nachwachsende-rohstoffe.de

Gülzower Fachgespräche

Band 24

Trockenfermentation — Stand der Entwicklungen und weiterer F+E-Bedarf



Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR)

Hofplatz 1 • 18276 Gülzow Tel.: 0 38 43 / 69 30 - 0 Fax: 0 38 43 / 69 30 - 1 02 info@fnr.de • www.fnr.de

Gefördert durch das Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz

Gedruckt auf Papier aus Durchforstungsholz mit Farben auf Leinölbasis







Trockenfermentation – Stand der Entwicklungen und weiterer F+E-Bedarf

4./5. Februar 2006 in Gülzow

Herausgegeben von der Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. (FNR), Hofplatz 1, 18276 Gülzow mit Förderung des Bundesministeriums für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz.

Herausgeber:

Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. Hofplatz 1 18276 Gülzow

Tel.: (0 38 43) 69 30- 0 Fax: (0 38 43) 69 30-102

E-Mail: info@fnr.de Internet: http://www.fnr.de

Redaktion:

Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. Abt. Öffentlichkeitsarbeit

Gestaltung und Produktion:

tangram documents, Bentwisch

Alle Rechte vorbehalten.

Kein Teil dieses Werkes darf ohne schriftliche Einwilligung des Herausgebers in irgendeiner Form reproduziert oder unter Verwendung elektronischer Systeme verarbeitet, vervielfältigt, verbreitet oder archiviert werden.

Inhalt

A. Schütte
Stand der Förderarbeit der FNR zum Thema Trockenfermentation 8 P. Schüsseler
Stellung der Trockenfermentation im Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG)
Stand der Technik bei der Trockenfermentation – Aktuelle Entwicklungen
Potenzialabschätzung, ökologische und ökonomische Beurteilung der Feststoffvergärung
Laborversuche zur Trockenfermentation – Erste Ergebnisse
Ausgewählte Ergebnisse zur Vergärung von Feststoffen in berieselten Boxenfermentern mit Batch-Betrieb
Ergebnisse zum Einfluss physikalischer Feststoffparameter auf die Trockenfermentation von nachwachsenden Rohstoffen

Erste Ergebnisse zur kontinuierlichen Trockenfermentation im Labormaßstab95 GR. Vollmer
Möglichkeiten und Grenzen des Batch-Verfahrens "Bioferm" 103 A. Gronauer
Ergebnisse aus den wissenschaftlichen Begleitungen der Pilotanlagen Pirow und Clausnitz112 B. Linke, M. Heiermann, J. Mumme
Ergebnisse der Diskussion und Zusammenfassung
Teilnehmerliste

Vorwort

A. Schütte Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR), Gülzow

Im Februar 2004 führte die Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR) ein erstes Fachgespräch zum Thema "Trockenfermentation – Evaluierung des Forschungs- und Entwicklungsbedarfs" durch. Im Fokus der Präsentationen und Diskussionen von Experten aus Forschung, Wirtschaft und Verwaltung standen damals die zumeist noch in der Entwicklungsbzw. Erprobungsphase stehenden Batchverfahren, mit denen stapelbare Substrate wie Festmist und Energiepflanzen zu Biogas umgesetzt werden können. Kontinuierliche Verfahrenstechniken aus der Abfallwirtschaft wurden damals als zu kostenintensiv und nicht auf die Bedürfnisse der Landwirtschaft adaptierbar eingestuft.

Im Ergebnis der Expertendiskussion konnten damals sehr detaillierte Forschungs- und Entwicklungsaufgaben identifiziert werden, die die FNR als Projektträger des Bundesministeriums für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz (BMELV) veranlasste, die Trockenfermentation als Förderschwerpunkt im Rahmen des Förderprogramms "Nachwachsende Rohstoffe" aufzunehmen. Der gemeinsam erarbeitete Forschungsbedarf wurde zusammen mit den Vortragsmanuskripten im Rahmen der Schriftenreihe Gülzower Fachgespräche unter dem Titel: Trockenfermentation – Evaluierung des FuE-Bedarfs, Band 23, veröffentlicht.

Mit Novellierung des Erneuerbare-Energien-Gesetzes (EEG) im August 2004 und den darin vorgesehenen Vergütungssätzen für den Einsatz von nachwachsenden Rohstoffen und der, unter innovativen Technologien aufgeführten, Trockenfermentation stieg das Interesse der Landwirte und damit auch der Anlagenhersteller und -planer sowie der Berater an geeigneten Technologien zur Vergärung nachwachsender Rohstoffe deutlich an.

Das Hauptziel des aktuellen Fachgesprächs lag darin, die ersten Ergebnisse der Förderprojekte, die im Wesentlichen im Anschluss an das Gespräch 2004 in die Förderung aufgenommen wurden, vorzustellen und gemeinsam mit Experten aus der Wissenschaft und Entscheidungsträgern der Verwaltung den möglicherweise vorhandenen weiteren Forschungsbzw. Handlungsbedarf zu identifizieren. Bereits zu Beginn des Gesprächs wurde von den Gesprächsteilnehmern auf die Notwendigkeit einer Präzisierung des Begriffs der Trockenfermentation in Bezug auf die Bonusregelung gemäß EEG hingewiesen. In der Biogaspraxis besteht derzeit eine große Unsicherheit, was unter diesem Begriff zu verstehen ist, da das EEG hier keine präzise Begriffdefinition vornimmt. In der amtlichen Begründung zum EEG heißt es "Bei Trockenfermentationsverfahren werden im Gegensatz zu Nassvergärungsverfahren keine pumpfähigen sondern stapelbare Substrate eingesetzt. Die eingesetzten organischen Stoffe haben dabei i.d.R. einen Wassergehalt von unter 70 %". Da inzwischen derartige Substrate auch mit konventionellen Verfahrenstechniken der Nassfermentation (z. B. Monovergärung Maisilage) verwertet werden können, wird die Formulierung von den Experten als nicht ausreichend zur Abgrenzung von Trocken- und Nassvergärungsverfahren eingestuft.

Nach Auswertung der im Rahmen des Fachgesprächs geführten Diskussionen um den Begriff "Trockenfermentation" stellt die FNR fest, dass eine wissenschaftlich begründbare eindeutige Abgrenzung von kontinuierlichen Trocken- und Nassvergärungsverfahren nicht möglich ist.

Da letztlich die Förderung "...innovativer, besonders energieeffizienter und damit umwelt- und klimaschonender Anlagentechnik" die Zielsetzung des Innovations- oder Technologiebonusses ist, ist aus Sicht der FNR eine Überprüfung der Wirksamkeit des umstrittenen Begriffs "Trockenfermentation" in der Liste der bonusfähigen Technologien dringend geboten. Alternativ empfiehlt die FNR im Zuge der geplanten Überprüfung des EEG geeignete Kriterien zur Feststellung der Förderwürdigkeit im Sinne der amtlichen Begründung zum Innovationsbonus zu entwickeln. Die Vergütung von energieeffizienten Anlagen mit einem hohen Wirkungsgrad und niedrigen Schadstoffwerten könnte dann gleichsam Trockenund Nassfermentationsverfahren treffen, so sie denn die entsprechenden "Effizienzkriterien" erfüllen.

Insgesamt werden die ersten Ergebnisse der laufenden Untersuchungen überwiegend zur Trockenfermentation im Batchverfahren als äußerst interessant und wertvoll für die weitere Entwicklung dieser Verfahrens-

variante eingestuft. In den Diskussionen zu den Präsentationen und in der Abschlussdebatte wurde festgestellt, dass der im Nachgang zum ersten Fachgespräch formulierte F+E-Bedarf größtenteils planmäßig durch die aktuellen Forschungsprojekte erarbeitet wird. Es konnte darüber hinaus weiterer F+E-Bedarf identifiziert werden, speziell in den Bereichen Substrataufbereitung, Animpfstrategien und Prozessführung. Wie auch im ersten Fachgespräch zur Trockenfermentation konnte durch die gezielte Referentenauswahl ein fachdisziplinübergreifender Informationsaustausch stattfinden.

Den Referenten und Teilnehmern des Fachgesprächs danke ich für ihre engagierten Präsentationen und die aktive Gestaltung der anschließenden Diskussionen. Die FNR wird die Anregungen für die praxisnahe Ausrichtung weiterer Aktivitäten, insbesondere zur zielorientierten Umsetzung des Förderprogramms "Nachwachsende Rohstoffe" des BMELV, nutzen.

Anschrift des Autors: Dr.-Ing. Andreas Schütte Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR) Geschäftsführer Hofplatz 1 18276 Gülzow info@fnr.de

Stand der Förderarbeit der FNR zum Thema Trockenfermentation

P. Schüsseler Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR), Gülzow

Einleitung

Im Februar 2004 führte die Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. (FNR) ein erstes Fachgespräch mit Experten aus Forschung, Wirtschaft und Verwaltung zum Thema "Trockenfermentation - Evaluierung des Forschungs- und Entwicklungsbedarfs" durch. Entlang der Verfahrenskette, d.h. von der Substratbereitstellung über die verfügbare Verfahrenstechnik bis zur Gärrestverwertung zeigten die Referenten den Status quo auf und stellten ihre Sichtweise zum F+E-Bedarf vor. Im Ergebnis der gemeinsamen Diskussion konnten sehr detaillierte Forschungs- und Entwicklungsaufgaben identifiziert werden, die die FNR als Projektträger des Bundesministeriums für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz (BMELV) veranlasste, die Trockenfermentation als Förderschwerpunkt im Rahmen des Förderprogramms "Nachwachsende Rohstoffe" aufzunehmen. Die im Anschluss initiierten Projekte befassen sich mit verschiedenen Aspekten der Trockenfermentation und reichen von Laborversuchen bis zur wissenschaftlichen Begleitung von Pilotanlagen. Das zweite Fachgespräch in 2006 diente dazu, die ersten Ergebnisse aus diesen Projekten vorzustellen, gemeinsam mit anderen Experten zu diskutieren und den möglichen weiteren F+E-Bedarf herauszuarbeiten.

F+E-Bedarf nach Fachgespräch 2004

Die Tabelle 1 zeigt eine Zusammenstellung des im Fachgespräch 2004 identifizierten Forschungs- und Entwicklungsbedarfs im Bereich der Trockenfermentation.

Zum Zeitpunkt des Gesprächs war die sogenannte Nassvergärung von Gülle mit verschiedenen Kosubstraten Stand der Technik in der landwirtschaftlichen Biogaserzeugung. In der Trockenfermentation, und damals dachte man in der Landwirtschaft überwiegend an diskontinuierliche Verfahren (Batchverfahren), wurde eine Technologie gesehen, mit der stapelbare, nicht pumpfähige Substrate mit einem hohen Trockensubstanzgehalt (wie z. B. Festmist, Landschaftspflegematerial, Stroh, Mais- und Getreidesilagen) mit vergleichbar einfacher Technik und damit kostengünstig zu Biogas umgesetzt werden kann. Ein Anwendungspotenzial für diese Verfahrenstechnik wurde vor allem bei landwirtschaftlichen Betrieben ohne Tierhaltung, bei Betrieben mit Tierhaltung nach Grundsätzen des ökologischen Landbaus, Betrieben mit Tierhaltung in Festmistwirtschaft und bei Betrieben mit Verwertung von Landschaftspflegematerial und Straßenbegleitgrün gesehen.

Der Begriff Trockenfermentation wurde schon damals als irreführend eingestuft, da für den eigentlichen Vergärungsprozess, wie bei der Nassfermentation, ein "feuchtes" Milieu notwendig ist. Eine vertiefte Diskussion über die Begrifflichkeiten, Trocken- bzw. Nassfermentation, wurde im Rahmen des ersten Fachgesprächs jedoch nicht geführt, zumal diese Begriffe bereits seit vielen Jahren in der Abfallwirtschaft in der Anwendung waren. Die aus der Bioabfallverwertung bekannten kontinuierlichen Verfahren der Trockenfermentation (z. B. Anacom, Dranco, Kompogas, Valorga, ATF) wurden in der Expertendiskussion Anfang 2004 aufgrund ihres hohen verfahrenstechnischen Aufwandes als zu teuer und damit unwirtschaftlich für die Vergärung von landwirtschaftlichen Substraten eingestuft.

Entsprechend zielte der im Gespräch identifizierte F+E-Bedarf vorrangig auf die Weiterentwicklung der Batchverfahren sowohl in Labor- als auch Praxisversuchen, möglicherweise in Kombination mit der konventionellen Nassfermentation.

Tabelle 1: F+E Bedarf bei der Trockenfermentation /1/

Parameter	F+E-Bedarf	
Potenziale	 Ermittlung des Substratpotenzials Ermittlung des Nachfragepotenzials auf Anwenderseite 	
Substrat	 Gärverhalten einzelner Substrate (u. a. Gasertrag und -qualität) Ermittlung optimaler Substratmischungen Berücksichtigung physikalischer Anforderungen, Eigenschaften (Verfügbarkeiten, Durchströmungsverhalten, Verschlämmung, Lagereigenschaften, Silierung) Animpfproblematik (z.B. optimale Rückführmengen) Berücksichtigung ökologischer Gesichtspunkte (Standorte, Fruchtfolge, Krankheitserreger) 	
Technik/Verfahren	 Darstellung möglicher Technologien F+E-Bedarf im Anlagenbau u. a. Entwicklung kostengünstiger Anlagen, Steigerung der Gasausbeute, Erhöhung der Betriebssicherheit Weiterentwicklung der Batchverfahren Entwicklung Kombiverfahren Nass-/Trockenfermentation (z. B. Anstauverfahren) Entwicklung geeigneter Messtechnik Ermittlung belastbaren Datenmaterials Optimierungsbedarf bei der Prozesssteuerung (Raum-Zeit-Ausbeute) Wirtschaftliche und ökologische Bewertung der Verfahren; Berücksichtigung der gesamten Prozesskette (u. a. Arbeitsaufwand, Klimaschutzaspekte) 	
Gärrückstände	 Charakterisierung der Gärrückstände Ermittlung der Absatzmöglichkeiten als Substratkomponente (rechtliche Rahmenbedingungen) 	

Förderaktivitäten der FNR zum Thema Trockenfermentation

Das Förderprogramm "Nachwachsende Rohstoffe" des Bundesministeriums für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz (BMELV), stellt gemäß Haushaltsplan 2006 insgesamt 53,6 Mio. € zur Förderung von Forschungs-, Entwicklungs- und Demonstrationsvorhaben im Bereich der stofflichen und energetischen Nutzung von nachwachsenden Rohstoffen zur Verfügung. Für den Bereich Forschung und Entwicklung sind 27 Mio. €, für das Markteinführungsprogramm 26,6 Mio. € vorgesehen.

Derzeit werden im Bereich Biogas durch den Projektträger FNR 57 Projekte mit einer Fördersumme von 15,3 Mio. € gefördert. In der Zielsetzung befassen sich diese Projekte mit den im o.g. Förderprogramm formulierten Forschungs- und Entwicklungsaufgaben:

- Bewertung der Eignung verschiedener pflanzlicher und tierischer Biomassen hinsichtlich Vergärbarkeit und Nutzung der Reststoffe,
- Effizienzsteigerung von Biogasanlagen,
- Verbesserung der Gasqualität,
- Entwicklung und Verbesserung der Nutzung von Biogas in stationären Brennstoffzellensystemen,
- Systemanalytische Begleitforschung.

Weitere 15 Projekte mit einer Fördersumme von insgesamt 4,5 Mio. € konnten im Bereich Biogas bereits abgeschlossen werden. Nähere Informationen zu den o.g. Projekten sind in der Projektdatenbank auf der Homepage der FNR eingestellt (www.fnr.de).

Im Themenbereich der Trockenfermentation werden bzw. wurden 7 Projekte finanziell über das Förderprogramm des BMELV unterstützt, davon 5 laufende und 2 abgeschlossene Projekte (siehe Tabelle 2). Die Fördersumme liegt bei insgesamt 1 Mio. €, davon 0,7 Mio. € für die laufenden und 0,3 Mio. € für die abgeschlossenen Projekte. Die Vorhaben wurden bis auf eines im Nachgang zum ersten Fachgespräch Trockenfermentation im Februar 2004 in die Förderung aufgenommen. Sowohl bei der Formulierung der Projektinhalte durch die Antragsteller als auch bei der Bewertung der Relevanz der vorgelegten Projektideen durch die FNR fand der im ersten Fachgespräch formulierte F+E-Bedarf Berücksichtigung.

Im Rahmen der Fortführung des Bundesmessprogramms unter Federführung der Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft (FAL) werden zur Bewertung neuartiger Biomasse-Biogasanlagen planmäßig sowohl

Nass- als auch verschiedene Trockenfermentationsanlagen messtechnisch begleitet (FKZ: 22003405, Laufzeit: 1.10.2005-30.9.2008).

Tabelle 2: Förderprojekte zum Thema Trockenfermentation (Stand Februar 2006)

FKZ	Thema	Ausführende Stelle	Laufzeit		
Abgeschlossene Projekte					
22004702	Pilotanlage mit Wannenreak- toren zur Biogasgewinnung aus organischen Feststoffen	Agrargenossenschaft Bergland Claus- nitz e. G., Clausnitz	01.09.03 - 31.10.04		
22002504	Wissenschaftliche Begleitung "Regenerative Energieerzeu- gung auf Landwirtschafts- betrieben durch die effiziente Nutzung nachwachsender Roh- stoffe und biogener Reststoffe in einer nachhaltigen Kreislauf- wirtschaft für Biomasse"	Leibniz - Institut für Agrartechnik Bornim e. V. (ATB), Potsdam	01.10.04 - 31.12.05		
Laufende Projekte					
22011701	Biogaserzeugung durch Trockenvergärung von organischen Rückständen, Nebenprodukten und Abfällen aus der Landwirtschaft	Universität Rostock – Fakultät für Maschi- nenbau und Schiffs- technik – Lehrstuhl für Verfahrenstechnik und Biotechnologie	01.10.04 - 30.06.06		
22004803	Wissenschaftliche Begleitung – Pilotanlage mit Wannenreak- toren zur Biogasgewinnung aus organischen Feststoffen	Leibniz - Institut für Agrartechnik Bornim e.V. (ATB), Potsdam	01.04.04 - 30.11.06		
22004804	Trockenfermentation von nach- wachsenden Rohstoffen als Grundlage für die Bemessung von Biogasanlagen	BTN Biotechnologie Nordhausen GmbH	01.01.05 - 31.12.06		

Tabelle 2: Förderprojekte zum Thema Trockenfermentation (Forts.) (Stand Februar 2006)

FKZ	Thema	Ausführende Stelle	Laufzeit			
Laufende Projekte						
22004904	Verbundprojekt: Einfluss physi- kalischer Feststoffparameter auf die Trockenvergärung von nachwachsenden Rohstoffen, Teilvorhaben 1	Bauhaus-Universität Weimar - Fakultät Bauingenieurwesen – Juniorprofessur Bio- technologie in der Abfallwirtschaft	01.03.05 - 28.02.07			
22001205	Verbundprojekt: Einfluss physi- kalischer Feststoffparameter auf die Trockenvergärung von nachwachsenden Rohstoffen, Teilvorhaben 2	S. I. G DRING. STEFFEN GmbH in Mecklenburg-Vorpom- mern, Lühburg	01.03.05 - 28.02.07			

Zielsetzung des Fachgesprächs 2006

Das Hauptziel des aktuellen Fachgesprächs am 4./5.2.2006 lag darin, einen Einblick in den Stand der verschiedenen Förderprojekte der FNR zum Thema Trockenfermentation zu erhalten. Darüber hinaus sollten die Ergebnisse aus Forschungsprojekten anderer Mittelgeber sowie die Entwicklungen in der landwirtschaftlichen Praxis seit dem ersten Fachgespräch in die gemeinsame Ergebnisdiskussion einfließen. Insbesondere sollten aktuelle Fragestellung zu den Einsatzmöglichkeiten der Trockenfermentation für bestimmte Substrate (z.B. Monovergärung von Landschaftspflegematerial und Grasschnitt), zur Betriebssicherheit und zur Wirtschaftlichkeit dieser Verfahrenstechnik mit den teilnehmenden Wissenschaftlern und Vertretern der Verbände diskutiert werden. Mit Hilfe der Expertenmeinung sollte der möglicherweise vorhandene weitere Handlungsbedarf im Bereich Forschung und Entwicklung identifiziert werden. Auch die Veröffentlichung der ersten Projektergebnisse im Rahmen der Schriftenreihe "Gülzower Fachgespräche" gehörte zu den Zielen des Gesprächs, um so für interessierte Landwirte, Berater und Anlagenhersteller eine fundierte und aktuelle Informationsschrift zum Thema Trockenfermentation bereitzustellen. Der Tagungsband zum ersten Gülzower Fachgespräch zum Thema "Trockenfermentation – Evaluierung des Forschungs- und Entwicklungsbedarfs", Band 23, der mit einer Auflage von 2.000 Stück gedruckt wurde, ist inzwischen vergriffen, steht dem Interessierten jedoch weiterhin als Download im Internet zur Verfügung.

Die an die Bioenergieberatung der FNR gerichteten Anfragen zum Thema Trockenfermentation zeigen das große Interesse der Landwirtschaft an dieser Verfahrensweise, das sehr maßgeblich durch den im novellierten EEG festgelegten Technologiebonus begründet ist.

Literaturverzeichnis

/1/ Schüsseler, P., Daebeler S. (2004): Ergebnisse der Diskussion und Zusammenfassung. In: Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. (FNR) (Hrsg.): Gülzower Fachgespräche "Trockenfermentation – Evaluierung des Forschungs- und Entwicklungsbedarfs". Band 23, Eigenverlag, S. 114-117.

Anschrift der Autorin: Dr. Petra Schüsseler Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. (FNR) Hofplatz 1 18276 Gülzow p.schuesseler@fnr.de

Stellung der Trockenfermentation im Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG)

Dr. Bernhard Dreher Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit

Einleitung

Das Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG) ist am 1. April 2000 in Kraft getreten. Ziel des Gesetzes ist es laut § 1, den Beitrag erneuerbarer Energien an der Stromversorgung deutlich zu erhöhen. Bereits im EEG 2000 ist das Ziel einer Verdopplung des Anteils erneuerbarer Energien an der Stromversorgung bis 2010 verankert. Das EEG hat sich seitdem als ein überaus erfolgreiches Klimaschutz- und Markteinführungsinstrument erwiesen. Entscheidend für den Erfolg war, dass das EEG eine gesetzlich festgelegte Mindestvergütung für in das Stromnetz eingespeiste Elektrizität aus erneuerbaren Energien garantiert. Dadurch schafft es Investitionssicherheit für Anlagenbetreiber und -hersteller.

Da der Grad der Marktdurchdringung und die technologische Entwicklung bei Anlagen zur Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien einem steten Wandel unterliegen, ist es erforderlich, diese Prozesse zeitnah zu verfolgen, um ggf. erforderliche Anpassungen im EEG vornehmen zu können. Der Erfahrungsbericht der Bundesregierung zum EEG hat bereits 2002 die Erfolge des EEG dokumentiert aber auch Hinweise zum Änderungsbedarf in einzelnen Bereichen gegeben. Mit der Gesetzesnovelle 2004 /1/ erfolgte dann eine Anpassung an die veränderten Gegebenheiten bei der Markteinführung der Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien.

Der Zweck des Gesetzes (§ 1 EEG)

Bei der Novellierung 2004 wurden die Zwecke des EEG weiter gefasst und zugleich konkreter formuliert. Nach Paragraph 1 Abs. 1 EEG 2004 ist Zweck des Gesetzes, insbesondere im Interesse des Klima-, Natur- und Umweltschutzes

- eine nachhaltige Entwicklung der Energieversorgung zu ermöglichen,
- die volkswirtschaftlichen Kosten der Energieversorgung auch durch die Einbeziehung langfristiger externer Effekte zu verringern,
- Natur und Umwelt zu schützen,
- einen Beitrag zur Verminderung von Konflikten um fossile Energieressourcen zu leisten und
- die Weiterentwicklung von Technologien zur Erzeugung von Strom aus erneuerbaren Energien zu fördern.

Zweck des EEG ist ferner, dazu beizutragen, den Anteil Erneuerbarer Energien an der Stromversorgung bis zum Jahr 2010 auf mindestens 12,5 % und bis zum Jahr 2020 auf mindestens 20 Prozent zu erhöhen.

Um diesen Zweck zu erreichen, wurde im Rahmen der EEG-Novelle 2004 eine Reihe von Neuerungen eingeführt. Kein Bereich der Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien war dabei ähnlich von Änderungen betroffen wie die Stromerzeugung aus Biomasse.

Stromerzeugung aus Biomasse im EEG 2004

Änderung betreffen insbesondere die Vergütungsregelungen für Strom aus Biomasse (§ 8 EEG). Die im EEG enthaltenen Vergütungssätze wurden mit Hilfe umfangreicher wissenschaftlicher Studien nach der Maßgabe ermittelt, dass damit bei fortgeschrittenem Stand der Technik und rationeller Betriebsführung sowie unter dem geografisch vorgegebenen natürlichen Energiedargebot erneuerbarer Quellen grundsätzlich ein wirtschaftlicher Betrieb der Anlagen möglich ist. Eine Garantie für eine auf jede Anlage bezogene Kostendeckung ist damit jedoch nicht verbunden.

Die gegenüber dem EEG 2000 deutlich weiterentwickelten Vergütungsregelungen für Strom aus Biomasse verfolgen das Ziel, die Vergütungen den realen Marktbedingungen besser anzupassen und vorhandene, aber bisher unerschlossene Biomassepotenziale für die Stromerzeugung zu er-

schließen. Die weiterentwickelten – und damit auch komplizierteren – Vergütungsregelungen waren auch erforderlich, um Mitnahmeeffekte zu vermeiden. So soll die neu eingeführte Vergütungsstufe für den Leistungsbereich bis 150 Kilowatt, den relativ höheren spezifischen Kosten kleiner Anlagen Rechnung tragen, die nach der alten Vergütungsregelung nur unzureichend berücksichtigt waren.

Auch die Einführung des sog. Nawaro-Bonus (erhöhte Mindestvergütung bei ausschließlichem Einsatz nachwachsender Rohstoffe nach § 8 Abs. 2) für die unteren drei Leistungsbereiche resultierte aus den Erfahrungen mit dem EEG 2000, nach denen ein wirtschaftlicher Betrieb von kleineren Anlagen in der Regel nicht erreicht werden konnte, wenn ausschließlich rein pflanzliche Stoffe aus Landwirtschaft und Gartenbau, Gülle oder Waldrestholz eingesetzt wurden. Die Vergütungsregungen des EEG 2000 trugen nämlich der Tatsache, dass derartige Stoffe gegenüber Biomasse aus Abfällen ungleich teurer sind, nicht Rechnung. Das große Nutzungspotenzial land- und forstwirtschaftlicher Herkunft blieb deshalb ohne ein zusätzliches Anreizinstrument für die Stromerzeugung aus Biomasse unerschlossen. Um die unterschiedlichen Kostenstrukturen zu berücksichtigen und um Mitnahmeeffekte zu vermeiden wurde die Höhe des Nawaro-Bonus nach der Anlagengröße gestaffelt und eine Sonderregelung für Anlagen mit einer Leistung über 500 Kilowatt in den Holz verbrannt wird eingeführt. Der Gesetzgeber hat großen Wert auf die Unterscheidung von Rest- und Abfallprodukten von nachwachsenden Rohstoffen, die ausschließlich zur Energiegewinnung geerntet oder anderweitig beschafft wurden, gelegt und deshalb die Erfüllung anspruchsvoller Anforderungen hinsichtlich Herkunftsbereich, Bearbeitung/Konservierung/Veränderung und Anlagenbetrieb zur Voraussetzung für den Anspruch auf den Nawaro-Bonus gemacht. Diese Unterscheidung rechtfertigt sich, darauf weist die amtliche Begründung des EEG ausdrücklich hin, mit den unterschiedlichen Kosten für Rest- und Abfallstoffe einerseits und nachwachsenden Rohstoffen andererseits /2/.

Auch für die bei der Stromerzeugung aus Biomasse bisher oft vernachlässigte Wärmenutzung wurde mit der EEG-Novelle 2004 ein neues Anreizinstrument geschaffen. Nach § 8 Abs. 3 besteht für den Anteil des ins Netz eingespeisten Stroms, der als KWK-Strom gilt, Anspruch auf eine um 2 Cent pro Kilowattstunde erhöhte Mindestvergütung.

Ein weiteres zusätzliches Anreizinstrument wurde mit dem in § 8 Abs. 4 verankerten Technologie-Bonus geschaffen. Damit soll dem Interesse Rechnung getragen werden, einen spezifischen Anreiz zum Einsatz

- innovativer,
- besonders energieeffizienter und damit
- umwelt- und klimaschonender Anlagentechnik

zu setzen, deren Anwendung regelmäßig mit höheren Investitionskosten verbunden ist. Der Gesetzgeber hat unter Berücksichtigung der o.g. Kriterien abschließend Verfahren und Techniken bestimmt, bei deren Einsatz zur Stromerzeugung aus Biomasse Anspruch auf eine um 2 Cent pro Kilowattstunde erhöhte Mindestvergütung für den ins Netz eingespeisten Strom besteht. Bei den begünstigten Techniken und Verfahren handelt es sich um:

- die thermochemische Vergasung,
- Trockenfermentation
- Aufbereitung des zur Stromerzeugung eingesetzten Gases auf Erdgasqualität
- Stromerzeugung durch Brennstoffzellen
- Gasturbinen,
- Dampfmotoren,
- Organic-Rankine-Anlagen (ORC-Anlagen),
- Mehrstoffgemischanlagen insbesondere Kalina-Cycle-Anlagen oder
- Stirling-Motoren.

Anspruch auf den Technologie-Bonus besteht allerdings nur, wenn die Stromerzeugungsanlage in Kraft-Wärme-Kopplung betrieben wird. Zum Zwecke der Anpassung an die Entwicklung des Standes der Technik bei der Stromerzeugung aus Biomasse ist das Bundesumweltministerium ermächtigt, im Einvernehmen mit dem Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz und dem Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie durch eine Rechtverordnung weitere Verfahren und Techniken in den Anwendungsbereich des Technologie-Bonus aufzunehmen oder einzelne in § 8 Abs. 4 genannte Verfahren und Techniken davon auszunehmen. Das Bundesumweltministerium hat von dieser Ermächtigung bisher nicht Gebrauch gemacht.

Privatrechtlicher Charakter der Vergütungsregelung des EEG

Das erneuerbare-Energien-Gesetz begründet, soweit es die Vergütungsregelungen betrifft, ein privatrechtliches Verhältnis zwischen dem Betreiber der Stromerzeugungsanlage und dem Betreiber des Netzes der öffentlichen Stromversorgung am Standort der Anlage. Ein behördlicher Vollzug ist nicht vorgesehen, dafür besteht auch keine Rechtsgrundlage im EEG. Sollte es also zu Streitigkeiten zwischen dem Anlagenbetreiber und dem Netzbetreiber um die Auslegung des EEG kommen, so sind diese Fragen verbindlich nur von den zuständigen Gerichten zu klären.

Bedingt durch die Komplexität der Vergütungsregelung für Strom aus Biomasse und der Vielfalt der technischen Möglichkeiten zur Stromerzeugung aus Biomasse hat sich in der Praxis des EEG eine ganze Reihe von Zweifelsfragen ergeben. Rechtskräftige Gerichtsurteile, die diese Zweifelsfragen klären könnten, sind in der Regel bisher nicht ergangen. Zweifelsfragen haben sich insbesondere zu den Tatbestandsvoraussetzungen für den Anspruch auf Nawaro-Bonus und Technologie-Bonus ergeben. Eine Übersicht dazu gibt der 2. Zwischenbericht des BMU-Projektes "Monitoring zur Wirkung der novellierten erneuerbare-Energiengesetzes auf die Entwicklung der Stromerzeugung aus Biomasse" /3/.

Trockenfermentation im Sinne von § 8 Abs. 4 EEG

Da das Verfahren der Trockenfermentation durch den Technologie-Bonus begünstigt wird, stellt sich die Frage nach der Begriffsbestimmung. Das EEG selbst enthält keine Bestimmung des Begriffs Trockenfermentation. Die amtlichen Begründung zum EEG /2/ führt zu § 8 Abs. 4 aus: "Bei Trockenfermentationsverfahren werden im Gegensatz zu Nassvergärungsverfahren keine pumpfähigen sondern stapelbare Substrate eingesetzt. Die eingesetzten organischen Stoffe haben dabei in der Regel einen Wassergehalt von unter 70 Prozent."

Ein Blick in die vor der Novellierung des EEG veröffentlichte Fachliteratur zu Biogasverfahren ergibt ein uneinheitliches Bild hinsichtlich der Begriffsbestimmung "Trockenfermentationsverfahren". Es werden verschiedene Systematisierungen für die unterschiedlichen Verfahrensprinzipien der verfügbaren Anlagentechnik vorgenommen /4,5/. Erschwerend kommt hinzu, dass der eingeführte Begriff Trockenfermentation unscharf

und an sich irreführend ist, da auch bei Trockenfermentationsverfahren für ein feuchtes Milieu gesorgt sein muss, um die anaerobe Vergärung zu ermöglichen. Man muss auch berücksichtigen, das die Biogasbildung natürlich zwangsläufig zu einer Erhöhung des Wassergehaltes führt, je vollständiger der Abbau der Biomasse im Fermenter ist, desto mehr steigt der Wassergehalt. Dies deutet darauf hin, dass fließende Übergänge zwischen Trocken- und Nassfermentationsverfahren möglich sind.

Mit der Novellierung des EEG 2004 entstand ein schlagartig wachsendes Interesse an der Trockenfermentation. Lag der anvisierte Einsatzbereich von Trockenfermentationsverfahren ursprünglich überwiegend im Bereich der Vergärung von Bioabfällen, so wurde es durch die Kombinierbarkeit des Nawaro-Bonus mit dem Technologie-Bonus auch wirtschaftlich interessant, nachwachsende Rohstoffe aus der Landwirtschaft in Trockenfermentationsanlagen zur Biogaserzeugung einzusetzen.

Ein besonderes Interesse an Trockenfermentationsverfahren besteht dort, wo große Potenziale für den Anbau nachwachsender Rohstoffe zur Biogaserzeugung bestehen, aber keine Gülle aus der Nutztierhaltung zur Verfügung steht. Trockenfermentationsverfahren können die Biogaserzeugung von der Nutztierhaltung unabhängig machen und damit zu einer deutlichen Ausweitung des Biogaspotenzials beitragen. Es ist jedoch fraglich, ob jede Art der Vergärung von nachwachsenden Rohstoffen, die auf den Einsatz von Gülle oder sonstigen Flüssigkeiten verzichtet, als Trockenfermentationsverfahren im Sinne von § 8 Abs. 4 EEG einzustufen sind.

Neben den Anforderungen an Wassergehalt und Stapelfähigkeit ist bei der Beurteilung der Verfahren auch der Zweck des Nawaro-Bonus zu berücksichtigen, einen Anreiz zum Einsatz innovativer, besonders energieeffizienter und damit umwelt- und klimaschonender Anlagentechnik zu setzen, deren Einsatz regelmäßig mit höheren Investitionskosten verbunden ist. Bei Anlagenkonzepten, die diese Kriterien nicht erfüllen, ist unabhängig von Wassergehalt und Stapelbarkeit der eingesetzten Substrate, die Erfüllung der Tatbestandsvoraussetzungen für den Anspruch auf Nawaro-Bonus fraglich. Die Darlegungspflicht über die Erfüllung der Tatbestandsvoraussetzungen liegt regelmäßig beim Anlagenbetreiber.

Die Kriterien Wassergehalt und Stapelbarkeit der eingesetzten Substrate haben sich als nur eingeschränkt geeignet erwiesen, den Begriff Trockenfermentation im Sinne der Vergütungsregelung von § 8 Abs. 4 EEG sicher zu bestimmen. Es ist deshalb sehr zu begrüßen, dass in der Biogasbranche und unter Biogasexperten aus der Wissenschaft die Diskussion um weitere

nachvollziehbare Kriterien zur Begriffsbestimmung Trockenfermentation begonnen hat. Damit eine solche Begriffsbestimmung im Hinblick auf den Technologie-Bonus des EEG Wirkung entfalten kann, ist es allerdings unverzichtbar, bei dieser Diskussion die Zwecke des EEG und insbesondere der Regelungen zum Technologiebonus im Auge zu behalten.

Literatur:

- /1/ Gesetz zur Neuregelung des Rechts der Erneuerbaren Energien in Strombereich vom 21. Juni 2004: Bundesgesetzblatt Jahrgang 2004 Teil I, Nr. 40, Seite 1918
- /2/ Deutscher Bundestag: Drucksache 15/2864, siehe auch: http://www.erneuer-bare-energien.de/files/pdfs/allgemein/application/pdf/eeg_begruendung.pdf
- /3/ Institut für Energetik und Umwelt: Monitoring zur Wirkung des novellierten Erneuerbare-Energien-Gesetzes (EEG) auf die Stromerzeugung aus Biomasse (2. Zwischenbericht, Februar 2006) http://www.erneuerbare-energien.de/ files/pdfs/allgemein/application/pdf/zwischenbericht_eeg_monitoring2.pdf
- /4/ Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V.: Handreichung Biogasgewinnung und Nutzung, Leipzig, 2004
- /5/ Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V.: Trockenfermentation Evaluierung des Forschungs- und Entwicklungsbedarfs, Gülzower Fachgespräche Bd. 23, Gülzow, 2004

Anschrift des Autors:
Dr. Bernhard Dreher
Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit
Referat KI I 2 Solarenergie, Biomasse, Geothermie, Markteinführungsprogramme für Erneuerbare Energien
11055 Berlin
bernhard.dreher@bmu.bund.de

Stand der Technik bei der Trockenfermentation – Aktuelle Entwicklungen

P. Weiland Institut für Technologie und Biosystemtechnik Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft (FAL), Braunschweig

1 Einleitung

Seit der Novellierung des EEG im August 2004 besteht in der Landwirtschaft ein steigendes Interesse am Einsatz von Trockenvergärungsverfahren, da aufgrund des NaWaRo-Bonus in Höhe von 4-6 Cent/kWh_{el} zunehmend feste Substrate aus landwirtschaftlicher Produktion verarbeitet werden und bei Einsatz von Trockenvergärungsverfahren über den Technologiebonus zusätzlich 2 Cent/kWh_{el} vergütet werden. Trockenvergärungsverfahren sind daher insbesondere für Betriebe ohne Tierhaltung attraktiv, da die bei Nassvergärung übliche Mitverarbeitung von Gülle entfällt.

Die Unterteilung in Nass- und Trockenfermentation unterliegt jedoch keiner genauen Definition und der Übergang zwischen beiden Techniken ist fließend, so dass die Zuordnung von Verfahren nicht eindeutig geregelt ist /1, 2/. Einigkeit besteht nur darin, dass bei Trockenfermentationsverfahren stapelbare Biomassen eingesetzt werden, die nicht pumpfähig sind und einen Trockensubstanzgehalt von mindestens 30% aufweisen sollten. Inwieweit die Einhaltung bestimmter Trockensubstanzgehalte im Fermenter für die Verfahrensdefinition sinnvoll und zielführend ist, bleibt derzeit umstritten, da sich ein solcher Wert fachlich nicht eindeutig begründen lässt und der Trockensubstanzgehalt im Fermenter nicht allein vom Verfahrenskonzept, sondern ganz entscheidend vom Abbauverhalten der eingesetzten Substrate abhängt. Daher werden nachfolgend alle Verfahren betrachtet, bei denen gemäß EEG-Definition nicht pump-

fähige stapelbare Biomassen mit Trockensubstanzgehalten $\geq 30\,\%$ ohne Zugabe einer externen Flüssigkeit verarbeitet werden.

Die zur Trockenfermentation eingesetzten Verfahren wurden ursprünglich überwiegend für die Verwertung von Bio- und Restabfällen entwickelt und erst später an die spezifischen Anforderungen nachwachsender Rohstoffe angepasst. Trotz langjähriger Erfahrungen im Bereich der Abfallverwertung bestehen bei Einsatz nachwachsender Rohstoffe daher noch viele Unsicherheiten, da sich die physikalisch-biologischen Eigenschaften der Substrate deutlich unterscheiden und für den Einsatz in der Landwirtschaft aus Kostengründen wesentliche Vereinfachungen der Anlagentechnik notwendig sind.

2 Typisierung von Trockenvergärungsverfahren

Bei den praxisrelevanten Anlagenkonzepten handelt es sich um diskontinuierlich und kontinuierlich betriebene Verfahren, die sowohl ein- als auch zweistufig bzw. zweiphasig im mesophilen oder thermophilen Temperaturbereich betrieben werden (Abb. 1).

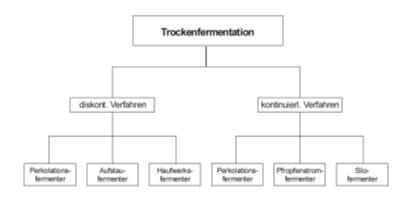


Abb. 1: Einteilung von Trockenfermentationsverfahren nach der Art der eingesetzten Fermenter

Sämtliche diskontinuierlich betriebenen Verfahren zeichnen sich durch eine einfache verfahrenstechnische Gestaltung des Fermenters aus, da für die Beschickung mit Substrat und die Entnahme des Gärrückstands keine eigenen Eintrags- und Austragssysteme erforderlich sind und keine Durchmischung des Fermenterinhalts erfolgt. Der geringe maschinentechnische Aufwand wirkt sich positiv auf Verschleiß und Wartungsaufwand aus und macht diese Verfahren unempfindlich gegenüber Störstoffen und fasrigen Substraten.

Durch die diskontinuierliche Betriebsweise werden Kurzschlussströmungen, wie sie bei der kontinuierlichen Prozessführung auftreten können, ausgeschlossen, so dass jeder Bestandteil des Gärsubstrats die gleiche Verweilzeit im Fermenter verbleibt. Solange keine Inhomogenitäten bezüglich der Bioaktivität und der Milieubedingungen (Temperatur, pH-Wert, Feuchte) im Fermenter vorliegen, ist daher eine gleichmäßige Ausnutzung des Substrats gewährleistet. Zur Aktivierung des anaeroben Abbaus wird das Substrat entweder mit Perkolationsflüssigkeit periodisch berieselt, mit Prozessflüssigkeit überstaut oder vor der Beschickung des Reaktors mit biologisch aktivem Gärrückstand vermischt. Je nach Art der Animpfung des frischen Materials kann zwischen drei Grundtypen unterschieden werden:

- Perkolationsverfahren (BEKON /3/, BIOFERM /4/, LOOCK /5 /, 3A-VERFAHREN /6/)
- Aufstauverfahren (RATZKA /7/)
- Haufwerkverfahren (BAG BUDISSA /8/, RATZKA /7/)

Die diskontinuierlichen Verfahren eignen sich vorzugsweise für kleine bis mittlere Verarbeitungskapazitäten, da das Arbeitsvolumen eines einzelnen Fermenters in der Regel $150~\rm m^3$ nicht übersteigt.

Bei den *kontinuierlichen* Verfahren sind stets Dosier- und Entnahmevorrichtungen erforderlich sowie maschinentechnische Einrichtungen für eine mechanische oder hydraulische Durchmischung. Verfahrensseitig wird auch hier keine vollständige Durchmischung angestrebt, um für das gesamte zugeführte Substrat eine möglichst gleiche Verweilzeit im Fermenter zu erreichen. Kontinuierlich betriebene Anlagen sind vor allem für große Verarbeitungskapazitäten (> 20.000 t/a) mit Fermentergrößen bis zu 2.000 m³ Arbeitsvolumen geeignet.

Unterschieden werden kann wiederum zwischen drei Grundtypen:

- Verfahren mit kontinuierlicher Feststoff-Perkolation (ISKA /9/)
- Pfropfenstromverfahren mit axial oder quer zur Strömungsrichtung angeordneten Rührwerken (KOMPOGAS /10/, LINDE /11/)
- Siloverfahren mit großem Umwälzstrom durch äußere Rezirkulation (ATF /12/, DRANCO /13/)

Aufgrund des höheren Technologie-Aufwands spielen die aus der Abfallverwertung bekannten kontinuierlichen Trockenvergärungsverfahren am Markt bisher nur eine untergeordnete Rolle, zumal aufgrund der unscharfen Definition derzeit auch an höhere Feststoffgehalte angepasste Nassvergärungsverfahren, die ohne Einsatz von Gülle oder externer Flüssigkeitszufuhr auskommen, den Technologie-Bonus erhalten. Hierzu gehören vor allem 2-stufige Vergärungsverfahren, die als erste Stufe einen liegenden Fermenter einsetzen. In der ersten Stufe werden die Feststoffe gemeinsam mit Gärrückstand aus der nachgeschalteten Vergärungsstufe im noch pumpfähigen Zustand verarbeitet und anschließend dem Nachgärer zugeführt.

Wie die Typisierung von Trockenvergärungsverfahren in Abb. 1 zeigt, finden Perkolationsverfahren, bei denen das Gärsubstrat zur Beimpfung, Temperierung und gleichmäßigen Befeuchtung regelmäßig mit Perkolationsflüssigkeit berieselt wird, sowohl bei diskontinuierlicher als auch kontinuierlicher Betriebsweise Anwendung. Dabei muss zwischen ein- und zweistufigen bzw. zweiphasigen Verfahren unterschieden werden (Abb. 2).



Abb. 2: Typisierung von Perkolationsverfahren

Bei den einstufigen Verfahren erfolgt simultan zur Perkolation die Methanisierung im gleichen Reaktor. Die Gasproduktion erfolgt allein durch Trockenfermentation. Für die zweistufigen bzw. zweiphasigen Verfahren ist kennzeichnend, dass jeweils nur die erste Prozessstufe mit einem hohen Feststoffgehalt und Perkolation betrieben wird, wohingegen die Methanbildung in der zweiten Prozessstufe bei wesentlich geringerem Feststoffgehalt erfolgt. Die Hauptmenge des Biogases wird in der Regel im Nachgärer gebildet, der grundsätzlich als Nassfermenter betrieben wird. Sofern ausschließlich die Perkolationsflüssigkeit dem Nachgärer zugeführt wird, handelt es sich um einen zweiphasigen Prozess.

3 Fermenter-Bauarten

3.1 Diskontinuierliche Verfahren

3.1.1 Perkolationsverfahren

Bei den diskontinuierlich betriebenen Perkolationsverfahren wird in der Regel ein container- oder garagenförmiger Boxenfermenter eingesetzt, der zur Befüllung und Entleerung stirnseitig mit einem hydraulisch betätigten Tor ausgerüstet ist. 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 Gärrückstand aus der vorherigen Vergärung zugemischt. Das Arbeitsprinzip mit Einschubfermenter ist in Abbildung 3 schematisch dargestellt.

Meist wird das Substrat zunächst kurzzeitig belüftet, um durch Bildung biogener Wärme auf die gewünschte Gärtemperatur zu kommen. Anschließend wird durch die Berieselung mit Perkolat die anaerobe Phase eingeleitet, die je nach den Substrateigenschaften zwischen 4 und 8 Wochen dauert. Die Berieselung erfolgt periodisch oder kontinuierlich und wird wenige Tage vor Beendigung des Abbauprozesses abgeschaltet, um eine statische Entwässerung zu erreichen. Vor Öffnung erfolgt entweder eine Rückspülung des Fermenters mit den Abgasen des BHKW oder eine Spülung mit Luft, die über einen Biofilter abgezogen wird. Zur Vermeidung einer Bildung explosionsfähiger Gasgemische während des

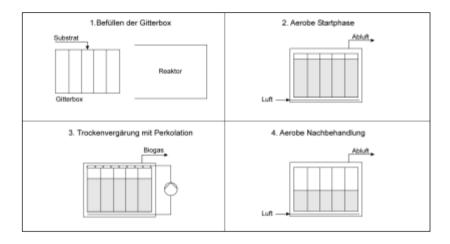


Abb. 3: Trockenfermentation mit Einschubfermenter

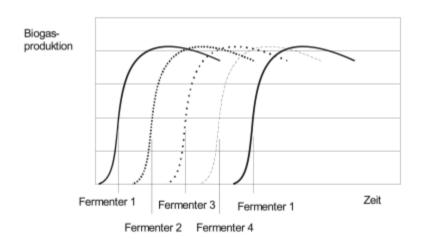


Abb. 4: Zeitliche Gasproduktion bei Parallelbetrieb verschiedener Batch-Fermenter

Anfahr- und Abfahrbetriebs sind spezielle Sicherheitssysteme erforderlich. Um eine gleichmäßige Gasproduktion zu erreichen, müssen 3-4 Fermenter zeitversetzt betrieben werden (Abb. 4).

Da die Perkolationsflüssigkeit je nach Gärdauer einen unterschiedlichen Säuregehalt und pH-Wert aufweist, kann durch kreuzweise Führung der Perkolationsflüssigkeit eine Übersäuerung zu Beginn der Vergärung vermieden werden. Dabei wird das saure Perkolat eines neu gestarteten Fermenters zur Perkolation eines bereits gut eingearbeiteten Fermenters genutzt, und die mit hoher Bakterienkonzentration sowie geringem Säuregehalt anfallende Perkolationsflüssigkeit des eingearbeiteten Fermenters dem neu gestarteten Fermenter zugeführt.

Nach dem gleichen Prinzip werden Boxenfermenter betrieben. Die garagenartig in einem Block nebeneinander angeordneten Betonboxen sind mit hydraulisch betriebenen Toren verschlossen und werden mittels Radlader befüllt und entleert. Durch diese Art der Beschickung kann im Vergleich zur Verwendung von Gitterboxen nur etwa 50% des Fermentervolumens ausgenutzt werden. Der Behälterboden ist beheizt und zur Ableitung des Perkolats geschlitzt ausgeführt. Das Perkolat wird in separaten, beheizten Perkolationstanks getrennt gelagert (Abb. 5).

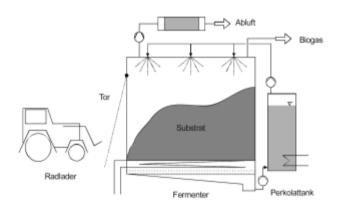


Abb. 5: Boxen- bzw. Garagenfermenter mit Perkolation

Eine wichtige Voraussetzung für die Funktionsfähigkeit der Perkolationsverfahren ist, dass eine relativ grobe Feststoffstruktur mit ausreichendem Porenvolumen vorliegt, die im Zuge des anaeroben Abbaus nicht zusammenbricht, um die Durchrieselung mit Perkolat aufrecht zu erhalten. Die Höhe des Substrathaufens ist daher auf 2-3 m begrenzt, da ansonsten

aufgrund des statischen Druckes die unteren Substratschichten verdichtet würden.

Erste Verfahren dieser Bauart (z. B. BIOFERM, LOOCK CONSULTANTS) sind im Praxiseinsatz und werden mit nachwachsenden Rohstoffen betrieben /14,15/.

Der 3A-Prozess, bei dem das Substrat in einem wannenförmigen Reaktor zeitlich und räumlich voneinander getrennt zuerst aerob, dann anaerob und wiederum aerob behandelt wird, nutzt ebenfalls für die Vergärung die kreuzweise Perkolationsflüssigkeitsführung (Abb. 6).

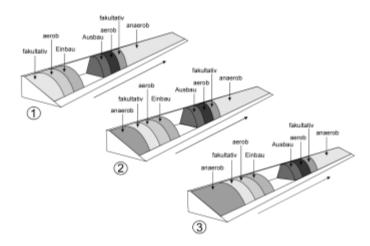


Abb. 6: Wannenreaktor zur segmentierten Behandlung von Biomasse

Das 3A-Verfahren wurde bisher nur in zwei Containeranlagen erprobt und stellt noch keine marktreife Technik dar /16/.

3.1.2 Aufstauverfahren

Aufstauverfahren unterscheiden sich gegenüber Perkolationsverfahren darin, dass die Prozessflüssigkeit nicht durch das stapelfähige Gärgut perkoliert wird, sondern das Material mit zwischengespeicherter Prozessflüssigkeit periodisch überstaut wird (Abb. 7).

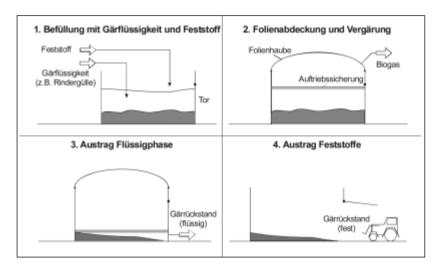


Abb. 7: Schematische Darstellung des Aufstauverfahrens

Mit dieser Technik sollen die Probleme, die sich im Zusammenhang mit der gleichmäßigen Verteilung des Perkolats und der Durchrieselung des Substratstapels ergeben, vermieden werden. Durch das Überstauen des Feststoffs mit Flüssigkeit besteht jedoch die Gefahr, dass das Gärgut aufschwimmt, weshalb nach Befüllung des Fermenters spezielle Einbauten eingebracht werden müssen, um ein Aufschwimmen der Biomasse zu verhindern. Hierdurch wird das betriebliche Stoffmanagement wesentlich erschwert. Bisher wird diese Technik nur im Pilotmaßstab erprobt /15, 17/.

3.1.3 Haufwerkverfahren

Bei dieser Variante erfolgt die Vergärung ohne Gegenwart einer Flüssigphase. Dazu muss das Gärgut vor der Vergärung mit bereits ausgefaultem Feststoff oder gelagerten Festmist intensiv vermischt werden, um vor Beschickung des Fermenters ein Animpfen des Substrats zu erreichen. Den schematischen Ablauf zeigt Abbildung 8.

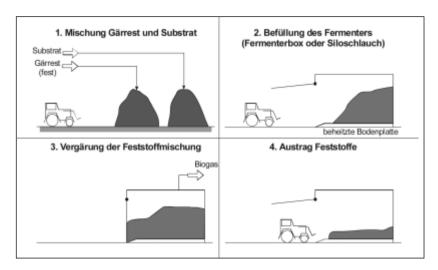


Abb. 8: Schematische Darstellung des Haufwerkverfahrens

Da bei einer zu geringen Animpfmenge die Gefahr einer Hemmung der Methangärung durch Übersäuerung des Gemisches besteht, muss das Verhältnis aus Frischsubstrat und Animpfmaterial sorgfältig ausgewählt werden, da im Verlauf der Trockenfermentation keine Möglichkeit zur Korrektur der Milieubedingungen besteht. Im Durchschnitt muss das Verhältnis von Impfsubstanz zu Frischsubstrat mindestens 1:1 betragen, wodurch die Ausnutzung des Fermentervolumens entsprechend sinkt /18/. Als Fermenter können Boxen- oder Garagenfermenter mit Wandund Bodenheizung eingesetzt werden. Die Einhaltung einer konstanten Temperatur im Substratstapel stellt hierbei das Hauptproblem dar. Die Verwendung von isolierten Siloschläuchen anstatt einer baufesten Fermenterhülle hat sich hingegen nicht bewährt, da keine gleichmäßige Temperatur im Schlauchfermenter erzielt wird, wodurch verminderte Gasausbeuten die Folge sind /8/.

3.2 Kontinuierliche Verfahren

3.2.1 Perkolationsverfahren

Bei den kontinuierlichen Perkolationsverfahren wird das Gärgut im Perkolator durch ein axial angeordnetes Rührwerk umgewälzt und durch den Reaktor transportiert. Die quasi-kontinuierlich aufgesprühte Perkolationsflüssigkeit durchströmt das Gärsubstrat und wird nach der Beladung mit organischer Substanz bodenseitig abgezogen und einem Nachgärer zugeführt. Der nicht abgebaute Feststoff wird mittels Schneckenpresse entwässert und das Presswasser zusammen mit dem Perkolat dem Nachgärer zugeführt (Abb. 9).

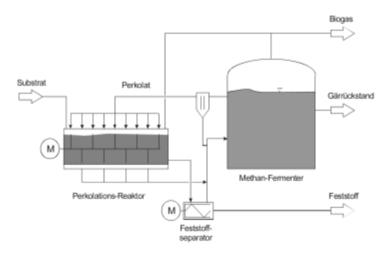


Abb. 9: Kontinuierliche Trockenvergärung mit Perkolation (ISKA-Verfahren)

Das in Abbildung 9 dargestellte ISKA-Verfahren wird bisher nur für die Verarbeitung von Restmüll eingesetzt /9/. Eine Erprobung mit nachwachsenden Rohstoffen steht noch aus. Ein ähnliches Verfahrenskonzept, mit kontinuierlicher Perkolation und einer Vergärung des Perkolats in einem Hochleistungsfermenter, wurde vom ATZ-Entwicklungszentrum erarbeitet, aber noch nicht im Praxismaßstab erprobt /19/. Fernerhin wurde unter der Bezeichnung InnoFerm-Technik ein Drehrohrfermenter im Pilotmaßstab erprobt, der als Vor- oder Hauptfermenter eingesetzt

werden kann. Dieses Verfahren wird aufgrund bestehender älterer Schutzrechtansprüche derzeit offensichtlich nicht weiter verfolgt /20/.

Eine Alternative, bei der der Ablauf aus dem Nachgärer einem speziell für höhere Feststoffgehalte entwickelten Gärkanalreaktor mir horizontalem Rührwerk zugeführt wird, findet demgegenüber bereits mehrfach in der Praxis Anwendung. Es handelt sich im Prinzip um eine konventionelle zweistufige Vergärung, bei der das Gärprodukt der ersten Stufe, das vorzugsweise die schwer abbaubaren Lignocelluloseanteile enthält, über eine Dickstoffpumpe dem Nachgärer zugeführt wird, der bei einem Trockensubstanzgehalt von 10-11 % betrieben wird. Hersteller dieses Anlagensystems (z. B. SCHMACK, ARCHEA) bezeichnen den Vorgang in der ersten Stufe vereinzelt auch als Perkolation, obgleich die typischen Merkmale dafür nicht gegeben sind /21, 22/.

3.2.2 Pfropfenstromprinzip

Bei diesen bisher vorzugsweise in der kommunalen Abfallbehandlung etablierten Vergärungsverfahren wird ein liegender Fermenter eingesetzt, der entweder über ein sehr langsam drehendes Axialrührwerk verfügt (KOMPOGAS) oder mit mehreren quer zur Strömungsrichtung angeordneten Rührwerken mit Paddeln (LINDE) ausgerüstet ist /10,11/. Das Substrat durchströmt den Fermenter in Längsrichtung als quasi-kontinuierlicher Pfropfenstrom. Dabei führen die Rührwerke selbst keinen axialen Substrattransport innerhalb des Fermenter durch, weshalb bei dem LINDE-LARAN-Pfropfenstromfermenter die Drehrichtung der quer angeordneten Rührwerke periodisch geändert wird. Um eine kontinuierliche Animpfung des zugeführten frischen Substrats zu erreichen, wird ein Teil des Fermenterablaufs zurückgeführt und gegebenenfalls zuvor durch eine Schneckenpresse von Feststoffen entlastet. Die Verfahrenskonzepte beider Varianten zeigen die Abbildungen 10 und 11.

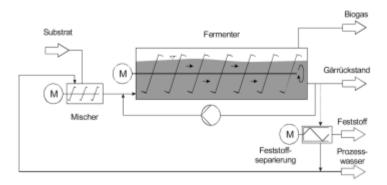


Abb. 10: Kontinuierliche Trockenfermentation mit Pfropfenstrom-Fermenter (KOMPOGAS)

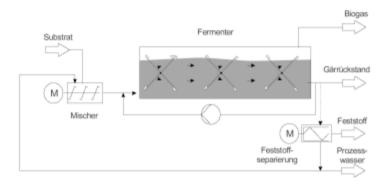


Abb. 11: Kontinuierliche Trockenfermentation mit Pfropfenstrom-Fermenter (LINDE)

Eine erste reine NaWaRo-Pilotanlage nach dem KOMPOGAS-Verfahren ist seit 2005 in Betrieb, Anlagen mit Leistungen zwischen 1 und 1,5 MW $_{\rm el}$ befinden sich in der Ausführungsplanung bzw. in der Genehmigungsphase /23/. Nach dem LINDE-LARAN-Pfropfenstromprinzip befinden sich derzeit zwei Anlagen mit einer Kapazität von 25.000 t/a bzw. 30.000 t/a für die Verarbeitung von Mais bzw. Mais-Roggengemischen in der Ausführungsplanung /24/.

3.2.3 Verfahren mit siloartigem Fermentersystem

Kennzeichnend für diese Verfahren ist der Einsatz von schlanken, zylindrischen Reaktoren, die von oben beschickt werden, während das ausgegorene Material am konisch ausgeführten Reaktorboden abgezogen wird. Der Fermenter enthält keinerlei Mischelemente, so dass das Material den Fermenter nach dem Pfropfenstrom-Prinzip durchströmt. Durch Rückführung von mindestens 80 % des bereits ausgefaulten Materials mit Hilfe einer Kolbenpumpe erfolgt eine intensive Animpfung des frisch zugeführten Materials. Typischer Vertreter dieses Verfahrensprinzips sind das DRANCO-Verfahren der Fa. OWS /13/ und das ATF-Verfahren der Fa. HAASE /12/. Die Abbildung 12 zeigt schematisch den Aufbau des DRANCO-Verfahrens.

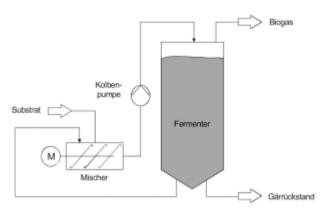


Abb. 12: Kontinuierliche Trockenvergärung mittels Silo-Fermenter (DRANCO)

Das DRANCO-Verfahren wird für Bio- und Restabfall bereits mehrfach eingesetzt, wohingegen das ATF-Verfahren bisher nur im Pilotmaßstab erprobt wurde. Für die Nutzung nachwachsender Rohstoffe befindet sich ein erstes Projekt nach dem DRANCOFARM-Verfahren in Niedersachsen in der Ausführungsplanung /25/.

4 Perspektiven

Trockenfermentationsverfahren stellen für die Mono-Vergärung nachwachsender Rohstoffe eine interessante Verfahrenslösung dar, die vor allem wegen der zusätzlichen Vergütung über den Technologiebonus steigendes Interesse findet. Neue Verfahren, welche die charakteristischen Vorteile von Trockenvergärungsanlagen aufweisen, können sich dennoch nur langsam am Markt durchsetzen, da einerseits weiterhin Unsicherheiten bezüglich der Funktionssicherheit, Leistung und Wirtschaftlichkeit bestehen, und andererseits bei reinen Trockenvergärungsanlagen die Festlegung für die Verarbeitung stapelfähiger Biomassen unumkehrbar ist, so dass eine Mitverarbeitung flüssiger Substrate zu einem späteren Zeitpunkt ausgeschlossen ist.

Die Weiterentwicklung und Etablierung von kompakten Trockenvergärungsverfahren, die mit hohem Feststoffgehalt betrieben werden, wird durch die unscharfe Definition des Begriffs "Trockenfermentation" und die daraus resultierende unzureichende technologische Abgrenzung zu Nassvergärungsverfahren erschwert, da zunehmend auch konventionelle Nassvergärungsanlagen, die keine Gülle oder andere externe flüssige Abläufe einsetzen, den Technologiebonus erhalten.

Die mit der Trockenfermentation angestrebten technologischen Ziele wurden ursprünglich wie folgt definiert /26/:

- kleine Reaktorvolumina aufgrund geringer Wassergehalte im Fermenter
- geringer Wärmebedarf aufgrund des geringen Wassergehalts
- kleine Stoffströme und somit lange Verweilzeiten trotz hoher Raumbelastungen
- geringe bzw. keine Gefahr für die Bildung von Schwimmschichten
- geringe Lagervolumina für die Gärrückstände

Um die Weiterentwicklung innovativer Trockenfermentationsverfahren stärker voranzutreiben, sollten diese Aspekte zukünftig mehr Beachtung finden.

5 Literatur

- /1/ Wagner, R.: Klärungsbedarf im EEG Lösungsansätze zu Trockenfermentation und Nawaro-Bonus. Tagungsskript zum 14. Symposium Bioenergie, Kloster Banz, Staffelstein 24./25.11.2005.
- /2/ Ott, M.: Trockenfermentation Plädoyer für eine sinnvolle Definition. Biogas-Journal, 1(2005), S. 8-9.
- /3/ Lutz, P., Wittmaier, M.: Praxiserfahrungen mit Bioabfällen aus der Getrenntsammlung. Müll und Abfall 2(2005), S. 91-93.
- /4/ Schiedermeier, H.: Das BioFerm-Trockenfermentationsverfahren. Waldmünchen, 2005.
- /5/ Loock, R.: Anbau und Nutzung landwirtschaftlicher Biomasse zur Vergärung. VDI-Berichte Nr. 1751 (2003), S. 67-80.
- /6/ Steffen, H.: Energieerzeugung aus Trockenfermentation nachwachsender Rohstoffe nach dem 3A-Verfahren. Tagungsband zur 11. Jahrestagung Biogas und Bioenergie in der Landwirtschaft, Rot am See 2002, S. 81-91.
- /7/ Ratzka, P.: Erste Erfahrungen bei der Vergärung nachwachsender Rohstoffe in der Feststoff-Biogasanlage Clausnitz. Leipziger Fachgespräche "Vergärung nachwachsender Rohstoffe", Leipzig 13.04.2005.
- /8/ Jäkel, K., Höhne, Ch., Heilmann, K., Mau, S.: Trockenfermentation im Siloschlauch. Sächsische Landesanstalt für Landwirtschaft, Dresden, 2005.
- /9/ U-Plus Umweltservice: ISKA mit Perkolation. Anlagenbeschreibung und allgemeines Verfahrenskonzept. Firmenschrift U-Plus Umweltservice, Ettlingen, 2001.
- /10/ Hüttner, A., Franke, H., Langer, A.: Das KOMPOGAS-Verfahren der Firma KOGAS. Bio- und Restabfallbehandlung III (Hrsg.: Wiemer, K., Kern, M.), 1999, S. 935-943.
- /11/ LINDE-KCA: Linde-Vergärungsverfahren für nachwachsende Rohstoffe. Firmenpräsentation, LINDE-KCA-Dresden GmbH, Dresden, 2005.
- /12/ Stegmann, R.: Großtechnische Erprobung von Verfahren zur einstufigen anaeroben ... Fermentation von Bioabfällen bei hohen Feststoffgehalten – ATF-Verfahren. DBU-Abschlussbericht, Hamburg, 1997.
- /13/ Six, W.: Auftrennung und Vergärung von Abfall nach dem DRANCO-Verfahren. Rest- und Bioabfallbehandlung III (Hrsg.: Wiemer, K., Kern, M.), 1999, S. 909-916.
- /14/ Gronauer, A., Aschmann, V.: Wissenschaftliche Begleitung einer Pilotanlage zur Feststoffvergärung von landwirtschaftlichen Gütern. Landtechnische Berichte aus Praxis und Forschung, Gelbes Heft 77, München, 2004.
- /15/ Linke, B.: Biogasgewinnung Versuche für die Praxis. VDL-Journals 55(2006), Heft 6.
- /16/ Sirch, M.: 3A-Biogas Entwicklung einer Trockenfermentation: Komposterzeugung mit Energiegewinnung. Tagungsband zum 13. Symposium "Energie aus Biomasse" (Hrsg.: OTTI), Regensburg, 2004, S. 166-171.
- /17/ Kusch, S., Oechsner, H.: Vergärung landwirtschaftlicher Substrate in Feststofffermentern. Gülzower Fachgespräche Bd. 23, 2004, S. 105-113.

- /18/ Linke, B., Miersch, S., Gegner, M.: Trockenvergärung im Siloschlauch. Tagungsband zur 11. Jahrestagung Biogas des Fachverbands Biogas e. V., Borken, 2002, S. 70-80.
- /19/ Prechtl, S.: ATZ-Festoffvergärungsverfahren. Persönliche Mitteilung, 2006.
- /20/ Kabasci, S.: InnoFerm-Technologie. Persönliche Mitteilung, 2006.
- /21/ Schmack, U.: Erste Erfahrungen beim Betrieb von NaWaRo-Anlagen. Tagungsband zum 14. Symposium "Bioenergie" (Hrsg.: OTTI), Regensburg, 2005, S. 419-425.
- /22/ Nacke, O.: System Pfropfenstromreaktor als kontinuierlicher Trockenfermenter. Tagungsband zur 13. Jahrestagung "Biogas und Bioenergie in der Landwirtschaft" des IBBK, Wolpertshausen, 2004.
- /23/ Zeifang, M.: KOMPOGAS-Verfahren für nachwachsende Rohstoffe. Persönliche Mitteilung, 2006.
- /24/ Langhans, G.: Linde-Trockenvergärung im LARAN-Pfropfenstromreaktor. Persönliche Mitteilung, 2006.
- /25/ Sixt, W.: DRANCOFARM-Anlage Nüstedt. Persönliche Mitteilung, 2006.
- /26/ Weiland, P.: Industrieabfälle und Möglichkeiten für deren Verwertung. ANS-Info-Band 16 (1989), S. 54-83.

Anschrift des Autors:

Dir. u. Prof. Dr.-Ing. Peter Weiland Institut für Technologie und Biosystemtechnik Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft (FAL) Bundesallee 50 38116 Braunschweig peter.weiland@fal.de

Potenziale, ökonomische und ökologische Beurteilung der Feststoffvergärung

F. Scholwin, J. Daniel, M. Paterson Institut für Energetik und Umwelt gGmbH, Leipzig

Kurzfassung:

Aufgrund der Novellierung des Erneuerbare-Energien-Gesetzes nimmt die Biogaserzeugung und -nutzung derzeit sehr stark zu. Besonderes Interesse, nicht zuletzt aufgrund der besonderen Förderung durch den Innovationsbonus, kommt hier dem Einsatz von Technologien zur Trockenfermentation zu.

Aus diesem Grund ist es Gegenstand eines aktuellen Forschungsprojektes [1], sowohl die Substratpotenziale zu untersuchen, die durch diese Technologie erschlossen werden können, als auch die Wirtschaftlichkeit der Technologie zu betrachten. Darüber hinaus wird untersucht, ob die in Frage kommenden Technologien aus ökologischer Sicht grundsätzliche Unterschiede gegenüber der konventionellen Nassfermentation aufweisen.

1 Einleitung

Die Erzeugung erneuerbarer Energie – vorwiegend in Form von Elektrizität – erlebt aufgrund der Erhöhung der Vergütungssätze durch die Novellierung des Erneuerbare-Energien-Gesetzes (EEG) einen erheblichen Aufschwung. Dabei wird die Strategie der Bundesregierung, die Erzeugung von Energie aus Biomasse auszubauen, in die Praxis umgesetzt. Die aktuelle Entwicklung der Stromerzeugung aus Biogas (Anlagenanzahl und installierte elektrische Leistung) zeigt hier in Abbildung 1 einen sehr deutlichen Trend.

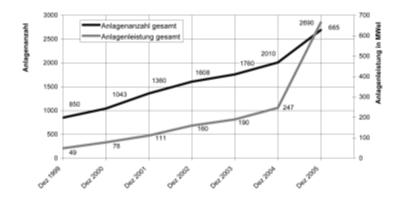


Abb. 1 Entwicklung der Stromerzeugung aus Biogas [2]

Aufgrund des im Erneuerbare-Energien-Gesetz verankerten Bonusses von 2 ct/kWh für den Einsatz innovativer Technologien ist u.a. die Nachfrage nach Biogasanlagen, die als Trockenfermentationsanlagen betrieben werden können, sehr hoch. Dementsprechend wird der Bonus für eine sehr große Zahl neuer Biogasanlagen beantragt und gewährt. Die Basis für die Gewährung des Bonusses ist derzeit die Definition der Trockenfermentation in der Begründung zum Erneuerbare-Energien-Gesetz. Aufgrund der Tatsache, dass die Begründung nicht wissenschaftlich untermauert ist und eine rege Diskussion über die Abgrenzung von Trockenfermentation gegenüber Nassfermentationstechnologien stattfindet, werden im Rahmen dieses Beitrages die bisher als Trockenfermentation benannten Verfahren der Betrachtung zugrunde gelegt. Dies beinhaltet die klassischen Pfropfenstromfermenter und Garagenverfahren sowie das sogenannte TNS-Verfahren. Aufgrund der Tatsache, dass auch die Mikroorganismen der Trockenfermentation an ein flüssiges Medium gebunden sind, ist die Bezeichnung Trockenfermentation irreführend, so dass im Weiteren der Begriff Feststoffvergärung verwendet wird.

Um nun die Bedeutung der Technologie im Praxiseinsatz zu prüfen, werden nachfolgend die für die Feststoffvergärung zum Einsatz kommenden Substrat- und resultierende Biogaspotenziale dargestellt, die Wirtschaftlichkeit am Markt verfügbarer Verfahren analysiert und ökologische Wirkungen diskutiert.

Welche Potenziale k\u00f6nnen durch Feststoffverg\u00e4rung erschlossen werden?

Für die Ermittlung des Biomassepotenzials wurden, soweit möglich, sämtliche in Deutschland anfallenden Stoffströme berücksichtigt, die für die Biogasproduktion durch die Feststoffvergärung in Betracht kommen. Dabei wurden ausschließlich technische, d. h. die unter Berücksichtigung der derzeitigen technischen Möglichkeiten, wie z. B. der Erntetechnik, nutzbaren Potenziale berücksichtigt. Im Einzelnen wurden bei der Berechnung die verfügbaren Nutzungstechniken, ihre Wirkungsgrade, die Verfügbarkeit von Standorten sowie "unüberwindbare" strukturelle, ökologische (z. B. Naturschutzgebiete), gesetzliche Vorgaben und andere nicht-technische Beschränkungen berücksichtigt.

Zunächst wurden die Branchen und das jeweilige Aufkommen des potenziell nutzbaren Primärenergieträgers (Substrat) in Tonnen pro Jahr ermittelt. Die zur Berechnung des Energiepotenzials benötigten substratspezifischen Angaben wie Trockensubstanzgehalt (TS), Biogasertrag und Methangehalt basieren auf Literaturangaben sowie Informationen von Fachverbänden. Es ist jedoch zu berücksichtigen, dass aufgrund mangelnder Datenlage keine spezifischen Biogaserträge und Methangehalte aus der Feststoffvergärung verwendet werden konnten, und demnach die bekannten Erträge der Nassvergärung angenommen wurden.

Die berücksichtigten Stoffströme der Potenzialanalyse können i.d.R. auf vielfältige Weise genutzt werden. Zur Abschätzung einer möglichen energetischen Verwendung der Substrate wurden die bestehenden Nutzungspfade berücksichtigt. Somit wird die derzeitige stoffliche Nutzung der Biomassen (Nutzungskonkurrenz) dem Energiepotenzial vorgezogen, so dass eine vollständige Verwendung der Biomassepotenziale zur energetischen Nutzung ausgeschlossen wird. Die resultierenden Energiepotenziale werden in Petajoule (PJ) pro Jahr angegeben und stellen das technische Energiepotenzial dar.

Die Ergebnisse der Analyse veranschaulicht Abbildung 2. Dabei wird für die meisten Substrate aufgrund der Schwankungsbreiten bei der aktuellen Nutzung und des realen Aufkommens sowie des zu erwartenden Biogasertrages eine Spannweite zwischen Minimum und Maximum angegeben. Bei optimaler Nutzung wird davon ausgegangen, dass das Maximum technisch erreichbar ist, weshalb es im Weiteren als Basis verwendet wird.

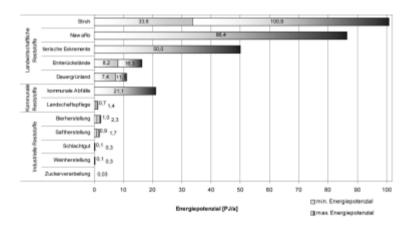


Abb. 2: Biogaspotenzial, das in Deutschland durch Feststoffvergärung erschlossen werden kann [1]

Deutlich ist die Bedeutung der Landwirtschaft erkennbar, denn mehr als 90 % des durch Feststoffvergärung erschließbaren Potenzials liegen im landwirtschaftlichen Sektor. Dabei muss berücksichtigt werden, dass das grundsätzlich vorhandene Strohpotenzial nur effektiv eingesetzt werden kann, wenn entsprechende Aufschlussverfahren (thermisch, mechanisch oder z.B. enzymatisch) am Markt verfügbar sind. Das Potenzial nachwachsender Rohstoffe (angenommen: Maissilage) ist dabei von der zugrunde liegenden Anbaufläche abhängig, die hier mit 550.000 ha angenommen wurde. [1]

Um die mögliche Bedeutung der Feststoffvergärung aufzuzeigen, wurden die Potenziale der Feststoffvergärung der Nassvergärung gegenübergestellt. Diese Gegenüberstellung zeigt Abbildung 3.

Dabei zeigt sich, dass wesentliche Unterschiede nur in einzelnen Positionen bestehen. Eine Verminderung der Potenziale der Nassfermentation erfolgt bei allen flüssigen und pastösen Substraten. Dies gilt vor Allem für Reststoffe und Abwässer der Nahrungsmittelindustrie sowie flüssige tierische Exkremente (Gülle). Ein höheres Potenzial zeigt die Feststoffvergärung ausschließlich bei Stroh, dessen Einsatz jedoch von der Entwicklung von Verfahren zum Aufschluss vor der Biogasgewinnung abhängig ist. Ansonsten können alle in der Feststoffvergärung zum Einsatz

kommenden Stoffströme auch – zum Teil mit entsprechenden Vorbehandlungsschritten – in Nassfermentationsanlagen mit am Markt verfügbarer Technik verwendet werden.

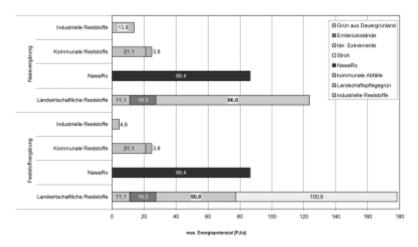


Abb. 3: Gegenüberstellung der Potenziale der Feststoffvergärung und der Nassvergärung [3]

3 Sind Feststoffvergärungsverfahren heute wirtschaftlich zu betreiben?

Zur Beurteilung der Wirtschaftlichkeit wurden die Investitions- sowie die resultieren Betriebskosten der Biogasanlagen – entsprechend der Verfahren und Leistungsgröße – durch entwickelte Modellanlagen dargestellt. Neben den Anlagenkosten wurden die möglichen Erlöse aus der Stromvergütung (EEG) ermittelt. Da neben der Stromerzeugung aus Biogas ebenfalls Konzepte zur Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) bestehen können, wurden darüber hinaus verschiedenen Möglichkeiten der Abwärmenutzung berücksichtigt, indem die Erlöse aus dem Wärmeverkauf für jede Anlagen gestaffelt in 100 %, 80 %, 20 % und 1 % betrachtet wurden. Die erwirtschafteten Erlöse aus der Strom- und ggf. der Wärmebereitstellung wurden den anfallenden Kosten gegenübergestellt.

Die Leistungsgrößen der betrachteten Modellanlagen wurden so gewählt, dass die typischen Anlagengrößen landwirtschaftlicher Biogasanlagen möglichst gut abgedeckt werden (150 kWh_{el}, 250 kWh_{el}, 500 kWh_{el}), wobei neben den Feststoffvergärungsanlagen auch die Nassvergärung in den entsprechenden Anlagenleistungen untersucht wurde. Aufgrund der Datenlage und der Angaben der jeweiligen Anlagenplaner wurde das Pfropfenstromverfahren lediglich für die Anlagengröße von 500 kWh_{el} betrachtet, während das TNS-Verfahren in den Leistungsgrößen 250 und 500 kWh_{el} dargestellt werden konnte.

Zur Gewährleistung der Vergleichbarkeit der betrachteten Modellanlagen und aus Gründen der Vereinfachung, wurde für alle Modell-Biogasanlagen Maissilage als Substrat angenommen. In der Praxis wird jedoch eher ein Substratmix für den Betrieb einer Biogasanlage erfolgen, um u. a. Schwankungen in der Substratqualität und den Biogaserträgen ausgleichen zu können.

Als Grundlage für die Wirtschaftlichkeitsberechnung dient u. a. der Betrachtungszeitraum, der für die gegebenen Biogasanlagen mit 20 Jahren als Abschreibungszeitraum festgelegt wurde. Für Anlagenteile, deren Nutzungs- bzw. Abschreibungsdauer vom Betrachtungszeitraum abweicht, wurden entsprechende Ersatzinvestitionen und entstehende Restwerte berücksichtigt. Für die betrachteten Modellanlagen wurde der Zinssatz mit 4,5 % festgelegt. Dies entspricht einem günstigen Zinssatz wie er beispielsweise von der Kreditanstalt für Wiederaufbau (KfW) derzeitig für Biogasprojekte gewährt wird. Zudem bleiben Preisänderungen und Steuern unberücksichtigt.

Des Weiteren wurde für die Betrachtung der Modellbiogasanlagen festgelegt, dass sich die Anlagen in unmittelbarer Nähe zu einem landwirtschaftlichen Betrieb befinden und komplett neu errichtet werden. Zwar können gewisse Strukturen und Einrichtungen des Betriebes wie z.B. Arbeitskraft und Radlader von der Biogasanlage mitgenutzt werden; dennoch sieht dieses Modellkonzept vor, dass notwendige Anlagenkomponenten neu gebaut werden. Dazu zählen z.B. Gebäude, Lagerkapazitäten (Substrat-, Gärrestlager) sowie eine gewisse Mindestfläche an Hofbefestigung.

Das Blockheizkraftwerk (BHKW) wurde als separate Position der Biogasanlage betrachtet, da dieses Anlagenteil keine verfahrensspezifische Komponente darstellt, und aus Gründen der Vergleichbarkeit für jede Modellanlage, der jeweiligen Anlagengröße, identisch ist.

Eine Übersicht der wesentlichen Annahmen für die wirtschaftliche Betrachtung der Modell-Biogasanlagen ist der Tabelle 1 zu entnehmen.

Tabelle 1 Übersicht – Annahmen zur Wirtschaftlichkeitsberechnung [1]

Kosten		Kosten/Erlöse	
Kalkulatorischer Zinssatz	4,5 %	Substratkosten (Silomais)	22 €/t
Nutzungsdauer Biogasanlage	20 a	Personalkosten	25 €/Akh
• Bau	20 a Betr BHR		7.500 Bh/a
Technik	10 a	Stromverbrauch	1 – 10 %**
• BHKW (Biogas)	12 a*	Wärmeverbrauch	20 - 30 % **
Wartung & Instand- haltung Bau	1,0 % v. Invest.	Energieeinkauf (Strom)	12 ct/kWh
Technik	3,0 % v. Invest.	Preisänderungen	keine
• BHKW	1,6 – 1,3 ct/kWh	Fördermittel	keine
Planung & Genehmigung	5,0 % v. Invest.	Steuern	keine
Inbetriebnahme Biogasanlage	1,0 % v. Invest.	Energieverkauf (Wärme)	6 ct/kWh
Versicherung Biogasanlage	1,0 % v. Invest.		

 ^{* 2}x Generalüberholung und 1x Ersatz (12. Jahr) des BHKW innerhalb der Nutzungsdauer der Biogasanlage

Im Ergebnis werden die Stromgestehungskosten für die Stromerzeugung aus Maissilage in Abhängigkeit von der Anlagengröße dargestellt (Abbildung 4).

Erkennbar ist, dass die Stromgestehungskosten mit zunehmender Anlagenleistung bei allen Modellanlagen sinken. Allerdings können bei den eingesetzten Rahmenbedingungen, die Modellbiogasanlagen – ungeachtet der Verfahrensart und bei einer soliden Annahme des elektrischen Wirkungsgrads – bis zu einer Leistungsgröße von 500 kWh_{el} i.d.R. nur mit einer Wärmeabgabe von 80% wirtschaftlich dargestellt werden. Größere Anlagen ab 500 kWh_{el} sind bei einer 20% Wärmenutzung bereits wirtschaftlich. Die Ausnahme bildet das TNS-Verfahren, welches trotz

^{**} in Abhängigkeit vom Verfahren

geringer Abwärmenutzung rentabel betrieben werden kann. Dabei ist zu berücksichtigen, dass bei den dargestellten Modellanlagen – bis auf die Nassvergärungsanlagen (90 % Maissilage, 10 Gülle) – der Einsatz von 100 % Maissilage zugrunde gelegt wurde. Durch den Einsatz kostengünstigerer Substrate beispielsweise im Substratmix (Ernterückstände u.a.) könnte ein erheblicher Kostenanteil der Biogasanlage (Substratkosten) reduziert werden.

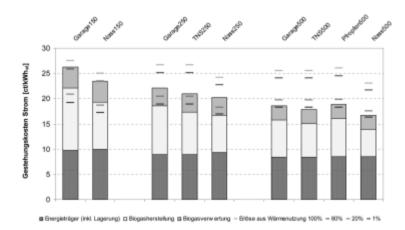


Abb. 4: Stromgestehungskosten der Modellanlagen im Vergleich und EEG-Vergütungen bei unterschiedlichen Wärmenutzungsgraden [1]

Inwieweit Änderungen der, für die Modellanlagen, festgelegten Annahmen und Rahmenbedingungen die Stromgestehungskosten beeinflussen, wird bei der Sensitivitätsanalyse dargestellt (Abbildung 5). Die Variationen umfassen dabei eine Erhöhung der Investitionskosten, erhöhte Substratkosten, höhere elektrische Wirkungsgrade des BHKW, einen erhöhten Zinssatz sowie die Berücksichtigung vorhandener Substratlager.

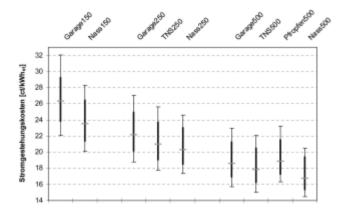


Abb. 5: Sensitivität der Stromgestehungskosten der Modellanlagen; Mittelwert (waagerechter Balken, Ausgangswert der Wirtschaftlichkeitsberechnung siehe Abbildung 4), Sensitivitätsbereich der einzelnen Variationen (fett markierter senkrechter Bereich) und die Auswirkung aller positiven und negativen Variationen (schmal gezeichneter senkrechter Bereich) [1]

4 Ist die Feststoffvergärung eine ökologische Alternative zur Nassvergärung?

Die Typenvielfalt von Feststoffvergärungsanlagen ist – von den Garagenverfahren bis zu den Pfropfenstromverfahren – sehr groß. Aufgrund der sehr unterschiedlichen technischen Ausstattung und Betriebsweisen lässt sich die gestellte Frage nicht pauschal beantworten und muss für jedes Verfahren spezifisch betrachtet werden.

Aufgrund der Tatsache, dass die ökologische Vorteilhaftigkeit der Biogasgewinnung und -nutzung grundsätzlich bewiesen ist ([4], [5]), muss die Feststoffvergärung im Kontext zur Nassfermentation analysiert werden. Aufgrund der Tatsache, dass es sich bei beiden Verfahren zum Teil nur um relativ geringe Unterschiede in der Verfahrensweise und dementsprechend auch in den Umweltauswirkungen handelt, ist die genaue Kenntnis der Umweltwirkungen der Nassfermentation Grundlage für diesen Vergleich. Da bisher auch die Beurteilung der Nassfermentation

nur mit relativ unscharfen Daten durchgeführt werden konnte ([4], [5]) ist diese genaue Kenntnis derzeit nicht vorhanden. Darüber hinaus werden Feststoffvergärungs-Technologien erst seit sehr kurzer Zeit für die Biogasgewinnung aus landwirtschaftlichen Substraten eingesetzt. Daher liegen für diesen Bereich nur Einzeldaten vor, die eher aus dem Versuchs- und Pilotmaßstab resultieren, als dass sie den Dauerbetrieb in der Praxis repräsentieren könnten. Aus diesen Gründen muss hier festgestellt werden, dass ein genauer zahlenmäßiger Vergleich z. B. anhand von Ökobilanzen nicht möglich bzw. auf der Basis der bekannten Daten nicht sinnvoll ist.

5 Schlussfolgerungen

Das Biogaspotenzial für die Anwendung von Feststoffvergärungsanlagen liegt bei rund 300 PJ/a. Im Vergleich zum Potenzial der Nassfermentation kann durch Feststoffvergärung, abgesehen von der Erschließung von Stroh, die von der Verfügbarkeit von zuverlässigen Aufschlussverfahren abhängig ist, kein zusätzliches Energieträgerpotenzial erschlossen werden, da mit marktverfügbarer Technik auch feste Substrate in Nassvergärungsanlagen eingesetzt werden können.

Die spezifischen Investitionskosten von Anlagen der Feststoffvergärung sind i.d.R. höher als bei Nassvergärungsverfahren. Durch die erhöhte EEG-Vergütung von Feststoffvergärungsanlagen können die Mehrkosten des Verfahrens teilweise gedeckt werden und somit einen wirtschaftlichen Anreiz schaffen. Dies sei nach Angaben des Fachverbandes Biogas e. V. auch die Intention des Technologie-Bonusses für Feststoffvergärungsanlagen, um anfängliche wirtschaftliche Risiken des Verfahrens auffangen zu können [6].

Die ökologische Beurteilung der Feststoffvergärung ist aufgrund der sehr schlechten Datengrundlage derzeit nicht möglich. Hier müssten sowohl für die Nassfermentation als auch für die Feststoffvergärung grundsätzliche Analysen zur Bereitstellung der für die Ökobilanzierung notwendigen Daten durchgeführt werden.

6 Literatur

- [1] Daniel, J.; Paterson, M.; Scholwin, F.: Biogaserzeugung durch Trockenvergärung von organischen Rückständen, Nebenprodukten und Abfällen aus der Landwirtschaft; unveröffentlichter Zwischenbericht; Forschungsvorhaben im Auftrag der Fachagentur für Nachwachsende Rohstoffe, FKZ 22011701; 2005
- [2] Daniel, J.; Fischer, E.; Jahraus, B.; Kaltschmitt, M.; Klinski, K.; Scholwin, F.; Thrän, D.; Vetter, A.; Weber, A.; Weber, M.: Monitoring zur Wirkung des novellierten Erneuerbare-Energien-Gesetzes (EEG) auf die Entwicklung der Stromerzeugung aus Biomasse; 2. Zwischenbericht an das BMU; 2006
- [3] Paterson, M.: Potenzialanalyse und ökonomische Betrachtung landwirtschaftlicher Trockenvergärungsanlagen im Vergleich zur Nassfermentation für den Standort Deutschland. Diplomarbeit. 2005
- [4] Wilfert, R.; Schattauer, W.: Biogasgewinnung aus Gülle, organischen Abfällen und aus angebauter Biomasse. Eine technische, ökologische und ökonomische Analyse. Endbericht. Im Auftrag der Deutschen Bundesstiftung Umwelt (DBU) Osnabrück, 2004
- [5] Greenhouse Gas Mitigation for Organic and Conventional Dairy Production (MIDAIR, EVK2-CT-2000-00096). Third Annual and Final Report, Germany, Leipzig 2004
- [6] Ott, M.: Trockenfermentation Plädoyer für eine sinnvolle Definition; Biogas Journal; Ausgabe 1, 2005

Anschrift der Autoren: Dr. Frank Scholwin, Jaqueline Daniel, Mark Paterson Institut für Energetik und Umwelt gGmbH Torgauerstr. 116 04347 Leipzig info@ie-leipzig.de

Laborversuche zur Trockenfermentation – Erste Ergebnisse

B. Sprenger, N. Engler, R. Matzmohr Universität Rostock, Fakultät für Maschinenbau und Schiffstechnik

Die im Folgenden vorgestellten Untersuchungen sind Teil des Gemeinschaftsvorhabens "Biogaserzeugung durch Trockenvergärung von organischen Rückständen, Nebenprodukten und Abfällen aus der Landwirtschaft". Neben der Universität Rostock sind die Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft (FAL) in Braunschweig sowie das Institut für Energetik und Umwelt (IE) in Leipzig an dem Vorhaben beteiligt.

Das am Lehrstuhl für Verfahrenstechnik/Biotechnologie der Universität Rostock durchgeführte Teilprojekt hat zum Ziel, für landwirtschaftliche Substrate verlässliche Daten zum Biogasertrag und der Methanausbeute zu ermitteln. Dabei sollen die speziellen Prozessbedingungen von Trockenfermentationsverfahren berücksichtigt werden.

1 Substratauswahl und Charakterisierung

Die Substratauswahl richtet sich nach der örtlichen und zeitlichen Verfügbarkeit sowie nach dem zu erwartenden Energieertrag. Für das Forschungsvorhaben musste aufgrund der begrenzten Projektlaufzeit die Auswahl eingeschränkt werden. Die Versuche werden daher hauptsächlich mit Maissilage durchgeführt. Kurzzeitig saisonal verfügbare Substrate wie Weidegras oder Rübenblatt wurden in den Versuchsablauf eingeordnet.

Die untersuchten Substrate werden im Wesentlichen durch ihren TSund oTS-Anteil charakterisiert. Bei Silagen kommt hierzu noch der Anteil an flüchtigen organischen Säuren. Aus der Elementaranalyse wurde der Anteil an C, N und S ermittelt. Wo möglich und sinnvoll, wurden die Substrate auch hinsichtlich ihrer mechanischen Eigenschaften wie Korngröße und Schüttdichte untersucht.

2 Beschreibung der versuchstechnischen Einrichtungen

Im Folgenden sollen die technischen Einrichtungen, an denen die Untersuchungen durchgeführt werden, beschrieben werden.

Ein Versuchsstand repräsentiert vom verfahrenstechnischen Ansatz her einen Rührkesselfermenter. Dieser ist als doppelwandiges Edelstahlgefäß mit 25 l Nennvolumen ausgeführt. Die Beheizung erfolgt durch einen Laborthermostaten. Im Fermenter befindet sich ein vertikales Propellerrührwerk, das eine Durchmischung des Inhalts auch bei höheren TS-Anteilen ermöglicht. Das Verfahrensfließbild ist in Abbildung 1 gezeigt. In Tabelle 1 sind die messtechnisch erfassten Prozessgrößen zusammengefasst.

Tabelle 1: Gemessene Prozessparameter am 25-l-Rührkesselfermenter

Messgröße	Sensor	Anmerkungen
Temperatur im Fermenter	Kombi-Einstab-Messkette	Aufzeichnungs- intervall: 30 min
pH im Fermenter	Kombi-Einstab-Messkette	Aufzeichnungs- intervall: 30 min
Gasmenge	Trommelgaszähler	Ablesung zweimal täglich
Gaszusammensetzung: O ₂ ; CO ₂ ; CH ₄	Gasmonitor GA 140 Plus	Eine Messung täglich
Luftdruck	Gasmonitor GA 140 Plus	Eine Messung täglich
Druckdifferenz Fermenter gegen Umgebung	U-Rohr-Manometer	Ablesung zweimal täglich

Es werden Batch-Gärversuche in Anlehnung an die VDI-Richtlinie 4630 durchgeführt. Um während der Projektlaufzeit eine genügend große Anzahl von Versuchen durchführen zu können, wurde die Verweilzeit auf 20 d festgelegt.

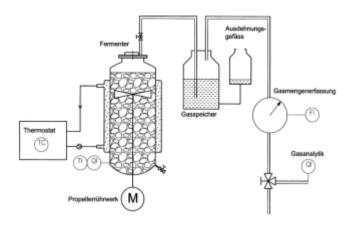


Abb. 1: Verfahrensfließbild 25 l Rührkesselfermenter

Als Inokulum wird jeweils der Gärrest des vorangegangenen Versuchs verwendet. Um eine Prozesshemmung durch das teilweise extreme Absinken des pH-Wertes bei der Vergärung von Maissilage zu vermeiden, ist ein Impfmaterialverhältnis p_i größer 1 erforderlich.

$$p_i = \frac{m_{oTS}(I)}{m_{oTS}(S)}$$

m_{oTS}: Masse der organischen Trockensubstanz absolut in kg Index I/S: Impfmaterial/Substrat

Dies hat zur Folge, dass der oTS-Anteil im Fermenter nur sehr langsam gesteigert werden konnte.

Zur Ermittlung des Restgaspotenzials des Inokulums wird parallel zu jedem Versuch ein Nullversuch im Kleinmaßstab (2,5 l Kulturgefäß) durchgeführt. Mit den Daten des Nullversuchs kann das Restgaspotenzial des Inokulums exakt ermittelt und somit im Hauptversuch der Biogasertrag und die Methanausbeute des untersuchten Substrats bestimmt werden.

Der zweite betriebene Versuchsstand ist als Festbettfermenter aufgebaut. Dieser hat ein Nennvolumen von 300 l, ist wärmegedämmt und doppelwandig ausgeführt und wird über einen Laborthermostat beheizt. Die Abbildung 2 zeigt das Verfahrensfließbild.

Entsprechend der Aufgabenstellung wurde an diesem Versuchsstand ein bereits im großtechnischen Maßstab realisiertes sogenanntes Perkolationsverfahren aufgebaut. Dabei wird das Substrat als Feststoffschüttung eingebracht und die Prozessflüssigkeit (Perkolat) im Kreislauf geführt. Das Perkolat wird über der Schüttung verteilt, durchläuft die Schüttung und fließt in den unterhalb des Fermenters angeordneten Perkolatbehälter zurück. Um Grobpartikel austragen zu können, ist am Einlauf dieses Behälters ein Schlammfang angeordnet. Der Perkolatbehälter verfügt über eine separate Beheizung sowie eine Entgasungsleitung.

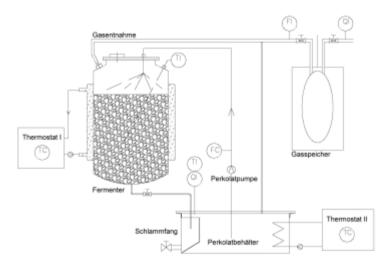


Abb. 2: Verfahrensfließbild 300 l Festbettfermenter

Das gebildete Biogas wird durch einen Trommelgaszähler geführt und in einem 300 l Foliensackspeicher zur Analyse zwischengespeichert. In der Tabelle 2 sind die erfassten Prozessparameter aufgeführt.

Auch am Festbettfermenter werden Batch-Versuche in Anlehnung an die VDI-Richtlinie 4630 gefahren. Aufgrund der zu erwartenden geringeren Abbaugeschwindigkeit wurde die Verweilzeit auf 40 d festgelegt.

Als Inokulum wurde zu Projektbeginn Rinderfestmist eingesetzt, anschließend wurde zum Animpfen der Gärrest des jeweils vorangegangenen Versuchs verwendet.

Das Impfmaterialverhältnis lag zu Beginn bei pi = 1, und wurde bei den folgenden Zyklen schrittweise verringert. Das Ziel ist, mit der Zeit ein biologisch aktives und stabiles Perkolat zu entwickeln. Dadurch soll das Animpfen im Wesentlichen durch das Perkolat erfolgen und durch die geringere Impfmaterialmenge das Fermentervolumen besser ausgelastet werden.

Mit dem Gärrest (Feste Phase und Perkolat) wird, wie bereits für den Rührkesselfermenter erläutert, parallel zum laufenden Versuch ein Nullversuch zur Bestimmung des Restgaspotenzials des Gärrests durchgeführt.

Tabelle 2: Gemessene	Prozessparameter an	n 300-l-Festbettfermenter

Messgröße	Sensor	Anmerkungen	
Temperatur im Fermenter	Pt 100 Sensor	Aufzeichnung am PC	
Temperatur Perkolat	Pt 100 Sensor	Aufzeichnung am PC	
pH-Wert Perkolat	Einstab-Messkette	Aufzeichnung am PC	
Gasmenge	Trommelgaszähler	Aufzeichnung am PC	
Gaszusammensetzung: O ₂ ; CO ₂ ; CH ₄	Gasmonitor GA 140 Plus	Eine Messung täglich	
Luftdruck	Gasmonitor GA 140 Plus	Eine Messung täglich	
Druckdifferenz Fermenter gegen Umgebung	Differenzdruck- sensor DPS 250	Aufzeichnung am PC	

Im Projektverlauf hat sich gezeigt, dass insbesondere beim Einsatz von Silagen der pH-Wert im Perkolat extrem sinkt. Ursache hierfür ist das beständige Auswaschen der leicht löslichen organischen Säuren.

Um ein biologisch aktives Perkolat zu erhalten und die Pufferkapazität ausnutzen zu können, sollte die verfügbare Menge Perkolat ungefähr dem Fermentervolumen entsprechen. Praxiserfahrungen mit ähnlichen Verfahren¹ bestätigen dies.

54

¹ Praxisbericht BGA Pirow (Brandenburg)

3 Bisherige Ergebnisse der Batch-Versuche

Bei der Interpretation der im Folgenden dargestellten Ergebnisse ist zu berücksichtigen:

- Die Verweilzeiten von 20 bzw. 40 d sind feste Randbedingungen.
- Die gemessenen Gasvolumina werden unter Berücksichtigung von Druck und Temperatur auf Normbedingungen (0°C, 101,3 kPa) umgerechnet und auf die Masseeinheit organische Trockensubstanz des Substrats bezogen.
- Bezugsgröße für die Angabe der organischen Trockensubstanz ist dabei die Frischmasse (nicht die Trockenmasse). Zu beachten ist weiterhin, dass die Gaszusammensetzung in Vol.-% des trockenen Gases gemessen und angegeben wird.

3.1 Untersuchte Substrate

Es wurden Maissilagen von zwei unterschiedlichen Standorten verwendet, die sich im Wesentlichen durch den oTS-Anteil unterschieden. Beide Chargen stammten von Milchviehbetrieben und wurden als Futtermittel und nicht speziell für den Einsatz in Biogasanlagen (BGA) hergestellt. Die Silage der Charge 1 wird aber vom Landwirt in einer hofeigenen BGA als Koferment eingesetzt.

Des Weiteren wurden Kleegras, Weidegras und Rübenblatt jeweils als Frischmaterial untersucht.

3.2 Versuchsergebnisse Rührkesselfermenter

In der Abbildung 3 sind die Ergebnisse der Batch-Versuche am Rührkesselfermenter zusammengefasst. Es sind jeweils der Biogasertrag und die Methanausbeute in $\rm m^3(N)/t_{\rm oTS}$ dargestellt. Des Weiteren ist der mittlere oTS-Anteil im Fermenter zu Versuchsbeginn und zu Versuchsende eingetragen.

Aufgrund der Animpfproblematik (s. o.) konnte der oTS-Anteil im Fermenter nur langsam gesteigert werden. Mit Substraten mit hohem Wasseranteil, wie z. B. Rübenblatt, konnten keine oTS-Anteile über 7 % realisiert werden.

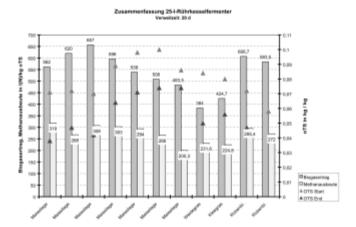


Abb. 3: Zusammenfassung der Batch-Versuche am 25 l Rührkesselfermenter

Die Abbildung 4 fasst die Versuche mit Maissilage zusammen. Hier ist ein deutlicher Zusammenhang zwischen dem oTS-Anteil im Fermenter und den Gaserträgen erkennbar. In Tabelle 3 sind neben den ermittelten Gasausbeuten auch die mittleren Gaszusammensetzungen angegeben.

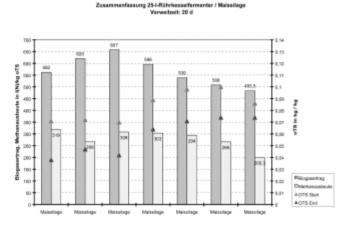


Abb. 4: Zusammenfassung der Versuche mit Maissilage am 25 l Rührkesselfermente

Tabelle 3: Zusammenfassung der Erträge und Gaszusammensetzung; Rührkesselfermenter

Substrat		Mais- silage	Rüben- blatt	Weide- gras	Klee- gras
Biogasertrag	l(N)/kg oTS	539	583,5	384	424,7
Methanausbeute	l(N)/kg oTS	294	272	231,6	224,8
mittl. CH ₄ -Konz.	Vol%	55 %	47 %	60 %	53 %
mittl. H ₂ S-Konz.	ppm	483	>1000		

3.3 Versuchsergebnisse Festbettfermenter

Aufgrund der längeren Verweilzeit als auch von Anfahrproblemen mit dem Perkolationsverfahren liegen für den Festbettfermenter weniger Versuchsdaten als für den Rührkesselfermenter vor. Tabelle 4 zeigt eine Zusammenfassung der bisherigen Ergebnisse. Die extrem hohen H₂S-Konzentrationen, die bei der Vergärung von Rübenblatt gemessen wurden, sind auf eine Schwefeldüngung von 45 kg/ha unmittelbar vor der Vegetationsperiode zurückzuführen. Die allgemeine Aussage, dass der H₂S-Anteil im Biogas bei Trockenfermentationsverfahren niedrig sei, kann durch die bisherigen Ergebnisse nicht bestätigt werden. Substrate mit hohem Schwefelanteil bewirken auch entsprechend hohe H₂S-Konzentrationen im Biogas.

Tabelle 4: Zusammenfassung der Erträge und Gaszusammensetzung; Festbettfermenter

Substrat		Mais- silage	Rüben- blatt	Weide- gras	Klee- gras
Biogasertrag	l(N)/kg oTS	512	498	429	301
Methanausbeute	l(N)/kg oTS	162	233	171	132
mittl. CH ₄ -Konz.	Vol%	55 % ²	47 %	57 %	43 %
mittl. H ₂ S-Konz.	ppm	575	>1000		

Bei der Vergärung von Silagen mit Perkolationsverfahren treten Effekte auf, die einen optimalen Verlauf der Gärprozesse stark behindern. Durch

² Mittelwert unter Vernachlässigung der ersten fünf Versuchstage

die Befeuchtung der Schüttung kommt es zu einem wieder Anlaufen der Milchsäuregärung, verbunden mit einer extremen $\mathrm{CO_2}$ -Produktion und gleichzeitig zum Auswaschen der organischen Säuren. Dadurch kann der pH-Wert im Perkolat auf bis zu pH 4 absinken. Eine aerobe Vorbehandlung des Substrats ist nach bisherigen Erkenntnissen für eine stabile Prozessführung erforderlich.

4 Zusammenfassung

- Die üblicherweise mit dem Begriff Trockenfermentation verbundenen Angaben von TS-Anteilen größer 25 % im Fermenter sind mit landwirtschaftlichen Substraten kaum erreichbar. (Substrate mit weniger als 15 % TS, TS-Abbau, Wasseraufnahme des Substrats...)
- Insbesondere beim Einsatz von Silagen ist ein Animpfverhältnis von 1 (auf oTS-Basis) nicht zu unterschreiten.
- Beim Einsatz von Silagen im Festbettfermenter mit Perkolation fällt der pH-Wert im Perkolat extrem ab (< pH 5). Eine Stabilisierung der Verhältnisse ist über die Veränderung der Umlaufrate des Perkolats erreichbar. Für diese Prozessoptimierung sind weitere Versuchsreihen erforderlich.
- Die bis zum Ende der Projektlaufzeit geplanten Versuche werden ausschließlich mit Maissilage als Substrat durchgeführt, um die Datenbasis zu verbreitern.
- Die am Rührkesselfermenter ermittelten Kenndaten erlauben bereits Aussagen über zu erwartende Energieerträge. Für den Festbettfermenter sind weitere Versuche erforderlich um belastbare Aussagen zu erhalten.

Anschrift der Autoren:
Prof. Dr. rer. nat. Bertold Sprenger, Dipl.-Ing. Nils Engler,
Dr.-Ing. Roland Matzmohr
Universität Rostock
Fakultät für Maschinenbau und Schiffstechnik
Justus-von-Liebig-Weg 6
18059 Rostock
bertold.sprenger@uni-rostock.de

Ausgewählte Ergebnisse zur Vergärung von Feststoffen in berieselten Boxenfermentern mit Batch-Betrieb

Sigrid Kusch, Hans Oechsner, Thomas Jungbluth Universität Hohenheim, Landesanstalt für Landwirtschaftliches Maschinen- und Bauwesen, Institut für Agrartechnik

1 Einleitung

In der landwirtschaftlichen Biogaserzeugung war Flüssigmist noch bis vor wenigen Jahren das dominante potenzielle Einsatzmaterial, so dass bis heute hauptsächlich Flüssigvergärungsanlagen zu finden sind. Insbesondere da der Einsatz von Energiepflanzen nach dem derzeitigen Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG) besonders gefördert wird und da die Rahmenbedingungen für die Biogasgewinnung insgesamt attraktiver geworden sind, ist ein gestiegenes Interesse an der Vergärung auch dann festzustellen, wenn hauptsächlich Feststoffe und kein oder nicht ausreichend Flüssigmist vorhanden sind.

Verfahren, die bei hohen Gehalten an Trockensubstanz (TS) arbeiten, sind Stand der Technik bei der Vergärung von kommunalen Abfällen. Im Gegensatz zur Landwirtschaft fielen im kommunalen Verantwortungsbereich mit getrennt eingesammelten Bioabfällen sowie mit Restabfällen zur Verwertung von Beginn an Materialien mit hohen TS-Gehalten an. Die Einführung von technischen Verfahren, die gezielt diese Stoffgruppen verarbeiten können, war daher eine logische Entwicklung. Es sind hauptsächlich kontinuierliche Verfahren verwirklicht worden, die mit entsprechend aufwändigen Einrichtungen für Materialaufbereitung, Gärgutbewegung während der Fermentation sowie Fermenterbeschickung und Materialaustrag ausgestattet sind. Eine Übersicht zu Verfahren am deutschen Markt findet sich in /1/. Für etablierte Anlagenbauer ist eine Realisierung

nur ab einer bestimmten Jahresdurchsatzleistung interessant und auch wirtschaftlich umzusetzen.

Für den landwirtschaftlichen Bereich aber auch im kommunalen Bereich in Fällen, in denen wenig potenziell vergärbare Stoffströme anfallen, aber die dezentrale Behandlungsstruktur unter Nutzung der Vergärungstechnologie trotzdem aufrecht erhalten oder aufgebaut werden soll, sind alternative Anlagenkonzepte erforderlich. Eine Möglichkeit zur Nutzung stapelbarer Feststoffe ist die Vergärung in garagenartigen Boxenfermentern im Batch-Betrieb. Hierbei wird die Substratcharge im Fermenter aufgestapelt und ohne Durchmischung unter Berieselung über mehrere Wochen vergoren. Im Vergleich zu kontinuierlichen Verfahren sind Vorteile der diskontinuierlichen Vergärung in berieselten Boxenfermentern neben dem sehr flexiblen Betrieb die große Robustheit sowie die sehr einfache und damit wartungsarme technische Ausstattung. Es können auch Substrate verarbeitet werden, die in einer Flüssigvergärung ausgeschlossen werden müssten, beispielsweise Feststoffe, die einen höheren Anteil verholzter Biomasse oder Steine enthalten, wie es beispielsweise für Grünschnitt aus kommunaler Sammlung typisch ist.

Bei der diskontinuierlichen Vergärung müssen mehrere Fermenter mit versetzten Betriebszyklen betrieben werden, um die qualitativ und quantitativ ungleichmäßige Gasproduktion des Einzelfermenters auszugleichen. Das Arbeitsvolumen eines Fermenters beträgt durchschnittlich 100-150 m³ /2/. Der modulare Aufbau ermöglicht eine flexible Erweiterung der Gesamtanlage. Allerdings ist die Verarbeitungskapazität aus arbeitstechnischen Gründen nach oben begrenzt, da der Arbeitsaufwand proportional zur Zahl der Boxen zunimmt /2/.

Für landwirtschaftliche Substrate mit hohen Wassergehalten, die während der Vergärung Zellwasser freisetzen und ohne weitergehende Aufbereitung eine pumpfähige Konsistenz einnehmen, ist eine Entwicklung hin zur Nutzung in kontinuierlichen Fermentern zu beobachten. Für weitere landwirtschaftliche Substrate wie Festmist ist die kontinuierliche Vergärung bei hohen TS-Gehalten Forschungsgegenstand beispielsweise in Skandinavien /3/.

Nachfolgend bleiben kontinuierliche Verfahren, die bei niedrigen oder erhöhten TS-Gehalten vergären, unberücksichtigt. Hierunter fallen sowohl klassische landwirtschaftliche Flüssigvergärungsverfahren, bei denen Feststoffe in begrenztem Maße einem flüssigen Gärsubstrat zugeführt werden können, sowie kontinuierlich betriebene Verfahren, die in Abhängigkeit der

eingesetzten Substrate gegebenenfalls auch unter Verzicht der Zugabe von Fremdflüssigkeit bei höheren TS-Gehalten unter Durchmischen des Fermenterinhaltes vergären. Es werden hier nur Verfahren betrachtet, bei denen Feststoffe in boxenförmigen Fermentern aufgestapelt und ohne Durchmischung im Batch-Betrieb unter Berieselung vergoren werden können.

2 Definitionen zentraler Begriffe und theoretische Grundlagen zum Verfahren

Bisher existiert keine abgesicherte Definition der Begriffe <u>Trockenfermentation</u> und Nassfermentation. Neben rechtlichen Unklarheiten bei der Begriffsabgrenzung besteht auch keine klare natur- oder ingenieurswissenschaftliche Definition. Im Allgemeinen wird jedoch bei Feststoffgehalten bis zu 15 % Trockensubstanz von Nassfermentation gesprochen, bei höheren Feststoffgehalten von Trockenfermentation /4/. Grundsätzlich können diese Bezeichnungen irreführend sein, da für einen biologischen Abbau der Organik stets ein gewisser Wassergehalt erforderlich ist. An dieser Stelle werden stattdessen die Begriffe <u>Feststofffermentation</u> oder Feststoffvergärung verwendet.

Bei landwirtschaftlichen <u>Perkolationsverfahren</u> wird der zu vergärende Substratstapel im Fermenter über die Dauer des Gärzyklusses in regelmäßigen Zeitabständen mit Flüssigkeit übersprüht. Die Berieselung zur Unterstützung der mikrobiellen Aktivität im Feststoff wird als Perkolation bezeichnet, wobei dies nicht der Begrifflichkeit entspricht, die bei der Vergärung von Bio- und Restabfall verwendet wird. Dort bezeichnet Perkolation eine Extraktion der Organik durch eine intensivierte aerobe oder anaerobe Hydrolyse gegebenenfalls auch in Kombination mit Versäuerung und anschließender Weiterverarbeitung der angereicherten Lösung z.B. in einer Hochleistungsflüssigvergärung. In der Chemietechnik bezeichnet Perkolation (von lat.: percolare = durchseihen, durchsickern lassen) ein Verfahren zur Gewinnung von Auszügen, d.h. zur Extraktion von Wirkstoffen wie Alkaloiden aus zerkleinerten Substanzen mit Hilfe von langsam hindurch fließenden Lösungsmitteln wie Wasser und Alkohol /5/.

Im landwirtschaftlichen Bereich scheint sich für Verfahren, die darauf abzielen, Organik gezielt in einer Hydrolyse- und Versäuerungsstufe aus dem Feststoff zu extrahieren, um die angereicherte Flüssigphase in einer getrennten Stufe zu vergären, der Begriff <u>Bioleaching</u> zu etablieren.

Der Begriff <u>Kreuzberieselung</u> kennzeichnet Verfahren, bei denen räumlich getrennte Feststoffschüttungen über den gegenseitigen Austausch der freien Flüssigphasen in Beziehung gesetzt werden, siehe Abschnitt 6. In einem System können dabei sowohl kreuzberieselte wie eigenberieselte Fermenter (Rezirkulation der freien Flüssigphase innerhalb desselben Fermenters) vorhanden sein. Im Gegensatz dazu führen andere Verfahren die Flüssigphasen aller Feststofffermenter in einem getrennten Flüssigkeitstank zusammen und verteilen die Mischflüssigkeit erneut über alle Feststoffschüttungen. Für diesen Verfahrenstyp wird der Begriff <u>Mischberieselung</u> vorgeschlagen.

Bei der Vergärung in diskontinuierlich betriebenen Feststofffermentern mit Berieselung ergibt sich die Produktion von Biogas infolge der mikrobiellen Tätigkeit im absatzweise zur Verfügung gestellten Substrat in Zusammenwirken mit dem Durchtritt der Flüssigphase durch die Feststoffschüttung. In der Kopplung von stofflichem Transport und biologischer Umwandlung /6/ hängt das Ergebnis von den Substrateigenschaften, den Milieubedingungen, der Art der Interaktionen zwischen den Spezies der Mischpopulation sowie den eingestellten Prozessbedingungen ab.

Die Umwandlung des Substrates zu Biogas ergibt sich durch das Zusammenwirken unterschiedlicher Organismengruppen, wobei die Hauptreaktionsstufen Hydrolyse, Säurebildung und Methanbildung aufeinander aufbauen. Die Kinetik des Prozesses ist grundsätzlich als enzymkatalysierte Reaktionskette beschreibbar, die durch die Maximalrate der langsamsten Vorwärtsreaktion limitiert ist, z.B. nach /7/. Insofern nicht die Hydrolyse der Feststoffe geschwindigkeitsbestimmend ist, wirkt sich die im Vergleich zu den Säurebildnern wesentlich längere Generationszeit der Methanbakterien aus. In Abhängigkeit der unterschiedlichen Geschwindigkeiten zwischen Freisetzung von Säuren entsprechend den spezifischen Substrateigenschaften und Verbrauch durch die vorhandenen Methanbildner kann es zu einer Akkumulation von Säuren und damit zu einer Hemmung der Methanbakterien kommen, da diese nur eine begrenzte Milieutoleranz gegenüber hohen Säuregehalten und niedrigen pH-Werten aufweisen. Um der Versäuerung entgegenzuwirken, kann die Dichte der Methanbakterien durch Beimpfung des Substrates bzw. des Reaktors mit bereits an den Prozess angepasster Biomasse selektiv erhöht werden. Bei einer kontinuierlichen Reaktion wird hierzu eine bestimmte Menge des Reaktoroutputs wieder zurückgeführt. Beim Starten eines neuen Gärprozesses, also auch bei jeder neuen Charge im Batch-Verfahren, wird eine bestimmte Menge des Inhaltes eines anderen Vergärungsreaktors als Impfmedium (Inokulum) zugesetzt.

Die grundsätzlichen Anforderungen der mikrobiellen Mischpopulation hinsichtlich Nährstoffdargebot sowie Milieubedingungen unterscheiden sich im Vergleich zur Flüssigvergärung nicht. Dabei ist die Anwesenheit von Wasser für den Abbau organischer Substanz von entscheidender Bedeutung. Mikroorganismen können Nährstoffe nur aus wässrigen Lösungen aufnehmen. Auch bei der Feststoffvergärung ist daher ein gewisser Wassergehalt erforderlich. Nach /8/ ist der biochemische Abbau im Anaeroben bei einem Wassergehalt unter 15 % unterbunden, unter 30 % gehemmt und ab 40 % optimal. Noch aussagekräftiger als der absolute Wassergehalt eines Materials ist seine Relation zur spezifischen Wasserhaltekapazität (Wassersättigung), die je nach Material sehr unterschiedlich sein kann. /9/ zitiert aus der Literatur eine für den mikrobiellen Abbau optimale Bodenfeuchte von 50 bis 80 % der spezifischen Wasserhaltekapazität. Offenbar wurden geeignete Methoden zur Bestimmung der Wasserhaltekapazität auch für Materialien entwickelt, bei denen die bisherigen standardisierten Verfahren versagen /10/.

In Medien mit hohem Feststoffgehalt, die keiner mechanischen Durchmischung unterliegen, erfolgt der Transport von gelösten oder suspendierten Partikeln ausschließlich über die wässrige Phase. Eine erste anschauliche Vorstellung der Zusammenhänge beim Durchtritt von Flüssigkeit durch eine Substratschüttung kann gelingen, wenn die Gleichung von Hagen-Poiseuille für eine stationäre, laminare vertikale Strömung einer Flüssigkeit mit konstanter Viskosität durch eine gleichförmige Kapillare bei Fehlen einer äußeren Druckkraft (Wirkdruck $p = \rho gh$) (Gleichung 1 nach /5/, verändert) herangezogen wird.

$\frac{V}{t} =$	$\frac{\pi R^4}{8\eta L}\rho$	gh	Gleichung 1
mit	V/t	Volumenstrom	m^3/s
	R	Radius der Kapillare	m
	η	dynamische Viskosität des Fluids	Pa $s = kg/(m s)$
	L	Länge der Kapillare	m
	ρ	Dichte Fluid	kg/m³
	g	Fallbeschleunigung am Messort	m/s^2
	h	hydrostatische Druckhöhe	m

Danach ist eine hohe Viskosität des Fluids grundsätzlich nachteilig für die Durchströmung. Der Porenkanalradius wirkt sich mit der vierten Potenz entscheidend auf den Volumenstrom aus. So führt eine Verdopplung des Radius zu einer Versechzehnfachung der durchfließenden Flüssigkeitsmenge pro Zeiteinheit. Insbesondere besteht in biologischen Systemen durch die Anwesenheit und Aktivität von Mikroorganismen eine erhöhte Gefahr der Kolmation (Porenraumverstopfung), da eine Verengung des Porenkanals durch Zellkörper oder extrazelluläre Polymere (Schleime) auftreten kann und eine Verstopfung der Poren durch mikrobielle Stoffwechselprodukte (Gasblasen, Ausfällungen) möglich ist /11/. Zu berücksichtigen ist weiterhin, dass die Viskosität nur bei Newtonschen Fluiden konstant ist. Abweichungen vom Newtonschen Fließverhalten zeigt z.B. Flüssigmist, der im Stillstand oder in der langsamen Bewegung zähflüssiger als im schnell fließenden Zustand ist, wobei ein Fließen erst nach Überschreiten der Fließgrenze bei Vorhandensein einer Mindestschubspannung einsetzt (plastisches Fließen), siehe /12/. Negative Auswirkungen hätte diese Stoffeigenschaft insbesondere bei engem Porenkanalradius mit niedriger Durchtrittsgeschwindigkeit.

3 Material und Methodik

Im Rahmen eines Forschungsprojektes wird an der Universität Hohenheim die Vergärung von stapelbaren Feststoffen in diskontinuierlich betriebenen Feststoffvergärungsanlagen mit Intervall-Berieselung untersucht. Hierzu wurden Versuchsreihen hauptsächlich im Labor aber auch in Kombination von Labor- und Praxisversuchen durchgeführt, um Bedingungen zu identifizieren, die einen sicheren Anlagenbetrieb bei unterschiedlichen Substraten ermöglichen.

Für Untersuchungen im Labormaßstab wurde ein Feststoffvergärungslabor mit 10 Testfermentern aufgebaut. **Abbildung 1** zeigt in schematischer Darstellung einen Reaktor.

Im Fermenter wird der Feststoff auf einem Lochblechboden aufgestapelt. Um ein dünnflüssiges Prozesswasser zu gewährleisten, durchströmt die durchsickernde Flüssigphase ein auf dem Lochblechboden aufgespanntes Feinsieb mit einer Maschenweite von 1,9 x 1,4 mm. Die Verrieselung über dem Feststoff erfolgt über ein Verteilerkreuz, das mit 2,5 mm Bohrlöchern perforiert wurde. Nach Voruntersuchungen beim Testen des Prototyps

wurden die Bohrlöcher seitlich an den vier Verstrebungen des Verteilerkreuzes angebracht (beidseitig). Weitere Details zu Aufbau und Betrieb des Labortestsystems sowie zu eingesetzten Analysemethoden wurden veröffentlicht /13/14/15/16/.

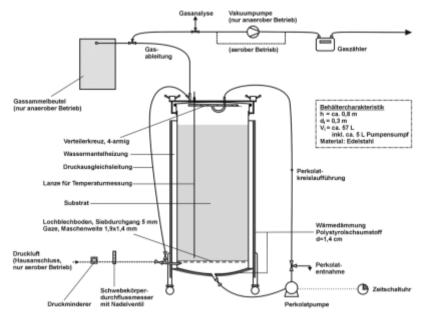


Abb. 1: Laborreaktor zur Fermentation von aufgestapelten Feststoffen

Beim Einbau des Versuchsgutes wurde nach einer vereinfachten Viertelungsmethode vorgegangen (Verzicht auf Mischung gegenüberliegender Viertel). Nach gründlicher Durchmischung der Einzelfraktion auf einer ebenen Fläche wurde der Materialstapel vertikal geviertelt. Der Einzelquadrant wurde erneut sorgfältig durchmischt und dann nach Bedarf wiederum in vier Teile aufgeteilt, bis die gewünschte Teilmenge erreicht war. Auf diese Weise wird eine weitgehende Homogenisierung im Versuchsgut sowie eine der Ursprungsgewichtung entsprechende Verteilung von Einzelfraktionen wie Fein- und Grobfraktion auf die Endproben erreicht. Anschließend wurden die Einzelfraktionen entsprechend der vorgesehenen Zusammensetzung der Zielmischung zusammengeführt und sorgfältig von Hand durchmischt.

Die Laborfermenter wurden auf 35 °C temperiert. Standardmäßig wurde zweimal pro Tag à 15 min perkoliert. Von jeder Versuchsvariante wurden grundsätzlich zwei Parallelen betrieben. Gaserträge von Frischmaterialien in Mischungen wurden rechnerisch bestimmt. Hierzu wurde das Altmaterial ebenfalls getrennt vergoren, so dass aus den gemessene Gasausbeuten der Mischung unter Berücksichtigung der Gaserträge aus Altmaterial auf den Ertrag des Frischmaterials zurückgerechnet werden kann, siehe /14/17/18/.

Die Praxisanlage, an der Versuche durchgeführt wurden, ist in **Abbildung 2** schematisch dargestellt. Sie wurde hauptsächlich zur Vergärung von Grünschnitt aus kommunaler Sammlung errichtet. Die Anlage besteht aus vier garagenförmigen Fermentern mit einem Nutzvolumen von jeweils ca. 100 bis 110 m³. Der Feststoff wird im Fermenter mit Hilfe eines Radladers aufgestapelt und während des Fermentationsprozesses diskontinuierlich mit Prozesswasser übersprüht (perkoliert). Das Sickerwasser aller vier Fermenter wird einem gemeinsamen Perkolattank zugeführt und erneut zur Berieselung eingesetzt. Ausführlichere Beschreibungen der Anlage sind in früheren Veröffentlichungen zu finden /13/14/17/. Die Anlage wurde von Dezember 2003 bis Dezember 2005 betrieben.

Die Bewertung von Praxisversuchen bei diesem Anlagentyp anhand der aus einem Fermenter austretenden Biogasmenge ist schwierig und mit großen Unsicherheiten behaftet. Hauptgründe hierfür sind:

- Abführen eines nur schwer quantifizierbaren Teils der Organik aus der Feststoffschüttung über die austretende Flüssigphase mit teilweisem Abbau im Perkolattank sowie teilweisem Abbau in anderen Gärboxen, ebenso Abbau von Fremdorganik aus benachbarten Fermentern durch Eintrag über die Perkolationsflüssigkeit (Vernachlässigung des aus der Feststoffschüttung ausgetragenen Organikanteils führt insbesondere bei schnell hydrolysierbarem Material zu deutlicher Unterschätzung der Gasproduktion aus dem Feststoff)
- generelle Schwierigkeiten zur genauen Mengenerfassung auf Grund von fehlendem geeignetem Messgerät insbesondere für die im Vergleich zur Flüssigvergärung geringen und durch den Batch-Betrieb stark schwankenden Teilströme aus der Einzelbox
- ungenaue Trennung der Gasflüsse aus den Einzelboxen sowie dem Perkolattank durch unterschiedliche Durchflussraten aus den Einzelkompartimenten mit daraus resultierenden unterschiedlichen Vor-

drücken an Gaskreuzungspunkten, Veränderungen der Gasableitung bei vollem oder leerem Gasspeicher in Abhängigkeit des BHKW-Betriebs sowie Beeinflussung der Gasabführung durch die diskontinuierliche Perkolation (Beeinflussung der kompressiblen Gasphase im Feststofffermenter durch die rasch eintretende und langsam ablaufende Flüssigphase sowie Veränderungen des Gasvolumens im Perkolattank auf Grund kurzfristiger Druckausgleichsbestrebungen bei Betrieb der Perkolatpumpe)

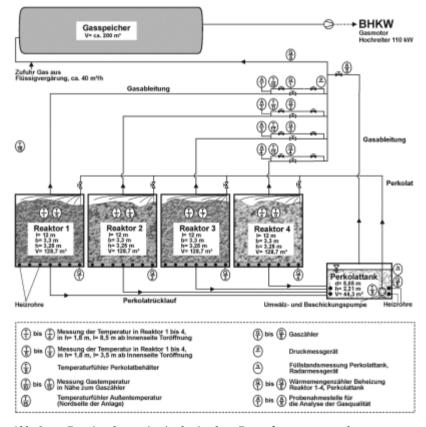


Abb. 2: Praxisanlage mit vier berieselten Boxenfermentern und Mischung der Flüssigphasen in einem gemeinsamen Perkolattank (Mischberieselung)

Während im Laborversuch die Gasproduktion des durchgeführten Versuchs sicher bestimmt und damit bewertet werden kann, wurde bei den nachfolgend dargestellten Ergebnissen die Gasproduktion in der Praxis nicht bewertet. Bei den diskutierten Praxisversuchen wurde ein dreidimensionales Profil der Gehalte an organischer Trockensubstanz (oTS) im Gärrückstand der Feststoffschüttung erstellt. Die Bewertung zur Güte der Vergärung im Praxismaßstab ergibt sich somit durch Beurteilung der Einzeldaten im Profil sowie durch Vergleich mit den entsprechenden Laborergebnissen bekannten Restorganikgehalt nach gelungener weitgehender Ausgärung des Materials.

4 Ausgewählte vorläufige Ergebnisse

Im Berieselungsverfahren ist es anzustreben, dass der Substratstapel tatsächlich von Prozesswasser durchsickert werden kann. Nach den Überlegungen entsprechend Gleichung 1 muss hierfür zum einen das Prozesswasser möglichst niedrigviskos und ohne hohe Konzentrationen an abfiltrierbaren Partikeln sein, zum anderen muss der Feststoff eine geeignete Struktur aufweisen. Bei Versuchen zur Vergärung von Rindermist konnte der Gasertrag aus dem Mist innerhalb von sechs Wochen um ca. 50 % gesteigert werden, indem der Festmist vor dem Eintrag in den Fermenter mit 50 Vol.-% Strukturmaterial gemischt wurde /14/18/. Hierbei spielte es keine Rolle, ob als Strukturmaterial frischer oder vergorener Grünschnitt (mit hohem Holzanteil, gehäckselt) eingesetzt wurde.

Um einer zu starken Versäuerung der Charge entgegenzuwirken, kann das Frischmaterial vor dem Eintrag in den Fermenter mit bereits vergorenem Altmaterial gemischt werden. Entstehende Säuren, die im Batch-Verfahren je nach Eigenschaften des Substrates in größerem Umfang zu Beginn des Prozesses freigesetzt werden, können so durch bereits vorhandene Methanbakterien zu Biogas abgebaut werden. Zu niedrige Mengen an Impfsubstrat führen zu einer länger andauernden Versäuerungsphase und entsprechend zu einer gehemmten Methanproduktion in diesem Zeitraum. Während bei der Vergärung von Festmist mit geringen Mengen Altmaterial gearbeitet werden kann, muss bei der Vergärung von energiereichen Stoffen ein hoher Anteil an Gärrest zugemischt werden, siehe Tabelle 1. Bei der Nutzung von energiereichen Stoffen steigt damit die Energiedichte im Fermenter nur bedingt. Umfangreiche Untersuchungen

zu zweckmäßigen Impfmaterialverhältnissen für verschiedene Substrate wurden von der Arbeitsgruppe Linke am Institut für Agrartechnik Bornim durchgeführt /19/.

Es ist grundsätzlich möglich, versäuerte Fermenter durch die gezielte Zugabe von Kalk zu stabilisieren. Bei Untersuchungen im Rahmen des Forschungsprojektes setzte die mikrobielle Aktivität der Methanbakterien in versäuerten Fermentern nach gezielter Anhebung des pH-Wertes rasch ein und hohe Fettsäuregehalte von ca. 35.000 ppm wurden innerhalb von etwa vier Wochen vollständig abgebaut /16/.

Tabelle 1: Experimentelle Ergebnisse zum notwendigen Altmaterialanteil zur Herstellung gärfähiger Mischungen für verschiedene Feststoffe (Laborversuche, 35 °C)

Substrat	erforderlicher Anteil an Altmaterial (in Gew% TS)
Rinderfestmist	0 %, jedoch Steigerung der Gasausbeute durch Strukturmaterial
Pferdemist mit Stroheinstreu	10 bis 20 %
Grassilage	ca. 70 %
Maissilage	ca. 70 %

Unter optimierten Bedingungen konnten bei der Vergärung von Grasund Maissilage in der Feststoffvergärung im Labor Methanausbeuten erzielt werden, die auf dem Niveau der Flüssigvergärung liegen /14/16/. Um die erreichbare Güte der Vergärung im Praxismaßstab zu bestimmen, wurde entsprechend Ergebnissen im Labormaßstab eine optimale Gärsubstratmischung aus 25 Gew.-% (bezogen auf TS) Maissilage und 75 Gew.-% Altmaterial in Form von vergorenem Grünschnitt (mit hohem Holzanteil) aus kommunaler Sammlung bereitgestellt. Die Mischung wurde parallel sowohl im Labor- wie im Praxisversuch vergoren. Abbildung 3 zeigt die Restorganikgehalte im jeweiligen Gärrest.

Ebenso wie im Laborversuch verlief die Vergärung unter Praxisbedingungen über die gesamte Feststoffschüttung gleichmäßig und umfassend. Die Restorganikgehalte bei Ausbau des Labor- und des Praxisversuchs lagen in ähnlicher Höhe. Die Streuung der Messergebnisse im Praxisversuch ist als gering zu klassifizieren. Auch zeigte sich keine Tendenz der oTS-Gehalte über die Höhe der Substratschüttung. Somit wurde ein räumlich gleichmäßiger und zufrieden stellender Gärerfolg erreicht.

Nicht optimierte Substratmischungen zeigten hingegen in Praxisversuchen über die Höhe der Schüttung eine ungleichmäßige Vergärung sowie eine Tendenz zum Ausbilden versäuerter Teilbereiche mit entsprechend hohen lokalen Fettsäurekonzentrationen im Gärrest nach mehreren Wochen Gärzeit (noch nicht veröffentlichte Untersuchungsergebnisse). Hierbei waren jedoch die Fettsäuregehalte der aus der gesamten Schüttung austretenden Sickerflüssigkeit nicht mehr mit Fettsäuren belastet, d. h. die vorhandenen Fettsäuren aus den lokalen Problembereichen wurden offensichtlich während der diskontinuierlichen Berieselung nicht mehr in größerem Umfang ausgespült.

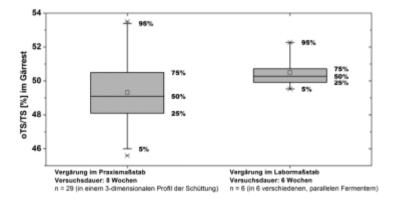


Abb. 3: Restorganikgehalte des Gärrestes einer unter Praxis- und Laborbedingungen (35 °C) vergorenen optimalen Substratmischung aus 25 Gew.-% (bezogen auf TS) Maissilage und 75 Gew.-% strukturreichem Altmaterial

Um eine vollständige Vergärung zu gewährleisten, sollte entsprechend den bisherigen Versuchsergebnissen bei diesem Verfahren im Praxismaßstab ein Substrat bereitgestellt werden, das in der Mikrostruktur eine in sich gärfähige Beschaffenheit aufweist, d.h. ein Substrat, das nicht nur über die Gesamtheit des Fermenters Gärtätigkeit zeigt, sondern das auch in der kleinräumigen Struktur gärfähig ist. Dies verdeutlichen weitere Ergebnisse, nach denen eine sorgfältige Durchmischung der Einzelkomponenten und damit ein hoher Homogenisierungsgrad des eingebrachten Gärgutes angestrebt werden sollten. Abbildung 4 zeigt Ergebnisse aus

einem Laborversuch, bei dem in der einen Variante die Einzelfraktionen standardmäßig sorgfältig durchmischt wurden (Kapitel 3) und in der anderen Variante aber in Schichten eingebaut wurden.

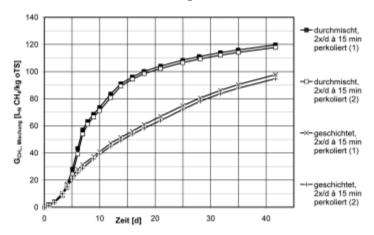


Abb. 4: Einfluss des Durchmischungsgrades von Einzelkomponenten auf den Methanertrag einer Mischung mit 15 Gew.-% (bezogen auf TS) Maissilage in Laborversuchen (35°C)

Im Vergleich zu einem Einbau der Fraktionen in Schichten führte eine sorgfältige Durchmischung von Maissilage und Altmaterial im Laborversuch zu einer höheren Methanproduktion innerhalb von 6 Wochen. Entsprechend war die Gasproduktionsrate nach 6 Wochen aus dem geschichteten Material höher als aus dem durchmischten, d. h. der Ausfaulgrad war bei dem geschichteten Ansatz niedriger. Prozesswasseranalysen (pH, Fettsäuren) der beiden Versuchsvarianten lieferten hingegen keine Hinweise auf eine verzögerte Methanisierung, d.h. die aus der Frischmaterialschicht freigesetzte Organik wurde durchaus in der Altmaterialschicht entsprechend umgesetzt.

Zur Durchmischung verschiedener Komponenten hat sich beim Betrieb der Praxisanlage der Einsatz eines Mietenumsetzgerätes, wie es in der Kompostiertechnik zum Einsatz kommt, bewährt. Hierzu wurde auf der Kompostplatte vor der Anlage eine Miete aus den entsprechenden Einzelfraktionen aufgesetzt und mit dem Mietenumsetzgerät sorgfältig durchmischt, siehe /17/. Vor dem Eintrag in den Fermenter wurde die

Substratschüttung etwa einen Tag vorkompostiert, um eine Selbsterwärmung des Materials auf das angestrebte Temperaturniveau der Vergärung zu erreichen. Bei nicht vorgewärmtem Material war das Anheben der Temperatur im Fermenter mittels Fußbodenheizung und erwärmtem Perkolat problematisch.

5 Nachwachsende Rohstoffe

Insbesondere in der Landwirtschaft aber gegebenenfalls auch im kommunalen Bereich ist das Interesse am Einsatz von Nachwachsenden Rohstoffen (NaWaRos) hoch, da der entsprechend hergestellte Strom bei der Einspeisung ins Netz gemäß dem derzeitigen EEG besonders vergütet wird.

Dabei sind NaWaRos gekennzeichnet durch hohe Bereitstellungskosten hauptsächlich in Form von Anbau- und Konservierungskosten, so dass in höherem Maße als bei der Nutzung von Abfallstoffen für einen wirtschaftlichen Einsatz von Energiepflanzen eine gleichmäßige und vollständige Ausnutzung des Energieinhaltes erforderlich ist. Ergebnisse des durchgeführten Forschungsprojektes zeigen, dass in der Feststoffvergärung grundsätzlich die gleichen Gasausbeuten wie in der Flüssigvergärung erzielt werden können, wenn die Rahmenbedingungen optimal eingestellt sind. Beim Einsatz von Boxenfermentern mit diskontinuierlicher Berieselung wirken sich die charakteristischen Eigenschaften typischer NaWaRos wie Gras- oder Maissilage zum Teil eher negativ aus:

- relativ geringe Struktur
- hohe Energiedichte
- schnelle Hydrolysierbarkeit

Zur Vergärung in aufgestapelter Form und bei diskontinuierlicher Berieselung ist die Zugabe von hohen Mengen an Altmaterial sowie auch von Strukturmaterial erforderlich, um der Neigung zum Verklumpen und Versäuern vorzubeugen. Im Gegensatz dazu sind die genannten stofflichen Eigenschaften in kontinuierlich betriebenen Verfahren von Vorteil. Damit sind diese Substrate optimal zum Einsatz in klassischen Flüssigvergärungsanlagen oder auch in kontinuierlich betriebenen Verfahren, die gegebenenfalls auch unter Verzicht der Zugabe von Fremdflüssigkeit bei erhöhten TS-Gehalten unter Durchmischen des Gärgutes vergären.

Verfahren, die darauf abzielen, entstehende Säuren aus einer Festbettschüttung gezielt abzuführen (siehe Abschnitt 6), sind grundsätzlich auch für NaWaRos möglich. Bei Verfahrensalternativen, die darauf abzielen, Säuren in älteren Feststoffschüttungen abzubauen, sollte jedoch berücksichtigt werden, dass (entsprechend von Kraft /11/ ausgeführten Überlegungen) bei NaWaRos nach längerer Gärzeit durch Setzungs- und Abbauprozesse nicht notwendigerweise eine in größerem Umfang als Abbaukörper nutzbare Altmaterialschüttung übrig bleibt, während bei strukturreichen Materialien mit einem hohen Anteil an anaerob nicht umsetzbaren Komponenten weiterhin ein für den Abbau von Fremdorganik nutzbarer Altmaterialstapel vorhanden ist.

6 Verfahrensalternativen mit berieselten Feststoffschüttungen

Die Gefahr einer zu ausgeprägten Versäuerung kann vermindert werden, indem entstehende Säuren gezielt abgeführt werden. Der Anteil an Frischmaterial kann dann entsprechend höher sein, gegebenenfalls kann vollständig auf Gärrest verzichtet werden. Nachfolgend genannte Verfahren am Markt kommen bisher im kommunalen Bereich zum Einsatz.

Im Rahmen einer Kreuzberieselung (SEBAC-System /20/, Mehrkammer-ATF-Verfahren /21/) wird Prozesswasser aus versäuernden Reaktoren abgeleitet und über ältere Fermenter verrieselt, während Flüssigkeit aus älteren Fermentern zu neu angesetzten Reaktoren geführt wird. Die Abstimmung der Kreuzberieselung sowie die Umschaltung zwischen fremdund eigenberieselten Fermentern erfordern eine gewisse Prozesskontrolle und -steuerung, so dass in einfachen landwirtschaftlichen Anlagen die Umsetzung anspruchsvoll erscheint.

Bei einer Mischberieselung wird Prozesswasser aus allen Fermentern in einem gemeinsamen Perkolattank aufgefangen. Nach teilweisem Abbau der Fettsäuregehalte im Flüssigtank wird das Mischperkolat auf alle Fermenterinhalte verrieselt, wobei in den älteren Fermentern ein Abbau der eingespülten Fremdorganik stattfindet. Die Mischberieselung wurde bei der im Projekt untersuchten Praxisanlage (Abbildung 2) umgesetzt. Offensichtlich kommt die Mischberieselung auch bei den am Markt angebotenen Verfahren von Loock und Bekon zum Einsatz. Allerdings wird hier in der Regel die Bezeichnung Kreuzberieselung angewandt.

Andere Verfahren zielen darauf ab, Organik in einer Hydrolyse- und Versäuerungsstufe aus dem Feststoff zu extrahieren und alleine die angereicherte Flüssigphase in Hochleistungsreaktoren zu vergären. Die Hydrolysestufe kann als volldurchmischter Reaktor mit Fest-/Flüssigtrennung oder als Perkolationsreaktor ausgeführt sein. Unter den Perkolationsreaktoren gibt es am Markt aerobe und anaerobe Typen, z. B. das Biopercolat-Verfahren /22/, das ISKA-Verfahren /23/ oder das AN-Verfahren /24/. Aerob betriebene nutzen aus, dass Hydrolyse und Versäuerung unter Luftzutritt wesentlich schneller stattfinden. Eine Übersicht der Entwicklung von anaeroben hin zu aeroben Verfahren findet sich in /23/. In der eigentlichen Methanbildungsstufe werden Hochleistungsreaktoren eingesetzt, in denen gezielt hohe Biomassekonzentrationen angesiedelt werden /25/. Dabei erreichen Wirbelbett-Reaktoren die höchsten Raum-Zeit-Ausbeuten, erfordern jedoch langwierige Anfahrphasen und sind eher für niedrig belastete Zuläufe (CSB < 10.000 mg/L) geeignet. Für sehr organikreiche Zuläufe eignen sich Festbett-Reaktoren am besten. Sie können mit CSB-Konzentrationen bis zu 40.000 mg/L im Zulauf betrieben werden und zeigen sich auch gegenüber organischen Stoßbelastungen robust. Jedoch ist im Langzeitbetrieb das Risiko der Verstopfung durch Feststoffe hoch, so dass beim Einsatz im Abwasserbereich eine Vorklärung erforderlich ist /26/.

Sollen Verfahren weiterentwickelt und eingesetzt werden, die mit berieselten Feststoffschüttungen arbeiten, so ist zu berücksichtigen, dass sich auch eine intensivierte Berieselung nur dann vollständig positiv auswirkt, wenn der gesamte Substratstapel durchströmt werden kann und Säuren aus der gesamten Substratmatrix ausgetragen werden. Bei Verfahren ohne Durchmischung der Festphase beinhaltet dies zum einen, dass die Durchlässigkeit über die gesamte Höhe des Substratstapels gewährleistet sein muss und zum anderen, dass sich keine dominant bevorzugten Sickerwasserkanäle ausbilden. Als mögliche Alternative zu einer Berieselung sollte eine permanente oder diskontinuierliche Flutung des Feststoffs erwogen werden, insbesondere wenn Verfahren entwickelt werden, die auf eine schnelle und vollständige Hydrolyse der Einsatzstoffe abzielen.

7 Zusammenfassung und Ausblick

Bei der Vergärung von Feststoffen in diskontinuierlich betriebenen Boxenfermentern mit Berieselung besteht unter Praxisbedingungen auf Grund der fehlenden Durchmischung und der über die Höhe der Festkörperschüttung variierenden Bedingungen eine erhöhte Gefahr der Ausbildung von Totzonen und somit eines ungleichmäßigen Gärprozesses. Nach Ergebnissen der Universität Hohenheim ist auch unter Praxisbedingungen bei der Batch-Vergärung in Boxenfermentern mit diskontinuierlicher Berieselung die gleichmäßige und hochwertige Vergärung möglich, wenn optimal vorkonditioniertes Substrat bereitgestellt wird, das auch in der kleinräumigen Struktur gärfähig ist. Dies erfordert die Zugabe einer entsprechend hohen Menge an Altmaterial sowie gegebenenfalls von Strukturmaterial und eine sorgfältige Durchmischung der Einzelkomponenten. Hierzu müssen jedoch bei der Vergärung von NaWaRos hohe Mengen (bis zu 70 %) Gärrest zurückgemischt werden, so dass das Verfahren für diese Einsatzstoffe an Attraktivität einbüßt.

Neben Entwicklungen hin zu kontinuierlich betriebenen Feststoffvergärungsverfahren sind Forschungsansätze vorhanden, die erforderliche Menge an Altmaterial bei der diskontinuierlichen Vergärung auch für NaWaRos zu verringern, indem entstehende Säuren gezielt abgeleitet werden. Dabei können diese einer getrennten Flüssigvergärung zugeführt, über ältere Feststofffermenter verrieselt oder zunächst einem gemeinsamen Tank zugeleitet und nach partieller Vergärung über alle Fermenter verrieselt werden. Eigene Versuche (bisher unveröffentlichte Ergebnisse) sowie Untersuchungen anderer Forschungsgruppen /27/28/ im Labormaßstab zeigen interessante Ansätze auf. Jedoch sollten entsprechende Verfahrenskonzepte auf Effizienz für verschiedene Substrate sowie unter Praxisbedingungen überprüft werden.

In weit größerem Maße als bei der Vergärung von Abfallstoffen ist beim Einsatz von Energiepflanzen das Auftreten von Totzonen zu vermeiden, so dass alternative Verfahrenskonzepte im Hinblick auf die Gleichmäßigkeit und Vollständigkeit des Organikabbaus insbesondere unter Praxisbedingungen überprüft werden sollten. So ist beispielsweise zu untersuchen, ob zum gleichmäßigen Herauslösen von Organik aus Frischmaterial sowie zum Durchleiten von Prozesswasser durch ältere Feststoffe bei Schüttungen mit mehreren Metern Höhe die Zugabe von Strukturmaterial unterstützend wirken muss.

Die Entscheidung für eine Verfahrensalternative sollte primär von den zur Verfügung stehenden potenziellen Einsatzsubstraten abhängig gemacht werden. So können sich charakteristische Eigenschaften verschiedener Materialien in verschiedenen Prozesstypen als Vor- oder aber als Nachteil auswirken. Nicht jedes theoretisch vergärbare Substrat liefert daher in jedem Verfahren notwendigerweise ein ähnlich gutes Ergebnis. Bei der Entscheidung für den Einsatz eines Verfahrensgrundtyps sowie bei weiteren Prozessentwicklungen sollten spezifische stoffliche Eigenschaften der verschiedenen potenziellen Einsatzmaterialien gezielt als Stärke ausgenutzt anstatt als limitierender Faktor in Kauf genommen werden. Leicht hydrolysierbare, energiereiche Stoffe mit wenig Struktur wie Mais- oder Grassilage eignen sich sehr gut für eine kontinuierliche Vergärung. Für diskontinuierlich betriebene Boxenfermenter mit Berieselung eignen sich hingegen eher strukturreiche Materialien wie Grünschnitt oder Festmist mit hohem Strohanteil. Jedoch ist die Energieausbeute hierbei eher gering. Im Hinblick auf die Erhöhung der Gasausbeuten bei gegebenem Reaktorvolumen erscheint ein gezieltes Mischen energiereicher und strukturreicher Fraktionen positiv /29/. So ist beispielsweise die Mischung von Maissilage mit Grünschnitt mit hohem Holzanteil aus kommunaler Sammlung eine mögliche Kombination.

Danksagung

Das an der Universität Hohenheim durchgeführte Forschungsprojekt zur Feststoffvergärung landwirtschaftlicher Biomassen steht unter der Projektträgerschaft des Ministeriums für Ernährung und Ländlichen Raum Baden-Württemberg und ist im Programm Zukunftsoffensive III angesiedelt.

Darüber hinaus bedanken wir uns ganz besonders beim Betreiber der Praxisanlage im Landkreis Sigmaringen für die ausgezeichnete Zusammenarbeit und den unermüdlichen Einsatz bei der Durchführung von zeitraubenden Versuchen sowie auch für die große Bereitschaft zur stets ehrlichen Weitergabe eigener Erfahrungen an uns und insbesondere an Kollegen in der Landwirtschaft.

Literatur

- /1/ Kusch, S.; Oechsner, H.: Trockenfermentation Überblick. In: VDI Wissensforum (Hrsg.): Biogas Energieträger der Zukunft. VDI-Berichte 1872, S. 165-180
- /2/ Weiland, P.: Stand der Technik bei der Trockenfermentation Zukunftsperspektiven. In: FNR (Hrsg.): Trockenfermentation – Evaluierung des Forschungs- und Entwicklungsbedarfs. Gülzower Fachgespräche, Band 23, 2004, S. 23-35
- /3/ Schäfer, W.; Evers, L.; Lehto, M.; Sorvala, S.; Teye, F.; Granstedt, A.: Two phase continuous digestion of solid manure on-farm: Plant design, mass, energy, and nutrient balance. In: Proceedings of 7th FAO/SREN-Workshop "The future of biogas for sustainable energy production in Europe", held 30 Nov 2 Dec 2005 in Uppsala, Sweden
- /4/ Bilitewski, B.; Dornack, C.; Gehring, M.: Die Bedeutung der anaeroben Verfahren in Deutschland. In: Bilitewski, B.; Werner, P.; Rettenberger, G.; Stegmann, R.; Faulstich, M. (Hrsg.): 4. Fortschrittsbericht Anaerobe biologische Abfallbehandlung Neue Entwicklungen-. Technische Universität Dresden: Beiträge zu Abfallwirtschaft/ Altlasten, Band 32, 2004, S. 1-10
- /5/ Neumüller, O.-A.: Römpps Chemie-Lexikon. Stuttgart: Franckh'sche Verlagshandlung, W. Keller & Co., 7. Auflage, Band 1-6, 1974/1976
- /6/ Reuss, M.: Skriptum (und Mitschriften) zur Vorlesung "Bioreaktionstechnik". Universität Stuttgart, Institut für Bioverfahrenstechnik, Stand 1999
- /7/ Reuss, M.: Skriptum (und Mitschriften) zur Vorlesung "Einführung in die Bioverfahrenstechnik". Universität Stuttgart, Institut für Bioverfahrenstechnik, Stand 1998
- /8/ Weber, B.: Gas- und Wasserhaushalt von Deponien. In: Abfallwirtschaftsjournal, 5/1993, Nr. 1, S. 29-33
- /9/ Kaltenbrunner, W.: Biologische in-situ-Sanierung mit Hilfe des Bio-Puster-Verfahrens am Fallbeispiel Feldbach. Diplomarbeit am Institut für Entsorgungsund Deponietechnik der Montanuniversität Leoben, Österreich, 1999
- /10/ Kraft, E. (Bauhaus-Universität Weimar): Angaben im Vortrag, in der Diskussion zum Vortrag und im persönlichen Gespräch anlässlich des "Fachgesprächs Trockenfermentation" bei der FNR in Gülzow am 15.02.2006
- /11/ Schwarz, M.; Fuchs, S.; Hahn, H. H.: Mikrobielle Kolmation und Dekolmation in Bodenfiltern. In: Wasser und Abfall 5, Heft 10/2003, S. 20-23
- /12/ Jungbluth, T.; Büscher, W.; Krause, M.: Technik Tierhaltung Grundwissen Bachelor. Verlag Eugen Ulmer, Stuttgart, 2005
- /13/ Kusch, S.; Oechsner, H.: Vergärung landwirtschaftlicher Substrate in Feststofffermentern. In: FNR (Hrsg.): Trockenfermentation – Evaluierung des Forschungs- und Entwicklungsbedarfs. Gülzower Fachgespräche, Band 23, 2004, S. 105-113
- /14/ Kusch, S.; Oechsner, H.; Jungbluth, T.: Vergärung landwirtschaftlicher Substrate in diskontinuierlichen Feststofffermentern. In: Agrartechnische Forschung 11, Heft 4/2005, S. 81-91

- /15/ Kusch, S.; Morar, M. V.; Oechsner, H.; Jungbluth, T.: Research on the production of biogas in solid-phase digestion systems using agricultural substrates.
 In: Buletinul USAMV-CN 61/2005, ISSN 1454-2382, University of Agricultural Sciences and Veterinary Medicine, Cluj-Napoca, Romania, S. 289-294
- /16/ Kusch, S.; Oechsner, H.: Jungbluth, T.: Biogas production in discontinuously operated solid-phase digestion systems. In: Proceedings of 7th FAO/SREN-Workshop "The future of biogas for sustainable energy production in Europe", held 30 Nov 2 Dec 2005 in Uppsala, Sweden
- /17/ Kusch, S.; Oechsner, H.: Feststoffvergärung im Batchverfahren erste Versuchsergebnisse. In: ALB Baden-Württemberg (Hrsg.): Tagungsband zur Fachtagung "Landtechnik und Landwirtschaftliches Bauwesen 2005" am 17./18.02.2005 in Stuttgart-Hohenheim, S. 61-70
- /18/ Kusch, S.; Oechsner, H.: Feststofffermentation landwirtschaftlicher Substrate im Batch-Betrieb. In: KTBL (Hrsg.): Tagungsband "7. Tagung: Bau, Technik und Umwelt in der landwirtschaftlichen Nutztierhaltung 2005". Fachtagung am 01.-03.03.2005 in Braunschweig, S. 361-366
- /19/ Linke, B.: Substrateinsatz bei der Trockenfermentation Einschätzung des F+E-Bedarfs. In: FNR (Hrsg.): Trockenfermentation – Evaluierung des Forschungs- und Entwicklungsbedarfs. Gülzower Fachgespräche, Band 23, 2004, S. 36-48
- /20/ O'Keefe, D. M.; Chynoweth, D. P.; Barkdoll, A. W.; Nordstedt, R. A.; Owens, J. M.; Sifontes, J.: Sequential batch anaerobic composting of municipal solid waste (MSW) and yard waste. In: Cecchi, F.; Mata-Alvarez, J.; Pohland, F.G. (Hrsg.): Anaerobic digestion of solid waste (Proceedings of the International Symposium on Anaerobic Digestion of Solid Waste, held in Venice, Italy, 14-17 April 1992). Water Science & Technology, Vol. 27, No. 2, 1993, S. 77-86
- /21/ Leikam, K.; Stegmann, R.; Arndt, M.; Bade, O.: Konzepte für die anaerobe Feststoff-Fermentation – Mehrkammer ATF-Verfahren. In: Tagungsband "Technik anaerober Prozesse", Tagung an der TU Hamburg-Harburg vom 7.-9.10.1998, S. 231-244
- /22/ Wehrle Werk AG (Fa.): Biopercolat® Mechanisch-biologische Abfallbehandlung für flexible und wirtschaftliche Entsorgungskonzepte. Informationsschrift der Firma Wehrle Werk AG, URL www.wehrle-werk.de, Datum des Zugriffs: 22.03.2004
- /23/ Santen, H.; Seifermann, T.: Untersuchungen zur Vorbehandlung von Abfällen vor der Vergärung mittels Perkolation nach dem ISKA®-Verfahren.
 In: Wiemer, K.; Kern, M. (Hrsg.): Witzenhausen-Institut Neues aus Forschung und Praxis: Bio- und Restabfallbehandlung VII, Fachbuchreihe Abfall-Wirtschaft des Witzenhausen-Instituts für Abfall, Umwelt und Energie, 2003
- /24/ Westphal, W.: Das AN-Verfahren in Oldenburg. In: Wiemer, K.; Kern, M. (Hrsg.): Grundlagen und Verfahren der Anaerobtechnik. Fachbuchreihe Abfall-Wirtschaft, Neues aus Forschung und Praxis, Institut für Abfallwirtschaft, Witzenhausen, M.I.C. Baeza-Verlag, Witzenhausen, 1994, S. 129-135
- /25/ Lenkeit, D.; Pfeiffer, W.: Vergärung biogener Abfälle. In: Entsorgungspraxis 11/1994, S. 21-27

- /26/ Janke, H. D.: Umweltbiotechnik. Verlag Eugen Ulmer, Stuttgart, 2002
- /27/ Mumme, J.; Linke, B. (Leibniz-Institut für Agrartechnik Bornim): persönliche Gesprächsmitteilungen am ATB Potsdam am 15.02.2006
- /28/ Kausch, J.; Kreidl, A.; Fischer, K.: Vergärung stapelbarer Biomasse in Feststofffermentern. In: Wasser und Abfall 7, Heft 12/2005, S. 43-46
- /29/ Kusch, S.: Vergärung von Grünabfall in landwirtschaftlichen Feststoffvergärungsanlagen. In: Umweltmagazin zur Veröffentlichung eingereicht

Anschrift der Autoren:
Dipl.-Ing. Sigrid Kusch, Dr. sc. agr. Hans Oechsner,
Prof. Dr. Thomas Jungbluth
Universität Hohenheim
Landesanstalt für Landwirtschaftliches Maschinen- und Bauwesen,
Institut für Agrartechnik
Garbenstr. 9
70599 Stuttgart
kuschsig@uni-hohenheim.de

Ergebnisse zum Einfluss physikalischer Feststoffparameter auf die Trockenfermentation von nachwachsenden Rohstoffen

E. Kraft, T. Haupt Bauhaus-Universität Weimar

B. Tscherpel S.I.G. - DR.-ING. STEFFEN GmbH in Mecklenburg-Vorpommern

1 Einleitung

Vor dem Hintergrund einer nachhaltigen Rohstoff- und Energiewirtschaft soll die Trockenvergärungstechnologie all jenen Landwirten den Zugang zur Energiebereitstellung eröffnen, die keine Viehhaltung besitzen. Der Trockenvergärung von nachwachsenden Rohstoffen (NAWARO) kann ein enormes Entwicklungspotential unterstellt werden. Für die Nutzung von Festbetten im Batchbetrieb, als sinnfälligste Verfahrensvariante im landwirtschaftlichen Bereich, existieren derzeit jedoch keine hinreichend gesicherten Daten. Das Verbundprojekt der S.I.G. – DR.-ING. STEFFEN GmbH in Mecklenburg-Vorpommern (S.I.G.-MV) und der Bauhaus-Universität Weimar (BUW) stellt sich dieser Aufgabe und zielt auf die Bereitstellung belastbarer Basisdaten ab. Die Durchführung orientiert sich an den Möglichkeiten des großtechnischen Einsatzes und verbindet produktionsund anwendungsbezogene Forschung und Entwicklung. Es wird zu verallgemeinerungsfähigen Aussagen auf dem Gebiet der Trockenvergärung von NAWARO beitragen.

Der maßgebliche Erkenntniszuwachs erfolgt durch die systematische Untersuchung von Festbetten, bestehend aus NAWARO, mit unterschiedlichen physikalischen Randparametern. Dies schließt eine Charakterisierung der Substrate im Vorfeld ein. Dabei ist insbesondere der an die Ver-

fahrenstechnik/Baustoffkunde angelehnte Ansatz neu, welcher essentiell der Sicherstellung des notwendigen, guten Durchströmungsverhaltens des NAWARO-Festbettes dient. In diesem Punkt unterscheidet sich Trockenvergärung maßgeblich vom nassen Pendant. Es ist eine entsprechende Matrix von physikalischen Feststoffparametern und dem Biogasertrag zu erstellen. Die üblichen biochemischen Parameter sind begleitend zu erheben. Diese Matrix führt in der Folge zur Eingrenzung der technischen Machbarkeit und Sinnhaftigkeit von grundsätzlich vorstellbaren Prozessschritten und -parametern und zeigt die geeigneten Anwendungsfälle klar auf. Darüber hinaus werden durch vergleichende Betrachtungen von Biogasraten gleicher Materialien unter adäquaten physikalischen Festbettrandparameter in den Varianten mit und ohne Perkolation wesentliche Aussagen über die jeweilige Effizienz erwartet (Prozessstabilität, Reaktorraumbelastung, Aufenthaltszeit, Hemmung, Betriebsstörungen). Dies ist für Landwirte als Anwender bzw. Betreiber von immenser wirtschaftlicher Bedeutung.

2 Systemabgrenzung und Methodik

Kontinuierliche Trocken- und Nassvergärungsverfahren benötigen meist aktiv betriebene Misch- oder Rührwerke sowie entsprechend leistungsstarke Pumpen. Neben der kosten- und energieintensiven Betriebsweise wirkt die Leistungsfähigkeit dieser Aggregate begrenzend.

Beispielsweise kann sich der Trockensubstanzgehalt in gerührten Nassfermentationssystemen nur in bestimmten Bereichen bewegen, um sowohl Durchmischung als auch maximale Gaserträge sicherzustellen. Im Falle der Trockenvergärung von NAWARO gilt der Vorzug den diskontinuierlichen respektive batchbetriebenen Verfahren, deren geringe Betriebskosten als Vorteil anzusehen sind. Diese Systeme verzichten zumeist auf eine Homogenisierung der Substrate nach Einbringen in den Reaktor. Es reduzieren sich wartungsintensive, störanfällige Einbauten im Reaktorinnenraum auf ein Minimum. In Abhängigkeit des gewählten Verfahrens kann das dynamische Element durch die Perkolation mit Flüssigkeit ersetzt werden, wodurch sich zweierlei Betrachtungsebenen ergeben [1]:

- 1. Vergärung in Haufwerken mit Perkolation und
- 2. Vergärung in Haufwerken unter Zuhilfenahme von Impfmaterialien.

Als Voraussetzung für den Aufbau der jeweiligen Festbetten dient die bodenphysikalische Substratcharakterisierung ausgewählter NAWARO (Triticale, Stroh, Maisilage, Gras, Apfeltrester sowie Rübe, Raps und Topinambur). Zusätzlich wird Rinderfestmist einer diesbezüglichen Untersuchung zugeführt. Das Vorhandensein eines durch den Deutschen Akkreditierungs-Rates (DAR) akkreditierten Labors nebst Fachpersonal mit langjähriger Erfahrung auf Seiten der S.I.G.-MV prädestiniert das Unternehmen zur Durchführung dieses Kompartiments. Weiterhin obliegen ihr diejenigen Versuche zur Trockenvergärung mit Perkolation. Durch die Integration der Perkolatkreuzlaufführung, einem Bestandteil des 3A-Verfahrens, stärken die Untersuchungen gleichzeitig die qualifizierte Entwicklung eines Demonstrationsverfahrens für diese neuen Substrate. Bezüglich einer weitergehenden Erläuterung des Funktionsprinzips der Kreuzlaufführung wird auf [1] verwiesen. Einen Einblick in die Gestaltung der Laboranlage gewährt Abb. 1.





Abb. 1: Foto links: Perkolatsammeltanks und Pumpenvorrichtung S.I.G.-MV, Foto rechts: Vergärungsreaktoren S.I.G.-MV

Die Bauhaus-Universität Weimar übernimmt die Versuche zur allgemeinen (animpfenden) Trockenfermentation ohne Perkolation. In der Startphase kam ausgegorener Rinderfestmist als Impfmaterial zur Anwendung, welcher in der Folge durch die erhaltenen Gärreste substituiert wurde. Zur Gewährleistung eines stabilen Prozesses wurde, verifiziert durch entsprechende Vorversuche, ein Verhältnis des Impfmaterials zu Frischsubstrat von 2:1 bezogen auf die Trockenmasse gewählt. Eine schematische Darstellung des Versuchsaufbaus, ist in Abb. 2 zu finden.

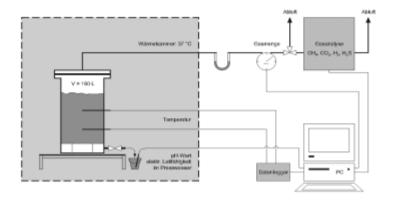


Abb. 2: Schematischer Versuchsaufbau an der Bauhaus-Universität Weimar

Durch die Gleichschaltung des Versuchsaufbaus an beiden Standorten mit jeweils sechs Reaktoren mesophiler Betriebsweise – realisiert über Wärmekammern – und die Verwendung von Materialien gleichen Ursprungs werden die Varianzen zurückgehend auf die unterschiedlichen Verfahrensvarianten limitiert. Eine Aufenthaltszeit im Reaktor von 60 Tagen trägt der Spanne verschiedenster Angaben der Anlagenhersteller zur Verweildauer Rechnung und stellt damit Belastbarkeit der Ergebnisse sicher. Sie ist als Obergrenze fachgerechter Untersuchung ausgelegt und wird von Praxisanlagen zum Teil deutlich unterschritten. Darüber hinaus lassen sich dadurch Aussagen zum Langzeitverhalten und zur Abbaubarkeit der NAWARO sowie zur Wirtschaftlichkeit bezüglich der Vergärung von Monosubstraten tätigen.

3 Ergebnisse und Interpretation

Die im Kommenden dargestellten Ergebnisse stehen für die bisher gewonnenen Erkenntnisse. Die angestrebte Verallgemeinerung soll zum gegenwärtigen Zeitpunkt nicht abgeleitet oder in Anspruch genommen werden, da sich das Projekt noch in der Bearbeitungsphase befindet.

3.1 Substratcharakterisierung

Batchbetriebene Trockenvergärungssysteme müssen zur Sicherung optimaler Gaserträge aus physikalischer Sicht wie folgt angesprochen werden: Es handelt sich um ein Haufwerk (Packung), dessen Aufbau einen maximalen Substratabbau, als auch die Abfuhr des Biogases sicherstellen muss. Damit grenzen sie sich deutlich von anderen Trocken- und auch Nassvergärungsverfahren ab. Bei Perkolationsverfahren muss zudem das Perkolat das Haufwerk zügig und gleichmäßig verteilt durchströmen können. Allein daraus ergibt sich, dass maximale technisch erreichbare Dichten eines Substrates zwar zu einer sehr guten Ausnutzung des umbauten Raumes führen, aber nicht zwangsläufig zu maximalen Biogaserträgen. Der kontinuierliche und störungsfreie Betrieb wird gegenwärtig im Wesentlichen durch den Erfahrungsschatz der Mitarbeiter sichergestellt, da detaillierte Handlungsanweisungen und Bemessungshilfen fehlen.

Das fachliche Neuland birgt die Verführung durch die Annahme sehr hoher Substratdichten Biogaserträge zu prognostizieren, die späterhin nicht realisiert werden können. Es häufen sich Fälle mit unvollständigem Abbau, die mit Prozessstörungen und Geruchsbelästigungen korrespondieren. Laboruntersuchungen von NAWARO können hier als belastbare Vergleichsdaten sehr nützlich sein.

Schüttungen oder Materialpackungen bestehen aus aufeinander gelagerten Einzelpartikeln. Diese dispersen Systeme können geordnet oder ungeordnet vorliegen. Die Lagerung der Partikel wird beeinflusst durch:

- 1. die Eigenschaften und Anteile der Einzelpartikel,
- 2. die Anzahl und Anteile der Phasen und
- 3. den Einfluß äußerer Kräfte.

In Bezug auf ihr Durchflussverhalten sind Materialpackungen durch die, die Lagerung bestimmenden Eigenschaften, aber auch von Eigenschaften die aus der Lagerung resultieren, gekennzeichnet. Untersuchungen zu Charakterisierungsmerkmalen von NAWARO und deren Beeinflussung des Strömungsverhaltens von Fluiden in NAWARO-Packungen sollen einen Beitrag zur sicheren Bemessung und zum geordneten Betrieb von batchbetriebenen Trockenvergärungsanlagen leisten. Dazu müssen definierte Komponenten Berücksichtigung finden, namentlich Material, Packung und Durchströmung. Die Eigenschaften der einzelnen Komponenten verzahnen sich und bestimmen gemeinsam in Korrespondenz mit dem Fluid

das Durchströmungsverhalten. Von besonderem Interesse ist hierbei sowohl die qualitative als auch die quantitative Wirkung der einzelnen Merkmale bzw. Eigenschaften [4]. Parameter, die mit der Komponente Material und deren Eigenschaften zusammenhängen, werden als Charakterisierungsmerkmale erhoben (Tab. 1).

Tabelle 1: Zielparameter zur Untersuchung von Substraten aus strömungstechnischer Sicht

Material	Packung	Durchströmung
Benetzbarkeit	Sättigung	effektiver Porenraum
Wassergehalt	Porenraum	Raum- und Flächenbelastung
Korndichte	Porengrößenverteilung	Verweilzeiten
Korngrößenverteilung	Partikelverteilung	Fluidverteilung
Kornform	Vernetzungsgrad	
spez. Oberfläche	Tortuosität	
Rauhigkeit		

Die in Tab. 1 aufgezählten Beeinflussungen lassen sich in der Praxis bei der Durchführung von Eignungsprüfungen für Baustoffe wiederfinden. So werden in Abhängigkeit des Einsatzzweckes auf Grundlage von Erfahrungen Kornverteilungen und Phasenanteile gewählt, mit praxisrelevantem Energieeintrag verdichtet und anschließend mit Durchströmungsversuchen getestet. Beispiel hierfür sind Eignungsprüfungen von Dichtungselementen im Deponie- und Wasserbau [3].

Für die praktische Anwendung in der Trockenvergärung ist eine geringere Zahl von Parametern von Bedeutung. Herauszuarbeiten sind Systemparameter wie Trocken- und Feuchtdichten sowie ihre Auswirkung auf den Gasertrag, aber auch die Durchlässigkeit. Zur sinnvollen Beeinflussung der Substratzusammensetzung sind Kenntnisse zu Korngrößenverteilungen oder zu Porenräumen erforderlich. Tab. 2 zeigt erste Ergebnisse zu ausgewählten Substraten.

Die Spanne des natürlichen Wassergehalts ist dem jeweiligen Erntezeitpunkt und damit dem Reifegrad des Substrates respektive den differenten Lagerungsrandbedingungen geschuldet. Die Wasserhaltekapazität gibt an, wieviel Wasser das geschüttete Haufwerk maximal halten kann [3].

	Was	licher sser- halt	Wasser- halte- kapazität	Schütt- dichte	Trocken- dichte		ichte tdichte	Durch- lässigkeit
	[%]	FM] max.	[%FM]	[g/cm³]	[g/cm³]	[g/ min.	cm³] max.	[m/s]
Triticale	16,3	67,4	74,0	0,06 - 0,13	0,050 - 0,166	0,22	0,66	5,30 * 10 ⁻⁵
Stroh	8,3	17,9	77,1	0,03	0,025 - 0,120	0,12	0,57	2,12*10 ⁻⁷
Apfeltrester	73,2	78,9	84,5	0,93	0,196 - 0,249	0,90	1,18	5,85 * 10 ⁻⁸
Gras	64,6	87,2	84,9	0,12	0,042 - 0,103	0,46	0,73	4,02 * 10 ⁻⁶ - 7,23 * 10 ⁻⁸
Rinderfestmist	77.0	-	85.9	-	0.19 - 0.20	0.83	0.88	-

Tabelle 2: Ergebnisspanne einzelner Substrate

Die Werte beziehen sich auf Untersuchungen der Substrate mit minimalem Wassergehalt. Tritt ein Überschreiten dieser Werte auf, kommt es zu einem Einstau des Porenraumes. Die maximalen Feucht- und Trockendichten wurden durch Belastungen, adäquat landwirtschaftlicher Geräte, erzielt. Bei Einsatz von Pressen wären höhere Dichten erreichbar, die Ergebnisse hätten allerdings keinerlei praktische Relevanz. Angegebene Durchlässigkeiten sind mehrheitlich den Bereichen mittlerer Feuchtdichte zuzuordnen. K_f -Werte von 10^{-7} – 10^{-8} m/s verkörpern sehr geringe Durchlässigkeiten. Geologische Barrieren von Deponien liegen im Vergleich bei 10^{-7} m/s, mineralische Oberflächenabdichtungen bei 10^{-9} m/s. Die Gefahr von nur teilweise durchströmbaren Bereichen des Haufwerkes kann also nicht vernachlässigt werden. Es ist zu berücksichtigen, dass die Durchlässigkeiten nach DIN 18130 mittels Wasser ermittelt wurden [5]. Allein daraus lässt sich schlussfolgern, dass eine Perkolation mit Gülle keine sinnvolle Herangehensweise darstellt.

Abb. 3 zeigt exemplarisch für das Substrat Triticale die Erreichung unterschiedlicher Feuchtdichten. Bei differenten Wassergehalten und variierter Schnittlänge (Korngröße) wird bei gleichzeitigem Energieeintrag die maximal erreichbare Feuchtdichte gesucht. Der Energieeintrag lässt sich an der Schlagzahl ablesen. Es wird die Anzahl des Fallens eines genormten Fallgewichtes, welches landwirtschaftliches Verdichtungsgerät simuliert, ermittelt. Die Vorgehensweise lehnt sich an den Proctorversuch nach DIN 18127 [6] an. Allerdings ist die Zahl der Schläge dort auf 22 pro eingebauter Schicht festgelegt, der Anwendungsbereich liegt bei bindigen

Böden. Es überrascht nicht, dass die Kombination der kleineren Schnittlänge mit dem höchsten Wassergehalt die höchsten Feuchtdichten erbringt. Zum einen ist die Dichte des Wassers vergleichsweise hoch, zum anderen ermöglichen die kleineren Korngrößen eine dichtere Lagerung in der Packung.

Für Rinderfestmist (RFM) und Kombinationen aus NAWARO und Rinderfestmist wurden klassische Proctorversuche durchgeführt. Dem Ziel dieses Versuches folgend, wurde bei einer Schlagzahl von 22, nach einer optimalen (maximalen) Trockendichte, bei steigenden Wassergehalten gesucht. Für eine Vielzahl von Böden bilden sich typische Glockenkurven aus. Da für die landwirtschaftlichen Anwendungen zunächst eine Vortrocknung der Substrate ausgeschlossen wurde, sind steigende Wassergehalte erst über dem natürlichen Wassergehalten zum Ansatz gekommen.

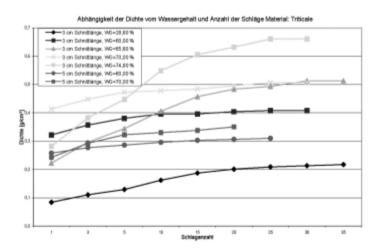


Abb. 3: Feuchtdichten des Substrates Triticale bei unterschiedlichen Wassergehalten und variierter Schnittlänge (Korngröße)

Aus Abb. 4 wird ersichtlich, dass kein nennenswerter Anstieg der Trockendichten in erhöhten Wassergehaltsbereichen zu erreichen war. Es darf geschlussfolgert werden, dass sinnvolle Dichteunterschiede nur bei unterschiedlicher Auflast im Bereich des natürlichen Wassergehaltes zu

berücksichtigen sind. Auch hier wird die Berechnung der flüssigkeitsund gasgefüllten Porenräume von Interesse sein. Dies kann allerdings erst nach Ermittlung der substratspezifischen Korndichten erfolgen.

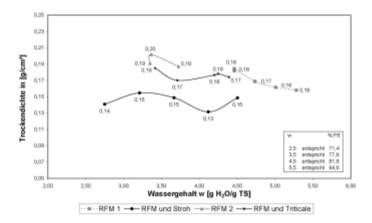


Abb. 4: Ergebnisse der Proctorversuche von Rinderfestmist und Substratgemischen

3.2 Ergebnisse des perkolierten Haufwerkes

Um eine Reduzierung der Datenmengen zu bewerkstelligen, soll an dieser Stelle das Exempel Getreidestroh aus dem Pool der bisherigen Ergebnisse beider Trockenfermentationsversuche herausgegriffen und gegenübergestellt werden. Begründung findet dies in der Tatsache, dass Stroh als Nebenprodukt bundesweit vorhanden ist, in großen Mengen zur Verfügung steht und momentan in geringerem Maße einer energetischen Nutzung zugeführt wird, obschon es diesbezüglich das größte Potential besitzt [7]. Es verkörpert damit einen repräsentativen Vertreter der grundsätzlich zur Trockenvergärung geeigneten Substrate. Als weiteres Argument für die Auswahl lässt sich anführen, dass sich aufgrund der Materialeigenschaften der Prozess stabil gestaltet und somit anschaulicher darzustellen ist.

Aufbauend auf die Substratcharakterisierung wurden differente Einbaudichten realisiert, indem der Wassergehalt des Materials einer Variation unterlag. Dafür fand im Vorfeld des Einbaus eine definierte Wasserzugabe bis hin zum Einstau und anschließendes Abtropfen des Strohs statt. Es

zeigte sich, dass die in den physikalischen Untersuchungen maximal erreichten Dichten nicht reproduzierbar waren, was auf die Federwirkung des Materials in größeren Packungen zurückgeführt werden kann. Die verdichteten Haufwerke wurden dann periodisch vier bis fünf mal am Tag jeweils 10 Minuten perkoliert. Die nachfolgend Graphik (Abb. 5) zeigt die erreichten Gaserträge.

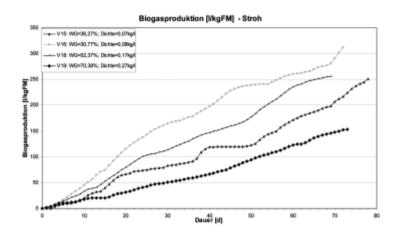


Abb. 5: Summenkurve der Biogasproduktion für Stroh, perkoliert

Die Abbildung unterstützt die Arbeitshypothese, dass sich nicht zwangsläufig mit steigenden Feuchtdichten höhere Gaserträge realisieren lassen. Im Gegenteil, es lässt sich konstatieren, dass mit zunehmender Dichte ein verminderter Gasaustrag zu verzeichnen ist. Dieser aufgrund der Charakterisierung erwartetet Sachverhalt konnte ebenso bei den NAWARO Triticale und Gras nachgewiesen werden. Eine Ausnahme bildet Versuch 15 (V15). Insoweit müssen die weiterführenden Untersuchungen zeigen, ob sich der Trend verfestigt und verallgemeinern lässt.

3.3 Ergebnisse des angeimpften Haufwerkes

Da dieser Verfahrensvariante jegliches dynamisches Element fehlt und an Einflussgrößen während des Gärprozesses nur die Temperatur zur Verfügung steht, ist die Zuhilfenahme von Impfmaterial notwendig. Damit soll von Beginn an ein methangärungsfähiges Gemisch bereitgestellt werden, welches fähig ist, Versäuerungspotentiale aus der frischen Biomasse aufzufangen. In vorliegendem Fall nahm gelagerter Rinderfestmist (RFM) diese animpfende Funktion ein. In Anlehnung an die Literatur [1] sowie auf Basis der Ergebnisse vorangegangener Projekte, fußten die Versuche auf der Annahme, dass gelagerter RFM in der Lage sein sollte, als solches zu fungieren. Die Größenordungen zum Mischungsverhältnis beliefen sich auf 75 % Impfmaterial sowie 25 % Frischsubstrat. Beide Angaben beziehen sich auf die Feuchtmasse. Der Erfahrungsaustausch mit Betreibern großtechnischer Anlagen offenbarte, dass diese Vorgehensweise durchaus von Anlagenherstellern, z. T. auch mit engeren Verhältnissen empfohlen wird.

Entsprechend der Charakterisierung fand der schichtenweise Einbau eines Triticale-Rinderfestmist-Gemisches von in Summe 60 kg pro Reaktor (R) mit standardisiertem Verdichtungsgerät in verformungsstabilen Behältern statt. Parallel wurde der RFM als Referenz angesetzt, um eine Bilanzierung zu gewährleisten. Abb. 6 gibt den Verlauf des zugehörigen Trockenvergärungsversuches bei einer Temperatur von 37 °C wieder.

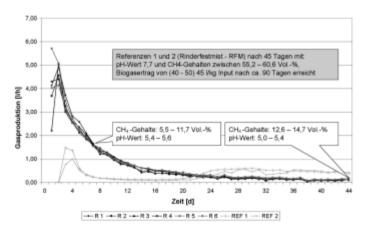


Abb. 6: Gasproduktion respektive Gasbildungsgeschwindigkeit von Triticale mit im Freien gelagertem Rinderfestmist (RFM) als Impfmaterial

Es zeigte sich, dass der reine RFM erst ab einem Zeitpunkt von 25 Tagen akzeptable Methangehalte von > 45 Vol.-% aufwies, demnach eine funktionierende methanogene Mischpopulation ausgebildet hat. Der in der Lite-

ratur angegebene Bereich des spezifischen Biogasertrags mit 40 – 50 Liter pro kg FM [2] wurde nach ca. 90 Tagen erreicht und überschritten, der zugehörige Methangehalt pegelte sich zwischen 55,2 und 60,0 Vol.-% ein. Bei Ausbau des Mistes nach 135 Tagen betrug die Gasausbeute 60,17 Normliter/kg Input.

Damit lässt sich ableiten, das RFM als Monosubstrat oder als puffernder Stabilisator durchaus geeignet ist. Die Aufgabe des Impfmaterials konnte er jedoch im Zuge des vorliegenden Versuches nicht übernehmen. Wie aus den Graphen R1 bis R6 hervorgeht, trat eine irreversible Übersäuerung auf, die in der Folge zum Abbruch des Versuches nach 45 Tagen führte. Inwiefern der RFM zu einem späteren Zeitpunkt imstande gewesen wäre, als Impfmaterial zu dienen, bleibt offen, da es jenseits der wirtschaftlichen und technischen Interessen liegt, vorzuvergären. Schlussfolgernd wurde die explizite Herstellung von geeignetem Impfmaterial für die Startphase angestrebt, welches im späteren Verlauf durch die Gärreste ersetzt wird. Die Überlegung fand unter praxisrelevanten Gesichtpunkten statt und führte zu der Entscheidung, auf Gärreste der Nassvergärung zurückzugreifen. Begründet ist dies in der zur Trockenvergärung umfänglicheren Verfügbarkeit. Basis war wiederum RFM, der in ausgegorene Rindergülle eingestaut wurde. Nach Erreichen einer stabilen Prozessphase wurde diese wieder vom Feststoff abgezogen. Eine Abtropfzeit von zwei Tagen sicherte den Austrag überschüssiger Flüssigkeit. Das verbleibende Impfmaterial kam mit Getreidestroh zur Vermischung. Die zur Abschätzung des Mischungsverhältnisses getätigten Vorversuche ergaben einen optimalen Wert von 0,65 bezogen auf die Trockensubstanz des Materials (TSSubstrat zu TSImpfmaterial). Dieser verkörpert nicht den Grenzwert, sondern den sicheren Bereich, um bei etwaigen Störeinflüssen und anderen Unwägbarkeiten, die Notwendigkeit eines Prozessabbruchs zu verhindern.

Da in den Versuchen mit Triticale die in Abhängigkeit von der Wasserhalt-kapazität zugeführten Wassermengen zur Einstellung der Dichteunterschiede nahezu komplett wieder als Presswasser abgezogen wurden, kam es auch auf diesem Gebiet zur Anpassung. Wie bereits erwähnt, werden nunmehr im Gegensatz zum Perkolationsverfahren nur unterschiedliche Auflasten im Bereich des natürlichen Wassergehaltes zur Dichteeinstellung berücksichtigt. Der Einbau von Stroh erfolgte ansonsten analog der beschriebenen Vorgehensweise. Entsprechende Ergebnisse zum Gasertrag finden sich Abb. 7.

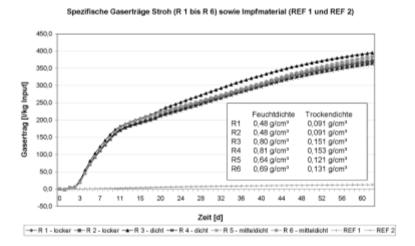


Abb. 7: Spezifische Gaserträge getrennt nach Substrat und Impfmaterial

Die aufgetragenen Graphen geben die erreichten spezifischen Gaserträge in Normliter pro kg Input wieder. Es fällt auf, dass der Literaturwert von 312 l/kg FM [2] in allen Fällen überschritten wird und deutlich höher ausfällt als beim Monosubstrat mit Perkolation. Selbstredend wurden die Referenzwerte bereits herausgerechnet. Die Maximalwerte erreichten sowohl dichte (R3) als auch mitteldichte (R6) Lagerung zum Zeitpunkt des Ausbaus nach 77 Tagen mit 417 l/kg Input bei einem durchschnittlichen Methangehalt von 52,1 Vol.-%. Dahingegen lässt die Interpretation keinen signifikanten Zusammenhang zwischen Dichtevarianz und Gasertrag erkennen, da der Minimalwert ebenfalls bei dichter Lagerung (R4) mit 388 l/kg Input (50,6 Vol.-% CH₄) erreicht wurde. Damit weichen die Ergebnisse von denen des Perkolationsverfahrens ab, können dessen Tendenzen also nicht bestätigen. Allerdings muss erwähnt werden, dass es sich bei Stroh um ein langsam abbaubares Substrat handelt. Es kann vermutet werden, dass in diesem Fall nicht der Gasaustrag, sondern die Verfügbarkeit des Substrates das Kriterium darstellt. Erst Versuche mit Materialien schneller verfügbaren Inhalts und damit höherem Versäuerungspotential und ähnlichen Ergebnissen lassen eine genauere Aussage zu.

4 Forschungsbedarf

Die vorangegangenen ersten Ergebnisse des Projektes haben gezeigt, dass weiterhin Fragen zur Technologie in der landwirtschaftlichen Anwendung offen stehen bzw. in der Tiefe noch nicht ausreichend untersucht wurden. Von übergeordneter Bedeutung ist die Erarbeitung von verallgemeinerbaren Einfahrstrategien, um in praktischen Anlagen lange Anfahrzeiten und damit monetäre Verluste vermeiden zu können. Da diese Startphasen in engem Kontakt mit den zu verwendenden Substraten stehen, sind deren optimale Trockensubstanzgehalte (TS) von Interesse. Gerade für Mischungen mit Impfmaterial in entsprechenden Varianzen ist bisher noch keine hinreichende Anzahl von Grunddaten erhoben worden. Das geht einher mit der Festlegung optimaler Größenverhältnisse der Impfmaterialien. Sollen Anlagen wirtschaftlich betrieben werden, sind weiterführende Betrachtungen zum Größenanteil des im Kreislauf geführten Materials notwendig. Zudem gilt es, Grenzen im Minimum- und Maximumbereich aufzuzeigen.

In der fachlichen Praxis treten vermehrt Fragestellungen zur Betrachtung von Gaserträgen nach Substrataufbereitungen, beispielsweise Pyrolyse, auf. Es ist zu untersuchen, in welchem Rahmen sich der Energieeintrag für solch eine Aufbereitung bewegt, um in Summe positive Effekte zu erzielen. Der erwartete Zugewinn an Biogas muss sicherstellen, die im Vorfeld eingetragene Energie zu kompensieren.

Schlussendlich sind unter betrieblichen Aspekten auch weiterhin Verfahrensvergleiche von verschiedenen Vergärungsverfahren sowohl auf dem trockenen, als auch auf dem nassen Sektor von Interesse. Gerade im Bezug auf Monosubstrate bedarf es hier der ganzheitlichen Betrachtung von:

- Gaserträgen,
- technischer Ausstattung sowie
- Wirtschaftlichkeit.

Da Wirtschaftlichkeit bei der Vergärung von NAWARO hauptsächlich durch den Stromerlös bewerkstelligt wird, bedarf es effizienter und hinsichtlich der eingesetzten Materialen optimierter Anlagen. Das notwendige belast- und vergleichbare Datenmaterial wird nur durch strukturierte und qualitativ hochwertige Begleitforschung zum gegenwärtigen Biogasboom zu erarbeiten sein.

5 Literatur

- [1] Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe (FNR) e. V. (Hrsg.): Trockenfermentation Evaluierung des Forschungs- und Entwicklungsbedarfs, Gülzower Fachgespräche, Band 23, FNR, Gülzow, 4./5. Februar 2004
- [2] Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe (FNR) e. V. (Hrsg.): Handreichung Biogasgewinnung und -nutzung, FNR, Gülzow, Auflage 2005
- [3] Kraft, E.: Charakterisierung von Bioabfällen, Voraussetzung für die Optimierung des Kompostierungsprozesses, Rhombos Verlag Berlin, 2001.
- [4] Kraft, E.: Methods For Determining Physical, Particle-Related Characteristics Relevant To Fluid Flow Phenomena In Biowaste, Sevilla 2001.
- [5] DIN Deutsches Institut für Normung e.V.: DIN 18130-1: Bestimmung des Wasserdurchlässigkeitsbeiwerts, Normenausschuß Bauwesen (NABau) im DIN, Beuth Verlag GmbH, Berlin, Mai 1998
- [6] DIN Deutsches Institut für Normung e. V.: DIN 18127 : Proctorversuch, Normenausschuß Bauwesen (NABau) im DIN, Beuth Verlag GmbH, Berlin, November 1997
- [7] Kaltschmitt, M., D. Merten, N. Fröhlich und M. Nill: Energiegewinnung aus Biomasse, Externe Expertise für das WBGU-Hauptgutachten 2003 "Welt im Wandel – Energiewende zur Nachhaltigkeit", Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2003

Anschriften der Autoren:

Prof. Dr.-Ing. Eckhard Kraft, Dipl.-Ing. Thomas Haupt
Bauhaus-Universität Weimar
Juniorprofessur Biotechnologie in der Abfallwirtschaft
Coudraystraße 7
99423 Weimar
eckhard.kraft@bauing.uni-weimar.de, thomas.haupt@bauing.uni-weimar.de

Dr.-Ing. Burckhard Tscherpel S.I.G. - DR.-ING. STEFFEN GmbH in Mecklenburg-Vorpommern Dorfstraße 38 17179 Lühburg info@sig-mv.de

Erste Ergebnisse zur kontinuierlichen Trockenfermentation im Labormaßstab

G.-R. Vollmer BTN Biotechnologie Nordhausen GmbH

1 Einführung

Ab dem 01. August 2004 ist das fortentwickelte Erneuerbare – Energien – Gesetz (EEG) in Kraft.

Mit dem Bonus für Biogas aus nachwachsenden Rohstoffen wird die Verarbeitung von Energiepflanzen nachhaltig beeinflusst, wobei für den aus Trockenfermentationen gewonnenen Strom eine weitere Anhebung der Mindestvergütung um 2,0 Cent pro Kilowattstunden erfolgt ("Technologie-Bonus").

Zur technischen Gestaltung von Trockenfermentationsanlagen sind für eine effiziente Biogaserzeugung Kenntnisse über die Kinetik der Biogasbildung, insbesondere unter praxisrelevanten quasikontinuierlichen Prozessbedingungen, unverzichtbar.

Für die Bioabfallvergärung wird die Nassfermentation mit Raumbelastungen zwischen 2 und 4 kg oTS/ m^3 x d definiert, Raumbelastungen zwischen 9 und 12 kg oTS/ m^3 x d als Trockenfermentation (Abbildung 1 und 2, beispielhaft stehender Rührkesselfermenter (nass) und Pfropfenstromfermenter (trocken)).

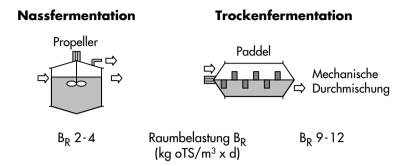


Abb. 1: Raumbelastungen für Nassfermentation und Trockenfermentation

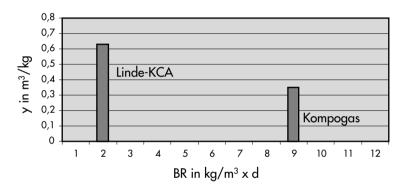


Abb. 2: Zusammenhang Biogasausbeute – Raumbelastung (einstufig thermophile Verfahrensführung /1/, /2/.

Die vergleichende Bewertung der Biogasausbeuten (m³ Biogas/kg oTS) in Praxisanlagen zeigt für die Trockenfermentation eine geringe Ausbeute aus dem Substratangebot der organischen Trockensubstanz (oTS) (Abbildung 2).

Ob dieser Zusammenhang für nachwachsende Rohstoffe wie Mais mit wesentlich höheren Abbauraten ebenfalls darstellbar ist, soll im Rahmen des Projektes geklärt werden.



Rührkesselfermenter Ouelle: Linde



Trockenfermenter Quelle: Thöni - Kompogas

Abb. 3: Praxisanlagen

2 Ergebnisse der Trockenfermentation von Mais

2.1 Inbetriebnahme der Laborfermenter

Die Inbetriebnahme einer Biogasanlage kann bei Nichtbeachtung einfacher mikrobiologischer Zusammenhänge zu hohen wirtschaftlichen Defiziten führen /3/ (Abbildung 4).

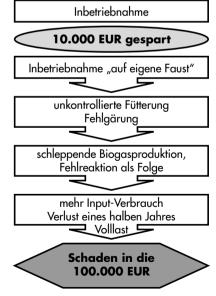


Abb. 4: Kostendefizit Inbetriebnahme

Insbesondere für Trockenfermentationen muss bei den angestrebten hohen Raumbelastungen mit hohen Impfdichten gearbeitet werden.

Als Impfmaterial für die Laborfermenter wurde der Ablauf einer großtechnischen Anlage (Schweinegülle mit geringen Anteilen Mais und Roggenkörnern) eingesetzt.

Die Stoffkennwerte der Impfgülle (Sediment nach 24 Stunden) und der Maissilage sind in Tabelle 1 zusammengestellt (Tabelle 1).

Parameter	Einheit	Impfgülle	Maissilage
TS	in %	9,27	31,5
oTS	in %	6,69	30
FS	in mg/l	480	10.400
pH-Wert	-	8,0	3,8
Zucker	% TS	-	5,3
Rohprotein	% TS	-	14,4
Rohfett	% TS	-	2,6
Rohfaser	% TS	-	24,1

Tabelle 1: Analysenwerte Impfgülle und Maissilage

Die Laboranlage für die Trockenfermentation sind Feststofffermenter (8 Liter Nettovolumen), die thermostatierbar und durchmischbar sind und quasikontinuierlich betrieben werden (Abbildung 5).



Abb. 5: Feststofffermenter

Die Feststofffermenter sind in einem Inkubationsschrank installiert, der die Temperierung (36 °C) sichert.

Zur Beschickung und Probenahme ist der Deckel mit einem Stopfen versehen. Mittels Paddelrührwerk erfolgt die Durchmischung der Fermenterinhalte.

Über die Zugabe- und Entnahmemenge ist die Steigerung der Belastung der Fermenter problemlos steuerbar.

Die erzeugte Biogasmenge wird über Präzisionsgaszähler erfasst, der Methananteil im Biogas diskontinuierlich ermittelt.

Für die vergleichende Bewertung mit der Nassfermentation (gleiches Substrat nach Einfahren mit Gülle) werden Rührkesselfermenter mit einem Nutzvolumen von 8 Liter eingesetzt (Abbildung 6).



Abb. 6: Rührkesselfermenter

Die Temperierung der Fermenter auf 36 °C erfolgt über thermostatbeheizte Wassermäntel und die Durchmischung über Stahl-Plexiglas-Rührer.

Die Inbetriebnahme der Feststofffermenter erfolgt in 2 Varianten: Einmal wurde die Impfgülle vorgelegt und Maissilage zudosiert. In der zweiten Variante wurden 1,5 kg Maissilage vorgelegt und mit der Gülle überimpft (Tabelle 2).

1 modice 2. The control million and Emberger internet	Tabelle 2:	Inbetriebnahme	der Labo	orfermenter
---	------------	----------------	----------	-------------

Parameter	Einheit	Inbetriebnahme 6 Liter Impfgülle 300 g Maissilage	Inbetriebnahme 1,5 kg Maissilage 6 Liter Impfgülle
TS	in %	11,0	12,7
oTS	in %	8,25	10,0
FS	in mg/l	360	793
pH-Wert		8,7	8,20

In beiden Fällen setzte die Gasproduktion sofort ein, so dass nach einer Woche zur kontinuierlichen Dosierung übergegangen wurde.

Variante 1 wurde als Fermenter 1 weiterbetrieben, Variante 2 als Fermenter 2.

2.2 Erste Untersuchungsergebnisse

Für die konzipierten Belastungssteigerungsversuche wurde zunächst die Raumbelastung 1 g oTS/l x d gewählt.

Die niedrigen Raumbelastungen ermöglichen dann auch die vergleichende Bewertung der angestrebten Trockenfermentation mit der Nassfermentation mit gleicher Dosierung (Tabelle 3).

Tabelle 3: Kinetische Parameter B_R 1

Parameter	Einheit	Fermenter 1	Fermenter 2	Nass- fermentation
Raumbelastung	g/l x d	1	1	1
Biogasproduktivität	1/1 x d	0,7	0,6	0,9
Methananteil	%	56	56	52,4
Biogasausbeute	1/goTS	0,71	0,63	0,8
TS-Gehalt im Fermenter	%	10,4	12,4	4,4
Karbonsäuren*	g/l	0,6	1,1	0,35

^{*} bestimmt als Essigsäureäquivalent

Die vergleichende Bewertung von Fermenter 1 und Fermenter 2 zeigt im Langzeitversuch, dass das Inbetriebnahmeregime Einfluss auf die sich einzustellenden Gleichgewichtszustände hat.

Bei hohen Impfdichten in der Einfahrphase wird offensichtlich mehr Biogas erzeugt.

Die Erhöhung der Raumbelastung mit der Zwischenstufe 1,5 g oTS/1 x d auf 2 g oTS/1 x d führte zu folgenden Ergebnissen (Tabelle 4).

Kinetische Parameter B_R 2
Kinetische Parameter B_R 2

Parameter	Einheit	Fermenter 1	Fermenter 2	Nass- fermentation
Raumbelastung	g/l x d	2	2	2
Biogasproduktivität	1/1 x d	1,4	1,1	1,85
Methananteil	%	54	55	51
Biogasausbeute	1/goTS	0,67	0,55	0,77
TS-Gehalt im Fermenter	%	10,0	11,3	6,3
Karbonsäuren*	g/l	0,6	0,8	0,5

^{*} bestimmt als Essigsäureäquivalent

Aus Tabelle 3 und 4 ist zu entnehmen, dass bei der hier als Nassfermentation bezeichneten Untersuchungsvariante höhere Biogasausbeuten erzielt werden.

Ob dies mit der Bioverfügbarkeit der organischen Substanz in Zusammenhang steht, wird sich bei weiterer Steigerung der Fermenterbelastung (Erhöhung des Trockensubstanzgehaltes im Fermenter) zeigen.

3 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

Die bisherigen Untersuchungsergebnisse lassen sich wie folgt zusammenfassen:

Die Impfstrategie hat bei Einsatz von Mais als Substrat einen langfristigen Einfluss auf die Biogasproduktion.

Der Vergleich von Nassfermentation und angestrebter Trockenfermentation zeigt für die bisher geprüften geringen Raumbelastungen für die

Nassfermentation höhere Biogasausbeuten (geringerer Trockensubstanzgehalt im Fermenter bei Nassfermentation).

Der Zusammenhang zwischen abnehmender Biogasausbeute bei steigender Fermenterbelastung scheint auch für die angestrebte Trockenfermentation zu greifen, hier müssen aber noch Ergebnisse aus höheren Raumbelastungen zur endgültigen Bewertung herangezogen werden.

Literatur:

- /1/ Baumann, T. (2001): pers. Mitteilung
- /2/ Langhans, G. (2002): pers. Mitteilung
- /3/ Ott, M. (2006): Herausforderung an die Biogasanlagen von morgen. Wirtschaftsmotor Biogas. 15. Jahrestagung des Fachverbandes Biogas e. V. Tagungsband S. 112 - 116

Anschrift des Autors: Prof. Dr. sc. Gerd-Rainer Vollmer BTN Biotechnologie Nordhausen GmbH Kommunikationsweg 11 99734 Nordhausen BTN-GmbH@t-online.de

Möglichkeiten und Grenzen des Batch-Verfahrens "Bioferm"

Dr. Andreas Gronauer Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft Institut für Landtechnik, Bauwesen und Umwelttechnik

Am Institut für Landtechnik, Bauwesen und Umwelttechnik wurde von April 2002 bis zum März 2003 ein Verfahren zur Feststofffermentation der Firma Bioferm im Auftrag des Bayerischen Staatsministeriums für Landwirtschaft und Forsten ("Wissenschaftliche Begleitung einer Pilotanlage zur Feststoffvergärung von landwirtschaftlichen Gütern" Az: N/01/17) wissenschaftlich untersucht, um verlässliche Daten über die erzielbaren Gaserträge landwirtschaftlicher Substrate und deren Verhalten während des Prozesses zu bekommen. In der Pilotanlage wurden fünf Substrate (Maissilage, Grassilage, Landschaftspflegegrün, Rinderfestmist und Hühnerfestmist) auf ihre Eignung hinsichtlich Vergärbarkeit, Gasertrag, Arbeitszeitbedarf und Wirtschaftlichkeit untersucht.

Der Abschlussbericht zu diesem Projekt (Gelbes Heft Nr. 77) ist unter http://www.lfl.bayern.de/ilt/umwelttechnik/13390/ im Internet verfügbar.

1 Verfahrensüberblick

Die untersuchte Feststoffvergärungsanlage besteht aus gasdichten Fertigbetonbauteilen, die über Dehnfugen verbunden sind (Abb. 1).

Die Anlage ist modular erweiterbar und kann somit den jeweiligen Erfordernissen des Anlagenbetreibers angepasst werden. Die Tore der Anlage werden hydraulisch bewegt, eine Gummidichtung an der Torinnenseite soll einen Lufteintritt in den Fermenter verhindern. Der von der

Fa. BIOFERM® verwendete Anlagentyp ähnelt von der Bauweise her dem einer Doppelgarage. Die beiden Fermenter werden unabhängig voneinander betrieben. Das Blockheizkraftwerk, und die Steuer- und Regelungstechnik befinden sich im Technikraum, der neben den Fermentern angeordnet ist. Die Sammelbehälter für das Perkolat (Perkolattanks) sind in einem separaten Raum untergebracht. Im Pumpensumpf hinter dem Gebäude wird das Perkolationswasser (Perkolat) aufgefangen und mittels einer Pumpe mit Schwimmerschaltung in die Perkolattanks zurückgepumpt. An der Stirnseite der Anlage befinden sich der Mitteldruckgasspeicher und der Biofilter, der die Abluft aus den Fermentern zu Beginn des Prozesses und vor dem Öffnen der Tore zu Prozessende reinigen soll.

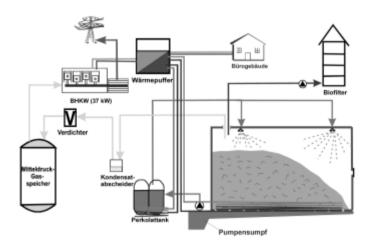


Abb. 1: Anlagenschema der Feststoffvergärungsanlage (Fa. BIOFERM©)

In Tab. 1 sind die wichtigsten technischen Daten der Anlage zusammengefasst.

Anlagengröße	12,90 x 8,18 x 6,17 m (l x b x h)	
	8,00 x 4,00 x 3,50 m (l x b x h) Innenmaß	
Fermentergröße	112 m ³ Bruttovolumen (ca. 52 m ³ Netto-Füllvolumen)	
Termentergrowe	Innenraum mit speziellem Farbanstrich gegen elektrostatische Aufladung	
Material	Betonfertigbauteile (gasdicht), durch Dehnfugen verbunden	
Isolation	Styrodur [©] (10 cm)	
Tor	hydraulisch verschließbar, mit mechanischer Verriegelung	
101	und gasundurchlässiger Gummidichtung	
BHKW	Gas-Ottomotor, Fa. Hochreiter (37 kW elektrisch)	
Heizung	Fußbodenheizung zur Substrat- und Perkolations-	
Tieizung	wassererwärmung	
Perkolattank	6.000 L pro Fermenter (Kunststoffbehälter)	
Systemsteuerung	Steuerungsmodul Fa. Awite	
Gasspeicherung	Mitteldruckgasspeicher (5 m³; bis 7 bar Druck) mit Gasverdichter	
Biofilter	Betonsiloringe, schichtweise befüllt mit Holzhäcksel, Rinde und Rohkompost	
Pumpensumpf	Tauchpumpen mit Schwimmerschaltung	

Tab. 1: Technische Kenndaten der Feststoffvergärungsanlage

2 Optimierungspotentiale

Die im folgenden Kapitel ausgearbeiteten Angaben über mögliche Optimierungspotentiale gehen von den Ergebnissen der Untersuchungen aus, stellen aber Schätzwerte dar, die nicht kumulativ zusammengefasst werden dürfen. Für die Bestätigung dieser Annahmen wären weitergehende Untersuchungen an der Anlage erforderlich. Die Angaben über Ertragssteigerungen sind deshalb nur als Orientierungswerte anzusehen.

2.1 Substrat

2.1.1 Erhöhung des Frischsubstratanteils

In den Versuchen wurden Frischsubstratanteile von etwa 15-40 % realisiert. Die Verwendung von Rinderfestmist und Landschaftspflegegrün hat sich

als problemlos herausgestellt. Hier sind Frischsubstratanteile von bis zu 70 % durchaus realisierbar. Bei Grassilagen können Frischsubstanzanteile bis höchstens 50 % erreicht werden, da bereits bei 40 % Frischanteil eine deutliche Absenkung des pH-Wertes eingetreten ist, die auf eine beginnende Hemmung der Methanisierung hinweist. Maissilage verursacht aufgrund ihrer hohen Gehalte an Stärke bei Frischanteilen von 40 % eine deutliche Versäuerung der Biozönose. Inwieweit der Frischmasseanteil gesteigert werden kann, müsste in Versuchsreihen geprüft werden. Dies gilt auch für die Verwendung von Hühnermist, da hier bei Frischmasseanteilen von über 30 % mit starken Hemmungen der mikrobiologischen Aktivität durch hohe Ammoniumgehalte zu rechnen ist.

2.1.2 Verbesserung der Substratdurchmischung

In den Versuchen wurden das Frischsubstrat und das Impfmaterial entweder abwechselnd in den Fermenter gefüllt, (zwei Schaufeln frisch und eine Schaufel Impfmaterial) oder die beiden Substrate mittels Radlader in der Halle abwechselnd auf einen Haufen geschüttet und danach in den Fermenter eingebracht. Diese Verfahrensweise führt zu einer Inhomogenität des Materials. Die Abbauintensität durch Mikroorganismen könnte dadurch reduziert werden. Mit einem Futtermischwagen könnte eine wesentlich bessere Durchmischung erreicht werden, d. h. es entstünden weniger Zonen mit einer unzureichenden Bakterienpopulation. Dem Vorteil der besseren Durchmischung würden jedoch die mechanische Beanspruchung des Impfmaterials, der Kontakt mit Luftsauerstoff und der höhere Bedarf an Arbeitszeit und Maschinenstunden entgegenstehen.

Durch diese Maßnahme könnte der Gasertrag evtl. um 10 - 20 % gesteigert werden.

2.1.3 Verzicht auf die aerobe Vorrotte

Durch die ca. dreitägige Vorrotte erwärmt sich der Substrathaufen, was zur Folge hat, dass hier bereits ein Abbau energiereicher Bestandteile erfolgt, die für die Methanproduktion nicht mehr genutzt werden können. Ein sofortiges Einfüllen des Frischsubstrates würde diese Verluste vermindern. Andererseits müsste in diesem Fall mehr Energie zur Erwärmung

des Substratsaufgewendet werden, und es müsste eine Zwischenlagerung des Substrats vor der Befüllung vermieden werden.

Durch diese Maßnahme könnte der Ertrag um ca. 10 - 30 % erhöht werden.

2.1.4 Fermenterauslastung

Das Fermentervolumen war in den Versuchen nur zu 50 % nutzbar, die Ausnutzung sollte zukünftig bei größeren Anlagen entsprechend verbessert werden.

2.2 Perkolation

Anhand der Ergebnisse zeigt sich, dass für den Bereich der Perkolation die größten Optimierungspotentiale gegeben sind.

2.2.1 Verbesserung der Perkolatverteilung

Durch die Verwendung von nur zwei Düsen entstehen große Zonen, die nicht mit Perkolat durchfeuchtet werden (Abb. 2).

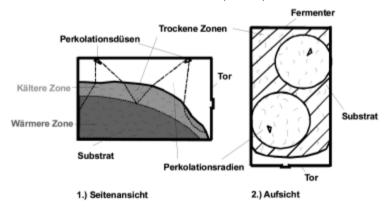


Abb. 2: Temperaturschichtung und Perkolatverteilung (schematische Darstellung)

Eine gleichmäßige Perkolierung des Substrats würde in zweifacher Weise zur Optimierung beitragen. Erstens würde das gesamte Substrat im Fermenter in anaerobes Milieu überführt und eine zeitlich und räumlich homogene Aufbauproduktion sichergestellt. Zweitens würde die Abbaugeschwindigkeit und der Abbaugrad des Substrats einschließlich der Methanbildungsrate deutlich erhöht.

Es ist davon auszugehen, dass für einige Substrate eine Steigerung des Gasertrages von bis zu 100 % realisierbar wäre.

2.2.2 Gleichmäßige Perkolaterwärmung

Die perkolatführenden Einrichtungen (Pumpensumpf, Leitungen) außerhalb des Fermenters sind nicht beheizt, wodurch besonders im Winter eine Abkühlung des Perkolats eintritt. Im Vorratstank wird das Perkolat nicht auf dasselbe Temperaturniveau erwärmt, wie es im Fermenter vorherrscht. Daraus ergibt sich eine reduzierte Aktivität und Vermehrungsrate der Mikroorganismen. Die gleichmäßige Erwärmung des Perkolats im gesamten Kreislauf bedeutet allerdings auch einen höheren Energiebedarf und einen höheren bautechnischen Aufwand.

Im Rahmen der Untersuchungen war nicht zu prüfen, ob die anstehenden Mehrkosten durch eine Erhöhung des Gasertrages um ca. 30 - 50 % amortisierbar sind.

2.2.3 Verbesserung der Bakterienanpassung

Laut Anlagenbetreiber war, bedingt durch die kurze Projektlaufzeit, eine ausreichende Bakterienanpassung an die jeweiligen Substrate nicht gegeben. Anpassungsphasen für anaerobe Biozönosen von 7 bis 21 Tagen sind nach Aussagen von Mikrobiologen (Dr. Lebuhn, Dr. Arab, TU-München) unter Praxisbedingungen zu erreichen. Ob sich eine längere Bakterienanpassung günstig auf die Höhe der Gaserträge auswirkt, konnte im Rahmen der Untersuchungen nicht überprüft werden, da die Untersuchung verschiedener Substrate und deren Eignung für das Verfahren im Vordergrund stand. Diese Überprüfung würde zudem eine gleichbleibende Substratzusammensetzung während des gesamten Jahres voraussetzen.

Ertragssteigernde Potentiale von 20 - 50 % sind aber durchaus zu erwarten.

2.2.4 Gaserträge

Aus Rinderfestmist und Maissilage wurden die höchsten Gaserträge erzielt, während beim Versuch mit Landschaftspflegegrün aufgrund der niedrigen Energiegehalte der tägliche Gasertrag sehr rasch abnahm (Abb. 3).

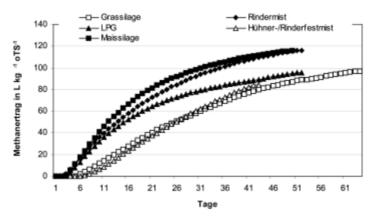


Abb. 3: Methanerträge bei verschiedenen Versuchssubstraten

Bei den Versuchen mit Grassilage und mit einer Hühner-/Rinderfestmistmischung traten Verzögerungen der Gasbildung auf, die auf eine Hemmung der Methanbildung (Hühnermist-/Rinder-festmist) hinweist und auf eine kurzzeitige pH-Wertabsenkung durch die hohen Säurekonzentrationen im Substrat (Grassilage) zurückzuführen sind. Die erzielten Biogaserträge sind im Vergleich zu Literaturangaben in Tab. 2 aufgeführt.

<i>Tab.</i> 2:	Gaserträge einzelner Substrate nach Literaturangaben verschiedener
	Autoren

Gaserträge in L/k	g oTS	Liter	Vergleich (%)	
Gasertrag	Versuche	Feststoffvergärung	Flüssigvergärung	Vergieidi (70)
Grassilage	191,4	540 - 720	420 - 700	34
Rinderfestmist	218,5	340 - 550	167 - 400	76
Landschaftspflegegrün	188,7	_	-	_
Hühner-/Rinderfestmist	148,1	430 - 510	250 - 500	39
Maissilage	231,7	-	540 - 600	40

2.2.5 Wirtschaftlichkeit

Die wirtschaftliche Bewertung ist problematisch, da es sich bei der untersuchten Anlage um einen Prototyp handelt. Der hohe Investitionskostenanteil für Prozessüberwachung führt bei kleinen Anlagen zu einer überproportionalen Bewertung der Kosten. Anhand der vorliegenden Ergebnisse ist dennoch eine wirtschaftliche Vergärung kostenintensiver Substrate fraglich. Beim Bau größerer Anlagen, Verwendung kostenneutraler Substrate könnte ein wirtschaftlicher Betrieb denkbar sein.

3 Zusammenfassung und Ausblick

Die im Rahmen des Projektes untersuchte Pilotanlage wies einige Schwächen auf, zeigte aber auch positive Eigenschaften. Prinzipiell lässt sich aus landwirtschaftlichen Substraten bei diesem Feststoffvergärungsverfahren Biogas gewinnen. Es eignen sich aber nicht alle Substrate gleichermaßen für die Vergärung in diesem Anlagentyp und die in den Versuchen erzielten Gaserträge reichen zur Zeit für eine wirtschaftliche Betriebsweise der Anlage nicht aus. Es bestehen auch noch erhebliche Mängel bei der Perkolatverteilung und der Isolation des Fermenters. Als positiv zu bewerten sind die geringen H₂S-Gehalte im Biogas, die verschleißarme Betriebsweise der Anlage und der hohe sicherheitstechnische Standard.

Um eine wirtschaftliche Betriebsweise zu erhalten sind noch vielerlei Optimierungen an der Anlage auszuführen, wobei eine Verknüpfung der verschiedenen Optimierungspotentiale mit wirtschaftlichen Berechnungen auf Basis der vorliegenden Daten nicht möglich ist, da sich sowohl gegenseitig verstärkende, als auch hemmende Effekte ergeben werden. Insbesondere Daten zur Optimierung der mikrobiologischen Milieubedingungen dürften ausschlaggebend sein.

Ob sich die laut Anlagenbetreiber durchgeführten Optimierungen dahingehend ertragssteigernd ausgewirkt haben, dass ein Gasertrag von 2 m³ t⁻¹d⁻¹ garantiert werden kann, bedarf weiterer Untersuchungen an der Anlage, die speziell auf die Optimierung der Gaserträge ausgerichtet sind. Sollten sich diese Aussagen als realistisch erweisen, könnte durch die Novellierung des EEG, das Feststoffvergärungsverfahren für bestimmte Betriebe durchaus von Interesse sein.

Fazit:

Positive Ansätze:

- Vergärung von landwirtschaftlichen Substraten prinzipiell möglich
- geringe H₂S-Gehalte (< 100 ppm) im Biogas (keine Entschwefelung nötig)
- verschleißarme Betriebsweise
- hoher sicherheitstechnischer Standard

Defizite:

- geringe Gaserträge (148 232 l/kg oTS) im Vergleich zur Nassvergärung
- schlechte Perkolatverteilung im Fermenter
- ungenügende Isolation des Fermenters (v. a. bei Betrieb im Winter)
- geringer Abbaugrad (9 33 % der oTS)
- => Keine wirtschaftliche Betriebsweise bei dieser Anlagengröße unter den gegebenen Umständen während des Versuchszeitraumes möglich

Anschrift des Autors: Dr. Andreas Gronauer Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft Institut für Landtechnik, Bauwesen und Umwelttechnik Vöttinger Str. 36 85354 Freising andreas.gronauer@lfl.bayern.de

Ergebnisse aus den wissenschaftlichen Begleitungen der Pilotanlagen Pirow und Clausnitz

Bernd Linke, Monika Heiermann, Jan Mumme Leibniz-Institut für Agrartechnik Potsdam-Bornim

1 Einleitung

Der zunehmende Einsatz nachwachsender Rohstoffe, die ebenso wie Festmist schüttfähig sind und für die Biogasgewinnung zum Einsatz kommen, wirft die Frage auf, ob diese Substrate auch im stapelbaren Zustand zu Biogas vergoren werden können. Die unter Feststoff- oder Trockenvergärung bekannten Verfahren arbeiten satzweise, d.h. der Fermenter wird mit schüttfähigem Substrat und einem Teil bereits vergorenem, aber noch schüttfähigem Gärrest vermischt und gasdicht verschlossen. Diese aus der Bioabfallvergärung bekannten Verfahren [1] [2] sind auch für landwirtschaftliche Gärsubstrate von Interesse, da nicht die gesamte Reaktionsmasse mit hohem Energieaufwand durchmischt werden muss und der noch schüttfähige Gärrest in einer konventionellen Stroh-Stallmist-Kette verwertet werden kann. Zur Beschleunigung des anaeroben Abbaus wird das schüttfähige Gemisch perkoliert (berieselt) und damit der anaerobe Abbau beschleunigt. Für landwirtschaftliche Substrate wie Mist und grünem Pflanzenmaterial wird in [3] ein satzweise arbeitendes System mit Perkolation und anschließender Biogasgewinnung in einem Anaerobfilter beschrieben. Eine praktische Anwendung ist jedoch nicht bekannt geworden. Im Hinblick auf eine weitere Nutzung des flüssigen Gärrestes aus bestehenden Nassvergärungsanlagen wurden in der Agrargenossenschaft PIROW (Brandenburg) und in der Agrargenossenschaft Bergland e.G. CLAUSNITZ (Sachsen) zwei satzweise arbeitende Trockenfermentationsanlagen errichtet. Die wissenschaftliche Begleitung beider Anlagen erfolgte mit Unterstützung der Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. (FNR) durch das Leibniz-Institut für Agrartechnik Potsdam-Bornim (ATB). Verfahrensentwicklung, Planung und Ausführung der Anlage in PIROW erfolgte durch das Ingenieurbüro LOOCK-Biogassysteme, während die Anlage CLAUSNITZ vom Ingenieurbüro RATZKA konzipiert wurde. Im vorliegenden Beitrag werden Ergebnisse aus der Erprobung vorgestellt. Für die Untersuchungen an der Anlage PIROW ist die Förderung ausgelaufen, die wissenschaftliche Begleitung in CLAUSNITZ kann noch bis Ende 2006 fortgeführt werden.

2 Pilotanlage Pirow

2.1 Aufbau und Beschreibung der Pilotanlage

Die nach dem Trocken-Nass-Simultan (TNS)-Verfahren der Firma LOOCK-Biogassysteme GmbH errichtete Biogasanlage in Pirow (Abb. 1) besteht im wesentlichen aus 4 gasdichten Tockenfermentern mit einem Nutzvolumen von je 150 m³, die mit hydraulisch verschließbaren Toren, Belüftungstechnik zum Einblasen von Luft, einer Vorrichtung zur Perkolation der Prozessflüssigkeit und zugehöriger Prozessleittechnik ausgestattet sind. Neben der Trockenfermentationsanlage wurde eine konventionelle Nassvergärungsanlage errichtet, in der Schweinegülle und nachwachsende Rohstoffe in zwei Fermentern mit einem Volumen von 1500 m³ vergoren werden. Für die Verstromung des Biogases aus der Nass- und Trockenvergärungsanlage stehen zwei BHKW mit einer elektrischen Leistung von je 250 kW zur Verfügung. Die für die Erprobung der Pilotanlage notwendigen Gasmengenzähler für jeden Fermenter, eine Teleskopwaage für die Masseerfassung der eingebrachten Substrate, einen Container zur Speicherung von Perkolat und Mittel für die Erfassung und Auswertung der Messergebnisse (Personal- und Sachmittel) wurden durch die FNR bereitgestellt.





Abb. 1: Ansicht der Trockenvergärungsanlage PIROW, links: Gesamtansicht mit BHKW und 4 Trockenfermenter, rechts: Innenansicht in einen entleerten Trockenfermenter

2.2 Versuchsdurchführung und Betriebsbeeinträchtigungen

Die ursprüngliche Verfahrensweise, einen Prozesswasserkreislauf zur Berieselung des Substrates in der Trockenfermentation über den Nachgärer der Nassfermentation zu schaffen, konnte in der Praxis nicht aufrecht erhalten werden. Es zeigte sich, dass durch mitgeführte Schwebstoffe in der Flüssigkeit des Nachgärers ein Film auf dem Substrathaufen im Trockenfermenter (TF) gebildet wurde, der die Perkolation der Flüssigkeit durch das Substrat erheblich beeinträchtigte. Aus diesem Grund musste eine Alternative gefunden werden, die in der Umnutzung des Trockenfermenters 2 als Prozesswasserspeicher resultierte.

Diese improvisierte Zwischenlösung machte den Betrieb der Trockenfermentationsanlage aufgrund des geringen Speichervolumens für Prozesswasser hinsichtlich Temperaturstabilität und Wasserregelung sensibel, so dass für einen stabilen und sicheren Betrieb ein großvolumiger Prozesswasserspeicher erforderlich ist. Mit der systematischen Aufnahme der Messdaten und der Befüllung der Trockenfermenter wurde im März 2005 begonnen. Im weiteren Versuchsbetrieb kam es jedoch zu Betriebsbeeinträchtigungen, die nachfolgend kurz dargestellt werden.

Zeitraum bis 27.5.05

Die Erwärmung des Prozesswassers erfolgte bis Ende Mai über einen Plattenwärmetauscher. Dieser erwies sich durch die im Prozesswasser mitgeführten Schwebstoffe als sehr anfällig gegenüber Verstopfungen, so

dass regelmäßige Reinigungen durchgeführt werden mussten. Die hiermit verbundenen Temperaturschwankungen im umlaufenden Prozesswasser führten zu größeren Schwankungen der Biogasproduktionsraten im Prozesswasserspeicher (F2) mit insgesamt geringerer Biogasproduktion. Die Installation einer im Prozesswasserspeicher liegenden Heizung und die Herausnahme des Plattenwärmetauschers wurde am 27.5.05 abgeschlossen. Im anschließenden Zeitraum bis zur Außerbetriebnahme der Anlage ab dem 21.6.05 konnte die Biogasproduktionsrate im Prozesswasserspeicher auf hohem Niveau stabilisiert werden.

Zeitraum 21.6.05 bis 3.8.05

Die Auswertung der Messergebnisse zeigte, dass eine Undichtheit am Trockenfermenter 1 (TF1) vorliegen musste. Aus diesem Grund wurde der TF I am 21.6.05 zur Revision außer Betrieb genommen. Nach Abschluss der vorherigen Messreihe mit Einsatz von Maissilage und Putenmist sollte in der nächsten Phase der Betrieb mit reiner Maissilage erfolgen. Da die Biogasanlage Pirow nach wirtschaftlichen Gesichtspunkten betrieben werden muss, war die Verfügbarkeit der erforderlichen Mengen Maissilage für die Nass- und die Trockenfermentation für die geplante Messphase nicht gegeben. Die gesamte Trockenfermentationsanlage wurde deshalb zur Revision stillgelegt und zum 3.8.05 wieder in Betrieb genommen.

Zeitraum nach Wiederinbetriebnahme ab 3.8.05

Nach der Wiederinbetriebnahme war absehbar, dass ein Zeitraum zur Neubildung und Stabilisierung der Biologie erforderlich sein würde. Dies zeigte sich in den geringen Gasausbeuten im Prozesswasserspeicher im August und September. Insbesondere mit dem improvisierten Prozesswasserspeicher zusammenhängende Probleme haben die Aufnahme einer weiteren stabilen Messreihe verhindert. Das Fermentertor ist nicht für die Aufnahme der Lasten hoher Wassersäulen ausgelegt. Ein Anstieg des Gasdrucks im Innenraum des Prozesswasserspeichers drückt das Tor heraus. Die Undichtigkeiten und erforderlichen Reparaturen haben den Anlagenbetrieb im September und Oktober immer wieder unterbrochen. Der als Trockenfermenter konzipierte Prozesswasserspeicher weist ein zu geringes Volumen auf, um das Prozesswasser in der kalten Jahreszeit auf stabiler Temperatur mit ausreichend hohem Niveau zu halten. Seit November besteht das Problem, dem Prozesswasser ausreichend Wärme zur Einstellung einer stabilen Prozesstemperatur im Gesamtsystem zuzuführen.

2.3 Ergebnisse aus der Praxiserprobung

Wegen der genannten Betriebsbeeinträchtigungen kann für die Bewertung der Trockenfermentationsanlage hinsichtlich Leistungsfähigkeit und Biogasausbeute nur der Zeitraum vom 18.5.2005 bis 4.7.2005 herangezogen werden. Innerhalb dieses Zeitraumes erhielt jeder Trockenfermenter 2 Chargen mit einem Gemisch aus Maissilage, Putenmist und Gärrest aus dem vorherigen Ansatz. Die Fermentationszeit in den Trockenfermentern wurde auf 3 Wochen begrenzt, anschließend wurde der Gärrest ausgelagert und ein Teil für den neuen Ansatz verwendet. Die Analysen der als Gärsubstrate verwendeten Maissilage und Putenmist (Tab. 1) liegen im üblichen Bereich.

Tabelle 1: Analysenparameter der verwendeten Substrate für die Trockenvergärung

Parameter	Einheit	Putenmist	Maissilage	
pH-Wert	-	8,50	4,10	
TS (105 °C)	g kg ⁻¹ FM ¹⁾	403	306	
oTS	g kg ⁻¹ FM	334	293	
NH ₄ -N	g kg ⁻¹ FM	2,70	0,54	
N _{ges}	g kg ⁻¹ FM	11,08	3,28	
Flüchtige Carbonsäuren	g kg ⁻¹ FM	0,91	4,38	
Milchsäure	g kg ⁻¹ FM	-	16,30	

¹⁾ Frischmasse

Während des genannten Untersuchungszeitraumes sind die TF 1, 2 und 3 jeweils um eine Woche zeitversetzt mit einer Mischung aus Maissilage, Putenmist und Gärrest beschickt worden (Tab. 2). Nach der Beschickung und einer Vorbelüftung von etwa 12 Stunden wurden die Trockenfermenter nacheinander mit Perkolat aus dem Perkolatspeicher (F2), der ein Flüssigkeitsvolumen von etwa 80 m³ aufwies, mit einer Menge von 15 m³h¹¹ alternierend berieselt. Nach 4 Minuten Perkolation folgte eine Pause von 30 Minuten und die Perkolation wurde mit dem gleichen Rhythmus erneut aufgenommen. Nach wenigen Stunden setzte die Biogasproduktion ein und zeigte den erwarteten Anstieg (Abb. 2). Während bei den Fermentern 3 und 4 Spitzenwerte in der Methanproduktion von 200 bis 300 m³d¹¹

erreicht wurden, lag die Methanproduktion im Fermenter 1 lediglich bei etwa 100 $\rm m^3 d^{-1}$. Da alle Trockenfermenter nahezu die gleichen Substratmischungen erhalten haben, wurde vermutet, dass nicht die gesamte, in TF1 gebildete Methanmenge, wegen Undichtigkeiten erfasst wurde. Dieser Verdacht wurde durch Revision am 21.6.2005 bestätigt.

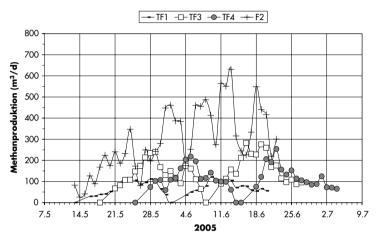


Abb. 2: Verläufe der Methanproduktion (normiert) im Untersuchungszeitraum

Die Zunahme des Methangehaltes im Biogas war bei allen Trockenfermentern ähnlich und erreichte nach etwa 1 Woche einen Methangehalt von 50 %, der noch Werte bis 70 % erreichte. Auf relativ hohem Niveau stellte sich der Methangehalt im Perkolatspeicher (F2) ein. Im Mittel des Untersuchungszeitaumes betrug der Methangehalt im Perkolatspeicher 69 %.

Die im Untersuchungszeitraum aus den einzelnen Fermentern produzierten Biogas- und Methanmengen wurden bilanziert und auf die eingebrachten Substratmengen bezogen. (Tab. 2). Im Mittel aller Befüllungen ergaben sich Masseanteile in der gesamten Mischung von 60 % Maissilage, 13 % Putemist und 27 % Gärrest. Da nicht die gesamte aus TF1 produzierte Biogas- und Methanmenge wegen Undichtigkeiten am Fermenter erfasst werden konnte, andererseits aber der Perkolatspeicher (F2) organische Verbindungen aus dem Fermenter 1 mit dem Perkolat zu Biogas umgesetzt hat, wurde folgende Methode der Bilanzierung gewählt: Die gesamte aus dem Perkolatspeicher produzierte Biogasmenge wird in die

Bilanzierung einbezogen und für die aus dem Trockenfermenter 1 produzierte Biogasmenge wird wegen der gleichen Substratbeschickung der Mittelwert aus TF3 und TF4 verwendet.

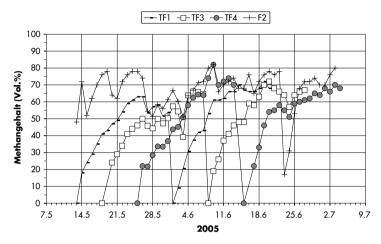


Abb. 3: Verlauf der Methangehalte im Biogas im Untersuchungszeitraum

Tabelle 2: Biogas- und Methanproduktion aus der Trockenfermentationsanlage Pirow mit jeweils 2 Befüllungen für TF1, 3,4 im Zeitraum vom 18.5.2005 bis 4.7.2005

Fermenter	Mais- silage t	Puten- mist t	Gärrest t	Biogas- menge m ³	${ m CH_4} ext{-} \ { m Menge} \ { m m}^3$	CH ₄ Vol.%
TF1	79,0	17,5	36,0	8916 ¹⁾	4779 ¹⁾	56
TF3	80,5	18,0	36,5	10129	5370	53
TF4	81,0	17,5	35,5	7703	4188	54
F2	-	-	-	17562	12070	69
Gesamt	240,5	53	108	44310	26407	59

¹⁾ Mittelwert aus TF3 und TF4

Bezieht man die im Untersuchungszeitraum produzierte Methanmenge von 26407 m³ auf die eingesetzte Substratmasse von 240,5 t Maissilage und 53 t Putenmist, dann ergibt sich eine spezifische Methanausbeute von 90 m³ Methan je Tonne Frischmasse. Bezogen auf die mit der Substratmasse eingesetzte oTS resultiert eine oTS-bezogene Methanausbeute von 0,3 m³ kg⁻¹. Die aus dem Putenmist produzierte Methanmenge kann aus einem Gärtest mit etwa 2400 m³ veranschlagt werden (45 m³ CH₄ t⁻¹ Putenmist), so dass auf die eingesetzte Maissilage eine spezifische Methanausbeute von 0,34 m³ kg⁻¹ oTS entfällt. Damit können die für eine Nassvergärungsanlagen ermittelten Methanausbeuten [4] auch für eine Trockenvergärung erreicht werden. Die Analysenwerte der ausgelagerten Gärreste unterlagen trotz einheitlicher Befüllungen gewissen Schwankungen. Der oTS-Gehalt der Gärreste lag mit Ausnahme von Fermenter 1 bei etwa 15 % in der Frischmasse. Die geringen Konzentrationen an flüchtigen Carbonsäuren korrelieren mit dem relativ geringen Gärrestpotenzial, das bei 35 °C nach Auslagerung im Labor des ATB ermittelt wurde (Tab. 3).

Tabelle 3: Analysenwerte und Gärrestpotenzial von ausgelagerten Gärresten

Parameter	Einheit	TF3 18.5.	TF4 25.5.	TF1 1.6.	TF3 8.6.
pH-Wert	-	9,04	9,14	9,14	8,83
TS (105 °C)	g kg ⁻¹ FM ¹⁾	202	193	262	204
oTS	g kg ⁻¹ FM	157	148	209	150
NH ₄ -N	g kg ⁻¹ FM	2,09	3,20	1,16	3,41
N _{ges}	g kg ⁻¹ FM	6,83	5,96	9,09	6,27
Flüchtige Carbonsäuren	g kg ⁻¹ FM	1,69	1,62	0,79	4,00
Gärrestpotenzial (35 °C)					
nach 20 d	m ³ t ⁻¹ FM	18	22	11	12
nach 40 d	m ³ t ⁻¹ FM	36	33	21	22

¹⁾ Frischmasse

3 Pilotanlage Clausnitz

3.1 Aufbau und Beschreibung der Pilotanlage

Die vom Ingenieurbüro Ratzka in der Agrargenossenschaft Bergland CLAUSNITZ geplante Trockenfermentationsanlage besteht im Wesentlichen aus 4 Fermentern mit einem Nutzvolumen von je 125 m³. Die Fer-

menter können von oben über eine abnehmbare Plane befüllt und der Gärrest über ein verschließbares Tor von vorn entnommen werden. Es war vorgesehen, den flüssigen Gärrest aus der bereits vorhandenen Nassvergärungsanlage von unten in den zu vergärenden Substrathaufen einzustauen und die mit organischen Säuren angereicherten Einstauflüssigkeit über einen 150 m³ fassenden Zwischenlagerbehälter in die Nassvergärungsanlage zurückzuführen. Durch diese Prozessführung sollte die Biogasgewinnung gleichermaßen in der Trockenvergärungsanlage und in der Nassvergärungsanlage erfolgen. Die Trockenfermentationsanlage ist an die BHKWs (2 x 225 kW_{el}) angeschlossen. Mit der Erprobung der Trockenfermentationsanlage wurde im Februar 2005 begonnen.





Abb. 4: Ansicht der Trockenvergärungsanlage CLAUSNITZ, links: Blick in einen Fermenter, im Hintergrund 2 Nassfermenter, rechts: Draufsicht eines Trockenfermenters, geöffnet

3.2 Einstauversuche mit flüssigem Gärrest

Durch die Analyse des Prozessverlaufs sowie durch die optische Kontrolle des Trockenfermenterinhaltes stellte sich bereits unmittelbar nach Beginn der Erprobungsphase heraus, dass die hohe Viskosität des flüssigen Gärrestes ein großes Hindernis für die Funktionsfähigkeit darstellt. Dieses äußerte sich insbesondere durch folgende Kennzeichen:

- Aufschwimmen der zu vergärenden organischen Feststoffe,
- geringe Eindringtiefe des flüssigen Gärrestes in den Feststoffstapel von nur wenigen Zentimetern,
- starke Übersäuerung im angeimpften Bereich des Feststoffstapels,

- Anstieg der Gasbildungsrate in der ersten Woche nach Prozessbeginn bis 7 m³ pro Tag und Tonne eingelagerter Feststoffmasse, danach Rückgang des Wertes auf unter 1,
- sehr geringe Biogasausbeuten.

Exemplarisch ist in Abb. 5 der Prozessverlauf der Feststoffvergärung von 30 t Triticale-Ganzpflanzensilage (Triticale-GPS) in einem Trockenfermenter dargestellt. Bei diesem Versuch wurde eine Einlagerungsdichte von 0,5 t m³ ermittelt.

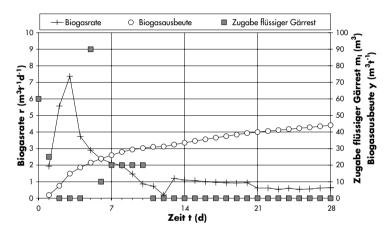


Abb. 5: Prozessverlauf nach Zugabe von flüssigem Gärrest aus der Nassvergärungsanlage

Die Biogasrate und die Biogasausbeute in Abb. 5 beziehen sich auf die Frischmasse der eingelagerten Triticale-GPS. Der Einfluss der zusätzlichen Gasbildung aus dem flüssigen Gärrest wurde vernachlässigt. Die Höhe der täglichen Ablaufmenge aus dem Fermenter entsprach etwa der Zugabemenge. An den ersten beiden Versuchstagen erfolgte keine Flüssigkeitsentnahme. Wie aus dem Prozessverlauf zu entnehmen ist, wurde nach den Zugaben von 60 m³ flüssigem Gärrest am Tag der Einlagerung der organischen Feststoffe und 25 m³ am Folgetag eine hohe Prozessaktivität initiiert, die am 3. Versuchstag zu einer maximalen Biogasrate von etwa 7,4 m³t-¹d-¹, bezogen auf die gesamte eingelagerte Feststoffmasse, führte.

Wie jedoch aus dem weiteren Verlauf der Biogasbildungsrate hervorgeht, wurde diese hohe Abbauaktivität in der Folgezeit nicht aufrechterhalten. So konnte trotz der täglichen Zugabe von neuem flüssigem Gärrest und der Abführung von flüssigem Trockenfermenterinhalt zwischen dem 7. und 10. Versuchstag die Biogasproduktion auf sehr geringe Raten von 1 m³t-¹d-¹ und später 0,5 m³t-¹d-¹ nicht aufgehalten werden. Nach dem Öffnen der Fermenterbox zeigte sich, dass es während des Fermentationsprozesses zum Aufschwimmen der gesamten Feststoffmasse gekommen ist und die Eindringtiefe des flüssigen Gärrestes in den Feststoffstapel nur wenige Zentimeter betrug. Des weiteren wurde festgestellt, dass aufgrund des mangelhaften Flüssigkeitsaustauschs eine starke Übersäuerung im unteren Bereich des Stapels organischer Feststoffe vorlag, während in der Flüssigkeit am Boden der Fermenterbox keine Säureakkumulation festgestellt werden konnte.

Bedingt durch die ungünstigen Prozessbedingungen konnten auch im Bezug auf die Biogasausbeute nur sehr geringe Leistungen erreicht werden. So wurde unter Vernachlässigung des aus dem flüssigen Gärrest zusätzlich gebildeten Biogases, nach der Verweildauer von 29 Tagen eine Ausbeute von nur ca. 45 m³t-¹ erzielt. Das in Laborversuch ermittelte Biogasbildungspotenzial der eingebrachten Triticale-GPS von durchschnittlich etwa 200 m³t-¹ wurde damit nur zu einem geringen Teil ausgenutzt.

3.3 Änderung des Verfahrenskonzeptes

Die Ergebnisse aus den Praxisversuchen zur Feststoffvergärung am Standort CLAUSNITZ und ergänzende Laborversuche haben gezeigt, dass die
Nutzung des flüssigen Gärrestes aus der Nassvergärung von Rindergülle
nicht zielführend ist. Ursache hierfür ist die hohe Viskosität und eingeschränkte Fliessfähigkeit des flüssigen Gärrestes. Das bisherige Konzept der
Feststoffbeimpfung mit flüssigem Gärrest lässt sich deshalb nur durch eine
erhebliche Reduzierung der Substratdichte in den Trockenfermentern
oder durch eine Separation mit hohem Abscheidegrad der Kolloide verwirklichen. Mit der Reduzierung der Substratdichte in der Feststoffvergärung würden die Vorteile der Trockenfermentation jedoch nicht zum
Tragen kommen. Auf der Grundlage der vorgestellten Versuchsergebnisse
wurde deshalb bei der Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe beantragt,
das ursprüngliche Verfahrenskonzept der Kombination aus Nassvergärung

und Feststoffvergärung an der Agrargenossenschaft Clausnitz zu verlassen und statt dessen ein eigenständiges zweistufiges Verfahren zur Feststoffvergärung mit einer niedrigviskosen und in einer separaten Methanisierungsstufe zu regenerierenden Einstauflüssigkeit einzurichten.

Zur Realisierung des neuen Verfahrens zur eigenständigen Feststoffvergärung mit niedrigviskoser Einstauflüssigkeit können alle bereits vorhandenen Behälter genutzt werden (Abb. 6). Hierzu sollten die Trockenfermenter mit einem Überlaufrohr ausgestattet werden, damit sie von unten aufwärts mit Einstauflüssigkeit durchströmt werden können. Ebenfalls zweckdienlich erscheint die Installation von Niederhalterungsvorrichtungen in Form von abnehmbaren Gittern. Für den zur Regeneration der Einstauflüssigkeit benötigten Anaerobfilter kann der bereits vorhandene Sammelbehälter mit einem nutzbaren Volumen von etwa 150 m³ verwendet werden, in dem Trägermaterial für die Ansiedlung einer aktiven methanogenen Mischpopulation eingebracht wird und eine Heizung für die Einstauflüssigkeit nachgerüstet wird.

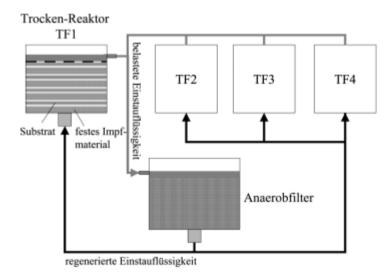


Abb. 6: Schema des veränderten Verfahrens zur zweistufigen Trockenvergärung schüttfähiger nachwachsender Rohstoffe (Beispiel: TF1 mit Zugabe von schüttfähigem Gärrest)

Für die Betriebsweise dieses zweistufigen Vergärungssystems wird als günstig erachtet, die Trockenfermenter einzeln im zeitlichen Versatz mit dem Anaerobfilter zu verschalten. Optimale Intervalle und dabei jeweils ausgetauschte Flüssigkeitsmengen sind durch entsprechende Versuche zu ermitteln. Ebenso ist der optimale Anteil an schüttfähigem Gärrest als festes Impfmaterial zu ermitteln, um insgesamt eine hohe Leistungsfähigkeit der Anlage zu erreichen.

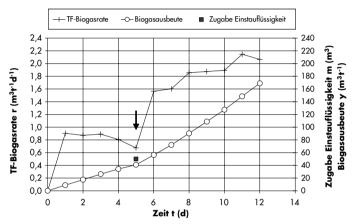


Abb. 7: Prozessverlauf der Feststoffvergärung von Triticale-GPS im Praxismaßstab bei einmaliger Zugabe von Einstauflüssigkeit, Biogasausbeute bezogen auf die Frischmasse der Triticale-GPS

Nachdem im Labormaßstab die Funktionsfähigkeit des veränderten Verfahrens nachgewiesen werden konnte, wurde mit einem Fermentationsversuch in der Praxisanlage Clausnitz begonnen. Hierzu kamen eine Trockenfermenterbox als Behälter für den zu vergärenden organischen Feststoff und eine weitere Fermenterbox als Speicher für die Einstauflüssigkeit zum Einsatz. Die Feststoffmischung enthielt wie im Laborversuch 10 Ma. % Triticale-GPS und 90 Ma.% festes Impfmaterial. Als Impfmaterial kam Rottemist aus der Rinderhaltung zum Einsatz. Die Einstauflüssigkeit bestand aus einer Mischung von Silosickersaft und Niederschlagswasser. Von der Feststoffmischung wurde eine Menge von 64 t mit einer Stapelhöhe von 2,2 m und einer Lagerungsdichte von 0,65 t m³ in den Trockenfermenter eingebracht. Anschließend wurde durch den gasdichten Abschluss des Fermenters der Fermentationsprozess initiiert. Die Ein-

stauflüssigkeit, in einer Menge von 50 t, wurde nach Erwärmung auf etwa 35 °C erst am 5 Tag nach Prozessbeginn zugeführt. Dabei wurde keine Niederhaltungsvorrichtung verwendet. Die Entwicklung der Biogasbildung wurde vor und nach der Flüssigkeitszugabe erfasst (Abb. 7).

Der Verlauf der Biogasrate zeigt, dass sich die Biogasbildung in zwei Phasen aufteilt. Während in den ersten fünf Versuchstagen ohne Einstauflüssigkeit Biogasraten zwischen 0,9 und 0,7 m³t⁻¹d⁻¹ gemessen wurden, erreicht sie nach der Zugabe von 50 t Einstauflüssigkeit Werte von 1,6 bis 2,2 m³t⁻¹d⁻¹. Bezogen auf die Triticale-GPS wurde damit unter Vernachlässigung der als gering angenommenen zusätzlichen Gasbildung aus dem Rottemist und der Einstauflüssigkeit nach 12 Tagen eine Biogasausbeute von 170 m³t⁻¹ beobachtet. Diese Änderung des Verfahrenskonzeptes zur Trockenvergärung am Standort CLAUSNITZ wurde durch die FNR bewilligt, so dass mit den notwendigen Umbauarbeiten begonnen werden konnte. Diese Arbeiten waren im Dezember 2005 abgeschlossen, so dass mit der praktischen Erprobung nach dem neuen Verfahren begonnen werden konnte.

3.4 Laborversuche mit separater Prozessflüssigkeit

Im Hinblick auf die Optimierung des in der Praxisanlage CLAUSNITZ zur Anwendung kommenden neuen Verfahrenskonzeptes wurden im Biotechnikum des ATB begleitende Laborversuche mit 65-Liter-Fermenter aus Plexiglas durchgeführt. Der zur Regeneration der Einstauflüssigkeit vorgesehene Festbettfermenter (Anaerobfilter) enthielt feste Aufwuchsträger (Bioflow 40 PE, 305 m²m³), während der zweite Laborfermenter als einstaufähiger Trockenfermenter arbeitete. Beide Fermenter sind über einen Wassermantel themostatierbar. Für den Transport der Einstauflüssigkeit vom Anaerobfilter (downstream) in den Trockenfermenter (upstream) wurde eine Schlauchpumpe eingesetzt. Die Rückführung der regenerierten Einstauflüssigkeit aus dem Anaerobfilter erfolgte über einen Überlauf. Durch zyklische Flüssigkeitszirkulation in Intervallen von 90 min wurden dabei während einer 2 minütigen Pumpenlaufzeit jeweils 0,8 Liter Flüssigkeit bewegt, woraus sich ein täglicher Flüssigkeitsaustausch ergab.

Für den ersten Vergärungsversuch im Labormaßstab wurde eine Feststoffmischung mit Masse-Anteilen von 10 % Triticale-GPS (oTS = 32,8 % FM) und 90 % schüttfähigem Gärrest (oTS = 9,3 % FM) hergestellt. Als Einstau-

flüssigkeit wurde Sickerwasser aus einer Feststoffvergärung verwendet. Die aus dem eingestauten Trockenfermenter und aus dem Anaerobfilter produzierten Biogas- und Methanmengen wurden getrennt erfasst und auf die eingestzte oTS aus der Triticale-GPS bezogen. In weiteren systematischen Versuchen wurde der Anteil an festen Impfmaterial, das aus vorangegangenen Ansätzen zur Verfügung stand, systematisch reduziert. Als Kenngröße für den oTS-Anteil von festem Impfmaterial diente das auf oTS-Basis ermittelte Impfmaterial-Substrat-Verhältnis.

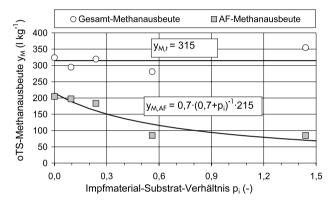


Abb. 8: Einfluss des Impfmaterial-Substrat-Verhältnisses auf die oTS-Methanausbeute bei der zweistufigen Trockenvergärung mit Hilfe eines Anaerobfilters (AF)

Die Fermentationszeit im Trockenfermenter betrug 3 Wochen. Nach dieser Zeit wurde die Einstauflüssigkeit abgelassen, der schüttfähige Gärrest entnommen und mit der Triticale-GPS eine neue Mischung hergestellt. Die Auswertung der Versuche zeigt, dass mit abnehmendem Anteil an Impfmaterial in der Mischung sich der Anteil der Methanausbeute, die vom Anaerobfilter gebildet wird, erhöht (Abb. 8). Wird auf die Zugabe an Impfmaterial verzichtet, stammen etwa 2/3 des gesamten Methans aus dem Anaerobfilter. Die Gesamt-Methanausbeute bleibt unabhängig vom eingestellten Impfmaterial-Substrat-Verhältnisses etwa gleich groß. Die Schwankungen können auf unterschiedlich verwendete Substratchargen zurückgeführt werden. Parallel zu den durchgeführten Versuchen wurde die Laboranlage um zwei weitere Feststofffermenter erweitert, so dass zwei weitere Fermenter zeitversetzt betrieben werden konnten (Abb. 9).



Abb. 9: Ansicht der Laboranlage zur zweistufigen Trockenvergärung, 3 Trockenfermenter im Vordergrund, Anaerobfilter im Hintergrund

Bei den weiteren Versuchen zur zweistufigen Trockenvergärung wurde nur Triticale-GPS (oTS = 290 g kg⁻¹ FM) in die Trockenfermenter gegeben, so dass bei einer Fermentationsdauer von 3 Wochen jede Woche ein Fermenter entleert und befüllt wurde. Der Verlauf der auf das Fermentervolumen bezogenen Methanproduktion zeigt für die Trockenfermenter 1-3 eine deutlich geringere Leistung als der Anaerobfilter (Abb. 10). Interessant ist, dass unmittelbar nach einer Befüllung und Inbetriebnahme des Prozesswasserkreislaufes die Methanproduktion des Anaerobfilters stark ansteigt. Dieser Anstieg ist darauf zurückzuführen, dass die in der Triticale-GPS gelöst vorhandenen organischen Verbindungen (hauptsächlich organische Säuren) ausgetragen werden und damit im Anaerobfilter schnell zu Methan umgesetzt werden können.

Tabelle 4: Biogas- und Methanproduktion (Normliter) aus der kleintechnischen Versuchsanlage des ATB mit jeweils 2 Befüllungen vom 7.12.2005 bis 30.1.2005

Fermenter	Triticale- GPS kg FM	Triticale- GPS kg oTS	Biogas- menge 1	CH ₄ - Menge l	CH ₄ Vol.%
TF1	40,8	12,82	3788	1103	29,1
TF2	44,1	12,43	3568	1089	30,5
TF3	41,0	12,41	3861	1207	31,3
AF	-		10014	6850	68,4
Gesamt	125,9	37,66	21231	10249	48,3

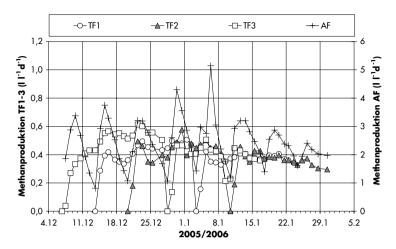


Abb. 10: Methanproduktion der Trockenfermenter und des Anaerobfilters im Verlauf von jeweils 2 Befüllungen je Trockenfermenter in der kleintechnischen Versuchsanlage des ATB

Im untersuchten Zeitraum wurde aus Triticale-GPS (oTS = 299 g kg $^{-1}$ FM) mit jeweils 2 Befüllungen der Trockenfermenter aus 37,66 kg oTS eine Methanmenge von 10249 l gebildet, was einer oTS-Methanausbeute von 272 l kg $^{-1}$ entspricht. Hiervon werden etwa 2/3 vom Anaerobfilter gebildet, so dass die Versuche aus Abb. 8 bestätigt wurden.

4 Schlussfolgerungen und weiterer F&E-Bedarf

Bei der Erprobung der Pilotanlagen in den Agrargenossenschaften PIROW und CLAUSNITZ hat sich gezeigt, dass flüssiger Gärrest aus dem Nachgärer einer konventionellen Nassvergärungsanlage als Inoculum für die Trockenvergärung sowohl bei der Berieselung (Perkolation) als auch beim Einstau die zu vergärenden Biomasse nicht ausreichend durchdringt und damit als Prozess- und Impfflüssigkeit nicht geeignet ist. Es muss deshalb ein eigener Prozesswasserkreislauf mit geringen Feststoffanteilen geschaffen werden, der dann auch den separaten Betrieb der Nass- und Trockenvergärungsanlage ermöglicht. Die Zugabe von schüttfähigem Gärrest zum Gärsubstrat (z. B. Silagen) beschleunigt

die Methanproduktion im Trockenfermenter, wobei der Anteil im zu vergärenden Substratgemisch auf etwa 30 Ma.% begrenzt werden kann. Hierfür ist jedoch eine entsprechende Prozessführung notwendig, um die anfangs in hoher Konzentration vorhandenen organischen Säuren (z. B. Milchsäure und Essigsäure) abzubauen. Die ist durch eine entsprechende "Kreuzschaltung" möglich, indem die Prozessflüssigkeit eines gerade in Betrieb gegangenen Trockenfermenters auf Fermenter geleitet wird, die bereits eine zufrieden stellende Methanproduktion aufweisen. Für ein Gemisch aus 60 Ma.% Maissilage, 13 Ma.% Putenmist und 27 Ma.% Gärrest konnte nach nur 3 Wochen Fermentationszeit eine Methanausbeute von 90 m³t-¹ Frischmasse ermittelt werden. Für die eingesetzte Maissilage errechnet sich hieraus eine spezifische Methanausbeute von 0,34 m³kg-¹ oTS, die auch bei Nassvergärungsanlagen erreicht wird.

Der Abbau der organischen Säuren und anderer leicht umsetzbarer Verbindungen kann aber auch in einem Anaerobfilter mit hoher Leistungsfähigkeit erfolgen. Dieses Konzept wurde unter Laborbedingungen erprobt und ist in der Praxisanlage CLAUSNITZ umgesetzt worden. Zur Optimierung des bei der Trockenvergärung angewendeten Verfahrens der zweistufigen Prozessführung ist jedoch noch weiterer F&E-Bedarf notwendig. Insbesondere könnte die Hydrolyse zur geschwindigkeitsbestimmenden Teilreaktion werden, da immobilisierte Systeme eine leistungsfähige Methanbildung ermöglichen. Forschungsbedarf besteht auch in der optimalen Temperaturführung bei der Trockenvergärung und der Analyse der am mikrobiellen Abbau beteiligten Mischpopulation.

5 Literatur

- Thome-Kozmiensky, K.J. (1995): Biologische Abfallbehandlung, Berlin: EF-Verlag für Energie- und Umwelttechnik.
- [2] Bidlingmaier, W.; Müsken, J. (1997): Biotechnologische Verfahren zur Behandlung fester Abfallstoffe. In: Umweltbiotechnologie, Hrsg. von Johannes C.G. Ottow und Werner Bidlingmaier, Stuttgart; Jena; Lübeck; Ulm: G. Fischer.
- [3] Wellinger, A.; Edelmann, W.; Favre, R.; Seiler, B.; Woschütz. D. (1984): Biogas-Handbuch, Grundlagen-Planung-Betrieb landwirtschaftlicher Anlagen: Verlag Wirz AG, Aarau.
- [4] Linke, B.; Mähnert, P. (2005): Biogasgewinnung aus Rindergülle und nachwachsenden Rohstoffen. Agrartechnische Forschung 11 (5) S. 125-132.

Anschrift der Autoren:
PD Dr. agr. habil. Dipl.-Ing. Bernd Linke,
Dr. rer. hort. Monika Heiermann,
Dipl.-Ing .agr. Jan Mumme
Leibniz-Institut für Agrartechnik Potsdam-Bornim
Max-Eyth-Allee 100
14469 Potsdam
http://www.atb-potsdam.de

Ergebnisse der Diskussion und Zusammenfassung

P. Schüsseler Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR), Gülzow

Ziel des zweiten Gülzower Fachgesprächs zum Thema "Trockenfermentation" am 4.-5.2.2006 war die Vorstellung der ersten Ergebnisse aus den laufenden Förderprojekten der FNR zu diesem Thema, die Diskussion des aktuellen Stands der Entwicklungen seit dem ersten Fachgespräch zu diesem Thema im Februar 2004 und die Identifizierung des möglichen weiteren F+E-Bedarfs.

Von verschiedenen Gesprächsteilnehmern wurde bereits zu Beginn der Veranstaltung ein Diskussions- und Handlungsbedarf im Bereich der Begriffsdefinition "Trockenfermentation" für die landwirtschaftliche Biogaserzeugung, im Hinblick auf die derzeitigen Vergütungsregelungen im Rahmen des EEG, festgestellt.

Die Ergebnisse der Diskussion zur Definition und zum weiteren F+E-Bedarf werden im Folgenden vorgestellt.

Begünstigung der Trockenfermentation durch den Technologiebonus des EEG

Das Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG) beabsichtigt mit dem sogenannten Technologiebonus für Strom aus Biomasse gemäß § 8 Absatz 4, "...einen spezifischen Anreiz zu geben zum Einsatz innovativer, besonders energie-effizienter und damit umwelt- und klimaschonender Anlagentechnik, deren Anwendung regelmäßig mit höheren Investitionskosten verbunden ist."/1/. Gemäß EEG § 8 Absatz 4 wird als begünstigtes Verfahren u.a. die Trockenfermentation benannt, wobei das EEG keine Definition des Begriffs Trockenfermentation enthält. In der amtlichen Begründung zum

§ 8 Absatz 4 EEG heißt es: "Bei Trockenfermentationsverfahren werden im Gegensatz zu Nassvergärungsverfahren keine pumpfähigen sondern stapelbare Substrate eingesetzt. Die eingesetzten organischen Stoffe haben dabei i. d. R. einen Wassergehalt von unter 70 %" /1/.

Während die Zuordnung der bekannten Batchverfahren (z. B. Garagenoder Containerverfahren) zur Trockenfermentation nach o.g. Definition vergleichsweise unstrittig ist, bestehen im Hinblick auf die Vergütungsregelung Abgrenzungsschwierigkeiten zwischen kontinuierlichen Verfahrenstechniken der sogenannten Trocken- bzw. Nassvergärung. In der Praxis sieht es inzwischen so aus, dass auch mit vergleichsweise gängigen und in der kontinuierlichen Nassfermentation erprobten Standardtechniken stapelbare Substrate mit einem Wassergehalt von unter 70 % (z. B. Monovergärung Maissilage), auch ohne Zugabe externer Flüssigkeiten, vergoren werden können und die Betreiber damit gemäß Definition der amtlichen Begründung in den Genuss des Technologiebonusses kommen können.

Aufgrund dieser Praxisentwicklungen wurde während des Expertengesprächs über mögliche zusätzliche Abgrenzungskriterien bei den kontinuierlichen Verfahrenstechniken der Trocken- bzw. Nassfermentation diskutiert. Ein bestimmter Trockensubstanzgehalt im Fermenter als Kennzeichen von Trockenfermentationsverfahren, wie er in früheren Definitionen formuliert wurde /2/, hat sich aufgrund neuerer Untersuchungsergebnisse als fachlich nicht zu begründen herausgestellt (siehe hierzu den Beitrag von Herrn Weiland, FAL).

Zur Abgrenzung zwischen Nassvergärungsverfahren und kontinuierlichen Trockenfermentationsverfahren wurde von den Experten neben den in der amtlichen Begründung genannten Angaben zur Konsistenz und zum Wassergehalt der eingesetzten Substrate (d. h. vor Eingabe in den Fermenter) als weiteres Kriterium die Effizienz des Verfahrens vorgeschlagen. Die Effizienz könne zum einen über die durchschnittliche Raumbelastung im Fermenter (in kg oTS/(m³xd)) und die Bestimmung des Essigsäureäquivalent (in mg/l) am Ablauf des letzten Fermenters oder alternativ zur Raumbelastung über die Biogasproduktivität (Raum-Zeit-Ausbeute (in m³/(m³xd)) bestimmt werden. Als Kennwerte für die Raumbelastung wurden Werte zwischen 3-4 kg oTS/(m³xd) diskutiert, d. h. liegt die Raumbelastung im Jahresdurchschnitt über diesen Kennwerten, dann ist das Verfahren als kontinuierliche Trockenvergärung einzustufen. Mit dem Essigsäureäquivalent am Fermenterablauf soll die Restaktivität des ver-

gorenen Substrats bestimmt werden. Konkrete Kennwerte für das Essigsäureäquivalent bzw. die Biogasproduktivität konnten im Rahmen des Gesprächs nicht genannt werden. Einig waren sich die Experten hingegen, dass für Trockenfermentationsverfahren eine Fahrweise ohne eine externe Flüssigkeitszufuhr (u. a. Gülle, Frischwasser, Pulpe) kennzeichnend sei.

Zur Frage der Nachweisführung für die o. g. Messgrößen wurde vorgeschlagen, den Nachweis durch den Betreiber erbringen zu lassen und zwar durch regelmäßige Messungen (Vorschlag: 1 mal monatlich). Die Messergebnisse wären dann im Betriebstagebuch niederzulegen. Der Aufwand für die Messungen sei durch die zusätzliche Vergütung des erzeugten Stroms mit dem Technologiebonus gerechtfertigt. Zudem seien diese Festlegungen Impulsgeber für mehr Messtechnik und damit mehr Prozesskontrolle im Biogasbetrieb.

Definitionsentwurf

Im Expertengespräch wurde beschlossen, dass ein Definitionsentwurf an die Teilnehmer des Gesprächs übersandt und den Experten anschließend die Möglichkeit gegeben wird, Änderungen, Ergänzungen und entsprechende Begründungen hierzu schriftlich zu äußern. Insbesondere zu den Effizienzkriterien Raumbelastung, Essigsäureäquivalent bzw. Biogasproduktivität sollten die fehlenden Kennwerte ergänzt und entsprechend begründet werden.

Folgender Definitionsentwurf wurde als Diskussionsgrundlage an die Experten des Fachgesprächs übermittelt:

"Bei Trockenfermentationsverfahren werden im Gegensatz zu Nassvergärungsverfahren keine pumpfähigen sondern stapelbare Substrate eingesetzt. Die eingesetzten Substrate haben dabei i. d. R. einen Wassergehalt von unter 70 %. Trockenfermentationsverfahren werden ohne eine externe Flüssigkeitszufuhr betrieben. Bei Trockenfermentationsverfahren wird zwischen Batchverfahren und kontinuierlichen Verfahren unterschieden. Kontinuierliche Trockenfermentationsverfahren grenzen sich zu Nassvergärungsverfahren durch eine Raum-Belastung von über ??? kg oTS/(m³xd) im Fermenter und ein Essigsäureäquivalent von unter ??? mg/l im Ablauf des letzten Fermenters ab."

Alternativ:

"...Kontinuierliche Trockenfermentationsverfahren grenzen sich zu Nassvergärungsverfahren durch eine Biogasproduktivität von über ??? m³/(m³xd) im Fermenter und ein Essigsäureäquivalent von unter ??? mg/l im Ablauf des letzten Fermenters ab."

Auswertung der Rückmeldungen zum Definitionsentwurf

Zusammenfassend muss festgestellt werden, dass nach Auswertung der Rückmeldungen der beteiligten Experten die Festlegung einer gemeinsamen wissenschaftlich begründeten Definition nicht möglich ist.

Während einige Teilnehmer konkrete Werte für die diskutierten Effizienzkriterien aufgrund von Erfahrungswerten bzw. Versuchsergebnissen vorschlugen, äußerten andere ihre Bedenken gegenüber der Eignung der diskutierten Kriterien und rieten von einer entsprechenden Erweiterung des Begriffs Trockenfermentation eindringlich ab. Sie schlugen statt dessen vor, bei der geplanten Prüfung des EEG den Begriff Trockenfermentation ganz aus Liste der innovativen Techniken herauszunehmen.

In Tabelle 1 werden die Rückmeldungen zu dem oben angeführten Textentwurf zusammenfassend vorgestellt.

Tabelle 1: Auswertung der Rückmeldungen zum Definitionsentwurf

Textvorschlag	Kommentar
Bei Trockenfermen-	Formulierung aus der amtlichen Begründung zum
tationsverfahren	EEG /1/
werden im Gegen-	Bewertung: Da auch mit der konventionellen Nass-
satz zu Nassver-	vergärung Substrate, die diese Anforderungen erfül-
gärungsverfahren	len, vergoren werden können (z.B. Monovergärung
keine pumpfähigen	von Maissilage), wird die nebenstehende Formulie-
sondern stapelbare	rung als nicht ausreichend zur Abgrenzung von
Substrate eingesetzt.	Trocken- und Nassfermentationsverfahren eingestuft.
Die eingesetzten	Der Begriff Trockenfermentation wird als irreführend
Substrate haben	eingestuft, da auch bei dieser Verfahrensweise den be-
dabei i.d.R. einen	teiligten Mikroorganismen Feuchtigkeit zur Verfügung
Wassergehalt von	stehen muss. Alternativ wird der Begriff Feststofffer-
unter 70 %.	mentation bzw. Feststoffvergärung vorgeschlagen.

tionsverfahren fr werden ohne eine F	lierunter wird der Verzicht auf eine regelmäßige Zu-
keitszufuhr betrieben • B k d g n b m T (g • V w m li d (n a d d A b h g d c s s s s s s s s s s s s	uhr von Gülle, Frischwasser oder anderen externen lüssigkeiten (z. B. Frucht-, Presswasser oder Pulpe) erstanden. ewertung: Batchverfahren benötigen i.d.R. Flüssigeit, die das Haufwerk als dynamisches Element urchströmt. Die Flüssigkeit kann zwar im Kreislauf eführt werden, um Anreicherungen (von z. B. Ammoium) zu vermeiden, wird ein Flüssigkeitsaustausch ei Bedarf als sinnvoll eingestuft. Hierzu ist anzunerken, dass die Zuordnung von Batchverfahren zur rockenfermentation bei den Experten unstrittig war s. u.). Vie in der Abfallwirtschaft ist bei kontinuierlicher fergärung von stapelbaren Substraten aus der Landvirtschaft (z. B. Maissilage) ein Betrieb ohne regelnäßige Zuführung von externen Flüssigkeiten mögch. Der nebenstehende Definitionszusatz begünstigt ist Monovergärung von nachwachsenden Rohstoffen nR) (z. B. Maissilage) ohne Zusatz von Gülle und nderen Flüssigkeiten. Die Vergärung von nR ohne is stabilisierende Wirkung der Gülle stellt aus Sicht er Verfahrenstechnik ein erhebliches Risiko dar. außerdem führt der zunehmende Verzicht auf Gülle ereits heute dazu, dass selbst in Gebieten mit einem ohen Tierbesatz der Flüssigmist nicht mehr den Bioasanlagen zugeführt wird. Die ökologischen Vorteile ieser Art der Gülleaufbereitung (Minderung von ieruch- und Methanemissionen) bleiben so unberücksichtigt. Zudem sind Stoffströme wie z. B. Stroh, andschaftspflegematerial ohne eine regelmäßige

Textvorschlag	Kommentar
Bei Trockenfermentationsverfahren wird zwischen Batchverfahren und kontinuierlichen Verfahren unterschieden.	 Beim Batchverfahren wird der Fermenter mit frischem Substrat gefüllt, welches dort bis zum Ende der Verweilzeit ohne weitere Substratzu- oder -abfuhr verbleibt. Bei kontinuierlichen Verfahren wird dem Fermenter stetig Substrat zugeführt. Bei quasikontinuierlicher Beschickung wird "mindestens einmal arbeitstäglich eine unvergorene Substratmenge in den Fermenter eingebracht."/3/ Bewertung: Die Zuordnung der bekannten Batchverfahren (hier Garagenverfahren, Boxenverfahren, Schlauchverfahren etc.) zur Trockenfermentation im Sinne der amtlichen Begründung zum EEG gilt bei den Experten als unstrittig.
Kontinuierliche Trockenfermenta- tionsverfahren grenzen sich zu Nassvergärungsver- fahren durch eine Raum-Belastung von über ??? kg oTS/ (m³xd) im Fermen- ter ab.	 Nennung von Werten zwischen 2,5-5 kg oTS/(m³xd) Diese Werte sind nicht nur in der ersten Prozessstufe einzuhalten, sie gelten über das Volumen sämtlicher aktiv an der Biogasproduktion beteiligten Fermenter. Daher Ergänzungsvorschlag: "Raumbelastung von, die bei mehrstufigen Anlagen über das Volumen sämtlicher aktiv an der Biogasproduktion beteiligten Fermenter gelten muss und nicht allein für die erste Prozessstufe". Ergänzungsvorschlag: "Kontinuierliche Trockenfermentationsverfahren, die ausschließlich nR verarbeiten," da z. B. bei der Verarbeitung von kommunalen Bioabfällen im Trockenfermentationsverfahren Raumbelastungen von bis zu 15 kg oTS/(m³xd) üblich sind. Bewertung: Die Eignung der Raumbelastung als Effizienzkriterium wird angezweifelt,da sie bei verschiedenen Substratarten aufgrund der unterschiedlichen Abbaubarkeit in sehr unterschiedlichen Bereichen bei gleichzeitig stabilem Anlagenbetrieb liegen kann. Durch den Einsatz langsam abbaubarer Substrate kann eine Erhöhung der Raumbelastung erzielt werden, ohne das dies zu einer optimierten Biogasausbeute und Prozesseffizienz führen würde. Dies würde beispielsweise als besonders förderwürdig eingestufte Substrate wie z. B. Landschaftspflegematerial aus "effizienten" Anlagen ausschließen

Textvorschlag	Kommentar
Alternativ: Kontinuierliche Trockenfermentationsverfahren grenzen sich zu Nassvergärungsverfahren durch eine Biogasproduktivität von über ??? m³/(m³xd) im Fermenter ab.	 Nennung von Werten von über 1,5 m³ bzw. über 2 m³/(m³xd) in der Trockenfermentationsanlage Bewertung: Die Eignung des Faktors Biogasproduktivität als Effizienzkriterium wird angezweifelt, da diese Größe im wesentlichen von der Abbaubarkeit der Substrate abhängt und bei der Bildung von Mindestwerten einzelne Stoffklassen (z. B. Grünschnitt) voraussichtlich aufgrund ihrer langsamen Abbaueigenschaften herausfallen würden.
Ergänzend zum Faktor Raumbelastung oder Biogasproduktivität: und ein Essigsäureäquivalent von unter ??? mg/l im Ablauf des letzten Fermenters	 Nennung von Werten von unter 1.500 mg/kg bzw. unter 1.500 bis 2.000 mg/l im Ablauf des letzten Fermenters Bewertung: Die Eignung des Faktors Essigsäureäquivalent zur Beurteilung der Restgasaktivität der vergorenen Substrate wird angezweifelt, da zwischen niedrigen Gehalten an flüchtigen Fettsäuren und dem Restgaspotenzial kein hinreichend enger Zusammenhang bestehen würde. Als alternativer Parameter wird das Restgaspotenzial mit folgendem Grenzwert vorgeschlagen: "Im Ablauf des letzten Fermenters muss das Restgaspotenzial weniger als 5 % der Gasmenge betragen, die in der Biogasanlage aus den entsprechenden Einsatzstoffen realisiert wurden und unter 50 Normliter Methan je Kilogramm organischer Masse der Faulsubstrate liegen (Gärtest 35 d, 37 °C Gärtemperatur)".

Zusammenfassung der Rückmeldungen zum Definitionsentwurf

Aus den oben aufgeführten Ausführungen zu den verschiedenen Kriterien wird deutlich, dass eine wissenschaftlich begründbare eindeutige Abgrenzung von kontinuierlichen Trocken- und Nassvergärungsverfahren nicht möglich ist. Eine Festlegung von Grenzwerten für die o.g. Effizienzkriterien und die Berücksichtigung dieser erweiterten Definition bei der Vergaben des Technologiebonusses würde u.a. zu einer Ausgrenzung von prinzipiell gewünschten Substraten (z. B. Stroh, Grünschnitt, Landschaftspflegematerial) führen. Zudem würden durch den Zusatz "...ohne externe Flüssigkeitszufuhr" bei kontinuierlichen Verfahren der prinzipiell prozessbiologisch und ökologisch sinnvolle Einsatz von Gülle benachteiligt. Hinzu kommt, dass inzwischen verschiedene Verfahrenstechniken zur kontinuierlichen Vergärung nachwachsender Rohstoffe ohne externe Flüssigkeitszufuhr auf dem Markt erhältlich sind, die die o.g. Kriterien erfüllen können und zwar ohne erhebliche Investitionsmehrkosten. Folglich ist der aktuelle Innovationsgehalt, egal ob diese Verfahren nun der kontinuierlichen Trockenfermentation oder Nassfermentation zugeordnet werden, als vergleichsweise gering einzuschätzen. Eine zukünftige Förderung derartiger Verfahrenstechniken durch den Innovations- bzw. Technologiebonus könnte hier eine Überförderung bedeuten und damit letztlich zu einer Marktverzerrung führen.

Aus diesen Gründen wird seitens FNR dringend empfohlen, bei der geplanten Überprüfung des EEG die Sinnhaftigkeit der weiteren Festschreibung des Begriffs "Trockenfermentation" im Förderkatalog des Innovationsbonusses zu hinterfragen. Letztlich zielt das EEG mit dem Innovationsbonus darauf ab, wie oben schon ausgeführt, den "...Einsatz innovativer, besonders energieeffizienter und damit umwelt- und klimaschonender Anlagentechnik, deren Anwendung regelmäßig mit höheren Investitionskosten verbunden ist" zu fördern und diese können nach Einschätzung der FNR sowohl aus dem Bereich der Trocken- als auch Nassfermentationsverfahren stammen.

Alternativ sollte geprüft werden, ob es möglich ist, ein oder mehrere sinnvolle Effizienzkriterien für die Biogasgewinnung zu entwickeln, in denen z.B. der Eigenstrombedarf berücksichtigt wird.

Letztlich sollte bei der geplanten Prüfung des EEG aus Sicht der FNR die Wirksamkeit des Innovationsbonusses als Instrument zur Förderung innovativer, besonders energieeffizienter und damit umwelt- und klimaschonender Anlagentechnik insgesamt überprüft werden. Auch die Eignung und Umsetzbarkeit alternativer Förderinstrumente sollte in die Diskussion aufgenommen werden. Wichtig sind in diesem Zusammenhang die ersten Ergebnisse des Monitoring-Projekts des Instituts für Energetik (IE) zu den Wirkungen des EEG /4/.

Weiterer F+E-Bedarf

Insgesamt werden die ersten Ergebnisse der laufenden Untersuchungen zur Trockenfermentation (hier überwiegend im Batchverfahren) als äußert interessant und wertvoll für die weitere Entwicklung dieser Verfahrensvariante eingestuft. So zeigten erste Laborergebnisse vergleichbare Biogaserträge wie bei der Nassfermentation. Des Weiteren wurde in verschiedenen Versuchsanstellungen festgestellt, dass niedrig-viskose Flüssigkeiten besser als Gülle und flüssiger Gärrest aus der Nassfermentation zur Perkolation in Batchverfahren geeignet sind, da sie besser ins Haufwerk eindringen. Weiterhin konnten positive Effekte durch das Anwärmen des Perkolats/ der Einstauflüssigkeit, durch eine gleichmäßige Benetzung, durch sorgfältige Durchmischung von Alt- und Frischmaterial sowie durch Kreuzschaltung des Perkolats beobachtet werden. In den Diskussionen zu den Präsentationen und in der Abschlussdiskussion wurde festgestellt, dass der im Nachgang zum ersten Fachgespräch formulierte F+E-Bedarf größtenteils planmäßig durch die aktuellen Forschungsprojekte erarbeitet wird. Da die Arbeiten jedoch noch nicht abgeschlossen sind, waren konkrete Aussagen zum weiteren F+E-Bedarf zu diesem Zeitpunkt nur vereinzelt möglich.

Im Bereich der Batchverfahren wurde folgender F+E- bzw. Optimierungsbedarf präzisiert:

- Untersuchungen zur Subtrataufbereitung, hier: Zerkleinerung, Mischung
- Untersuchung verschiedener Animpfstrategien, hier speziell: Auswirkungen von Kreuz- bzw. Mischberieselung bei verschiedenen Substraten, Vorwärmung des Perkolats, optimale Mischungsverhältnisse bei verschiedenen Substratmischungen, optimierte Zumischung von Gärresten, optimale Intervalle bei Anstauverfahren

- Untersuchungen zur Prozessführung: optimale Temperaturführung, weiterführende Untersuchungen zur zweistufigen Prozessführung, Analyse der am mikrobiellen Abbau beteiligten Mischpopulationen
- Erprobung von in Labor- bzw. Technikumanlagen erprobten Verfahren unter Praxisbedingungen
- Ermittlung von belastbarem und vergleichbarem Datenmaterial aus Vergärung von nR

Fazit

Seitens der FNR wurden die Präsentationen als hochwertig und die Einzeldiskussion sowie die abschließende Gesamtdiskussion als zielorientiert eingestuft. Zwar führte die Diskussion zum Begriff "Trockenfermentation" im Hinblick auf die damit verbundene Vergütungsregelung gemäß EEG nicht zu einer neuen Definition des Begriffs, allein die Protokollierung der Diskussion sowie die Auswertung der Rückantworten zum Definitionsentwurf zeigen äußerst interessante Aspekte im Hinblick auf das Thema "Trockenfermentation". Die Diskussion führte letztlich zu dem Ergebnis, dass seitens FNR die Überprüfung der Zweckmäßigkeit des Begriffs "Trockenfermentation" in der Liste der nach EEG § 8 Absatz 4 bonusfähigen Technologien dringend empfohlen wird.

Alternativ empfiehlt die FNR, im Rahmen der geplanten Überprüfung des EEG die Eignung eines oder mehrerer "Effizienzkriterien" zur Identifizierung innovativer, besonders energieeffizienter und damit umwelt- und klimaschonender Anlagentechnik bzw. die Eignung alternativer Förderinstrumente zu prüfen.

Literaturverzeichnis

- /1/ Ausschuss für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (2004): Begründung zu den gleichlautenden Gesetzentwürfen der Bundesregierung sowie der Fraktionen SPD und BÜNDNIS 90/Die GRÜNEN; Entwurf eines Gesetzes zur Neuregelung des Rechts der Erneuerbaren Energie im Strombereich. (Drucksachen 15/2327, 15/2539); Ausschussdrucksache 15(15)265, Drucksache 15/2864, Deutscher Bundestag 15. Wahlperiode, 1.4.2004, Anlage 4, Bundesanzeiger Verlagsgesellschaft, Köln, S. 20-55.
- /2/ Schattauer A., Weiland P. (2005): Grundlagen der anaeroben Fermentation. In: Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. (FNR) (Hrsg.): Handreichung Biogasgewinnung und -nutzung, Eigenverlag, S. 25-35.
- /3/ Scholwin F., Weidele T., Gattermann H. (2005): Merkmale und Unterscheidung verschiedener Verfahrensvarianten. In: Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. (FNR) (Hrsg.): Handreichung Biogasgewinnung und -nutzung, Eigenverlag, S. 36-85.
- /4/ Institut für Energetik und Umwelt gGmbH (2005): Monitoring zur Wirkung des novellierten Erneuerbare-Energien-Gesetzes (EEG) auf die Entwicklung der Stromerzeugung aus Biomasse. 2. Zwischenbericht. Im Auftrag des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU).

Anschrift der Autorin: Dr. Petra Schüsseler Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR) Hofplatz 1 18276 Gülzow p.schuesseler@fnr.de

Teilnehmerliste

Name	Institution/Firma
Herr Prof. DrIng. Weiland	Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft (FAL), Institut für Technologie und Biosystemtechnik, Braunschweig
Herr PD DrIng. Linke	Leibniz – Institut für Agrartechnik Bornim e. V. (ATB), Bioverfahrenstechnik, Potsdam
Herr Prof. DrIng. Kraft	Bauhaus-Universität Weimar, Weimar
Herr DrIng. Scholwin	Institut für Energetik und Umwelt gGmbH (IE), Leipzig
Frau Kusch	Universität Hohenheim, Landesanstalt für Landwirtschaftliches Maschinen und Bauwesen, Stuttgart-Plieningen
Herr Prof. Dr. Vollmer	BTN Biotechnologie Nordhausen GmbH, Nordhausen
Herr Dr. Gronauer	Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft, Institut für Landtechnik, Bauwesen und Umwelttechnik, Freising
Herr Prof. Dr. Sprenger	Universität Rostock, Lehrstuhl für Verfahrenstechnik und Biotechnologie, Rostock
Herr DrIng. Matzmohr	Universität Rostock, Lehrstuhl für Verfahrenstechnik und Biotechnologie, Rostock
Herr Dr. Dreher	BMU, Referat Z III 2, Berlin
Herr Ott	Fachverband Biogas e. V., Freising
Herr Wagner	C.A.R.M.E.N. e. V., Straubing
Herr OAR Welsch	BMELV, Referat 523, Bonn
Herr DrIng. Schütte	FNR, Gülzow
Frau Dr. Schüsseler	FNR, Gülzow
Herr Fuchs	FNR, Gülzow
Herr Paterson	FNR, Gülzow