thermischen Behandlung zu unterziehen. Dass es sich hierbei gemäß Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz um ein Verfahren der Entsorgung zur "Beseitigung" handelt und nicht um eine "thermische Verwertung" dürfte damit hinreichend belegt sein. In diesem Zusammenhang kann allenfalls das Prädikat der "thermischen Nutzung" der in den zu beseitigenden Abfallstoffen enthaltenen Energien herangezogen werden.

Trotz der Erzeugung/Konditionierung von brennbaren Stofffraktionen aus Klärschlamm, getrennt gesammelten biogenen Abfallstoffen bzw. aus Müll/Restmüll zielen diese Verfahren stets auf die Entsorgung durch Beseitigung ab und nicht auf eine Verwertung. Da die aktuelle Gesetzeslage jedoch eine Verwertung der genannten Stoffe präferiert, ist hier für die Entsorgungspflichtigen ein flächenhaftes Dilemma mit erheblicher Rechtsunsicherheit gegeben.

Unter den Gesichtspunkten der Bodenschutzgesetzgebung und der gegebenen Restrisiken bei einer stofflichen Verwertung ist in der aktuellen Rechtsdiskussion bisher ungeklärt, ob sich aus den Forderungen der Abfallgesetzgebung wirklich eine "Verwertungspflicht" ableiten lässt.

Literatur

ATV-Fachausschuss 3.2: Arbeitsbericht "Maschinelle Schlammmentwässerung", Korrespondenz Abwasser, S. 271-285 (1995)

Kontakt

Dr.-Ing. Ulrich Loll
Institut für Technischen Umweltschutz (ITU)
Sachsenstraße 1A, D-64297 Darmstadt
Tel.: + 49 (0) 6151/55034
Fax: + 49 (0) 6151/55035

»

Energetische Nutzung biogener Abfälle

von L. Leible, E. Nieke, A. Arlt, H. Seifert, B. Fürniß, Forschungszentrum Karlsruhe (ITAS bzw. ITC-TAB)

Es werden Zielsetzung, Aufbau und erste Ergebnisse aus einer Studie von ITAS zum Themenbereich Energiegewinnung aus biogenen Abfällen vorgestellt. Dabei wird Bezug auf aktuelle Entwicklungen in der Abfallwirtschaft genommen und Daten zum Aufkommen der biogenen Abfälle präsentiert. Dem Themenbereich Erfassung und Transport (Logistik) und der Aufbereitung (Konditionierung) der biogenen Abfälle zu Brennstoffen ist ein Schwerpunkt gewidmet. Abschließend werden erste Abschätzungen zum Stand und Potential der Stromgewinnung aus biogenen Abfällen gegeben.

1 Bedeutung und Zielsetzung

Die Entwicklungschancen aber auch -risiken, die im Zusammenhang mit der energetischen Nutzung von biogenen Abfällen gesehen werden, müssen v.a. vor dem Hintergrund von zwei derzeit erkennbaren Entwicklungen diskutiert werden. Zum einen sind dies die aktuellen Entwicklungstendenzen und die Zielsetzungen, die bei der Verwertung und Entsorgung von Abfällen zu beobachten sind bzw. verfolgt werden. Zum zweiten zielen aktuelle politische Bestrebungen darauf ab, den Anteil der erneuerbaren Energieträger an der Energieversorgung deutlich zu erhöhen. Dabei wird den biogenen Energieträgern eine dominante Rolle zugerechnet.

Auf nationaler Ebene ist hier vor allem die TASI (Technische Anleitung Siedlungsabfall, 1993) zu nennen, die ab 2005 – bei strenger Auslegung – eine Deponierung biogener Abfälle untersagt bzw. nur nach thermischer Behandlung erlaubt (vgl. Beitrag von K. Fricke). Zunehmend muss auch zur Kenntnis genommen werden, dass die Vermarktung der in steigendem Maße produzierten Kompostmengen – und somit die stoffliche Nutzung von biogenen Abfällen – an Grenzen stößt. Ähnlich bedenklich ist die festgestellte, zunehmende Überdüngung

der Hausgärten zu beurteilen, die eine Eigenkompostierung teilweise sehr fragwürdig erscheinen lassen. Die Ausbringung von Klärschlämmen auf landwirtschaftliche Flächen ist unter Vorsorgeaspekten in gleicher Weise zu hinterfragen.

Auf der EU-Ebene sind in den vergangenen drei Jahren in diesem Zusammenhang v.a. zwei wichtige politische Zielsetzungen in Form einer Richtlinie bzw. eines Weißbuches formuliert worden. In der "Europäischen Deponierichtlinie" (Council of EC, 1999) wurden verbindliche Ziele für die Reduktion der Deponierung biologisch abbaubarer Abfälle formuliert (vgl. Beitrag von D. Brune). Des Weiteren hat sich die EU-Kommission (Commission of EC, 1997) in ihrem Weißbuch zu erneuerbaren Energien das Ziel gesetzt, bis 2010 den Anteil erneuerbarer Energieträger in der EU zur Deckung des Primärenergiebedarfs auf 12% zu verdoppeln; in Deutschland liegt dieser Anteil derzeit bei rd. 2%. Die in ihrem Weißbuch durchgeführten Abschätzungen der EU-Kommission zeigen, dass dieser Zuwachs der erneuerbaren Energieträger zu über 80% über die energetische Nutzung von Biomasse, einschließlich biogener Abfälle, erfolgen muss.

Vor diesem Hintergrund gewinnt die energetische Nutzung der biogenen Abfälle an Bedeutung, da sie einerseits nicht mehr deponiert werden sollten, andererseits aber einen Beitrag – als erneuerbare Energieträger – zur Deckung unseres Primärenergiebedarfs leisten könnten. Darüber hinaus ist zu erwarten, dass durch die energetische Nutzung dieser biogenen Abfälle zusätzliche Umweltvorteile, gerade im Hinblick

auf klimarelevante Spurengase und ökotoxikologisch relevante Emissionen, erschlossen werden können.

2 Studie zur energetischen Nutzung biogener Abfälle – Aufbau und Zielsetzung

Vor dem Hintergrund der in Kapitel 1 ansatzweise geschilderten aktuellen Entwicklungen und politischen Zielsetzungen wurde im ITAS eine systemanalytische Studie zur energetischen Nutzung biogener Abfälle begonnen.

Diese Studie hat zum Ziel, zu untersuchen, welchen Beitrag die energetisch effiziente Nutzung von biogenen Abfällen, als regenerative Energieträger, zur Energiedeckung in Deutschland leisten kann und welche Rahmenbedingungen hierzu nötig sind. Neben Potentialabschätzungen stehen hierbei vor allem vergleichende Analysen und Bewertungen zu den neueren Verfahren und Konzepten der energetischen Nutzung von biogenen Abfällen im Vordergrund. Hierdurch werden u.a. Vergleichsmöglichkeiten zur energetischen Nutzung von Biomasse aber auch zu anderen regenerativen und nicht regenerativen Energieträgern erschlossen. Aufgezeigte Alternativen können so zu einer Veränderung in der Prioritätensetzung bei den politischen Rahmenbedingungen und nicht zuletzt bei den Fördermaßnahmen führen. Ein vereinfachtes Blockschema zum Aufbau und den Schwerpunkten dieser Studie ist in Abbildung 1 dargestellt.

Abb. 1: Vereinfachtes Blockschema zum Aufbau und den Schwerpunkten der Studie zur energetischen Nutzung biogener Abfälle

Die Studie ist hinsichtlich der nach technischen, ökonomischen und umweltrelevanten Kenngrößen zu untersuchenden Technikbereiche im Wesentlichen in drei Blöcke aufgegliedert, nämlich in die Bereiche Logistik (Erfassung, Transport), Konditionierung und den Bereich der energetischen Nutzung. Die Untersuchungen und Bewertungen werden in Form von Prozesskettenanalysen – von der Erfassung bis zur energetischen Nutzung der Abfälle – durchgeführt, ergänzt um die Analyse von Mengenszenarien. Ausgangspunkt für solche Mengenszenarien sind umfassende Abschätzungen zum Aufkommen an biogenen Abfällen in Deutschland – erste Ergebnisse hierzu werden in Kapitel 3 vorgestellt.

3 Abfallaufkommen

Das Aufkommen an biogenen Abfällen spielt insbesondere in der Land- und Forstwirtschaft aber auch im Produzierenden Gewerbe und bei der Öffentlichen Abfallentsorgung eine große Rolle. Erste Abschätzungen für Deutschland (Basis 1997) zeigen beispielsweise, dass das jährliche Aufkommen an biogenen Abfällen,

das für eine energetische Verwertung in Frage kommt, bei rd. 70 bis 80 Mio. Mg oTS (organische Trockensubstanz) liegt. Dies entspricht rd. einem Drittel der jährlichen oberirdischen Biomasseproduktion in Deutschland. Dieses Aufkommen an biogenen Abfällen von rd. 0,9 Mg oTS pro Einwohner und Jahr entspricht einem Heizwert von rd. 450 l Heizöl.

Mehr als zwei Drittel des angeführten energetisch nutzbaren Aufkommens an biogenen Abfällen fallen in der Land- und Forstwirtschaft an (s. Abb. 2) und werden derzeit nicht bzw. nur in vernachlässigbarem Umfang genutzt. Das verbleibende Drittel fällt bei der Öffentlichen Abfallentsorgung und im Produzierenden Gewerbe an und setzt sich v.a. aus Altholz, Papier, Pappe, Klärschlamm, Küchen-, Garten- und Pflegeabfällen zusammen. Aus Abbildung 2 wird darüber hinaus deutlich, dass einerseits relativ trockene Abfälle, wie z.B. Stroh, Holz, Papier (Restmenge, derzeit noch nicht recycelt), andererseits sehr feuchte biogene Abfälle, wie z.B. Klärschlamm, Gülle oder Küchenabfälle, das Abfallaufkommen bestimmen.

Abb. 2: Herkunft und Art der biogenen Abfälle in Deutschland

Quelle: Abschätzungen in Anlehnung an BML 1999; Stat. BA 1996 u. 1997; u.a.

Die Abschätzungen zum Bereich der Öffentlichen Abfallentsorgung und des Produzierenden Gewerbes haben vorläufigen Charakter. Hier müssen noch die Ergebnisse der amtlichen Statistik des Statistischen Bundesamtes für die Jahre 1996 und 1997 (bisher nur für 1993 verfügbar) abgewartet werden.

Das in Deutschland von der öffentlichen Hand erfasste Aufkommen an Restmüll (Hausmüll, Sperrmüll, haushälterischer Gewerbeabfall) hat sich seit 1990 von rd. 52,5 Mio. Mg mehr als halbiert und lag 1997 bei rd. 25,2 Mio. Mg (Abb. 3). Im gleichen Zeitraum verdreifachte sich das erfasste Aufkommen an Wertstoffen und Bio-/Grünabfällen von rd. 6,2 Mio. Mg (1990) auf 18,4 Mio. Mg (1997). Vom Aufkommen an Restmüll wurden 1997 rd. 5% stofflich verwertet, 35% in Müllverbrennungsanlagen verbrannt und 60% deponiert.

Abb. 3: Entwicklung des Aufkommens an Hausmüll, haushälterischem Gewerbeabfall, Bio-/Grünabfall und Wertstoffen in Deutschland

Quelle: Angaben für 1990 und 1993: Stat. BA 1994 u. 1996 (Öffentliche Abfallbeseitigung)

Angaben für 1997: Eigene Auswertung anhand der Abfallbilanzen der 16 Bundesländer

In der EU werden nach Angaben der OECD (1997), auf der Basis des Jahres 1995 bzw. früherer Jahre (soweit Daten der Mitgliedsländer nicht verfügbar waren), mehr als zwei Drittel der kommunalen Siedlungsabfälle deponiert, rd.

18% verbrannt, 6% kompostiert und 10% stofflich verwertet. Es ist somit offensichtlich, welche dominierende Stellung derzeit in nahezu allen Ländern der EU die Deponierung von Abfällen einnimmt (vgl. Kap. 1). Der Grund hierfür liegt darin, dass das billigste Verfahren der Abfallentsorgung auch heute noch die Deponierung ist, insbesondere dann, wenn Deponien (vor allem ältere) auf niedrigem technischen Stand zum Einsatz kommen.

Wie sich bereits aus der Zusammenstellung des Aufkommens an biogenen Abfällen andeutet (vgl. Abb. 2), sind für die Erfassung der Abfälle und ihre Konditionierung zu einem lagerfähigen Ersatzbrennstoff sehr unterschiedliche technische Verfahren erforderlich. In den nachfolgenden Kapiteln 4 und 5 wird dies exemplarisch verdeutlicht.

4 Logistische Aspekte der Abfallsammlung

Bioabfälle fallen in vielen Bereichen an (vgl. Tab. 1). Strukturarme Bioabfälle sind vor allem Reste der Nahrungszubereitung und Speisereste von Haushalten, aber auch Grasschnitt, Fallobst und Laub. Unter strukturreichen Bioabfällen versteht man Baum- / Strauchschnitt und Grünschnitt.

Bekannte Probleme bei der Erfassung von biogenen Abfällen sind aus der Sicht des Entsorgers:

- oft geringer Anschlussgrad in ländlichen Gebieten, hoher Anschlussgrad in städtischen Gebieten,
- hohes sammelbares Bioabfallpotential in ländlichen Gebieten, geringe Mengen in städtischen Gebieten,
- hoher Zeitaufwand für Fahrten in ländlichen Gebieten,
- hoher Zeitaufwand für Entleerung in städtischen Gebieten,
- erhöhter Fahrzeugbedarf für Getrennsammlung,
- geringe Fahrkosten, aber erheblicher Personaleinsatz.

Tab. 1: Typische Abfälle, die über ein Holsystem eingesammelt werden

Haushalte	Produzierendes Gewerbe, Handwerk	Kommunen	Gaststätten, Kantinen, Hotels
Restmüll	Restmüll	Restmüll	Restmüll
Wertstoffe (Papier, Pappe, Kunststoffe, Glas, Metalle)	Wertstoffe (Papier, Pappe, Kunststoffe, Glas, Metalle)	Wertstoffe (Papier, Pappe, Kunststoffe, Glas, Metalle)	Wertstoffe (Papier, Pappe, Kunststoffe, Glas, Metalle)
Verpackungen	Verpackungen	Straßenkehricht und Sinkkasteninhalte	Verpackungen
Bioabfälle, strukturararm	Bioabfälle, strukturararm	Klärschlamm	Speiseabfälle
Bioabfälle, strukturreich	Bioabfälle, strukturreich	Abfall aus der Kanalreinigung	Friteusenfett oder Fettabscheiderrückstände
Spermmüll	Produktionsabfälle	Marktabfälle	
Sonderabfälle	Sonderabfälle		

4.1 Behältersysteme zur Sammlung der Abfälle

Bei der Auswahl der Behälter muss das zugehörige Schüttgewicht der Abfälle berücksichtigt werden. Altglas hat Schüttgewichte zwischen 300 und 320 kg/m³, Altpapier erreicht gepresst Werte über 600 kg/m³. Das Schüttgewicht von biogenen Abfällen aus der Biotonne schwankt sehr im Jahresverlauf und ist abhängig von dem Anteil des strukturreichen Materials (Baum- und Heckenschnitt); Schüttdichten von 50 bis 700 kg/m³ sind möglich.

Gebrauchliche Behälter für die Abfallsammlung sind:

- für *Haushalte und Kleingewerbe*
 - klassische "Mülltonnen" von 80 l bis 240 l
 - Mülltonnen mit zwei oder drei Kammern (Mehrkammertonnen)
 - der "gelbe Sack" für das DSD-System
 - 1,1 m³ Umleerbehälter (auch für die separate Erfassung von Wertstoffen)
- für *Produzierendes Gewerbe und Handel*, z.T. für zentrale Sammelplätze
 - Absetzcontainer – offen oder gedeckelt – von 3-12 m³
 - Abrollcontainer von 5-40 m³
 - Selbstpresscontainer
 - speziell belüftete "Biotonnen" für die Grünabfallsammlung.

4.2 Sammel- und Logistiksysteme (Transportfahrzeuge)

Die Sammelfahrzeuge müssen zu den Sammelbehältern passen. So werden auch im Bereich der Bioabfälle ähnliche Fahrzeuge und Aufbau-systeme verwendet, wie im Bereich der Restmüll-Entsorgung oder bei der Wertstoffsammlung. Generell ist zu unterscheiden, ob am Ort des Abfallerzeugers umgeladen wird (Mülltonnenentleerung) oder ob das Sammelgefäß zusammen mit dem Inhalt abtransportiert wird (Behältertauschsystem).

Als wichtige, in der Praxis vorkommende Sammel- und Logistiksysteme sind zu nennen:

- Behältersysteme zum Austausch (z.B. für Speisereste)
- Umladesysteme mit herkömmlichen Müllsammelfahrzeugen (z.B. Restmüll)
- Müllsammelfahrzeuge mit Seitenladertechnik (z.B. Restmüll)
- Mehrkammerfahrzeuge (z.B. Restmüll + Bioabfall)
- Absetzcontainerfahrzeuge (z.B. Baustellenabfall)
- Abrollcontainerfahrzeuge (z.B. Baustellenabfall)
- Saugfahrzeuge (z.B. Klärschlamm).

4.3 Kosten für das Erfassen und Transportieren von Restmüll und Bioabfall

Die gegenwärtigen gesetzlichen Rahmenbedingungen erfordern die getrennte Erfassung von Wertstoffen, Bioabfällen und Restmüll. Nachfolgend sind erste Kostenabschätzungen zur getrennten bzw. gemeinsamen Erfassung und Transport von Bioabfall und Restmüll zusammengestellt. In diesen Angaben sind keine Kosten für die Entsorgung (z.B. Deponie, Müllverbrennungsanlage) bzw. die Kompostierung enthalten. Behälterkosten und Verwaltungsausgaben sind ebenfalls noch nicht berücksichtigt.

Aufgrund der vielen verschiedenen Systeme der Erfassung und des Transports von Abfällen sind Kostenabschätzungen nur schwer durchzuführen. Deshalb wird an dieser Stelle exemplarisch versucht, mittels einer Modellgemeinde mit 5000 Einwohnern und ländlicher Struktur, die möglichen Unterschiede bei den Sammlungskosten zu verdeutlichen. Es wird vereinfachend davon ausgegangen, dass pro Einwohner 150 kg Restmüll und 100 kg Bioabfall im Jahr anfallen. Etwa 65% der Einwohner nutzen das Angebot der Biotonne (Anschluss-

grad). Die Anfahrt beträgt 20 km, die Leerung aller Behälter erfolgt 14-tägig.

Die Gesamtkosten pro Jahr liegen für die Modellgemeinde bei der getrennten Erfassung mit 109 000 DM ca. 20% über dem früheren System (vgl. Tab. 2). Durch die Einführung der Mehrkammertonnen vor einigen Jahren ließ sich dieser Mehraufwand deutlich reduzieren, allerdings wurde auch weniger Bioabfall, wegen der zusätzlichen Gebühren, eingesammelt. Am ungünstigsten liegen die Sammelkosten für die reine Biotonne. Die Entsorgungsfirmen weisen zudem darauf hin, dass aufgrund starker jahreszeitlicher Schwankungen des Biomasseanfalls die obige Kalkulation im Ergebnis noch deutlich ungünstiger werden kann. Der hohe Anteil der Personalkosten an den Sammlungskosten lässt vermuten, dass Kostenreduzierungen nur über Einsparungen an den Personalausgaben effektiv möglich sind. Dies wurde von den Entsorgungsfirmen ebenso erkannt und die Fahrzeug- wie auch Aufbauhersteller aufgefordert, Einmann-Geräte zu entwickeln. Im Rahmen unserer Studie werden diese Aspekte näher analysiert.

Tab. 2: Kosten für die Erfassung und für den Transport von Bioabfall und Restmüll

Sammelsystem	früheres System: Restmüll und Bioabfall zusammen	nur Restmüll-sammlung	nur Bioabfall	Mehrkammersystem: Restmüll u. Bioabfall im selben Behälter
Investition für Fahrzeug	360 000 DM	360 000 DM	360 000 DM	420 000 DM
Anzahl der Touren	2 pro Tag	2 pro Tag	1 pro Tag	2 pro Tag
Sammelstrecke am Tag	12 km	16 km	13,5 km	12 km
durchschnittl. Inhalt eines Behälters	18 kg Restmüll + 12 kg Bioabfall ¹⁾	19 kg Restmüll	15 kg Bioabfall	18 kg Restmüll + 9 kg Bioabfall
Anzahl der geleerten Behälter pro Jahr und durchschn. Haushalt	21	20	12	21
Gesamtkosten für Leerung und Abtransport	91 000 DM pro Modellgemeinde	67 000 DM	42 000 DM	95 000 DM pro Modellgemeinde
		pro Modellgemeinde zusammen 109 000 DM		
Leerungskosten pro Mg	76 DM	121 DM	206 DM	88 DM
Leerungskosten pro durchschn. Behälter	2,23 DM	1,73 DM	2,00 DM	2,34 DM
Leerungskosten pro durchschn. Haushalt	47 DM / a	59 DM / a		49 DM / a
Personalkostenanteil	67 %	67 %	71 %	65 %

¹⁾ Da keine Zusatzgebühren für den Bioabfall: 90% Anschlussgrad

Quelle: Berechnungen in Anlehnung an Gallenkemper et al. 1995 und Daten von verschiedenen Entsorgungsfirmen

Die genannten Kostenfaktoren erfordern einen flexiblen Einsatz der Sammelfahrzeuge. So ist es für einen Disponenten hilfreich, nicht nur zu wissen, an welchem Ort seine Fahrzeuge sich gerade befinden. Zusätzliche Kenntnisse über den aktuellen Fortschritt der Sammlung und den Füllgrad des Containers erschließen weitere Optimierungsmöglichkeiten. Das Stichwort hierfür heißt satellitengestütztes Dispositions- und Ortungssystem. Voraussetzung hierfür ist, dass die Fahrzeuge des Entsorgers mit Satellitenempfängern und Bordrechnern ausgerüstet und per Bündelfunk mit dem Dispositionscomputer verbunden sind.

5 Aufbereitung biogener Abfälle (Konditionierung)

Die Aufbereitung (Konditionierung) stellt einen wesentlichen Untersuchungsbereich der im ITAS durchgeführten Studie dar (vgl. Abb. 4). Sie muss die Kluft zwischen den physikalisch-chemischen Eigenschaften der biogenen Abfälle und den Qualitätsanforderungen an einen lagerfähigen, trockenen Ersatzbrennstoff überbrücken. Biogene Abfälle sind in ihrem ursprünglichen Zustand oft sehr feucht (z.B. TS-Gehalt bei Klärschlamm von 3 - 5%), teilweise inhomogen, stückig, mit Fehlwürfen verunreinigt, stark riechend oder hygienisch bedenklich. Sie können deswegen in dieser Form in der Regel nicht als Ersatzbrennstoff (EBS) gelagert bzw. einer energetischen Verwertung zugeführt werden. Die energetischen Verwertungsverfahren stellen an EBS aus Biomasse definierte Anforderungen hinsichtlich Heizwert, Stückigkeit, Korngröße, Homogenität oder Konzentration an Schad- und Problemstoffen.

Für die dauerhafte Lagerfähigkeit eines biogenen Brennstoffs ist ein Trockensubstanzgehalt von mindestens 90% erforderlich. Für eine thermische Verwertung von Abfällen sind außerdem die im Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz (KrW-/AbfG) vorgegebenen Anforderungen an den Heizwert (11.000 kJ/kg, § 6(2), KrW-/AbfG, 1994) und an den Immissionsschutz (BImSchG, 1990; 13. BImSchV, 1983; 17. BImSchV, 1990) zu berücksichtigen. All diese Anforderungen machen eine strenge Qualitätskontrolle des Ersatzbrennstoffs erforderlich.

5.1 Vorgehen und Konzept

Aufgrund ihres großen Anteils am Gesamtaufkommen an biogenen Abfällen, des bestehenden Entsorgungsdrucks, der aktuellen Diskussion der Fachwelt (vgl. Diskussion um die Mechanisch-biologischen Anlagen (MBA)) und des für die Aufbereitung erforderlichen, unterschiedlichen, verfahrenstechnischen Aufwands wurden folgende vier Abfallarten für eine nähere Betrachtung ausgewählt: *Klärschlamm*, *strukturarme Bioabfälle* (Küchen- und Bioabfälle aus Haushalten), *struktureiche Bioabfälle* (Pflegeabfälle aus Gärten, Parks, der Landschaftspflege) und *Restmüll* (inklusive der biogenen Fraktion).

In Tabelle 3 sind die für die Aufbereitung der verschiedenen biogenen Abfallarten erforderlichen wesentlichen Verfahrensschritte in der Übersicht dargestellt. Die Verfahrensketten für die Aufbereitung von Klärschlamm und Restmüll waren bereits schematisch in Abbildung 4 abgebildet. Sie verdeutlichen beispielhaft die Unterschiedlichkeit der Verfahrensketten in Abhängigkeit vom biogenen Abfall.

Tab. 3: Verfahrensschritte in Abhängigkeit vom aufzubereitenden biogenen Abfall

Biogener Abfall Verfahrensmodul	Klär- schlamm	strukturarme Bioabfälle	struktureiche Bioabfälle	Restmüll mit biogener Fraktion
Stabilisieren	+	+	-	o
Entwässern (mechanisch)	+	+	-	o
Trocknen	+	+	+	+
Sortieren, Ausschleusen von Fehlwürfen	-	+	+	+
Abscheiden von Metallen	-	o	o	+
Homogenisieren, Zerkleinern	-	+	+	+
Komprimieren	o	o	o	o
Verpacken	-	o	o	o

+ : erforderlicher Verfahrensschritt; - : nicht erforderlicher Verfahrensschritt; o : unter best. Bedingungen sinnvoller Verfahrensschritt

Anmerkung: Die Tabelle erhebt keinen Anspruch auf Vollständigkeit

Abb. 4: Betrachteter Bilanzraum für die Konditionierung von biogenen Abfällen

5.2 Aufbereitung biogener Abfälle – Beispiel Klärschlamm

Die Analyse der Einzelmodule zur Konditionierung biogener Abfälle wurde beim Klärschlamm begonnen, da Klärschlamm eine große Vielseitigkeit hinsichtlich seiner Konsistenz – vom flüssigen Rohschlamm (3-5% TS) bis zum festen Schlamm (über 90% TS) – aufweist. Außerdem wird für seine Konditionierung schon seit Jahrzehnten eine vielfältige Verfahrenstechnik eingesetzt. Den ersten Verfahrensschritt stellt beim Klärschlamm i.d.R. die Stabilisierung dar (vgl. Abb. 4), weil der Roh-

schlamm ein idealer Nährboden für Mikroorganismen darstellt und deshalb spontan zu anaeroben Abbauprozessen (Geruchsbelästigung) neigt.

Dies kann durch aerobe oder anaerobe Stabilisierungsverfahren erfolgen, bei denen ein Teil des im Schlamm enthaltenen organischen Materials so um- bzw. abgebaut wird, dass er sich nach der Behandlung gegenüber mikrobiologischen Prozessen weitgehend stabil verhält.

Bei der anaeroben Stabilisierung (Vergärung) wandeln anaerobe Mikroorganismen unter Abwesenheit von freiem Sauerstoff bis zu 50%

der Biomasse in Faulgas um, das durchschnittlich 65 Vol-% Methan (CH_4) und ca. 35 Vol-% Kohlendioxid (CO_2) enthält. Die Gasausbeuten liegen bei der mesophilen Vergärung (Betriebstemperaturen: 35 - 39 °C), bei 400 bis 500 l/kg oTS, was ca. 24 l/EW*d entspricht (ATV, 1996). Eigene Umfrageergebnisse (1999) unter 15 deutschen Kläranlagen (Größenklasse (GK) 5 > 100.000 EW Anschlusswert) erbrachten eine durchschnittliche Gasausbeute von 22 l/EW*d, was einem Energieertrag von 52 kWh/EW*a entspricht (65% CH_4 , Heizwert H_u von Methan: 10 kWh/Nm³).

Das Faulgas wird nach kurzer Zwischenlagerung (max. 1-2 Tage) und Aufbereitung (Entschwefelung, Entwässerung) meist in Blockheizkraftwerken (BHKW) zur Erzeugung von Strom und Wärme genutzt. Die modernen BHKW erreichen elektrische Wirkungsgrade von 36-38% und Wärmewirkungsgrade von 50%. Die aus dem Faulgas gewonnene Energie steht zur Deckung des Wärme- und Strombedarfs der anaeroben Stabilisierung und der anderen Stromverbraucher auf der Kläranlage zur Verfügung. Zeitlich überschüssiger Strom kann zu den gesetzlichen Einspeisevergütungen (Stromeinspeisegesetz, 1994) ins vorgelagerte Netz des Energieversorgungsunternehmens (EVU) eingespeist werden.

Die anaerobe Behandlungsstufe benötigt Wärme für die Aufheizung des Schlammes auf Betriebstemperatur, den Ausgleich des Wärmeverlusts durch Abstrahlung und Strom für die Umwälzung des Schlammes. Abbildung 5 zeigt die Strom- und Wärmebilanz für eine Kläranlage (KA) der Größenklasse 3 (GK 3) mit 5.000 bis 10.000 Einwohnergleichwerten (EW) und eine Kläranlage der GK 5 (> 100.000 EW), normiert auf den Jahresstrom- bzw. -wärmebedarf der Gesamtanlage. Es zeigt sich, dass der Stromertrag aus der anaeroben Stabilisierung ihren Strombedarf um ein Vielfaches (3,3- bzw. 6,3-fach) übersteigt und den Strombedarf der

Gesamtanlage zu ca. 35 bzw. 72% decken kann. Der Wärmebedarf der Anaerobie kann durch die Motorabwärmenutzung des BHKW zu 98% bzw. ca. 140% gedeckt werden. Diese Zahlen belegen in energetischer Hinsicht die großen Vorzüge der anaeroben gegenüber der aeroben Stabilisierung. Bei den aeroben Stabilisierungsverfahren wird die Biomasse ebenfalls zu 50% abgebaut, ihr Energiepotential bleibt jedoch ungenutzt. Darüber hinaus liegt bei der aeroben Stabilisierung der auf den CSB-Abbau bezogene Strombedarf um den Faktor 5 bis 6 höher als bei der anaeroben Stabilisierung. Ausschlaggebend hierfür ist der für die Belüftung der Stabilisierungs- bzw. Belebungsbecken erforderliche hohe Strombedarf, der bei kleinen Kläranlagen (GK 3) bis zu 60% des Gesamtstrombedarfs betragen kann.

Die Auswertung von Referenzlisten führender BHKW-Anbieter erbrachte, dass der Großteil der auf Kläranlagen installierten BHKW-Module im Leistungsbereich zwischen 15 und 250 kW mit zwei Anzahlmaxima bei ca. 20 und 120 kW liegt. Diese Größenverteilung wirkt sich negativ auf die Stromgestehungskosten des auf Kläranlagen produzierten Stroms aus.

Dies verdeutlicht ein Vergleich der spezifischen Investitionen pro kW. Diese liegen für BHKW mit 20 kW, 120 kW oder 1000 kW Leistung bei rd. 3500 DM, 1900 DM bzw. 1000 DM. Welche Auswirkungen dies auf die Stromgestehungskosten hat veranschaulichen die Kalkulationen für eine Kläranlage der Größenklasse 3 und 5 (vgl. Tab. 4). Bei der kleinen Kläranlage (GK 3) resultieren Stromgestehungskosten von rd. 22 bzw. 113 Pf/kWh_{el}, je nachdem, ob die Investitionen für den Faulturm aus- oder eingeschlossen sind. Analog dazu liegen die Stromgestehungskosten bei der größeren Kläranlage (GK 5) bei rd. 3 bzw. 14 Pf/kWh_{el}, und sind somit deutlich günstiger.

Abb. 5: Strom- und Wärmebilanz einer Kläranlage unterschiedlicher Größe **Tab. 4: Stromgestehungskosten auf Kläranlagen**

	KA GK 3 ohne Faulturminvest.	KA GK 3 mit Faulturminvest.	KA GK 5 ohne Faulturminvest.	KA GK 5 mit Faulturminvest.
Anzahl und elektrische Leistung (kW) der BHKW	1 Modul mit 24 kW _{el}		2 Module mit 170 kW _{el} 1 Modul mit 490 kW _{el}	
Investition BHKW (DM)	144.100	144.100	1.030.000	1.030.000
Investition Spitzenkessel (DM)	39.100	39.100	15.000	15.000
Investition Faulturm (DM)	0	1.701.600	0	6.729.000
Gesamtinvestition (DM)	183.200	1.884.800	1.045.000	7.774.000
Kapitalkosten ohne Faulturm (DM/a) (Annuität mit 5,0 % Zins, 15 a)	17.650	17.650	100.678	100.678
Kapitalkosten Faulturm (DM/a) (Annuität mit 5,0 % Zins, 50 a)	0	93.208	0	368.592
Instandhaltung (DM/a)	7.140	7.140	62.500	62.500
Personal (DM/a)	4.000	4.000	8.000	8.000
Summe Kosten (DM/a)	28.790	121.998	171.178	539.770
Stromproduktion (kWh/a)	102.000	102.000	3.400.000	3.400.000
Wärmeerlöse (DM/a)	6.334	6.334	66.452	66.452
Stromgestehungskosten (Pf/kWh) ohne Wärmeerlös	28,23	119,61	5,03	15,88
Stromgestehungskosten (Pf/kWh) mit Wärmeerlös	22,02	113,40	3,08	13,92

Annahme: Neuinvestition im Jahre 1999; Berechnungen nach VDI 2067 bzw. LAWA, 1993

Aus den Ergebnissen wird deutlich, dass auch mit dem von der Bundesregierung geplanten Gesetz zur Förderung der Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien (EEG, 1999) – als Ersatz für das Stromeinspeisegesetz (1994) – bei einer (geplanten) Vergütung von 15 Pf/kWh für Anlagen < 500 kW_{el} noch keine Kostendeckung erreicht wird. Die für Anlagen > 500 kW_{el} vorgesehenen 13 Pf/kWh können, bei Einbeziehung der Kapitalkosten für den Faulturm, fast zu einer Kostendeckung führen. Mit Blick auf die Kläranlagenstruktur in Deutschland müssten folglich kleine Anlagen noch stärker finanziell unterstützt werden, damit die anaerobe Nutzung kleiner Rohschlamm-mengen zur Stromproduktion ökonomisch wettbewerbsfähig wird. Zusätzlich könnte die Co-Fermentation von Bioabfällen in den Faultürmen der Kläranlagen, auch mit Blick auf eine bessere Auslastung, eine interessante Option darstellen.

6 Beitrag biogener Abfälle zur Stromproduktion – Stand und Perspektiven

In den vorangegangenen Kapiteln 4 und 5 wurde exemplarisch beschrieben, welche Bedeutung die Logistik und Konditionierung für die Bereitstellung energetisch nutzbarer Abfälle haben. Nachfolgend sind Ergebnisse zum derzeitigen Stand und dem Potential der Stromgewinnung aus biogenen Abfällen dargestellt (vgl. Abb. 6). Diese Ergebnisse sind erste Abschätzungen und haben vorläufigen Charakter. Voraussetzung für genauere Abschätzungen sind zum einen das Vorliegen der amtlichen Statistik zur Abfallbeseitigung in Deutschland für die Jahre 1996 und 1997 (bisher nur für 1993 verfügbar) und die detaillierte Beschreibung der zugrundegelegten, energetischen Verwertungsverfahren.

Abb. 6: Stromgewinnung aus biogenen Abfällen: Stand und Perspektiven

Trotz der geschilderten Einschränkungen hinsichtlich der Belastbarkeit ist in Abbildung 6 gegenübergestellt, in welchem Umfang im Jahr 1995 Strom aus biogenen Abfällen gewonnen wurde, ergänzt um Abschätzungen für das Jahr 2005 und zum Potential insgesamt. Bei den Kalkulationen wurden eher konservative elektrische Wirkungsgrade unterstellt. Aus diesen ersten Abschätzungen lassen sich vorab bereits folgende Ergebnisse zusammenfassen:

Die derzeitige Verwendung biogener Abfälle zur Stromgewinnung hat in Deutschland eher marginalen Charakter. Mit rd. 3,8 TWh_{el} im Jahr 1995 wurden nur rd. 0,8% zur Deckung des Strombedarfs (ohne Netzverluste) beigetragen. Bestimmend hierfür sind v.a. die Stromgewinnung bei der Müllverbrennung und die Verstromung von Klärgas. Vergleicht man dies mit dem möglichen potentiellen Beitrag (rd. 44 TWh_{el}), dies entspricht annähernd 10% unseres derzeitigen Stromverbrauchs aus dem öffentlichen Netz, wird offensichtlich, welcher Aufwand hinsichtlich verbesserter Rahmenbedingungen noch betrieben werden müsste, um das angeführte Potenzial erschließen zu können. Aus Abbildung 6 ist ersichtlich, dass insbesondere im Bereich der Biomasseverbrennung und Biogasnutzung zur Stromgewinnung die größten Diskrepanzen zwischen dem möglichen Potential und der tatsächlichen Erschließung dieses Potentials bestehen. Hier könnten gerade die verbesserten Rahmenbedingungen nach dem vor der Verabschiedung stehenden "Erneuerbare-Energien-Gesetz" (EEG, 1999) zu neuem Schub verhelfen und insbesondere die Stromgewinnung aus Biomasse und Biogas verstärken. Offen bleibt in diesem Zusammenhang, durch welche Maßnahmen (Rahmenbedingungen) die energetische Nutzung von biogenen Energieträgern zur Bereitstellung von Nutzwärme verbessert werden könnte. Dies trifft insbesondere auch auf die Nutzung der Abwärme in MVA oder Kraftwerken zu.

Wie diese ersten Ergebnisse gezeigt haben, sind die Potentiale der energetischen Nutzung von biogenen Abfällen keinesfalls vernachlässigbar. Längerfristig könnten sie sogar die Stromgewinnung aus Wasserkraft oder Wind an Bedeutung überflügeln. Maßgebliche Voraussetzung hierfür ist jedoch, mit welchem Ehrgeiz von der Politik die Ziele der Erhöhung des Anteils an regenerativen Energieträgern oder der

umweltverträglichen Behandlung und Verwertung von Abfällen verfolgt werden.

Literatur

13. *BImSchV*, 1983: Dreizehnte Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (Verordnung über Großfeuerungsanlagen – 13. BImSchV) vom 22. Juni 1983, Bundesgesetzblatt, I, 719 ff.
17. *BImSchV*, 1990: Siebzehnte Verordnung zur Durchführung des Bundesimmissionsschutzgesetzes – Verordnung über Verbrennungsanlagen für Abfälle und ähnliche brennbare Stoffe vom 23. November 1990, Bundesgesetzblatt, I, 2545, ber. 2832; 1999, 186 ff.
- ATV, 1996: ATV (Abwassertechnische Vereinigung) – Handbuch Klärschlamm, Ernst & Sohn Verlag, Berlin, 729 S.
- BImSchG*, 1990: Gesetz zum Schutz vor schädlichen Umwelteinwirkungen durch Luftverunreinigungen, Geräusche, Erschütterungen und ähnliche Vorgänge (Bundes-Immissionsschutzgesetz – BImSchG), Fassung vom 14. Mai 1990, In: Umweltrecht, Verlag C.H. Beck, München, 1995, 963 S.
- BML*, 1999: Statistisches Jahrbuch über Ernährung, Landwirtschaft und Forsten 1999. Landwirtschaftsverlag, Münster-Hiltrup, 561 S.
- Commission of EC*, 1997: Energy for the future: Renewable sources of energy. White Paper for a Community strategy and action plan. Communication from the Commission. COM (97) 559 final (26/11/1997), Brussels
- Council of EC*, 1999: Council Directive 1999/31/EC of 26 April 1999 on the Landfill of Waste. Official Journal of the European Communities No L 182/1, 16.7.1999
- EEG*, 1999: Gesetz zur Förderung der Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien (EEG) – Entwurf, Gesetzentwurf der Bundestagsfraktionen SPD und Bündnis 90/Die Grünen, Dezember 1999
- Esch, B., Krüger, G.*, 1999: Entsorgung von Kläranlagenrückständen, Korrespondenz Abwasser, 46, 6, 943-952
- Gallenkemper, B., Gellenbeck, K., Dornbusch, H.-J.*, 1995: Gebührensysteme und Abfuhrhythmen in der kommunalen Abfallwirtschaft, Erfahrungen und Handlungsempfehlungen. Abfallwirtschaft in Forschung und Praxis 91, Erich Schmidt Verlag, Berlin
- KrW-/AbfG*, 1994: Gesetz zur Förderung der Kreislaufwirtschaft und Sicherung der umweltverträglichen Beseitigung von Abfällen (Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz – KrW-/AbfG) vom 27. September 1994, In: Abfallgesetz, 2. Auflage, Verlag C. H. Beck, München, 1994, 542 S.

LAWA, 1993: Leitlinien zur Durchführung von Kostenvergleichsrechnungen, Länderarbeitsgemeinschaft Wasser (LAWA)
 OECD, 1997: OECD environmental data. Compendium 1997, OECD, Paris
 Stat. BA, 1998: Erneuerbare Energieträger 1991 bis 1996. StBA, Wirtschaft und Statistik 5, 438-443
 Stat. BA, 1997: Abfallbeseitigung im Produzierenden Gewerbe und in Krankenhäusern 1993. Fachserie 19, Reihe 1.2, Verlag Metzler-Poeschel, Stuttgart, 252 S.
 Stat. BA, 1996: Öffentliche Abfallbeseitigung 1993. Fachserie 19, Reihe 1.1, Verlag Metzler-Poeschel, Stuttgart, 128 S.
 Stat. BA, 1994: Öffentliche Abfallbeseitigung 1990. Fachserie 19, Reihe 1.1, Verlag Metzler-Poeschel, Stuttgart, 112 S.
 TASi, 1993: Technische Anleitung zur Verwertung, Behandlung und sonstigen Entsorgung von Siedlungsabfällen (TA Siedlungsabfall, TASi). Dritte Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Abfallgesetz, vom 14. Mai 1993. Bundesanzeiger, 4967ff.
 Stromeinspeisegesetz, 1994: Gesetz über die Einspeisung von Strom aus erneuerbaren Energien in das öffentliche Netz (Stromeinspeisegesetz) vom 7. Dezember 1990, BGBl. I S. 2633; 1994 S. 1618; 1998 S. 730, BGBl. III, 754-9
 VDI 2067, 1999: VDI Richtlinie "Wirtschaftlichkeit gebäudetechnischer Anlagen – Grundlagen und Kostenberechnung" – Entwurf, Verein deutscher Ingenieure (VDI), Düsseldorf, 30 S.

Kontakt

Dr. Ludwig Leible
 Forschungszentrum Karlsruhe GmbH
 Institut für Technikfolgenabschätzung und Systemanalyse (ITAS)
 Postfach 3640, D-76021 Karlsruhe
 Tel.: + 49 (0) 7247 - 82 4869
 E-Mail: leible@itas.fzk.de

»

Forschungsthema Abfall – Überblick über die Arbeiten im Forschungszentrum Karlsruhe

von F. Arendt, W. Schmidt, B. Mathes,
 Forschungszentrum Karlsruhe, PSA

Etwa 15% der Forschungs- und Entwicklungsarbeiten des Forschungszentrums Karlsruhe befassen sich mit Studien, technischen Entwicklungen und grundlegenden Untersuchungen zur kostengünstigen Bewältigung und zu Sicherheitsfragen des Abfallproblems. Im Mittelpunkt stehen dabei Untersuchungen zur thermischen Behandlung und zur energetischen Verwertung von Siedlungs-, Industrie- und landwirtschaftlichen Abfällen. Weitere Arbeiten befassen sich mit der Wiedergewinnung von Wertstoffen aus der Bau- und Metallindustrie sowie mit der Zerstörung hochtoxischer Stoffe bei niedriger Temperatur und Atmosphärendruck.

Für nukleare Abfälle werden Verglasungsverfahren weiterentwickelt und die Sicherheit und Radionuklidmobilität im Nahbereich eines geologischen Endlagers unter Langzeitaspekten untersucht. Fragen der Langzeitsicherheit spielen auch für die Verwertung und Deponierung der großen Mengen anorganischer Abfälle aus der Energie-, Bau- und Abfallwirtschaft sowie aus Umweltschutzmaßnahmen (Abgas- und Wasserreinigung) eine zunehmende Rolle. Aus Platzgründen kann auf die letztgenannten Arbeiten hier nicht eingegangen werden.

1. Einleitung

Eine der Hauptaufgaben der 16 Institutionen in der Hermann-von-Helmholtz-Gemeinschaft deutscher Forschungszentren (HGF) ist die Analyse und Beeinflussung von komplexen Systemen. Beispiele sind die Gesundheits-, Energie- und Atmosphärenforschung. Das Forschungszentrum Karlsruhe widmet den überwiegenden Teil seiner Arbeiten der Weiterentwicklung von komplexen technischen Systemen, die als gesellschaftliche Aufgaben oder wegen ihres vorwettbewerblichen Charakters von der Industrie nicht oder noch nicht umfassend bearbeitet werden. Dazu gehört die Abfallwirtschaft, die große gesellschaftliche Bedeutung hat, weil jeder Bürger und jede Ge-