



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK

Bundesamt für Energie BFE

FESTSTOFF-VERGÄRUNG IN DER SCHWEIZ

Schlussbericht 2007

Ausgearbeitet durch

Bruno Liesch und Christian Müller,
INES Ingenieurbüro für nachhaltige Energiesysteme
Luisenstrasse 14, 3000 Bern 9, info@ines-energy.ch, www.ines-energy.ch

Impressum

Datum: 12. Juni 2007

Im Auftrag des Bundesamt für Energie, Forschungsprogramm Biomasse

Mühlestrasse 4, CH-3063 Ittigen

Postadresse: CH-3003 Bern

Tel. +41 31 322 56 11, Fax +41 31 323 25 00

www.bfe.admin.ch

BFE-Bereichsleiter, bruno.guggisberg@bfe.admin.ch

BFE-Projektnummer: 101639

Bezugsort der Publikation: www.energieforschung.ch

Für den Inhalt und die Schlussfolgerungen ist ausschliesslich der Autor dieses Berichts verantwortlich.

Inhaltsverzeichnis

1.	Zusammenfassung	5
2.	Abstract.....	6
3.	Glossar	7
4.	Ausgangslage.....	9
5.	Ziel der Arbeit	10
6.	Methode.....	10
7.	Vergärung	11
7.1.	Prozess	11
7.2.	Verfahrensdesign	11
7.3.	Feststoffvergärungsverfahren.....	13
8.	Pfropfenstromverfahren - kontinuierlich	14
8.1.	Verfahren Kompogas	14
8.2.	Verfahren LINDE.....	16
9.	Verfahren mit siloartigem Fermentersystem - kontinuierlich	17
9.1.	Verfahren Dranco.....	17
9.2.	Verfahren ATF	18
9.3.	Verfahren Valorga.....	19
9.4.	Zweistufige Feststoffvergärungsanlage Järna Schweden	20
9.5.	Verfahren Anacom	21
10.	Perkolationsverfahren – kontinuierlich	22
10.1.	Verfahren ISKA	22
10.2.	Verfahren ATZ.....	24
10.3.	Verfahren Bioperkolat.....	24
11.	Perkolationsverfahren - diskontinuierlich.....	26
11.1.	Verfahren Bekon	27
11.2.	Verfahren Bioferm	29
11.3.	Container-Verfahren.....	30
11.4.	Verfahren Look-TNS®.....	31
11.5.	Verfahren 3A	32
12.	Aufstauverfahren - diskontinuierlich	34
12.1.	Aufstau-Boxen-Fermenter	34
12.2.	Verfahren Chiemgauer	35
13.	Haufwerkverfahren - diskontinuierlich	37
13.1.	Folienschlauchvergärung	37
14.	Zusammenfassung der Vergärungsverfahren.....	39
15.	Feststoffvergärung versus Flüssigvergärung	40
15.1.	Verfahrenstechnische Aspekte	41
15.2.	Ökonomische Aspekte	42
15.3.	Ökologische Aspekte.....	43
16.	Feststoffvergärungs-Potential in der Schweiz	44

17.	Rahmenbedingungen	46
17.1.	Situation in der Schweiz	46
17.2.	Erfahrungen in Deutschland.....	47
18.	Schlussfolgerung	48
19.	Referenzen	49

1. Zusammenfassung

In der Schweiz werden zurzeit vermehrt Biogasanlagen realisiert. Die realisierten Anlagen für gewerblich-industrielle Zwecke basieren vorwiegend auf dem Prinzip Kompogas. In der Landwirtschaft werden Flüssigvergärungsanlagen gebaut, die flüssigen Hofdünger (Gülle), gemischt mit zusätzlichen organischen Zusatzstoffen (Co-Substraten), zur Produktion von Biogas nutzen.

Von Landwirtschaftsbetrieben ohne Tierhaltung, welche keine flüssigen Hofdünger zur Verfügung haben, besteht die Nachfrage nach Vergärungsanlagen, die feste, stapelbare organische Reststoffe direkt verwerten können. Diese Anlagen werden aufgrund des höheren Trockensubstanzgehaltes des Inputmaterials als Feststoffvergärungsanlagen bezeichnet. Derzeit werden schon solche Feststoffvergärungsanlagen im In- und Ausland betrieben. Die Feststoffvergärung wird schon seit mehreren Jahren zur gewerblich-industriellen Entsorgung von kommunalem Biomüll eingesetzt. In den letzten Jahren wurden Feststoffvergärungsverfahren entwickelt, welche auch für den Einsatz in der Landwirtschaft ausgelegt sind. Mit der Einführung des novellierten Erneuerbaren-Energie-Gesetzes in Deutschland und dem damit festgelegten Innovationsbonus stieg die Nachfrage nach Feststoffvergärungsverfahren. Verschiedene Feststoffvergärungsanlagen wurden gebaut und erste Erfahrungen wurden gesammelt. Es ist deshalb sinnvoll, die gewonnen Kenntnisse aus Projekten im In- und Ausland zu kennen.

Diese Studie setzt sich zum Ziel, diese Erfahrungen zusammenzufassen und auszuwerten, um die Einsatzmöglichkeiten der Feststoffvergärung in der Schweizer Landwirtschaft einschätzen zu können.

Die bedeutendsten Feststoffvergärungsverfahren wurden in diesem Bericht strukturiert erfasst. Sowohl bautechnische, wie auch wirtschaftliche Aspekte wurden, soweit es die Datengrundlage zulies, berücksichtigt.

Die Studie zeigt, dass es derzeit eine Vielzahl von Verfahren im Bereich der Feststoffvergärung gibt, welche in der Abfallwirtschaft zur Entsorgung von Biomüll und in der Landwirtschaft eingesetzt werden. Kontinuierlich betriebene, gewerblich-industrielle Verfahren, welche bisher nur in der Abfallentsorgung eingesetzt wurden, werden seit Kurzem auch für landwirtschaftliche Bedürfnisse, vorwiegend zur Verarbeitung von nachwachsenden Rohstoffen, angepasst. Die Vergärung von organischen Feststoffen ist heute auch bei Flüssigvergärungsanlagen Stand der Technik. Aufgrund tendenziell tieferer Gesteherungskosten für Strom sind Flüssigvergärungsanlagen heute konkurrenzfähiger als Feststoffvergärungsanlagen.

Die Feststoffvergärung wird jedoch als Technologie mit hohem Entwicklungspotential gesehen. In Deutschland wird diese Technologie derzeit gefördert, damit der wirtschaftliche Betrieb auch in der Landwirtschaft möglich ist. In der Schweiz bestehen derzeit Rahmenbedingungen (Gesetzgebung, Betriebsstrukturen etc.), die eine spezielle Förderung der Feststoffvergärung nicht vorsehen. Deshalb sind die Flüssigvergärungsanlagen für den Einsatz in der Landwirtschaft derzeit der Feststoffvergärung tendenziell vorzuziehen.

2. Abstract

Currently biogasification facilities in Switzerland are increasingly implemented. Facilities utilized in the commercial and industrial sector are mainly based on the technology of the company Kompogas (dry fermentation). Agricultural facilities are built in order to treat liquid manure, dung as well as added substrates such as organic residues from households, restaurants and the edibles industry (wet fermentation).

Farmers without livestock husbandry and not having the possibility of using manure are interested in fermentation technologies that enable the digestion of stackable organic material with high dry matter contents. Due to the high contents on organic matter this kind of technology is called dry fermentation. This technology is already established in the municipal solid waste sector. For agricultural purposes new technologies were invented in the last few years.

Thus, the aim of this study is to summarize experiences with dry fermentation technologies. This research provides information on the state-of-the-art of current dry fermentation systems. Thus, it enables estimations on the potential of implementing dry fermentation in the Swiss agriculture.

The study reveals that the current dry fermentation technologies provided by various enterprises are not really suitable (complex, continuous operating digestion reactors, developed for handling municipal solid waste) or mature (batch digestion reactors) for the application in the Swiss agriculture, yet. Nowadays, besides from economic considerations, wet fermentation technologies also enable the utilization of organic substrate with high dry matter contents and are thus economically more competitive than dry fermentation systems.

Nevertheless, dry fermentation is seen as a technology with high development potential. This is proved by the fact that in Germany dry fermentation systems are economically supported in order to facilitate the application for agricultural purposes. In Switzerland, profitability of dry fermentation is not warranted under the existing general framework (legislation, agricultural structures etc.).

3. Glossar

Aerob

Aerob bedeutet unter Beteiligung von Sauerstoff. Lebewesen, die elementaren Sauerstoff zum Leben benötigen, werden als aerob bezeichnet.

Anaerob

Anaerob bedeutet ohne Zutritt von Sauerstoff. Der anaerobe Abbau von organischen Substanzen durch Mikroorganismen (Pilze und Bakterien) liefert zahlreiche organisch-chemische Verbindungen, als Endprodukt größtenteils Methan (CH_4).¹

Blockheizkraftwerk (BHKW)

Ein Blockheizkraftwerk besteht aus einem stationären Motor, der nach dem Prinzip der Kraft-Wärme-Kopplung sowohl elektrischen Strom als auch Wärme produziert.²

Biogasanlage

Anlage zur Erzeugung von Strom, Wärme und Dünger aus Biomasse. Unter Luftausschluss wird Biomasse in Gärreaktoren zu Biogas umgewandelt, welches einem Blockheizkraftwerk zur Strom- und Wärmeproduktion zugeführt wird. Die vergorene Biomasse wird als natürlicher Dünger eingesetzt. Das Gas könnte auch als Treibstoff Verwendung finden oder direkt in einem Gasofen verbrannt werden.

Biozönose

(*biocoenosis*) bios (gr. = Leben) koinos (gr. = gemeinsam) Lebensgemeinschaft aller in einem bestimmten Biotop lebenden Pflanzen, Tiere und Mikroorganismen. Sie sind voneinander abhängig und stehen mit der unbelebten Umwelt in Wechselbeziehungen.³ Im Zusammenhang mit der Vergärung in Biogasanlagen bezieht sich der Begriff vorwiegend auf Mikroorganismen.

Gasspeicher

Gasdichter Behälter oder Foliensack, in dem das Biogas zwischengespeichert wird, bevor es energetisch genutzt wird.

Gärbehälter (Gärreaktor, Fermenter, Faulbehälter)

Behälter, in dem der mikrobiologische Abbau des Substrates stattfindet.

Gütlelager (Endlager)

Behälter und Erdbecken, in dem Gülle oder das vergorene Substrat gelagert wird.

Hydrolyse

(*hydrolysis*) Hydro (gr. = Wasser) lysis (gr. = Lösung). Chemisch betrachtet ist die Hydrolyse die Spaltung einer chemischen Verbindung unter Anlagerung eines Wassermoleküls. Im Bereich der Abwassertechnologie wird darunter i.d.R. die Zerkleinerung partikulärer organischer Substanzen durch Einwirkung von Mikroorganismen verstanden.⁴

Maschinenraum

Raum, in dem Gasreinigungs-, Gasförder- oder Gasverwertungseinrichtungen einschließlich deren Steuer- und Regelungstechnik enthalten sind.

Nass- oder Flüssigvergärung

Verfahren werden als Nass- oder Flüssigvergärung bzw. –fermentation bezeichnet, wenn Substrate bzw. Substratgemische verwendet werden mit TS-Gehalten kleiner als 15%.

NaWaRo

Nachwachsende Rohstoffe sind natürliche organische Stoffe, die aus Pflanzen gewonnen werden, z.B. aus Holz, Faserpflanzen (Baumwolle, Flachs, Jute), öl-, zucker- oder stärkehaltigen Pflanzen (Raps, Rüben, Kartoffeln) und Stroh.

¹ www.solarregion.net/index.php

² http://www.geschlossenefonds.de/oekoenergien_glossar.htm

³ <http://www.wasser-wissen.de/abwasserlexikon/b/biozoenose.htm>

⁴ <http://www.wasser-wissen.de/abwasserlexikon/h/hydrolyse.htm>

Raumbelastung

Die Raumbelastung ist eine wichtige Grösse für die Beurteilung der biologischen Belastung des Prozesses. Sie gibt an, wie stark der Gärbehälter bzw. die am Abbau beteiligten Bakterien mit organischem Material belastet sind. Sie berechnet sich aus der Substratkonzentration S (kg org. Substrat / m^3), der täglichen Beschickungsmenge Q (m^3) und dem Fermenternutzvolumen V (m^3):

$$RB = Q \cdot \frac{S}{V}$$

Substrat

Zur Vergärung bestimmte organische Stoffe.

Trocken- oder Feststoffvergärung

Verfahren werden als Trocken- oder Feststoffvergärung bzw. –fermentation bezeichnet, falls stapelbare Substrate bzw. Substratgemische mit Trockensubstanz(TS)-Gehalten über 15 bis hin zu 35% verwendet werden [40].

Vergärung bzw. Fermentierung

Abbau von organischen Reststoffen unter Sauerstoffabschluss in einer Biogasanlage oder in einem Klärwerk. Sowohl die ganze anaerobe Behandlung organischer Reststoffe als auch ihr Kernprozess, die Fermentation wird im Deutschen unter 'anaerober Vergärung' verstanden.⁵

Verweilzeit

Die hydraulische Verweilzeit ist definiert als die mittlere Aufenthaltszeit des Gärsubstrates im Fermenter. Sie berechnet sich aus dem Fermenternutzvolumen V (m^3) und der täglichen Beschickungsmenge Q (m^3 /Tag):

$$tR = \frac{V}{Q}$$

⁵ <http://gis.joensuu.fi/termit/termeng/selite/biogas/ger/1302sel.htm>

4. Ausgangslage

In der Schweiz werden zurzeit vermehrt Biogasanlagen realisiert. Die realisierten Anlagen für gewerblich-industrielle Zwecke basieren vorwiegend auf dem Prinzip Kompogas. In der Landwirtschaft werden Flüssigvergärungsanlagen gebaut, die flüssigen Hofdünger (Gülle), gemischt mit zusätzlichen organischen Zusatzstoffen (Co-Vergärung), zur Produktion von Biogas nutzen.

Von Landwirtschaftsbetrieben ohne Tierhaltung, welche keine flüssigen Hofdünger zur Verfügung haben, besteht die Nachfrage nach Vergärungsanlagen, die feste, stapelbare organische Reststoffe direkt verwerten können. Diese Anlagen werden aufgrund des höheren Trockensubstanzgehaltes des Inputmaterials als Feststoffvergärungsanlagen bezeichnet.

Die Technologie der Feststoffvergärung in der Landwirtschaft ist nicht neu. Anfänge einer Feststoffvergärung, vor allem mit der Behandlung von Stallmist verknüpft, wurden schon in den 60er Jahren beschrieben [20]. In den 90er Jahren wurden in der Schweiz auch schon Versuche im Bereich der Feststoffvergärung für landwirtschaftliche Betriebe durchgeführt. Dabei ging es seinerzeit um Untersuchungen zur Vergärung von Mist in seiner Ursprungsform, ohne weitere Zerkleinerung. Die Pilot-Anlagen wurden jedoch nicht bis zur Marktreife weiterentwickelt [8], [22], [30].

In Deutschland wurden in jüngster Zeit landwirtschaftliche Anlagen ausschliesslich zur Vergärung von Feststoffen realisiert. Besonders nach der Verabschiedung des novellierten Erneuerbare-Energien-Gesetzes (EEG) in Deutschland und dem damit verbunden Innovationsbonus stieg die Nachfrage für Feststoffvergärungsanlagen stark an. Neue Systeme kamen auf den Markt, welche die Biogasproduktion aus fester, stapelbarer Biomasse in sogenannten Batch-Reaktoren ermöglichen. Auch Hersteller von Feststoffvergärungsverfahren, die schon seit mehreren Jahren zur gewerblich-industriellen Entsorgung von kommunalem Biomüll eingesetzt werden, orientieren sich heute am Biomassepotential der Landwirtschaft.

Um den heutigen Stand der Technik in der Feststoffvergärung zu erfassen, ist es sinnvoll, die heutigen Verfahren und die gewonnenen Kenntnisse aus Projekten im In- und Ausland zu kennen.

5. Ziel der Arbeit

Diese Studie setzt sich zum Ziel, die bis anhin gemachten Erfahrungen im Bereich Feststoffvergärung zusammenzufassen und auszuwerten. Damit können die Einsatzmöglichkeiten der Feststoffvergärung in der Schweizer Landwirtschaft besser eingeschätzt werden.

Die Studie beinhaltet die Prüfung der Einsatzmöglichkeiten der Feststoffvergärung in der Schweizer Landwirtschaft. Sie schenkt folgenden Punkten besondere Beachtung:

- Bestehende Feststoffvergärungs-Verfahren (Auswahl)
 - Technologie und bautechnische Aspekte (Konzept, Platzbedarf)
 - Qualitätsrelevante Aspekte (Funktion der Anlage, Qualitätssicherung)
 - Investitionskosten
- Rahmenbedingungen in der Schweiz
- Potential in der Schweizer Landwirtschaft

6. Methode

In einer ersten Phase werden die Erfahrungen mit Feststoffvergärungs-Anlagen im In- und Ausland recherchiert. Hierzu werden die folgenden Schritte unternommen:

- Literaturstudium (Berichte, Internetrecherche)
- Kontaktaufnahme mit Planern, Herstellern und Betreibern von Anlagen
- Besuch von Anlagen in der Schweiz und Deutschland

Die zweite Phase beinhaltet das Zusammenfassen und die Analyse einer Auswahl aktueller Feststoffvergärungsverfahren. Die Verfahren werden gemäss Zielvorgaben strukturiert erfasst. Erfahrungen aus der Praxis oder aus Pilot- und Laborversuchen werden dargestellt.

7. Vergärung

7.1. PROZESS

Der anaerobe Abbau (Vergärung) ist ein natürlicher biologischer Prozess, welcher den Abbau von organischem Material durch Mikroorganismen unter Ausschluss von Sauerstoff beschreibt. In angewandten Wissenschaften wird dieser Prozess genutzt, um in geschlossenen Reaktoren unter Berücksichtigung kritischer Bedingungen (Kontrolle von Feuchtigkeitsgehalt, Temperatur, pH) die Gasproduktion und die Abbauraten zu maximieren [26].

Heutige Technologien nutzen die biologische Produktion von Biogas (55-70% Methan), welches direkt als Treibstoff oder zur Strom- und Wärmeproduktion genutzt werden kann. Die in ingenieurtechnischen Verfahren gewonnene Energie hängt vorwiegend von der Qualität, sprich vom Methangehalt des Gases ab. Diese wiederum ist abhängig von verschiedenen Faktoren, wie dem Verfahrensdesign oder der Zusammensetzung der Festsubstanz im Reaktor. Im Folgenden wird genauer auf diese Faktoren eingegangen.

7.2. VERFAHRENSDESIGN

Die meisten der heutigen Vergärungs-Verfahren (Biogasanlagen) verwenden einen ähnlichen Ansatz zur Verarbeitung von organischem Material. Zu Beginn des Prozesses wird das Material aufbereitet und zum Teil mit anderen Substanzen gemischt, um den Abbau im Reaktor zu optimieren.

Trotz vieler Analogien der Vergärungs-Verfahren gibt es einige Parameter, anhand welcher die Verfahren definiert werden. Im Folgenden sind die wichtigsten Parameter definiert (Tabelle 1).

Tabelle 1: Schlüsselparameter der Vergärungsanlagen

Parameter	Bezeichnung	Bereich
Anzahl Prozessstufen	1-stufig	
	2-stufig	
	mehrstufig	
Trockensubstanzgehalt	Flüssigvergärung	< 15 %
	Feststoffvergärung	> 15 %
Art der Beschickung	Kontinuierlich	
	Diskontinuierlich	
Prozesstemperatur	Psychrophil	< 20 °C
	Mesophil	30 bis 37 °C
	Thermophil	55 bis 60 °C

Anzahl Prozessstufen

Die Produktion von Biogas unter kontrolliert anaeroben Bedingungen beinhaltet separate biologische Prozesse, wie die Hydrolyse, die Acidogenese (Versäuerung), die Acetogenese (Essigsäurebildung) und die Methanogenese (Methanbildung), welche unterschiedliche Bakteriengruppen beanspruchen (siehe Abbildung 1). Während der Hydrolyse wird das komplexe (polymere) organische Material in Zucker und langkettige Aminosäuren zerlegt. Die anschliessende Acidogenese spaltet die Ketten zu kurzkettigen Säuren. Weiter wird das Material während der Acetogenese in Acetat, Kohlendioxid (CO₂) und Wasserstoff (H₂) abgebaut. Schlussendlich können die methanogenen Bakterien das Acetat und das Kohlendioxid unter Anlagerung von Wasserstoff in Methan und Kohlendioxid umwandeln.

In einem 1-stufigen Verfahren werden alle biologischen Prozesse im gleichen Reaktor parallel ablaufen. Im 2-stufigen Verfahren wird ein separater Reaktor für die Methanogenese zur Verfügung gestellt. Beim mehrstufigen Verfahren werden weitere Prozessschritte eingeführt, welche in einem separaten Reaktor ablaufen.

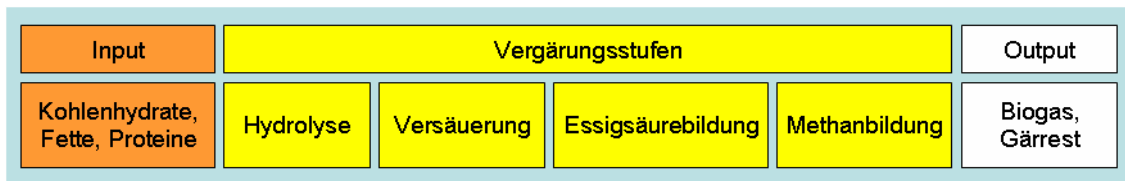


Abbildung 1: Biogasentstehung durch die Prozesse Hydrolyse, Versäuerung, Essigsäurebildung und Methanbildung (Quelle INES).

Trockensubstanzgehalt

Der Trockensubstanzgehalt in einer Biogasanlage bestimmt weitgehend die angewendete Verfahrenstechnik. Hierbei wird zwischen zwei Typen unterschieden; der Flüssigvergärung und der Feststoffvergärung.

Flüssigvergärung:

Flüssigvergärungs-Anlagen sind darauf ausgelegt, organische Substanzen mit Feststoffgehalten von 3 bis 15% zu verarbeiten. Um diese Feststoffgehalte zu erreichen, wird dem Substrat Flüssigkeit beigegeben. In gewerblich-industriellen Anlagen wird meist Wasser eingesetzt. Auf landwirtschaftlichen Betrieben wird hofeigene Gülle verwendet.

Die Technologie der Flüssigvergärung beinhaltet einige Herausforderungen. Das flüssige Substratgemisch im Reaktor teilt sich gerne in zwei oder mehrere Schichten. Leichtes Material schwimmt tendenziell auf, wobei dichtes Material nach unten an den Boden des Reaktors sinkt. Schichtenbildung bedeutet, dass es innerhalb des Reaktors suboptimale Bedingungen für die Vergärung hat. Eine geringe Gasproduktion ist die Folge davon.

Eine weitere Herausforderung bei Flüssigvergärungs-Anlagen ist das mögliche Auftreten von „Kurzschluss-Strömungen“. Dies geschieht, wenn innerhalb des Reaktors Strömungen entstehen, welche den Reaktor schneller durchfliessen als es die optimale durchschnittliche Verweilzeit vorsieht. In diesem Fall werden Teile des Substrates nicht genügend abgebaut.

Das heutige Verfahrensdesign und die Rührsysteme im Reaktor versuchen diesen Problemen Rechnung zu tragen.

Feststoffvergärung:

Die Verfahren der Feststoffvergärung werden fälschlicher Weise oft als Trockenfermentations-Verfahren bezeichnet. Dieser Begriff ist irreführend, hat sich aber im Sprachgebrauch eingeprägt und ist auch so im neuen EEG beschrieben. Bei jeder Form der Vergärung wird Feuchtigkeit gebraucht [5]. In dieser Studie wird daher ausschliesslich der Begriff der Feststoffvergärung angewendet. In Feststoffvergärungsanlagen werden Substratgemische mit Trockensubstanzgehalten von 15 bis 45% verarbeitet.

Art der Beschickung

Die Beschickung oder auch Fütterung der Biogasanlage bestimmt die Verfügbarkeit von frischem Substrat für die Mikroorganismen und wirkt sich damit auf die Biogasfreisetzung aus. Es wird grundsätzlich zwischen kontinuierlicher und diskontinuierlicher Beschickung unterschieden.

Die meisten gewerblich-industriellen Verfahren basieren auf einem kontinuierlichen Betrieb und einer kontrollierten Zugabe von frischem organischem Material, welches mit teilweise fermentiertem Material eingespeist wird. Die Endprodukte des Verfahrens sind Biogas, Kompost und Perkolatflüssigkeit.

Derzeit kommen auch diskontinuierliche (Batch)-Systeme zur Anwendung. Bei den meisten diskontinuierlichen Verfahren wird das relativ feste Substratgemisch (ohne zusätzliche Flüssigkeit) in einem geschlossenen Reaktor gestapelt. Bei einigen Verfahren wird durch Einspritzen von Perkolatflüssigkeit der mikrobielle Abbau im Gärreaktor angeregt. Die Perkolatflüssigkeit wird am Boden gefasst und wieder in den Kreislauf geführt.

Das Biogas wird im luftdichten Reaktor gespeichert und kann später energetisch genutzt werden. Nach dem Vergärungsprozess wird der Reaktor geleert und mit neuem Substratgemisch (Frischsubstrat und Impfmateriale) gefüllt. Das vergorene Restmaterial wird nachkompostiert und später landwirtschaftlich genutzt.

Prozesstemperatur

Kommerzielle Vergärungsanlagen werden in der Regel mesophil oder thermophil betrieben. Die Praxis hat gezeigt, dass auch Betriebstemperaturen zwischen diesen beiden Temperaturbereichen eine hohe Gasausbeute ermöglichen.

Die Temperatur im mesophilen Prozess liegt zwischen 30 bis 37 °C. Der Vorteil einer mesophilen Prozessführung liegt darin, dass die Bakterienstämme robuster sind und sich äusseren Einflüssen besser anpassen.

Ein thermophiler Reaktor wird mit Temperaturen von 50 bis 65 °C betrieben. Ein Vorteil höherer Temperaturen ist die erhöhte Bioaktivität, die für einen schnelleren Abbau von organischem Material und höheren Biogaserträgen verantwortlich ist [26].

7.3. FESTSTOFFVERGÄRUNGSVERFAHREN

In der Praxis gibt es inzwischen viele Verfahrensvarianten mit fließenden Übergängen zwischen Flüssig- und Feststoffvergärung und bei zweistufigen Prozessen auch die Kombination beider Verfahren. In Deutschland werden derzeit auch Anlagen mit hohem NaWaRo-Einsatz gebaut, die keine Gülle oder Regenwasser nutzen. Aber nicht jede güllelose Anlage kann als Feststoffvergärungsanlage gelten (in Deutschland nach dem EEG als Trockenfermentationsanlagen bezeichnet [4]). Mit der Rückführung des Prozesswassers wird das Substratgemisch rühr- und pumpfähig gemacht. Die Einstufung erfolgt anhand des Trockensubstanzgehaltes des Inputmaterials und nicht auf dem im Fermenter.

Die in diesem Bericht erfassten Verfahren können zumindest teilweise aus verfahrenstechnischer Sicht als Feststoffvergärung bezeichnet werden. Flüssigvergärungsverfahren, welche gemäss EEG (Deutschland), aber nicht aus verfahrenstechnischer Hinsicht, als Feststoffvergärung eingestuft werden, sind hierbei nicht berücksichtigt. Die Vielfalt und Vielschichtigkeit der Verfahren ist dennoch gross und erschwert eine präzise Unterteilung in verschiedene Gruppen. Die heutigen Feststoffvergärungsverfahren können anhand beliebiger Kriterien eingeteilt werden. In diesem Bericht werden sie nach der Art der Verfahrenstechnik unterteilt (siehe Abbildung 2).

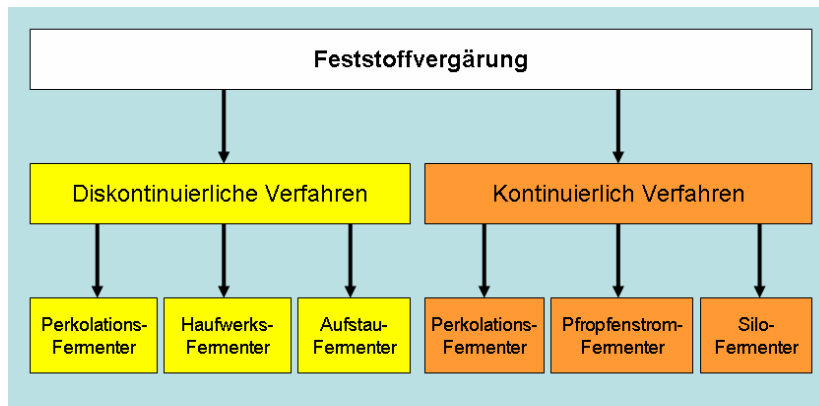


Abbildung 2: Einteilung von Feststoffvergärungsverfahren nach Art der Verfahrenstechnik (Quelle INES).

Derzeit existieren Verfahren unterschiedlicher Hersteller, die sich bereits im Markt etabliert haben, sich in der Entwicklung befinden oder schon wieder vom Markt ausgeschlossen sind. Diese Verfahren werden im folgenden Kapitel den oben aufgelisteten Gruppen zugeteilt. Hierbei wird nicht der Anspruch erhoben, alle existierenden Technologien aufzulisten.

8. Pfropfenstromverfahren - kontinuierlich

Pfropfenstrom-Verfahren werden bisher vorzugsweise in der kommunalen Abfallbehandlung angewendet. Diese Art von Vergärungsverfahren zeichnet sich durch einen liegenden Fermenter aus, der entweder über ein sehr langsam drehendes Axialrührwerk verfügt (KOMPOGAS) oder mit mehreren quer zur Strömungsrichtung angeordneten Paddeln (LINDE) ausgerüstet ist. Bei beiden Verfahren durchströmt das Substrat den Fermenter in Längsrichtung als Pfropfenstrom. Die Rührwerke führen dabei selbst keinen axialen Substrattransport innerhalb des Fermenters durch. Um eine kontinuierliche Animpfung des zugeführten frischen Substrats sicher zu stellen, wird ein Teil des Fermenterablaufs in den Fermenter zurückgeführt. Das Animpfmateriale wird zum Teil zuvor durch eine Schneckenpresse von Feststoffen getrennt [36].

8.1. VERFAHREN KOMPOGAS

Biogasanlagen der Schweizer Firma Kompogas AG wurden für das Vergären von Bioabfall ohne Zusatz von Gülle entwickelt und werden nunmehr seit mehr als 16 Jahren errichtet. Das Verfahren wird vorwiegend zur Verwertung von Siedlungsabfällen (siehe auch Tabelle 2) verwendet und wird schon an verschiedenen Standorten im In- und Ausland (Volketswil, Otelfingen, Pratteln, Frankfurt, Lustenau etc.) eingesetzt. Seit dem Jahre 2005 werden Anlagen auch für den Einsatz von NaWaRo gebaut (Beispiel Reimlingen, Deutschland).

Tabelle 2: Kurzzusammenfassung des Verfahrens Kompogas

Kurzzusammenfassung		Bemerkungen
Verfahrensbezeichnung	Kompogas	
Homepage	http://www.kompogas.ch	
Substratinput	bisher vorwiegend Biomüll	neu auch NaWaRo
Trockensubstanzgehalt	25 bis 35 %	
Anzahl Prozessstufen	1-stufig	
Art der Beschickung	kontinuierlich	
Prozesstemperatur	thermophil	
Verweilzeiten	15 bis 20 Tage	
Gasertrag	85 bis 150 m ³ /to Input	vorwiegend vom Inputmaterial abhängig
Methangehalt	50 bis 63 %	
Beispielanlage		
Kapazität	4000 to/Jahr	Module bis Jahreskapazitäten von 100'000 to
Platzbedarf	1500 bis 2000 m ²	
Investitionskosten	2.5 Mio. SFr.	Richtgrösse (detail. Leistungsumfang n.b.)
Quellen: [15], [26], (Kontakt W. Schmid, Kompogas)		



Abbildung 3: Kompogas-Anlage mit typischem Design: ein liegender schlanker Pfropfenstrom-Fermenter (Quelle Kompogas AG).

Technologiebeschreibung

Alle Kompogasanlagen arbeiten nach dem Prinzip der kontinuierlichen Feststoffvergärung im Pfropfenstrom. Für die Verwertung von Biomüll sind aufwendige Aufbereitungsschritte dem Vergärungsprozess vorgelagert, um Fremdstoffen vom organischen Substrat zu trennen. Bei NaWaRo-Anlagen kann auf aufwendige Separationsschritte verzichtet werden. Das Verfahrensprinzip bleibt jedoch das gleiche.

Das Gärsubstrat wird bei Bedarf zerkleinert und gesiebt und kommt dann in einen Zwischenspeicher, in welchem es aufbereitet wird. Das Gärsubstrat wird während etwa 2 Tagen im Zwischenspeicher erhitzt, bis es dem Reaktor mittels eines Schneckenförderers kontrolliert zugeführt wird. Wasser aus dem Entwässerungs-Prozess wird zugefügt, bis das Substrat einen Trockensubstanzgehalt von etwa 28% erreicht. Eine Kolbenpumpe pumpt das Substrat in den Pfropfenstrom-Fermenter (meist ein horizontaler Stahl- oder Betontank – siehe Abbildung 3 und 4). Mit einem Wärmetauscher wird das Substrat von 25 auf 55°C erhitzt. Im Fermenter wird es mit vergorenem Material gemischt und durchläuft den Fermenter als Pfropfen. Eine Paddelwelle sorgt für eine gleichmässige Entgasung und Konsistenz des Materials. Aufgrund seiner Konsistenz durchmischt es sich dabei nicht mit später oder vorher eingebrachtem Material. Mit Verweilzeiten von 15 bis 20 Tagen wird die Hygienisierung des Endprodukts sichergestellt.

Anschliessend wird das Substrat entwässert. Die Weiterverarbeitung des Restmaterials und der Flüssigkeit hängt vom Standort der Anlage ab. In einigen Anlagen wird das Perkolat als Wasserersatz in den Prozess zurückgeführt. An anderen Standorten wird das Perkolat als Kunstdüngerersatz an Bauern oder Treibhausbesitzer weitergegeben.

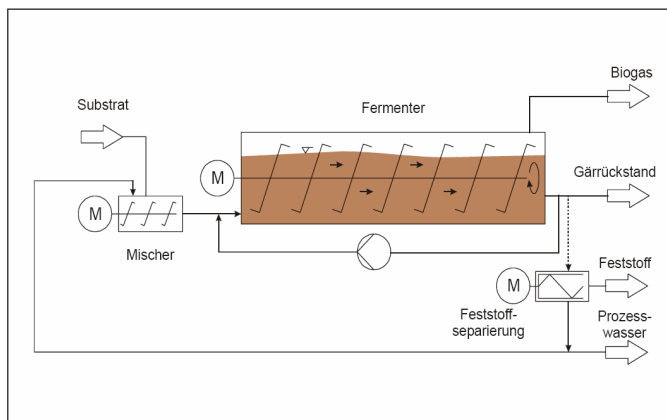


Abbildung 4: Prinzipschema des Kompogas-Verfahrens [38].

8.2. VERFAHREN LINDE

Die Firma Linde AG mit ihren 2 Filialen in Deutschland (Linde-KCA-Dresden GmbH) und in der Schweiz (Linde BRV Biowaste Technologies AG) bieten Abfallbehandlungs-Systeme an, welche auf einer anaeroben oder aeroben Verarbeitung basieren. Linde-KCA-Dresden GmbH bietet schon seit 1973 biologische Kläranlagen an und nahm 1985 die erste anaerobe Vergärungsanlage (für Stallmist) in Betrieb.

Tabelle 3: Kurzzusammenfassung des Feststoffvergärungsverfahrens Linde

Kurzzusammenfassung		Bemerkungen
Verfahrensbezeichnung	Linde	
Homepage	http://www.linde-kca.de	
Substratinput	Restmüll / Biomüll	
Trockensubstanzgehalt	15 bis 45%	
Anzahl Prozessstufen	1-stufig	
Art der Beschickung	kontinuierlich	
Prozesstemperatur	thermophil oder mesophil	
Verweilzeiten	n.b	
Gasertrag	100 m ³ /to Input	vorwiegend vom Inputmaterial abhängig
Referenzanlage Baar (Schweiz)		
Betriebsstart	1994	
Kapazität	18'000 to/Jahr	
Platzbedarf	10'000 m ²	
Investitionskosten	20 Mio. SFr.	
Quellen: [26]		

Technologiebeschreibung

Bei der Trockenvergärung der Firma Linde BRV Biowaste Technologies AG handelt es sich um ein thermophiles oder mesophiles Verfahren (Tabelle 3), das im liegenden Pfropfenstromfermenter mit Rechteckquerschnitt abläuft. Dem Fermenter wird in der Regel eine aerobe Vorrotte zur Hydrolyse und gezielten Versäuerung vorgeschaltet. Das organische Substrat wird mit einer kompakten Einspeisevorrichtung (Speicher für Aufbereitung) in den Fermenter geführt. Im Reaktor können Abfälle mit Trockensubstanzgehalten von 15% bis zu 45% behandelt werden⁶. Der horizontal-liegende Pfropfenstrom-Fermenter ist mit einem Rührwerk ausgerüstet, um das Absinken und Aufschwimmen von bestimmten Materialien zu verhindern (siehe Abbildung 5). Das vergorene Material wird mit einer Zentrifuge entwässert und danach kompostiert [26].

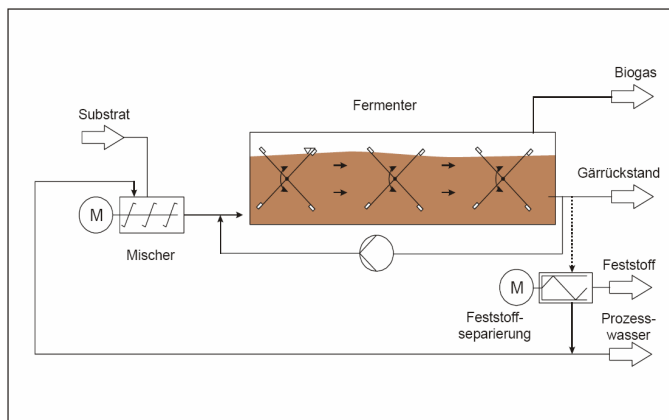


Abbildung 5: Prinzipschema des Linde BRV-Verfahrens [36].

⁶ Quelle: <http://62.27.58.13/de/p0106/p0106.jsp>

9. Verfahren mit siloartigem Fermentersystem - kontinuierlich

Bei siloartigen Verfahren werden schlanke, zylindrische Reaktoren eingesetzt, die von oben beschickt werden, während das ausgegorene Substrat am Reaktorboden abgezogen wird. Der Fermenter enthält keine Rührsysteme, so dass das Material den Fermenter von oben nach unten als eine Art vertikaler Pfropfenstrom durchströmt. Durch Rückführung des ausgefaulten Materials mit Hilfe von Pumpsystemen eine intensive Animpfung des frisch zugeführten Materials erreicht. Typischer Vertreter dieses Verfahrensprinzips ist das vorwiegend in der Abfallwirtschaft eingesetzte DRANCO-Verfahren.

Weitere Verfahren können den siloartigen Fermentersystemen zugeordnet werden, wie z.B. das Valorga-Verfahren, das schon lange im Markt vertreten ist. Im Gegensatz dazu wird ein vom Biodynamic Research Institute (Schweden) entwickeltes Verfahren mit einem schräg liegenden siloartigen Fermenter zur Vergärung von Festmist an einer Pilotanlage in Järna (Schweden) erprobt. Ein an der Forschungsanstalt für Agrarwirtschaft und Landtechnik (FAT) Tänikon entwickeltes Verfahren (Anacom) wurde nicht zur Marktreife gebracht.

9.1. VERFAHREN DRANCO

Das Dranco (Dry anaerobic composting)-Verfahren ist ein kontinuierliches Feststoffvergärungsverfahren, das von der belgischen Firma Organic Waste Systems (OWS) entwickelt wurde. Das Verfahren wurde schon an verschiedenen Standorten (Brecht, Salzburg, Rom, Aarberg etc.) zur Behandlung von organischen Siedlungsabfällen angewendet (siehe auch Tabelle 4).

Tabelle 4: Kurzzusammenfassung des Verfahren Dranco

Kurzzusammenfassung		Bemerkungen
Verfahrensbezeichnung	Dranco	
Homepage	http://www.dranco.be/	
Substratinput	vorwiegend Biomüll	
Trockensubstanzgehalt	20 bis 45%	
Anzahl Prozessstufen	1-stufig	
Art der Beschickung	kontinuierlich	
Prozesstemperatur	thermophil	
Verweilzeiten	15 bis 30 Tage	
Gasertrag	100 bis 170 m3 /to Input	vorwiegend vom Inputmaterial abhängig
Methangehalt	50 bis 65 %	
Beispielanlage Aarberg (Schweiz)		
Kapazität	13'500 t / Jahr	Gartenabfälle
Quellen: [15], [26], [28]		



Abbildung 6: Anlage mit typischem Dranco-Fermenter: Ein stehender, schlanker Gärreaktor (Quelle ⁷).

Technologiebeschreibung

Zuerst wird das Substrat in einem Vormischer mit Wasserdampf auf eine Temperatur von 50°C aufgeheizt. Danach wird es über eine Kolbenpumpe von oben in die stehenden, schlanken Fermenter (siehe Abbildung 6 und 7) beschickt. Das Gärsubstrat wird anschliessend vertikal nach unten geleitet. Der

⁷ <http://www.biom.cz/index.shtml?x=103725>

thermophile Prozess wird im Temperaturbereich von 50 bis 55°C gehalten. Um den Prozess biologisch stabil zu halten, werden bis zu 80% des ausgefaulten Materials wieder zurückgeführt und mit dem Frischsubstrat vermischt. Während des einphasigen Fermentierungsprozesses findet kein Mischen des Substrates statt. Die Verweilzeit im Fermenter beträgt 15 bis 30 Tage. Das gesammelte Biogas wird gespeichert, filtriert und in einem Blockheizkraftwerk in Strom und Wärme umgewandelt. Das vergorene Substrat wird bis zu einem TS-Gehalt von 50% entwässert und bis zu 2 Wochen kompostiert.

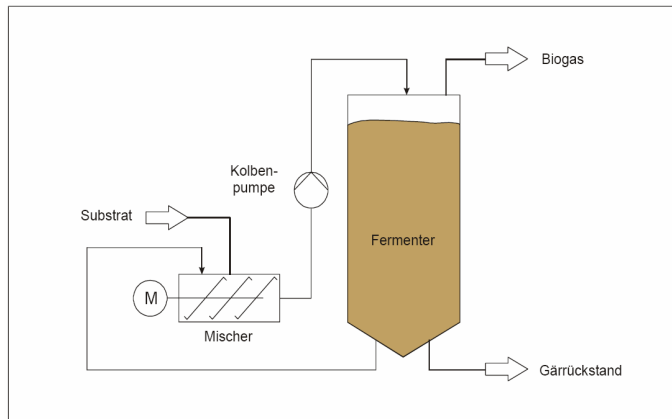


Abbildung 7: Prinzipschema des Dranco-Verfahrens [36].

9.2. VERFAHREN ATF

Das an der Technischen Universität Hamburg-Harburg entwickelte Verfahren zur Anaeroben Trockenfermentation (ATF-Verfahren) ist ein einstufiges Vergärungsverfahren, das mit hohen Feststoffgehalten betrieben wurde. Das Verfahren wurde an der 1994 in Betrieb genommenen Pilotanlage in Hamburg-Bergedorf getestet (siehe Abbildung 8). Laut Ingenieurbüro Krieg + Fischer GmbH⁸, welches in Deutschland die Entwicklung verfolgte, ist die Umsetzung des Verfahrens jedoch seit längerer Zeit eingestellt worden.



Abbildung 8: Pilotanlage in Hamburg-Bergedorf mit einem Reaktorvolumen von 100m³ (Quelle ⁹).

⁸ www.KriegFischer.de

⁹ <http://www.tu-harburg.de>

9.3. VERFAHREN VALORGA

Das Valorga-Verfahren ist ein Patent der Firma Valorga International SAS¹⁰, welche eine der ältesten Firmen im Bereich der Vergärung von organischen Siedlungsabfällen ist. Valorga ist ein 1-stufiges, mesophil betriebenes Verfahren, das in Frankreich entwickelt wurde und seit 1988 in Europa im Einsatz ist (siehe Tabelle 5).

Tabelle 5: Kurzzusammenfassung des Verfahrens Valorga

Kurzzusammenfassung		Bemerkungen
Verfahrensbezeichnung	Valorga	
Homepage	http://www.valorgainternational.fr	
Substratinput	vorwiegend Biomüll	
Trockensubstanzgehalt	30 bis 35%	
Anzahl Prozessstufen	1-stufig	
Art der Beschickung	kontinuierlich	
Prozesstemperatur	mesophil	
Verweilzeiten	20 bis 30 Tage	abhängig von Substartinput
Gasertrag	80 bis 120 m ³ /to Input	vorwiegend vom Inputmaterial abhängig
Methangehalt	55 - 60 %	
Referenzanlage Genf (Schweiz)		
Betriebsstart	2000	
Kapazität	14'000 to / Jahr	
Platzbedarf	6'000 m ²	
Investitionskosten	6 Mio. SFr.	Richtgrösse (detail. Leistungsumfang n.b.)
Quellen: [15], [26], [28]		



Abbildung 9: Valorga-Biogasanlage in Tilburg, Holland (Quelle ¹¹).

Technologiebeschreibung

Im semi-kontinuierlichen Pfropfenstromverfahren wird die organische Fraktion zuerst bis zu einem Trockensubstanzgehalt von 30% verdünnt. Anschliessend wird das Material mit Förderbändern, Förder-schnecken und starken Pumpen in den Fermenter befördert.

Die vertikalen, zylinderförmigen Fermenter besitzen kein mechanisches Rührsystem (siehe Abbildung 9 und 10). Dies erlaubt die Vergärung von Substraten mit sehr hohen Trockensubstanzgehalten. Das Mischen des Substrates erfolgt mit Hilfe von Biogas-Injektionen, welche alle 15 Minuten unter hohem Druck am Boden eingeblasen werden. Die Verstopfung der Injektionsdüsen, welche nur schwierig zu warten sind, ist ein Nachteil dieses Mischsystems.

Die Verweilzeit des Substrates in Valorga-Biogasanlagen beträgt 18 bis 25 Tage. Das behandelte Material wird entfernt und entwässert. Die Festsubstanz wird kompostiert und das Presswasser wird aufbereitet.

¹⁰ <http://www.valorgainternational.fr>

¹¹ http://www.esru.strath.ac.uk/EandE/Web_sites/03-04/biomass/validation.html

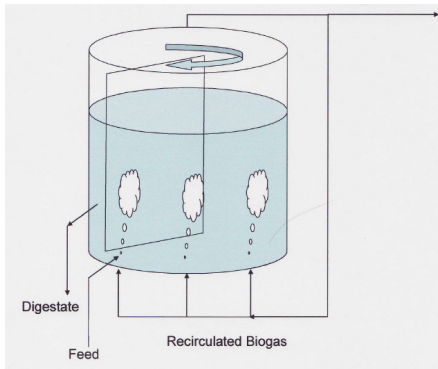


Abbildung 10: Prinzipschema des Valorga-Verfahrens [7].

9.4. ZWEISTUFIGE FESTSTOFFVERGÄRUNGSANLAGE JÄRNA SCHWEDEN

Das Biodynamic Research Institute in Järna entwickelte eine Biogasanlage auf einem landwirtschaftlichen Betrieb in Järna. Die Anlage wurde so ausgelegt, dass sie Kuhmist, wie auch organische Reststoffe verwerten kann. Die Anlagentechnik erreichte bis anhin noch keine Marktreife [29].

Tabelle 6: Kurzzusammenfassung des Verfahrens der Feststoffvergärungsanlage in Järna, Schweden

Kurzzusammenfassung		Bemerkungen
Verfahrensbezeichnung	Festmistvegärung in Järna, Schweden	Spezifische Bezeichnung unbekannt
Kontakt	Winfried Schäfer	winfried.schafer@mtt.fi
Substratinput	Festmist, organische Reststoffe	Feststoff-Fermenter / Methanreaktor Messresultate Pilotanlage
Trockensubstanzgehalt	15 bis 20%	
Anzahl Prozessstufen	1-stufig	
Art der Beschickung	kontinuierlich	
Prozesstemperatur	mesophil	
Verweilzeiten	22 Tage / 16 Tage	
Gasertrag	25 bis 30 m3 / t Input	
Methangehalt	60%	
Referenzanlage Järna		
Kapazität	n.b (Pilotstadium)	Reaktorvolumen 90 m3
Investitionskosten	200'000 EURO	1000 EURO / m3
Quellen: [28]		

Technologiebeschreibung

Der Kuhmist wird über einen Kratzboden zum Futterungskanal geführt (siehe Abbildung 11). Aufgrund des durchlöchernten Bodens wird der Urin vom Mist getrennt. Über einen Fütterungskanal wird dann der Mist in den Hydrolyse-Reaktor eingeführt. Mit Hilfe des Fütterungskanals wird der Mist an das obere Ende des etwa um 30° geneigten Fermenters (53m³) gebracht. Durch die Gravitation fliesst der Mist nach unten und vermischt sich mit dem restlichen Substrat. Nach einer Verweilzeit von 22 bis 25 Tagen bei 38°C wird das Substrat durch einen Austrag am Boden des Fermenters teilweise entleert. Der grösste Teil des entnommenen Substrates wird mit einer Schneckenpresse in eine flüssige und eine Festphase separiert. Das restliche Substrat wird zurück in den Fermenter geführt und dient als Impfmateriail.

Das Festmaterial wird kompostiert und die Substratflüssigkeit wird in einen Methanreaktor (18m³) gepumpt. Nach Ablauf der Verweilzeit von 15 bis 16 Tagen wird ein Teil der Flüssigkeit wieder in den Hydrolyse-Fermenter gepumpt, um die Fliesseigenschaften des Substrates zu verbessern. Die Restflüssigkeit wird gespeichert und bei Bedarf als Dünger eingesetzt. Das produzierte Biogas (aus beiden Fermenter) wird zur Strom- und Wärmeproduktion eingesetzt [9], [28].

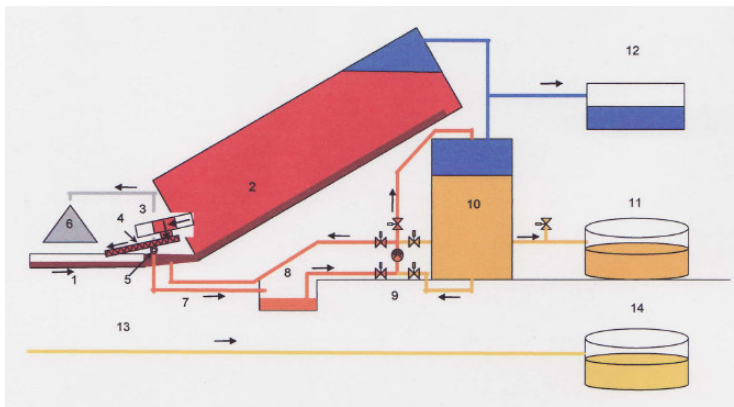


Abbildung 11: Zweistufige Feststoffvergärungsanlage in Järna (1 Fütterungskanal, 2 Hydrolysereaktor, Einschubeinrichtung, 4 Beschickungs- Austragsschnecke, 5 Separationsschnecke, 6 Separierte Festsubstanz, 7 Presswasserleitung, 8 Presswasserspeicher, 9 Pumpen und Ventile, 10 Methanreaktor, 11 Presswasserlager, 12 Gasspeicher, 13 Urinleitung, Urinspeicher) [9].

9.5. VERFAHREN ANACOM

Das Anacom (Anaerobic Composting of Manure)-Verfahren wurde an der Forschungsanstalt für Agrarwirtschaft und Landtechnik (FAT¹²) Tänikon entwickelt, konnte jedoch nur als Pilotanlage realisiert werden. Das übergeordnete Ziel des mehrjährigen Forschungsvorhabens bestand darin, eine Pilotanlage zur kontinuierlichen Vergärung von Festmist zu entwickeln. Der Festmist konnte dabei ohne Vorbehandlung vergoren und mit einem konventionellen Miststreuwer auf die Felder ausgebracht werden. Die Pilotanlage hat sich gemäss einem früheren FAT-Bericht von 1994 [2] hinsichtlich Betriebssicherheit, Prozess-Stabilität und Energieertrag bewährt, wurde jedoch nicht weiterentwickelt¹³.

Technologiebeschreibung

Die realisierte Pilotanlage zur kontinuierlichen Vergärung von Festmist besteht aus einem kubischen Stahltank mit einem Volumen von rund 10m³ (siehe Abbildung 12). Der Fermenter wird mit einer Kolbenpresse (Maulwurf) mit Festmist beschickt, welcher im Durchlaufverfahren vergärt wird. Der Austrag des vergorenen Materials erfolgt mit Hilfe eines Kratzbodens und einer Austragsschnecke.

Mit der Verwertung von Festmist erreichte das Anacom-Verfahren Biogaserträge von 28 bis 48m³ pro Tonne Mist im mesophilen und 33 bis 51m³ pro Tonne Mist im thermophilen Betrieb [2].

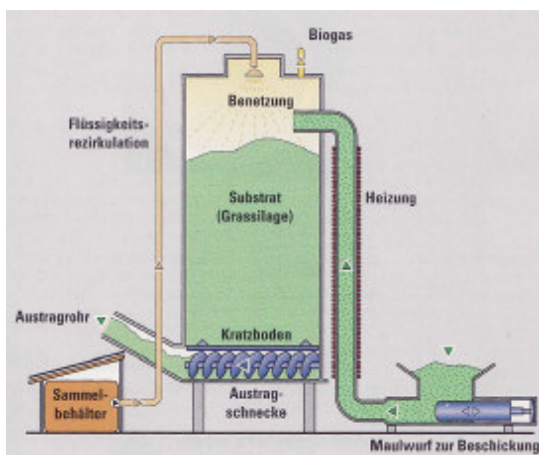


Abbildung 12: Beim Anacomverfahren gelangt das Frischsubstrat von oben in einen stehenden Fermenter, während das vergorene Substrat unten über eine Förderschnecke ausgetragen wird [34].

¹² FAT: Forschungsanstalt für Agrartechnik und Landtechnik (heute Agroscope genannt)

¹³ <http://www.fat.admin.ch/d/publi/fb/fatb451d.html>

10. Perkolationsverfahren – kontinuierlich

Bei den kontinuierlichen Perkolationsverfahren wird das Gärsubstrat im Perkolator durch ein axial angeordnetes Rührwerk umgewälzt und durch den Reaktor transportiert. Das aufgesprühte Perkolat durchströmt das Gärsubstrat und wird nach der Beladung mit organischer Substanz bodenseitig abgezogen und einem Nachgärer zugeführt. Der nicht abgebaute Feststoff wird entwässert und das Presswasser zusammen mit dem Perkolat dem Nachgärer zugeführt.

Verfahren, bei welchen die Perkalotion zwar mit hohen Trockensubstanzen, die Vergärung aber ausschliesslich im Fermenter mit tiefen Trockensubstanzen stattfindet, werden auch als Flüssigvergärungsverfahren bezeichnet (ISKA).

10.1. VERFAHREN ISKA

Die ISKA GmbH ist ein Tochterunternehmen der U-plus Umweltservice AG. Die U-plus Umweltservice AG hat das ISKA-Verfahren mit Fördermitteln der EnBW AG (Energie Baden-Württemberg) entwickelt und in einer Demonstrationsanlage in Buchen (Baden-Württemberg), die im Jahr 2000 in Betrieb genommen wurde, zur Marktreife gebracht. Die mechanisch-biologische Abfallhandlung wird zur Verarbeitung von Restmüll in verschiedenen Anlagen (z.B in Buchen (Abbildung 13), Heilbronn, Sydney) angewendet. Anlagen zur Verarbeitung von NaWaRo sind erst in Entwicklung (siehe Tabelle 7).

Tabelle 7: Kurzzusammenfassung des Verfahrens ISKA

Kurzzusammenfassung		Bemerkungen
Verfahrensbezeichnung	ISKA	
Homepage	http://www.iska-gmbh.de	
Substratinput	Restmüll / Biomüll	NaWaRo-Verarbeitung in Entwicklung
Trockensubstanzgehalt	15 bis 45%	im Perkolator
Anzahl Prozessstufen	2-stufig	
Art der Beschickung	kontinuierlich	
Prozesstemperatur	40 bis 45 °C	im Perkolator
Prozesstemperatur	mesophil	im Gärreaktor
Verweilzeiten	2 bis 3 Tage im Perkolator	
Gasertrag	40 bis 50 m3 /to Input	kurze Verweilzeit im Perkolator
Referenzanlage Sydney (Australien)		
Kapazität	170'000 to/Jahr	
Platzbedarf	30'000 m2	
Investitionskosten	70 Mio. SFr.	Richtgrösse (detail. Leistungsumfang n.b.)
Quellen: [26]		



Abbildung 13: ISKA-Anlage zur Restmüllverwertung in Buchen, Deutschland (Quelle ¹⁴).

Technologiebeschreibung

Die erste Stufe des ISKA-Verfahrens beinhaltet eine mechanische Separierung von organischem und anorganischem Material (siehe Abbildung 14). In der mechanischen Aufbereitung wird der angelieferte

¹⁴ <http://www.iska-gmbh.de>

Restabfall für das Perkulationsverfahren vorbereitet. Nach der mechanischen Auftrennung in ein hochkalorisches, trockenes Substrat und ein organikreiches, feuchtes Substrat werden beide Fraktionen von Metallen befreit. Während die heizwertreiche Fraktion zur energetischen Verwertung gelangt oder eventuell rückgeführt wird, wird die organikreiche Fraktion in die Perkolationstrommel geführt. Hier wird das Material durch ein Rührwerk kontinuierlich umgewälzt und mit einem Schubboden innerhalb des Perkulators transportiert. Während dieser Zeit wird das Material bei einer Temperatur von 40 bis 50°C bewässert und belüftet. Dadurch ergibt sich eine aerobe Hydrolyse und Versäuerung, die die Auswaschung der Organik durch das zugeführte Wasser beschleunigt. Somit befindet sich nunmehr ein Teil der Organik im Prozesswasser wieder. Nach dem Durchlauf durch den Perkulator, innerhalb 2 bis 3 Tage, wird der Feststoff entnommen und durch eine Schneckenpresse entwässert. Das Prozesswasser läuft über den Siebboden des Perkulators ab und gelangt zusammen mit dem Presswasser aus der Entwässerung in eine Sand- und Faserscheidung. Das gesamte Prozesswasser wird einem Vergärungsreaktor zugeführt, in dem die organischen Komponenten anaerob zu Biogas umgesetzt werden.

Nach der Vergärung werden dem Prozesswasser Stickstoffverbindungen entzogen. Es wird dann wiederum zur Auswaschung im Perkulator verwendet. Der Prozesswasserkreislauf ist damit geschlossen, Frischwasser wird nicht benötigt. Der größte Teil des Prozesswassers wird allerdings ausgeschleust und für die nachfolgende Kompostierung verwendet [26].

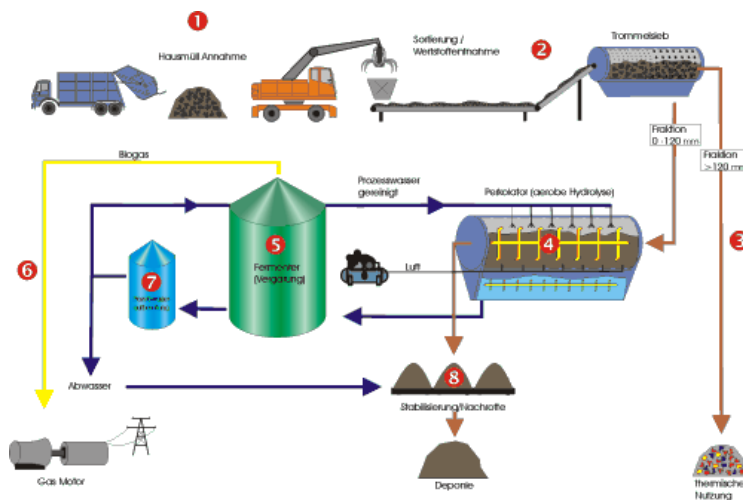


Abbildung 14:
Prinzipschema des ISKA-
Verfahrens (Quelle ¹⁵).

¹⁵ <http://www.iska-gmbh.de>

10.2. VERFAHREN ATZ

Das ATZ-Verfahren wird vom ATZ Entwicklungszentrum in Sulzach-Rosenberg (D) entwickelt. Mit dem ATZ-TDH[®]-Verfahrens sollen bisher nicht für eine Vergärung einsetzbare Reststoffe anaerob in Biogas umgewandelt werden. Das Verfahren wurde noch nicht im Praxismassstab erprobt [36].

Technologiebeschreibung

Das ATZ-Thermodruckhydrolyse-Verfahren (TDH-Verfahren, Abbildung 15) dient dazu, bisher nicht für eine Vergärung einsetzbare Reststoffe anaerob in Biogas umzuwandeln. Dabei werden in der ersten Stufe biogene Restmassen durch Druck- und Temperaturerhöhung in kurzkettinge, biologisch gut verfügbare Bruchstücke gespalten. Im nachfolgenden Fermenter wird die organische Substanz gegenüber dem Stand der Technik bei reduzierten Verweilzeiten in Biogas umgesetzt.



Abbildung 15: ATZ-Verfahren – Pilotanlage zur Vergärung spezieller organischer Reststoffe (Quelle ¹⁶).

10.3. VERFAHREN BIOPERKOLAT

Die Bioperkolat-Technologie wurde vom Wehrle-Werk in Deutschland patentiert. Die Technologie ist Teil eines Systems, welches darauf ausgerichtet ist, den gemischten Siedlungsabfall zu behandeln. Das Unternehmen hat jedoch die Lizenz verloren und wurde vom Markt ausgeschlossen¹⁷.



Abbildung 16: Bioperkolat-Biogasanlage in Kahlenberg (Deutschland, Quelle ¹⁸).

Technologiebeschreibung

Das Bioperkolat-Verfahren ist ein mechanisch-biologischer Behandlungsprozess. Der Prozess ist vergleichbar mit dem ISKA-Verfahren. Das Verfahren basiert auf einer mechanischen Aussortierung von anorganischem Material, einer Perkulationsphase, welche leicht aerob geführt wird und einer strikt anaeroben Abbauphase im Fermenter (siehe Abbildung 16 und 17).

Nach der mechanischen Aufbereitung wird das Substrat in einem 2-stufigen, mesophilen Prozess weiterverarbeitet. Die erste Stufe beinhaltet die leicht aerobe Hydrolyse unter Einspritzung von Perkolat in einer horizontalen Röhre. Das Substrat wird mit einem horizontalen Rührwerk kontinuierlich gemischt. Die leicht aerob geführte Prozessführung erlaubt kürzere Verweilzeiten, da höhere Abbauraten erreicht werden. Die Aufenthaltszeiten in der Perkulationsphase schwanken zwischen 2 bis 3 Tagen.

¹⁶ <http://www.atz.de/>

¹⁷ E-mail Korrespondenz mit A. Wellinger (Biogas-Experte CH)

¹⁸ <http://www.bio-pro.de/de/region/freiburg/magazin/02403/index.html>

Nach der Perkulationsphase wird das Substrat mit einer Schneckenpresse separiert. Die Festsubstanz wird weiterverarbeitet oder kompostiert und die Flüssigkeit, welche mit biogenen Anteilen angereichert ist, wird in einen Fermenter gepumpt. Im Fermenter werden die gelösten biogenen Anteile 4 bis 5 Tage vergoren. Danach wird das Perkolat im Fermenter rezykliert oder in der ersten Phase des Prozesses als Impfmateriel verwendet. Die gesamte Verweilzeit des Prozesses beträgt nur 6 bis 7 Tage¹⁹.

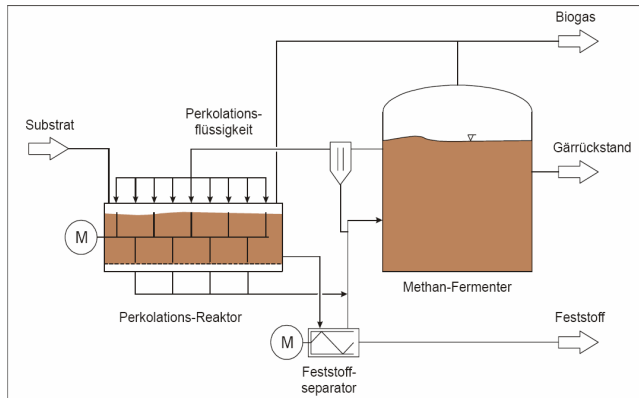


Abbildung 17: Prinzipschema des Bioperkolat-Verfahrens [36].

¹⁹ <http://www.wehrle-werk.de/>

11. Perkulationsverfahren - diskontinuierlich

Die diskontinuierlich betriebenen Perkulationsverfahren bestehen meist aus einem container- oder garagenförmigen Boxenfermenter. Der Fermenter ist stirnseitig mit einem hydraulischen Tor ausgerüstet, über das die Befüllung und Entleerung stattfindet. Die Beschickung mit Substrat kann über eine Gitterbox mit perforiertem Boden erfolgen, die mit einem Abrollkipper in den Fermenter eingeschoben wird, oder durch direkten Eintrag mittels Radlader. In der Regel wird dem frischen Substrat zur Beschleunigung der Methanbildung etwas Impfmateriale zugemischt.

Das Substrat zunächst kurzzeitig belüftet, um dieses durch Bildung biogener Wärme auf die gewünschte Gärtemperatur zu bringen. Nachdem der Luftsauerstoff verbraucht und die aerobe Phase abgeschlossen ist, beginnt die anaerobe Phase im geschlossenen Fermenter. Das Substrat wird über 4 bis 8 Wochen, je nach Substrateigenschaften, mit Perkolat berieselt. Die Berieselung erfolgt periodisch oder kontinuierlich und wird wenige Tage vor Beendigung des Abbauprozesses abgeschaltet, um eine statische Entwässerung zu erreichen. Vor der Öffnung der Türen erfolgt entweder eine Rückspülung des Fermenters mit den Abgasen des BHKW oder eine Spülung mit Luft, die über einen Biofilter abgezogen wird. Durch die diskontinuierliche Betriebsweise mit dem Befüllen und Entleeren eines Fermenters ist keine gleichmässige Gasproduktion möglich. Um trotzdem eine gleichmässige Gasproduktion zu erreichen, müssen 3 bis 4 Fermenter zeitversetzt betrieben werden (siehe Abbildung 18).

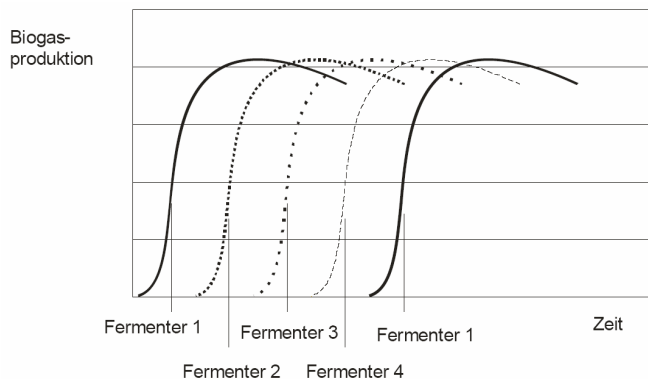


Abbildung 18: Zeitliche Gasproduktion bei Parallelbetrieb verschiedener Batch-Fermenter [36].

Die Perkulationsflüssigkeit weist je nach Gärdauer einen unterschiedlichen Säuregehalt und pH-Wert auf. Durch eine kreuzweise Führung der Perkulationsflüssigkeit wird eine Übersäuerung zu Beginn der Vergärung vermieden. Dabei wird die saure Perkulationsflüssigkeit eines neu gestarteten Fermenters zur Perkulation eines eingearbeiteten Fermenters genutzt und die mit hoher Bakterienkonzentration sowie geringem Säuregehalt anfallende Perkulationsflüssigkeit des eingearbeiteten Fermenters dem neu gestarteten Fermenter zugeführt.

Bei den meisten Perkulationsverfahren ist der Behälterboden beheizt und zur Ableitung des Perkolats geschlitzte ausgeführt. Das Perkolat wird in separaten, beheizten Perkolatspeichern getrennt gelagert.

Eine wichtige Voraussetzung für die Funktionsfähigkeit der Perkulationsverfahren ist, dass eine relativ grobe Feststoffstruktur mit ausreichendem Porenvolumen vorliegt, welche während dem anaeroben Abbau nicht zusammenbricht. Die Durchrieselung mit Perkolat muss gewährleistet sein, damit das Substrat mit möglichst viel Flüssigkeit in Kontakt kommt. Die Höhe des Substrathaufens ist daher auf 2 bis 3 m begrenzt, da ansonsten aufgrund des statischen Druckes die unteren Substratschichten verdichtet würden.

Schon seit 1997 liegen Praxiserfahrungen mit der Feststoff-Fermentation in 14 Betonboxen an einer Kompostieranlage in Holland vor. Aktuelle Verfahren dieser Bauart (z.B. BIOFERM, BEKON, LOOCK CONSULTANTS) sind im Praxiseinsatz. Auch das 3A-Verfahren nutzt die Perkulation zum Abbau der Gärsubstanz. Das Gärsubstrat wird dabei jedoch räumlich und zeitlich versetzt alternierend unter aeroben und anaeroben Bedingungen abgebaut [5], [36].

11.1. VERFAHREN BEKON

Die Firma Bekon Energy Technologies GmbH & Co. KG entwickelte ein so genanntes Boxen- oder Garagenverfahren. Das Verfahren wird bis heute im Bereich der Abfallentsorgung (Stadt München) und im landwirtschaftlichen Bereich (Rheinland-Pfalz) angewendet. Weitere Anlagen im Bereich der Abfallentsorgung oder auf Basis der NaWaRo-Verwertung sind in Planung.

Das Bekon-Verfahren ermöglicht den Einsatz von leicht vergärbaren Biomasse, wie z.B. NaWaRo (Grassilage, Maissilage, Ganzpflanzensilage), Festmist von Rindern, Pferden und Geflügel oder kommunale Abfälle (Biomüll, Straßenbegleitgrün, Marktabfälle (Gemüse) usw.). Die Biomasse sollte jedoch einen TS-Gehalt über 25% enthalten und stapelbar sein (siehe Tabelle 8).

Tabelle 8: Kurzzusammenfassung des Verfahrens Bekon

Kurzzusammenfassung		Bemerkungen
Verfahrensbezeichnung	Bekon	
Homepage	http://www.bekon-d.de/	
Substratinput	Restmüll / Biomüll / NaWaRo	Stapelbar (Strukturmateriale wird benötigt)
Trockensubstanzgehalt	25 bis 45%	
Anzahl Prozessstufen	1-stufig	
Art der Beschickung	diskontinuierlich	
Prozesstemperatur	mesophil	
Verweilzeiten	35	abhängig von Prozesstemperatur
Gasertrag	60 bis 130 m3 /to Input	vorwiegend vom Inputmaterial abhängig
Methangehalt	55 bis 60 %	
Beispielrechnung		
Kapazität	10'300 t / Jahr	Vorwiegend Mais und Ganzpflanzensilage
BHKW-Leistung	500 kW elektrisch	
Platzbedarf	1'800 m2	exkl. Rangier-/Anmischfläche
Fermentergrösse (L*B*H)	28m * 6m * 5m	Anlage mit 7 Fermentern
Investitionskosten	2.4 Mio. EURO	inkl. Anlage und technische Ausführung
Quellen: [15], (Beispielrechnung der Firma Bekon)		



Abbildung 19: Garagen-Verfahren der Firma Bekon Energy Technologies GmbH & Co. KG bei Fröttmanning (Stadt München, Quelle ²⁰).

Technologiebeschreibung

Nach einer Animpfung mit bereits vergorenem Material wird das Substrat mit Radladern in den Fermenter geführt (siehe Abbildung 19). Der garagenförmig aufgebaute Gärbehälter wird mit einem gasdichten Tor verschlossen. Die Biomasse wird unter Luftabschluss vergoren, dabei erfolgt keine weitere Durchmischung und es wird kein zusätzliches Material zugeführt.

Das aus dem Gärgut sickernde Perkolat wird über eine Drainagerinne abgezogen, in einem Tank zwischengespeichert und zur Befeuchtung wieder über dem Substrat versprüht (siehe Abbildung 21). Der Gärprozess findet im mesophilen Temperaturbereich bei ca. 37 °C statt, die Temperierung erfolgt mittels Boden- und Wandheizung.

²⁰ <http://www.bekon-d.de/>

Das entstehende Biogas wird getrocknet und bezüglich Gasqualität und –menge analysiert. Danach wird es in einem Blockheizkraftwerk zur Gewinnung von Strom und Wärme genutzt. Das BHKW wird entsprechend dem Gasanfall geregelt, damit keine externe Gasspeicherung notwendig ist. Der Gasraum über dem Gärsubstrat dient als Zwischenspeicher. Um eine kontinuierliche Gasproduktion zu bewerkstelligen werden mehrere Gärbehälter zeitlich versetzt betrieben (siehe Abbildung 18).

Am Ende der Verweilzeit wird der Fermenterraum vollständig entleert und dann neu befüllt. Das vergorene Substrat wird einer Nachkompostierung zugeführt.

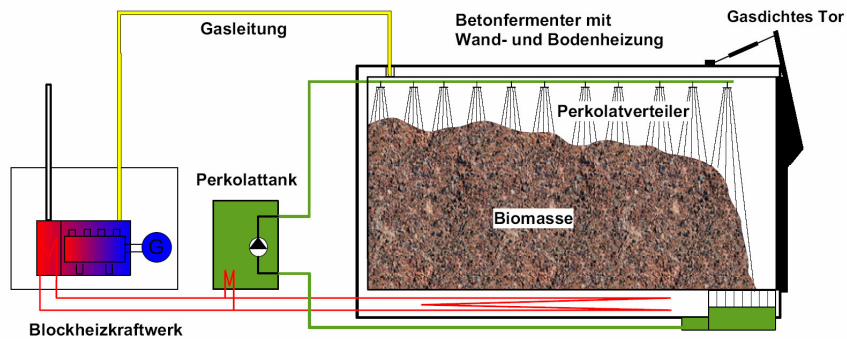


Abbildung 20: Prinzipschema der Firma Bekon Energy Technologies GmbH & Co [12].

Die Gärbehälter der Bekon-Anlage werden mit hydraulisch betriebenen, gasdichten Toren verschlossen. Die Dichtung wird mittels einer aufblasbaren Dichtungslippe bewerkstelligt. Sie ist am Tor befestigt und schliesst in aufblasbaren Zustand zur Betonwand des Fermenters hin gasdicht ab. Vor dem Öffnen des Tores wird Luft aus der Dichtung wieder abgelassen.

Die Tore werden nach oben hin geöffnet. Dadurch wird verhindert, dass beim Befüllen oder Entladen durch einen Radlader die Tore oder die Dichtung (Dichtungslippe ist am Tor befestigt) beschädigt wird.

Die Bekon-Anlage wird mit einem leichten Überdruck von 20hPa betrieben. Dadurch ist gewährleistet, dass zu keinem Zeitpunkt ein explosionsfähiges Gas-Luft-Gemisch entstehen kann. Während dem Befüllen und Entleeren sorgt eine Absaugvorrichtung im hinteren Fermenterbereich dafür, dass dieser ständig mit Frischluft durchströmt wird. Lichtschranken verhindern das Schliessen von Toren, während sich eine Person im Fermenterraum befindet. Das Technikgebäude ist so positioniert, dass vom Steuerungsraum aus dem der direkte Blick auf die Tore möglich ist.

11.2. VERFAHREN BIOFERM

Die Firma Bioferm GmbH entwickelte ein Boxen- oder Garagensystem, welches erstmals in der 2001 gebauten Demonstrationsanlage in Waldmünchen (Deutschland) zum Einsatz kam. Schon heute sind mehrere Anlagen für die Verwertung von biologischen Rest- und Abfallstoffen oder die Verarbeitung von NaWaRo in Betrieb (Deutschland, Japan). In Deutschland sind rund 12 Bioferm-Anlagen im landwirtschaftlichen Bereich im Einsatz oder in Planung [3].

Tabelle 9: Kurzzusammenfassung des Verfahrens Bioferm

Kurzzusammenfassung		Bemerkungen
Verfahrensbezeichnung	Bioferm	
Homepage	http://www.bioferm.de/	
Substratinput	Restmüll / Biomüll	Stapelbar (Strukturmaterial wird benötigt)
Trockensubstanzgehalt	> 25%	
Anzahl Prozessstufen	1-stufig	
Art der Beschickung	diskontinuierlich	
Prozesstemperatur	mesophil	
Verweilzeiten	25 bis 30 Tage	
Gasertrag	60 bis 80 m ³ /to Input	vorwiegend vom Inputmaterial abhängig
Methangehalt	55 bis 60%	
Beispielanlage		
Kapazität	12'000 to / Jahr	
Platzbedarf	900 m ²	4 Fermenter und Technik-/BHKW-Container
Fermentergrösse	30m * 6m * 4m (L*B*H)	Richtgrösse pro Fermenter
Referenzanlage Breese / Marsch (Deutschland)		
Betriebsstart	Okt 06	
Lagerkapazität	10'000 m ³	Fahrsilolagerung für NaWaRo
Fermentervolumen	850 m ³	Anlage mit 7 Fermentern à 850 m ³
Auftragssumme	1.5 Mio. EURO	Richtgrösse (detail. Leistungsumfang n.b.)
Quellen: [10], (www.sbibau.de), (Aus technischem Konzept der Firma Bioferm)		



Abbildung 21: Bioferm-Anlage in Japan (Quelle ²¹).

Technologiebeschreibung

Das Prinzip der Bioferm-Technik ist vergleichbar mit jener der Firma Bekon. Bei der Einbringung in den Fermenter wird die Biomasse (aerob) zunächst mit Methanbakterien (Perkolat) versetzt und anschließend im geschlossenen System (anaerob) gelagert und vergoren. Die von Bioferm GmbH entwickelten Anlagen werden standardmässig konzipiert. Sie enthalten mehrere Fermenterkammern, ein Gasspeicher, ein Technikcontainer und ein BHKW-Container (siehe Abbildung 21). Die Fermenterkammern werden durch Stahltore mittels eines pneumatischen Schliessmechanismus gasdicht verschlossen. Im Boden ist eine Fussbodenheizung zur Sicherung einer konstanten Prozesstemperatur (rund 40 °C) integriert. Auf der Deckenkonstruktion wird ein Gassack installiert.

²¹ <http://www.bioferm.de/>

Der Gasspeicher dient zur Erhaltung des kontinuierlichen Betriebs des BHKW's während des Entleer- bzw. Füllvorgangs einer Fermenterkammer. Der zu wechselnde Fermenter wird belüftet und das Gas wird über einen Biofilter abgeblasen.

Durch ein Sicherheitssystem aus Luft- und Methansensoren wird verhindert, dass die Tore vor der Absaugung des restlichen Methans geöffnet werden. Bis auf die Befüllung und Entleerung der Biomasse durch Radlader oder andere Füllfahrzeuge wird die komplette Anlage vollautomatisch gesteuert und geregelt.

11.3. CONTAINER-VERFAHREN

Gemäss Auskünften der Fachagentur für Nachwachsende Rohstoffe (FNR e.V.) hatte vor einigen Jahren Prof. Hofmann von der Universität Triesdorf, die Holsteiner Gasgesellschaft (HGG) und die Fa. Bioferm GmbH mit dem Container-Verfahren gearbeitet. Auf Grund zu hoher Betriebskosten wurde das Verfahren nicht weiter vorangetrieben.

Technologiebeschreibung

Im Containerverfahren werden Mobil- oder Einschub-Fermenter (Abbildung 22) mit Biomasse befüllt und luftdicht verschlossen. Die im Impfsupstrat, das dem frischen Substrat beigemischt wird, enthaltenen Mikroorganismen erwärmen das Substrat in einer ersten Phase, in der dem Fermenter Luft zugeführt wird. Es findet ein mit Wärmefreisetzung verbundener Kompostierungsprozess statt. Nachdem die Betriebstemperatur erreicht ist, wird die Luftzufuhr abgeschaltet. Der eingetragene Sauerstoff wird verbraucht und die anaeroben Mikroorganismen werden aktiv und setzen die organische Substanz in Biogas um. Das Biogas wird in Gassammelleitungen aufgefangen und genutzt²².

Die Technologie wird auch verwendet indem bei geschlossenem Container Gärflüssigkeit eingestaut und zirkuliert wird.

Diese Technik zeigte erfolgsversprechende Ansätze und ist für kleinere Einheiten gedacht (maximale Containergrösse 30 m³). Bislang sind die Kosten je Tonne Jahresdurchsatz aber noch zu hoch [5].



Abbildung 22: Geschlossene Container-Fermenter [12].

²² Quelle: <http://www.fnr-server.de/pdf/literatur/Kapitel3.pdf>

11.4. VERFAHREN LOOCK-TNS®

Das Loock-TNS®-Verfahren (Trocken-Nass-Simultan Vergärung) wurde vom Ingenieurbüro Loock Consultants Hamburg entwickelt. Das Verfahren wurde an der Versuchsanlage in Bergedorf getestet und bis heute in 3 Grossanlagen (Biogasanlagen in Pirow, Friedersdorf und Halle) im landwirtschaftlichen Bereich eingesetzt.

Die Ergebnisse aus der Praxiserprobung der Anlage in Pirow sind in der Zusammenfassung „Ergebnisse aus den wissenschaftlichen Begleitungen der Pilotanlagen Pirow und Clausnitz“ [19] aufgeführt.

Tabelle 10: Kurzzusammenfassung des Verfahrens Loock-TNS

Kurzzusammenfassung		Bemerkungen
Verfahrensbezeichnung	Loock-TNS	
Homepage	http://www.loock-tns.de/	
Substratinput	Fest- und Flüssigsubstrate	2 gekoppelte Systeme (Trocken-Nass-System)
Trockensubstanzgehalt	20 bis 25%	Gärrest stapelbar in Feststofffermenter
Anzahl Prozessstufen	1 bis 2-stufig	gekoppelt
Art der Beschickung	diskontinuierlich-kontinuierlich	
Prozesstemperatur	mesophil	
Verweilzeiten	20 bis 25 Tage	pro Charge Festschubstanz
Gasertrag	180 m ³ / Tonne Maissilage	gemäss Hersteller (Homepage)
Methangehalt	55%	
Beispielanlage		
Kapazität	10'000 t / Jahr	NaWaRo (Mais)
BHKW-Leistung	500 kW elektrisch	
Investitionskosten	1.5 Mio. EURO	Richtgrösse (detail. Leistungsumfang n.b.)
Quellen: [21]		



Abbildung 23 und 24: Biogas-Fermenter in Pirow gebaut nach dem Prinzip des Loock-TNS®-Verfahrens. Ansicht der Feststoffvergärung (links) und der Flüssigvergärung (rechts – Quelle ²³).

Technologiebeschreibung

Bei diesem System handelt es sich um eine Kombination aus Fest- und Flüssigfermentation. Die Anlage in Pirow besteht aus 4 gasdichten Feststoff-Fermentern, die mit hydraulisch verschliessbaren Toren, Belüftungstechnik zum Einblasen von Luft und einer Vorrichtung zur Perkolation der Prozessflüssigkeit ausgestattet sind. Neben der Feststoffvergärungsanlage steht eine konventionelle Flüssigvergärungsanlage (Abbildungen 23 und 24). Der Austausch der Perkulationsflüssigkeit erfolgt über einen Prozesswasserkreislauf zwischen beiden Systemen (Abbildung 25).

²³ <http://www.loock-tns.de/>

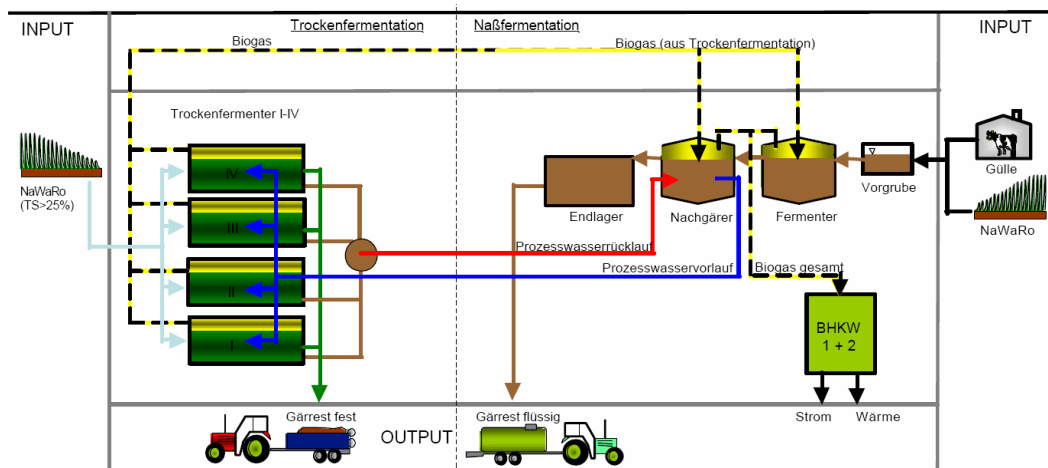


Abbildung 25: Prinzipschema der Trocken-Nass-Vergärung [21].

11.5. VERFAHREN 3A

Das 3A-Verfahren ist ein Batch-Prozess, der auf einer Kombination aus anaerober Vergärung und Kompostierung in einem so genannten Wannen-Fermenter basiert. Das Verfahren verbindet Biogasproduktion, Hygienisierung und Desodorierung in 3 Phasen: 1. aerob, 2. anaerob, 3. aerob. Der 3A-Process²⁴ wurde schon 1988 von Dr. Ing. Heinz Steffen als diskontinuierlicher Prozess patentiert. Das neue 3A-Batch-System soll in Zukunft für den Einsatz im industriellen Maßstab entwickelt werden. Biogasanlagen dieses Typs sind in Planung.

Tabelle 11: Kurzzusammenfassung des Verfahrens 3A

Kurzzusammenfassung		Bemerkungen
Verfahrensbezeichnung	3A	
Homepage	http://www.3a-biogas.com	
Substratinput	Biomüll	Stapelbar (Strukturmaterial wird benötigt)
Trockensubstanzgehalt	25 bis 45%	
Anzahl Prozessstufen	3-stufig	aerob-anaerob-aerob
Art der Beschickung	diskontinuierlich	
Prozesstemperatur	mesophil	
Verweilzeiten	45 bis 50	abhängig von Prozesstemperatur
Gasertrag	100 m ³ /to Input	vorwiegend vom Inputmaterial abhängig
Methangehalt	55%	
Beispielanlage		
Kapazität	6500 m ³ / Jahr	(Mais, Grassilage, Hühnermist)
Platzbedarf	n.b	
Investitionskosten	570'000 Euro	ohne Gasverwertung (BHKW etc.)
Quellen: [15], (Ingenieurbüro Müller Abfallprojekte GmbH, Weibern, D)		

²⁴ <http://www.profactor.at/>

Technologiebeschreibung

Das Substratgemisch liegt auf Spaltenböden, unter denen segmentweise Hohlräume zur Erfassung des Perkolats und zur Absaugung des Biogases angeordnet sind. Nach der Befüllung eines Segments mit Biomasse erfolgt zunächst eine Saugbelüftung, um durch den aeroben Stoffwechsel die für den anaeroben Abbau erforderliche Prozessstemperatur zu erreichen (Phase 1). Anschließend wird die Belüftung eingestellt und das benachbarte Segment befüllt und belüftet. Das erste Segment wechselt dadurch in den fakultativen Stoffwechsel über (Phase 2), dem eine strikt anaerobe Phase folgt (Phase 3), sobald das dritte Segment befüllt und belüftet wird. Dieser Vorgang wiederholt sich solange, bis die gesamte Fermenterwanne mit Substrat gefüllt ist (Abbildung 26).

Für die anaerobe Behandlung wird das Segment mit einer Folie gasdicht gegenüber der Atmosphäre verschlossen und mit Perkolatwasser beaufschlagt. Das gebildete Biogas wird segmentweise abgesaugt. Nach Beendigung des anaeroben Abbaus erfolgt erneut eine Belüftung, so dass ein Kompost entsteht. Das Prinzip der segmentweisen Behandlung ist in Abbildung 4 schematisch dargestellt [38].

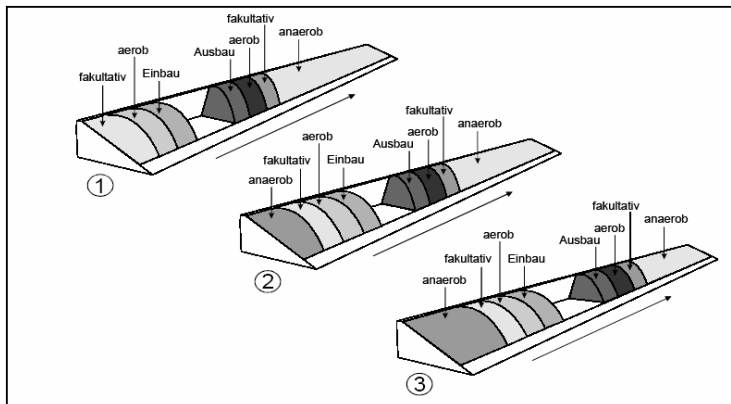


Abbildung 26:
Prinzipschema des 3-A-Verfahrens [38].

12. Aufstauverfahren - diskontinuierlich

Die Aufstauverfahren (auch An- und Einstauverfahren genannt) unterscheiden sich gegenüber Perkolationsverfahren darin, dass die Prozessflüssigkeit nicht durch das stapelfähige Gärgut perkoliert wird, sondern das Material mit zwischengespeicherter Prozessflüssigkeit periodisch überstaut wird (Abbildung 27).

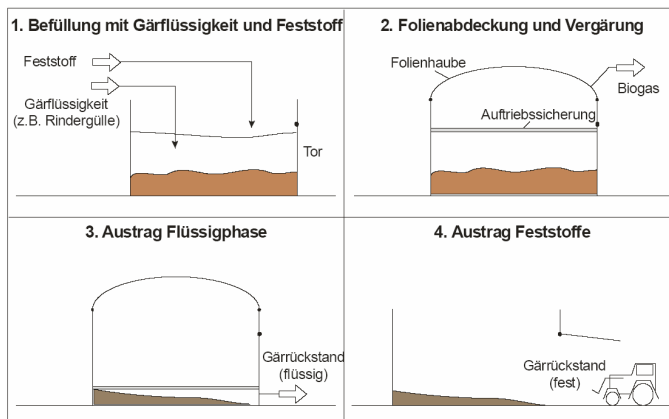


Abbildung 27: Prinzipschema des Aufstau-Verfahrens [36].

Dieses Verfahren wurde entwickelt, um die Probleme die sich im Zusammenhang mit der gleichmäßigen Verteilung des Perkolats und der Durchrieselung des Substratstapels ergeben, zu vermeiden. Durch das Überstauen des Feststoffs mit Flüssigkeit besteht jedoch die Gefahr, dass das Gärgut aufschwimmt, weshalb nach Befüllung des Fermenters zum Teil spezielle Einbauten eingebracht werden müssen. Dadurch wird das betriebliche Stoffmanagement wesentlich erschwert.

12.1. AUFSTAU-BOXEN-FERMENTER

Ein Aufstau-Boxen-Fermenter wurde vom Ingenieurbüro Ratzka (Ostrau) in der Agrargenossenschaft Bergland Clausnitz (Sachsen, Deutschland) an einer Pilotanlage erprobt. Ende 2006 nahm die Biogasanlage ihren Betrieb auf.

Tabelle 12: Kurzzusammenfassung des Aufstau-Boxen-Verfahrens

Kurzzusammenfassung Anlage Clausnitz		Bemerkungen
Verfahrensbezeichnung	Aufstau-Boxen	
Kontakt	Ingenieurbüro Ratzka, Ostrau	
Substratinput	NaWaRo	
Trockensubstanzgehalt	25 bis 45%	
Anzahl Prozessstufen	2-stufig	
Art der Beschickung	diskontinuierlich	
Prozesstemperatur	mesophil	
Verweilzeiten	12 bis 30 Tage	Messreihen Versuchsanlage
Gasertrag	45 bis 170 m ³ / t Input	Messergebnisse Pilotanlage
Methangehalt	n.b.	
Fermentervolumen	500 m ³ + Flüssigfermenter	4 Feststofffermenter à 125 m ³
Quellen: [15], [19]		

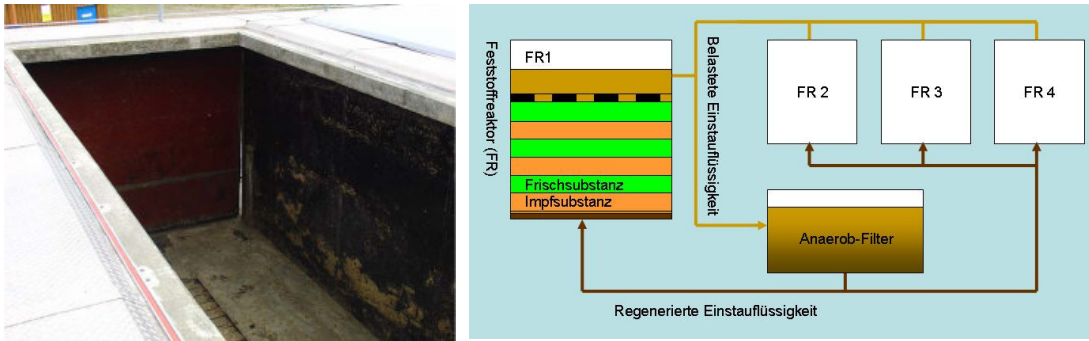


Abbildung 28 und 29: Anstau-Fermenter in Clausnitz (links) ohne Folienabdeckung [37]. Rechts das Prinzipschema des Anstau-Verfahrens (Quelle INES).

Technologiebeschreibung

Der entwickelte Aufstau-Boxen-Fermenter besteht aus 4 Fermentern (Abbildung 28 und 29). Die Fermenter können von oben über eine abnehmbare Plane befüllt und der Gärrest über ein verschließbares Tor von vorn entnommen werden.

Die vier wannenförmigen, teils in die Erde eingelassenen Fermenter werden zunächst von oben mit stapelbarem Material (zum Teil mit fester Impfschicht vermisch) befüllt. Zwei der vier Fermenter werden mit dem flüssigen Gärrest im so genannten Anstauverfahren aus der benachbarten Flüssigvergärungsanlage angeimpft. Die eingestaute und mit organischen Säuren angereicherte Flüssigkeit wird anschließend wieder der Flüssigvergärungsanlage zugeführt, in der die Zersetzung der organischen Säuren zu Biogas erfolgt. Die Frequenz des Einstaus ist dabei abhängig von der Substratmischung. In den anderen zwei Fermentern kommt das Mischverfahren zur Anwendung, wobei ausschließlich fester Gärrest der Feststoffvergärung als Impfmaterail genutzt wird. Alle vier Fermenter laufen im mesophilen Batch-Betrieb, d.h. sie werden mit Biomasse befüllt, die dann angeimpft wird und bei Temperaturen zwischen 32°C und 38°C luftdicht über mehrere Wochen vergärt. Die Fermenter müssen vor dem nächsten Durchlauf entleert werden.

Die Erprobung der Pilotanlage Clausnitz hat gezeigt, dass der flüssige Gärrest aus dem Nachgärer die Biomasse beim Einstau nicht ausreichend durchdringt und damit als Prozessflüssigkeit nicht geeignet ist. Ein separater Prozesskreislauf wurde realisiert, so dass die Prozessführung und bessere Gaserträge ermöglicht wurden. Die Zusammenfassung „Ergebnisse aus den wissenschaftlichen Begleitungen der Pilotanlagen Pirow und Clausnitz“ [19] fasst die weiteren Versuchsergebnisse zusammen.

12.2. VERFAHREN CHIEMGAUER

Das von der Firma Chiemgauer Biogasanlagen entwickelte Verfahren basiert auf dem Prinzip der Fahrsilo-Technik (Tabelle 13).

Tabelle 13: Kurzzusammenfassung des Chiemgauer-Fahrsilo-Verfahrens

Kurzzusammenfassung		Bemerkungen
Verfahrensbezeichnung	Chiemgauer-Fahrsilo	
Homepage	http://www.chiemgauer-biogasanlagen.de/	
Substratinput	NaWaRo / Mist	Strukturmaterail wird benötigt
Trockensubstanzgehalt	> 25%	
Anzahl Prozessstufen	1-stufig	
Art der Beschickung	diskontinuierlich	
Prozesstemperatur	Abwärme BHKW	keine genauen Angaben bekannt
Verweilzeiten	40 bis 60 Tage	abhängig von Substratgemisch
Gasertrag	50 bis 60 m ³ /m ³ Gras- Maissilagegemisch	siehe Homepage
Methangehalt	n.b	
Quellen: (Homepage ²⁵)		

²⁵ <http://www.chiemgauer-biogasanlagen.de/>



Abbildung 30: Fahrsilo-Fermenter mit Folienhaube (gefüllt mit Biogas).



Abbildung 31: Fahrsilo-Fermenter mit Restsubstrat nach Abdeckung der Folienhaube (Quelle ²⁶).

Technologiebeschreibung

Bei dieser recht einfachen Konstruktion bestehen die Fermenter aus befahrbaren, betonierten Becken und einer gasdichten Membrandeckung (siehe Abbildung 30 und 31). Die Becken sind so ausgebildet, dass sie über eine Einfahrtsrampe mittels Radlader befüllt oder entleert werden können. Nach der Befüllung wird das Becken bis zum Beckenrand mit Perkolat geflutet und das über den Beckenrand hinausragende Futter berieselt. Die Wärmeverluste über die grosse Oberfläche der Gasmembran werden durch eine auf das Substrat aufgelegte Isolierfolie gemindert.

²⁶ <http://www.chiemgauer-biogasanlagen.de>

13. Haufwerkverfahren - diskontinuierlich

Bei dieser Variante erfolgt die Vergärung ohne Gegenwart einer Flüssigphase. Dazu muss das Gärgut vor der Vergärung mit Impfmateriel intensiv vermischt werden, um vor Beschickung des Fermenters ein Animpfen des Substrats zu erreichen. Den schematischen Ablauf zeigt Abbildung 32.

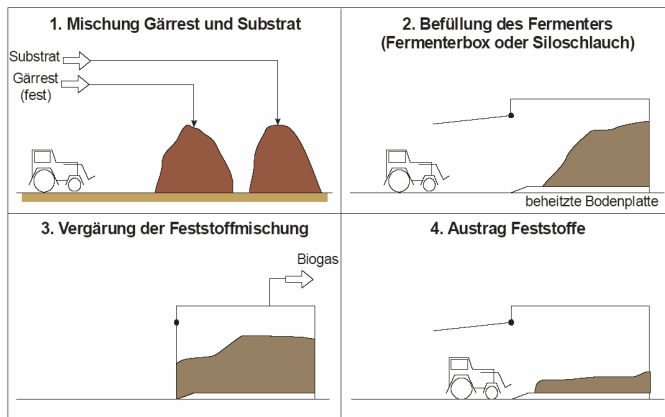


Abbildung 32: Prinzipschema des Haufwerkverfahrens [36].

Da bei einer zu geringen Animpfmenge die Gefahr einer Hemmung der Methangärung durch Übersäuerung des Gemisches besteht, muss das Verhältnis aus Frischsubstrat und Animpfmateriel sorgfältig ausgewählt werden, da im Verlauf der Feststoffvergärungsprozesses keine Möglichkeit zur Korrektur der Milieubedingungen besteht. Im Durchschnitt muss das Verhältnis von Impfsbstanz zu Frischsubstrat mindestens 1:1 betragen, wodurch die Ausnutzung des Fermentervolumens entsprechend gering ist. Als Fermenter können Boxen- oder Garagenfermenter mit Wand- und Bodenheizung eingesetzt werden. Die Einhaltung einer konstanten Temperatur im Substratstapel stellt hierbei das Hauptproblem dar.

13.1. FOLIENSCHLAUCHVERGÄRUNG

Das Folienschlauch-Verfahren ist an die Technik der Schlauchsilierung für Gras, Mais etc. angelehnt. Die Firma AG Bag Budissa Agroservice GmbH aus Malschwitz (Deutschland) stellt für das Folienschlauch-Verfahren²⁷ die erforderlichen Schläuche her (Abbildung 33). Das Verfahren hat sich in der Praxis jedoch nicht bewährt.



Abbildung 33: Ein Folienschlauch-Fermenter wird befüllt [27].

²⁷ Quelle: www.fnr-server.de/pdf/literatur/Kapitel3.pdf

Tabelle 14: Kurzzusammenfassung des Folienschlauch-Verfahrens

Kurzzusammenfassung		Bemerkungen
Verfahrensbezeichnung	Folienschlauch	
Kontakt	Firma AG Bag Budissa Agroservice GmbH aus Malschwitz (Deutschland)	
Substratinput	NaWaRo / Mist	Strukturmateriale wird benötigt
Trockensubstanzgehalt	> 25%	
Anzahl Prozessstufen	1-stufig	
Art der Beschickung	diskontinuierlich	
Prozesstemperatur		Temperaturschwankungen
Verweilzeiten	40 bis 60 Tage	abhängig von Substratgemisch
Gasertrag	0.4 m ³ / Tag und Tonne	sehr witterungsabhängig
Methangehalt	n.b	
Beispielanlage		
Kapazität	17 Schläuche / Jahr (Verbrauch)	150 t Input pro Schlauch
BHKW-Leistung	15 kW elektrisch	
Platzbedarf	40 m Länge pro Schlauch	
Investitionskosten	65'000 EURO	Richtgrösse (inkl. Befüllmaschine)
Quellen: [27]		

Dieses Verfahren benötigt tiefe Investitionskosten für Bau und Technik. Problematisch sind die starke Abhängigkeit von Umgebungstemperaturen, der in der Regel zu geringe Wassergehalt und der fehlende Konzentrationsausgleich innerhalb des Gärsubstrates. Insgesamt herrschen ohne weitere bautechnische Massnahmen keine günstigen Bedingungen für die Gärbiologie. Dies hat geringe Biogaserträge zur Folge, was sich negativ auf die Wirtschaftlichkeit auswirkt.

Gemäss der Sächsischen Landesanstalt für Landwirtschaft schnitt das Folienschlauch-Verfahren bei einer Studie im Hinblick auf das wirtschaftliche Ergebnis deutlich negativ ab. Die Investition in das Verfahren ist selbst unter Beachtung der günstigen Rahmenbedingungen des EEG in Deutschland und einer Landesförderung von 30 % unrentabel. Es wird deutlich, dass die Wirtschaftlichkeit des Verfahrens hauptsächlich von der Biogasproduktion abhängt [27].

Technologiebeschreibung

Beim Folienschlauch-Verfahren wird der Feststoff mit einer Maschine (analog der Siliertechnik) in einen Folienschlauch gepresst, luftdicht verschlossen und ausgefault. Zuerst wird der aerobe Kompostierungsprozess für die Erwärmung des Substrates benutzt. Während der anaeroben Phase, zur weiteren kontinuierlichen Wärmeeinbringung, können die Schläuche auf Betonplatten verlegt werden, in der eine Fussbodenheizung integriert ist. Zur Verhinderung von Wärmeverlusten kann der Folienschlauch bei der Befüllung mit einer Wärmedämmung überzogen werden. Über in den Schlauch integrierte Sammelleitungen wird das Biogas gefasst und der Nutzung zugeführt.

14. Zusammenfassung der Vergärungsverfahren

In Tabelle 15 werden die im vorherigen Kapitel beschriebenen Feststoffvergärungsverfahren zusammengefasst.

Tabelle 15: Zusammenfassung der verschiedenen Feststoffvergärungs-Verfahren (Quelle INES)

Verfahren		Typ	Kontakt	Entwicklungsstand
Pfropfenstrom	kont.	Kompogas	www.kompogas.ch	Im Markt
Pfropfenstrom	kont.	Linde BRV	www.linde-kca.de	Im Markt
Siloartig	kont.	Dranco	www.dranco.be	Im Markt
Siloartig	kont.	ATF	www.KriegFischer.de	Abbruch
Siloartig	kont.	Valorga	www.valorgainternational.fr	Im Markt
Siloartig	kont.	Järna, Schweden	winfried.schafer@mtt.fi	Pilotstadium
Siloartig	kont.	Anacom	www.fat.admin.ch	Abbruch
Perkolation	kont.	ISKA	www.iska-gmbh.de	Im Markt
Perkolation	kont.	ATZ	www.atz.de	Pilotstadium
Perkolation	kont.	BioPercolat	www.wehrle-werk.de	Lizenzverlust
Perkolation	diskont.	Bekon	www.bekon-d.de	Im Markt
Perkolation	diskont.	Bioferm	www.bioferm.de	Im Markt
Perkolation	diskont.	Container	www.bioferm.de	Abbruch
Perkolation	diskont.	Loock-TNS	www.loock-tns.de	Im Markt
Perkolation	diskont.	3-A	www.3a-biogas.com	Pilotstadium
Aufstau	diskont.	Aufstau-Boxen	Ingenieurbüro Ratzka, Ostrau	Pilotstadium
Aufstau	diskont.	Fahrsilo	www.chiemgauer-biogasanlagen.de	Pilotstadium
Haufwerk	diskont.	Folienschlauch	www.ag-bag.de	Pilotstadium

15. Feststoffvergärung versus Flüssigvergärung

Die Vergärung von landwirtschaftlichen Produkten in Feststoffvergärungsanlagen basiert im Vergleich zur Flüssigvergärung auf weniger Erfahrungshintergrund. In Expertenkreisen wird der Feststoffvergärung jedoch ein grosses Entwicklungspotential attestiert. In diesem Kapitel werden die wesentlichen Unterschiede zwischen der Feststoffvergärung und der Flüssigvergärung aufgezeigt.

In Tabelle 15 sind die wichtigsten Vor- und Nachteile der Feststoffvergärung dargestellt. Es werden nur die Batch-Verfahren (Boxen, Garagen) und die Pfpfenstromverfahren der Flüssigvergärung gegenübergestellt. Andere Verfahren stehen noch im Entwicklungsstadium oder zeigen vergleichbare Eigenschaften mit einem dieser Verfahren auf. Deshalb werden sie hier nicht berücksichtigt.

Tabelle 16: Zusammenfassung Feststoffvergärung vs. Flüssigvergärung (Quelle INES).

Verfahren	Feststoffvergärung	Feststoffvergärung	Flüssigvergärung
Bauformen	Boxen, Garagen	Pfpfenstromverfahren	Speicher-, Durchflussverfahren
Eignung	für stapelbare Substrate geeignet (viel Strukturmaterial)	für feste Substrate geeignet: wird z.B. zur Verwertung von Biomüll eingesetzt	für flüssige Substrate geeignet - feste Substrate werden angemischt
Bauweise	+ einfache Bauweise	- komplexe Bauweise	- komplexe Bauweise
Prozessenergie	+ verringerter Prozessenergiebedarf durch Einsparung von Fördertechnik und Beschickungstechnik	- Hoher Prozessenergiebedarf durch komplexe Prozessführung bzw. Verfahrenstechnik	- Förder- und Beschickungstechnik mit hohem Energieverbrauch (abhängig von Substratinput)
Wärmenutzung	+ Einsparung von Energie zur Erwärmung des Garsubstrates durch Nutzung der biologischen Wärme-freisetzung bei kurzzeitigem anaeroben Abbau des Materials (geringere Wassergehalte)	Wärmennutzungsgrad liegt zwischen jenen von Batch- und Durchflussverfahren (abhängig von Prozessführung)	- Sehr hoher Wärmebedarf durch kontinuierliches Aufheizen des hohen Wasserinputs.
Störstoffe	+ unempfindlich gegenüber Störstoffen	Störstoffe werden verfahrenstechnisch entfernt, sonst empfindlich	- empfindlich gegenüber Störstoffen
Wartung	+ verminderter Wartungsaufwand und Verschleiss**	- hoher Wartungsaufwand und Verschleiss	- Förder- und Beschickungstechnik mit hohem Verschleiss (abhängig von Substratinput)
Schwefelwasserstoff	+ Entstehung eines Biogases mit geringerer Schwefelwasserstoffkonzentrationen	+ Entstehung eines Biogases mit geringerer Schwefelwasserstoffkonzentrationen	- Entstehung von Schwefelwasserstoffkonzentrationen abhängig von Substratinput (Bei eiweisshaltigen Substraten relativ hoch)
Durchfluss	+ keine Durchflusströmungen	+ keine Durchflusströmungen	- Durchflusströmungen möglich
Gasproduktion	- eine kontinuierliche Gasproduktion erfordert den phasenversetzten betrieb mehrerer Module - auf Grund fehlender Durchmischung können Zonen mit verminderter Gasbildung auftreten	Pfpfenstromverfahren ermöglicht kontinuierliche Gasproduktion Aufwendige Substrataufbereitung ermöglicht gute Durchmischung	Durchfluss bzw. Speicherverfahren ermöglicht kontinuierliche Gasproduktion + Fermenter wird voll durchmisch
Impfmateri	- um einen hohen Gasertrag zu erzielen, ist der Einsatz hoher Impfmateri-mengen notwendig (Platzverlust)	Prozesswasser wird für die Substratanmischung genutzt	+ Durchmischung bewerkstelligt kontinuierliches Impfen. Substratinput (z.B Gülle) enthält schon gewünschte Mikrobiologie.
Sicherheitstechnik	für die explosions-sichere Befüllung und Entleerung muss Sicherheitstechnik installiert werden	Sicherheitstechnik bei Gas-speicherung muss gewährleistet sein.	Sicherheitstechnik bei Gas-speicherung muss gewährleistet sein.

Emissionen	- Allfällige Mehremissionen bei der Vorrotte und beim Öffnen der Fermenterboxen* - Allfällige Mehremissionen infolge der Ausbringung fester Gärreste im Vergleich zu den flüssigen Gärresten der Flüssigvergärung*	geschlossenes, kontinuierliches System, daher keine Mehremissionen Bei NaWaRo-Einsatz: Vergorenes Substrat wird bodennahe ausgebracht. Ansonsten Mehremissionen.	geschlossenes, kontinuierliches System, daher keine Mehremissionen Referenz: Vergorenes Substrat wird bodennahe ausgebracht. Ansonsten Mehremissionen
Kosten	- i.d.R. höhere Gesteungskosten als Flüssigvergärung	- Höhere Gesteungskosten als Flüssigvergärung	+ Gesteungskosten tendenziell tiefer als bei Feststoffvergärung
Wirtschaftlichkeit	- Noch keine Rentabilität ohne EEG-Bonus (D)	Rentabilität mit Abfallentsorgungsgebühren gewährleistet	Rentabilität mit Einsatz von entsprechenden Co-Substraten und deren Gebühren gewährleistet (CH)

* Datenlage teilweise ungenügend / **keine langen Betriebserfahrungen

15.1. VERFAHRENSTECHNISCHE ASPEKTE

Diskontinuierliche Verfahren

Diskontinuierliche Feststoffvergärungsanlagen zeichnen sich durch eine verfahrenstechnisch einfache Bauweise aus. Für den Ein- und Austrag der Gärsubstanz sind keine zusätzlichen Beschickungssysteme erforderlich. Die Beschickung wird meist mit landwirtschaftlichen Fahrzeugen (z.B. Radlader) durchgeführt. Während des Gärprozesses findet keine Durchmischung des Fermenterinhaltens statt. Der geringe maschinentechnische Aufwand bei diskontinuierlichen Verfahren hat einen positiven Einfluss auf Verschleiss- und Wartungsaufwand der Anlage. Diskontinuierlichen Anlagen sind aufgrund fehlender Mischsysteme unempfindlich gegenüber Störstoffen und fäuligen Substanzen. Kurzschlussströmungen, wie sie in Durchflussverfahren auftreten können, werden ausgeschlossen. Das ganze Gärsubstrat verbleibt mit der gleichen Verweilzeit im Fermenter. Um eine kontinuierliche Gasproduktion zu erzielen, müssen verschiedene Fermenter phasenversetzt nebeneinander geschaltet werden.

Untersuchungen zeigen, dass in der diskontinuierlichen Feststofffermentation Gaserträge erzielt werden können, die mit den Gaserträgen in der Flüssigvergärung vergleichbar sind. Allerdings müssen hierfür die Prozessbedingungen optimal eingestellt werden [17]. Um möglichst optimale Bedingungen zu schaffen, müssen betreffend Verfahrenstechnik verschiedene Punkte berücksichtigt werden [10], [18], [41]:

- **Einsatz von Strukturmaterial:** Das eingesetzte Substrat muss stapelbar sein. Mit Hilfe von Strukturmaterial kann das Substrat so gelagert werden, dass Fließwege für das Perkolat und Raum für die Gasentnahme vorhanden sind. Das Struktursubstrat selber wird teilweise nicht abgebaut (z.B. Stroh).
- **Einsatz von Impfmateriail:** Durch die Beimischung von aktivem Gärsubstrat, das mehrheitlich schon abgebaut ist, geht Fermentervolumen für das Frischsubstrat verloren. Die Raumbelastung ist dadurch kleiner und die Gaserträge fallen tiefer aus. Mit der Erhöhung des Verhältnisses zwischen Frisch- und Gärsubstrat kann der limitierte Fermenterraum besser genutzt werden.
- **Inhomogenitäten im Substrat:** Durch ungenügende Mischung der eingebrachten Substrate (Maissilage, Grassilage, Hühnermist, Rindermist etc.) oder zwischen Frisch- und Gärsubstrat entstehen Inhomogenitäten, welche die Abbauintensität durch die Mikroorganismen reduzieren. Eine verbesserte Mischung könnte die Gaserträge erhöhen, führt jedoch auch zu erhöhtem Arbeitsaufwand.

In einem Bericht des Instituts für Kreislaufwirtschaft in Bremen und des GeoForschungszentrums in Potsdam [41] wird vermerkt, dass gerade die Heterogenität im Fermenter die Stabilität des Gärprozesses fördert. Im Rahmen von Untersuchungen an einem Garagen-Fermenter wurde festgestellt, dass in Fermentern mit heterogenem Substrat lokal durch ein hohes Angebot leichtverwertbarer Substrate eine starke Versäuerung entsteht. Die entstandenen Säuren können durch Diffusion und durch die Perkolation in Bereiche transportiert werden, in denen sie aufgrund eines günstigeren Milieus schneller verwertet werden können.

Im Weiteren wird beschrieben, dass die Heterogenität die Ausbildung von Mikrozonon begünstigt, in denen sich die verschiedenen Mikroorganismen mit ihren unterschiedlichen Mi-

lieuansprüchen einen günstigeren Lebensraum als bei der Flüssigvergärung schaffen können. Es können biologische Prozesse mit unterschiedlichen Optima in Bezug auf den pH-Wert, die Konzentration an organischen Säuren und den Wasserstoffgehalt ablaufen.

Genaue Grundlagen, welche die Auswirkungen eines heterogenen Substratgemisches darlegen, sind keine bekannt.

- **Aerobe Vorrotte:** Durch die aerobe Behandlung des Substrates vor der Beschickung des Fermenters kann das Substrat auf ein ideales Temperaturniveau gebracht werden. Die umgesetzte organische Materie kann jedoch nicht mehr zur Biogasproduktion verwendet werden. Beim Auslassen der Vorrotte müsste mehr Heizenergie zugeführt werden.
- **Perkolatverteilung:** Eine gleichmässige Perkolierung (gute, flächendeckende Verteilung der Perkolatdüsen) des Substrats verbessert den Abbauprozess. Die Abbaugeschwindigkeit und der Abbaugrad werden erhöht. Die Bildung von Wasser undurchlässigen Zonen durch Verdichtung in den obersten Schichten des Substrathaufens gilt es zu verhindern (z.B. mit dem Einbringen von strukturreichem Material).
- **Perkolaterwärmung:** Die perkolatführenden Einrichtungen (Leitungen etc.) ausserhalb des Fermenters müssen beheizt werden. Die Abkühlung des Perkolats führt später bei der Berieselung zu suboptimalen Bedingungen für den mikrobiellen Abbau. Die gleichmässige Erwärmung des Perkolats bedeutet einen höheren Energiebedarf und bautechnischen Aufwand.
- **Verbesserung der Bakterienanpassung:** Um einen optimalen Betrieb zu gewährleisten, muss sich die Biozönose im Fermenter den gegebenen Bedingungen (Temperatur, Substratmischung etc.) anpassen können. Bei Milieu-Veränderungen reagieren die Mikroorganismen sehr sensibel, was zu reduzierten Biogaserträgen bis zum Kollaps der Biozönose führen kann.

Kontinuierliche Verfahren

Die meisten Systeme mit kontinuierlichem Verfahren wurden für die Verwertung von Biomüll entwickelt. Die Bewältigung grosser Mengen erfordert hoch automatisierte, komplexe Verfahren, die heute erfolgreich in der Abfallwirtschaft eingesetzt werden. Die verschiedenen Systeme beinhalten automatische Beschickungssysteme, prozesskontrollierende Einrichtungen wie z.B. Temperatur- und pH-Sonden. Aufgrund des hohen Mechanisierungsgrades ist der Verschleiss von Anlagenteilen hoch, die Anfälligkeit für technische Störungen demzufolge höher. Um Schäden vorzubeugen, wird der Biomüll mit speziellen Aufbereitungsschritten von Störmaterialien getrennt.

15.2. ÖKONOMISCHE ASPEKTE

Die Kosten einer Biogasanlage ergeben sich aus den Kapitalkosten und den laufenden jährlichen Kosten (Substratkosten, Reparatur, Unterhalt, Betriebsmittel und Arbeitseinsatz). Die Haupteinnahmequellen bei landwirtschaftlichen Anlagen sind derzeit sehr unterschiedlich. In der Schweiz basieren die Erlöse bei landwirtschaftlichen Biogasanlagen auf der Bereitstellung des Stroms und der Vergütung der eingesetzten Co-Substrate. Die Nutzung der thermischen Energie ist in vielen Bereichen noch zweitrangig. Positive Effekte durch die Anwendung vergorener Substrate (Substituieren von mineralischem Dünger, Düngerwertverbesserung, Geruchsreduzierung, usw.) sind vorhanden, der wirtschaftliche Nutzen ist aber im Vergleich zu den Haupteinnahmen gering.

Die Wirtschaftlichkeit einer Biogasanlage in der Schweiz ist von folgenden Faktoren abhängig:

- Hohe Gasausbeute
- Möglichst hohe Vergütung der Co-Substratverwertung
- Niedrigen Investitionskosten durch möglichst kostengünstige und gleichzeitig solide Anlagenkonzeptionen. Hohes Maß an Eigenleistung bei Bau und Betreuung (Arbeitseinsatz, Wartung, Reparatur) der Anlage
- Erhalt von öffentlichen Fördermitteln
- Ausreichend Hofdünger (bei landwirtschaftlichen Anlagen) und entsprechende Co-Substrate bzw. ausreichende Reststoffanlieferung (gewerblich-industriell)
- Möglichst hoher Verwertungsgrad der anfallenden Energie zu hohen Preisen (Strom- und Wärmevergütung). Substitution fossiler Energieträgern in Gewächshäusern etc.
- Entsprechende pflanzenbaulich sinnvolle Anwendung der vergorenen Gülle bzw. Reststoffe

Die heute in der Schweiz im Betrieb stehenden Biogasanlagen besitzen eine individuelle Kosten- und Einkommensstruktur. Zu verschiedenen sind die Standorte (Rahmenbedingungen), die eingesetzten Substrate (Hofdünger, Reststoffe etc.), das Mass an Eigenleistung oder die Betriebsfinanzierung (Eigen- und Fremdkapital, Fördermittel etc.).

Bei der Beurteilung der Wirtschaftlichkeit der verschiedenen Anlagentypen müssen die Rahmenbedingungen mitberücksichtigt werden. Einige der bekannten Verfahren sind bisher nur im Ausland (vor allem Deutschland) eingesetzt und unterliegen daher Rahmenbedingungen, welche für die Schweiz nicht gelten. So werden zum Beispiel die Feststoffvergärung in Deutschland stärker gefördert (Novelle EEG) als die Flüssigvergärung.

Diskontinuierliche Feststoffvergärungsverfahren

Die diskontinuierlichen Verfahren haben gegenüber der Flüssigvergärung tendenziell tiefere Investitionskosten (abhängig vom Verfahrenstyp). Bei Fahrsilo oder Folienschlauchverfahren können die Investitionskosten deutlich tiefer liegen. Bei Garagenverfahren liegen sie in einem vergleichbaren Kostenbereich wie die der Flüssigvergärung. Die einfache Bauweise mit teilweise kostengünstigen Materialien senkt die Investitionskosten. Aufgrund des tiefen Mechanisierungsgrades (keine Pumpen etc.) sind die Ersatzinvestitionen geringer. Diesen Vorteilen stehen auch ökonomische Nachteile gegenüber, welche bis anhin dafür ausschlaggebend waren, dass sich die Feststoffvergärungsanlagen im landwirtschaftlichen Markt noch nicht durchsetzen konnten. Die Stromgestehungskosten liegen gemäss einer Studie [31] tendenziell noch über jenen der Flüssigvergärung. Der höhere Arbeitsaufwand für die Beschickung und Entleerung (z.B. mit Radlader) benötigt zusätzlich Arbeitskräfte und Zeit. Die Wirtschaftlichkeit dieser Anlagen ist stark davon abhängig, wie sie betrieben werden. Der Betreiber sollte viel prozesstechnisches Know-how aufweisen und die Arbeitsabläufe möglichst effizient gestalten.

Kontinuierliche Feststoffvergärungsverfahren

Durch die Erfahrung in der Abfallentsorgung über einen längeren Zeitraum, sind kontinuierlichen Feststoffvergärungsverfahren derzeit besser ausgereift. Der Prozess ist über die Prozesssteuerung kontrollierbar. Die Verfahrenstechnik verursacht jedoch hohe Investitionskosten. Die Ersatzinvestitionen dürften aufgrund der Fördertechnik in einem ähnlichen Bereich liegen, wie die der Flüssigvergärung. Die Erfahrungen in landwirtschaftlichem Kontext sind heute noch gering, so dass keine verlässlichen Aussagen gemacht werden können.

Kontinuierliche Anlagen werden vorwiegend in der Abfallwirtschaft eingesetzt und sind daher auf die höhere Vergütung der Reststoffe angewiesen. Werden landwirtschaftliche Produkte eingesetzt, welche zum Teil selber Gestehungskosten verursachen (NaWaRo) und aus denen keine Vergütung generiert werden kann, muss die Anlage ausschliesslich über den Erlös aus Strom- und Wärmeverkauf finanziert werden. Können nicht deutlich höhere Biogaserträge erzielt werden als in der Flüssigvergärung, dann ist die Wirtschaftlichkeit nicht mehr gewährleistet.

15.3. ÖKOLOGISCHE ASPEKTE

Der ökologische Nutzen der Energiegewinnung aus Biogas im Vergleich zur Nutzung fossiler Brennstoffe ist heute grundsätzlich anerkannt. Inwiefern die Feststoffvergärung gegenüber der Flüssigvergärung einen ökologischen Vorteil bringt, gilt es noch abzuklären.

Da bisher auch die Beurteilung der Flüssigvergärung nur mit relativ ungenauen Daten erfolgte, ist ein Vergleich der beiden Verfahrenstypen noch nicht möglich. Zudem können die Umweltauswirkungen aufgrund der Verfahrensvielfalt nicht generell bestimmt werden. Erfahrungen und Studien diesbezüglich werden in Zukunft mehr Informationen liefern [31].

16. Feststoffvergärungs-Potential in der Schweiz

Als Datengrundlage für die Abschätzung des Feststoffvergärungs-Potentials diente vorwiegend der im Auftrag des Bundesamtes für Energie verfasste Bericht „Potentiale zur energetischen Nutzung von Biomasse in der Schweiz (2004)“ [24] „Biomasse-Bericht 2004“).

Gemäss Biomasse-Bericht 2004, betrug die Energiemenge der Biomasse²⁸ und somit das theoretische²⁹ Potenzial der Biomasse im Jahre 2003 rund **330 PJ**. Genutzt wurden nur rund **37 PJ**. Vom theoretischen Biomassepotential werden derzeit also nur 12% genutzt, überwiegend Biomasse aus den Kategorien Holz und Abfall-/Reststoffe. Die folgende Grafik (Abbildung 35) zeigt das theoretische Potenzial und die aktuelle Nutzung der einzelnen Biomassekategorien im Vergleich.

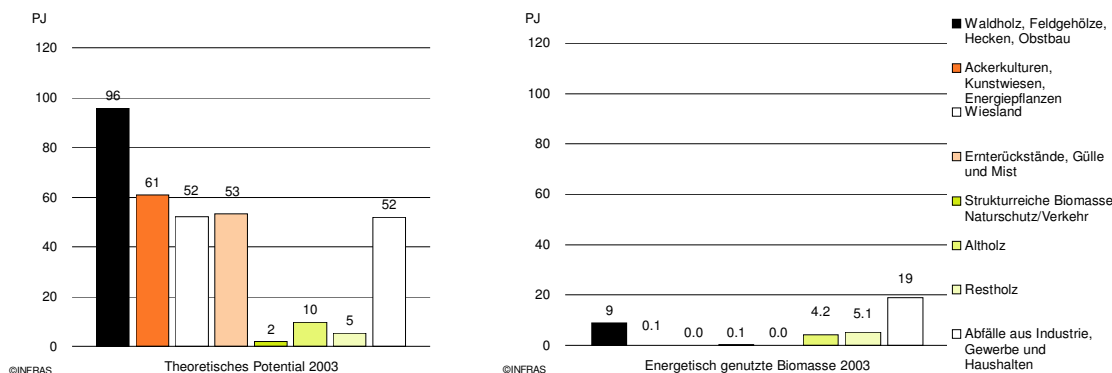


Abbildung 35: Theoretisches Biomassepotential der Schweiz (links) und die energetisch genutzte Biomasse im Jahre 2003 (rechts - Quelle: INFRAS)

Aufgrund technischer (Verfahrensentwicklung etc.), ökonomischer und ökologischer Hürden bei der Energieproduktion aus Biomasse wird auch in Zukunft die energetische Nutzung weit unterhalb des theoretischen Biomassepotentials liegen. In der Biomasse-Studie 2004 wurde daher auch das ökologische Biomassepotential³⁰ abgeschätzt (Abbildung 36).

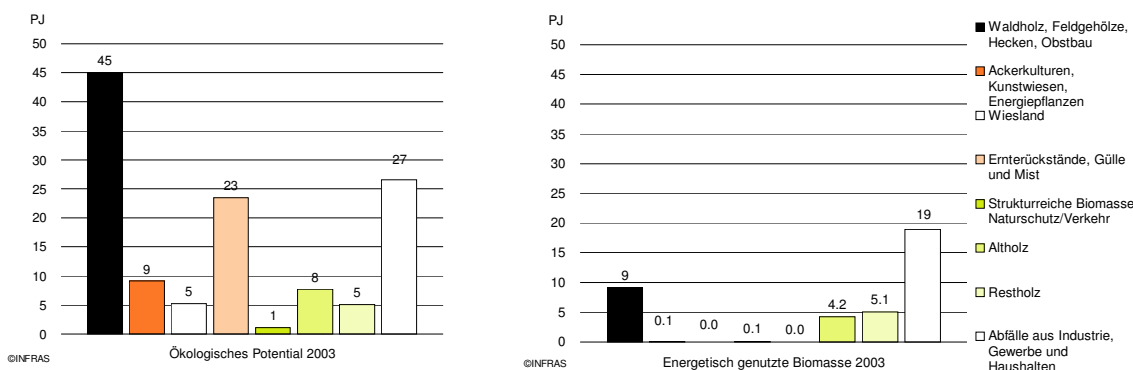


Abbildung 36: Ökologisches Biomassepotential der Schweiz (links) und die energetisch genutzte Biomasse im Jahre 2003 (rechts - Quelle: INFRAS)

²⁸ Die Energiemenge der Biomasse (sowohl die theoretische als auch die genutzte Menge) berücksichtigt noch keine Energieverluste, welche bei der Umwandlung in nutzbare Energie auftreten. Es sind hier also **keine** Endenergieverbräuche sondern untere Heizwerte dargestellt.

²⁹ Theoretisches Potential: Gewachsene Biomasse auf kulturfähiger Landfläche und in der Volkswirtschaft anfallende Stoffe aus der Sekundärproduktion.

³⁰ Ökologisches Potential: Biomasse, welche aus land- und forstwirtschaftlicher Produktion inkl. Nebenprodukten ökologisch nachhaltig und energetisch mit einem plausiblen Aufwand-/ Ertragsverhältnis gewonnen werden kann.

In der Schweizer Landwirtschaft steckt ein bedeutendes Biomassepotential, das bis heute kaum genutzt wird. Die Werte zeigen auf, dass das ökologische Potential alleine in den Kategorien Ackerkulturen (inkl. Kunstweiden, Energiepflanzen), Wiesland und Ernterückstände (inkl. Gülle und Mist), welche für die Schweizer Landwirtschaft von Bedeutung sind, rund 37 PJ ist. Dieses zusätzliche ökologische Energiepotential entspricht dem Energiepotential der derzeit genutzten Biomasse, inkl. der Holz und Reststoffverwertung.

In Zukunft könnte dieses Potential mit Hilfe der Biogastechnologie erschlossen werden. Inwiefern dieses Potential für die Feststoffvergärung geeignet ist bzw. zur Verfügung steht bleibt offen. Denn praktisch alle in der Feststoffvergärung zum Einsatz kommenden Substrate können auch (zum Teil mit entsprechenden Vorbehandlungsschritten) in Flüssigfermentationsanlagen mit am Markt verfügbarer Technik verwendet werden.

Ausnahmen bestehen vor allem für Reststoffe und Abwässer der Nahrungsmittelindustrie sowie flüssige tierische Exkremente (Gülle). Diese können in Feststoffvergärungsanlagen nicht verwertet werden. Ein höheres Potenzial zeigt die Feststoffvergärung ausschließlich bei Stroh. Das Energiepotential von Stroh wird in der Biomasse-Studie mit rund 10 PJ ausgewiesen.

Der Einsatz von Stroh in Vergärungsanlagen ist jedoch von geeigneten Aufschluss-Verfahren (thermisch, mechanisch oder z. B. enzymatisch) abhängig, welche derzeit noch in Entwicklung sind. Zudem kann Stroh auch zur Verbrennung (z.B. in Strohheizkraftwerken) eingesetzt werden.

17. Rahmenbedingungen

17.1. SITUATION IN DER SCHWEIZ

In diesem Kapitel werden einerseits die gesetzlichen Rahmenbedingungen in der Schweiz (Energiegesetz, Raumplanungsgesetz) erläutert, andererseits wird die Situation in Deutschland kurz dargestellt.

Raumplanungsgesetz Schweiz

Das in den letzten Jahren verstärkt aufkommende Interesse für den Bau von Biogasanlagen hat die zuständigen kantonalen Bewilligungsbehörden vor grosse Probleme gestellt. Dies aufgrund der Tatsache, dass das zugrunde liegende Raumplanungsgesetz (RPG) noch keine befriedigenden Entscheidungsgrundlagen für den Bau solcher Anlagen bietet. Die Beurteilung der Zonenkonformität landwirtschaftlicher Biogasanlagen stellt für viele Projekte eine zum Teil unüberwindbare Hürde dar. Mit der Produktion von Energie (Strom und Wärme) aus landwirtschaftlichen und betriebsfremden gewerblich-industriellen Reststoffen bewegt sich der entsprechende Landwirt (bzw. Anlagenbetreiber) auf einem schmalen Grad zwischen Landwirt, Energiewirt und Abfallentsorger [1].

Die Bedenken vor einer Zweckentfremdung in der Landwirtschaft haben zur Folge, dass sich die Baubewilligungsverfahren in die Länge ziehen. Um dieser unbefriedigenden Situation Rechnung zu tragen, wird das Raumplanungsgesetz revidiert. Das Bundesgesetz wurde schon verabschiedet. Die Verordnung wird jedoch noch ausgearbeitet und sollte im Sommer in die öffentliche Vernehmlassung.

Gemäss geltendem Raumplanungsgesetz werden Biogasanlagen dann als zonenkonform bzw. standortgebunden bezeichnet, wenn nicht mehr als ein definierter Anteil betriebsfremder Reststoffe verarbeitet wird. Dieser Anteil ist heute kantonal unterschiedlich hoch (z.B. Kanton Bern mit 35 %, mehrheitlich jedoch 50%). Die Revision sieht vor, dass die Rechtspraxis in dieser Hinsicht vereinheitlicht und vereinfacht wird.

Durch die Änderungen im Raumplanungsgesetz könnten Bewilligungsverfahren effizienter durchgeführt werden.

Detaillierte Informationen zur heute noch gültigen Bewilligungspraxis für Biogasanlagen in der Schweiz werden in der Studie „Biogasanlagen in der Landwirtschaft – Bewilligungsfähigkeit nach geltendem Raumplanungsrecht“ [23] zusammengefasst.

Stromeinspeisevergütung

Die Wirtschaftlichkeit einer landwirtschaftlichen Biogasanlage in der Schweiz hängt grundsätzlich von zwei Haupteinnahmequellen ab: dem Stromverkauf und der Vergütung der verwerteten betriebsfremden Reststoffe. Der Verkauf von Wärme (oder die Substitution fossiler Energieträgern) trägt nur zur verbesserten Wirtschaftlichkeit bei, wenn der grösste Teil der Wärme vor Ort genutzt werden kann. Dies ist derzeit nur unter sehr guten Voraussetzungen (z.B. Beheizung von Treibhäusern) möglich.

Die Vergütung der Reststoffe unterliegt dem marktwirtschaftlichen Gesetz von Angebot und Nachfrage. Diese für den Betreiber wichtige Einnahmequelle kann sich daher innerhalb kurzer Zeit ändern. Mit dem vermehrten Bau von Biogasanlagen und der dadurch steigenden Nachfrage werden die Vergütungspreise für Reststoffe tendenziell sinken. Diese Tatsache stellt für derzeitige Anlagenbetreiber ein Unternehmerrisiko dar, welches die Wirtschaftlichkeit der Anlage gefährden könnte. Die gesicherten Einnahmen beruhen daher auf der gesetzlich geregelten Einspeisevergütung durch Strom aus erneuerbaren Energie, welche derzeit auf 15 Rp. pro kWh festgelegt ist. Eine kostendeckende Einspeisevergütung (wie sie zum Beispiel in Deutschland praktiziert wird) könnte einen Teil dazu beitragen, die Wirtschaftlichkeit landwirtschaftlicher Biogasanlagen längerfristig zu sichern.

Im Rahmen der Vorlage zur Stromversorgungsgesetz (StromVG) haben Nationalrat und Ständerat die kostendeckende Einspeisevergütung für Strom aus erneuerbaren Energien gutgeheissen.

Das Bundesamt für Energie erarbeitet zurzeit die Verordnungen zum Stromversorgungsgesetz bzw. zum Energiegesetz. Es ist vorgesehen, diese Verordnungen von Juli bis Oktober in die Vernehmlassung zu geben. Vorbehältlich eines allfälligen Referendums sollen Gesetz und Verordnungen auf den 1. Januar 2008 in Kraft gesetzt werden³¹.

³¹ <http://www.bfe.admin.ch/themen/00612/00613/index.html?lang=de>

17.2. ERFAHRUNGEN IN DEUTSCHLAND

Stromeinspeisevergütung

In Deutschland trat mit dem Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG) erstmals im April 2000 ein Gesetz in Kraft, das die Abnahme und die Vergütung von Strom aus erneuerbaren Energiequellen regelt³².

Mit der Absicht unter anderem die Biogastechnologie in die gewünschte Richtung zu lenken, wurde mit der Novellierung des Erneuerbaren Energiegesetzes (EEG) im Jahre 2004 eine Grundlage geschaffen, welche den Einsatz bestimmter Substanzen (NaWaRo-Bonus), die Kraft-Wärme-Kopplung (KWK-Bonus) und neue Technologien (Innovations-Bonus) fördert. Als Basis für die Vergütung des Stromes besteht ein Grundpreis, welcher bei Neuanlagen jährlich gesenkt wird und so die zu erwartende Effizienzsteigerung berücksichtigt. Die verschiedenen Boni werden zusätzlich den Anlagen entsprechend vergütet.

Basierend auf diesen Gesetzesänderungen erlebt Deutschland einen anhaltenden Bau-Boom im Bereich der landwirtschaftlichen Biogasanlagen. Die Anlagenzahl und besonders die produzierte Strommenge stiegen in den letzten Jahren stark an.

Aufgrund des NaWaRo-Bonus in Höhe von 4 bis 6 Cent/kWh_{el} werden zunehmend feste Substrate aus landwirtschaftlicher Produktion verarbeitet. Beim Einsatz in Feststoffvergärungsverfahren (in Deutschland als Trockenfermentationsverfahren bekannt) wird über den Innovations-Bonus zusätzlich 2 Cent/ kWh_{el} vergütet.

Die Einstufung in Feststoffvergärungsanlagen und die damit verbundene erhöhte Vergütung von Strom ist sehr umstritten [33]. Erstens ist im Gesetz nicht vollumfänglich definiert, welche Anlagen als Feststoffvergärungsanlagen gelten und somit stärker gefördert werden und zweitens wird der Sinn des gesetzlich verankerten Innovations-Bonus für Feststoffvergärungsanlagen hinterfragt. Anlagenbetreiber, welche kein Regenwasser oder keine Gülle einsetzen, werden für den produzierten Strom besser entgeltet. Der Grundgedanke der energetischen Nutzung von Hofdünger (Gülle und Mist) hat derzeit eine untergeordnete Rolle. Anlagen werden überbetrieblich für die Verwertung grosser Mengen an NaWaRo (vorwiegend Mais) gebaut.

Die heutigen Experten-Vorschläge für eine Änderung im Gesetz gehen in die Richtung, dass ein Bonus über die Effizienz (mindest. Raumbelastung, mindest. Abbaurate) der entsprechenden Anlagen definiert werden soll, unabhängig davon, ob es sich um eine Flüssig- oder Feststoffvergärungsanlage handelt.

³² <http://www.solarserver.de/solarmagazin/eeg.html>

18. Schlussfolgerung

In dieser Studie wurden Feststoffvergärungsanlagen untersucht. Auf dem heutigen Markt bestehen kontinuierliche Verfahren, die für den Bereich der Abfallentsorgung entwickelt wurden und heute auch auf die Nutzung von landwirtschaftlichen Erzeugnissen umfunktioniert werden (Dranco, Valorga, ISKA, Kompogas etc.). Die neu entwickelten diskontinuierlichen Verfahren sind speziell auf die Verarbeitung von fester, stapelbarer Biomasse ausgerichtet (Bekon, Bioferm, Chiemgauer-Fahrsilo etc.). Die Erfahrungen mit Anlagen der neuen Generation sind bis heute noch gering und eine abschliessende Schlussfolgerung aufgrund der Datenbasis gestaltet sich schwierig. Im Folgenden werden die wichtigsten Erkenntnisse dieser Studie zusammengefasst.

Schlussfolgerungen für Bauherren und Planer

Die Stromgestehungskosten der derzeitigen Feststoffvergärungsanlagen, für kontinuierliche und diskontinuierliche Verfahren, sind in der Regel höher als die der Flüssigvergärungsanlagen. Die Ursachen für die höheren Stromgestehungskosten sind unterschiedlich. Bei den meist in der Abfallentsorgung eingesetzten Feststoffvergärungsanlagen sind die Investitionskosten aufgrund der komplexen Verfahrenstechnik relativ hoch. Diskontinuierliche Feststoffvergärungsverfahren haben gegenüber der Flüssigvergärung vergleichbar hohe Investitionskosten. Sie weisen aber tendenziell noch geringere Gaserträge aus. Die Feststoffvergärungsverfahren werden in dieser Hinsicht weiter optimiert.

Die gesetzlichen Rahmenbedingungen in der Schweiz sehen keine spezielle Förderung für Feststoffvergärungsanlagen vor. Der Einsatz von organischen Feststoffen ist heute auch bei Flüssigvergärungsanlagen Stand der Technik. Aus heutiger Sicht sind daher die bekannten Flüssigvergärungsverfahren gegenüber der Feststoffvergärung in der Schweizer Landwirtschaft konkurrenzfähig.

Schlussfolgerungen für die Forschung

Verschiedene feste landwirtschaftliche Substrate können auch in Flüssigvergärungsanlagen mit heutiger Technik verwertet werden. Stroh, welches für die Verarbeitung in Flüssigvergärungsanlagen nicht geeignet ist, stellt ein zusätzliches Potential für Feststoffvergärungsanlagen dar. Der Aufschluss von Stroh zur Gewinnung von Biogas befindet sich im Entwicklungsstadium. Inwiefern die Vergärung von Stroh sinnvoll bzw. wirtschaftlich ist, könnte Gegenstand weiterer Abklärungen sein.

Die Prozessführung in diskontinuierlichen Feststoffvergärungsanlagen ist noch nicht vollkommen ausgereift. In Reaktoren mit Perkolationstechnik kann der optimale Abbau von stapelbarer Biomasse noch effizienter gestaltet werden. Untersuchungen im Bereich Perkolatverteilung im Zusammenhang mit mikrobiologischer Aktivität, Mischverhältnisse zwischen Frischmaterial und Impfmateriel etc. könnten zur Optimierung der Prozesse und damit zur verbesserten Wirtschaftlichkeit beisteuern.

Die ökologischen Auswirkungen von Feststoffvergärungsverfahren wurden bis anhin nicht untersucht. Ein Vergleich zu bekannten Flüssigvergärungsanlagen könnte in Zukunft eine wichtige Entscheidungsgrundlage liefern.

Schlussfolgerungen für die Politik

Die gesetzlichen Rahmenbedingungen in der Schweiz sind derzeit nicht mit jenen in Deutschland vergleichbar. Zudem unterscheiden sich die Betriebsstrukturen und -ausrichtungen in Deutschland von Schweizer Verhältnissen. Die Infrastruktur und die Grösse der Betriebe in Deutschland begünstigen den NaWaRo-Anbau und den Einsatz der Feststoffvergärung ohne Gülleeinsatz.

Wird die kostendeckende Einspeisevergütung nach deutschem Vorbild gestaltet, dass heisst wird in Zukunft für die Feststoffvergärung ein Technologiebonus vergütet, dann wird der Einsatz von Feststoffvergärungsanlagen auch in der Schweizer Landwirtschaft interessant werden.

Mit der Festlegung der Vergütungspreise wird daher Einfluss genommen, welche Substrate und welche Biogastechnologien in Zukunft in der Schweizer Landwirtschaft vermehrt eingesetzt werden.

Die Entwicklung in Deutschland hat jedoch gezeigt, dass die Förderung einzelner Verfahrenstypen nicht über das Inputmaterial oder die Prozessführung definiert werden sollte, sondern über die Abbau- oder Energieeffizienz des Verfahrens.

Referenzen

- [1] Angele H-C., Serafimova K.: **Rahmenbedingungen für die Energie aus Biomasse**, Umwelt Perspektiven, Dezember 2005
- [2] Bersega U. et al., **Biogas aus Festmist** - Entwicklung einer kontinuierlich betriebenen Biogasanlage zur Vergärung von strohreichtem Mist, Eidgenössische Forschungsanstalt für Agrarwirtschaft und Landtechnik (Agroscope FAT):, FAT-Bericht Nr. 451, 1994
- [3] Daniel J., **Stand der Trockenfermentation „Bioenergie Fachgespräche“**, Vortragsunterlagen, 6. November 2006, Merzig, Institut für Energetik und Umwelt GmbH
- [4] Dreher B., **Stellung der Trockenfermentation im Erneuerbare-Energie-Gesetz (EEG)**, Gülzower Fachgespräche, Band 24, 2006
- [5] Eder B, Schulz H.: **Biogas Praxis** – Grundlagen, Planung, Anlagenbau, Beispiele, Wirtschaftlichkeit, überarbeitete Auflage, 2006
- [6] Eidgenössische Forschungsanstalt für Agrarwirtschaft und Landtechnik (Agroscope FAT): **Vergärung organischer Reststoffe in landwirtschaftlichen Biogasanlagen**, FAT-Bericht Nr. 546, 2000
- [7] Eunomia, **Feasibility Study concerning Anaerobic Digestion in Northern Ireland**, Final report for Bryson House, A-RENA Network and NI2000
- [8] Fischer T., Krieg A.: **Zur Trockenfermentation in der Landwirtschaft**, Krieg & Fischer Ingenieure
- [9] Granstedt A., Thomsson O., Schneider T.: **Environmental Impact of Eco-Local Food Systems**, BERAS Work Package 2, Schlussbericht, 2005
- [10] Gronauer A., **Möglichkeiten und Grenzen des Batch-Verfahrens „Bioferm“**, Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft, Gülzower Fachgespräche, Band 23, 2004
- [11] Gubler N., **Erfolgsfaktoren von Biogasanlagen – ein europäischer Vergleich**, Diplomarbeit an der ETH Zürich, 2006
- [12] Haupt T., **Die Trockenfermentation zur Behandlung von organischen Abfallstoffen** – Potentiale einer zukunftsweisenden Technologie, Seminarunterlagen Bundesversammlung 2005 – Müllverwertung, Bauhaus-Universität Weimar, 2005
- [13] HAW Hamburg, **Forschungsbericht 2002 / 2003**
- [14] IEA Bioenergy: **Biogas and More**, Systems and Markets Overview of Anaerobic digestion, 2001
- [15] Kraft E.: **Trockenfermentation – Brücke zwischen Abfallbehandlung und Landwirtschaft**, Gülzower Fachgespräche, Band 23, 2002
- [16] Kusch S et al., **Neues von der Trockenfermentation**, Universität Hohenheim, Tagung „Bioenergienutzung in Baden-Württemberg – Auf dem Weg zum nachhaltigen Ausbau“, Stuttgart, 2006
- [17] Kusch S., Oescher H., **Kurzvorstellung – Forschungsprojekt zur Feststofffermentation spezieller Biomassen**, Universität Hohenheim, 2006
- [18] Landtechnischer Verein in Bayern e. V (LTV): **Wissenschaftliche Begleitung einer Pilotanlage zur Feststoffvergärung von landwirtschaftlichen Gütern**, Abschlussbericht zum Forschungsvorhaben, 2004
- [19] Linke B. et al., **Ergebnisse aus den wissenschaftlichen Begleitungen der Pilotanlagen Pirow und Clausnitz**, Gülzower Fachgespräche, Band 24, 2006
- [20] Linke B. et al., **Grundlagen, Verfahren und Potential der Biogasgewinnung im Land Brandenburg**, Leitfaden Biogas 2003
- [21] Looock-TNS, **Looock-TNS-Verfahren**, Biogasanlage Pirow, Leitprojekt für die Landwirtschaft Brandenburg, Zwischenergebnisse des Messprogramms, Präsentationsunterlagen Fachtagung Biogas in Erfurt, 2005
- [22] Membrez Y. et al., **Bilan énergétique de la fromagerie et avant-projet d' installation de biogaz: Richard Bettex**, Schlussbericht, 2002, BFE-Projekt-Nr. 42300
- [23] Muggli R.: **Biogasanlagen in der Landwirtschaft** – Bewilligungsfähigkeit nach geltendem Raumplanungsrecht, Bericht gemäss Zwischenstand, 2004, BFE-Projekt
- [24] Oettli B. et al.: **Potentiale zur energetischen Nutzung von Biomasse in der Schweiz**, 2004, BFE-Projekt
- [25] Ostram, Karena: **Greening Waste: Anaerobic Digestion for Treating the Organic Fraction of Municipal Solid Waste**, Columbia University, 2004
- [26] RIS International Ltd: **Feasibility of Generating Green Power through Anaerobic Digestion of Garden Refuse from the Sacramento Area**, Final report 2005
- [27] Sächsische Landesanstalt für Landwirtschaft, **Trockenfermentation im Siloschlauch**, „Demonstration und Entwicklung des Verfahrens der Trockenfermentation im Siloschlauch zur Nutzung in der landwirtschaftlichen Praxis“, 2005
- [28] Schäfer W. et al., **Dry anaerobic digestion of organic residues on-farm – a feasibility study**, MTT Agrifood Research Finland, 2006
- [29] Schäfer W., Every L.: **Nutrient balance of two-phase solid manure biogas plant**, Agricultural Engineering Research (VAKOLA) MTT Agrifood Research, Finland and Biodynamic Research Institute, Schweden, PowerPoint Präsentation, 2005
- [30] Schober G., Wellinger A., Widmer C.: **Bau und Betrieb einer Perkulationsanlage im Pilotmassstab zur Aufbereitung von Bioabfällen**, Schlussbericht, 2004, BFE-Projekt-Nr. 38714
- [31] Scholwin F. et al., **Potenziale, ökonomische und ökologische Beurteilung der Feststoffvergärung**, Institut für Energetik und Umwelt GmbH, Gülzower Fachgespräche, Band 24, 2006

- [32] Schüsseler P.: **Stand der Förderarbeit der FNR zum Thema Trockenfermentation**, Gülzower Fachgespräche, Band 24, 2006
- [33] Schütte A., **Vorwort**, Gülzower Fachgespräche, Band 24, 2006
- [34] Top agrar, **Biogas – Strom aus Gülle und Biomasse**, Landwirtschaftsverlag GmbH, 2002
- [35] Vandevivere P., **Types of anaerobic digesters for solid wastes**, Jahrgang unbekannt, internet: www.ees.adelaide.edu.au/pharris/biogas/pvdiv.pdf,
- [36] Weiland P., **Stand der Technik bei der Trockenfermentation – Aktuelle Entwicklungen**, Gülzower Fachgespräche, Band 24, 2006
- [37] Weiland P., **Stand der Technik bei der Festmistvergärung und der Trockenfermentation**, Präsentationsunterlagen KTBL „Biogaserzeugung im ökologischen Landbau“ Braunschweig, 2006
- [38] Weiland P., **Stand der Technik bei der Trockenfermentation – Zukunftsperspektiven**, Gülzower Fachgespräche, Band 23, 2004
- [39] Wellinger et al., **Biogas Handbuch** – Grundlagen –Betrieb landwirtschaftlicher Biogasanlagen, 1991
- [40] Wilfert R. et al., **Bedeutung der Trockenfermentation zur Stromerzeugung –Analyse relevanter Stoffströme – Potenzialabschätzung**; Gülzower Fachgespräche, Band 23, 2004
- [41] Wittmaier M. et al.: **Trockenfermentation versus Nassfermentation**, Anaerobe biologische Abfallbehandlung – Entwicklung, Nutzen und Risiken der Biogastechnologie. TU Dresden, Eingenv Verlag des Forums für Abfallwirtschaft und Altlasten e.V., 2006