen Einsatz nutzbare mikrobielle Brennstoffzellen (sog. Bio-Brennstoffzellen) entwickelt werden können, lässt sich derzeit nicht absehen.

Für Brennstoffzellen ist die Verwertung von Biogas aus dem Faulturm derzeit ein erstes, bescheidenes Einsatzgebiet, bei dem sich aber vermutlich keine Kostendeckung erreichen lässt, da bereits nach der Energiebilanz nur wenig überschüssige und damit real exportierbare Energie erwirtschaftet werden kann. Die in über 40.000 Betriebsstunden (alleine in Köln-Rodenkirchen) gewonnenen, erheblichen Erfahrungen lassen sich jedoch auf andere Anwendungen übertragen, insbesondere zur Nutzung von Klärgasen aus Anaerob-ARAs. Im Anwendungsbereich der anaeroben Behandlung von aerob erzeugten Klärschlämmen könnte der Einsatz von Kombinationsverfahren wie das Seaborne-Verfahren erfolgversprechender sein, das sowohl zur Gewinnung von Biogas als auch zur Rückgewinnung von Phosphat verwendet werden kann und eine Abtrennung der Schwermetalle vom entstehenden Dünger erlaubt. Das entschwefelte Biogas kann auch hier anschließend weiter aufgereinigt werden, um ein möglichst reines Methangas (Erdgasqualität) zu erzeugen. Dazu

werden vor allem Wasserdampf und Kohlendioxid abgetrennt. (Auf der ARA Gifhorn wird derzeit eine Seaborne-Anlage im großtechnischem Maßstab realisiert – vgl. ausführlicher die Ausarbeitung zur Nährstoffrückgewinnung in: ISOE-Diskussionspapiere, Nr. 32).

4.8 Entwicklung der mikrobiell-chemoelektrischen Verwertung von Abwasser

Strom aus Klärschlamm zu gewinnen, ist bisher nur über den Umweg der Vergasung möglich. Während herkömmliche Brennstoffzellen konventionelle Energieträger wie Methan oder Methanol nutzen, gewinnen die mikrobiellen Brennstoffzellen aus der Stoffwechselaktivität von Mikroorganismen elektrische Energie. Daraus lässt sich die Entwicklungsidee ableiten, Brennstoffzellen einzurichten, welche die Tätigkeit von Mikroorganismen, die das Abwasser direkt aufschließen, chemoelektrisch auswerten können. Entsprechend könnten mittelfristig die Bakterien, die sich in Klärschlamm, Kompost oder Abfallhaufen tummeln, selbst zu Stromlieferanten werden.

Bei den bisherigen Untersuchungen der Universität Greifswald befinden sich die Mikroorganismen in einer anaerob gehaltenen Anodenkammer. Sie können dort (in Abhängigkeit vom genutzten Elektronentransfer-Mechanismus) entweder suspendiert oder auch in Form eines bakteriellen Biofilmes auf der Anode vorliegen. Das Substrat (der Brennstoff) wird durch die Bakterien abgebaut und die freigesetzten Elektronen werden auf die Brennstoffzellenanode übertragen. Der Anodenraum wird durch eine halbdurchlässige Membran vom Kathodenraum getrennt. Die Anode ist dabei mit neuartigen Materialien beschichtet. Eine Platinelektrode oder eine mit Platin bezogene Graphitelektrode ist mit einer Schicht des elektrisch leitfähigen Kunststoffs Polyanilin überzogen. Diese Kunststoffschicht ist biokompatibel und elektrokatalytisch aktiv. Sie nimmt Elektronen aus dem Stoffwechsel der Bakterien auf, überträgt sie auf die Anode und ist so entscheidend am Stromfluss beteiligt.

Die Entwicklungsrichtung, mikrobielle Brennstoffzellen mit nachwachsenden Rohstoffen zu betreiben, wird seit etwa fünf Jahren verfolgt. Dabei ist zu klären, wie weit die derzeitige Entwicklungsrichtung der Anoden auf Basis fluorierter Polyaniline den zukünftigen Erwartungen standhält. Um auf diese Weise mikrobielle Brennstoffzellen aufbauen zu können, sind die Arbeiten hinsichtlich der Entwicklung geeigneter Kathoden noch weiter fortzuführen; hierbei sind insbesondere elektrokatalytische und biokompatible Eigenschaften genauer zu untersuchen. Derzeit wird die Brennstoffzelle mit einfach strukturierten Substraten auf Stärke und Zuckerbasis experimentell erforscht. Daher wird noch eingehend zu erforschen sein, ob eine mikrobiologische Brennstoffzelle auch mit inhomogeneren Substanzen wie Klärschlamm funktionieren wird.

4.9 Optimierung der Reinigung und Weiterverarbeitung biogener Gase

Faulgase sind meist aggressiv und hochbelastet. Problematisch sind dabei die zunehmenden Gehalte organischer Silizium-Verbindungen, von Schwefelwasserstoff und von halogenierten Kohlenwasserstoffen. Damit sie in Gasmotoren und Brennstoffzellen als Energieträger eingesetzt werden können, sind spezielle Behandlungsverfahren erforderlich. Aufgrund der Größenordnung kann anstelle einer klassischen Gaswäsche (z.B. Druckwasserwäsche) auch die Adsorption verwendet werden. Bewährt haben sich die Siloxanreinigung durch Aktivkohle und die Entschwefelung durch (imprägnierte) Aktivkohle/Chemisorption. Verfahren wie die Druckwasserwäsche oder auch die Druckwechseladsorption werden bereits standardmäßig für die industrielle Gasreinigung eingesetzt, andere wiederum befinden sich erst im Stadium der Forschung und Entwicklung (z.B. kryogene Gastrennung).

Dagegen ist die Weiterverarbeitung zum Methangas (Konditionierung) weitgehend Stand der Technik. Auf den in Kapitel 3.5 erwähnten Schweizer Pilot-Anlagen wird sowohl die Abtrennung von Problemstoffen der Klärgase als auch die Konditionierung hinsichtlich der Einspeisung ins Erdgasnetz großtechnisch erprobt. Generell sind die Anlagen zur Klärgasaufbereitung bzw. seiner Reinigung stark abhängig von der jeweiligen Belastung des Abwassers, die sehr spezifisch sein kann. Die Anlagen sind daher einzelfallspezifisch anzupassen und zu optimieren. Entsprechende Planungssets sind für eine flächenhafte Etablierung der Gasaufbereitung bzw. Reinigung zu entwickeln.

Daneben werden weitere Entwicklungsrichtungen bei der Weiterverarbeitung verfolgt, deren Wirtschaftlichkeit und praktische Handhabbarkeit noch zu überprüfen ist. Im Rahmen des Pilotprojekts EuWaK (Erdgas und Wasserstoff aus Kläranlagen) soll die Aufbereitung von Faulgas zu Erdgas und zu Wasserstoff im großtechnischen Maßstab erprobt werden. Das Projekt wird vom Land Nordrhein-Westfalen und der Europäischen Union finanziell gefördert und von der Stadt Bottrop umgesetzt. Dort wird das Faulgas zunächst zu Erdgas aufbereitet, welches an einer eigenen Erdgastankstelle zum Betrieb von Fahrzeugen der Emschergenossenschaft verwendet wird. In einem zweiten Schritt wird das Erdgas weiterverarbeitet; mit einem konventionellen Dampf-Reformer¹⁷ und einer weitergehenden Gasaufbereitung (Druckwechseladsorption) wird aus dem Methangas Wasserstoff gewonnen. Der Wasserstoff wird zu einem Schulzentrum transportiert und dort in einem Blockheizkraftwerk mit PEM-Brennstoffzellen-Technologie eingesetzt werden, um das Zentrum (inklusive Schwimmbad) mit Strom und Wärme zu versorgen.

¹⁷ Im Dampfreformer wird aus Methangas und Wasserdampf in einem Reaktor bei hohen Temperaturen zunächst Wasserstoff, Kohlenmonoxid und -dioxid erzeugt und in einem zweiten Prozessschritt das angefallene Kohlenmonoxid mit Dampf zu Kohlendioxid und Wasserstoff konvertiert.

4.10 Integrierte Infrastrukturplanung

Stärker als bisher ist bei der Infrastrukturplanung zu berücksichtigen, an welcher Stelle Wärmeaustauscher oder andere Möglichkeiten der Energierückgewinnung ins Abwassersystem implementiert werden (dies ist im Prinzip de- bzw. semi-zentral als auch im Netz oder in der Kläranlage möglich). Eine länger dauernde oder permanente Absenkung der Abwassertemperatur infolge einer Wärmeentnahme im Kanalisationsnetz kann bereits bei konventionellen Kläranlagen erhebliche Auswirkungen auf die Nitrifikationsleistungen haben. Der Abwasserkanal ist an sich ein großer Wärmetauscher gegen das ihn umgebende Erdreich. Lokale Energieentnahmen können daher nach einer entsprechenden Fließzeit wieder ausgeglichen werden und dann die Abwasserreinigung nicht beeinträchtigen.

Generell ist ein mathematisches Modell des Wärmehaushalts in der Kanalisation anzuwenden, um die zeitliche und örtliche Änderung der Abwassertemperatur in einem Kanalisationsrohr zu berechnen und um zu ermitteln, ob bzw. wie weit sich beispielsweise ein anaerober Prozess auf der Kläranlage und eine de- oder semi-zentrale Nutzung der Abwasserabwärme vertragen. Hierbei sind auch die Temperaturen in der Vorflut und deren ökologische Situation zu berücksichtigen. Wenn die Abwasserreinigungsanlage über eine Nitrifikationsreserve verfügt und die Temperaturabsenkung infolge Wärmeentnahme gegenüber den natürlichen Temperaturschwankungen im Abwassersystem gering bleibt, kann evtl. eine solche Analyse unterbleiben. In entsprechenden Modellen ist auch die Ausgliederung von Teilströmen aus dem Siedlungsabwasser (z.B. Grauwasser) zu berücksichtigen.

Die bisherigen Planungen optimaler Abwassernetze sind ausschließlich auf die Aspekte Abwasserbeseitigung und Gewässerschutz ausgelegt. Eine integrierte Berücksichtigung der Energierückgewinnung wird ggfs. zu veränderten Netzstrukturen führen und auch zu einer Veränderung der Optionen der einzusetzenden Technologien der Wasserbehandlung und der Betriebsführung.

5 Zukunftsvisionen

Im vorausgehenden Kapitel wurden Entwicklungsaufgaben formuliert, die als vorrangig für die Lösung globaler Wasserproblemlagen eingeschätzt werden und von denen vermutet wird, dass sie ein hohes Innovationspotential besitzen. Diese Einschätzung soll mit einer Delphi-Befragung überprüft werden. Die schriftlich befragten Experten werden dabei gebeten, die Bedeutung der Technologien, ihre Realisierungschancen im genannten Anwendungsgebiet und ihren Realisierungszeitraum ebenso einzuschätzen wie den Entwicklungsaufwand und das globale Marktpotential. Der Methode der Delphi-Befragungen folgend werden die beschriebenen Entwicklungsziele in Thesen über die Zukunftsgestaltung formuliert.

Es wird vorgeschlagen, den Experten die folgenden Thesen über Zukunftsvisionen der Energierückgewinnung im Abwassersystem vorzulegen:

5.1 Nutzung der Abwasserwärme

Die Wärmelast des Siedlungsabwassers wird koordiniert abgeschöpft. Satzungen bzw. allgemeine Geschäftsbedingungen regeln, wieweit dezentral Wärmetauscher betrieben werden können und legen evtl. auch Rahmenbedingungen dafür fest (z.B. Grauwasserverwendung als Bedingung für eine Erlaubnis).

Semi-zentral wird an geeigneten Punkten aus der Kanalisation Wärme entnommen und einer Nutzung (z.B. Klimatisierung großer Gebäudekomplexe, Fernwärme) zugeführt. Nanotechnologische Entwicklungen erlauben mittel- bis langfristig den Einsatz verbesserter Wärmetauscher im Kanalisationsnetz mit einer einfachen Bekämpfung des Antifoulings.

5.2 Klärschlämme als Brennstoff

Kurz- bis mittelfristig werden Klärschlämme verstärkt als Brennstoff genutzt werden (Monoverbrennung, Mitverbrennung in Kohlekraftwerken bzw. Müllverbrennungsanlagen, Herstellung von speziellen Kraftstoffen). Beim Aufbau entsprechender Technologielinien ist darauf zu achten, dass diese nicht einer hochwertigeren Verwertung der im Abwasser enthaltenen chemischen Energie bzw. einer Energieoptimierung der ARAs im Weg stehen, sondern den Einstieg in diese Entwicklungen erlauben.

5.3 Energieoptimierung der ARA

Um bestehende ARAs in Richtung Energieautarkie zu entwickeln, werden nicht nur Verfahrensoptimierungen eingeführt, sondern zukünftig auf bestehenden Aerob-ARAs Kapazitäten aufgebaut, um die anfallenden Schlämme anaerob auszufaulen und dabei Faulgas als Biogas zu gewinnen. Wo die biologischen Behandlungsstufen von Anlagen neu errichtet werden müssen, wird überprüft, ob nicht hier eine bessere Energieeffizienz durch Einführung einer Anaerob-Stufe erreicht werden kann.

Soweit im Bereich der ARA Abwärme aus dem Abwasser abgeschöpft werden kann, werden hierzu Wärmetauscher hinter der Kläranlage eingebaut.

5.4 Steigerung der Biogasausbeute durch Ko-Vergärung

Zur Erhöhung der Ausbeute an Biogas werden auf größeren Anlagen geeignete Ko-Substrate zugegeben. Während in der Vergangenheit dem Abwasser für die Biogaserzeugung fast ausschließlich biogene Abfallstoffe (z.B. Bioabfall, andere organische Abfallstoffe) zugesetzt wurden, wird die Nutzung nachwachsender Rohstoffe auf den ARAs zukünftig erheblich an Bedeutung gewinnen, da die Verfügbarkeit von geeigneten Bio-Abfällen letztlich als doch vergleichsweise begrenzt eingeschätzt werden muss.

In geeigneten semi-zentralen und dezentralen ARAs (insbesondere solchen mit konzentriertem Abwasser (in Folge von Teilstromseparation und Ausgliederung von Grauwasser) wird die organische Fraktion der Haushaltsabfälle bereits in der Küche oder an semi-zentralen Sammelpunkten zerschreddert und dem Abwasser zugegeben.

5.5 ARAs als Energieversorger

Das gewonnene Biogas wird vor allem in kleineren ARAs direkt zur Energiegewinnung eingesetzt. Hierbei werden insbesondere Möglichkeiten der KWK genutzt. Brennstoffzellen werden hier zukünftig neben Stirlingmotoren und anderen Kraftwärmemaschinen zunehmend eingesetzt. Mit der in der KWK anfallenden Wärme können insbesondere eigene (anaerobe) Prozesse gestützt werden. Im weiteren wird die hier und die mit Wärmekraftmaschinen gewonnene Wärme nach Möglichkeit als Fernwärme vermarktet; eventuell wird sie saisonal zwischengespeichert.

5.6 Methanherstellung aus Klärgas

In einem großen Umfang wird langfristig insbesondere auf großen ARAs Methan in Erdgasqualität aus dem Faulgas gewonnen. Dieses wird in die bestehenden Erdgasleitungen eingespeist und so für die Energieversorgung zur Verfügung gestellt. Bei entsprechender lokaler Nachfrage kann es auch in chemischen Synthesen als Rohstoff eingesetzt werden.

5.7 Bio-Brennstoffzellen

Mikrobielle Brennstoffzellen sind eine Zukunftstechnologie. Spezielle Linien werden entwickelt werden, die an Siedlungsabwasser adaptiert sind. Deren Nutzung wird langfristig eine erhebliche Rolle bei der Gewinnung elektrischer Energie direkt aus dem Abwasser spielen.

6 Literatur

- Baccini, P./F. Oswald (1998): Netzstadt: transdisziplinäre Methoden zum Umbau urbaner Systeme. Ergebnisse aus dem ETH-Forschungsprojekt Synoikos – Nachhaltigkeit und urbane Gestaltung im Raum Kreuzung Schweizer Mittelland. Zürich
- Blesl, M./M. Ohl/Th. Leipzig (2006): Entwicklungsstand und Entwicklungsbedarf stationärer Brennstoffzellen. Stuttgart
http://www.ier.uni-stuttgart.de/publikationen/pb_pdf/ZES_2006_0009_Brennstoffzelle.pdf (14.8.2007)
- Bundesverband Wärmepumpe e.V. (2005): Heizen und Kühlen mit Abwasser – Ratgeber für Bauherren und Kommunen. München
- DBU (Deutsche Bundesstiftung Umwelt) (2000): Entwicklung eines energetisch optimierten Kläranlagenkonzeptes im Rahmen halbtechnischer Versuche. Projektkennblatt 10144. <http://www.dbu.de/PDF-Files/A-10144.pdf> (21.8. 2007)
- Faulstich, M. et al. (2006): Energetische Nutzung von Biomasse: Potenziale – Entwicklungen – Chancen. Abfalltage Baden-Württemberg, Stuttgart, 26. und 27. September 2006. http://www.wz-straubing.de/technologie-biogener-rohstoffe/download/2006_09_26_aufsatz_abfalltage_badenwuertt_2006.pdf (17.8.2007)
- Fehrenbach, H./F. Knappe (2002): Ökobilanzielle Betrachtung von Entsorgungsoptionen für Klärschlamm im Land Schleswig-Holstein. Im Auftrag des Ministeriums für Umwelt, Natur und Forsten des Landes Schleswig-Holstein. Heidelberg.
<http://www.umwelt.schleswig-holstein.de/servlet/is/23013/Klaerschlam.pdf> (24.7.07)
- Fehrenbach, H. (2006): Ökologische Bewertung der Klärschlammentsorgung: Aktualisierung und Erweiterung bisheriger Studien. „Klärschlammentsorgung – Eine Bestandsaufnahme“. http://www.ifeu.org/abfallwirtschaft/pdf/SkriptLCA_Aachener%20Klaerschlammsymposium.pdf (13.8.2007)
- Felde, D. van/St. Staske/R. Wilms (2005): Co-Vergärung von Fettabscheiderrückständen in Faulbehältern kommunaler Kläranlagen. KA – Abwasser, Abfall 52: 1151–1156
- FNR – Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe (2000): Energetische Nutzung von Biomasse durch Kraft-Wärme-Kopplung: Stand der Technik und Perspektiven für den ländlichen Raum. Gülzower Fachgespräche.
 Gülzow ftp://fnr-server.de/pdf/literatur/pdf_95gfg14_kwk.pdf (24.7.07)
- FNR – Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe (2006): Handreichung Biogasgewinnung und –nutzung. Gülzow 3. Aufl.
http://www.fnr-server.de/pdf/literatur/HR_Biogas.pdf (24.7.07)
- Hanßen, H./J. Rothsprack (2005): Perspektiven der thermischen Klärschlammverwertung. KA – Abwasser, Abfall 52: 1126–1133
- Hunziker, P. et al. (2005): Einspeisung von Biogas ins Erdgasnetz. Vorreiterrolle der ARA Region Luzern. GWA 4/2005:1–8
- Institut für Kreislaufwirtschaft (2005): Machbarkeitsstudie „Perspektiven der solaren Klärschlammtrocknung im Land Bremen“ für Bremer Energie-Konsens GmbH.

- http://www.energiekonsens.de/Downloads/Projekte/Solare_Klaerschlammtrocknung-Machbarkeitsstudie.pdf (14.8. 2007)
- Keicher, K. et al. (2004): Systemintegration von Brennstoffzellen in Kläranlagen – Potenzialabschätzung für Baden-Württemberg. BW-Plus-Bericht. Stuttgart
<http://www.bwplus.fzk.de/berichte/SBer/BWI22006SBer.pdf> (14.8. 2007)
- Klinger, H./St. Weber (2004): Wärmetauscher im Kanal – Theoretische Grundlagen. KA – Abfall/Abwasser Abfall 51 (6): 608–612
- Lange, J./R. Otterpohl (1998): Handbuch zu einer zukunftsfähigen Abwasserwirtschaft. Donaueschingen-Pföhen
- Lühning, A./U. Walter (2007): Zentrale Biogas-Verstromung nach Durchleitung durch ein separates Gasnetz.
http://www.freesen.de/wte/2007/com/ab_e/luehring_m.pdf (14.8.2007)
- Mitsdorfer, R./O. Christ/C. Moeser (2006): Zum Heizen und Kühlen gibt es Abwasser. Wwt 11–12/2006: 8–12
- Müller, E.A./B. Kobel (o.J.): Wärmegewinnung aus Abwasser: Eine regenerative Energiequelle mit großem Potenzial. http://www.infrastrukturanlagen.ch/dokumente/waermenutzung_aus_abwasser.pdf (24.7.2007)
- Nationale Koordinierungsstelle Jülich für Wasserstoff und Brennstoffzellen (2006): Übersicht der seit 2004 aktuellen Wasserstoff- und Brennstoffzellenprojekte mit deutscher Beteiligung. Stand: Juli 2006. http://www.nkj-ptj.de/datapool/page/3/07_18_AiF_Juli.pdf (14.8.2007)
- Onlinereports (2007): Herber Rückschlag für Basler Biogasproduktion. <http://www.onlinereports.ch/2007/BiogasARABirsfelden.htm>
- Peregrina C. et al. (2006): Immersion frying for the thermal drying of sewage sludge. An economic assessment. Journal of Environmental Management, doi:10.1016/j.jenvman.2006.12.035
- Rothenberger, D. (2003): Report zur Entwicklung des Sektors Wasser. Integrierte Mikrosysteme der Versorgung. http://www.mikrosysteme.org/documents/Report_Wasser.pdf (11.4.2004)
- Ryser Ingenieure AG (2005): Energie aus Kanalabwasser. Leitfaden für Ingenieure und Planer. Oldenburg/Bern
- Saure, Th. (2005): Betriebserfahrungen mit der klärgasbetriebenen Brennstoffzelle Köln-Rodenkirchen. BioBZ-Workshop, 28. April 2005, Potsdam
- Schmelz, K.G. (2007): Co-Vergärung aus Sicht eines Kläranlagenbetreibers. BMU-Fachgespräch, 29. Januar 2007
- Sosnowski, P. et al. (2003): Anaerobic co-digestion of sewage sludge and organic fraction of municipal solid wastes. Advances in Environmental Research 7: 609–616
- Stahl, K. (2006): Erfahrungsbericht über einen fünfjährigen Betrieb einer mit Klärgas betriebenen 200 kW Brennstoffzelle. Gaswärme International – Zeitschrift für industrielle und gewerbliche Gasanwendung 1/2006
- TBW (1998): Förderung der Anaerobtechnologie zur Behandlung kommunaler und industrieller Abwässer und Abfälle. Zusammenfassung wichtiger Ergebnisse für GTZ GmbH OE44.

- <http://www2.gtz.de/Dokumente/oe44/ecosan/de-anaerobtechnologie-1998.pdf>
(7.8.2007)
- Thomas, B. (2007): Stirlingmotoren zur direkten Verwertung von Biobrennstoffen in dezentralen KWK-Anlagen. Vortrag auf dem Statusseminar BW-Plus im FZ Karlsruhe. <http://www.bwplus.fzk.de/berichte/ZBer/2007/thomas2007.pdf>
(13.8.2007)
- Thomas, B. et al. (2007): Gekoppelte Produktion von Kraft und Wärme aus Bio-, Klär- und Deponiegas in kleinen dezentralen Stirlingmotor-Blockheizkraftwerken. Zwischenbericht anlässlich des BWPlus-Statusseminars am 7. und 8. März 2007 im FZ Karlsruhe
- Wanner, O. (2004): Wärmerückgewinnung aus Abwassersystemen. Schlussbericht. Dübendorf
- Wanner, O. (2005): Biofilme vermindern die Wärmerückgewinnung. EAWAG news 60: 31–32
- WBGU – Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen (2003): Welt im Wandel: Energiewende zur Nachhaltigkeit. Berlin

In unserer Veröffentlichungsreihe ISOE-Diskussionspapiere bisher erschienen:

Schramm, Engelbert (2008): Düngerrückgewinnung aus Abwasser: Technologien für die Zukunft. Unter Mitarbeit von Jana von Horn. ISOE-Diskussionspapiere, Nr. 32

Schramm, Engelbert (2008): Grauwasserrecycling – Abwasser als Sekundärrohstoffquelle: Technologien für die Zukunft. ISOE-Diskussionspapiere, Nr. 31

Schramm, Engelbert (2008): Energierückgewinnung aus Abwasser: Technologien für die Zukunft. ISOE-Diskussionspapiere, Nr. 30

Schultz, Irmgard/Immanuel Stieß (2006): Emissionshandel und Gender. Ergebnisse einer transdisziplinären Genderanalyse. ISOE-Diskussionspapiere, Nr. 29

Becker, Egon (2006): Gegen das Verwischen der Differenz von Gesellschaft und Natur. Kommentar zum Potsdamer Manifest 2005 „We have to learn to think in a new way“. ISOE-Diskussionspapiere, Nr. 28

Kluge, Thomas/Stefan Liehr/Engelbert Schramm (2007): Strukturveränderungen und neue Verfahren in der Ressourcenregulation. ISOE-Diskussionspapiere, Nr. 27

Liehr, Stefan (2006): Decision Support-Systeme in sozial-ökologischen Regulationsprozessen. Eine Betrachtung aus kybernetischer Perspektive. ISOE-Diskussionspapiere, Nr. 26

Keil, Florian/Thomas Kluge/Stefan Liehr/Alexandra Lux/Petra Moser/Engelbert Schramm (2007): Integrierte Perspektiven in der Wasserforschung. ISOE-Diskussionspapiere, Nr. 25

Stieß, Immanuel/Doris Hayn (2005): Ernährungsstile im Alltag. Ergebnisse einer repräsentativen Untersuchung. ISOE-Diskussionspapiere, Nr. 24

Schramm, Engelbert (2005): Genese und „Verschwinden“ der Kybernetik. Ein Literaturbericht. ISOE-Diskussionspapiere, Nr. 23

Schramm, Engelbert (2004): Monitoringbasierte Vernetzung und partizipative Synthese. Eine Auswertung integrierter Begleitaktivitäten zu einer BMBF-Förderinitiative. ISOE-Diskussionspapiere, Nr. 22

Röhr, Ulrike/Irmgard Schultz/Gudrun Seltsmann/Immanuel Stieß (2004): Klimapolitik und Gender. Eine Sondierung möglicher Gender Impacts des europäischen Emissionshandelssystems. ISOE-Diskussionspapiere, Nr. 21

Franz-Balsen, Angela/Matthias Stadler (2003): Erwachsenenbildung als Multiplikator für die Kommunikation sozial-ökologischer Forschung in die Gesellschaft. ISOE-Diskussionspapiere, Nr. 20

Kluge, Thomas/Engelbert Schramm (2001): Regionalisierung als Perspektive nachhaltigen Wirtschaftens. Konzeptionelle Betrachtungen. ISOE-Diskussionspapiere, Nr. 19

Zahl, Bente (2001): Zielgruppenspezifische Freizeitmobilität. Bestandsaufnahme der sozialwissenschaftlichen Forschung. Unter Mitarbeit von Konrad Götz. ISOE-Diskussionspapiere, Nr. 18

Kluge, Thomas/Alexandra Lux (2001): Privatisierung in der Wasserwirtschaft. Sozial-ökologische Forschungsperspektiven. ISOE-Diskussionspapiere, Nr. 17

Sons, Eric (2001): Innovative Forschungsaspekte „Nachhaltigen Wirtschaftens“. Identifikation der inhaltlichen Kernelemente einer BMBF-Förderinitiative. ISOE-Diskussionspapiere, Nr. 16

Weller, Ines (2000): Stand und Perspektiven ökologischer Innovationen im Textilbereich. Ergebnisse der ExpertInnenbefragung und -diskussion. ISOE-Diskussionspapiere, Nr. 15

Jahn, Thomas/Egon Becker/Immanuel Stieß (2000): Workshop: „Sozial-ökologische Forschung“. Protokoll des Workshops zur Einrichtung eines neuen Förderschwerpunkts „Sozial-ökologische Forschung“ des Bundesministeriums für Bildung und Forschung vom 30.6. bis 1.7.1999 in Bonn. ISOE-Diskussionspapiere, Nr. 14

Empacher, Claudia/Peter Wehling (1999): Indikatoren sozialer Nachhaltigkeit. Grundlagen und Konkretisierungen. ISOE-Diskussionspapiere, Nr. 13

Kluge, Thomas/Engelbert Schramm (1999): Sicherung der Innovationslinie Bio-Puten: Lösungsperspektiven für vermutete Akzeptanzprobleme. ISOE-Diskussionspapiere, Nr. 12

Götz, Konrad (1999): Ansprüche an ökologische Innovationen im Textilbereich. Zwischenergebnisse des BMBF-Projektes „Wissenstransfer“. ISOE-Diskussionspapiere, Nr. 11

Empacher, Claudia/Konrad Götz (1999): Ansprüche an ökologische Innovationen im Lebensmittelbereich. Ergebnisse einer Verbraucherbefragung im BMBF-Projekt „Wissenstransfer“. ISOE-Diskussionspapiere, Nr. 10

Empacher, Claudia (1998): Die Umweltrelevanz der Lebensmittelherstellung: Das Beispiel Joghurt und Geflügel. Zwischenergebnisse des BMBF-Projektes „Wissenstransfer“. ISOE-Diskussionspapiere, Nr. 9

Jahn, Thomas (2000): Social-Ecological Research – Conceptual Framework for a New Funding Policy. Synopsis of the Report for the German Federal Ministry of Education and Research. ISOE-Diskussionspapiere, Nr. 8

Götz, Konrad/Willi Loose/Steffi Schubert (2001): Forschungsergebnisse zur Freizeitmobilität. Zwischenergebnisse aus dem UBA-Projekt „Minderung der Umweltbelastungen des Freizeit- und Tourismusverkehrs“. ISOE-Diskussionspapiere, Nr. 7

Empacher, Claudia/Engelbert Schramm (1998): Ökologische Innovation und Konsumentenbeteiligung. ISOE-Diskussionspapiere, Nr. 4

Kluge, Thomas (1998): Das ökologische, ökonomische und soziale Potential von Umweltabgaben am Beispiel der Grundwasserabgabe. ISOE-Diskussionspapiere, Nr. 3

Schultz, Irmgard (1998): Umwelt- und Geschlechterforschung – eine notwendige Allianz. ISOE-Diskussionspapiere, Nr. 2

Schramm, Engelbert (1998): Soziale Dimensionen nachhaltiger Wassernutzung. ISOE-Diskussionspapiere, Nr. 1

Informationen zu unserer Veröffentlichungsreihe ISOE-Diskussionspapiere, zu unseren weiteren Veröffentlichungsreihen und zu Bestellmöglichkeiten unter:

<http://www.isoe.de/literat/matlit.htm> sowie in unserem Literatur-Flyer, der über das Institut angefordert werden kann:

Institut für sozial-ökologische Forschung (ISOE) GmbH
Hamburger Allee 45
60486 Frankfurt am Main
Tel.: +49 (69) 707 69 19 0
Fax: +49 (69) 707 69 19 11
E-Mail: info@isoe.de

Das Institut für sozial-ökologische Forschung (ISOE)

1988 in Frankfurt am Main als gemeinnütziges Forschungsinstitut gegründet, hat das ISOE Pionierarbeit zur Begründung der sozial-ökologischen Forschung in Deutschland geleistet. Das besondere Profil des Instituts besteht darin, sozialwissenschaftliche und naturwissenschaftlich-technische Umweltforschung fachübergreifend zu betreiben und mit dem Wissen verschiedener sozialer Akteure und Akteursgruppen zu verknüpfen. Das Institut gehört damit zu den wenigen Forschungseinrichtungen zur theoriegeleiteten, aber zugleich umsetzungsorientierten Erzeugung transdisziplinären Wissens im Spannungsfeld von Natur und Gesellschaft.

Unsere Informationsangebote:

Webpräsenz: <http://www.isoe.de>

ISOE-Newsletter Soziale Ökologie (vierteljährlich):

<http://www.isoe.de/service/newsjbf.htm>

ISOE-Newsletter Social Ecology (zweimal jährlich):

<http://www.isoe.de/english/nlorderf.htm>