

Anaerobe Verfahren zur Abfallbehandlung

Naturgerechte Technologien, Bau und
Wirtschaftsberatung (TBW) GmbH

(März 2000)

Technical Field:	
<input type="checkbox"/>	Energy / Environment (E)
<input checked="" type="checkbox"/>	Water / Sanitation (W)
<input type="checkbox"/>	Agriculture (A)
<input type="checkbox"/>	Foodprocessing (F)
<input type="checkbox"/>	Manufacturing (M)
This Technical Information is available in:	
<input checked="" type="checkbox"/>	English (e)
<input checked="" type="checkbox"/>	French (f)
<input checked="" type="checkbox"/>	German (g)
<input type="checkbox"/>	Spanish (s)
<input type="checkbox"/>	Other:.....

1. Einführung

Problemstellung

Durch Bevölkerungswachstum sowie veränderte Produktions- und Konsumgewohnheiten sind die abfallbedingten Belastungen von Gesundheit und Umwelt weltweit dramatisch angestiegen. Dies trifft die städtischen mehr als die ländlichen Räume. Schäden treten an Gewässern, Böden, Luft und Klima auf, die gesundheitlichen Folgen betreffen die gesamte Bevölkerung sowie Fauna und Flora. Gegenwärtig anfallende Produktions- und Konsumrückstände können aufgrund ihrer Menge, veränderten Beschaffenheit und Zusammensetzung von der Natur allein ohne weitere Behandlung nicht mehr hinreichend abgebaut, aufgenommen oder verwertet werden.

Insbesondere in ärmeren Ländern verbreiten sich so Infektionskrankheiten, Geruchsbelästigungen und andere Umweltschäden durch herumliegenden Unrat und wilde Müllkippen mit erschreckender Geschwindigkeit. Häufig werden die Abfälle beliebig in Flüsse und auf Kulturböden mit entsprechend schweren Folgeschäden für Gewässer, Nahrung und Natur verbracht.

Lösungsansätze

Durch die gewachsene Sensibilisierung der Bevölkerung und die zu tragenden Folgekosten kommen vor allem in Industrieländern jedoch zunehmend gesetzliche, organisatorische und technische Maßnahmen zur Eindämmung

dieser Probleme zum Einsatz, zum Teil mit erheblichem finanziellen Aufwand. Das Wachstum der Abfallmengen zu begrenzen und die Abfallerzeuger selbst für ihre Abfälle zur Verantwortung zu ziehen („Verursacherprinzip“) ist der naheliegendste Schritt, gefolgt von der Wiederverwertung eines möglichst großen Teils der Abfälle. Stoffliche und energetische Potentiale dieser Abfälle werden jedoch bisher erst selten und meist nur punktuell genutzt.

Deponierung

Das gängigste Entsorgungsverfahren sowohl in reichen wie auch in ärmeren Ländern ist die Deponierung der Abfälle. Dies setzt deren Sammlung und regelmäßigen Abtransport voraus. Deponien können sehr unterschiedliche Standards haben, angefangen vom offenen und stinkenden Müllhaufen im Umfeld der Städte mit einer Gefährdung für Grundwasser und Bevölkerung bis zu modernen geordneten Deponien mit aufwendiger Basisabdichtung zum Auffangen der Sickerwässer und Oberflächenabdichtung zur Verhinderung bzw. Sammlung der entstehenden klimaschädlichen Gasemissionen. Wichtigstes Problem von Deponien sind deren langfristige, über Jahrzehnte wirkungsvolle Umweltwirkungen und –schäden, der große Flächenbedarf, aber auch aktuelle gesundheitliche Schäden, Explosions- und Brandgefahren. Daher wird in Deutschland versucht, Neugenehmigungen von Deponien über die Einschränkung der zur Deponierung zugelassenen Abfallarten und -mengen zu vermeiden

und bis zum Jahr 2020 ganz auf die Deponien zu verzichten.

Müllverbrennung

Die Müllverbrennung kann einen Teil der im Abfall enthaltenen Energie nutzen, ist jedoch sehr viel technikintensiver als die Deponierung. Emissionen können mit modernsten Techniken und erheblichem Kostenaufwand (Behandlungskosten DM 200-350/Mg Abfall) weitgehend verhindert werden. Sowohl bei der Müllverbrennung als auch bei der Ablagerung von Abfällen in Deponien werden gemischte Abfälle eingesetzt, beide Verfahren erlauben alleine keine Wiederverwendung der Abfallstoffe.

Abfallrecycling

Ver mehrt werden daher in verschiedenen Ländern Abfalltrenn-, Sortier-, Rücknahme- und Pfandsysteme zur Mengenreduzierung und Wiederverwertung der Rohstoffe (insbesondere von Metallen, Glas, Papier, Plastik, Biomasse) eingesetzt. Dabei erfolgt je nach Land und Standort die Trennung der Abfallfraktionen entweder bereits im Haushalt, in eigenen Sortierstationen, in speziellen Behandlungsanlagen oder auf der Deponie.

Größter Abfallbestandteil (bezogen auf Volumen und Gewicht) in allen Ländern sind biologisch abbaubare (organische) Abfälle aus biogenen Bestandteilen. Ihr Anteil schwankt zwischen 35 % und 90 % und stellt das größte Potential zur Verwertung und zur Verringerung der Abfallmengen dar. Zugleich ist der biologisch aktive Teil des Abfalls maßgeblich verantwortlich für Sickerwasser-, Gas- und Geruchsemissionen von Deponien. Daher sollen nach dem neuen Kreislaufwirtschaftsgesetz bspw. in Deutschland Abfälle mit mehr als 5% organischen Bestandteilen nicht mehr auf Deponien entsorgt werden.

Kompostierverfahren

In Mitteleuropa, besonders in Deutschland, werden seit ca. 20 Jahren Trennung

und separate Kompostierungsverfahren für trockene Bioabfälle (v.a. Strauchschnitt und Gartenabfälle) eingesetzt, da die getrennte Bioabfallbehandlung auch gesetzlich eingefordert wird. Der entstehende Kompost wird in der Landwirtschaft, Garten- und Landschaftsbau zur Bodenverbesserung und Düngung wiederverwendet. Während der Kompostierung der biologischen Abfallbestandteile wird Wärmeenergie freigesetzt, die nicht genutzt wird, dabei jedoch zur Hygienisierung der Abfälle beiträgt. Flächenbedarf und Behandlungsdauer sind relativ hoch. Soll die Abluft aus Kompostanlagen gereinigt werden, um Geruchs- und Keimemissionen zu verhindern, sind die Anlagen- und Betriebskosten durch die erforderliche geschlossene Betriebsweise beträchtlich.

Anaerobe Abfallbehandlung

Seit etwa 15 Jahren werden daher vermehrt anaerobe Gärverfahren zur Behandlung vorwiegend biologischer Abfälle entwickelt. Sie wurden vor etwa 10 Jahren entwickelt und sind jetzt in den meisten großen Städten Deutschlands, aber auch als dezentrale Behandlungseinheiten in kleineren Städten und im ländlichen Raum im Einsatz.

Die anaerobe Abfallbehandlung hat folgende *Vorteile*:

- Außer trockenen Bioabfällen können auch feuchte Bestandteile wie Speisereste, Abfälle aus der Nahrungsmittelverarbeitung und der Landwirtschaft verarbeitet werden.
- Durch die Gasproduktion und Nutzung des enthaltenen Energiepotentials werden Strom, Wärme und Kälte produziert und genutzt.
- Das vergorene Substrat kann flüssig oder getrocknet wiederverwendet werden.
- Für den Betrieb der Anlagen werden nur relativ kleine Flächen benötigt.
- Durch die geschlossene Betriebsweise können Gerüche stark reduziert werden, die Anlagen näher an bebau-

ten Gebieten errichtet und somit Transportkosten reduziert werden.

- Deponien oder Verbrennungsanlagen werden mengenmäßig und bezüglich der zu erwartenden Emissionen entlastet.

Nachteile sind

- Der noch relativ hohe Technikaufwand.
- Die daher je nach Bauweise noch sehr unterschiedlichen, zum Teil hohen Investitions- und Betriebskosten.
- Das Erheben einer Abfallgebühr ist trotz Einnahmen für Energie und Dünger in den meisten Fällen Voraussetzung. Die Behandlungskosten liegen zwischen 50 und 200 DM/t.
- Die Technologie ist noch relativ jung und gerade in Entwicklungsländern bisher kaum eingesetzt.
- Die effiziente Verwertung, Handhabung und Qualitätskontrolle von Energie, Kompost und weiteren Produkten verlangen ausreichendes Know-how.

Durch die geringe Geruchsbelastung, ein breites Substratspektrum und eine positive Energiebilanz hat sich die Vergärung zumindest in Deutschland mittlerweile auf dem Abfallmarkt etabliert; der Technologievorsprung der Kompostierung ist aufgeholt, so dass die Anzahl der anaeroben Abfallbehandlungsanlagen stetig steigt.

Im folgenden soll als Hilfestellung für EntscheidungsträgerInnen finanzschwacher Länder auf dem Gebiet der Abfallbe-

handlung und –entsorgung eine Übersicht über verschiedene Verfahren zur Abfallvergärung in Deutschland gegeben, verschiedene Anwendungen und Umweltwirkungen dargestellt und die Übertragbarkeit von Technologie und dem zugehörigen Abfallwirtschaftskonzept auf Länder außerhalb Europas diskutiert werden.

2. Übersicht über wichtige Verfahren der Abfallvergärung

Anaerobe Bakterien können auf eine lange Geschichte zurückblicken. Methanbakterien gelten als wahrscheinlich älteste Lebensform der Erde (Entstehung vor rund 3,5 Milliarden Jahren). Die erste Beschreibung der Biogasbildung erfolgte im Jahre 1682 durch BOYLE, der erste dokumentierte Biogasreaktor wurde 1859 in Bombay betrieben. Im Jahre 1967 beschrieb BRYANT das bis heute nahezu unveränderte Modell des anaeroben Kohlenstoffabbaus. Die technologische Nutzung der anaeroben mikrobiellen Aktivität kann unter unterschiedlichen Voraussetzungen und in verschiedenen Prozessarten geschehen, denen allen der Ausschluß von Sauerstoff gemeinsam ist.

Die folgende Tabelle faßt wichtige Merkmale und erforderliche Spezifikationen zur Klassifizierung von verschiedenen Vergärungsverfahren und wichtigen Behandlungsschritten für die Behandlung organischer Abfälle zusammen.

Systematik verschiedener Gärverfahren (nach TBW GmbH, Frankfurt)

1	Anforderung an die Zusammensetzung der Inputmaterialien d.h.: Grenzen, z.B. TS-Gehalt, Faseranteil und -länge, Korngröße, Viskosität, Fremdstoffgehalt					
2	Vorbehandlung zur Verringerung der Schadstoff- und Inertstoffgehalte z.B.: Handsortierung, mechanische/magnetische Abtrennung, Naßaufbereitung					
3	Für das Verfahren erforderliche Vorbehandlung z.B.: Zerkleinerung und Stoffaufschluß: mechanisch, chemisch, enzymatisch, thermisch, bakteriologisch [Verfahren, eingesetzte Hilfsstoffe] Spanne des TS-Gehaltes: Zumischung von Prozeßwasser [Trockenvergärungs-, Naßvergärungsverfahren] Bei Monochargen erforderliche Mischung mit anderen vergärbaren Ausgangsstoffen					
4	a) Verfahren					
	1-Phasen-Vergärung			2-Phasen-Vergärung		
	Einstufiges Verfahren	Mehrstufiges Verfahren	Feststoff stationär/ Flüssigphase mobil	Feststoff mobil/ Flüssigphase stationär	Aufkonzentrierung	Abkonzentrierung
	b) Gärtemperaturbereich/e (mesophil / thermophil)					
	c) Rühren/Mischen – Rührsystem/Mischsystem					
	d) Förderorgane zwischen den Stufen (z.B. Pumpe, gravimetrisch)					
	e) Sediment-/Schwimmstoffabscheidung in der Vergärung					
	f) Verweilzeit/en					
	g) Einrichtungen zur Steuerung des Prozeßmilieus					
	h) Phasentrennung am Schluß der Vergärung					
5	Nachbehandlungsverfahren Nachrotte (z.B. Zeitspanne für Rottegrad V, Temperaturverlauf in der Nachrotte), Trocknung, Entkeimung, Reduzierung der (Nähr)Salzfracht, Abwasserreinigung					
6	Endprodukt/e d.h.: Spezifikation nach anerkannten Kriterien (z.B. Rottegrad, Hygienisierungsgrad, Nitrat-/ Salzgehalt)					

3. Anwendung anaerober Verfahren zur Abfallbehandlung

Aufgrund der Ölkrise in den siebziger Jahren wurden durch die Möglichkeit des Energiegewinns verstärkt anaerobe Verfahren zur Behandlung kohlenstoffreicher Substrate eingesetzt. Durch den Verfall der Energiepreise in den achtziger Jahren verloren sie jedoch zunächst

wieder an Bedeutung. Einzig zur Klärschlammfäulung finden sich diese Verfahren auch heute noch auf nahezu allen größeren Kläranlagen im Einsatz.

Trotz Aktivitäten einzelner Firmen seit Mitte der achtziger Jahre, die anaerobe Behandlung von Bioabfällen zu etablieren, wurde in Deutschland die erste großtechnische Vergärungsanlage für Bioabfälle erst 1992 in Kaufbeuren in Betrieb

genommen (NIEDERMEIER et al., 1994). Seitdem ist die Anzahl der Vergärungsanlagen und Gärverfahren sprunghaft angestiegen.

Die anaerobe Behandlung organischer Siedlungsabfälle im großen Maßstab blickt somit erst auf eine kaum 20-jährige Geschichte zurück. Die gängigen Anwendungen der anaeroben Feststoffbehandlung sind:

1. Die anaerobe Behandlung biogener Siedlungsabfälle
2. Die Co-Vergärung von getrennt gesammeltem Bioabfall mit landwirtschaftlichen aber auch mit industriellen Abwässern und Abfällen
3. Co-Vergärung von getrennt gesammeltem Bioabfall in den Faultürmen kommunaler Kläranlagen
4. Vergärung von Restabfall im Rahmen eines Mechanisch-Biologischen Abfallkonzeptes.

Eignung organischer Abfälle für die Vergärung oder Kompostierung

VERGÄRUNG	KOMPOSTIERUNG
Gülle/Klärschlamm Schlachtabfälle Speiseabfälle Küchenabfälle organische Gewerbeabfälle Bioabfälle (ländlich/städtisch) Rasenschnitt/Laub Grünabfälle (Strauchschnitt)	

Abnehmende Feuchte



Bevorzugt behandelte Substrate in Abfallvergärungsanlagen:

- Biogene Haushaltsabfälle (Biotonne)
- Speise- und Fleischreste aus der Essenszubereitung
- Speiseabfälle aus Einrichtungen zur Gemeinschaftsverpflegung
- Gemüseabfälle
- Feldfruchtabfälle
- Organische Abfälle aus der Lebensmittelverarbeitung
- Abfälle der Fischverarbeitung
- Molkereiabfälle
- Schlachthofabfälle
- Rasenschnitt, z.B. Gras von Stillungsflächen
- Gemischte Grünpflanzenreste, z.B. aus Grünanlagen und Friedhöfen, wildwachsende Pflanzen

- Organische Abfälle aus der Landwirtschaft wie Pflanzenreste, Stroheinstreu, verdorbene Silagen
- Reststoffe aus der Futtermittelherstellung
- Gülle und Festmist
- Schlempe und Treber
- Tee- und Kaffeeabfälle
- Reststoffe aus der Stärkeverarbeitung
- Organisch verunreinigte/stofflich nicht verwertbare Papiere/Pappe
- Spezielle Biomasse-Kulturen für energetische Zwecke (z.B. Gras, Mais)
- Reststoffe aus der Zuckerherstellung
- Organische Reststoffe aus der chemischen Industrie
- Reststoffe aus der Kosmetikindustrie

3.1. Die anaerobe Behandlung biogener Siedlungsabfälle

Aufbereitung

Abfallvergärungsverfahren lassen sich nach der Art der Aufbereitung der Bioabfälle klassifizieren. Es wird daher unterschieden zwischen trockenen und nassen Vergärungsverfahren. Die Wahl der Aufbereitung bestimmt im wesentlichen die Leistung der nachfolgenden biologischen Behandlung, die Qualität des Gärrückstandes sowie die Art und Menge der zu behandelnden Abwässer.

Bei **trockenen Vergärungsverfahren** werden die Bioabfälle vor der biologischen Behandlung in ihrem Wassergehalt im Anlieferungszustand belassen. Der Feststoffgehalt (TR-Trockenrückstand) von Bioabfällen liegt in der Regel zwischen 35 bis 45% TR. Die Abtrennung der Störstoffe erfolgt wie bei der Kompostierung vor

und/oder nach der biologischen Behandlung, beispielsweise durch Siebung, Magnetabscheidung und Handsortierung. Auf eine Handsortierung des Eingangsmaterials kann in der Regel nicht verzichtet werden.

Für **nasse Vergärungsverfahren** werden die angelieferten Bioabfälle durch Zugabe von Frisch- und/oder Kreislaufwasser zu einer Suspension mit einem Feststoffgehalt von etwa 10% TR angemischt. Auf diese Weise entsteht eine pump- und rührfähige Suspension, die vor der biologischen Behandlung durch ein Lochsieb geführt werden kann, um Störstoffe zurückzuhalten. Das zum Anmischen zugegebene Wasser muß nach der biologischen Behandlung mit Hilfe von Entwässerungsaggregaten wie Dekanter oder Kammerfilterpresse abgetrennt werden.

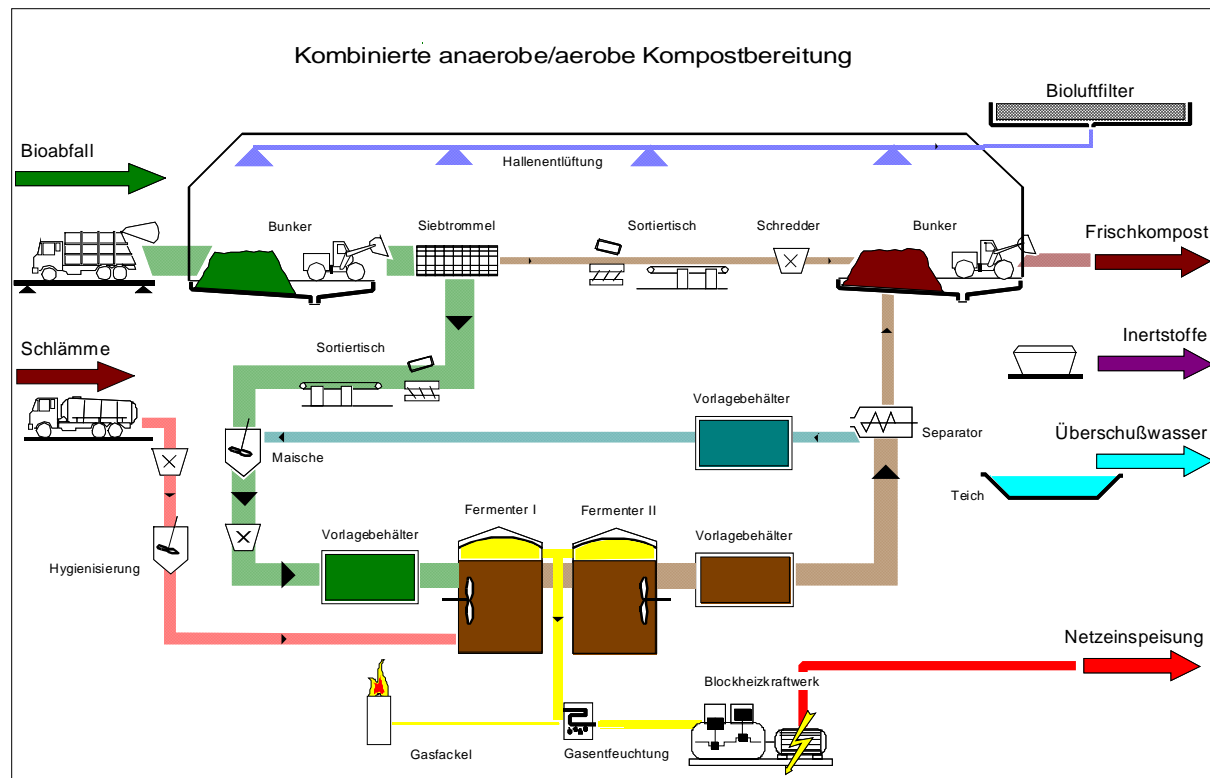


Abb. 1: Beispielhafter Verfahrensablauf einer Naßvergärung

Biologische Behandlung

Die Verfahren zur Vergärung von Bioabfällen lehnen sich eng an die Verfahren zur Behandlung von Klärschlämmen, landwirtschaftlichen Abfällen und hochbelasteten Abwässern an. So ist zu erklären, daß viele Reaktorbauweisen und Verfahrenskombinationen nichts grundsätzlich Neues darstellen, sondern nur für die Besonderheiten von Bioabfall modifiziert wurden. Als grundsätzliche Verfahrenskombination kommen drei Varianten in Betracht:

- Einstufige Verfahren
- Mehrstufige Verfahren
- Zweiphasige Verfahren

Jeder auf dem Markt befindliche Anbieter von Bioabfall-Vergärungsanlagen bedient sich einer dieser drei Grundvarianten, so daß diese im folgenden diskutiert werden. Die Reaktoren können kontinuierlich, quasi-kontinuierlich (Beschickungsintervall: 3 bis 6 mal täglich) oder im Batch-Betrieb (eine Charge pro angestrebter Verweilzeit) betrieben werden.

Einstufige Verfahren

Einstufige Reaktoren können mesophil (35 °C) oder thermophil (55 °C) betrieben werden. Eine Möglichkeit zur vollständigen Hygienisierung des Gärrückstandes bietet nur die thermophile Betriebsweise. Bei der mesophilen Behandlung wird oft eine Vor- oder Nachpasteurisierung der Bioabfälle bzw. des Gärrückstandes zur Hygienisierung vorgesehen.

Als Reaktorbauart für einstufige Verfahren scheiden Hochleistungsreaktoren wie Anaerobfilter oder UASB-Reaktoren aufgrund der hohen Feststoffkonzentrationen im Bioabfall bzw. in der Suspension aus. Es bleiben daher nur Rührkessel-, Perkolator- oder Plug-Flow-Reaktoren zur einstufigen Bioabfallbehandlung, bei denen die Verweilzeit der Bioabfälle der Verweilzeit der aktiven Biomasse entspricht. Rührkesselreaktoren, wie sie aus der Klärschlammfaulung bekannt sind, werden häufig verwendet, um naß aufbereitete Bioabfälle zu behandeln.

Dabei wird der Reaktorinhalt kontinuierlich durch externe Pumpen, Schraubenschaufler oder durch Einpressung von Faulgas umgewälzt. Letzteres ist besonders vorteilhaft, da trotz intensiver Umwälzung nur geringe Scherkräfte auf die Mikroorganismen wirken, jedoch steigt hierdurch die Gefahr der Bildung von Schwimmdecken.

Besonders zu beachten ist der Einfluß von hohen Feststoffkonzentrationen bei Trockenfermentationsverfahren: Da sich der Reaktorinhalt nicht oder nur sehr schwer und unvollständig umwälzen läßt, werden anstatt eines vollaufgemischten Rührkesselreaktors häufig Plug-Flow-Reaktoren verwendet, bei denen das Material den Reaktor quasi als Pfropfen durchläuft. Um aktive Biomasse mit den Bioabfällen zu vermischen, wird das Eingangsmaterial mit dem Ausgangsmaterial angeimpft.

Der Vorteil von Plug-Flow-Reaktoren ist, daß das Material eine definierte Zeitspanne im Reaktor verbleibt, da Kurzschlußströmungen nahezu ausgeschlossen sind. Insbesondere im Hinblick auf die geforderte Hygienisierung im thermophilen Betrieb ist dies von Bedeutung.

Gänzlich auf eine Umwälzung verzichtet wird bei den Perkolator-Reaktoren. Der Bioabfall wird chargenweise, meist mit ausgefaultem Material vermischt in den Reaktor gegeben. Das Gärgut wird im Reaktor mit Prozeßwasser berieselt (perkoliert). Durch den geringen Stoffaustausch ist die Gasproduktion und damit auch der Stabilisierungsgrad des Gärrückstandes sehr gering. Perkolator-Reaktoren kommen häufig als erste Stufe zur Hydrolyse vor einem Methanreaktor zur Anwendung (siehe mehrstufige und zweiphasige Verfahren).

Mehrstufige Verfahren

Unter dem Begriff mehrstufige Verfahren wird hier verstanden, daß mehrere Reaktoren, in denen jeweils unterschiedliche Milieubedingungen herrschen, hintereinander geschaltet sind.

Häufig angewendet wird die Kombination einer ersten Hydrolysestufe und einer zweiten thermo- oder mesophilen Faulstufe. Vorteil dieser Variante ist, daß die Hydrolyse bei niedrigen pH-Werten schneller verläuft als bei den für die Faulung erforderlichen pH-Werten zwischen 6,5 und 7,5. Dadurch kann das für die Hydrolyse erforderliche Reaktorvolumen relativ gering ausfallen. Der Faulung werden dann weitgehend gelöste und damit schnell umsetzbare Substrate zur Verfügung gestellt, so daß das Faulraumvolumen ebenfalls klein dimensioniert werden kann.

Da Bioabfälle ein sehr heterogen zusammengesetztes Substrat darstellen, ist auch die Hydrolisierbarkeit der einzelnen Substratkomponenten unterschiedlich. Für Bioabfallkomponenten, die langsamere Hydrolysegeschwindigkeiten (im Hydrolysereaktor) als Methanisierungsgeschwindigkeiten (in der Faulstufe) aufweisen, ergeben sich keine Vorteile durch diese Zweistufigkeit. Da die vorversäuerten Bioabfälle aus der Hydrolysestufe naturgemäß einen sehr hohen Gehalt an gelöstem Substrat aufweisen, muß genügend Biomasse zur Methanbildung vorhanden sein, um einer Versäuerung des Faulbehälters vorzubeugen. Insbesondere reagieren die im mesophilen Temperaturbereich aktiven Bakterien empfindlich auf hohe Konzentrationen an gelöstem Substrat, während bei der thermophilen Betriebsweise kaum Probleme zu erwarten sind.

Ob eine gezielte Vorversäuerung der Bioabfälle mehr Faulbehältervolumen einspart, als durch das Hydrolysereaktorvolumen benötigt wird, muß für das zu behandelnde Substrat im Einzelfall geprüft werden. Da die anaeroben Abbauprozesse eng miteinander verzahnt sind, können erhebliche steuerungstechnische Probleme mit der Trennung von Hydrolyse / Versäuerung und Acetogenese / Methanogenese auftreten. Hydrolyse und Methanogenese von komplexen Substraten wie Bioabfällen sind nicht ohne weiteres voneinander zu trennen. Sinnvoll

kann daher ein großzügig dimensionierter Bunker zur Anlieferung der Bioabfälle sein, in dem leicht abbaubare Substrate in den Bioabfällen bereits hydrolisiert werden können.

Ein weiteres vielversprechendes Konzept ist, statt der oben beschriebenen Trennung des Abbauweges die Trennung nach Temperaturbereichen vorzunehmen. Als erste Stufe können beispielsweise thermophile Bakterien den Umbau von weitgehend gelösten Substraten sowie die Hygienisierung übernehmen, während im nachgeschalteten mesophilen Schritt komplexe Verbindungen zu Methan reduziert werden. Durch dieses "Teamwork" erhöht sich die Prozeßstabilität des Vergärungsverfahrens und es können sich erhebliche Leistungsverbesserungen ergeben. Die umgekehrte Abfolge (mesophil – thermophil) scheint wenig sinnvoll, da mesophile Anaerobbakterien belastungsempfindlicher sind als thermophile. Außerdem lassen sich thermophil stabilisierte Bioabfälle wesentlich schlechter entwässern (CHRIST et al., 1997), so daß als letzte Stufe auf jeden Fall ein mesophiler Reaktor gewählt werden sollte.

Zweiphasige Verfahren

Ähnlich dem zweistufigen Konzept der Trennung von Hydrolyse und Methanisierung wird bei zweiphasigen Verfahren die notwendig hohe Biomassenkonzentration im Methanisierungsreaktor durch den Einsatz eines Hochleistungs-Methanreaktors, wie z.B. eines Anaerobfilters, des Kontakt-schlammverfahrens oder des UASB-Verfahrens realisiert (KUNST, 1982).

Für leicht hydrolisierbare Substrate, wie beispielsweise homogene Großmarktabfälle sind zweiphasige Verfahren sehr gut geeignet. Da sich Bioabfälle jedoch zu einem erheblichen Teil aus schwer hydrolisierbaren Substanzen zusammensetzen, ist die Hydrolyse für einen Großteil des Substrates der geschwindigkeitslimitierende Abbauschritt, so daß kaum eine Verkürzung der Verweilzeit zu erwarten ist. Ob der erhöhte maschinentechnische

und energetische Aufwand gerechtfertigt ist, muß im Einzelfall geprüft werden.

3.2. Covergärung von Bioabfall mit landwirtschaftlichen Abfällen in einer landwirtschaftlichen Biogasanlage

Die Einbindung der Land- oder Gartenbauwirtschaft in den Stoffkreislauf der biogenen Stoffe ist häufig geboten, da sie einer der Hauptabnehmer für das vergorene Produkt (Faulschlamm oder Kompost) ist.

Jedoch stößt besonders in der Landwirtschaft der Einsatz von anonymen Kompost aus städtischen Bioabfällen häufig auf Skepsis. Dies hängt vor allem mit der für den einzelnen Landwirt nicht nachvollziehbaren und kontrollierbaren Herkunft und Behandlung der Abfälle zusammen. Im schlimmsten Fall können solche Akzeptanzprobleme die gesamte biologische Abfallbehandlung in Frage stellen.

Die Mitbehandlung (Cofermentation) von organischen Reststoffen in landwirtschaftlichen Biogasanlagen kann somit die Nutzung der Endprodukte sowie Auslastung und Wirtschaftlichkeit in der Landwirtschaft häufig bereits vorhandener Anlagen verbessern.

Entsorgungsgebühren schaffen eine zusätzliche Einnahmequelle für die Landwirtschaft. Insgesamt gibt es in Deutsch-

land bereits mehr als hundert derartige Co-Vergärungsanlagen

Folgende Organisationsformen setzen sich für die Covergärung landwirtschaftlicher Abfälle mit vorsortierten Bioabfällen zunehmend durch:

- Die dezentrale Aufbereitung und Vergärung des Biomülls bei den Landwirten, und die dezentrale Verwertung des Faulschlammes am selben Standort. Bei einer kombinierten Abfallaufbereitung und Tierhaltung in einem Betrieb ist jedoch auf größtmögliche Sauberkeit zu achten, um die Übertragung eventuell im Abfall vorhandener Krankheitserreger zu vermeiden.
- Die Trennung in eine zentrale Aufbereitung des Biomülls durch die Landwirte, ggf. auch eine zentrale Vergärung und eine dezentrale Verwertung des Faulschlammes bei den einzelnen Landwirten. Dies vor allem, weil die Investitionskosten für eine dezentrale Aufbereitung des Biomülls, bezogen auf die behandelte Menge an Abfall, relativ hoch sind. Bei einer zentralen Aufbereitung steigen jedoch die Transportkosten, da die landwirtschaftlichen Abfälle zur Anlage transportiert werden müssen. Ob diese Mehrkosten durch die Reduzierung der Investitionskosten aufgrund des zentralen Baus der Vergärungsanlage aufgewogen werden, muß im Einzelfall geprüft werden.

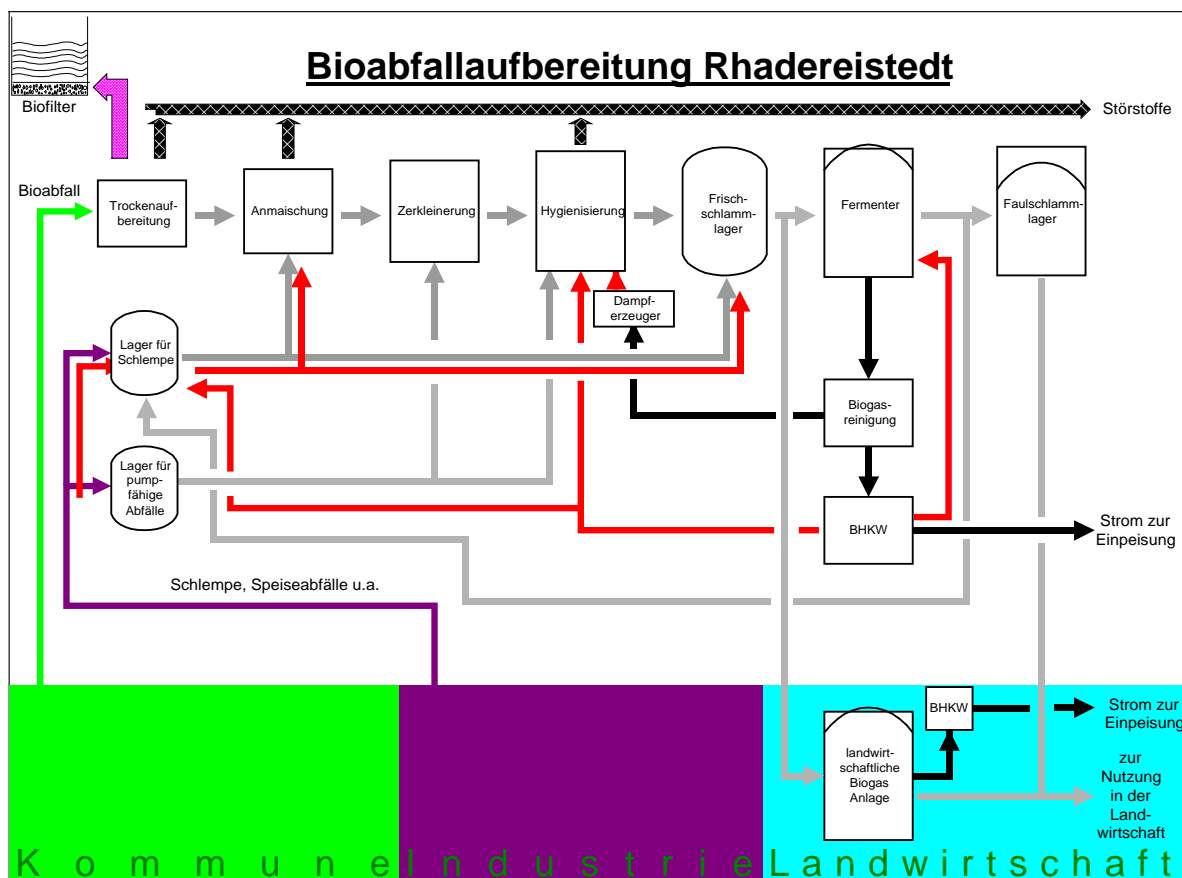


Abb. 2: Co-Vergärung von vorsortiertem Bioabfall mit landwirtschaftlichen und industriellen Abfällen

Abbildung 2 zeigt den Verfahrensablauf eines Konzepts, bei dem der Bioabfall zentral aufbereitet und die entstehende Bioabfallsuspension dezentral in landwirtschaftlichen Biogasanlagen mitvergoren wird. Durch die zentrale Aufbereitung, die in den einzelnen landwirtschaftlichen Betrieben so nur schwer realisierbar wäre, kann ein hochwertiger Faulschlamm garantiert werden (geringer Störstoffanteil). Der Faulschlamm wird direkt auf den landwirtschaftlichen Flächen der vergärenden und umliegenden Betriebe verwertet.

3.3. Co-Vergärung von Bioabfällen mit Faulschlamm in Klärwerken

Die Mitbehandlung von Biosubstraten in Faultürmen zur anaeroben Klärschlammbehandlung wird bisher nur selten

praktiziert. Trotz rechtlicher Unsicherheiten bietet sich die Co-Vergärung von Bioabfällen vielerorts aus ökonomischen und logistischen Gründen an:

- Wenn bspw. die bei der Planung zugrundegelegte Auslastung nicht erreicht wird. Dies ist in der Mehrzahl der bundesdeutschen Kläranlagen der Fall, wo sich häufig hohe Sicherheitszuschläge bei der Bemessung der Behältergröße (oft begründet durch schwankende Klärschlammengen oder erwartete Mengenzuwächse durch Bevölkerungswachstum, Unsicherheiten bezüglich der Eindickung oder der notwendigen Verweilzeiten) in der Praxis als nicht erforderlich erwiesen haben.
- Die Co-Vergärung zusätzlicher Substrate führt somit zu einer besseren Faulraumnutzung. Der Fest-

stoffgehalt im Reaktor wird erhöht und die Gasproduktion gesteigert. Dadurch wird die Energiebilanz der Faulung und insgesamt die Wirtschaftlichkeit der Anlage verbessert.

Neben der Problematik der Aufbereitung der Co-Substrate, die eventuell zusätzliche Investitionen erforderlich macht, ist für Kläranlagenbetreiber besonders die mögliche Veränderung der Konsistenz des Gärreststoffs und des Preßwassers von Bedeutung, das je nach Strukturanteil und Zusammensetzung unterschiedliches Verhalten zeigt. Auch treten bei den Parametern CSB (chemischer Sauerstoffbedarf), BSB₅ (biologischer Sauerstoffbedarf in 5 Tagen) und TKN (Total Kjeldahl Nitrogen) durch die Co-Vergärung häufig leicht erhöhte Belastungen auf.

3.4. Mechanisch-Biologische-Misch- und Restabfallbehandlung (MBRA) mit anaerob biologischer Stufe

Als Restabfall wird derjenige Abfallteil bezeichnet, der nach einer Abfalltrennung in den privaten Haushalten in der Restmülltonne verbleibt. Ihm sind also in Deutschland bspw. bereits Glas, Papier, Verpackungs-, Bio- und gefährliche Abfälle weitgehend entzogen. Trotz der Sortieranstrengungen sind allerdings durch Sortierfehler u.ä. in den deutlich reduzierten Restabfallmengen auch heute noch erhebliche Bestandteile an Organik, inklusive Papier und Pappe, vorhanden (25-50%), die biologisch abgebaut werden können. Im Anschluß an verschiedene Aufbereitungsschritte (Zerkleinerung, Siebung) werden auch für diese Abfallfraktion zunehmend biologische Verfahren, u.a. die anaerobe Vergärung zur Energiegewinnung und Stabilisierung angewandt. Die verbleibenden Reststoffe werden zumeist gepreßt und dann auf einer Deponie entsorgt oder verbrannt.

4. Umweltwirkungen der anaeroben (Bio-) Abfallbehandlung

4.1. Klimaschutz

- a) Deponien ohne Gaserfassung, Gasreinigung und Gasverwertung mit einem hohen Organikanteil in den Abfällen, also insbesondere in Ländern der Dritten Welt, sind unter Klimagesichtspunkten im Abfallbereich am problematischsten.
- b) Hauptursache für Klimaschädigungen sind die hohen gasförmigen Emissionen, insbesondere von Methan (das je nach Zeithorizont eine 21-56-fach höhere schädliche Klimawirkung entfaltet als bspw. CO₂). - In Deutschland bspw. ist daher im Rahmen des Kreislaufwirtschaftsgesetzes, u.a. aus Klimaschutzgründen (eine weitere Rolle spielen die Brand- und Explosionsgefahr, auch die Geruchsemissionen), die Verbringung von Abfällen mit einem Organikanteil von >5% untersagt worden, auch nach einer Kompostierung.
- c) Verbrennungsanlagen weisen in den meisten Entwicklungsländern aufgrund des unzureichenden Emissionsschutzes enorme Probleme auf. Hinzu kommt, daß diese sowohl im Betrieb als auch in der Investition zumeist nicht finanzierbar sind. Unter klimatischen Gesichtspunkten kommen als sinnvolle Verwertungs- und Entsorgungsalternativen daher zumeist nur die Kompostierung und die Vergärung in Frage.
- d) Bei der Kompostierung entstehen je nach Qualität und Gleichmäßigkeit der Belüftung auch anaerobe Zonen, wobei gleichermaßen Methan in die Atmosphäre entweichen kann. Eine Zwangsbelüftung erfordert erhebliche Energiemengen (zumeist aus fossilen Quellen), die, wenn auch in geringerem Ausmaß, das Klima

belasten. Wird die Belüftung nur durch Wenden des Materials sichergestellt, kann der Energiebedarf entsprechend geringer sein. Das Risiko des Entstehens anaerober Zonen und auch des Schimmelns des Materials steigt dann jedoch je nach dem angewendeten Belüftungssystem und den betrieblichen Bedingungen.

- e) Anaerobe Verfahren können durch Nutzung der entstehenden (erzeugten) Methanemissionen, eigene Herstellung der benötigten Betriebsenergie und die Erzeugung eines Energieüberschusses (der

fossile Energiequellen ersetzen kann) zum Klimaschutz im Abfallbereich am besten beitragen.

- f) In dem Maße, wie es gelingt, auch die Transportkosten zu reduzieren, verringert sich darüber hinaus der Ausstoß klimaschädlicher Emissionen (fossile Energien) durch geringere Transportbewegungen der Fahrzeugflotte.

Vergleicht man die Verfahren Vergärung, Kompostierung, und Deponierung (ohne Gasfassung, mit Gasabfackelung, mit Gasnutzung) miteinander, so ergibt sich schematisch das folgende Bild hinsichtlich ihrer Klimawirkung.

Tabelle 1: Abfallbehandlungsverfahren und ihre Klimaeffekte (Trend)

	Vergärung	Deponie*		Kompostierung	
	mit Gasnutzung	Ohne Gasfassung	mit Gasfassung + Abfackelung		mit Gasnutzung
Vermeidung von Methanemissionen	ja	nein	ja/nein**	ja/nein**	ja
Emissionsreduzierung durch Energiesubstitution für externe Nutzer	ja	nein	Nein	ja	nein
Geringer fossiler Energiebedarf	ja	ja	ja	ja	nein

* In dem Maße, wie in Deponien kein Lufteintritt erfolgt, sind sie im Prinzip gleichermaßen kontrolliert oder unkontrolliert "anaerobe Verfahren".

** Abhängig von der Qualität der Gasfassung, Vermeidung nur, wenn keine Deponiegasverluste auftreten.

4.2. Gewässerschutz

Die Sickerwasseremissionen von Deponien belasten an vielen Standorten die Grundwasservorräte:

- a) Problematisch ist vor allem die langfristige Wirkung von unzureichend abgedichteten Deponien auf die Gewässer.
- b) Die Zusammensetzung und Toxizität ist nur selten bekannt und kann sich durch unterschiedliche Auswaschungen über die Jahre auch verändern.

- c) Häufig werden auch Wasserläufe und Flüsse, die der Trinkwasserversorgung dienen, für die wilde Ablagerung von Abfällen verwendet.

Auch bei der anaeroben Abfallbehandlung können größere Presswassermengen anfallen, die gleichermaßen gereinigt werden müssen, da sie ansonsten erhebliche Gewässerbelastungen verursachen.

4.3. Ressourcenschutz

Eine Rückführung der Abfallnährstoffe und der Organik in den Boden dient dem Ressourcenschutz. Dies gilt gleichermaßen für eine Verwertung der in den Abfällen enthaltenen Energie zur Produktion und Nutzung erneuerbarer Energiequellen.

- a) Sind hinreichend Bewußtsein und Tradition für die Wiederverwertung und Nutzung der organischen Abfallstoffe und enthaltenen Nährstoffe und die sich daraus ergebenden Möglichkeiten zur Bodenverbesserung vorhanden, wird der Reststoff als Qualitätsdünger und Bodenverbesserer eingesetzt.
- b) Die vermehrte Verwendung von organischen Düngern kann dazu beitragen, die Bodenfruchtbarkeit (Durchlüftung, Wasserhaltefähigkeit, Bodenleben, Krankheitsresistenz) nachhaltig zu verbessern, den Humus aufzubauen und der weitverbreiteten Bodendegradation und -erosion entgegenzuwirken.
- c) Bei einem städtischen oder stadtnahen Einsatz kann dies auch umwelpädagogische Zwecke erfüllen, zur Schulung des Bewußtseins über ökologische Zusammenhänge, Bodenfruchtbarkeit, Wasserkreislauf, Luftqualität und Klima.
- d) Wenn sich mithilfe des produzierten Materials der Anteil der städtischen Grünflächen, die Zahl der Gebäude- oder Dachbegrünungen sowie städtische oder stadtnahe Garten-, Gemüse-, Obstbauflächen und Nahrungsproduktionsaktivitäten erhöhen lassen, so sind weitere nicht ganz unwesentliche Vorteile bezüglich Luftqualität, Hygiene, Wasserhaushalt sowie ggf. Nahrung und Beschäftigung wirksam.

5. Übertragbarkeit der Verwertungsmöglichkeiten und Verfahren in Schwellen- bzw. Entwicklungsländern

Aufgrund der unterschiedlichen Müllzusammensetzung, der zum größten Teil nicht stattfindenden Mülltrennung und des heißeren und feuchteren Klimas sind die Abfallwirtschaftskonzepte und -technologien mitteleuropäischer Staaten nur bedingt auf finanzschwächere Staaten des Südens direkt übertragbar. Andererseits sind gerade in Entwicklungsländern die Anteile der Organik im Abfall besonders hoch, die Temperaturen für anaerobe Verfahrensschritte geeignet und der Bedarf für Energie, Dünger und Bodenverbesserer meist gegeben.

Anaerobe Verfahren wurden in "Serienreife" in Entwicklungsländern bisher nur für Schlämme und Abwässer angewendet. Großtechnisch wurde die Abfallvergärung für Siedlungsabfälle in Entwicklungsländern bisher nicht eingesetzt.

Besonders kostenintensiv bei Abfallvergärungsanlagen sind in Deutschland/Europa die vollautomatische Aufbereitung und Selektion des Materials, die in Entwicklungsländern anders organisiert werden könnte. Betriebsaufwendungen für den Energiebedarf und die Zuverlässigkeit der Energieversorgung - häufig ein wichtiger limitierender Faktor - können durch anaerobe Verfahren selbst gedeckt und statt dessen Energieüberschüsse produziert werden.

Wichtige finanzielle Aspekte bei anaeroben Verfahren sind:

- a) Die benötigten Kosten für den Gesamtbetrieb der Anlage können z.T. aus Energie-, Gärsubstrat- bzw. Komposteinnahmen gedeckt werden. Finanzielle Überschüsse sind je nach Preisverhältnissen durchaus denkbar.
- b) Je nach Nutzung und Substitution von Energieträger und Dünger

könnten Devisenersparnisse eintreten.

- c) Je nach Entfernung kann eine zentrale oder dezentrale Vergärung in Stadtnähe langfristig kostengünstiger sein, als der Transport der Abfälle zu entfernten Deponien. Dazu trägt auch die Reduzierung des Abfallvolumens durch die Vergärung auf ca. 1/3 der Ausgangssubstanz bei.

Die Kostensituation ist standortabhängig und läßt sich kaum verallgemeinern: Ein reiner Investitionskostenvergleich hängt stark vom Technikniveau, der Qualifikation und der Organisationsform, stadtplanerischen und geographischen Gesichtspunkten, einzelnen Kostenkomponenten wie Fläche, Energie, Kompost, Abwasser, Transport, qualifizierter und unqualifizierter Arbeit etc. ab.

Die Einführung der anaeroben Abfallbehandlung verlangt infrastrukturell und für

Ausbildung Begleitmaßnahmen, so daß Mittel für die lokale Anpassung der geeignetsten Vergärungstechnik erforderlich sind.

Zusammenfassung

Anaerobe Behandlungsverfahren für kommunale Abfälle sind noch relativ junge Technologien, die in Entwicklungsländern bisher nicht etabliert sind. Aufgrund der gleichzeitig stofflichen und energetischen Verwertung, bergen sie jedoch zukunfts-trächtige ökonomische und ökologische Potentiale im Abfallsektor. Gerade in Entwicklungsländern kann die anaerobe Abfallbehandlung wegen der dort knapperen Ressourcen, günstigerer Temperaturen und meist geringerer Lohnkosten künftig eine relevante Rolle in der Abfallentsorgung einnehmen.

Faustzahlen für die anaerobe Abfallbehandlung
Abfallmengen

Häusliche Abfälle	360–400 kg/E*a
Davon Organik	120-150 kg/E*a
	30-40 kg oTS/E*a

Einsatzoptima

TS-Gehalt	10-15%
davon anaerob abbaubar	95 %
geringe Konzentrationen an toxischen Substanzen	

Prozeßdaten organische Abfälle

Mesophiler Bereich	35 °C
Thermophiler Bereich	55 °C
Gärdauer	20 d
Kompostproduktion	0,2 t/t Input
Hygienisierung/Pasteurisierung	bei 65 – 70 °C für mindestens 1 h

Energie

Eigenbedarf Strom	150-200 kWh _{el} /t oTS _{Input}
Produktion Strom	600-800 kWh _{el} /t oTS _{Input}
Stromüberschuß	400-650 kWh _{el} /t oTS _{Input}
Eigenbedarf Wärme	200-300 kWh _{therm} /t oTS _{Input}
Produktion Wärme	1000-1200 kWh _{therm} /t oTS _{Input}
Wärmeüberschuß	700-1000 kWh _{therm} /t oTS _{Input}

6. Weiterführende Literatur

- CHRIST, O., FAULSTICH, M., (1997): The TherMes-Process – Two-stage thermophilic/mesophilic anaerobic treatment of suspended or-ganic waste; in: 1st International Conference, Narbonne, 28.-29. April 1997; Treatment of Solid Waste and Wastewater; Hrsg. Wilderer, Delgenes, Tartler, Graja; Pg. 265 - 271.
- KUNST, S. (1982): Untersuchungen zum anaeroben Abbau polymerer Kohlenhydrate zur Optimierung der Versäuerungsstufe bei anaeroben Abwasserreinigungsanlagen. In: Institut für Siedlungswasserwirtschaft und Abfalltechnik der Universität Hannover; Heft 54, Hannover.
- NIEDERMEIER, K., CHRIST, O., WILDERER, P. (1994): Biostabilisation Process of the model Kaufbeuren; 17th International Symposium on anaerobic Digestion; 23-27 January 1994, Cape Town, South Africa, S. 128 - 131.
- Statusbericht des GTZ-Sektorvorhabens „Förderung der Anaerobtechnologie zur Behandlung kommunaler und industrieller Abwässer und Abfälle“, Band 3: Abfallbehandlung.

7. Weiterführende Adressen

Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit (GTZ) GmbH

gate-Informationsdienst
 Postfach 5180
 65726 Eschborn
 Deutschland
 Tel: ++49-6196-79-3093
 Fax: ++49-6196-79-7352
 Email: gate-id@gtz.de
 Internet: <http://www.gtz.de/gate/gateid.afp>

ANS – Arbeitskreis zur Nutzbarmachung von Siedlungsabfällen

Fachausschuß Vergärung
 Ernst-Moritz-Arndt-Straße 2
 40822 Mettmann
 Deutschland
 Tel: ++49-2104-958874
 Fax: ++49-2104-958875

TBW GmbH – Naturgerechte Technologien, Bau und Wirtschaftsberatung

Baumweg 10
 60316 Frankfurt
 Deutschland
 Tel: ++49-69-943507-0
 Fax: ++49-69-943507-11
 Email: tbw@ipf.de

Knoten Weimar

Bauhaus-Universität Weimar Lehrstuhl Abfallwirtschaft

Coudraystr. 7
 99423 Weimar
 Deutschland
 Tel: ++49-3643-584644
 Fax: ++49-3643-584643
 e-mail: bionet@uni-weimar.de

Tagungsbände Kasseler Abfallforum

K. Wiemer, M. Kern (Hrsg.), M.I.C. Baeza-Verlag Witzenhausen
 Kirchstraße 8
 37213 Witzenhausen
 Deutschland
 Tel.: ++49-5542-72720
 Fax: ++49-5542-4509

Internet-Adressen:

- <http://www.gtz.de/anaerob>
- <http://www.tbw-frankfurt.com>