

Energetische Nutzung organischer Abfälle

M. Kaltschmitt

Zusammenfassung

Vor dem Hintergrund der Diskussionen um die Folgen des anthropogenen Treibhauseffekts werden im folgenden die Perspektiven einer energetischen Nutzung von Abfällen organischen Ursprungs in Deutschland als eine Möglichkeit zu deren Entsorgung analysiert. Organische Abfälle fallen dabei in der Land- und Forstwirtschaft, der Industrie und den Haushalten an (u. a. Alt- und Restholz, Stroh, Gras, Laub, Dung, Klärschlamm, organischer Müll). Zusätzlich dazu kommen nicht unter den Begriff Abfall fallende „Nebenprodukte“, die zwar eine dem Abfall entsprechende Produktpalette umfassen, deren Gewinnung aber noch vom Produktionszweck umfaßt wird. Für solche organischen Abfälle und Nebenprodukte werden im folgenden die technischen Potentiale dargestellt, die Kosten analysiert und darauf aufbauend die wirtschaftlichen Potentiale diskutiert. Auch wird auf die Erschließungspotentiale im Rahmen einer Wenn-Dann-Betrachtung eingegangen.

Einleitung

Die energiewirtschaftlichen Diskussionen in Deutschland werden gegenwärtig wesentlich durch die möglichen negativen Folgen des anthropogenen Treibhauseffekts und ihrer potentiellen Vermeidung bestimmt. Von der Vielzahl der hierfür denkbaren Möglichkeiten stellen Energieträger aus organischen Abfällen eine vielversprechende Option dar. Einerseits sind sie weitgehend CO₂-neutral, da das bei der Verbrennung freigesetzte CO₂ zu-

vor von den Pflanzen der Atmosphäre entzogen wurde. Andererseits sind sie im Vergleich zu anderen Möglichkeiten meist vergleichsweise kostengünstig verfügbar und speicherbar. Zusätzlich müssen derartige Stoffe als Abfälle oft ohnehin entsorgt werden. Aus diesen Vorteilen resultiert auch die derzeit schon gegebene Nutzung.

Vor diesem Hintergrund werden im folgenden die technischen Energieträgerpotentiale und deren derzeitige Nutzung, die entsprechenden Kosten und darauf aufbauend die wirtschaftlichen Potentiale im Kontext der energiewirtschaftlichen Gegebenheiten in Deutschland für feste Stoffe, Abfälle mit hohem Wasseranteil und Abwässer mit organischer Fracht diskutiert. Außerdem wird für diese Optionen auf die Erschließungspotentiale eingegangen und die damit verbundenen energiewirtschaftlichen Möglichkeiten abschließend bewertet.

Definition der Potentialbegriffe

Bei den Potentialen wird unterschieden zwischen den theoretischen, den technischen und den wirtschaftlichen Potentialen sowie dem Erschließungspotential.

Theoretisches Potential

Unter dem theoretischen Potential wird das physikalische Angebot innerhalb einer gegebenen Region zu einer bestimmten Zeit verstanden. Dabei handelt es sich z. B. um die

- von der Sonne auf die Erde eingestrahlte Energie,
- die potentielle Energie der Flüsse,
- die kinetische Energie des Windes oder
- die gesamte vorhandene Biomasse.

Wegen der grundsätzlich unaufhebbaren technischen Schranken bei seiner Nutzung ist die Aussagekraft des theoretischen Potentials begrenzt. Ihm kommt deshalb zur Beurteilung der tatsächlichen Nutzbarkeit einer Option keine praktische Relevanz zu.

Technisches Potential

Das technische Potential geht aus dem theoretischen Potential hervor. Es beschreibt das „technisch Machbare“ u. a. unter Berücksichtigung von

- verfügbaren Energiewandlungstechniken und ihrer Nutzungsgrade,
- der Höhe, dem zeitlichen Verlauf und der räumlichen Verteilung von Energieangebot

- und -bedarf,
- der konkurrierenden Nutzungen.

Es stellt damit die Meßlatte dessen dar, was unter Beachtung technischer Restriktionen möglich wäre.

Wirtschaftliches Potential

Das wirtschaftliche Potential umfaßt den Anteil des technischen Potentials, der gegenüber anderen Energien nach Ort, Zeit und gegebenen Bedingungen wirtschaftlich konkurrenzfähig ist.

Über die Höhe des wirtschaftlichen Potentials aus betriebswirtschaftlicher Sicht wird aus der Sicht eines Investors mit dem Ziel der Minimierung der Gesamtkosten entschieden. Es bestimmt sich danach, in welchem Umfang der Investor - unter Beachtung aller Optionen - seine Gesamtkosten vermindern kann. Dabei sind alle Faktoren zu berücksichtigen, die das einzelwirtschaftliche Investitionskalkül berühren, z. B. die gegebenen Marktpreise bzw. Entsorgungserlöse für Energieträger, der Fremdkapitalzins, Risikoaufschläge für neue Technologien, die subjektiven Amortisationsanforderungen, Steuern, Fördermaßnahmen, Subventionen sowie ggf Informations-, Such- und Umstellungskosten. Da für verschiedene Investorengruppen unterschiedliche Rahmenbedingungen gelten, gibt es auch sehr verschiedenartige wirtschaftliche Potentiale aus betriebswirtschaftlicher Sicht.

Das wirtschaftliche Potential aus volkswirtschaftlicher Sicht orientiert sich am volkswirtschaftlichen Entscheidungskalkül. Damit bleiben Steuern, Subventionen sowie je nach Investorengruppe unterschiedliche Zinssätze und Amortisationsanforderungen außer Betracht. Dies gilt allerdings nicht für die Informations-, Such- und Umstellungskosten. Andererseits sind grundsätzlich alle externen Effekte (Kosten und Nutzen) der jeweiligen Investitionsvorhaben zu berücksichtigen.

Im Sinne dieser Definition kann es auch „erzwungene“ wirtschaftliche Potentiale geben, wenn aufgrund der administrativen Normensetzung ein bestimmter Entsorgungsweg vorgeschrieben wird. Ist wegen der gesetzlichen Rahmenvorgaben beispielweise ausschließlich eine thermische Verwertung eines bestimmten Stoffes als Entsorgungspfad möglich, ist diese - unabhängig von den Kosten - „wirtschaftlich“. So ist u. a. auch der Stroheinsatz zur Stromerzeugung in Dänemark aufgrund der administrativ vorgegebenen Quoten „wirtschaftlich“.

Erschließungspotential

Das erschließbare Potential resultiert aus dem wirtschaftlichen Potential, da dieses i. allg. nicht sofort, sondern allenfalls langfristig vollständig ausgeschöpft werden kann. Gründe hierfür sind u. a. begrenzte Herstellkapazitäten, Funktionsfähigkeit der vorhandenen und funktionsfähigen, ggf noch nicht abbeschriebenen Konkurrenzsysteme sowie eine Vielzahl von Hemmnissen (z. B. mangelnde Information, rechtliche und administrative Hemmnisse), die selbst einen an sich wirtschaftlich möglichen Einsatz behindern. Das Erschließungspotential kann aber im Einzelfall auch größer als das wirtschaftliche Potential sein, wenn beispielsweise die betreffende Option aufgrund administrativer oder sonstiger Maßnahmen gefördert wird (z. B. 1 000-Dächer-Photovoltaik-Programm) oder sie aus anderen Gründen trotz Mehrkosten genutzt wird (z. B. Imagegewinn). Damit resultiert die Bandbreite des Erschließungspotentials aus der Variationsbreite des wirtschaftlichen Potentials und den Unterschieden, die aufgrund der verschiedenen Hemmnisse oder Motivationen gegeben sind.

Technische Potentiale

Energetisch nutzbare feste organische Abfälle bzw. Nebenprodukte fallen im wesentlichen bei der land- und forstwirtschaftlichen Pflanzen- und Tierproduktion, in sonstigen Industrie- und Gewerbebetrieben, bei den Haushalten und bei kommunalen Einrichtungen an (*Abb. 1*). Sie sind sowohl in fester Form beispielsweise als Holz oder Stroh, als Stoffe mit einem hohen Wasseranteil wie z. B. Gülle oder Stallmist oder als Abwässer mit (hoher) organischer Fracht (u. a. Haushaltsabwässer, organisch hoch belastete Industrieabwässer) verfügbar. Grundsätzlich können sie sowohl zu einem Festbrennstoff als auch zu einem Brenngas weiterverarbeitet werden; bei beiden Möglichkeiten ist anschließend ein einfacher Einsatz als Energieträger möglich. Im folgenden werden die wesentlichen Möglichkeiten, die letztlich zu einer energetischen Verwertung führen, diskutiert.

Holz

Bei der Waldbewirtschaftung fällt neben dem Stamm- bzw. Industrieholz auch Biomasse an, die derzeit industriell nicht verwertet wird. Davon ist das nicht genutzte Derbholz (Durchforstungsmaterial, Stammabschnitte und stärkere Äste mit einem Durchmesser

von > 7 cm mit Rinde) für eine Energiegewinnung prädestiniert [1, 9]. Zusätzlich dazu fällt im Wald weitere Biomasse an (Stock- und Wurzelholz, Zweige, z. T. Rinde, Laub, Nadeln und Früchte bzw. Fruchtstände). Jedoch stellt beispielsweise die Gewinnung von Stock- und Wurzelholz einen schweren Eingriff in den Waldboden dar und sollte deshalb unterlassen werden. Auch sollte ein Teil der jährlich anfallenden Biomasse zur Erhaltung des Humus- und Nährstoffkreislaufs im Wald verbleiben (im wesentlichen Laub, Nadeln, Früchte und Fruchtstände); es ist folglich ebenfalls nicht als Energieträger einsetzbar. Deshalb wird eine energetische Verwertungsmöglichkeit dieser zusätzlich zum nicht genutzten Derbholz im Wald anfallenden Biomasse auch aufgrund der gegebenen ökologischen Restriktionen nicht unterstellt.

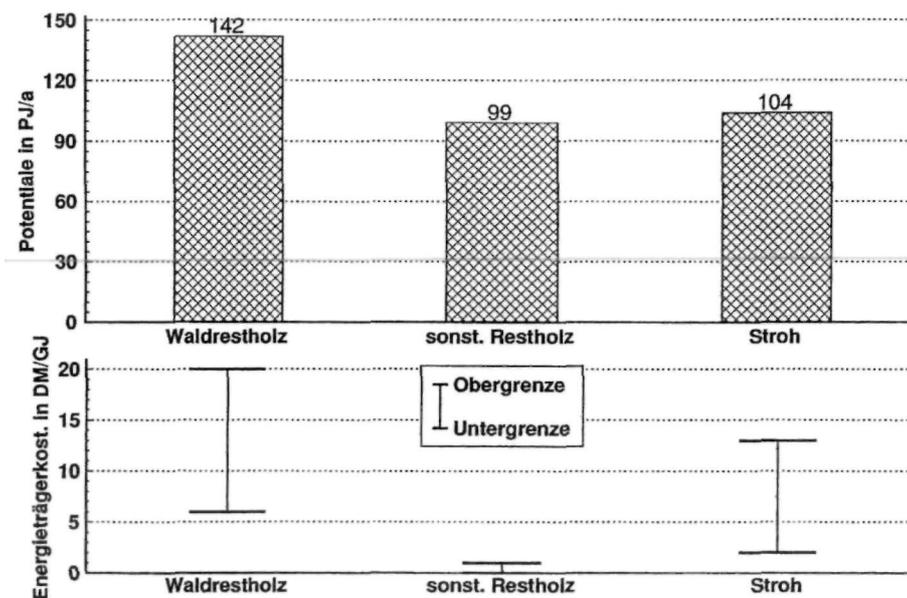


Abb.1: Systematik organischer Abfälle und Nebenprodukte und deren energetische Nutzungsmöglichkeiten

Das dem ungenutzten Derbholz entsprechende technische Energieträgerpotential ermittelt sich aus den mittleren jährlichen Derbholzzuwachsraten (ca. 60 Mio. m³/a) abzüglich dem Holzeinschlag (ca. 38 Mio. m³/a) und der jährlichen dem Derbholz zuzurechnenden Brennholznutzung von ca. 6 Mio. m³/a (ca. 54 PJ/a). Daraus ergibt sich ein Waldrestholzpotential von rund 16 Mio. m³/a bzw. 142 PJ/a [12]. Bezogen auf den Endenergie-

verbrauch in Deutschland in 1993 (9 203 PJ/a) entspricht dies einem Anteil von rund 1,5%.

Zusätzlich fallen bei der industriellen Holzbe- und -Verarbeitung feste organische Abfälle, d. h. industrielles Restholz, an. Im produzierenden Gewerbe Deutschlands sind 1992 rund 6,7 Mio. t TS/a (Trockensubstanz) allein in der Sägeindustrie und bei der Weiterverarbeitung des Schnittholzes angefallen. Davon werden aber in der Papier- und Spanplattenindustrie bereits rund 4,5 Mio. t TS/a stofflich verwertet [1]. Wird für die verbleibenden 2,2 Mio. t TS/a eine energetische Nutzung unterstellt, errechnet sich ein Energiepotential von rund 40 PJ/a.

Auch in vielen anderen Bereichen der Volkswirtschaft scheidet Altholz aus dem ordnungsgemäßen Nutzungsprozeß aus (z. B. Holzverpackungen für Maschinenteile, Abbruchholz, aus der Nutzung ausscheidendes Bauholz). Zusammengenommen fällt in Deutschland zwischen 2,5 und 3,5 Mio. t TS/a z. T. kontaminiertes Altholz ohne Berücksichtigung des Altpapiers an. Dies entspricht einem Energiepotential von etwa 54 PJ/a [12].

An den Straßenrändern, in Parks und öffentlichen Anlagen sowie auf Friedhöfen fällt zusätzlich als Abfall anzusehende Biomasse an. Grobe Schätzungen gehen von einem gesamten Biomasseaufkommen von rund 1,5 Mio t/a aus [3]. Jedoch ist nicht die gesamte anfallende organische Masse energetisch nutzbar, da z. T. ein sehr geringer flächenspezifischer Anfall gegeben und damit eine technisch sinnvolle Gewinnung nicht möglich ist. Teilweise wird die Biomasse auch kompostiert, um sie anschließend als Bodenverbesserer erneut beispielsweise in Parks oder auf Friedhöfen auszubringen. Werden derartige Restriktionen berücksichtigt, errechnet sich ein Energiepotential der als Straßenbegleitgrün und in öffentlichen Grünanlagen anfallenden energetisch nutzbaren holzartigen Biomasse von rund 5 PJ/a [3].

Zusätzlich dazu fällt in weiteren Bereichen der Volkswirtschaft holzartige Biomasse an (z. B. in **Vor-** und Schrebergärten, in Obstplantagen und auf Streuobstwiesen, im Rahmen der Pflegenutzung). Die entsprechenden Energiepotentiale dürften jedoch relativ gering und nur sehr eingeschränkt technisch gewinnbar sein; außerdem sind sie gegenwärtig nicht genau quantifizierbar. Sie werden deshalb hier nicht näher betrachtet.

Aus dem industriellen Restholz, dem Altholz und der holzartigen kommunalen Biomasse errechnet sich ein Gesamtenergiepotential von rund 99 PJ/a. Bezogen auf den Endener-

gieverbrauch in Deutschland in 1993 sind dies rund 1,1 %.

Zusammengenommen entspricht das Energiepotential aus holzartigen Abfällen von ca. 241 PJ/a (vgl. *Abb. 2*) einem Anteil am Endenergieverbrauch in Deutschland (9 203 PJ in 1993) von ca. 2,6 %. Im Vergleich dazu wurden rund 54 PJ/a an Brennholz verkauft; dies sind rund 0,6 % bezogen auf den Endenergieverbrauch.

Stroh

Bei den energetisch nutzbaren Nebenprodukten der landwirtschaftlichen Pflanzenproduktion handelt es sich im wesentlichen um das bei der Getreideerzeugung anfallende Stroh. Es wird bereits vielfach - im Regelfall jedoch nicht energetisch - verwertet (u. a. Einarbeitung in die Ackerkrume, Einstreu in der Nutztierhaltung, Verkauf an Gärtnereien). Nur das danach noch verbleibende Biomasseaufkommen ist als Energieträger nutzbar.

Das gesamte technisch gewinnbare Strohaufkommen kann aus der für die jeweilige Getreideart genutzten Anbaufläche, dem regional unterschiedlichen Kornertrag und dem mittleren Korn-Stroh-Verhältnis abgeschätzt werden. Für Deutschland ergibt sich daraus ein entsprechender Strohanfall von rund 39,1 Mio. t/a. Wird davon wegen der dargestellten Restriktionen rund ein Fünftel als energetisch nutzbar angesehen, resultiert ein Energiepotential von etwa 104 PJ/a [2]. Bezogen auf den Endenergieverbrauch in Deutschland sind dies 1,1 %.

Gülle und Mist

Bei der anaeroben Fermentation des Aufkommens an organischen Stoffen aus der Nutztierhaltung entsteht ein wasserdampfgesättigtes Biogas, das im wesentlichen aus Methan (ca. 50 bis 75 %) und Kohlendioxid (ca. 25 bis 50 %) besteht

Zur Abschätzung des zugehörigen Energieinhalts kann aus dem Tierbestand und dem tierartspezifischen Exkrementaufkommen zunächst der gesamte Gülle- und Mistanfall bestimmt werden; er liegt in Deutschland bei rund 55 100 t pro Tag ([2], Dezemberzählung 1993). Wird berücksichtigt, daß davon nur ein gewisser Anteil technisch verfügbar und ein Mindestsubstratanfall von 20 Rindern, 100 Schweinen bzw. 5 000 Hühnern für den technisch sinnvollen Betrieb einer einzelbetrieblichen Biogasanlage nötig ist, ergibt sich - unter Berücksichtigung des Prozeßenergieaufwandes - ein technisch gewinnbares Energieaufkommen von rund 81 PJ/a [5]. Bezogen auf den Endenergieverbrauch in Deutschland in 1993 sind dies rund 0,9 %.

Abwasser

In Kläranlagen mit Schlammfäulung entsteht durch den anaeroben Abbau der im Abwasser enthaltenen organischen Substanzen Klärgas. Zusätzlich kann der ausgefaulte Klärschlamm als Festbrennstoff eingesetzt werden. Das entsprechende Potential resultiert aus der organischen Abwasserfracht.

In Deutschland fällt insgesamt ein Abwasseraufkommen bei der öffentlichen Abwasserbeseitigung von rund 8,5 Mrd. m³/a an; zusätzlich dazu kommt noch das organisch belastete Industrieabwasser, das bei den jeweiligen Unternehmen gereinigt und dort in den Vorfluter geleitet wird. Dabei fallen pro Jahr in Deutschland bei der öffentlichen und industriellen Abwasserreinigung rund 90 Mio. m³ an Klärschlamm an; dies entspricht etwa 4,4 Mio. t TS/a (Trockensubstanz).

Die bei der anaeroben Schlammstabilisation im Faulturm produzierbare Gasmenge hängt dabei außer von der Faulturmtechnik wesentlich vom Gehalt an organischer Substanz im Faulschlamm ab. Bei durchschnittlich rund zwei Dritteln organischer Substanz im Feststoffgehalt liegt die anfallende Klärgasmenge bei 0,4 bis 0,5 m³/kg organischer Trockensubstanz. Bei einem mittleren Methananteil im Klärgas zwischen 62 und 68 % liegt der durchschnittliche Heizwert bei 20 bis 23 MJ/m³. Unter diesen Bedingungen errechnet sich ein Energiepotential des produzierbaren Klärgases von rund 26,7 PJ/a.

Zusätzlich fällt Klärschlamm an, der außer als Bodenverbesserer in der Land- und Forstwirtschaft auch thermisch verwertet werden kann; der Heizwert liegt dabei im groben Mittel zwischen 12 und 14 MJ/kg TS. Wird unterstellt, daß langfristig zwischen 0,5 und 0,6 Mio. t TS/a landwirtschaftlich verwertet werden können und der verbleibende Rest thermisch genutzt wird, errechnet sich ein Energiepotential des Klärschlammes zwischen 46 und 55 PJ/a.

Zusammengenommen entspricht dieses Klärgas- und Klärschlammaufkommen zwischen 73 und 82 PJ/a einem Anteil an Endenergieverbrauch in Deutschland zwischen 0,8 und 0,9 %.

Haushaltsmüll und hausmüllähnliche Industrie- und Gewerbeabfälle

In der Vergangenheit wurden derartige Stoffe mit Ausnahme eines geringen in Müllverbrennungsanlagen eingesetzten Anteils deponiert. Nach der Ablagerung auf der Deponie entsteht aus den organischen Müllkomponenten nach einer gewissen Anlaufphase als Folge von anaeroben Abbauprozessen Biogas. Dabei nimmt das Methan im Mittel einen

Anteil von ca. 54 %, das Kohlendioxid von ca. 44 % und der Schwefelwasserstoff von weniger als 3 % ein. Aus einem mittleren Methangehalt von rund 54 % ergibt sich ein Heizwert des Deponiegases von etwa 17MJ/m^3 . Die in einer Deponie zu erwartende Gasmenge ist im wesentlichen abhängig vom Milieu, dem Substratangebot, der Microbiozönose und den chemisch-physikalischen Bedingungen. Die maximal produzierbare Gasmenge berechnet sich aus der gesamten abbaubaren Kohlenstoffmenge im Abfall und der durchschnittlichen Deponietemperatur. Die Werte variieren im Bereich von 120 bis 220 m^3 Gas je Tonne Abfall.

Die anaeroben Prozesse in der Deponie laufen ungesteuert ab. Ohne eine Erfassung entweicht das entstehende Gas in die Atmosphäre oder in das Erdreich. Schäden an nahegelegener Vegetation und Belästigungen durch Gerüche in benachbarten Siedlungen sind die Folgen. Daher sind inzwischen Gaserfassungsanlagen auf Deponien zwingend vorgeschrieben. Von dem gesamten entstehenden Gas kann nur ein Teil von der Gaserfassungsanlage gesammelt und abgeleitet werden. Dieser Anteil hängt u. a. ab von der Effektivität des Entgasungs- bzw. Gaserfassungssystems, von der Betriebsweise der Deponie und der Dicke und Durchlässigkeit der Abdeckschicht. Erfassungsgrade zwischen 20 und 50 % erscheinen derzeit realistisch. Da insbesondere ältere Deponien nicht über eine Deponiegaserfassungsanlage verfügen, liegt der gesamte durchschnittliche Erfassungsgrad bei rund 25 % in Deutschland.

Zur Bestimmung des Deponiegasaufkommens wird deshalb von dem derzeitigen Deponiebestand und damit den bereits abgelagerten Abfallaufkommen ausgegangen. Der zukünftig zu deponierende Abfall mit organischer Fracht dürfte sich in den nächsten zehn Jahren jährlich um rund ein Zehntel bezogen auf 1991 reduzieren. Damit kann das zu erwartende Deponiegasaufkommen abgeschätzt werden. Mit dem diskutierten mittleren Erfassungsgrad errechnet sich ein Energiepotential von derzeit rund 19 PJ/a , das bis zur Jahrtausendwende auf etwa 23 PJ/a ansteigen dürfte. Bezogen auf den derzeitigen Endenergieverbrauch entspricht dies etwa 0,2 %. Aufgrund fehlender Daten wurden dabei die Möglichkeiten einer Deponiegaserzeugung in den neuen Bundesländern nicht berücksichtigt.

Dabei entsteht das Deponiegas, das derzeit und in den nächsten Jahren und Jahrzehnten auf den Deponien sich bildet, zum Großteil durch die anaerobe Zersetzung der bereits in der Vergangenheit abgelagerten Abfallmengen. Gleichzeitig wird in Zukunft der zu deponierende Abfall mit organischer Fracht deutlich zurückgehen. Da mittelfristig nur noch

inerte Stoffe abgelagert werden dürfen, nimmt deshalb nach Überschreiten eines Maximums um das Jahr 2000 die produzierte Deponiegasmenge kontinuierlich ab.

Mittelfristig ist damit eine Ablagerung von Hausmüll und hausmüllähnlichen Gewerbe- und Industrieabfällen nicht mehr möglich. Dem wird in Anfängen derzeit schon durch die in verschiedenen Städten bereits durchgeführte Getrenntsammlung organischer Stoffe Rechnung getragen. Diese organische Müllfraktion, die hier ausschließlich betrachtet wird, kann dabei in Müllverbrennungsanlagen verbrannt oder in Biogasanlagen weitgehend sterilisiert und homogenisiert werden (ggf zusammen mit landwirtschaftlichen Substraten wie Gülle oder Mist) und anschließend - sind die Schadstofffrachten innerhalb der zulässigen Grenzen - auf landwirtschaftlichen Nutzflächen als Wirtschaftsdünger ausgebracht werden. Teilweise ist auch eine Kompostierung möglich. Die entsprechenden Potentiale können - da jeder der diskutierten Entsorgungswege derzeit noch durch eine Vielzahl von Problemen bei der praktischen Umsetzung verbunden ist - nicht verlässlich angegeben werden. Wird im einfachsten Fall von einer Verbrennung ausgegangen und ganz grob das organische Abfallaufkommen mit etwa 7 Mio. t/a abgeschätzt, errechnet sich mit einem mittleren Heizwert von 7 MJ/kg ein Energiepotential von knapp 50 PJ/a. Bei einer anaeroben Fermentation dieses Aufkommens würde der Energieinhalt des gewinnbaren Biogasaufkommens deutlich niedriger liegen.

Gegenwärtige Nutzung

Holz und Stroh

Feste Abfälle organischen Ursprungs können in Kleinst-, Klein- und Großanlagen verbrannt und damit energetisch genutzt werden.

Unter Kleinstanlagen werden Verbrennungsanlagen unterhalb 15 kW thermischer Leistung verstanden, die keinen regelmäßigen Emissionsmessungen unterliegen (Anlagen außerhalb der 1. BImSchV). In Deutschland dürften insgesamt 1,2 bis 1,3 Mio. derartiger biogen befeuerter Anlagen - überwiegend mit Handbeschickung - in Betrieb sein; das entspricht etwa 5 % des vorhandenen Kleinstanlagengesamtbestandes. Der entsprechende Brennstoffverbrauch liegt zwischen 24 und 26 PJ / a [4], Dabei wird aber praktisch aus-

schließlich Brennholz und damit kaum holz- und strohartiger Abfall als Energieträger genutzt.

Unter Kleinanlagen werden entsprechend den gesetzlichen Bestimmungen holzbefeuerte Anlagen zwischen 15 kW und 1 MW und strohbetriebene Feuerungen mit 15 bis 100 kW thermischer Leistung zusammengefaßt. Anlagen dieser Größenordnung wurden in Deutschland in 1992 im industriellen und gewerblichen Bereich etwa 23 800 mit Holz **und** etwas mehr als 40 mit Stroh befeuert betrieben. In den privaten Haushalten sind zusätzlich zwischen 175 000 und 180 000 holz- und strohbefeuerte Kleinanlagen vorhanden. Diese damit rund 200 000 betriebenen Kleinanlagen entsprechen etwa 2 % aller Anlagen dieser Leistungsklasse. Der mittlere Brennstoffeinsatz liegt bei etwa 50 PJ/a [4]. In manuell beschickten Anlagen bis etwa 50 kW und damit in dem überwiegenden Teil solcher Feuerungen wird im wesentlichen Brennholz und sehr untergeordnet fester organischer Abfall verwendet. Nur bei automatisch beschickten Feuerungen höherer Leistung wird z. T. naturbelassenes, nicht stückiges industrielles Restholz und damit Abfall genutzt.

Bei Großanlagen handelt es sich entsprechend der TA Luft um Holzfeuerungsanlagen mit Leistungen zwischen 1 und 50 MW, um Strohfederungen oberhalb 100 kW und um Feuerungen über 100 kW, in denen belastetes Altholz verbrannt wird. In Deutschland dürften derzeit etwa 900 bis 1 100 Holz- und Strohfederungen (d. h. etwa 12 bis 15 % des Gesamtanlagenbestandes) in Betrieb sein. Mit mittleren Auslastungen resultiert daraus ein Brennstoffeinsatz von 29 bis 35 PJ/a [4]. Überwiegend wird Industrierestholz, aber auch Altholz unterschiedlichster Herkunft und Beschaffenheit in wechselnden Anteilen verfeuert; Stroh wird kaum eingesetzt. Außerdem kommen in grob 40 % der installierten biomassebetriebenen TA Luft-Anlagen zusätzlich fossile Brennstoffe (v. a. leichtes Heizöl) zum Einsatz. Zusätzlich dazu werden noch geringe Mengen an Straßenbegleitgrün in verschiedenen Müllverbrennungsanlagen eingesetzt.

Damit beschränkt sich die Nutzung fester organischer Abfallstoffe derzeit nahezu ausschließlich auf die Verbrennung. Andere Techniken der energetischen Nutzung, wie beispielsweise die Ent- oder Vergasung, die Verflüssigung oder andere theoretisch denkbare energetische Nutzungsmöglichkeiten fester Abfälle organischen Ursprungs finden derzeit in Deutschland außer im Rahmen von Forschungs- und Entwicklungsvorhaben und ggf. in Demonstrationsanlagen, praktisch keine Anwendung.

Gülle und Mist

In der Bundesrepublik Deutschland sind derzeit rund 130 bis 150 Biogasanlagen in Betrieb [5]. Der Großteil dieses Anlagenbestandes befindet sich im süddeutschen Raum. Es handelt sich meist um einzelbetriebliche Anlagen im kleinen Leistungsbereich. Zusätzlich werden noch wenige größere Biogasanlagen betrieben.

Aufgrund des insgesamt sehr kleinen Anlagenbestandes ist die korrespondierende Energiebereitstellung entsprechend gering. Meist wird das produzierte Biogas nach wie vor zur ausschließlichen Wärme- bzw. Warmwasserbereitstellung in entsprechenden Gasthermen energetisch genutzt. Aufgrund der geänderten Einspeisevergütungen für Strom aus erneuerbaren Energien kommt jedoch in der letzten Zeit vermehrt auch Biogas in Kraft-Wärme-Kopplungs-Anlagen (z. B. Blockheizkraftwerke) zum Einsatz, wobei die elektrische Energie sowohl im eigenen Betrieb verbraucht als auch ins öffentliche Netz eingespeist werden kann.

Klärgas und -schlamm

In der Bundesrepublik Deutschland waren in 1990 rund 300 Blockheizkraftwerke mit einer installierten Leistung von knapp 110 MW in Betrieb [13], die ausschließlich mit Klärgas befeuert wurden. Die daraus resultierende Stromerzeugung lag im Jahr 1992 bei rund 550 GWh; davon wurden jedoch nur rund 20 GWh in das Netz der öffentlichen Versorgung eingespeist [14]. Der nicht eingespeiste Strom wurde wie auch die Wärme in der Kläranlage selbst verbraucht.

Von den in 1991 insgesamt verwerteten 2,77 Mio. t TS an Klärschlamm wurden etwa 0,27 Mio. t TS und damit etwa 10 % verbrannt. Bei mittleren Heizwerten zwischen 12 und 14 MJ/kg TS entspricht dies einem Energieaufkommen zwischen 3,2 bis 3,7 PJ/a.

Deponiegas

In der Bundesrepublik Deutschland waren in 1992 102 Deponiegasanlagen mit einer installierten Leistung von 72 MW installiert. In diesen Anlagen wurde eine Stromerzeugung von rund 260 GWh realisiert [14].

Haushaltsmüll und hausmüllähnliche Industrie- und Gewerbeabfälle

In 1992 wurde in rund 537 statistisch erfaßten Anlagen [14] mit einer installierten Leistung von rund 778 MW Müll als Energieträger eingesetzt und Strom und Wärme erzeugt. Die ausschließlich statistisch erfaßte Netzeinspeisung elektrischer Energie lag bei

etwa 2 554 GWh. Dabei stammt diese Wärme- und Stromgewinnung aber, da bei den Erhebungen keine Trennung zwischen dem nativ-organischen (regenerativen) und dem fossilen Aufkommen gemacht wird, auch aus Reststoffen nicht regenerativen Ursprungs.

Kosten

Holz

Die untere Bandbreite der möglichen Energieträgerkosten für Restholz wird dadurch festgelegt, daß es als ein nicht monetarisierbarer Abfall angesehen wird; dann fallen nur die Kosten für die Verfügbarmachung an. Die obere Bandbreite ist definiert, wenn dem Restholz als ein verwertbares Nebenprodukt auch ein Teil des Aufwandes für die Herstellung des Nebenproduktes angelastet wird.

Dabei variieren die jeweils resultierenden Energieträgerkosten erheblich in Abhängigkeit der entsprechenden Aufbereitung als Energieträger. Die massigeren Anteile beispielsweise sind in Form von Brennholz (als Scheit- oder Rollenholz) oder als Hackschnitzel energetisch verwertbar. Letztere wiederum können lose oder verpresst zu Brickets bzw. Pellets als Energieträger eingesetzt werden.

Wird das Waldrestholz als Abfall der Industrieholzernte betrachtet, sind nur die Sammel- und Aufbereitungskosten zu monetarisieren. Es kann zu Scheitholz oder zu Holzhackschnitzeln verarbeitet werden. Bei ersterem fallen Sammelkosten und Aufwendungen für die entsprechende Aufarbeitung als Scheit- oder Rollenholz frei Wald zwischen 6 und 14 DM/GJ an. Bei letzterem addieren sich dazu die entsprechenden Aufbereitungskosten; daraus ergeben sich Kosten frei Wald zwischen 10 und 17 DM/GJ [6, 7].

Wird Waldrestholz als ein Nebenprodukt angesehen, sind ihm zusätzlich die für die Waldbewirtschaftung anfallenden Aufwendungen beispielsweise für die Durchforstung, die Stammholzernte, den Wegebau etc. anzulasten. Wird dem Waldrestholz deshalb rund ein Drittel des Waldbewirtschaftungsaufwandes zugerechnet (das entspricht etwa dem durchschnittlichen Anteil der technisch nutzbaren forstwirtschaftlichen Nebenprodukte am gesamten technisch gewinnbaren Biomasseaufkommen), errechnen sich daraus zusätzliche Kosten zwischen 1 und 3 DM/GJ und damit spezifische Energiekosten zwischen 7 und 20 DM/GJ [6, 7, 10] (*Abb. 2*).

Wird das Stammholz bei der holzverarbeitenden Industrie entrindet, liegt dort die Rinde bereits in zerkleinerter und damit weitgehend verbrennungsgerechter Form und konzentriert am Standort der Entrindungsanlage vor. Die Energieträgerkosten sind dann vernachlässigbar, da die Rinde hier ein zu entsorgendes Abfallprodukt darstellt und unterstellt wird, daß die Transport- und ggf. Aufbereitungskosten als Energieträger gerade die sonst anfallenden Entsorgungskosten decken.

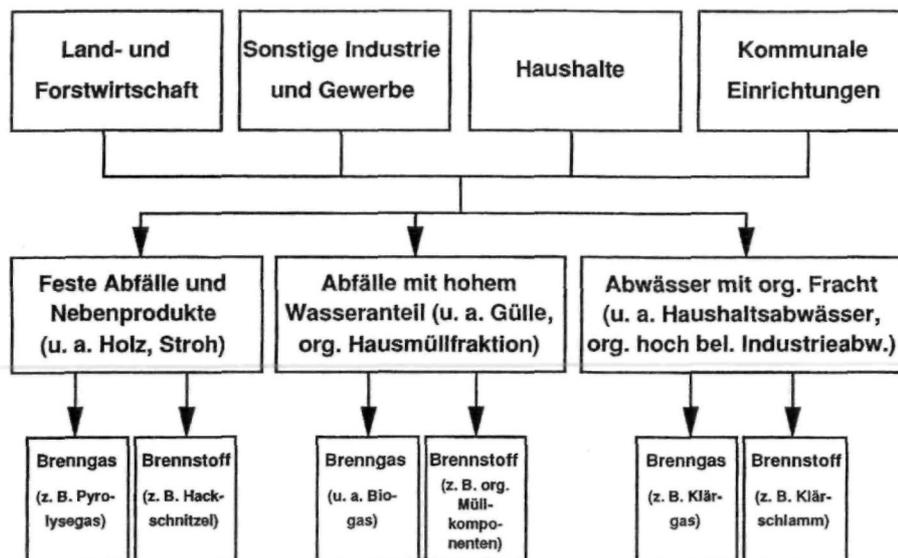


Abb. 2: Potentiale und Kosten fester organischer Abfälle und Nebenprodukte

Ähnliches gilt auch für industrielles Restholz sowie für Straßenbegleitgrün und ggf. für Altholz. Hier ist im Regelfall eine Entsorgung notwendig, durch die die Bereitstellungskosten meist vollständig abgedeckt werden. Energieträgerkosten im eigentlichen Sinn fallen deshalb nicht an; oft sind sogar noch Entsorgungserlöse zu erzielen. Hier wird in Anlehnung an die bisherigen Überlegungen davon ausgegangen, daß für derartige organische Abfälle im groben Durchschnitt die Entsorgungserlöse weitgehend den Bereitstellungsaufwendungen entsprechen und folglich von keinen Energieträgerkosten im eigentlichen Sinn auszugehen ist.

Stroh

Ähnlich wie bei Restholz kann bei der Energieträgerkostenanalyse auch Stroh einerseits als ein Abfallstoff und andererseits als ein Nebenprodukt angesehen werden. Dadurch ist wieder ein unteres bzw. oberes Kostenspektrum festgelegt.

Wird diese Biomasse als ein nicht kostenmäßig zu bewertender Abfall der Getreideproduktion angesehen, errechnen sich die spezifischen Kosten frei Anbaufläche aus den Aufwendungen für das Sammeln und Verdichten. Sie belaufen sich auf ca. 0,5 DM / Ballen für Hochdruckballen und etwa 18 DM / Ballen für große Quaderballen. Daraus ergeben sich mit mittleren Heizwerten und durchschnittlichen Feuchten spezifische Energieträgerkosten frei Anbaufläche zwischen 2 und 4 DM/GJ [6, 7],

Wird dagegen das Stroh als ein monetär zu bewertendes Nebenprodukt der Getreideerzeugung angesehen und ihm ein Teil des Produktionsaufwandes für das Getreide angelastet, errechnen sich Energieträgerkosten von 10 bis 13 DM/GJ frei Anbaufläche [6, 7, 10] (*Abb. 2*).

Gülle und Mist

Eine Abschätzung der Biogasgestehungskosten aus Gülle und Mist ist durch erhebliche Unsicherheiten gekennzeichnet, da die Anlagentechnik für landwirtschaftliche Substrate noch am Anfang der großtechnischen Einführung steht; daraus resultiert eine entsprechend große Bandbreite. Werden beispielsweise die spezifischen Investitionen existierender Kleinanlagen analysiert, streuen die einzelnen Werte um mehr als eine Zehnerpotenz; dies liegt u. a. darin begründet, daß einerseits der Aufwand bei kleinen Anlagen spezifisch relativ hoch ist und andererseits durch die Erbringung eines Eigenleistungsanteils und der Verwendung ausgedienter Anlagenkomponenten aus anderen Betriebsbereichen Kostenreduktionen möglich sind [5]. Ermittelt an bestehenden Biogasanlagen ergeben sich für kleinere Anlagen durchschnittliche spezifische Biogasgestehungskosten von rund 35 bis 50 DM/GJ. Sie gehen bei Großanlagen auf etwa 35 DM/GJ zurück. Die tatsächlichen Kosten im konkreten Einzelfall können aber deutlich von diesen mittleren Angaben abweichen

Klärgas und -schlamm

Klärgas stellt ein „Abfallprodukt“ der anaeroben Klärschlammstabilisation dar. Damit ist dessen Erzeugung aus verfahrenstechnischen Gründen notwendig und die entstehenden Kosten sind folglich vollständig dem Abwasserreinigungsprozeß anzulasten. Somit kann

auch hier unterstellt werden, daß die Energieträgerkosten für das anfallende Klärgas durch die bei einer nicht energetischen Nutzung notwendigen Entsorgungsaufwendungen aufgewogen und damit im Mittel keine Energieträgerkosten im eigentlichen Sinn gegeben sind.

Ähnliches gilt auch für Klärschlamm. Wurde er vor Jahren noch auf landwirtschaftliche Nutzflächen unter Erzielung von Erlösen ausgebracht, muß heute den Landwirten Geld dafür gezahlt werden, daß Klärschlamm auf die Nutzfläche ausgebracht werden darf, oft wird in Anbauverträgen sogar ein Verbot der Ausbringung festgeschrieben. Aufgrund der zukünftig ebenfalls nicht mehr möglichen Deponierung werden deshalb die Kosten für die Trocknung bei der thermischen Verwertung aufgrund fehlender Absatzmärkte vollständig der Abwasseraufbereitung angelastet. Energieträgerkosten im eigentlichen Sinn fallen keine an.

Deponiegas

Ähnliche Aussagen wie beim Klärgas lassen sich auch für das Deponiegas machen. Es entsteht zwangsläufig im Deponiekörper infolge der sich nach einer gewissen Zeit einstellenden anaeroben Verhältnisse aus den abgelagerten organischen Abfällen. Aufgrund der gesetzlichen Vorgaben muß es bei neueren Deponien abgesaugt werden. Damit sind die Kosten für die Gasabsaugung vollständig dem deponierten Abfall anzulasten und folglich - schließt man sich der bisherigen Argumentation an - keine Energieträgerkosten im eigentlichen Sinn für das Deponiegas gegeben.

Haushaltsmüll und hausmüllähnliche Industrie- und Gewerbeabfälle

Vergleichbar sind die Zusammenhänge auch bei der organischen Müllfraktion. Da eine Entsorgung auf jeden Fall gewährleistet werden muß - eine Deponierung wird mittelfristig nicht mehr möglich sein - müssen die Kosten einer thermischen oder anaeroben Behandlung durch die Entsorgungserlöse getragen werden. Damit fallen keine Energieträgerkosten im eigentlichen Sinn an; auch hier stellt dann die Energiebereitstellung einen (gewünschten) Nebeneffekt dar.

Wirtschaftliche Potentiale

Holz

Die wirtschaftlichen Potentiale einer thermischen Holznutzung werden im wesentlichen von den letztlich aufzubringenden Brennstoffkosten bestimmt. Dabei muß für eine wirtschaftliche Energiebereitstellung aus holzartiger Biomasse im Vergleich zu fossilen Brennstoffen der Bereitstellungsaufwand deutlich unterhalb des fossilen Energiepreisniveaus liegen, da biogen gefeuerte Verbrennungsanlagen im Schnitt durch erheblich höhere spezifische Investitionsaufwendungen gekennzeichnet sind. Auch ist davon auszugehen, daß unter den momentanen Bedingungen ausschließlich eine Verbrennung holzartiger Abfälle überhaupt näherungsweise wirtschaftlich realisiert werden kann; alle anderen technisch möglichen Verfahren einer energetischen Verwertung (z. B. Ent- bzw. Vergasung, Verflüssigung) befinden sich - bei entsprechenden hohen Anlagenkosten - noch im Forschungs- und Entwicklungsstadium.

Obwohl die Energieträgerkosten für das Waldrestholz geringfügig unter- oder innerhalb der Bandbreite der derzeitigen Preise fossiler Energieträger in Deutschland liegen, sind die resultierenden Wärmegestehungskosten und damit die für den Endverbraucher bei einem Einsatz in Hausheizungen letztlich relevante Größe höher. Dies ist darauf zurückzuführen, daß die Investitionen für Holzgefeuerten Anlagen nahezu unabhängig von den installierten thermischen Leistungen um mehr als den Faktor zwei über denen fossil gefeuerter Verbrennungsanlagen liegen (vgl. [11]). Dazu kommt noch der teilweise höhere Wartungs- und Bedienungsaufwand, die Aschenverwertung und der benötigte Platz für das Holzlager. Ein wirtschaftlicher Einsatz von Waldrestholz in kleinen Anlagen zur Hausheizung ist damit im Regelfall nicht gegeben. Unabhängig davon ist aber unter bestimmten Bedingungen eine wirtschaftliche Wärmebereitstellung durchaus möglich. Dies kann z. B. bei kurzen Wegen im ländlichen Raum und insbesondere dann der Fall sein, wenn der entsprechende Anlagenbetreiber die von ihm erbrachte Eigenleistung z. B. die Brennstoffbeschickung und Ascheverwertung nicht monetär bewertet. Damit ist für eine Waldrestholznutzung insgesamt ein beschränktes wirtschaftliches Potential gegeben.

Grundsätzlich gelten ähnliche Aussagen auch für einen Waldrestholzeinsatz in Großanlagen zur Wärmebereitstellung bzw. zur gekoppelten Strom- und Wärmeerzeugung. Hier ist jedoch das gegenwärtig gegebene wirtschaftliche Potential erheblich kleiner, da im

Normalfall bei Großanlagen kein Eigenleistungsanteil des Anlagenbetreibers erbracht werden kann. Außerdem werden aufgrund der größeren zu transportierenden Mengen meist Fuhrunternehmen benötigt; dies bedingt erhöhte Transportkosten.

Unabhängig von der Anlagengröße ist damit eine wirtschaftliche Holzverbrennung derzeit dort möglich, wo der Brennstoff kostenneutral verfügbar ist bzw. ggf. noch Entsorgungserlöse erzielt werden können (u. a. Entsorgung von Restholz in holzbe- und -verarbeitenden Betrieben, von Straßenbegleitgrün und von Altholz). Insbesondere wenn Entsorgungserlöse als Gutschrift in die Wirtschaftlichkeitsberechnungen mit einfließen, sind z. T. beachtliche „wirtschaftliche Potentiale“ gegeben. Sie sind in der holzbe- und -verarbeitenden Industrie (vgl. [12]) und ggf. in anderen Bereichen des verarbeitenden Gewerbes aber im wesentlichen bereits erschlossen. Dies gilt jedoch nur eingeschränkt für kontaminiertes Altholz, für dessen umweltverträgliche energetische Verwertung entsprechende Verbrennungsanlagen benötigt werden, die gegenwärtig die erzielbaren Entsorgungserlöse z. T. überkompensieren. Außerdem gibt es hier Probleme infolge der oft von den Anwohnern befürchteten Freisetzung gesundheitsschädlicher Stoffe.

Zusammengenommen sind damit die wirtschaftlichen Potentiale einer Holznutzung gering und beschränken sich - wird eine mögliche Entsorgung nicht berücksichtigt - auf Nischenmärkte. Ist jedoch mit der energetischen Nutzung ein Abfallmanagement verbunden, ist durchaus eine wirtschaftliche, weitgehend aber bereits erschlossene Energiebereitstellung möglich

Aufgrund der novellierten TA Siedlungsabfall dürfen zukünftig im wesentlichen nur noch inerte Stoffe abgelagert werden. Dann ist (fast) nur noch eine thermische Entsorgung des anfallenden Altholzaufkommens möglich. Auch ist der Markt für Kompost bereits heute nahezu gedeckt und voraussichtlich mengenmäßig nicht erheblich ausweitbar. Damit muß - da die Deponierung zukünftig nicht mehr möglich ist - zunehmend auch das Aufkommen an Straßenbegleitgrün energetisch verwertet werden. Eine thermische Nutzung dieser Stoffe ist infolge der gesetzlichen Vorgaben dann ebenfalls „wirtschaftlich“ und vergrößert das schon gegebene wirtschaftliche Potential zusätzlich.

Stroh

Ähnlich wie beim Holz sind die Energieträgerkosten von Stroh vergleichsweise gering. Jedoch sind die Investitionen für Verbrennungsanlagen im kleinen Leistungsbereich verglichen mit Anlagen für fossile Energieträger aufgrund der aufwendigen Anlagentechnik

sehr hoch; sie liegen im Schnitt noch oberhalb der entsprechenden Aufwendungen für Holz. Auch ist der Betriebsaufwand im Vergleich zu einer Holzgefeuerten Anlage höher. Daraus resultieren deutlich über dem gegenwärtigen Niveau liegende Wärmegestehungskosten. Damit ist das wirtschaftliche Potential entsprechend gering. Eine unter den Kosten vergleichbarer fossiler Optionen liegende Wärmegewinnung mit Stroh ist gegenwärtig in Ausnahmefällen nur dort möglich, wo Stroh kostenlos anfällt. Dies kann bei Kleinanlagen im landwirtschaftlichen Bereich ggf. dann gegeben sein, wenn die Eigenleistung des Anlagenbetreibers sowohl bezüglich der Brennstoffbereitstellung als auch hinsichtlich des Anlagenbetriebs nicht berücksichtigt werden muß.

Ähnliche Aussagen gelten auch, wenn Stroh als Energieträger in größeren Anlagen eingesetzt wird. Außer mit den für Biomassegefeuerten Anlagen durchweg deutlich höheren Investitionen muß Stroh mit den fossilen Festbrennstoffen konkurrieren. Dabei ist beim Stroh verglichen mit fossilen Energieträgern der volumenbezogene Heizwert niedriger und damit die zu transportierenden Mengen größer; damit fallen auch bei niedrigen Energieträgerkosten hohe Transportkosten an. Außerdem ist die Brennstoffaufbereitung an der Anlage und die Verbrennungstechnik selbst i. allg. aufwendiger. Weiterhin sind Probleme mit einer Hochtemperaturkorrosion aufgrund des relativ hohen Chlorgehaltes von Stroh zu erwarten (vgl. [8]). Deshalb ist ein wirtschaftlicher Einsatz auch in Großanlagen derzeit nicht möglich. Dies gilt im Regelfall auch dann, wenn das Stroh als Abfallprodukt quasi kostenlos frei Anlage anfallen würde, da bei Großanlagen ein kostenneutraler Betrieb im Regelfall nicht möglich ist.

Ähnliche Zusammenhänge liegen auch dann vor, wenn das Stroh in vorhandenen Kohlekraftwerken zugefeuert werden soll. Dann müssen die heizwertbezogenen Strohkosten den entsprechenden Kohlepreisen einschließlich der anteiligen Umbaufwendungen, damit Stroh überhaupt in solchen Anlagen als Brennstoff eingesetzt werden kann, gegenübergerechnet werden. Unter rein ökonomischen Gesichtspunkten ist dies derzeit ebenfalls im Normalfall nicht wirtschaftlich.

Zusammengenommen sind damit die wirtschaftlichen Potentiale einer Strohnutzung bezogen auf die Größenordnungen im Energiesystem der Bundesrepublik Deutschland vernachlässigbar gering.

Giille und Mist

Biogasanlagen sind hinsichtlich des Investitionsvolumens teuer bis sehr teuer; dies gilt selbst dann, wenn die teilweise Verwendung ausgedienter und damit kostenneutraler Sy-

stemelemente für den Bau und ein gewisser Eigenleistungsanteil des potentiellen Betreibers bei der Anlagenerstellung unterstellt wird. Zum anderen sind die Betriebskosten aufgrund einer nur mit einem sehr hohen Aufwand realisierbaren vollständigen Automatisierung vergleichsweise hoch; sie sind nur dann relativ gering, wenn die Arbeitsleistung des potentiellen Betreibers (z. B. eines Landwirts, der den Betrieb im Rahmen seiner sonstigen Tätigkeiten realisiert) nicht monetarisiert wird.

Eine wirtschaftliche Biogasgewinnung aus den Exkrementen der Nutztierhaltung ist damit derzeit nur möglich, wenn die Anlagenabschreibung sehr gering ist und der Betrieb weitgehend kostenneutral realisiert werden kann. Derartige Bedingungen sind nur auf kleineren landwirtschaftlichen Betrieben bei einem entsprechenden Engagement des Betriebsleiters und damit ausschließlich in Ausnahmefällen gegeben. Folglich ist das wirtschaftliche Potential einer Energiegewinnung aus Biogas in Deutschland, das aus in der landwirtschaftlichen Tierproduktion anfallender Gülle bzw. anfallendem Mist erzeugt werden könnte, vernachlässigbar.

Klärgas und-schlamm

Die Stabilisation des in Kläranlagen anfallenden Klärschlamm erfolgt durch eine Anaerobbehandlung. Das dabei notwendigerweise entstehende Biogas darf infolge der Umweltschutzgesetzgebung nicht direkt in die Atmosphäre abgegeben werden. Als Verwertungsmöglichkeit verbleibt neben einer energetischen Nutzung damit nur eine Abfacklung, die jedoch ebenfalls aus Umweltschutzgründen vermieden werden sollte. Somit ist ausschließlich ein Einsatz als Brenngas zur Wärme- und/oder Stromerzeugung möglich. Dabei können sowohl die Wärme als auch der Strom in der Kläranlage als Prozeßenergie genutzt werden. Damit ist eine Energiegewinnung aus Klärgas infolge der gesetzlich vorgegebene Randbedingungen „wirtschaftlich“, da es quasi die einzige verbleibende Möglichkeit der Entsorgung ist. Entsprechendes gilt auch für das „wirtschaftliche Potential“.

Gleiche Aussagen können auch für eine energetische Verwertung von Klärschlamm gemacht werden. Da eine thermische Verwertung - neben einem auch weiterhin beschränkt möglichen Einsatz als Bodenverbesserer- (fast) als einzige Entsorgungsmöglichkeit bleibt, müssen die entstehenden Kosten für die Bereitstellung eines entsprechenden Energieträgers durch die Abwasserreinigungsgebühr aufgebracht werden. Folglich ist ein

Einsatz als Energieträger „wirtschaftlich“ und damit auch ein entsprechendes „wirtschaftliches Potential“ gegeben.

Deponiegas

Vergleichbar den derzeitigen Gegebenheiten bei der Klärgasnutzung sind grundsätzlich auch die Zusammenhänge bei der Deponiegasnutzung. Bei neuen Deponien ist eine Gasabsaugung aus Umweltschutzgründen vorgeschrieben, um zu verhindern, daß das Deponiegas unkontrolliert in die Atmosphäre gelangt und die angrenzende Vegetation schädigt. Wird eine Abfacklung aus Umweltschutzgründen nicht unterstellt, verbleibt nur eine energetische Nutzung. Aufgrund der meist wärmeverbraucherfernen Standorte von Deponien wird das gesammelte Gas im Regelfall in Gasmotoren zur Stromerzeugung eingesetzt. Folglich ist eine Deponiegasverwertung aufgrund der gesetzlichen Rahmenvorgaben immer gegeben und folglich auch „wirtschaftlich“. Damit ist auch das „wirtschaftliche Potential“ entsprechend hoch.

Haushaltsmüll und hausmüllähnliche Industrie- und Gewerbeabfälle

Grundsätzlich gelten vergleichbare Aussagen auch für die organische Fraktion im Hausmüll und den hausmüllähnlichen Abfällen. Da eine zwingende Entsorgungsnotwendigkeit besteht - und dies unabhängig von den Kosten - ist die Müllverwertung auch „wirtschaftlich“.

Erschließungspotentiale

Die Erschließungspotentiale hängen wesentlich von der administrativen Normensetzung, dem jeweiligen von staatlicher Seite beeinflussbaren Energieträgerpreisniveau und möglichen zusätzlichen Steuern bzw. Abgaben (z. B. Energiesteuer, CO₂-Abgabe) oder Subventionen bzw. Zuschüssen (z. B. Investitionsbeihilfe für Hackschnitzelfeuerungen, Mineralölsteuerbefreiung für Rapsmethylester) ab. Da derartige Maßnahmen unabhängig vom jeweiligen organischen Abfall das erschließbare Potential erheblich beeinflussen können, werden diese allgemeinen und übergeordneten Einflußgrößen im folgenden nicht weiter diskutiert. Es wird ausschließlich auf die Faktoren eingegangen, die unmittelbar an den jeweiligen organischen Abfall bzw. das jeweilige Nebenprodukt gekoppelt sind.

Holz

Holz könnte einen deutlich über den gegenwärtigen Anteil hinausgehenden Beitrag zur Deckung der Energienachfrage in Deutschland leisten. Die entsprechenden Verbrennungstechniken sind seit Jahren verfügbar und die notwendigen Versorgungsketten weitgehend vorhanden und erprobt. Die Emissionsgrenzwerte, die noch Anfang bis Mitte der achtziger Jahre schwierig einzuhalten waren, können mittlerweile mit modernen Anlagen sicher erfüllt werden. Auch sind die Mehrkosten einer Wärmebereitstellung aus den noch unerschlossenen Restholzpotentialen verglichen mit den entsprechenden fossilen Optionen oft nur gering (vgl. [9, 11]). Dabei sind handbeschickte Kleinanlagen im Gegensatz zu Hackschnitzelfeuerungsanlagen mit mechanischer Brennstoffzuführung relativ günstiger. Besonders kostengünstig können auch Feuerungsanlagen zur Wärmeversorgung von Nah- und ggf Fernwärmenetzen sein. Zusätzlich ist eine Holzheizung im kleinen Leistungsbereich (z. B. Kachelofen) durch eine von vielen Menschen empfundene angenehmere Wärme gekennzeichnet (d. h. Strahlungswärme). Außerdem vermittelt der Holzvorrat im Keller oft mehr ein Gefühl der Unabhängigkeit als das Heizöl im Tank. Auch wird in ländlichen Gegenden unabhängig von ggf. vorliegenden Mehrkosten traditionell oft mit Holz geheizt.

Deshalb wird von vielen Menschen eine Holzheizung trotz der ggf. damit verbundenen Mehrkosten oft als die günstigere Option betrachtet. Daher übersteigt das Erschließungspotential der bisher ungenutzten Holzpotentiale das wirtschaftliche Potential z. T. erheblich

Für das noch nutzbare Altholz entspricht das diskutierte „wirtschaftliche Potential“ dem Erschließungspotential, da letztlich eine Entsorgung des aus der ordnungsgemäßen Nutzung ausscheidenden Holzes gewährleistet sein muß, wenn eine Deponierung nicht mehr erlaubt ist.

Stroh

Auch Stroh könnte einen höheren Beitrag zur Wärmebedarfsdeckung in Deutschland leisten. Es ist unter günstigen bis sehr günstigen Randbedingungen mit nur geringen Mehrkosten nutzbar. Dies gilt insbesondere für landwirtschaftliche Betriebe und - eingeschränkt - für Siedlungen und Dörfer im ländlichen Raum.

Bei Stroh ist der Aufwand für die Brennstoffbereitstellung und -beschickung größer und die Verbrennungstechnik aufwendiger verglichen mit Holz. Deshalb müssen die höheren

Aufwendungen für die Verbrennungsanlage bei Stroh durch günstigere Brennstoffkosten ausgeglichen werden. Insbesondere bei landwirtschaftlichen Betrieben und im ländlichen Raum ist ggf dort ein gewisses Erschließungspotential im Rahmen des Ersatz- und Neubedarfs gegeben, wo der Brennstoff kostengünstig bereitgestellt werden kann. Es liegt über dem wirtschaftlichen Potential, da im Regelfall der jeweilige Betreiber oft bereit ist, Eigenleistungen zu erbringen (z. B. „kostenlose“ Beschickung der Anlage). Zusammengefasst ist es jedoch vergleichsweise gering, da selbst bei einem durchaus erheblichen Eigenleistungsanteil die Mehrkosten immer noch in einer beachtlichen Größenordnung liegen können.

Gülle und Mist

Ein über das sehr geringe wirtschaftliche Potential hinausgehendes Erschließungspotential einer Biogasgewinnung aus Gülle und Mist ist nur dann gegeben, wenn aufgrund gesetzlicher Vorgaben oder der persönlichen Bewertung des Betriebsleiters die mit der Methangärung verbundenen Effekte (z. B. Geruchsverminderung, Homogenisierung, Düngewertveränderung, teilweise Hygienisierung im thermophilen Bereich), die sich einer Monetarisierung entziehen, bei der letztlichen Bewertung Berücksichtigung finden. Dies wäre beispielsweise denkbar, wenn eine Geruchsreduzierung der auszubringenden tierischen Exkrememente vorgeschrieben werden würde. Dies hat bei bestimmten Betrieben bereits heute dann Bedeutung, wenn aufgrund einer relativ siedlungsnahen Lage Probleme mit der Geruchsbelästigung der Nachbarn auftreten, die unabhängig von administrativen Vorgaben zu lösen sind. Auch das Stromeinspeisegesetz führt infolge der relativ hohen Vergütung von aus Biogas erzeugtem Strom zu einer vermehrten Nutzung, da durch die ins öffentliche Netz eingespeiste elektrische Energie der Geldfluß in den landwirtschaftlichen Betrieb verbessert werden kann. Trotz derartiger Effekte liegt das Erschließungspotential nur unerheblich über dem praktisch unbedeutenden wirtschaftlichen Potential.

Wird die Methangärung jedoch als Systemkomponente zur Schließung der Stoffkreisläufe, wie es im Sinne einer Kreislaufwirtschaft erstrebenswert wäre, herangezogen, wäre eine Rückführung organischen Materials (z. B. Biomüll, organische Nebenprodukte aus der lebensmittelbe- und -verarbeitenden Industrie) in den landwirtschaftlichen Produktionsprozeß möglich. Durch eine thermophile anaerobe Fermentation zusammen mit Gülle als „Trägermaterial“ kann eine Homogenisierung und eine weitgehende Hygienisierung erreicht werden. Dies ist jedoch nur realisierbar, wenn die Schadstofffrachten bei dem in

die Landwirtschaft aus anderen Sektoren der Volkswirtschaft zurückgeführten Material auf ein Minimum begrenzt werden können. Unter diesen Randbedingungen handelt es sich bei dem entstehenden Biogas - vergleichbar dem Klärgas - um ein (gewünschtes) Abfallprodukt der Abfallbehandlung im Rahmen einer Entsorgung organischer Stoffe. Diese Art des Abfallmanagements in Deutschland zu etablieren, würde aber die entsprechenden administrativen Vorgaben erfordern. Unter diesen Bedingungen wäre das Erschließungspotential so hoch wie das erzwungene „wirtschaftliche Potential“.

Klärgas und -schlamm, Deponiegas sowie organische Mullfraktion

Das Erschließungspotential dieser Stoffe orientiert sich am „wirtschaftlichen Potential“. Letzteres ist wiederum durch die gesetzlichen Vorgaben festgelegt.

Schlußbetrachtung

Ziel dieser Ausführungen ist eine Darstellung der technischen Potentiale, der Kosten und der wirtschaftlichen sowie der erschließbaren Potentiale organischer Abfälle und Nebenprodukte. Folgende wesentliche Aussagen können dabei zusammengefaßt werden.

Restholz

Unter Restholz werden neben dem bei der Bewirtschaftung der heimischen Wälder anfallenden Waldrestholz auch die u.a. in der Holzbe- und -verarbeitenden Industrie anfallenden Holzreste sowie das Altholz und das Straßenbegleitgrün verstanden. Die korrespondierenden technischen Energiepotentiale liegen bei rund 241 PJ/a bzw. 2,6 % bezogen auf den derzeitigen Endenergieverbrauch in Deutschland. Die entsprechenden Energieträgerkosten schwanken stark, liegen aber auf einem relativ geringen Niveau. Zusätzlich sind beispielsweise bei dem industriellen Restholz (z. B. Rinde, Späne, Spreisel) z. T. Entsorgungserlöse anrechenbar; dies gilt insbesondere auch für belastetes Restholz. Daß das wirtschaftliche Potential trotz dieser geringen Energieträgerkosten vergleichsweise gering ist, liegt in den relativ hohen Investitionen für die Konversionsanlagen und dem beachtlichen Betriebsaufwand für festbrennstoffgefeuerten Anlagen begründet. Die resultierenden Wärmegestehungskosten liegen daher meist über denen aus fossilen Brennstoffen. Das wirtschaftliche Potential ist deshalb (fast) ausschließlich dort gegeben, wo keine Energieträgerkosten anfallen bzw. ggf. noch Entsorgungserlöse wie z. B. bei unbelaste-

tem industriellen Restholz erzielbar sind. Hier ist es jedoch im wesentlichen bereits erschlossen; dies zeigt auch eine Analyse der gegenwärtigen Nutzung. Unabhängig davon ist ein erheblich über dem wirtschaftlichen Potential liegendes Erschließungspotential gegeben, da eine Holzheizungsanlage durch eine Reihe von Vorteilen gekennzeichnet ist, die - obwohl nicht monetarisierbar - von vielen Menschen so bewertet werden, daß sich die im Vergleich zu fossil gefeuerten Anlagen gegebenen Mehrkosten überkompensieren. Dies wird in dem jährlich abgesetzten Brennholz von rund 54 PJ/a deutlich.

Stroh

Stroh als ein Nebenprodukt der Getreideproduktion wird in der Landwirtschaft bereits u. a. als Einstreu bei der Tierhaltung vielfach genutzt. Auch unter Berücksichtigung dieses energetisch nicht nutzbaren Anteils verbleibt ein Energieträgerpotential von etwa 104 PJ/a und damit von etwas mehr als einem Prozent bezogen auf den derzeitigen Endenergieverbrauch. Obwohl eine Energieträgerbereitstellung aus Stroh im Bereich der entsprechenden Kosten von Waldrestholz liegt, sind die resultierenden Wärmekosten i. allg. höher. Dies liegt in der aufwendigeren Verbrennungstechnik begründet, da Stroh einen deutlich höheren Anteil an flüchtigen Komponenten beinhaltet, eine geringere Energiedichte aufweist und durch einen vergleichsweise höheren Chlorgehalt als beispielsweise Holz gekennzeichnet ist. Deshalb bietet sich für eine energetische Nutzung primär die Verbrennung in Großanlagen an. Aufgrund dieser Zusammenhänge ist das wirtschaftliche Potential entsprechend gering; deshalb ist auch die gegenwärtige Nutzung minimal und beschränkt sich auf wenige Kleinanlagen aus den achtziger Jahren und eine im Rahmen eines Demonstrationsvorhabens errichtete Großanlage. Auch das Erschließungspotential ist nur unwesentlich höher, da die gegebenen und nicht monetarisierbaren Vorteile die derzeit noch gegebenen Mehrkosten im Normalfall nicht ausgleichen.

Biogas aus Gülle und Mist

Aus den Exkrementen der Nutztierhaltung kann unter Sauerstoffabschluß ein Biogas erzeugt werden, dessen Potential in Deutschland bei etwa 81 PJ/a bzw. knapp unter einem Prozent bezogen auf den Endenergieverbrauch liegt. Aufgrund der relativ aufwendigen Verfahrenstechnik sind die Kosten dieser Möglichkeit zur Energiegewinnung jedoch hoch und die derzeitige Nutzung vergleichsweise gering. Entsprechend klein ist auch das wirtschaftliche Potential; vor dem Hintergrund der Größenordnung des Energiesystems der Bundesrepublik Deutschland spielt es praktisch keine Rolle. Ähnliches gilt auch für

das Erschließungspotential, das das wirtschaftliche Potential nur unwesentlich dann übersteigt, wenn beispielsweise eine Geruchsreduzierung aufgrund der lokalen Gegebenheiten angezeigt erscheint.

Wird die Methangärung als ein wesentliches Systemelement der angestrebten Kreislaufwirtschaft angesehen, könnte sich dieser Zusammenhang grundsätzlich ändern. Unabhängig von den mit einer praktischen Umsetzung verbundenen Problemen (u. a. Gewährleistung einer Minimierung des Schadstoffeintrags in die Landwirtschaft) sollen dabei durch eine Rückführung des organischen Materials aus Haushalten, Industrie und Gewerbe in die Landwirtschaft die Stoffkreisläufe geschlossen werden. Durch die Methangärung dieser zurückzuführenden organischen Materie im thermophilen Bereich mit dem „Trägermaterial“ Gülle wird eine Homogenisierung und eine weitgehende Hygienisierung dieser Stoffe erreicht. Dies könnte eine Ausbringung auf landwirtschaftlichen Nutzflächen ermöglichen (d. h. Einsatz als Wirtschaftsdünger). Wird dieser Weg ordnungspolitisch gewünscht und administrativ festgeschrieben, ist damit dann auch eine Biogasgewinnung „wirtschaftlich“. Entsprechendes würde dann auch für das Erschließungspotential gelten.

Klärgas und-schlamm, Deponiegas und organische Müllfraktion

Sowohl Klär- als auch Deponiegas fällt im Rahmen eines Abfallmanagements an. Das Gas muß jeweils verwertet werden, da eine Einleitung in die Atmosphäre bzw. eine Abfacklung aus Umweltschutzgründen vermieden werden sollte. Hier bietet sich ein Einsatz in Blockheizkraftwerken oder Gasmotoren an. Damit ist aufgrund der administrativen Vorgaben eine Nutzung der rund 19 PJ/a an Deponie- und der etwa 27 PJ/a an Klärgas „wirtschaftlich“; entsprechendes gilt dann auch für das „wirtschaftliche Potential“.

Ähnliches gilt auch für die zwischen 46 und 55 PJ an jährlich anfallendem Klärschlamm, der aufgrund kaum gegebener anderweitiger Verwertungsmöglichkeiten mittelfristig energetisch eingesetzt werden muß. Aufgrund dieser Zwänge ist dies somit auch „wirtschaftlich“.

Vergleichbar sind die Zusammenhänge auch bezüglich der organischen Fraktion im Hausmüll und den hausmüllähnlichen Industrie- und Gewerbeabfällen. Auch hier wird - da mittelfristig eine Deponierung nicht mehr möglich sein wird, der Markt für Kompost weitgehend erschöpft ist und nur eine beschränkte Müllreduzierung möglich sein dürfte - eine energetische Verwertung wahrscheinlich. Jedoch kann derzeit noch nicht abgeschätzt werden, ob sich eine thermische Verwertung - lier wäre ein technisches Potential

im Bereich von rund 50 PJ/a erschließbar - oder eine anaerobe Fermentation zusammen mit landwirtschaftlichen Substraten (d. h. Gülle und Mist) und damit eine Rückführung des organischen Materials in die natürlichen Stoffkreisläufe durchsetzen wird.

Literatur

- [1] Wegener, G.; Frühwald, A.: Das CO₂-Minderungspotential durch Holznutzung; Energiewirtschaftliche Tagesfragen 44(1994), 7. S. 421 - 425
- [2] Kaltschmitt, M.: Wirtschaftlich nutzbares Potential erneuerbarer Energien zur Energieversorgung in Deutschland; Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft, Bonn, November 1994
- [3] Kaltschmitt, M.; Wiese, A.: Erneuerbare Energieträger in Deutschland - Potentiale und Kosten; Springer, Berlin, Heidelberg, 1993
- [4] Kaltschmitt, M.; Becher, S.: Perspektiven einer Biomassenutzung in Deutschland; Vortrag, Tagung „Thermische Nutzung von Biomasse“, Stuttgart, April 1994
- [5] Kaltschmitt, M.: Biogas - Potentiale und Kosten; KTBL-Arbeitspapier 178, Landwirtschaftsverlag, Münster-Hiltrup, August 1993, 2. überarbeitete und erweiterte Auflage
- [6] Brenndörfer, M.; Dreiner, A.; Kaltschmitt, M.; Sauer, N.: Energetische Nutzung von Biomasse; KTBL-Arbeitspapier 199; Landwirtschaftsverlag, Münster-Hiltrup, August 1994
- [7] Kaltschmitt, M.: Energiegewinnung aus Biomasse; in: Eyerer, P. (Hrsg.): Theorie und Praxis der Ganzheitlichen Bilanzierung; Springer, Berlin, Heidelberg, 1995 (im Druck)
- [8] Kaltschmitt, M.; Schütte, A.: Thermische Nutzung von Biomasse - Probleme und zukünftige Aufgaben; BWK 46(1994), 10, S. 447 - 450
- [9] Dreiner, K.; Frühwald, A.; Küppers, J.-G.; Schweinle, J.; Thoro, C.: Holz als umweltfreundlicher Energieträger; Schriftenreihe des Bundesministers für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten, Reihe A, Heft 432 (1994), S. 192 - 220
- [10] Kaltschmitt, M.; Wiese, A.: Technische Energiepotentiale, substituierbare End- und Primärenergieäquivalente und Kosten erneuerbarer Energieträger in Deutschland, Zeitschrift für Energiewirtschaft 18(1994), 1. S. 41 - 64
- [11] Kaltschmitt, M.; Sauer, N.: Ökonomischer Vergleich zwischen öl- und holzgefeuerten Heizungsanlagen; HLH 44(1993), 11, S. 641 - 645
- [12] Becher, S.; Frühwald, A.; Kaltschmitt, M.: CO₂-Substitutionspotential und CO₂-Minderungskosten einer energetischen Nutzung fester Biomassen in Deutschland; BWK 47(1994), 1/2, S. 33 - 38
- [13] Nitschke, J.: Verbrennungskraftmaschinen zur gekoppelten Erzeugung von Wärme und Kraft sowie Nutzung von Abfallgasen - Entwicklungsstand in Deutschland 1991; Elektrizitätswirtschaft 90(1991), 23, S. 1299-1307
- [14] Wagner, E.: Nutzung von Biomassen und Abfällen durch die öffentliche Elektrizitätsversorgung in Deutschland, Stand 1992; Elektrizitätswirtschaft 92(1993), 24, S. 1534 - 1536