



Neue Wege zur Prozessoptimierung in Biogasanlagen

Abgeschlossene Vorhaben im
BMUB-Förderprogramm

Teil 1



**Energetische
Biomassenutzung**



**Energetische
Biomassenutzung**

Schriftenreihe des BMU-Förderprogramms
„Energetische Biomassenutzung“

BAND 11

Neue Wege zur Prozessoptimierung in Biogasanlagen

Abgeschlossene Vorhaben im BMU-Förderprogramm
Teil 1

Herausgegeben von
Daniela Thrän, Diana Pfeiffer

Gefördert vom



Bundesministerium
für Umwelt, Naturschutz,
Bau und Reaktorsicherheit

Koordiniert vom



Wissenschaftlich
begleitet vom



Impressum

Herausgeber

Daniela Thrän, Diana Pfeiffer

Kontakt

DBFZ Deutsches Biomasseforschungszentrum gemeinnützige GmbH
Torgauer Straße 116
D-04347 Leipzig
Telefon: +49 (0)341 2434-554
Telefax: +49 (0)341 2434-133
E-Mail: diana.pfeiffer@dbfz.de
www.energetische-biomassenutzung.de

Geschäftsführung

Wissenschaftlicher Geschäftsführer:
Prof. Dr. mont. Michael Nelles
Administrativer Geschäftsführer:
Dipl.-Kfm. (FH) LL.M. Daniel Mayer

Redaktion

Programmbegleitung des BMU-Förderprogramms
„Energetische Biomassenutzung“
www.energetische-biomassenutzung.de

Bildnachweis

Umschlag vorn: S. Kronberg/DBFZ, M. Dotzauer/DBFZ, M. Dotzauer/DBFZ, M. Dotzauer/DBFZ
Umschlag hinten: DBFZ, Barbara Thomas/pixelio.de, U. Dreiucker/pixelio, A. Gröber/DBFZ
Wenn nicht anders am Bild bezeichnet, liegen die Rechte beim DBFZ.

Layout & Herstellung

Steffen Kronberg
Angela Gröber

Druck

Fischer Druck, Leipzig

Förderung

Erstellt mit finanziellen Mitteln des Bundesministeriums
für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit,
Berlin (BMU)

ISSN 2192-1806

© Copyright: Alle Rechte vorbehalten. Kein Teil dieses Druckerzeugnisses darf ohne schriftliche Genehmigung des Herausgebers vervielfältigt oder verbreitet werden. Unter dieses Verbot fällt insbesondere auch die gewerbliche Vervielfältigung per Kopie, die Aufnahme in elektronische Datenbanken und die Vervielfältigung auf anderen digitalen Datenträgern.

Alle Rechte vorbehalten.
© DBFZ 2014

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	7
Vergleichende Untersuchungen an großtechnischen Biogasreaktoren - Mikrobiologische, verfahrenstechnische, ökologische und ökonomische Bewertung und Optimierung	9
Steigerung der Energieeffizienz bei der Vergärung fester biogener Reststoffe	25
Effizienzsteigerung von Grünlands substraten	47
Bioabfallvergärung - Beiträge zur Prozessoptimierung und zur verbesserten Gasnutzung	63
Imageanalyse und Imagewandel der Biogastechnologie	73
Grünlandenergie Havelland - Die energetische Nutzung von Gras und Schilf	86
Bestimmung der Biogaserträge für Presswasser aus der mechanischen Entwässerung von Läuterbottichtreiber	99



Vorwort

Liebe Leserinnen, liebe Leser,

zu schade zum Wegwerfen und verrotten lassen – das sind über 100 Kilogramm pro Einwohner an Abfällen aus Küche, Hof und Garten, wie Obst- und Gemüseschalen, Speisereste oder Grüngut aus der Landschaftspflege, Millionen Tonnen aus denen sich Energie gewinnen ließe, etwa in Form von Biogas. Das Förderprogramm „Energetische Biomassenutzung“ des Bundesumweltministeriums legt daher einen Schwerpunkt auf den effizienten Einsatz der Biogastechnik für die Nutzung von Reststoffen.

Bioenergie soll in den kommenden Jahren eine wichtige Funktion übernehmen, zum Beispiel als Ausgleich von fluktuierenden erneuerbaren Energien wie Sonne und Wind. Neue Substrate müssen dafür erschlossen werden. Neben den nachwachsenden Rohstoffen können dies vor allem Reststoffe sein, die nicht in Konkurrenz zur Nahrungsmittelproduktion stehen.

So schön die Theorie klingt, energetisch zu verwerten, was ohnehin schon da ist, so groß sind die Herausforderungen in der Praxis. Sind bestehende Anlagen auf die Vergärung der wenig homogenen Stoffe ausgelegt? Wie hoch sind die Gasausbeuten? Was ist bei Transport und Vorbearbeitung zu beachten? Ermöglichen die Stoffe einen wirtschaftlichen Betrieb? Die in diesem Sammelband vorgestellten praxisnahen Vorhaben wollen ein Teil dieser Fragen aufgreifen und versuchen Antworten zu liefern.



Neue Lösungen hierfür erfordern einen Blick auf die ganze Wertschöpfungskette: Von einem gestuften Ernteverfahren, die Gräser effektiv in der Trockenfermentation nutzen lassen – in Einklang mit dem Naturschutz, über eine gezielte Vorbehandlung der Reststoffe etwa mittels einer Hydrolyse bis hin zu Frühwarnsystemen für Prozessstörungen.

Zweistufige Verfahren bieten sich auch bei einem Reststoff an, der in Deutschland millionenfach anfällt, dem Biertreber. An diesem Beispiel zeigt sich die praxisnahe Anwendung: Denn das Interesse der Brauereien den Stoff energetisch zu verwerten und damit die eigenen Betriebskosten zu senken ist groß.

Noch stellen viele Reststoffe Fermenter vor große Herausforderungen. Prozessstörungen können dazu führen, dass Substrate nur unzureichend umgesetzt werden. Es bleiben auch weiterhin Forschungsanstrengungen, die vor uns liegen.

Ich wünsche Ihnen interessante Erkenntnisse bei der Lektüre des Bandes und hoffe, dass wir Ihnen einige Anregungen mit auf den Weg gegeben können.



Prof. Dr. mont. Michael Nelles

Wissenschaftlicher Geschäftsführer DBFZ, Lehrstuhlinhaber für Abfall- und Stoffstromwirtschaft an der Universität Rostock



OptGas – Vergleichende Untersuchungen an großtechnischen Biogasreaktoren

Hilke Würdemann¹, Anne Kleyböcker¹, Tobias Lienen¹, Marietta Liebrich¹, Manuel Brehmer⁴, Matthias Kraume⁴, Jaqueline Daniel-Gromke², Helge Lorenz², David Balussou⁶, Russell McKenna⁶, Lucie Moeller³, Kati Görsch³, Roland Müller³, Andreas Zehnsdorf³, Doren Zirkler⁵, Martin Kaupenjohann⁵

Vorhaben: Untersuchungen an großtechnischen Biogasreaktoren - Verfahrenstechnische, mikrobiologische, ökologische und ökonomische Bewertung und Optimierung

FKZ-Nr.: O3KB018

Laufzeit: 01.08.2009 – 15.10.2012

Zuwendungssumme: 1.478.705 €

Koordination:

¹ Helmholtz-Zentrum Potsdam – Deutsches Geoforschungszentrum GFZ
Zentrum für CO₂-Speicherung – Mikrobielles Geoengineering
Telegrafenberg, 14473 Potsdam
www.gfz-potsdam.de

Projektpartner:

² Deutsches Biomasseforschungszentrum gGmbH (DBFZ)
Torgauer Straße 116, 04347 Leipzig
Dr. Helge Lorenz
Telefon: +49 (0) 341 2434-460
E-Mail: helge.lorenz@dbfz.de

³ Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung (UFZ)
Permoserstr. 15, 04318 Leipzig
Dr. Andreas Zehnsdorf
Telefon: +49 (0) 341 235-1850
E-Mail: andreas.zehnsdorf@ufz.de

TU Berlin, Institut für Prozess- und Verfahrenstechnik – Fachgebiet Verfahrenstechnik
 Straße des 17. Juni 136, 10623 Berlin
 Prof. Dr.-Ing. Matthias Kraume
 Telefon: +49 (0) 30 314-23701
 E-mail: matthias.kraume@tu-berlin.de

TU Berlin, Fachgebiet Bodenkunde
 Ernst-Reuter-Platz 1, 10587 Berlin
 Prof. Dr. Martin Kaupenjohann
 Telefon: +49 (0) 30-3147-3530
 E-Mail: martin.kaupenjohann@tu-berlin.de

Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
 Institut für Industriebetriebslehre und Industrielle Produktion (IIP)
 Hertzstraße 16, 76187 Karlsruhe
 Dr. Russell McKenna
 Telefon: +49 (0) 721-608-44582
 E-Mail: mckenna@kit.edu

Kontakt:

Dr. Hilke Würdemann
 Telefon: +49 (0) 331 288-1516
 E-Mail: wuerdemann@gfz-potsdam.de



Hilke Würdemann (Projektleiterin):

Das rechtzeitige Erkennen von Prozessstörungen ist eine wesentliche Voraussetzung für einen optimierten Betrieb von Biogasanlagen. Der gezielte Einsatz von Additiven zur Prozessstabilisierung verbessert sowohl die ökonomische als auch die ökologische Bilanz von Biogasanlagen.

Zusammenfassung

Für eine verstärkte Verwertung von Rest- und Abfallstoffen in Biogasanlagen wird ein zuverlässiges, technologisch flexibles System benötigt, da Substratumstellungen Störungen wie Übersäuerung, Schaum und Schwimmschichten verursachen können, die die Durchmischung und/oder die effektive Ausnutzung der Anlage beeinträchtigen. Zudem treten aufgrund unvorteilhaft geregelter Umwälzungen, Dosier- und Abzugseinheiten in Biogasanlagen regelmäßig Kurzschlussströme auf. Eine Tracerstudie zeigte, dass im Extremfall bis zu 72 % des zugeführten Substrats direkt nach einer Dosierung unvergoren wieder abgeführt wurde. Im Durchschnitt lagen die Verluste in den untersuchten Anlagen zwischen 16 % und 33 % der maximalen Methanausbeute.

Als Beitrag zur Steigerung der Anlageneffizienz wurden verschiedene Prozessstörungen an großtechnischen Biogasanlagen analysiert sowie in Laborfermentern simuliert, um den Prozess unter kontrollierten Bedingungen zu studieren und Gegenmaßnahmen zu entwickeln. Es wurde ein Frühwarnindikator entwickelt, der bereits zwischen drei und sieben Tagen vor dem Eintreten auf eine Übersäuerung hinweist. Dieser Zeitraum ist für die Einleitung von Gegenmaßnahmen zur Stabilisierung des Prozesses ausreichend. Unter Einsatz des Indikators wurde eine stufenweise Erhöhung der Raumbelastung vorgenommen. Dabei diente der Frühwarnindikator zur Steuerung der Additiv-Zugabe. In verschiedenen Laborversuchen konnten Raumbelastungen von 6,0 und 9,5 kg_{oTS} m⁻³ d⁻¹ mit Fettanteilen von bis 87 % bei Methanausbeuten von 0,9 m³ kg_{oTS}⁻¹ erfolgreich gefahren werden. Zwischen zwei Erhöhungen der Substratfracht erwies sich ein Zeitintervall von acht Tagen als notwendig, um die Methanausbeute im Erwartungsbereich zu halten.

An einer mit Klärschlamm und Fett beschickten Biogasanlage wurde ein Schaumereignis untersucht. Genetische Fingerprint-Analysen zur Charakterisierung der mikrobiellen Biozönose der im Winter zur Schaumbildung neigenden Anlage wiesen auf die Beteiligung des fädigen Bakteriums *Candidatus Microthrix parvicella* an der Schaumbildung bzw. Schaumstabilisierung hin. Eine Langzeitbeprobung des betroffenen Reaktors zeigte jahreszeitliche Änderungen der Abundanz von *M. parvicella*, die mit der Umgebungstemperatur und der Zufuhr von Fett als Co-Substrat korrelierte.

Neben den wissenschaftlich technischen Fragestellungen wurden Betriebserfahrungen der Betreiber mit Schaumereignissen gesichtet und bewertet. Circa 80 % der befragten Betreiber waren wenigstens einmal von einem Schaumereignis betroffen. Eigene Laboruntersuchungen deuten darauf hin, dass Proteine und Polysaccharide eine wesentliche Rolle in der Bildung bzw. Stabilisierung von Schaum im Biogasreaktor spielen.

Im Rahmen der ökologischen Bewertung der hier im Fokus stehenden großtechnischen Biogasanlagen wurde auch die Fragestellung beantwortet, wie sich die Umweltwirkung der Biogasanlagen verändert, wenn Prozessstörungen eintreten. Dabei wurden als Prozessstörungen-Zustände 1) Übersäuerung und 2) ungünstige Durchmischungsverhältnisse ausgewählt, die an den untersuchten Biogasanlagen im Projektverlauf wesentliche Effekte zeigten (u. a. verminderte Methanausbeuten). Aufgrund der beschriebenen Prozessstörungen fiel die Klimabilanz der Anlagen ungünstiger als im optimierten Anlagenbetrieb aus. Ungünstige Prozesszustände sind daher aus ökonomischer und ökologischer Sicht in jedem Fall zeitnah zu beheben.

Aus energiesystemanalytischer Sicht wurde festgestellt, dass unter den aktuellen Rahmenbedingungen die Verstromung von Biogas aus nachwachsenden Rohstoffen die wirtschaftlichste Alternative ist. Die Prozesshemmungen, d. h. Übersäuerung und Schaumbildung, haben einen negativen Einfluss auf die ökonomische Bilanz der Anlagen, im Fallbeispiel (Übersäuerung einer Abfallanlage) lagen die Verluste bei 5,7 ct/kWh_{el}. Bei einer weiteren Gültigkeit des EEG-2012 kann mit einer Steigerung der gesamten installierten elektrischen Leistung der deutschen Biogasbranche bis zum Jahr 2030 auf ca. 6,3 GW_{el}, überwiegend auf Basis von NawaRo und Gülle, gerechnet werden.

Charakterisierung der Durchmischung in Biogasanlagen

Zur Bestimmung des Verweilzeitverhaltens in Biogasanlagen wird das Substrat mit einer definierten Menge eines Tracers markiert und anschließend die Zeitspanne bis zum Nachweis des Tracers im Output der Anlage und der Verlauf der Konzentrationsabnahme bestimmt. Tracerstudien liefern auch Aufschluss über das Zusammenwirken von Fermenter- und Rührwerksdesign sowie der Rührwerksbetriebsweise. Mit Hilfe dieses Verfahrens wurde die Durchmischung an zwei großtechnischen Biogasanlagen charakterisiert. Die Ergebnisse der Tracerstudie konnten mit Hilfe von Modellen, die eine Kompartimentierung im Reaktor simulieren, erfolgreich abgebildet werden. Das Verweilzeitverhalten der füllstandsregulierten Reaktoren war abhängig davon, zu welchem Zeitpunkt nach der Substratzufuhr der Gärrestabzug ausgelöst wurde. Im Extremfall wurden bis zu 72 % des zugeführten Substrats direkt nach einer Dosierung abgezogen und verminderten entsprechend die Methanausbeute (Kleyböcker et al. 2007). An einer großtechnischen Biogasanlage führte das im Durchschnitt zu einer um 33 % (Reaktor 1) bzw. 16 % (Reaktor 2) verringerten Methanausbeute.

Bei Untersuchungen an einer weiteren Anlage zeigte der in der Umwälzung beobachtete Verlauf der Tracerkonzentration, dass Substrat und Tracer schon 5 min nach Dosierung den Reaktor von oben nach unten über eine Distanz von ca. 30 m durchströmt hatten. Im Rahmen einer CFD-Simulation zur Abbildung des Strömungsverhaltens wurden die auftre-

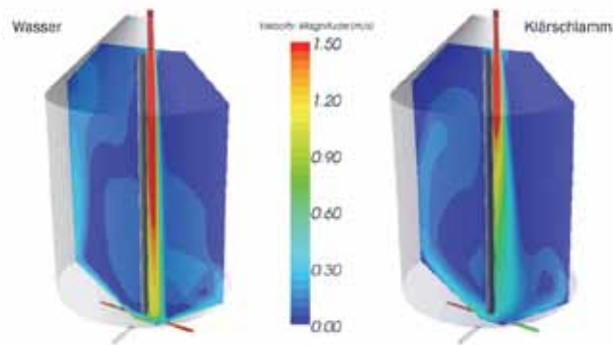


Abbildung 1: Momentaufnahme eines Strömungsprofils in einer großtechnischen Biogasanlage unter Zugrundelegung der Viskosität von Wasser (links) und Klärschlamm (rechts)

tenden Stagnationszonen lokalisiert und visualisiert. Der Einfluss des Viskositätsverhaltens des Klärschlammes auf das Geschwindigkeitsprofil im Vergleich zu dem von Wasser wurde in Abbildung 1 dargestellt. Zur Berechnung der Geschwindigkeitsfelder wurde dabei die unter Einsatz eines laminaren Strömungsrohrs experimentell ermittelten rheologischen Werte des Gärsubstrats zurückgegriffen. CFD-Simulationen ohne Berücksichtigung der komplexen Rheologie würden daher zu erheblichen Fehlern führen (Brehmer et al. 2011). Um Produktionsausfälle durch defekte Rührwerke und kostspielige Reparaturen zu vermeiden, werden bei der Vergärung biogener Reststoffe zunehmend externe Pumpen für die Umwälzung der Gärsubstrate eingesetzt. Wie die CFD-Simulation und die Tracerstudie zeigen, steht dem Vorteil einer vereinfachten Wartungsmöglichkeit das erhöhte Risiko einer Ausbildung von größeren Stagnationsvolumina und somit einer deutlich reduzierten Methanausbeute entgegen.

Ein Vergleich der gemessenen Tracerkonzentrationen im Ablauf des Biogasreaktors mit den berechneten Konzentrationen am Auslass eines ideal durchmischten Rührkessels zeigt, dass die Durchmischung des Biogasreaktors unter Annahme einer Stagnationszone (62,5 % des Reaktorvolumens) und einer dynamischen Zone (37,5 % des Reaktorvolumens) simuliert werden kann. In der dynamischen Zone führte die niedrige Verweilzeit von etwa 4 Tagen zu einem vorzeitigen Substrataustrag. Dem Modell entsprechend werden 19 % des täglich zugeführten Substrates innerhalb eines Tages wieder abgeführt. Wäre der Reaktor dagegen ideal durchmischt, würden nur 11 % des frischen Substrats ausgetragen werden. Dementsprechend gehen an dieser Anlage täglich 8 % des Substrats zur Erzeugung von Energie verloren (Kleyböcker et al. in prep.).

Frühwarnindikatoren zur Vermeidung von Prozessstörungen unter Einsatz von Additiven

Zur Entwicklung eines Frühwarnindikators wurden Übersäuerungen durch Substratüberfrachtungen im Labormaßstab gezielt herbeigeführt. Während der Übersäuerung konnten deutliche Änderungen der Verläufe verschiedener Parameter wie der Gasproduktion, dem pH-Wert, den Gaskomponenten (CH₄, CO₂, H₂) und den kurzkettigen Säuren (CH₂O₂ bis C₅H₁₀O₂) beobachtet werden. Diese Parameter reagierten jedoch erst eindeutig, wenn das Gärsubstrat bereits übersäuert war. Als Steuergröße im Hinblick auf die Prozessstabilität sind die Parameter daher weniger geeignet, weil sie erst eindeutig auf eine Überfrachtung des Systems hinweisen, wenn die Übersäuerung bereits erfolgt ist (Kleyböcker et al. 2012a). Die in Untersuchungen des GFZ entwickelten Frühwarnindikatoren (Phosphat in der wässrigen Phase [FWI-PO4]); Verhältnis organischer Säuren zu Calcium (FWI-VFA/Ca, Patentschrift: DE102008-044204A1: Verfahren zur Prozesssteuerung von Bioreaktoren) haben sich als geeignete Parameter für die Anzeige der Gefahr einer Übersäuerung in zwei Biogasanlagen erwiesen, die Klärschlamm und Fette als Substrat verwendeten (Kleyböcker et al. 2012a). Der Frühwarnindikator (FWI-VFA/Ca) zeigte zwischen drei und sieben Tagen vor dem Eintreten die Gefahr einer Übersäuerung an. In Abbildung 2 wurde ein typisches Beispiel für den Verlauf dargestellt. Dieser Zeitraum erwies sich für die Einleitung von Gegenmaßnahmen zur Stabilisierung des Prozesses als ausreichend. Der FWI-VFA/Ca konnte in Verbindung mit dem Einsatz von Additiven zur erfolgreichen Erhöhung der Raumbelastung genutzt werden (Kleyböcker et al. 2012b).

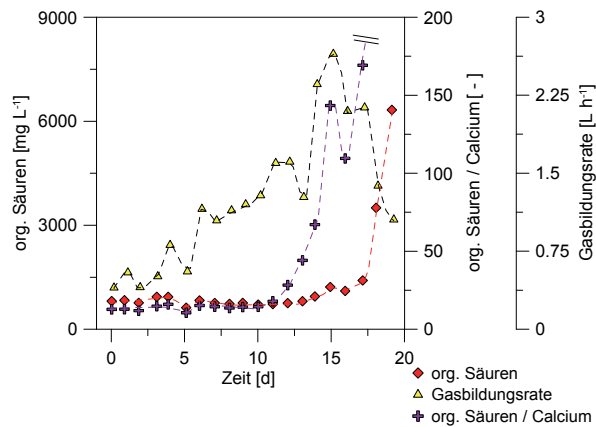


Abbildung 2: Organische Säuren, Gasbildungsrate und das Verhältnis der organischen Säuren zu Calcium vor und während einer kontrolliert herbeigeführten Übersäuerung als typisches Beispiel für den Konzentrationsverlauf

Hierbei stellte sich heraus, dass eine Zugabe von Calciumoxid (CaO) den Prozess besonders nachhaltig stabilisiert. Aufgrund seiner Flockungseigenschaft trägt es zur Bildung von Aggregaten bei, die im Wesentlichen aus Calcium, Phosphat und organischem Kohlenstoff (vor allem langkettige Fettsäuren und extrazelluläre polymere Substanzen (EPS)) bestehen. Durch die Festlegung von organischen Säuren spielten die Aggregate eine entscheidende Rolle bei der Prozessstabilisierung, weil hierüber die Verfügbarkeit langkettiger Fettsäuren reguliert und damit offensichtlich ihre inhibierende Wirkung vermindert wurde. Die Aggregate fungierten als eine Art „Puffer“ im Reaktor und förderten gleichzeitig auch die Kompartimentierung im volldurchmischten Reaktor (Kleyböcker et al. 2012b). Die mit der Aggregatbildung einhergehende schnelle Abnahme der Konzentration der lang- und kurzkettigen Säuren trotz niedrigem pH-Wert und zu hohem Wasserstoffpartialdruck ($> 0,1$ mbar) weist auf die entscheidende Bedeutung der Aggregatbildung für die Stabilisierung des Prozesses hin. Offensichtlich entstanden infolge der Aggregatbildung Mikrohabitate, in denen die Acetogenese und die Methanogenese bereits abliefen, während diese Prozesse in der wässrigen Phase noch gehemmt waren. Untersuchungen zur Zusammensetzung der kurzkettigen organischen Säuren während einer Übersäuerung zeigten, dass sich stets zuerst Essigsäure und dann Propionsäure akkumulierte. Die beiden Säuren bildeten den größten Anteil der kurzkettigen organischen Säuren (> 50 %). Gleichzeitig war jede Übersäuerung von einer starken Zunahme der Phosphatkonzentration gekennzeichnet, die auf die Freisetzung des gespeicherten Polyphosphats durch Phosphat-akkumulierende Mikroorganismen (PAO) zurückgeführt werden konnte (Kleyböcker et al. 2012b).

Fingerprinting-Analysen wiesen nach, dass verschiedene Vertreter der PAO im Gärschlamm vorhanden waren (*Dechloromonas* sp. und *Candidatus Accumilibacter phosphatis*, Liebrich et al. 2012). Außerdem zeigten die Verläufe von Essigsäure, Propionsäure und Phosphat stets einen ähnlichen Trend. Essig- und Propionsäure dienen den PAO während der Phosphatrücklösung als Substrat. Sind die Säuregehalte hoch, ist genug Substrat für die Phosphatrücklösung vorhanden, hingegen wird bei niedriger Säurekonzentration weniger Phosphat zurück gelöst.

Schaumbildung im Biogasreaktor - Praxiserfahrungen

Eine Umfrage unter 15 Biogasabfallanlagen-Betreibern aus Sachsen, Sachsen-Anhalt und Thüringen machte die hohe Relevanz des Problems Schaumbildung deutlich: 80% der Betreiber hatten bereits Erfahrungen mit übermäßiger Schaumbildung und daraus teilweise resultierenden Betriebsstörungen im Biogasreaktor. Zwei Betreiber beschrieben Schaumbildung in der biologischen Entschwefelungsstufe. Lediglich ein Betreiber gab an, noch nie Probleme mit Schaum im Biogasreaktor gehabt zu haben (Moeller et al. 2012a). Die Auswirkungen des Schaums sind schwer vorherzusagen. Manchmal verläuft ein Schaumereignis ungefährlich und ist einfach zu beseitigen. Es treten allerdings auch Fälle mit großen Schäden auf. So berichtete ein Abfallanlagenbetreiber von einer extrem starken Schaumbildung, die zur Zerstörung der Dachkonstruktion seiner Biogasanlage führte und letztendlich Kosten von rund 500.000 Euro verursachte.

Folgende Gründe wurden als mögliche Ursachen für die Schaumbildung aufgeführt: plötzlicher Temperaturanstieg, Überfütterung, Nährstoffmangel sowie ungünstiges Rührmanagement. Am häufigsten wurde die Verwendung von „risikoreichen“ Substraten wie Schlachtabfälle, Molkereiaufwasser, verunreinigte Fettabscheiderinhalte, Papierfaserstoffe und Klärschlämme, die fadenförmige Mikroorganismen beinhalten, in Zusammenhang mit Schaumbildung genannt.

Eigene Laboruntersuchungen von unterschiedlichen Biogasschäumen zeigten, dass einige Proben erhöhte Proteingehalte im Vergleich zum Gärmaterial besaßen (als Beispiel wurden im Fall einer Biogasanlage 5,65 g/L Protein im Schaum im Vergleich zu 2,99 g/L im Gärmaterial gemessen). Deswegen ist davon auszugehen, dass Eiweiß eine wesentliche Rolle bei der Schaumbildung im Biogasreaktor spielen kann (Moeller et al. 2012b). In einem Biogasschaum wurde weiterhin eine Anreicherung von Ölsäure (38,8 % Ölsäure in Bezug auf die Gesamtkonzentration aller langkettigen Fettsäuren im Schaum vs. 5,5 % Ölsäure im Reak-

Tabelle 1: Volumen des gebildeten Biogases in Versuchen zur Ermittlung des Einflusses der Zugabe von Antischaummitteln auf den Biogasbildungsprozess; $n = 3$ (die einzelnen Antischaummittel wurden mit Nummern kodiert, um die Wettbewerbsfähigkeit der Hersteller nicht zu beschädigen), Standardabweichung $\sigma(V_{\text{Biogas}})$

	Versuchsdauer	Mit Antischaummittel		Ohne Antischaummittel (Kontrolle)	
		V_{Biogas}	$\sigma(V_{\text{Biogas}})$	V_{Biogas}	$\sigma(V_{\text{Biogas}})$
		[d]	[mL _n]	[mL _n]	[mL _n]
ASM 1	42	1.417	26,4	882	95,6
ASM 2	48	984	67,0	935	7,31
ASM 3	23	871	25,3	970	22,6
ASM 4	29	1.587	151	1.115	9,84
ASM 5	19	1.024	3,31	983	9,08
ASM 6	19	964	19,8	983	9,08
Rapsöl	56	2.682	177	1.109	163

torinhalt). Die Rolle der Ölsäure im Schaumbildungsprozess konnte noch nicht hinreichend geklärt werden. In einem weiteren Schaum war die Konzentration von Kohlenhydraten höher als im Gärmaterial. Nähere Untersuchungen des Prozesses der Schaumbildung im Gärsubstrat aus einer stabil laufenden Biogasanlage zeigen, dass hier vor allem Polysaccharide einen Einfluss auf die Schaumbildung haben. Nach Zugabe von 1 % (w/w) Pektin wurden 6,2 g/L Kohlenhydrate im Schaum gegenüber 5,4 g/L im Gärmaterial festgestellt. Als wirkungsvollste Maßnahmen bei Schaumereignissen wurden von Anlagenbetreibern die sofortige Minderung der Substratzufuhr (sog. Hungerkur), das Abpumpen eines Teils des Gärmaterials und das Verdünnen desselben mit Wasser beschrieben. Die Anpassung des Betriebsmanagements, z. B. durch Zugabe von Spurenelementen oder Veränderung des Rühr- und Fütterungszyklus, führte in manchen Fällen zu einer dauerhaften Lösung eines längerfristigen Schaumereignisses.

Schaumbildung in Biogassystemen kann auch durch Zugabe von Antischaummitteln bekämpft werden. Sieben in der Praxis verwendete Antischaummittel wurden hinsichtlich der Beeinflussung des Biogasprozesses untersucht. Es handelt sich um silikonfreie Mehrkomponentensysteme, die langkettige Alkohole, Fettsäuren und ihre Derivate sowie Kieselsäure beinhalten. Sie zeigten in praxisrelevanten Konzentrationen keine negative Wirkung auf den Biogasprozess in Bezug auf Biogasbildung und Methangehalt. Vier von sieben Entschäumern wurden in Biogas umgesetzt (s. Tabelle 1). Weiterhin wurden die Antischaummittel auf ihre Wirkung untersucht. Es wurden drei verschiedene Testmethoden angewendet. Dabei wurde festgestellt, dass der üblichste Entschäumer – Rapsöl – die schlechteste Wirkung in der Schaumbeseitigung hat (Moeller et al. 2013).

Microthrix parvicella als Schaumverursacher in einem Biogasreaktor

Während eines Schaumereignisses wurde eine deutliche Veränderung der Zusammensetzung der mikrobiellen Biozönose in einer Biogasanlage beobachtet, die Klärschlamm Durch seine fädige Struktur und die Abgabe von extrazellulären polymeren Substanzen (EPS) könnte *M. parvicella* auch die Schaumbildung im Reaktor begünstigt haben. Im schäumenden Reaktor sowie in der Schaumprobe aus diesem Biogasreaktor waren die Banden von



Abbildung 3: Genetisches Fingerprinting der 4 Reaktoren (R1-R4) sowie einer Schaumprobe aus Reaktor 3 (R3S) der Biogasanlage. Banden von *Microthrix parvicella* sind markiert.

M. parvicella im Fingerprint-Gelbild erheblich intensiver als in den drei weniger betroffenen Reaktoren (Abbildung 3). Dieser halbquantitative Befund deutet auf eine ursächliche Beteiligung an der Schaumbildung hin. In einem relativen Quantifizierungsschritt mit Hilfe der quantitativen Polymerasekettenreaktion (Polymerase Chain Reaction – PCR) konnten die semiquantitativen Ergebnisse verifiziert werden. Relativ zur Menge der gesamten bakteriellen DNA wurde im schäumenden 2. Reaktor der Kaskade und im Schaum mehr DNA von *M. parvicella* gefunden als in nicht-schäumenden Reaktoren (Lienen et al. 2013). Der Lipid-akkumulierende *M. parvicella* hatte vermutlich in dem zur Co-Vergärung von Fetten genutzten Reaktor einen Selektionsvorteil und konnte sich daher im Vergleich zu den Reaktoren ohne Lipidzufuhr besser gegenüber den übrigen Bakterien durchsetzen. Bisher ist allerdings noch wenig darüber bekannt, ob sich *M. parvicella* in Biogasanlagen vermehren kann, da es sich nur bedingt in Reinkultur kultivieren lässt. Da aus der Literatur bekannt ist, dass *M. parvicella* sensitiv gegenüber höheren Temperaturen ist, wurde der zur Schaumbildung neigende Reaktor über den Zeitraum eines Jahres auf das Vorhandensein von *M. parvicella* analysiert. Über das Fingerprinting-Verfahren zeigte sich, dass *M. parvicella* zwar über das ganze Jahr im Reaktor nachgewiesen werden konnte, sich die Menge in den kälteren Monaten (Oktober bis März) deutlich erhöhte. Auch hier bestätigten die Ergebnisse der quantitativen PCR die semiquantitativen Analysen des Fingerprintings und wiesen auf eine höhere Abundanz von *M. parvicella* in den kälteren Monaten hin (Abbildung 4). Auf Grundlage der vorliegenden großtechnischen Daten wurden Laborversuche zur Temperatursensitivität von *M. parvicella* und Vermeidung von Schwimmschichtbildung durchgeführt. Mit Erhöhung der Reaktortemperatur konnte eine Verringerung der Schwimmschicht festgestellt werden. Desweiteren nahm das Vorkommen von *M. parvicella* bereits bei einer geringen Temperaturerhöhung signifikant ab (Lienen et al. in prep.).

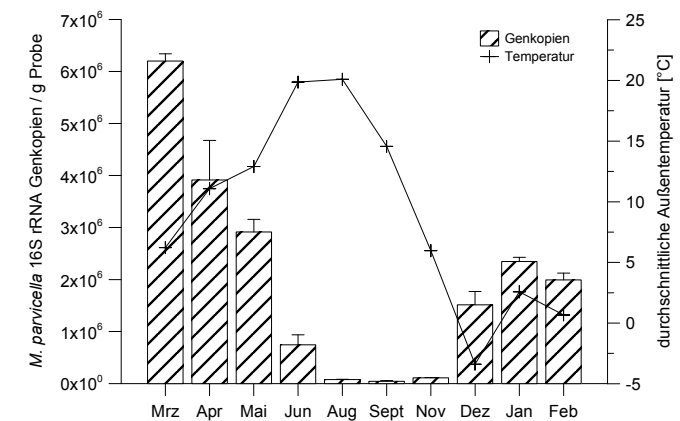


Abbildung 4: Vorkommen von *Microthrix parvicella* über das Jahr. Geringere Genkopienanzahl in den wärmeren Sommermonaten von Juni bis November.

Chemische Eigenschaften und Umweltwirkung von Gärresten

Entscheidend für die Nachhaltigkeit der Energieproduktion ist die Schließung von Nährstoffkreisläufen. Die Biomasse sollte deshalb nach der Vergärung zurück auf die Produktionsflächen gebracht werden. Über die chemische Zusammensetzung von Gärückständen aus Rest- und Abfallstoffen und ihre Wirkung auf den Boden ist bislang jedoch wenig bekannt. Aus diesem Grund wurden die Gärückstände von verschiedenen Biogasanlagen über ein Jahr monatlich chemisch analysiert (Tabelle 2). In einem Respirationsexperiment wurden die Mineralisierung dieser Gärreste und ihre Nährstoffverfügbarkeit untersucht. Zur Simulation von Pflanzenwurzeln, die die ökologischen Bedingungen im Boden beeinflussen, wurden Anionenaustauscherharze in die Respirationsgefäße integriert.

Die gemessenen Elementkonzentrationen in den Gärresten zeigten starke Schwankungen (Tabelle 2). Die statistische Auswertung ergab, dass über einen Zeitraum von mindestens fünf Monaten integriert werden muss, um verlässliche Mittelwerte zu erhalten (Zirkler et al. 2012a). Gärreste aus Substraten, die Klärschlamm enthielten (KI), zeigten erwartungsgemäß besonders hohe Konzentrationen an Phosphor und Eisen. Die Größenordnungen der Elementkonzentrationen stimmen gut mit denen von Pötsch et al. (2004) ermittelten überein. Die Grenzwerte der Abfall- und Klärschlammverordnung (AbfKlärV) für Schwermetalle wurden nicht überschritten.

Tabelle 2: Chemische Kenngrößen von Gärresten. Mittelwerte aus über 12 Monate erhobenen Daten. Standardabweichung in Klammern. Gü=Gülle-Gärrest, KI=Klärschlamm-Gärrest, M=Mais-Gärrest (N, P, K, Ca und Mg in g/kg TM, Cu, Zn, Pb, Cd und Ni in mg/kg TM)

	TM in %	pH	C/N	N	P	K	Ca	Mg	Cu 800 ¹	Zn 2.500 ¹	Pb 900 ¹	Cd 10 ¹	Ni 200 ¹
Gü	3,67	7,76	3-4	57-76	17 (7)	48 (33)	26 (10)	3 (1,6)	115 (44)	387 (44)	16 (15)	0,3 (0,2)	15 (6)
KI	2,76	7,26	4-5	57-76	26 (5)	15 (4)	25 (4)	4 (0,6)	68 (18)	449 (11)	13 (6)	0,9 (0,5)	22 (7)
M	6,97	7,53	5-6	63-84	10 (5)	62 (24)	18 (6)	5 (1,5)	25 (24)	106 (30)	1,5 (0,9)	0,2 (0,09)	4 (4)
Gärrest Rindergülle ²	4,18	7,96	-	63	10	64	25	9	73	304	6,5	0,6	10
Gärrest Schweinegülle ²	3,03	7,95	-	120	20	62	36	9	190	865	9	1,8	16

¹ Grenzwert AbfKlärV

² Pötsch et al. 2004

Die C-Mineralisierung in den Gärresten während des Respirationsexperiments stieg in folgender Reihenfolge an: KI < Gü < M (Abbildung 5). Die C-Mineralisierung des Gärrestes KI lag unterhalb der C-Mineralisierung der als Referenz zeitgleich untersuchten Stallmiste. Der höhere Anteil an Schwermetallen in diesem Gärrest kann zu einer Hemmung der Mikroorganismen und deshalb zu einer geringeren Abbaurate führen. Andererseits könnte aber

auch ein höherer Abbaugrad infolge des Abbaus in der Kläranlage zu einer geringeren Bioverfügbarkeit des organischen Materials und somit zu einer geringeren C-Mineralisierung geführt haben. In der Variante mit dem Gärrest M wurde dagegen sogar mehr C mineralisiert als zugegeben wurde (fast 120 %). Das bedeutet, dass durch die Zugabe des Gärrestes M mehr bodeneigener Kohlenstoff abgebaut wurde als in der ungedüngten Kontrolle. Dieses Ergebnis ist ein erster Hinweis auf sogenannte Priming-Effekte (Zirkler et al. 2012b). Die Konzentrationen von verfügbarem NO₃- stiegen durch die Zugabe von Gärrest M gegenüber der Kontrolle um durchschnittlich 60 % und durch die Zugabe von Gärrest KI um durchschnittlich 80 %. Diese erhöhten Konzentrationen lassen sich dadurch erklären, dass während der Vergärung der organischen Substanz im Biogasreaktor organischer N in anorganischen umgewandelt wurde. Dieses erhöhte Angebot an mineralischem N ergibt dann eine größere NO₃-Verfügbarkeit im Boden als beispielsweise beim Stallmist. Auch K und P waren nach Gärrest- aber auch nach Stallmistdüngung in höheren Mengen verfügbar als in ungedüngtem Boden. Phosphor war nach KI- und Gü-Düngung verfügbarer als nach Sr- (verrotteter Stallmist) oder M-Düngung. Die Versorgung mit K wurde vor allem durch die Gärreste Gü und M gesteigert (Zirkler et al. 2012a).

Die Untersuchungen führen zu dem Schluss, dass aufgrund der hohen Variabilität in der chemischen Zusammensetzung von Gärresten aus Rest- und Abfallstoffen genaue Analysen der Gärreste über längere Zeiträume vor der Ausbringung auf landwirtschaftliche Nutzflächen notwendig sind. Aufgrund der mit Stallmisten vergleichbaren oder höheren Nährstoffverfügbarkeit eignen sich Gärreste prinzipiell gut als Dünger. Jedoch können sie je nach Ausgangsmaterial auch schnell abgebaut werden und ihre Düngewirkung damit nur kurz- bzw. mittelfristig entfalten. Zur weiteren, naturnäheren Untersuchung der Umweltwirkungen von Düngern muss der Einfluss von Pflanzenwurzeln berücksichtigt werden.

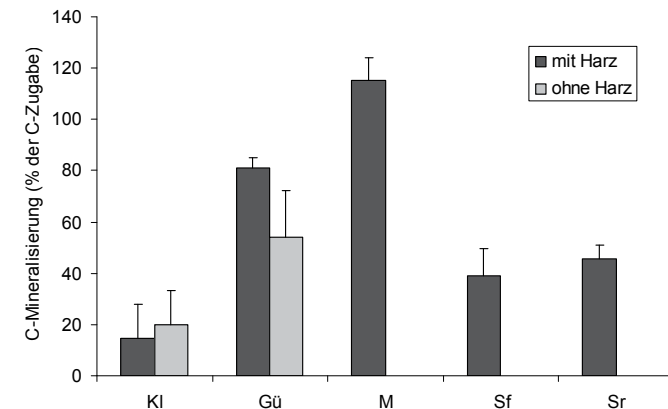


Abbildung 5: C-Mineralisierung normiert auf die C-Zugabe durch Gärrest bzw. Stallmist. Gärrest M und Stallmiste wurden nur mit Austauschharz inkubiert. KI = Klärschlamm-Gärrest, Gü = Gülle-Gärrest, M = Mais-Gärrest, Sf = Stallmist frisch, Sr = Stallmist verrottet (Stallmiste dienen als Referenz)

Ökonomische Bewertung

Um die monetären Auswirkungen von Prozesshemmungen zu quantifizieren, wurde eine Praxisanlage ökonomisch bewertet, die aufgrund einer Übersäuerung die Raumbelastung reduzieren musste. Hierzu wurde angenommen, dass die Bioabfallanlage über 100 Tage mit einer um den Faktor zwei verminderten Raumbelastung (Reduktion von 2,5 bis $1,25 \text{ kg}_{\text{OTR}} \text{ m}^{-3} \text{ d}^{-1}$) arbeitet. Dies hat eine Verminderung der Biogasbildungsrate um 75 % zur Folge. Mit Hilfe einer Kosten-Leistungs-Berechnung wurde die ökonomische Bilanz unter Berücksichtigung der verringerten Raumbelastung berechnet (Abbildung 6). Die in die Berechnung eingehenden Leistungen stammen aus den Vergütungen entsprechend dem Erneuerbaren-Energien-Gesetz-2009 (EEG-2009) für den eingespeisten Strom, sowie aus den Wärmeerlösen und den Vergütungen für die Bioabfallannahme. Die Stromgestehungskosten setzen sich für den Hauptteil aus den investitionsabhängigen Kosten sowie den Wartungs-, Personal-, Durchsatz- und Transportkosten zusammen. Unter Berücksichtigung der Prozesshemmung wurden die spezifischen Erlöse mit ca. $22 \text{ ct/kWh}_{\text{el}}$ und die Stromgestehungskosten mit ca. $16 \text{ ct/kWh}_{\text{el}}$ bestimmt. Die Betriebsänderung verursacht im Vergleich zum ungehemmten Zustand einen spezifischen Verlust in Höhe von ca. $6 \text{ ct/kWh}_{\text{el}}$. Nachfolgend ist eine Sensitivitätsanalyse unter Abnahme einer konstanten Biogasbildungsrate um 75 % mit den Ergebnisgrößen Stromgestehungskosten, Erlöse und Betriebsergebnis der Anlage bei Variation der jährlichen Betriebsdauer von 0 h bis 7.000 h dargestellt (Abbildung 7). Der schattierte Bereich entspricht der Dauer, in welcher weitere Übersäuerungen auftreten könnten ($\pm 10\%$ der Dauer der nominalen Prozesshemmung, hier angenommen um ca. 2.500 h laut Anlagenbetreiber).

Für die Berechnung der CO_2 -Vermeidungskosten wurden die im Methodenhandbuch des DBFZ (Thran/Pfeiffer, 2010) angegebenen Referenzwerte für den deutschen Kraftwerkspark, für Importsteinkohlekraftwerke, neue Erdgas-GuD-Kraftwerke sowie für den Grenzstrom-Mix (Erdgas-GuD- und Importsteinkohlekraftwerke) gewählt. Auf dieser Datenbasis

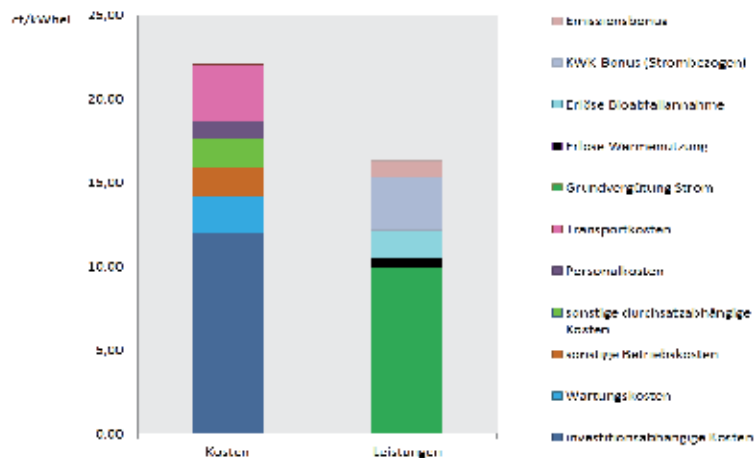


Abbildung 6: Kosten und Leistungen der Bioabfallanlage nach der Betriebsänderung (Mai 2011)

ergeben sich für eine Referenzanlage (NaWaRo2), die 2,15 Mio m^3/a Biomethan aus Mais-silage und Getreide erzeugt, mit ca. $245 \text{ €/t}_{\text{CO}_2\text{-Äq}}$ die höchsten CO_2 -Vermeidungskosten (Abbildung 8), hauptsächlich aufgrund des hohen THG-Potenzials (ca. $77 \text{ g}_{\text{CO}_2\text{-Äq}}/\text{kWh}$)¹ im Falle einer Verstromung des erzeugten Biomethans. Für die zwei anderen Referenzanlagen, die 9.000 t/a Bioabfälle, 6.000 t/a Fette, 41.000 t/a Klärschlamm (KS Abfall 2) und 32.760 t/a Speisereste, Tierblut, Flotatschlamm, Melasse, 22.675 m^3/a Rindergülle (Güll-Abfall) co-vergären, liegen die CO_2 -Vermeidungskosten bei ca. 240 bzw. $105 \text{ €/t}_{\text{CO}_2\text{-Äq}}$. Im Falle eines nicht abgedeckten Gärrestlagers für die Referenzanlage Güll-Abfall würden die CO_2 -Vermeidungskosten bis zu ca. $220 \text{ €/t}_{\text{CO}_2\text{-Äq}}$ steigen. Der Einsatz von 9.200 t/a nachwachsenden Rohstoffen in der Referenzanlage Nawaro1 (500 kW_{el}) führt zu CO_2 -Vermeidungskosten von ca. $225 \text{ €/t}_{\text{CO}_2\text{-Äq}}$. Diese Ergebnisse stimmen weitgehend mit der Studie von STENULL (2010) überein, die CO_2 -Vermeidungskosten von $217 \text{ €/t}_{\text{CO}_2\text{-Äq}}$ für die Co-Vergärung von Maissilage und Getreide für eine 500 kW_{el} -Biogasanlage unter Annahme von Stromgestehungskosten von $16 \text{ ct/kWh}_{\text{el}}$ sowie mit einer Wärmenutzung von 70 % ermittelte.

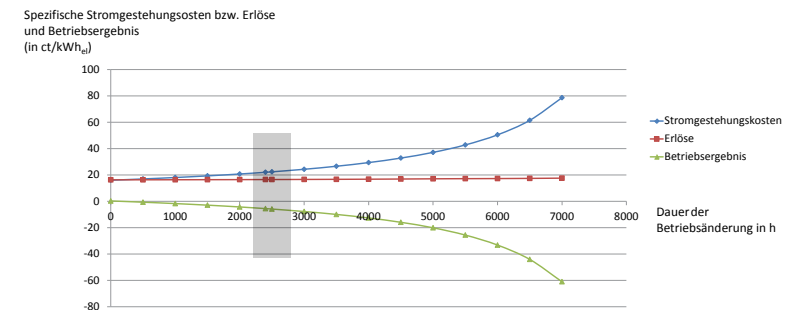


Abbildung 7: Stromgestehungskosten, Erlöse und Betriebsergebnis der Bioabfallanlage in Abhängigkeit der Dauer der Betriebsänderung

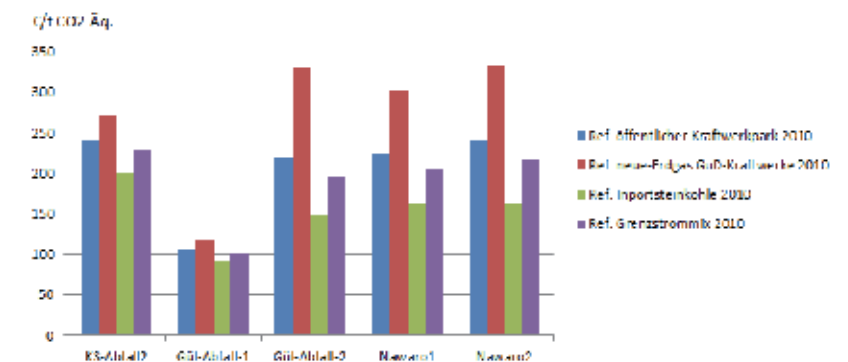


Abbildung 8: CO_2 -Vermeidungskosten der Referenzanlagen

¹ Verursacht durch einen Methanschlupf während der Biomethanverstromung

Ökologische Bewertung

Im Rahmen des Verbundvorhabens wurde eine ökologische Bewertung von Co-Vergärungsanlagen (Substrate u. a. Bioabfall, Klärschlamm) vorgenommen. Dabei sollte die Fragestellung beantwortet werden, wie sich die Umweltwirkung der Biogasanlagen verändert, wenn Prozessstörungen eintreten.

Die im Projekt erhobenen Daten wurden für ausgesuchte Einzelanlagen zusammengeführt und unter ökologischen Gesichtspunkten bewertet. Dabei wurde der Fokus auf die Bewertung von Prozessstörungen gelegt, die für die untersuchten Biogasanlagen im Projektverlauf wesentliche Effekte zeigten. Diese Zustände des Biogasprozesses stellten gleichzeitig die zu betrachtenden Systemgrenzen dar. Die Vorher- und Nachher-Zustände wurden demzufolge als Szenarien erfasst und dem Basis-Szenario - Bioabfall-Anlage ohne Prozessstörung im optimalen Anlagenbetrieb - gegenübergestellt.

Für die ökologische Bewertung der Biogaspfade wurde das Instrument der Ökobilanzierung eingesetzt, wobei die Wirkungskategorie der Treibhausgasemissionen (THG) untersucht wurde. Der Bilanzierungsrahmen der betrachteten Biogaspfade umfasste die gesamte Bereitstellungskette (Transport/Logistik) zur Stromerzeugung aus Biogas über die Konversion zu Biogas und die Verstromung des Biogases. Für alle Stufen der Prozesskette sind Input- und Outputströme von Energie sowie Hilfs- bzw. Einsatzstoffe notwendig. Für anfallende Kuppelprodukte (Gärrest, Wärme) erfolgte eine Gutschrift. Zur Quantifizierung der Emissionen aus dem Einsatz von Hilfsstoffen und Hilfsenergieträgern wurden Daten des DBFZ sowie die international anerkannte Ecoinvent Datenbank für Ökoinventare Version 2.0 (Datenstand 2007) verwendet. Infrastrukturelle Aufwendungen wurden nicht in die Berechnung mit einbezogen. Zur Berechnung der Treibhausgasemissionen fanden die CO_2 -Konversionsfaktoren auf Basis der IPCC 2007 Anwendung ($\text{CO}_2 = 1$; $\text{N}_2\text{O} = 298$; $\text{CH}_4 = 25$).

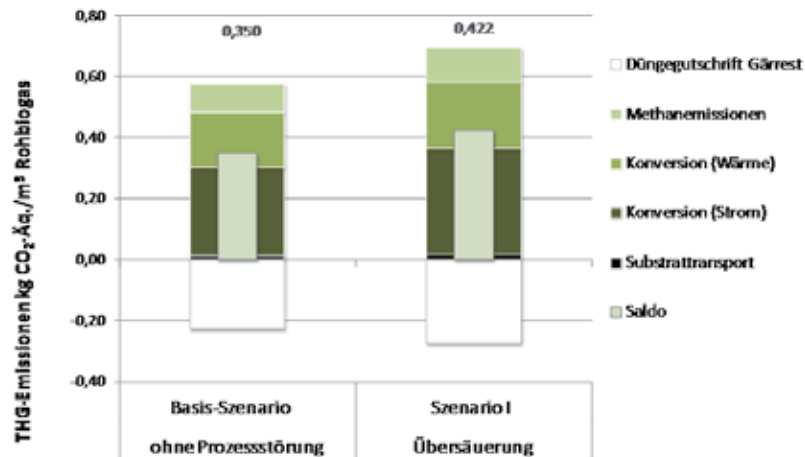


Abbildung 9: THG-Emissionen einer Modell-Bioabfallvergärungsanlage mit und ohne Prozessstörung in $\text{kg CO}_2\text{-Äq. je m}^3$ Rohbiogas

Im Rahmen des Forschungsvorhabens wurden verschiedene Prozessstörungen an Biogasanlagen an den Real-Anlagen beobachtet: Übersäuerung, Schaumbildung, Schwimmschichtbildung, mangelhafte Durchmischung. Beispielhaft für die ökologische Bewertung der Biogasanlagen wurden die Übersäuerung und ungünstige Durchmischungsverhältnisse als typische Prozessstörungs-Zustände betrachtet.

Analog zur ökonomischen Bewertung durch das KIT wurde am Beispiel einer Bioabfallvergärungsanlage (Modell-Biogasanlage: 600 kW_{el} , 50 % Bioabfall, 50 % Speiseabfall) angenommen, dass bei einer Übersäuerung die Raumbelastung der Anlage im Zeitraum von 100 Tagen reduziert wird und dadurch die Biogasproduktion um 75 % zurückgeht. Aufgrund dieser Prozessstörung und der damit einhergehenden Leistungsminderung der Co-Vergärungsanlage ist im Vergleich zum Basis-Szenario (ohne Prozessstörung) eine Verschlechterung der THG-Bilanz um ca. 21 % zu verzeichnen (Abbildung 9).

Literaturverzeichnis

- Balussou, D.; Kleyböcker, A.; McKenna, R.; Möst, D.; Fichtner, W. (2012): An economic analysis of three operational co-digestion biogas plants in Germany. In: *Waste and Biomass Valorization*, 3, 1, S. 23-41.
- Brehmer, M.; Kraume, M. (2011): Rheologie von Gärsubstraten und deren Einfluss auf die Durchmischung von Biogasanlagen. 14. Köthener Rührer-Kolloquium.
- Liebrich, M.; Kleyböcker, A.; Würdemann, H. (2012): Influence of the microbial community and mineral formation on the process performance of biogas production. Tagungsband Fourth International Symposium on Biomass and Waste, Venedig.
- Lienen, T.; Kleyböcker, A.; Verstraete, W.; Würdemann, H. (in prep.): Foam formation in full-scale biogas plant caused by supply and growth of *Microthrix parvicella*.
- Lienen, T.; Kleyböcker, A.; Würdemann, H. (in prep.): Slight temperature increment in anaerobic biogas digester leads to disintegration of floating layer, microbial community shift and reduction of the filamentous bacterium *Microthrix parvicella*.
- Klärschlammverordnung (AbfKlärV) 1992, zuletzt geändert durch Art. 5 Abs. 12 G v. 24.2.2012 I 212.
- Kleyböcker, A.; Lerm, S.; Miethling-Graff, R.; Vieth, A.; Wittmaier, M.; Würdemann, H. (2007): Genetic fingerprints to characterise microbial communities during organic overloading and in large-scale biogas plants. Internationale Biogaskonferenz "Progress in Biogas", Stuttgart-Hohenheim.
- Kleyböcker, A.; Seyfarth, D.; Liebrich, M.; Verstraete, W.; Kraume, M.; Würdemann, H. (2012a): Early warning indicators for process failure due to organic overloading by rapeseed oil in one-stage continuously stirred tank reactor, sewage sludge and waste digesters. in: *Bioresource Technology*, 123, S. 534-541.
- Kleyböcker, A.; Liebrich, M.; Kraume, M.; Wittmaier, M.; Würdemann, H. (2012b): Comparison of different procedures to stabilize biogas formation after over-acidification - influence of aggregate formation on process stability. In: *Waste Management*, 32, S. 1122-1130.
- Kleyböcker, A.; Brehmer, M.; Lienen, T.; Teitz, S.; Würdemann, H.; Kraume, M. (in prep.): Characterisation of mixing conditions and determination of the residence time distribution using uranine as a tracer at waste treatment anaerobic co-digesters.

Moeller, L.; Görsch, K.; Müller, R.; Zehndorf, A. (2012a): Bildung von Schaum in Biogasanlagen und seine Bekämpfung – Erfahrungen aus der Praxis. In: *Landtechnik*, 67/2, S. 108-111.

Moeller, L.; Goersch, K.; Neuhaus, J.; Zehndorf, A.; Mueller, R. A. (2012b): Comparative review of foam formation in biogas plants and ruminant bloat. In: *Energy, Sustainability and Society*, 2:12.

Moeller, L.; Goersch, K.; Köster, Y.; Müller, R. A.; Zehndorf A. (2013): Schaumbildung und Schaumvermeidung in Biogasanlagen. UFZ-Bericht 01/2013 – ISSN 0948-9452

Patent: Verfahren zur Prozesssteuerung von Bioreaktoren (Process control of biogas plant comprises measuring quantities of organic acids and calcium ions during operation of biogas plant in predetermined intervals, determining ratio of these quantities and comparing it with previous intervals). Erfinder: Kleyböcker, Anne, 10245 Berlin, DE; Würdemann, Hilke, 14482 Potsdam, am 10.06.2010 veröffentlicht.

Pötsch, E. M.; Pfundtner, E.; Resch, R.; Much, P. (2004): Stoffliche Zusammensetzung und Ausbringungseigenschaften von Gärrückständen aus Biogasanlagen. 10. Alpenländisches Expertenforum, Bundesanstalt für alpenländische Landwirtschaft Gumpenstein.

Zirkler, D.; Dominik, P.; Peters, A.; Kaupenjohann, M. (2012a): Gärreste aus der Biogasproduktion – Chemische Zusammensetzung und Nährstoffverfügbarkeit. 7. Marktredwitzer Bodenschutztag.

Zirkler, D.; Dominik, P.; Peters, A.; Kaupenjohann, M. (2012a): Digestates from biogas production: Chemical composition and effects on priming in soils. 4th International Congress Eurosoil, Bari (Italy).



Foto: Haase

Steigerung der Energieeffizienz bei der Vergärung fester biogener Reststoffe

Klaus Fricke¹, Christof Heußner¹, Axel Hüttner³, Thomas Turk³, Werner Bidlingmaier²

Vorhaben: Steigerung der Energieeffizienz bei der Verwertung biogener Reststoffe

FKZ-Nr.: O3KB022a

Laufzeit: 01.07.2009 – 30.06.2012

Zuwendungssumme: 234.039 €

Koordination:

¹ Technische Universität Braunschweig – Leichtweiß-Institut für Wasserbau
Abteilung für Abfall- und Ressourcenwirtschaft
Beethovenstrasse 51a, 38106 Braunschweig
www.tu-braunschweig.de/lwi/abwi

Projektpartner:

² Bauhausuniversität Weimar – Biotechnologie in der Ressourcenwirtschaft
Coudraystraße 7, 99423 Weimar

Fraunhofer-Institut für Umwelt-, Sicherheits- und Energietechnik UMSICHT
Institutsteil Sulzbach-Rosenberg
An der Maxhütte 1, 92237 Sulzbach-Rosenberg

³ iGLux Witzenhausen GmbH
Siesterstr. 10, D-37216 Witzenhausen

Kontakt:

Christof Heußner – Projektkoordinator
Telefon: +49 (0)531 391 3968
E-Mail: c.heussner@tu-braunschweig.de

Christof Heußner (Projektkoordinator):

Die Entwicklung von Vergärungstechnologien für feste Abfallstoffe hat erst Mitte der 1990-er Jahre begonnen. Zwangsläufig konnten im Rahmen der Untersuchungen sehr hohe Entwicklungs- und Optimierungspotenziale festgestellt werden. So ließe sich bei Ausschöpfung dieser Potenziale die Netto-Energiebereitstellung von zurzeit ca. 560 auf 4.160 GW steigern.



Zusammenfassung

Die effektive Nutzung biogener Reststoffe leistet einen wichtigen Beitrag zur Schonung von Ressourcen und zum Klimaschutz. Hierzu gehören auch Biomasseprodukte, die als Nebenprodukt, Reststoff oder Abfall/Abwasser in unterschiedlichen Wirtschaftsbereichen neben dem eigentlichen Produkt entstehen. In diesem Zusammen wurden im Rahmen des Forschungsprojektes „Steigerung der Energieeffizienz in der Verwertung biogener Reststoffe“ (FKZ-Nr.: 03KB022) die derzeit eingesetzten Technologien zur Behandlung und Verwertung biogener Reststoffe hinsichtlich deren energetischen Effizienz untersucht und Optimierungspotenziale aufgezeigt. Kompostierung, Vergärung und thermische Verwertung wurden hierbei nicht als konkurrierende Technologien betrachtet. Vielmehr ergänzen sie sich im Rahmen einer energetisch optimierten Reststoffwirtschaft. Neben herkömmlichen rein bilanziellen Betrachtungsweisen wurde versucht, auch die aus dem strategischen Management entlehnte SWOT-Methodik mit einzubeziehen. Es wurden Wege aufgezeigt, diese zum Zwecke der Effizienzsteigerung auf Behandlungsanlagen einzusetzen. Die Studie belegt ein sehr hohes Entwicklungs- und Optimierungspotenzial in den Segmenten Konzeption, Technik und Stoffstrommanagement. Die Abteilung für Abfall- und Ressourcenwirtschaft des Leichtweiß-Institutes für Wasserbau an der Technischen Universität Braunschweig (LWI) bearbeitete hierbei vorrangig das Themenfeld Vergärung fester Abfallstoffe, während die Bauhausuniversität Weimar (BUW) die Bereiche Kompostierung und Klärschlamm-Covergärung und Fraunhofer Umsicht die thermische Verwertung betrachteten.

Im nachfolgenden Beitrag werden die wichtigsten Ergebnisse und Konsequenzen der Studie mit Bezug auf die anaerobe Behandlung fester organischer Abfallstoffe präsentiert.

1 Einleitung

Die gezielte Vergärung organischer Abfälle wird im Bereich der Abwasserreinigung (Klärschlamm) und der Landwirtschaft (Gülle) schon seit langem praktiziert. Anaerobtechnologien zur Verarbeitung fester Abfallstoffe, wie z.B. Bio- und Grünabfälle, wurden erst Mitte der 1990-er Jahre eingesetzt. In der Boomphase der Implementierung der Getrenntsammlung und Verwertung von Bioabfällen – 1988 bis 1995 – verfügte die Vergärungstechnologie noch nicht über den erforderlichen Entwicklungsstand. Erst in den letzten Jahren gewann die Vergärung an Bedeutung. Verantwortlich für die anfängliche Zurückhaltung waren technische und wirtschaftliche Probleme. Technische Mängel traten durch funktionelle Störun-

gen im Gesamtprozess – Mechanik und Biologie – sowie durch auffallend hohen Verschleiß auf. Hohe Investitions- und Betriebskosten, die für Anaerobverfahren gegenüber Aerobverfahren aufgewandt werden mussten, hemmten anfangs ebenfalls deren Etablierung – trotz vielfältiger ökologischer Vorteile, die der Anaerobtechnologie attestiert werden.

Zwischenzeitlich ist die Vergärungstechnik weiterentwickelt und optimiert worden, sodass technische Probleme auf ein akzeptables Maß reduziert werden konnten. Finanziell sind durch das EEG positive Rahmenbedingungen für Anaerobtechnologien geschaffen worden. Zwar sind für Vergärungsanlagen nach wie vor höhere Investitionskosten zu veranschlagen, die Kostendifferenz zu Aerobanlagen fällt jedoch heute deutlich geringer aus als noch Mitte der 1990-er Jahre. Bedingt durch die Energieerlöse in Verbindung mit dem EEG, die mit Anaerobverfahren erzielt werden können, befinden sich die Betriebskosten für Anaerob- und Aerobtechnologien mittlerweile auf gleichem Niveau. Unter besonderen Rahmenbedingungen können Vergärungsverfahren sogar ökonomische Vorteile aufweisen. Unterstützung finden Vergärungsverfahren auch durch die höheren Anforderungen an die Begrenzung der Abluftemissionen durch die novellierte TA-Luft (2002) und die 30. BImSchV (2001), da diese aufgrund der im Vergleich zu Kompostanlagen geringeren Abluftemissionen bevorzugt werden. Die im novellierten Kreislaufwirtschaftsgesetz (2012) geforderte Pflicht zur getrennten Sammlung der Bioabfälle ab Januar 2015 werden eine Schlüsselfunktion hinsichtlich des Ausbaus der Bioabfallverwertung und damit auch der Vergärungstechnologien einnehmen.

2 Zielsetzung

Im Rahmen des FuE-Vorhabens wurde der Status quo und das Entwicklungs- und Optimierungspotenzial bei der Vergärung fester Abfallstoffe wie Bio- und Grünabfälle sowie Restabfälle ermittelt. Der Fokus lag hierbei in den Segmenten Stoffstrommanagement sowie Konzeption und Technik. Auf einzelnen Anlagen entwickelte und schon praktizierte Optimierungen dienten hierfür als wesentliche Datenquelle. Die Optimierungsansätze waren in der Form aufzubereiten und zu erläutern, dass sie in ihrer Relevanz und Übertragbarkeit für die einzelnen Anlagenbetreiber klar erkennbar sind. Auf Basis der ermittelten Optimierungsansätze erfolgte eine Abschätzung zusätzlich generierbaren Energieausbeuten bei der Vergärung fester Abfallstoffe.

3 Methodik

Große Unsicherheiten bei der Abschätzung von Steigerungspotenzialen bei der Vergärung fester Reststoffe bestehen im Umfang der zurzeit tatsächlich vergorenen und der zusätzlich generierbaren Massenströme. Im Rahmen der Erhebung wurde in einem ersten Schritt entsprechendes Datenmaterial zusammengestellt, mit dessen Hilfe belastbare Kalkulationen und Prognosen vorgenommen wurden.

Im Segment Konzeption und Technik erfolgte die Analyse auf verschiedenen Ebenen. In einem ersten Schritt war zu prüfen, ob die grundsätzlich unterschiedlichen Arten der verwendeten Verfahrenstechnologien und Prozessführungen bei der Fermentation selbst Effizienzunterschiede in der Netto-Energiebereitstellung aufweisen und somit Ansätze zur

Optimierung bieten. Im Rahmen der Erhebung wurde u.a. geprüft, ob in der Praxis nasse sowie zweistufige Verfahrenstechniken die erwarteten höheren Gasausbeuten erbringen und somit den höheren maschinentechnischen und betrieblichen Aufwand rechtfertigen. Hierauf aufbauend erfolgte die Analyse der einzelnen Prozessschritte wie z. B. mechanische Vorbehandlung, Entwässerung und Gasverwertung.

Die in den einzelnen Segmenten ermittelten Optimierungspotenziale dienen zur Evaluierung der insgesamt realisierbaren Maßnahmen zur Leistungssteigerung. Als Kalkulationsgrundlage für die Quantifizierung des Optimierungspotenzials wurden vorwiegend Leistungsdaten aus dem oberen Drittel der genannten Daten der Anlagenbetreiber angesetzt. Die Datenerhebung erfolgte in den Jahren 2011 und 2012 und basierte auf Begehungen und Interviews vor Ort, schriftlichen und telefonischen Befragungen bei den Betreibern. Ergänzungen erfolgten durch Herstellerangaben, Informationen von Ingenieurbüros und Auswertungen von Ausschreibungen bzw. Angeboten. Die zusammengestellten Daten wurden zum Abschluss der Erhebung telefonisch mit den Anlagenbetreibern auf ihre Richtigkeit überprüft. Zusätzlich sind die Unterlagen an die wesentlichen Anlagenbauer/Lieferanten verschickt worden, ebenfalls mit dem Ziel der Überprüfung der ermittelten Daten.

4 Ergebnis

4.1 Massenströme bei der Vergärung von Bio- und Grünabfällen sowie Restabfällen

Die getrennte Erfassung von Bio- und Grünabfällen hat in Deutschland ein hohes Niveau erreicht. Allerdings ist der Anteil der daraus gewonnenen Energie noch vergleichsweise gering, die Biomasse wird überwiegend über den Weg der Kompostierung verwertet. Nach Angaben des Statistischen Bundesamtes wurden im Jahr 2010 8,73 Mio. Mg Bio- und Grünabfälle erfasst (Destatis, 2012). Die erfassten Bio- und Grünabfälle werden in ca. 990 Kompostanlagen und 63 Vergärungsanlagen (Stand 02/2012) verarbeitet. Bei den 63 Vergärungsanlagen handelt es sich ausschließlich um Anlagen, die überwiegend Bioabfälle verarbeiten, die über die Biotonne erfasst werden. Die tatsächlich verarbeitete Menge an den Standorten für die Vergärung beträgt 1,66 Mio. Mg/a. Ein nicht unerheblicher Massenstrom, vorwiegend nicht für die Vergärung geeigneter Abfallstoffe, wird, an der Vergärung vorbei, direkt der Kompostierung zugeführt. Dies trifft zu für einen Großteil der Grünabfälle und für die Grobfraction der Bioabfälle (Teilstromvergärung). Die tatsächlich der Vergärung zugeführte Menge umfasst 1,36 Mio. Mg/a. Der der Vergärung zugeführte Massenstrom von 1,36 Mio. Mg/a umfasst nicht nur Bioabfälle, die über die Biotonnen erfasst werden, sondern schließt auch Teilströme von Grünabfällen und Reststoffe aus der Landwirtschaft, der Agrarindustrie bzw. dem Gewerbe mit ein. Die Menge an klassischen Bioabfällen, die derzeit der Vergärung zugeführt wird, umfasst 1,10 Mio. Mg/a und 0,05 Mio. Mg/a Grünabfälle (Tabelle 1).

In Deutschland werden derzeit 46 mechanisch-biologische Anlagen (MBA) mit einer Kapazität von ca. 5,76 Mio. Mg/a betrieben, 3,24 Mio. Mg/a davon in klassischen MBA-Anlagen mit Integration der Deponie (ASA 2011). Von diesen Abfällen gelangen ca. 50 % als sogenannte Feinfraktion (<60 bis <40mm) in die biologischen Prozessstufen (1,64 Mio. Mg/a).

69% bzw. 0,96 Mio. Mg/a gelangen in eine Aerobstufe, 31 % bzw. 0,68 Mio. Mg/a in eine Anaerobstufe. 12 MBA-Anlagen haben eine Vergärungsstufe integriert.

Nach dem Prinzip der Teilstromvergärung gelangen von der Feinfraktion, die den biologischen Stufen zugeführt wird, häufig nur 50 bis 60 % in die Vergärung.

Für die Abschätzung von Mengen an Bio- und Grünabfällen, die zusätzlich für die Vergärung generiert werden könnten, sind folgende Stoffströme relevant:

- Bioabfälle, die derzeit kompostiert werden, prinzipiell aber auch der Vergärung zugeführt werden könnten,
- Zusätzlich erfassbare Mengen an vergärbaren und Grünabfällen durch flächendeckende Implementierung der Biotonne.

Tabelle 1: Status quo Behandlungsanlagen für die Bio- und Grünabfallverwertung (Stand 2012) sowie für die mechanisch-biologische Restabfallbehandlung (Stand 2011)

Bio- und Grünabfallverwertung	Mengen und Kapazitäten
Installierte Behandlungskapazität	12,0 Mio. Mg/a
Anzahl Kompostanlagen	990
Verarbeitete Mengen	9,6 Mio. Mg/a
Anzahl Vergärungsanlagen	63
Verarbeitungskapazität auf Standorten Vergärung und Kompostierung	1,84 Mio. Mg/a
Verarbeitungskapazität Vergärungsstufe	1,36 Mio. Mg/a
Tatsächliche der Vergärung zugeführte Bio- und Grünabfälle	1,15 Mio. Mg/a
Restabfallbehandlung (MBA, MBS, MPS)	Mengen und Kapazitäten
Installierte Behandlungskapazität (gesamt)	5,76 Mio. Mg/a
Anzahl Anlagen (gesamt)	46
Vergärungsanlagen	12
Verarbeitungskapazität bezogen auf Gesamtinput MBA Kompostierung und Vergärung	3,24 Mio. Mg/a
Verarbeitungskapazität biologische Stufen	1,62 Mio. Mg/a
Verarbeitungskapazität Vergärungsstufe	0,68 Mio. Mg/a

Die Menge zusätzlich vergärbare Bio- und Grünabfälle beträgt auf Basis der Erhebung und der durchgeführten Kalkulationen 7,4 Mio. Mg/a (Tabelle 2).

Bei der Abschätzung zusätzlich vergärbare Restabfälle ist zu berücksichtigen, dass durch die vorgesehene flächendeckende Einführung des Systems Biotonne wesentliche Anteile der Organikfraktion bzw. der Feinfraktion abgeschöpft werden. Der zurzeit in MBA-Anlagen behandelte Massenstrom in den biologischen Behandlungsstufen von 1,62 Mio. Mg/a reduziert sich entsprechend. Bezogen auf die Deutschen MBA hätte dies eine massive Verringerung der Auslastung der biologischen Stufen zur Folge. Eine Nachrüstung von Vergärungskapazitäten an Standorten, die zurzeit nicht über Anaerob-Stufen verfügen, ist zwar prinzipiell möglich, der zu erwartende Rückgang der verfügbaren Massen für die biologische Stufen steht dem aber entgegen.

Tabelle 2: Prognose der Gesamtmenge an zusätzlich vergärbaren Bio- und Grünabfällen

Erschließungsquelle	Bioabfälle	Grünabfälle	Gesamt
Menge zusätzlich vergärbaren Bioabfälle aus dem Bestand	2.177.822 Mg/a	3.177.251 Mg/a	5.355.073 Mg/a
Menge zusätzlich vergärbaren Bioabfälle durch flächendeckende Sammlung	2.060.000 Mg/a	-	2.060.000 Mg/a
Gesamt	4.227.822 Mg/a	3.177.251 Mg/a	7.415.073 Mg/a

4.2 Status quo und Entwicklung bei der Vergärung von Bio- und Grünabfällen

In Betrieb befindliche Vergärungsanlagen für die Behandlung von Bio- und Grünabfällen

In Deutschland werden auf Grundlage der Erhebung 63 Anlagen zur Vergärung von Bio- und Grünabfällen betrieben – Stand 2. 2012. Die der Vergärung zugeführten Menge umfasst 1,36 Mio. Mg/a (Tabellen 1, 3). Gegenüber anderen Angaben zu Anlagenanzahl und Verarbeitungsmengen fallen diese Werte vergleichsweise niedrig aus. Hier werden Anlagenzahlen von 80 bis 100 genannt, bei jährlichen Verarbeitungskapazitäten von 1,8 bis 2,2 Mio. Mg. Die Erklärung hierfür ist vielschichtig:

- In den vergangenen Jahren sind mindestens fünf Anlagen stillgelegt worden,
- mind. zwei Anlagen haben die Mitverarbeitung von Bio- und Grünabfällen eingestellt,
- unklare Angaben zur Art der verarbeiteten Abfallarten, häufig wurden Bioabfälle angegeben, nach Rückfrage handelte es sich aber um Abfälle aus der Lebensmittelindustrie,
- in den Auflistungen befanden sich Mehrfachnennungen, verursacht durch unterschiedliche Benennung von Standorten
- bei den Kapazitätsangaben wurde häufig die Kapazität der Kompostierungsanlage mit eingerechnet.

Die Verarbeitungskapazitäten der betriebenen Bio- und Grünabfallvergärungsanlagen liegen sämtlich unterhalb 50.000 Mg/a. Die am häufigsten installierte Kapazität liegt zwischen 10 und 30.000 Mg/a. Im Vergleich zu Müllverbrennungsanlagen (MVA) oder Kompostanlagen fallen die Kapazitäten gering aus. Die zurzeit in Bau befindlichen Anlagen weisen höhere Verarbeitungskapazitäten auf, hier liegen die installierten Kapazitäten hauptsächlich zwischen 20 und 40.000 Mg.

Stillgelegte Vergärungsanlagen für die Behandlung von Bio- und Grünabfällen und Einstellung der Behandlung von Bio- und Grünabfällen

Mindestens fünf Anlagen mit einer Verarbeitungskapazität von rd. 143.000 Mg/a wurden bisher stillgelegt, hauptsächlich in den 1990-er Jahren. Gründe für die Stilllegungen:

- 2 x mangelnde Funktionsfähigkeit
- 1 x nicht akzeptable Behandlungskosten
- 1 x Stilllegung Versuchs- und Demonstrationsanlage
- 1 x mangelnde Verfügbarkeit geeigneter Abfälle.

Zwei Anlagen mit einer Kapazität von 65.000 Mg/a verarbeiten keine Bioabfälle mehr. Die Gründe für die Herausnahme von Bio- und Grünabfällen als Vergärungsrohstoff:

- 1 x mangelnde Verfügbarkeit von Bio- und Grünabfällen
- 1 x nicht akzeptable Behandlungskosten für Bio- und Grünabfälle.

In Bau befindliche Vergärungsanlagen für die Behandlung von Bio- und Grünabfällen

Im Oktober 2012 befanden sich mindestens zehn Anlagen mit einer Verarbeitungskapazität von rd. 285.000 Mg/a in Bau. Im Jahr 2013 wird somit eine Gesamtkapazität zur Vergärung von Bioabfällen von 1,64 Mio. Mg zur Verfügung stehen.

Tabelle 3: Status quo Vergärungsanlagen zur Verwertung von Bio- und Grünabfällen Deutschland

Status	Anzahl	Kapazität
In Betrieb befindliche Anlagen (02.2012)	63	1.359.000 Mg/a
In Bau befindliche Anlagen (10.2012)	10	285.000 Mg/a
Stillgelegte Anlagen (10.2012)	5	143.000 Mg/a
Verarbeitung von Bioabfällen eingestellt (10.2012)	2	65.000 Mg/a

Entwicklung Vergärungsanlagenbau für die Behandlung von Bio- und Grünabfällen

Der eigentliche Beginn der Vergärung von Bio- und Grünabfällen begann Mitte der 1990-er Jahre, davor waren lediglich einige Versuchs- und Demonstrationsanlagen in Betrieb (Tabelle 4). Der umfangreichste Neuanlagenbau fand in den Jahren nach 2003 statt.

In Deutschland werden 17 Anlagen mit nasser Betriebsweise und einer Kapazität von rd. 0,33 Mio. Mg/a sowie 46 Anlagen mit trockener Betriebsweise und einer Kapazität von rd. 1.03 Mio. Mg/a betrieben. Die 46 Anlagen mit trockener Verfahrensweise untergliedern sich in 23 kontinuierlich betriebene Verfahren mit einer Kapazität von rd. 0,54 Mio. Mg/a und 23 diskontinuierlich betriebene mit einer Kapazität von 0,49 Mio. Mg/a. Die Dominanz

der trockenen Verfahren spiegelt sich zwangsläufig auch bei ein und zweistufigen Verfahren wider, da klassische zweistufige Verfahren auf nasse Verfahren beschränkt sind. Von den 63 Anlagen werden lediglich 9 Anlagen mit rd. 0,17 Mio. Mg/a zweistufig betrieben. 36 Anlagen werden mesophil (0,75 Mio. Mg/a) und 27 thermophil (0,60 Mio. Mg/a) betrieben. Bei den trockenen kontinuierlichen Verfahren dominieren stark thermophile, bei den trockenen diskontinuierlichen Verfahren stark mesophile Betriebsweisen (Tabelle 4).

Tabelle 4: In Betriebsnahmezeitpunkte der Vergärungsanlagen für Bio- und Grünabfälle, differenziert nach Art der Verfahrens- bzw. Betriebsweise - Stand 02.2012

Art der Verfahrens- bzw. Betriebsweise	Anzahl Anlagen								
	Gesamt in Betrieb	vor 1995	1995-1997	1998-2000	2001-2003	2004-2006	2007-2009	2010-2011	Gesamt in Bau 2012-2013 ¹⁾
Nass, gesamt	17	1	7	4	0	4	1	0	0
- Einstufig	8	0	4	2	0	1	1	0	0
- Zweistufig	9	1	3	2	0	3	0	0	0
Trocken, gesamt	46	0	4	5	1	6	17	13	10
- Kontinuierlich	23	0	4	5	1	4	5	4	5
- Diskontinuierlich	23	0	0	0	0	2	12	9	5
Summe	63	1	11	9	1	10	18	13	10
Einstufig gesamt	54								10
Zweistufig gesamt	9								0

¹⁾ Stand 10.2012

Bei der verwendeten Verfahrenstechnik und Betriebsweise hat es in den zurückliegenden Jahren eine deutliche Entwicklung gegeben. So überwog in den 1990-er Jahren der Bau nasser Verfahren, davon einstufige und zweistufige Verfahren zu gleichen Anteilen. In den 2000-er Jahren wurden fast nur noch trockene Verfahren installiert. Diese Entwicklung setzt sich auch bei den in Bau befindlichen Anlagen fort. Sämtliche im Bau befindliche Anlagen sind trockene Vergärungstechniken. Gefördert wurde diese Entwicklung zu Beginn durch das EEG, in dem trockene Verfahren besonders gefördert wurden. Maßgeblich war die Weiterentwicklung und Optimierung der Technik. Insbesondere die Entwicklung der diskontinuierlichen Technologien hat zur Dominanz der trockenen Verfahren in Deutschland geführt. Von den 63 Vergärungsanlagen werden 46 mit trockenen Verfahren betrieben. Seit dem Jahr 2004 wurden 36 Anlagen mit trockener und lediglich fünf mit nasser Verfahrensweise gebaut. Dokumentiert wird diese Entwicklung auch durch Streichen der besonderen Förderung trockener Verfahren (Bonus) im Rahmen der letzten Novellierung des EEG im Jahr 2011. In den letzten fünf Jahren hat es in Europa eine Entwicklung zu

Gunsten trockener Verfahren gegeben. Bei der Vergärung von Restmüll fällt diese Entwicklung nach DE BAERE und MATTHEEUWS (2010) noch deutlicher aus. Der „Boom“ der trockenen, diskontinuierlichen Verfahren setzte 2006 ein. Von den seit 2006 in Deutschland installierten 36 trockenen Vergärungsanlagen wurden 23 Anlagen nach dem trockenen, diskontinuierlichen Vergärungsverfahren errichtet. Bei den im Bau befindlichen Anlagen halten sich kontinuierliche und diskontinuierliche Anlagen die Waage.

Bezüglich ein- und zweistufiger Verfahrens- und Prozesstechniken hat es eine deutliche Entwicklung zu Gunsten einstufiger Verfahren gegeben. In vergangenen fünf Jahren wurde keine zweistufige Anlage für die Vergärung von Bio- und Grünabfällen in Betrieb genommen. Unter den derzeit im Bau befindlichen Anlagen befindet sich keine zweistufige Anlage. Einige Hersteller gaben an, zweistufige Verfahren nur noch auf ausdrücklichen Wunsch für feste Abfallstoffe anzubieten.

Tendenziell ist eine Zunahme thermophiler Prozessführungen zu beobachten. So ist an mehreren Standorten bei den trockenen diskontinuierlichen Verfahren vorgesehen, auf thermophile Prozessführung umzustellen. Nach Rücksprachen mit entsprechenden Anlagenlieferanten ist auch bei den in Bau befindlichen Anlagen mehrheitlich ein thermophiler Prozess vorgesehen. Neben der Hygienisierung wird erwartet, dass dadurch größere Gas-mengen erzeugt werden können.

4.3 Energiebereitstellung bei der Vergärung von Bio- und Grünabfällen

Im Rahmen der Studie sollte geprüft werden, ob die grundsätzlich unterschiedlichen Arten der verwendeten Verfahrenstechnologien und Prozessführungen bei der Fermentation selbst Effizienzunterschiede in der Energiebereitstellung aufweisen und somit Ansätze zur Optimierung bieten. Zu Prüfen war z. B., ob in der Praxis nasse sowie zweistufige Verfahrenstechniken die erwartet höheren Gasausbeuten erbringen und somit den höheren Aufwand rechtfertigen.

Für die Biogasproduktion sind, neben den grundsätzlichen Arten der Prozessführung, verschiedene Parameter einflussgebend. Insbesondere die spezifische Qualität des Fermenter-Inputs ist hierbei maßgeblich, wie regional unterschiedliche Materialqualitäten, Anteil an Küchenabfällen etc.. Eine ausreichend befriedigende Datengrundlage konnte jedoch auch durch die vorliegende Erhebung nicht bereitgestellt werden.

Die Bestimmung der Biogasmenge wird auf den Anlagen nicht einheitlich vorgenommen. Sie erfolgte zum Teil direkt durch Messung des Gasstroms und zum Teil indirekt durch Rückrechnung der erzeugten Strommenge. Bei letzterer Methode ist mit nicht unerheblichen Fehlangaben zu rechnen. Außergewöhnlich geringe Biogasausbeuten, die von den Befragten eindeutig auf betriebliche Probleme zurückzuführen waren, sind nicht in die Bewertung eingeflossen.

4.3.1 Biogas und Methanproduktion

Einfluss trockene und nasse Prozessführung

Die mittleren Biogas- und Methanmengen der verschiedenen Prozess- und Verfahrenstechniken zeigt Tabelle 5. Der Ertrag bei kontinuierlichen trockenen Verfahren fällt gegenüber nassen Verfahren geringfügig höher aus. Bei dem sehr hohen Biogasertrag von thermophi-

len Nassverfahren handelt es sich um einen Einzelwert, er fällt bei der Mittelwertbildung daher weniger ins Gewicht. Geringere Erträge liefern die diskontinuierlichen Verfahren. Die oben aufgeführten Leistungsangaben beziehen sich auf den Fermenter-Input. Energetisch aussagekräftiger ist jedoch der Bezug auf den Anlagen-Input, da hiermit die tatsächlich pro Tonne verfügbaren Bioabfalls erzeugbare Energiemenge beschrieben wird. Bei den nassen und kontinuierlichen trockenen Verfahren werden im Mittel überschlägig ca. 20 % (12 - 30 %) des Bioabfalls bei der Aufbereitung vor der Vergärungsstufe abgetrennt und direkt der Kompostierung zugeführt. Bedingt durch die Schwerstoffscheidung und Grit-Scheidung weisen nasse Verfahren tendenziell höhere Werte auf. Bei den diskontinuierlichen trockenen Verfahren sind dies im Mittel überschlägig nur ca. 7 % (0 - 10 %). Zur Umrechnung auf den Anlagen-Input werden entsprechende Faktoren von 0,8 und 0,93 verwendet. Der Bezug auf den Anlagen-Input bewirkt eine Verringerung der erzeugten spezifischen Biogas- und Methanmengen. Bei den diskontinuierlichen trockenen Verfahren wird die spezifische Biogasausbeute auf Grund der in geringerem Umfang abgetrennten Abfallmenge vor der Vergärung nur geringfügig reduziert.

Relevant für eine Bewertung aus energetischer Sicht ist der Methanertrag. Die in der oben genannten Erhebung ermittelten Methangehalte reichen von 51 bis 66 Vol.-% (BMU, 2013). Nasse Verfahren weisen mit rd. 63 Vol.-% höhere Methankonzentrationen im Biogas auf als trockene Verfahren, die bei den kontinuierlichen Verfahren im Mittel Werte von 58 und bei den diskontinuierlichen von 57 Vol.-% erzielen. Da nasse Verfahren höhere Methangehalte aufweisen als trockene Verfahren sind die spezifischen Methanerträge zwischen nassen und trockenen kontinuierlichen Verfahren nahezu gleich.

Einfluss Prozesstemperatur

Die thermophile Betriebsweise führt – bei den praktizierten Retentionszeiten - bei allen Verfahrens- und Prozessarten zu deutlich höheren Biogas- und entsprechend höheren Methanerträgen (Tabelle 5). Der Mehrertrag von Methan resultiert aus der Erhöhung der spezifischen Biogasmenge und nicht aus höheren Methangehalten. Der Mehraufwand an Wärme der thermophilen gegenüber der mesophilen Prozessführung wird um ein Mehrfaches durch die dadurch bewirkte zusätzliche Wärmeproduktion gedeckt. Diskontinuierliche trockene Verfahren und auch nasse Verfahren werden zum überwiegenden Teil mesophil und kontinuierliche trockene Verfahren zum überwiegenden Teil thermophil betrieben). Ein hohes Optimierungspotenzial bieten vor diesem Hintergrund diskontinuierliche Verfahren, da diese zurzeit zum weitaus größten Teil mesophil betrieben werden.

Einfluss Abfallqualität

Aussagen von Betreibern zu Folge, werden in den Wintermonaten deutlich höhere spezifische Gasausbeuten erzielt (Abbildung 1). Da in den Wintermonaten nahezu ausschließlich Küchenabfälle erfasst werden, ist zu folgern, dass diese Fraktion der Bioabfälle die höheren Werte bewirkt. So konnten auf einigen Anlagen in der gartenabfallfreien Zeit – hauptsächlich Januar bis März – Gasausbeuten um den Faktor bis zu 1,9 über den Werten der Sommermonate gemessen werden (Schulte, schriftliche Mitteilung, 2012). In den laubreichen Monaten fällt die Biogasausbeute dagegen deutlich ab. Interne Untersuchungen an

der TU Braunschweig im Rahmen der Entwicklung sogenannter Standard-Bioabfälle bestätigen den Sachverhalt (Thiel 2013). Bei der Abschätzung zusätzlicher Energieerträge durch Ausweitung der Bioabfallefassung ist zu berücksichtigen, dass aus Küchenabfallreichen Bioabfällen aus städtischen Gebieten um bis zu 100 % mehr Gas generiert werden kann, darauf deuten vorliegende Jahresgänge über die erzeugten spezifischen Gasmengen hin. Dieser Jahresgang in der Bioabfallqualität wirkt den mengenbedingten jahreszeitlichen Schwankungen entgegen und führt zu einer ausgleichenden Wirkung hinsichtlich der Raumbelastung.

Tabelle 5: Spezifische durchschnittliche Biogasmenge und Methangehalte der verschiedenen Prozess- und Verfahrenstechniken bei der Vergärung von Bio- und Grünabfällen

Verfahren		Biogasmenge (m ³ /Mg Fermenterinput)	Biogasmenge (m ³ /Mg Anlageninput)	Methangehalt (%)
Nass	Gesamt	111	89	63
	1-stufig	106	85	62
	- mesophil	100	80	62
	- thermophil	130	104	63
	2-stufig	115	92	63
	- mesophil	115	92	63
	- thermophil	k. A.	k. A.	k. A.
Trocken	Kontinuierlich	122	98	58
	- mesophil	109	87	59
	- thermophil	123	99	58
	Diskontinuierlich	87	81	56
	- mesophil	87	81	56
	- thermophil	91	85	56

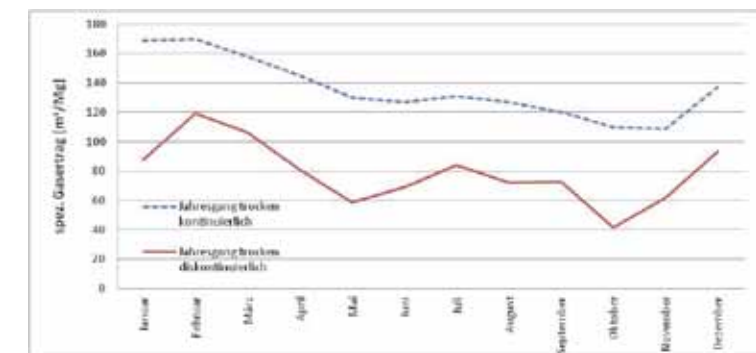


Abbildung 1: Spezifische Gaserträge im Jahresgang - bezogen auf Fermenter-Input

Einfluss durch mechanische Vorbehandlung

Im Gegensatz zu kontinuierlichen Verfahren zur Vergärung von Bio- und Grünabfällen wird bei den diskontinuierlichen Trockenvergärungsverfahren in der Regel keine mechanische Vorbehandlung vorgenommen. Zum einen werden hierdurch Investitions- und Betriebskosten für die erforderlichen Aggregate eingespart, zum anderen ist eine weitgehende Abtrennung der Störstoffe, wie bei kontinuierlichen Trockenvergärungsverfahren notwendig, nicht erforderlich, da das Gärmaterial nicht gerührt oder aber abgepresst wird. Eine zu weitgehende Zerkleinerung des Materials kann darüber hinaus dazu führen, dass die Perkolierbarkeit des Haufwerks herabgesetzt wird und dadurch die Gasproduktion verringert werden kann.

Das Vermischen der Bio- und Grünabfälle mit dem Gärrest und das Beschicken der Fermenter erfolgt bei den diskontinuierlichen Trockenvergärungsverfahren vorwiegend per Radlader, so dass kein weitergehender Aufschluss erreicht wird. Sowohl die Bio- und Grünabfälle selbst als auch das Mischgut aus diesen Materialien mit dem Gärrest sind als sehr inhomogen einzustufen und können dadurch die Effizienz des Perkolationsprozesses einschränken. Dieser Sachverhalt führte dazu, dass auf einer diskontinuierlichen Trockenvergärungsanlage im Rahmen von Optimierungsmaßnahmen der Fermenterinput homogenisiert wurde. Hierzu kam ein konventioneller selbstfahrender Mietenumsetzer zum Einsatz. Die Homogenisierungswirkung eines „Umsetzvorganges“ führte zu einer deutlich höheren Biogasproduktion von 10 bis 15 %. Gleiche Homogenisierungswirkungen sind durch vorgeschaltete grobe Siebschritte (Siebschnitt 100 bis 120 mm) zu erwarten. Trommelsiebe bewirken hierbei gegenüber Plansieben eine bessere Homogenisierungsleistung.

4.3.2 Gasverwertung

Auf 60 der 63 Anlagen sind BHKW im Einsatz, mindestens drei dieser Anlagen speisen zusätzlich Gas in ein Mikrogasnetz ein und versorgen damit BHKWs in nahegelegenen Ortschaften mit vorhandenem Wärmenetz bzw. Wärmeabnehmer (Tabelle 6).

Die erzielten Wirkungsgrade_{elektr} liegen im Bereich von 32 bis 42 %, bei einem Mittel von 38 %, und die Wirkungsgrade_{therm} bei 46 %. Zwei Anlagen geben ihr aufbereitetes Gas in ein Erdgasnetz. Auf einer Anlage wird versuchsweise eine Brennstoffzelle mit Gas versorgt. 59 Anlagenbetreiber nutzen einen Teil der Wärme zur systemimmanenten Fermenter- und Substratheizung, um die mesophilen bzw. thermophilen Prozesstemperaturen einzustellen. Mindestens 17 Anlagenbetreiber trocknen ihre Gärreste bzw. nutzen die Wärme zur Prozessluftherwärmung für die Rottesteuerung. Ein Anlagenbetreiber setzte die Überschusswärme gezielt zur Verdunstung überschüssigen Prozesswassers ein. Auf Grundlage der positiven Ergebnisse wurde auf dieser Anlage die Entwässerung weniger intensiv gefahren mit der Folge geringerer Prozesswassermengen mit niedrigeren TS-Gehalten im zu verwertenden/zuzusorgenden Prozesswasser. Dieser Lösungsansatz resultierte aus Entsorgungsproblemen für überschüssiges Prozesswasser in dem Zeitraum, in dem die Ausbringung untersagt ist. Betriebswirtschaftliche Berechnungen ergaben einen deutlichen Vorteil für diese Lösung. Zur besseren Vergleichbarkeit der Vergärungsstufen selbst wurde für die Berechnung der Energieerzeugung die Verwertung in BHKW mit einheitlichen Wirkungsgraden zu Grunde gelegt. Als Wirkungsgrad_{elektr} werden 38 % und als Wirkungsgrad_{therm} 46 % verwendet.

Tabelle 6. Art der Biogasverwertung und Wärmenutzung

Gasnutzung	Anzahl Anlagen
BHKW (elektr. Wirkungsgrade im Durchschnitt 38 % (32 bis 44 %))	61
BHKW plus Mikrogasleitung	3
Einspeisung Erdgasnetz	2
Brennstoffzelle	1
Wärmenutzung	Anzahl Anlagen
Fermenter- und Substratheizung	59
Trocknung Gärreste, Prozessluftherwärmung zur Rottesteuerung	17
Heizung Betriebsgebäude	10
Einspeisung Nahwärmenetz	4
Trocknung externer Produkte (Klärschlamm, Holz, Mais)	3
Heizung Gewächshäuser	1
Heizung Washwasser für Reinigung Umleerbehälter	1

Einfluss, Leistung und Auslastung BHKW

Die Effizienz der BHKW wurde in den vergangenen Jahren insbesondere beim elektrischen Wirkungsgrad stetig verbessert (Schnatmann 2011). Insbesondere bei Aggregaten mit einer elektrischen Leistung von mehr als 500 kW liegt der elektrische Wirkungsgrad heute in der Regel über 40 %. Jedoch scheint sich diese Entwicklung nicht in dieser Rasanz fortzusetzen. Dies erklärt auch, dass verschiedene BHKW-Lieferanten zu einer Steigerung der

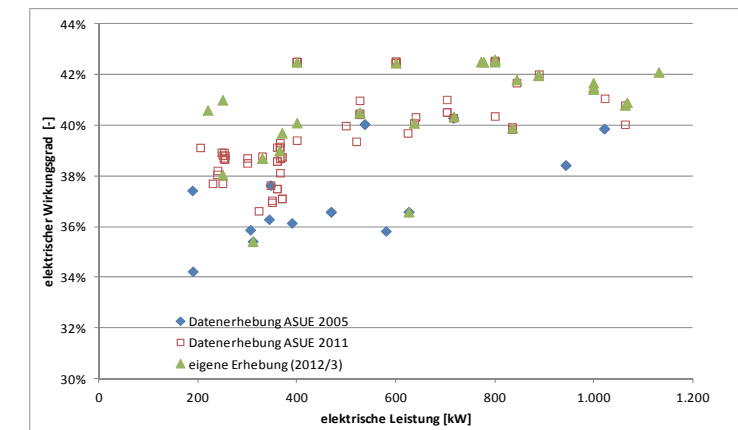


Abbildung 2: Entwicklung der elektrischen Wirkungsgrade verschiedener BHKW-Module

Anlageneffizienz an die BHKW-Module angepasste ORC-Module (Organic Rankine Cycle) für eine weitere Abwärmenutzung anbieten. Auch bei den verwendeten BHKW-Leistungsgrößen um 500 kWh sind Wirkungsgrade von 42 % erzielbar. Optimierungen sind im Rahmen von Ersatzbeschaffungen realisierbar. Dabei ist jedoch zu beachten, dass thermische Wirkungsgrade moderner Aggregate sich zugunsten des elektrischen Wirkungsgrades reduziert haben, so dass insbesondere bei einem bestehenden Wärmekonzept hier die Auswirkungen kritisch geprüft werden müssen. Die korrespondierenden Wirkungsgrade η_{therm} liegen um ca. 44 %.

Die Effizienzsteigerung der BHKW-Module hat höhere Anforderungen an die Biogasqualität zur Konsequenz. Insbesondere die Abtrennung von Schwefelverbindungen hat an Bedeutung gewonnen.

Neben der Wirkungsgradsteigerung der BHKW ist ebenso eine an die Aufgabenstellung angepasste Auslegung anzustreben. Die von den BHKW-Lieferanten angegebenen Wirkungsgrade wurden unter Prüfstandbedingungen ermittelt, so dass sie im praktischen Einsatz meist geringer sind. Weiterhin ist zu beachten, dass die Wirkungsgrade im Teillastbetrieb geringer als im Volllastbetrieb sind. Der Betrieb eines BHKW im Teillastbetrieb kann eine Reduzierung des elektrischen Wirkungsgrades von 2 bis zu 4 % nach sich ziehen, wie Abbildung 3 zeigt. Demgegenüber erhöht sich der thermische Wirkungsgrad der Module im Teillastbetrieb in einer ähnlichen Größenordnung, so dass der Gesamtwirkungsgrad nahezu konstant bleibt.

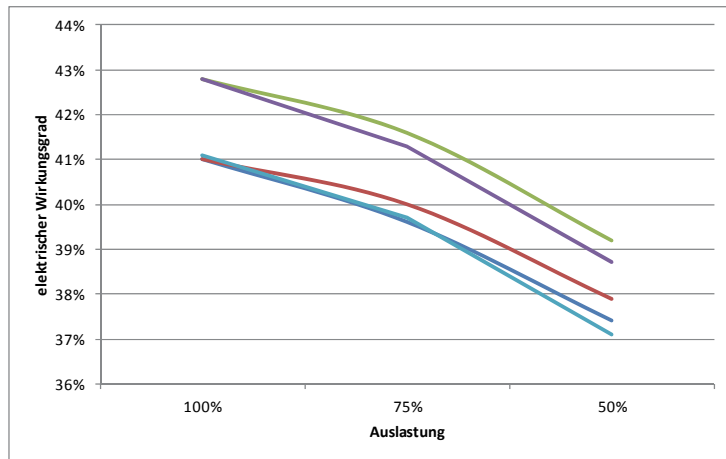


Abbildung 3: Elektrischer Wirkungsgrad in Abhängigkeit der BHKW-Auslastung von BHKW (Exemplarische Darstellung)

4.3.3 Energiebedarf von Vergärungsverfahren

Die Stromverbräuche bezogen auf den Anlageninput fallen auf Grundlage der ermittelten Daten bei den nassen Verfahren mit ca. 57 kWh/Mg deutlich höher aus als bei den intensiven, kontinuierlichen trockenen Verfahren mit Werten von 38 kWh/Mg (Tabelle 8). Der

Stromverbrauch der diskontinuierlichen, trockenen Verfahren weist mit einem Wert von lediglich 21 kWh/Mg den geringsten Strombedarf auf. Der geringere Eigenenergiebedarf bei den diskontinuierlichen, trockenen Verfahren gegenüber den intensiven, nassen und trockenen, kontinuierlichen Verfahren liegt begründet:

- im geringerem Aufwand bei Materialaufbereitung incl. Anmischung vor der Fermentation,
- in der nicht erforderlichen Durchmischung im Fermenter,
- in der nicht erforderlichen Entwässerung nach der Fermentation vor der Kompostierung.

Bei Nassverfahren wirken sich die großen zu transportierenden und zu entwässernden Massen der Suspension gegenüber Trockenverfahren zusätzlich energiezehrend aus. Zur Bewertung des Eigenenergieverbrauches von Vergärungsanlagen ist der Dieserverbrauch von mobilen Geräten wie Radladern, mobilen Sieb- und Zerkleinerungsaggregaten zu berücksichtigen, da ansonsten der Vergleich von Anlagen mit unterschiedlichen technischen Ausrüstungen nicht möglich ist. Angaben zu Dieserverbräuchen liegen nur in geringem Umfang vor, es ist jedoch nach eigenen Erfahrungen davon auszugehen, dass bei den intensiven nassen und trockenen Verfahren ein Dieselfbedarf von etwa 1 l/Mg Fermenterinput und bei den diskontinuierlichen trockenen Verfahren von etwa 1,5 l/Mg veranschlagt werden kann. Die Energieverbräuche aus Strom und Diesel ergeben sich dann bei den nassen Verfahren im Mittel zu 66 kWh, bei den trockenen, kontinuierlichen Verfahren zu 47 kWh und bei den trockenen, diskontinuierlichen Verfahren zu 35 kWh.

Datenverfügbarkeit Energiebedarf

Auf keiner der betrachteten Anlagen sind detaillierte Daten zu Energieverbräuchen einzelner Teilbereiche oder Aggregate verfügbar. Eine Identifikation von Energieeinsparpotenzialen einzelner Verfahrenssegmente war somit nicht gegeben. Diese Information gilt jedoch als entscheidende Voraussetzung von Maßnahmen zur Steigerung der Energieeffizienz. Als eine geeignete, vergleichsweise aufwandsarme, zerstörungsfreie Methode zur Generierung dieser Daten hat sich der sogenannte Zangenamperemeter bzw. die Rogowski-Klemme herauskristallisiert. Die analogen Signale werden mit Hilfe eines Analog/Digital-Wandlers digitalisiert. Gleichzeitig werden die einzelnen Datensätze des jeweiligen Aggregats codiert, so dass eine Rückverfolgung möglich ist. Diese Datenpakete werden über ein LAN/BUS-Netzwerk zu einem Knotenpunkt gesendet. Die Knotenpunkte fassen wichtige Baugruppen bzw. Anlagenteile zusammen. Sinnvoller ist es hierbei benachbarte Aggregate zu Clustern zusammen zu fassen und nur kurze Wegstrecken zu überbrücken. Meist gibt es auf den Anlagen für Teilbereiche, wie die Anlieferung, die Aufbereitung sowie die Konfektionierung, separate Schaltschränke. In diesen können die Leistungen der Aggregate sehr komfortabel abgegriffen werden. Auf Grund der Weitläufigkeit der Anlagen können die einzelnen Cluster bzw. Schaltschränke untereinander nur schwer mit Kabel also via LAN/BUS-System verbunden werden. Deshalb können diese Cluster mit einem W-LAN-System mit der Leitwarte verbunden werden. In der Leitwarte laufen alle Informationen zusammen.

Mit diesem modularen Verfahren lassen sich nicht nur Leistungen der Aggregate mitloggen, sie lassen sich auch mit weiteren verfahrens- und prozesstechnischen Steuerungsparametern korrelieren. Ein erhebliches Optimierungspotenzial wird z. B. bei Ventilatoren, Förderbändern und Aufbereitungsaggregaten identifiziert, die häufig im Leerlauf laufen. Die WAGO Kontakttechnik GmbH & Co. KG, Minden hat sich bereit erklärt, ein entsprechendes Messsystem für den entsprechenden Anwendungsfall zu entwickeln und bereitzustellen. Mehrere Anlagenbetreiber und -lieferanten erklären sich einverstanden, entsprechende Messkampagnen auf ihren Anlagen durchzuführen.

Einfluss Entwässerung

Bei den Verfahren zur Bio- und Grünabfallvergärung fallen, im Gegensatz zu reinen Aerobverfahren, relevante Prozess- bzw. Abwassermengen an. Die Verwertung des Gärrestes bei der Bio- und Grünabfallvergärung besteht aus der direkten Ausbringung auf landwirtschaftliche Flächen und/oder der aeroben Nachbehandlung zur Erzeugung eines Kompostes. Falls eine aerobe Nachbehandlung vorgesehen ist, muss der Gärrest entwässert werden. Dieser energieaufwendige Verfahrensschritt ist bei allen kontinuierlichen Verfahren vorzusehen. Bei diskontinuierlichen, trockenen Verfahren wird in der Regel auf die Entwässerung vor der Nachrotte verzichtet. Für die aerobe Nachbehandlung sind die Gärreste aus der Bio- und Grünabfallvergärung auf Wassergehalte um 60 % zu entwässern, bei Zugabe von Strukturmaterialien können auch höhere Wassergehalte akzeptiert werden.

Abwassermengen von kontinuierlichen Bioabfallvergärungsanlagen liegen zwischen etwa 200 bis 500 L/Mg Input. Bei der diskontinuierlichen Trockenfermentation fällt Überschusswasser aus der Perkolatation an, jedoch nur in einer Größenordnung von 20 bis 60 L/Mg des Materialinputs (Abbildung 4).

Exemplarisch wurde der Strombedarf der Entwässerung einer nassen und trockenen kontinuierlichen Vergärungsanlage mit einer Kapazität von 30.000 Mg/a kalkuliert. Der Energiebedarf nasser Verfahren liegt nach dieser Kalkulation bei ca. 6 bis 9 kWh/Mg. Kontinuierliche, trockene Verfahren liegen in der gleichen Größenordnung, falls eine Kombination aus Dekanter und Siebschneckenpresse aus Gründen von Qualitätsanforderungen an das Ab- bzw. Überschusswasser erforderlich ist. Falls die Entwässerung einstufig ausschließlich mit Siebschneckenpressen erfolgt, liegt der Strombedarf bei 4 bis 7 kWh/Mg. (Tabelle 7). Die Entwässerung der Gärreste mit der dazugehörigen Peripherie stellt mit bis knapp 30 % vom Gesamtstromverbrauch einen bedeutenden stromzehrenden Prozessbereich.

Optimierungspotenzial liegt u. a..

- Verringerung der notwendigen Entwässerungsintensität durch Nutzung von Überschusswärme zur Trocknung während der Rotte,
- Intensivere Nutzung von Strukturmaterialien, sofern diese nicht anders nachhaltig verwertbar sind,
- Hygienisierung der Gärreste ohne Aerobstufe und direkte landwirtschaftliche Applikation der Gärreste.

Einfluss Aufbereitung

Umfang und Intensität der Aufbereitung haben erheblichen Einfluss auf den Energieverbrauch. Besonders energiezehrend sind der Anmaisch- und der Zerkleinerungsprozess. In den vergangenen Jahren hat sich die Intensität der Zerkleinerung bei den kontinuierlichen Trockenverfahren verringert. In der Regel verzichten die meisten Verfahrensanbieter mittlerweile auf eine zweistufige Zerkleinerung, da die die Fermenter nicht auf einen Kornbegrenzung um 40 mm ausgelegt sind, sondern Korngrößen bis zu 80 mm verarbeiten können.

Einfluss Elektromotoren

Bei den eingesetzten Elektromotoren, die in einer Vielzahl auf Vergärungsanlagen im Einsatz sind, hat es in der Vergangenheit eine Entwicklung zu einer höheren Effizienz gegeben, u.a. angetrieben durch Forderungen aus der EU. Die Verordnung (EG) Nr. 640/2009 zur Festlegung von Anforderungen an die umweltgerechte Gestaltung von Elektromotoren legt eine Mindesteffizienz für Elektromotoren fest. Die Effizienz kann bei einem Austausch oder Ersatz eines älteren Motors durch einen Elektromotor der Klasse

- IE1 um etwa 6,4 %,
- IE2 um etwa 7,3 %,
- IE3 um etwa 8,6%

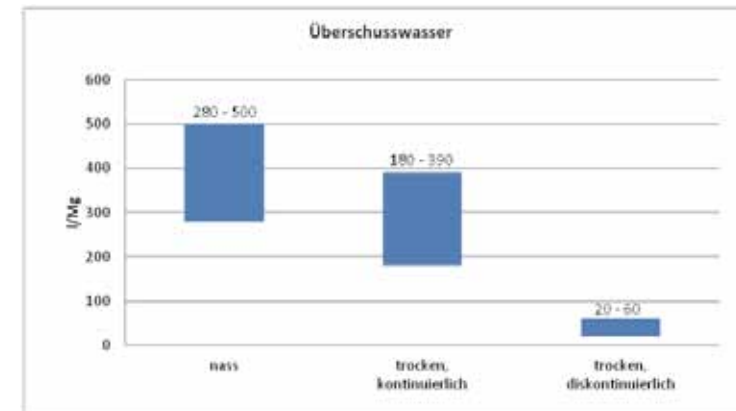


Abbildung 4: Überschusswasser bei der Vergärung von Bio- und Grünabfällen differenziert nach Verfahrens- und Prozessarten

verbessert werden (EnergieAgentur NRW 2010; Volz 2012). Da die Elektromotoren bei Neuanlagen bereits die Effizienzklassen einhalten müssen, sind die zu erwartenden Einsparungen lediglich beim Austausch von Elektromotoren aus Altanlagen relevant. Weiterhin kann nach Volz (2012) eine regelmäßige Wartung der Motoren durch eine Verringerung der mechanischen Verluste eine Stromeinsparung zwischen 3 und 10 % erreicht werden.

Tabelle 7: Vergleichende Abschätzung des Strombedarfs einer Entwässerungsstufe bei einer nassen und kontinuierlichen trockenen Vergärungsanlage mit einer Kapazität von 30.000 Mg/a

	Trockenverfahren	Nassverfahren
Anlagendurchsatz	30.000 Mg/a	
Gärrestmenge ¹⁾	34.500 Mg/a	84.100 Mg/a
Entwässerung ²⁾		
- Prozesswasser	23.100 Mg/a	69.600 Mg/a
- Feststoff	11.400 Mg/a	14.500 Mg/a
Betriebszeiten		
- Siebschneckenpresse ³⁾	3.300 Bh/a	-
- Dekanter ⁴⁾	2.300 Bh/a	3.400 Bh/a
Strombedarf		
- Siebschneckenpresse	2 – 5 kWh/Mg	-
- Dekanter	2 – 4 kWh/Mg	4 – 7 kWh/Mg
- Peripherie ⁵⁾	2 kWh/Mg	

¹⁾ unter Berücksichtigung von Anmischwasser zur Einstellung des TS-Gehaltes im Reaktorzulauf

²⁾ Verteilung abhängig vom angestrebten TS-Gehalt im Feststoff (Annahme: Trockenverfahren 40 %, Nassverfahren 35 %)

³⁾ unter Annahme einer durchschnittlichen Durchsatzleistung von 8 Mg/h

⁴⁾ bei Vollstrombehandlung, Nassverfahren durchschnittliche Durchsatzleistung von ca. 25 m³/h

⁵⁾ nur Zu- und abförpumpen und Behälterrührwerke

4.3.4 Netto Energieausbeute

Netto Stromausbeute

Die Daten zur Netto-Stromausschleusung zeigen, dass die Berücksichtigung der Strom- und Dieselverbräuche zu einer Verbesserung der Werte bei den trockenen insbesondere bei den diskontinuierlichen trockenen Verfahren führt. Die höchste Netto-Ausbeute weist im Mittel die kontinuierliche Trockenfermentation auf. Trotz der geringeren Eigenverbräuche erreichen die diskontinuierlichen, trockenen Verfahren auf Grund der geringeren Biogasausbeuten nicht die Netto-Ausbeuten der aufwändigeren kontinuierlichen, trockenen Verfahren. Entsprechend den höheren Biogas- und Methanausbeuten weisen thermophil betriebene Anlagen deutlich höhere Netto-Stromausbeuten auf (Tabelle 8).

Netto-Wärmebereitstellung

Die Wärmeproduktion und Netto-Wärmeausbeuten bezogen auf den Anlageninput sind in Tabelle 9 aufgeführt. Für den systemimmanenten Wärmebedarf wird die Aufrechterhaltung mesophiler oder thermophiler Prozesstemperaturen betrachtet und entsprechend bei der Berechnung der Netto- Wärmebereitstellung berücksichtigt. Die verschiedenen Verfahrens- und Prozessarten weisen sehr unterschiedliche Bedarfe an Wärme für die Aufrechterhal-

tung mesophiler oder thermophiler Prozesstemperaturen auf. Erwartungsgemäß benötigen nasse Verfahren wegen der sehr großen zu temperierenden Wassermengen und volumenbedingter Wärmeverluste vergleichsweise hohe Wärmemengen. Korrespondierend sind für trockene Verfahren entsprechend geringere Wärmemengen aufzuwenden. Bei diskontinuierlichen Verfahren entfällt der Wärmebedarf für die Aufheizung des Fermenterrohstoffes, da dieser verfahrensbedingt durch die freigesetzte Wärme des aeroben Abbauprozesses in der Startphase bereitgestellt wird. Auch kontinuierliche trockene Verfahren verwenden vereinzelt die Erwärmung des Gärgutes durch Vorschaltung einer kurzen, in der Regel 2- bis 3-tägigen aeroben Vorbehandlungsstufe. Bei Bezug auf den Anlageninput weisen die trockenen, diskontinuierlichen Verfahren mit 188 bis 191 kWh/Mg die höchsten Wärmeausbeuten auf, gefolgt von kontinuierlichen, trockenen Verfahren mit 173 bis 189 kWh/Mg. Die Wärmeausbeute nasser Verfahren beträgt hingegen etwa 153 bis 204 kWh/Mg, wobei die maximale Wärmeausbeute in einer thermophil betriebenen Anlage erreicht wurde. Die Betriebsweisen mesophil bzw. thermophil wirken sich auf den Wärmebedarf und damit auf die Netto-Wärmeausbeute aus.

Netto-Gesamtenergiebereitstellung

Die Netto-Energiebereitstellung resultiert aus den Netto-Strom- (inkl. Dieselverbrauch) und Netto-Wärmerträgen. Die Darstellung dieser Bilanz erfolgt trotz unterschiedlicher Wertigkeit beider Energiearten, da angenommen wird, dass Entwicklungen auf unterschiedlichen Ebenen zukünftig zu Verschiebungen in der Wertigkeit führen können. Auf Basis der Betrachtung der Netto-Energieausbeute bezogen auf den Anlagen-Input liegen die betrachteten Verfahren auf einem ähnlichen Leistungsniveau. Besonders hohe Netto-Energieausbeuten weisen thermophil betriebene Anlagen auf, dies gilt für alle bewerteten Verfahren.

Tabelle 8: Gegenüberstellung von Stromerzeugung und Strombedarf sowie erzielbare Netto-Stromausbeuten der verschiedenen Prozess- und Verfahrenstechniken bei der Vergärung von Bio- und Grünabfällen - bezogen auf Anlagen-Input

			Strom- produktion (kWh/Mg)	Strom- verbrauch (kWh/Mg)	Diesel- verbrauch (kWh/Mg)	Strom- ausbeute Netto (kWh/Mg)
Nass	1-stufig	Mesophil	188	57	9	122
		Thermophil	248	57	9	182
	2-stufig	Mesophil	219	57	9	153
		Thermophil	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.
Trocken	kontinuierlich	Mesophil	193	38	9	145
		Thermophil	217	38	9	169
	diskontinuierlich	Mesophil	173	21	14	137
		Thermophil	181	21	14	145

Tabelle 9: Gegenüberstellung von Wärmeerzeugung und Wärmebedarf sowie erzielbare Netto-Wärmeausbeuten der nassen und trockenen Vergärung von Bio- und Grünabfällen, differenziert nach mesophiler und thermophiler Betriebsweise – bezogen auf Anlagen-Input

			Wärme- produktion (kWh/Mg)	Wärme- verbrauch (kWh/Mg)	Wärmeausbeute Netto (kWh/Mg)
Nass	1-stufig	Mesophil	228	75	153
		Thermophil	300	97	204
	2-stufig	Mesophil	265	80	186
		Thermophil	k.A.	k.A.	k.A.
Tro- cken	kontinuierlich	Mesophil	234	61	173
		Thermophil	262	73	189
	diskontinuierlich	Mesophil	209	21	188
		Thermophil	219	28	191

Tabelle 10: Gegenüberstellung von Energieerzeugung, Eigenbedarf, Verluste in BHKW und Netto-Energieausbeute – bezogen auf Anlagen-Input

			Energie- produktion (kWh/Mg)	Energie- verbrauch (kWh/Mg)	Verlust BHKW (kWh/Mg)	Energie- Ausbeute Netto (kWh/Mg)
Nass	1-stufig	Mesophil	496	141	79	275
		Thermophil	653	163	104	386
	2-stufig	Mesophil	577	146	92	339
		Thermophil	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.
Tro- cken	kontinuierlich	Mesophil	508	109	81	318
		Thermophil	570	121	91	358
	diskontinuierlich	Mesophil	455	56	73	326
		Thermophil	476	63	76	336

5 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

Die Menge zusätzlich vergärbare Bio- und Grünabfälle beträgt 7,4 Mio. Mg/a. Diese Menge resultiert aus der flächendeckenden Implementierung des Systems Biotonne und den zusätzlich der Vergärung zuführbaren Menge bereits erfasster Bio- und Grünabfälle. Bei den zusätzlich zu erfassenden Bioabfallmengen ist zu berücksichtigen, dass aus küchenabfallreichen Bioabfällen um bis zu 100 % mehr Gas generiert werden kann. Zusätzliche Mengen vergärbare Restabfälle in relevanter Größenordnung sind nicht zu erwarten. Hinsichtlich der Verfahrenstechnik zur Vergärung der festen, biogenen Abfallstoffe zeichnet sich gegenwärtig folgende Entwicklung ab:

- Der Einsatz trockener Verfahren wird vermutlich weiterhin dominieren, zu Lasten nasser Verfahren. Diese Aussage gilt ausschließlich für die Vergärung der betrachteten Abfallqualitäten. Zwangsläufig trifft die gleiche Aussage für zweistufige Verfahren zu, da diese an nasse Verfahren gekoppelt sind. Welche Bedeutung hierbei kontinuierliche und diskontinuierliche, trockene Verfahren einnehmen werden ist offen. Auf die Verfahrensauswahl nehmen Einfluss,
 - o Investitions- und Betriebskosten
 - o Verarbeitungskapazität
 - o Höhe der Stromerlöse
 - o standortspezifische Rahmenbedingungen insbesondere Aspekte der „Energieverwertung“.

Maßgeblich wird auch die Ausschöpfung des Optimierungspotenzials sein. Diskontinuierliche, trockene Verfahren werden großtechnisch erst seit dem Jahr 2006 betrieben. Das Entwicklungspotenzial gegenüber den kontinuierlichen trockenen und nassen Verfahren, die großtechnisch seit Mitte der 1990-er Jahre betrieben werden, wird als hoch eingestuft.

- Die thermophile Prozessführung führt bei allen Prozess- und Verfahrenstechniken zu deutlich höheren Biogas- und auch Methanerträgen. Der Mehraufwand an Wärme für die thermophile gegenüber der mesophilen Prozessführung wird um ein Mehrfaches durch die dadurch bewirkte zusätzliche Wärmeproduktion gedeckt. Vor diesem Hintergrund wird die Umstellung von mesophiler auf thermophile Prozessführung grundsätzlich empfohlen. Diese Empfehlung wird ausgesprochen, trotz der Kenntnis, dass die mesophile gegenüber der thermophilen Prozessführung durch eine höhere Prozessstabilität gekennzeichnet ist. Die Befragung lieferte keine Hinweise auf Probleme, die sich hierdurch ergeben haben. Ein hohes Optimierungspotenzial bieten diesbezüglich diskontinuierliche Verfahren, da diese zum weitaus größten Teil mesophil betrieben werden.
- Die elektrischen Wirkungsgrade der eingesetzten BHKW sind mit im Mittel 38 % niedrig, 42 % sind mit neueren BHKW erzielbar. Optimierungen sind im Rahmen von Ersatzbeschaffungen realisierbar.
- Weitere Optimierungspotenziale im Segment Technik und Betrieb werden in der Studie benannt. Sie liegen vor allem in der Gasverwertung, der Aufbereitung vor der Anaerobstufe, der Nachkompostierung und der Entwässerung. Das Steigerungspotenzial wird auf ca. 24 % eingeschätzt.

Das Gesamtpotenzial zusätzlich erschließbarer Energiemengen (Nettoausbeute) durch die Vergärung von Bio- und Grünabfällen liegt bei 1.837 GWh Strom- und 1.755 GWh Wärmeausbeute. Die größten Potenziale liegen im Ausbau der Vergärungskapazität für schon erfasste Bio- und Grünabfälle sowie der Vergärung der zusätzlich erfassbaren Bioabfälle durch flächendeckende Einführung der Biotonne.

Bei Restabfällen sind keine nennenswerten Steigerungspotenziale durch Intensivierung der Vergärung zu erwarten, hier liegen die Steigerungspotenziale zur Energieerzeugung vor allem in der Trocknung der Restabfälle mit anschließender energetischer Verwertung.

Als problematisch ist zu beurteilen, dass keine der betrachteten Vergärungsanlagen über Daten zu spezifischen Energieverbräuchen differenziert nach Prozessabschnitten verfügt. Hier besteht dringender Handlungsbedarf, da eine Optimierung der Energieverbräuche nur auf Basis von entsprechenden Detailkenntnissen möglich ist. Methoden zur aufwandsarmen Messung entsprechender Energieverbräuche, insbesondere Strom sind verfügbar. Mehrere Anlagenbetreiber und -lieferanten haben sich bereit erklärt, entsprechende Messkampagnen auf ihren Anlagen durchzuführen.

Literaturverzeichnis

30. BImSchV: 30. Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes Verordnung über Anlagen zur biologischen Behandlung von Abfällen, BGBl 2001.

TA-Luft: Erste Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Bundes-Immissionsschutzgesetz TA Luft - Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft, GMBL 2002.

Kreislaufwirtschaftsgesetz (KRWG): Gesetz zur Förderung der Kreislaufwirtschaft und Sicherung der umweltverträglichen Bewirtschaftung von Abfällen vom 24. Februar 2012, BGBl 2012.

ASA: MBA-Steckbriefe der Arbeitsgemeinschaft Stoffspezifische Abfallbehandlung (ASA) e.V. 2011.

Witt, J.; Thrän, D.; Rensberg, N.; Hennig, C.; Naumann, K.; Billig, E.; Sauter, P.; Daniel-Gromke, J.; Krautz, A.; Weiser, C.; Reinhold, G.; Graf, T.: Monitoring zur Wirkung des Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG) auf die Entwicklung der Stromerzeugung aus Biomasse. Deutsches Biomasseforschungszentrum gemeinnützige GmbH in Kooperation mit Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft (TLL), Leipzig/Jena 2012.

De Baere, L.; Mattheeuws, B.: Anaerobic digestion in Europe, state of the Art 2010. Proceedings of the Conference ORBIT 2010, Heraklion, 2010.

EnergieAgentur NRW: Wirkungsklassen für Elektromotoren, Wuppertal, 2010. URL: www.energieagentur.nrw.de/tools/e-motor/wirkungsgradklassen_elektromotoren.pdf (Stand: 11.11.2012).

Thiel, T.: Intermediäre Belüftung zur Optimierung der Biogasqualität und -quantität, Dissertation, TU Braunschweig, 2013.

Schnatmann, C.: Wirkungsgrade von BHKW – Kritische Anmerkungen aus Sicht eines Betreibers von Kläranlagen, DWA – Energietage Kassel, 2011.

Volz, G.: Ratgeber: Elektrische Motoren in Industrie und Gewerbe: Energieeffizienz und Ökodesign-Richtlinie, Hrsg. v. Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena), Berlin 2012.

foto: DBFZ



Effizienzsteigerung von Grünlandssubstraten

Wulf Carius, Herbert Främs, Frank Hellberg

Vorhaben: Effizienzsteigerung von Grünlandssubstraten in der Biogasgewinnung unter Berücksichtigung naturschutzfachlicher Belange

FKZ-Nr.: 03KB029

Laufzeit: 01.09.2009 – 30.09.2011

Zuwendungssumme: 115.567 €

Koordination:

BUND - Institut für ökologisches Ressourcenmanagement
Grenzweg 8, 27243 Prinzhöfte

Dr. Wulf Carius – Projektleiter

Tel.: +49 (0) 4432-912270

E-Mail: info@wendbuedel.de

Dr. Wulf Carius (Projektleiter):

Biogas aus Naturschutzgras - ein spannendes Projekt zwischen Naturschutz, Landwirtschaft und regenerativer Energiegewinnung.



Einleitung

Die Nutzung von Grasschnitt aus der Landschaftspflege in der Biogaserzeugung ist in der Vergangenheit als nicht sehr effektiv angesehen worden. Um die Nutzung dieser Reststoffe trotzdem attraktiv zu gestalten, hat der Gesetzgeber 2009 für Biogasanlagen im Erneuerbaren Energien Gesetz (EEG) einen so genannten Landschaftspflegebonus von 2 ct/kWh eingeführt.

Der BUND Niedersachsen betreibt seit 2006 eine Biogasanlage in der ausschließlich Landschaftspflegematerial (100 % Gras) fermentiert wird. Bei der wirtschaftlichen Überprüfung des Stromverkaufs einschließlich des Landschaftspflegebonus stellte sich heraus, dass eine „normale“ Ernte und Silierung von Grasschnitt von Naturschutzflächen nicht zu befriedigenden Ergebnissen geführt hat. Die auch in der Literatur (FNR 2010) beschriebenen negativen Eigenschaften wie Ligningehalt und hohe Trockenmasse bei einmaligen Schnitten auf Naturschutzflächen haben eine schlechte Silierung und einen geringen Biogasertrag zur Folge. Aufgabe dieses Vorhabens war es die Erntequalität durch spezielle Mahdverfahren im Hinblick auf Konservierung und Biogasertrag zu erhöhen und dabei naturschutzfachliche Aspekte im Blick zu behalten.

Betriebsbeschreibung und Bodentypen

Der BUND Landesverband Niedersachsen betreibt den „BUND – Hof Wendbüdel“ seit dem Jahre 2002. Der Hof liegt im Naturpark „Wildeshauser-Geest“ zwischen Delmenhorst und Wildeshausen. Im Jahre 2002 wurden ca. 40 ha Feuchtgrünland in den Flusstälern von Delme und Hunte und 10 ha Geestland bewirtschaftet. Seit 2005 bewirtschaftet der Hof zusätzliche Feuchtgrünlandflächen im EU Vogelschutzgebiet „Bornhorster Wiesen“ (75 ha) und ca. 15 ha Hochmoorgrünland im „Moorplacken“ auf dem Gebiet der Stadt Oldenburg. Der überwiegende Teil der Flächen ist in öffentlicher Hand und wurde dem BUND kostenlos oder mit einer geringen Pacht überlassen.

Seit 2006 betreibt der BUND eine Biogasanlage in die ausschließlich Gras (100 %) von den hofeigenen Flächen eingebracht wird. Hier wird die Silage oder Heuernte je nach Mahdregime von 50-70 ha benötigt. Die Mahd erfolgt auf folgenden Bodentypen:

Hochmoorgrünland

Das untersuchte Hochmoorgrünland liegt auf einem Moorkörper mit bis zu 7 m Torfstärke. Auf den Flächen liegen vorwiegend Ausgleichsmaßnahmen für Bauvorhaben der Stadt Oldenburg. Die vorgeschriebene extensive Bewirtschaftung wurde in der Vergangenheit aus Kostengründen mehr schlecht als recht durchgeführt. Die Folge war eine Verbrachung mit bis zu 70 % Dominanz der Flatterbinse (*Juncus effusus*).

Niedermoergrünland

Das untersuchte Niedermoergrünland liegt in einem schmalen Niederungstal, das aufgrund des Vorkommens der Flussmuschel (*Unio crassus*) zum FFH-Gebiet „Mittleres Delmetal“ erklärt wurde. Die Grünlandflächen wurden aufgrund der schlechten Befahrbarkeit und Flächenzuschnittes aufgegeben. Bei Übernahme des Gebietes waren alle Flächen mit

dominanten Brennnessel- (*Urtica dioica*) Rohrglanzgras- (*Typhoides arundinacea*) und Mädesüß- (*Filipendula vulgaris*) Beständen verbracht.

Moormarschgrünland

Das untersuchte Moormarschgrünland liegt im EU-Vogelschutzgebiet „Bornhorster Wiesen“. Die von der öffentlichen Hand erworbenen Flächen wurden aus Kostengründen mehr oder weniger bewirtschaftet. Die vorgeschriebenen Mahdtermine und die geringe Bewirtschaftung führten im feuchten Bereich zur Dominanz von Rohrglanzgras und im trockeneren Bereich zur sehr starken Dominanz der Rasenschmiele (*Deschampsia caespitosa*).

Erntemethoden

Um die Kosten für die Bewirtschaftung der Flächen für den Naturschutz zu senken oder sogar eine kleine Wirtschaftlichkeit der Fermentation in einer Biogasanlage zu erreichen, wurde auf eine Qualitätsernte hingearbeitet. Die Auflagen im Naturschutz und das Artenspektrum der unterschiedlichen Feuchtgrünlandflächen stellten hier die größte Herausforderung dar. Dieser Herausforderung konnte zum Teil mit angepasstem Maschinentyp und -einsatz bei der Heu-, Silage- und Frischschnitternte begegnet werden.

Mahdverfahren

Beim Ernten auf Naturschutzflächen stellte sich heraus, dass ein einfaches Mähen nicht ausreicht, um optimale Ergebnisse bei der Konservierung und damit für die Biogasausbeute zu erzielen. Grund hierfür ist die große Heterogenität der Pflanzenszusammensetzung und die bei Sauergräsern oft anzutreffenden Wachsschichten, die die bei der Silagegewinnung vorgeschriebene gleichmäßige Feuchte von 45-65 % Wassergehalt verhindern. Aus diesem Grund wurden unterschiedliche Mahdverfahren getestet.

Es wurde unterschieden zwischen einschüriger Mahd und zweischüriger Mahd. Die einschürige Mahd wurde Mitte Juli durchgeführt.

Der erste Schnitt der zweischürigen Mahd wurde Anfang Juni und der zweite Schnitt Ende August durchgeführt.

Die klassische Mahd wurde mit einem Front-Trommelmäher (2,70 m Schnittbreite, 7 cm Schnitthöhe) durchgeführt. Neben der klassischen Mahd wurde auch mit Mäher und Aufbereiter gearbeitet. Die Schnitthöhe der Kombimaschine betrug permanent 4 cm. Das Mahdgut wurde beim Aufbereiter geknickt und vorhandene Wachsschichten der Gräser wurden teilweise mechanisch entfernt.

Um eine größere Zerkleinerung des Mahdgutes zu erzielen, wurde der Arbeitsschritt des Mulchens nach der Mahd angesetzt (Abbildung 1). Die Schnitthöhe



Abbildung 1: Kombination Trommelmäherwerk Mulcher

betrug 7 cm. Anschließend wurde das Mahdgut in einem Heckmulcher mit einer unüblichen Arbeitshöhe von 10 cm weiterverarbeitet. Vorhandene Wachsschichten wurden auch hier entfernt und die Halme durch Quetschung in der Länge aufgespleißt.

Substratgewinnung und Konservierung

Frischschnitt

Für den optimalen Energieertrag ohne Gär-(Silage) oder Bröckelverluste (Heu) wurde im Sommerhalbjahr die Biogasanlage mit Frischschnitt von hofnahen Flächen befüllt. Das Mahdgut wurde unmittelbar nach dem Mähen auf 10 cm Länge gehäckselt.

Silage

Die für Biogasanlagen optimale Silage wird kostengünstig als Fahrsilo angelegt. Dies eignet sich für Naturschutzflächen nicht. Aus diesem Grund wurde unmittelbar nach dem Mähen in Rundballen siliert.

Heu

Auch klassische Heugewinnung wurde auf den Naturschutzflächen durchgeführt. Die Wachsschichten der Naturschutzgräser führten oft zu langen Trocknungszeiten (bis zu vier Tagen) und die häufige mechanische Bearbeitung durch das Wenden zu hohen Bröckelverlusten bei den krautartigen Pflanzen. Beim Mähen mit Aufbereiter konnte das Heu schon nach zwei Tagen und mittels Mähmulchen schon oft nach einem Tag zu Rundballen gepresst werden.

Ernteergebnisse

Wirkung von Aufbereiter und Mulcher

Der Aufbereiter knickt das Mahdgut unmittelbar beim Mähen und entfernt die Wachsschicht. Dies ist bei der Silagegewinnung von Vorteil und führt zu einer besseren Fermentation. Das Mähmulchen mit seiner verstärkten Zerkleinerung hatte mehrere unmittelbare Einflüsse auf die Ernte:

- Die Wachsschicht der Sauergräser wird entfernt,
- Gräser werden nicht vollständig zerkleinert, sondern eher aufgespleißt (Abbildung 2),
- Kräuter werden stark zerkleinert,
- Die Trockensubstanz der Ernte wird durch Herausschlagen der Feuchtigkeit sofort von ca. 25 % auf 45-55 % erhöht.



Abbildung 2: Vergleich der Mahd: Rechts mit langem Rohrglanzgras und Mulchmäh, Links mit aufgespleißtem und geknicktem Rohrglanzgras

Das Mähmulchen ab dem Spätsommer ein Nachteil. Die kälteren Nächte mit hohem Tauvorkommen sorgten für die immer gleiche Feuchte am nächsten Morgen. Hier ist auch mit täglichen Wenden kaum eine Trockensubstanz von 80 %, die für Qualitätsheu unerlässlich ist, zu erreichen.

Silage

Die Konservierung des Substrates in Form von Rundballensilage zeigte je nach Mahdtermin und Technischeinsatz unterschiedliche Ergebnisse (Tabelle 1). Die Silage der einschürigen Mahd konnte zum größten Teil als misslungen bezeichnet werden, da sie einen hohen Anteil von verblühten und verholzten Gräsern aufwies. Aber auch die Einschürigkeit mit dem hohen Anteil von aufgewachsenen Gräsern des Spätsommers vom Vorjahre spielt eine große Rolle. Lediglich die Silage der einschürigen Mahd mittels Mähmulchen konnte zumindest als zufrieden stellend bezeichnet werden. Auf dem Bodentyp Niedermoor mit seinem fast immergrünen Aufwuchs und dem besseren Futterwert konnten die besten Ergebnisse erzielt werden.

Tabelle 1: Ergebnisse der Silagekonservierung auf unterschiedlichen Böden mit unterschiedlichen Ernteverfahren. X = schlechte Silierung: 21-50 % Ausfall, XX = suboptimale Silierung: 11-20 % Ausfall, XXX = optimale Silierung: 0-10 % Ausfall

Bodentyp	Mahdintervall	Mähen	Mähen + Aufbereiter	Mähen + Mulcher
Hochmoor	1. Schnitt	X	XX	XXX
	2. Schnitt	XX	XXX	XXX
einschürig		X	X	XX
Niedermoor	1. Schnitt	XX	XXX	XXX
	2. Schnitt	XX	XXX	XXX
einschürig		X	X	XX
Moormarsch	1. Schnitt	X	XX	XXX
	2. Schnitt	XX	XXX	XXX
einschürig		X	X	XX

Ernterträge

Die Ernterträge der einzelnen Bodentypen und Mahdintervalle sind in Abbildung 3 dargestellt. Aufgrund der unterschiedlichen Feuchte auf den einzelnen Bodentypen und der verschiedenen Mahdintervalle werden zur Vergleichbarkeit die Ernterträge in Tonnen (t) Trockensubstanz angegeben. 1 t Trockensubstanz entspricht in etwa 5 t Frischmasse beim 1. Schnitt auf Niedermoor. Die Ernterträge sind Durchschnittswerte und wurden auf Flächen erhoben, auf denen das angegebene Mahdregime mindestens drei Jahre durchgeführt wurde. Die anfänglichen Verbrauchszustände der Flächen mit teilweise sehr hohen Masenerträgen (Niedermoor) wurden vor allem durch die zweimalige Mahd verändert.

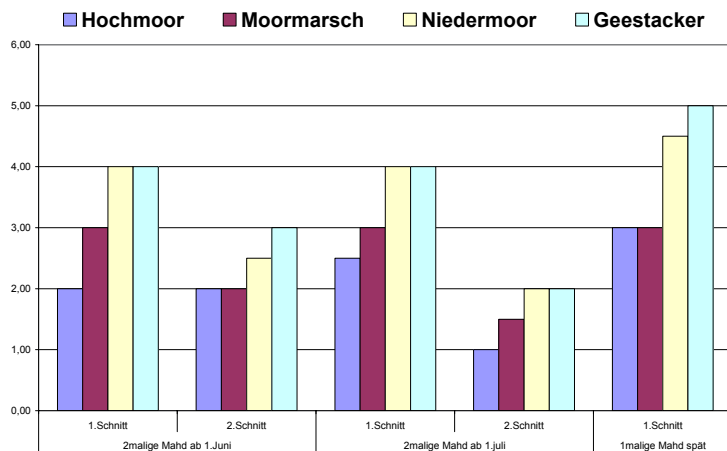


Abbildung 3: Darstellung der mittleren Ernterträge der einzelnen Mahdintervalle und Bodentypen in t Trockensubstanz

Naturschutzfachliche Begleituntersuchung

Die Bewirtschaftung von Naturschutzflächen setzt die Berücksichtigung naturschutzfachlicher Aspekte voraus. Deshalb wurde die Auswirkung verschiedener Mähgeräte und Mahdtechnik (Schnitthöhe, Abtransport des Grasschnitts) auf die Heuschreckenpopulation auf fünf aneinandergrenzenden Parzellen im Delmetal (Niedermoorgrünland) im August und September 2009 und 2010 untersucht.

Folgende Geräte und Gerätekombinationen kamen zum Einsatz:

- Trommelmäher mit Mulcher (270 cm Schnittbreite, 7 cm Schnitthöhe; Mulcher: 10 cm Schlaghöhe)
- Mulcher solo (4 cm Schlaghöhe)
- Scheibenmäher solo (270 cm Schnittbreite, 4 cm Schnitthöhe)
- Scheibenmäher mit Aufbereiter (270 cm Schnittbreite, 4 cm Schnitthöhe)

Heuschreckenerfassung

Die Erfassung der Heuschrecken erfolgte mit verschiedenen Methoden. Bei der Verwendung von Fangschleusen (siehe Abbildung 4) wurden Kunststofffolienzäune beiderseits des Mähgerätes aufgestellt. Die Folienschleuse wurde mit der Maschine durchfahren und sofort am vorderen und hinteren Ende mit weiteren Folienbahnen verschlossen (Fläche: 15 m * 3,5 m = 52,5 m²), um ein Entkommen der Heuschrecken zu verhindern. Beim Einsatz des Mulchers und des Mähers wurden zusätzlich die Maschinen mit einer Kunststofffolienrolle bestückt, die sich beim Fahren abrollte, so dass das Mahdgut bei der Ernte gut sichtbar auf die Folie fiel.

Isolationsrechtecke dienen zur flächenscharfen Ermittlung der Besiedlungsdichten in allen Stadien der Flächenbehandlung (vor/nach dem Mähvorgang; vor/nach dem Abtransport des Mahdgutes). Durch rasches Aufstellen eines Fangzaunes von 3 m x 2 m = 6 m² wurde die jeweilige Probenfläche umschlossen und die Tiere konnten quantitativ abgesammelt werden.

Beim Streifnetz- und Handsichtfang wurde eine 50 m² große Probenfläche von 25 m Länge und 2 m Breite von zwei langsam nebeneinanderhergehenden Personen abgestritten und alle gesichteten Tiere mit Streifnetz oder von Hand eingefangen.

Das Ziel der Heuballenanalyse war, den Einfluss des Mahdgutabtransportes auf die Heuschreckenpopulation abzuschätzen. Dafür wurde ein Heupressballen (Breite: 1,2 m) auf einer Länge von 72 m abgerollt und nach Tieren durchsucht.

Die Heuschrecken wurden auf Art bestimmt und in die Verletzungskategorien „unverletzt“ und „leicht verletzt“ (=reproduktionsfähige Tiere) sowie „schwer verletzt“ und „tot“ (=nicht reproduktionsfähige Tiere) eingeteilt.

Ergebnisse der Heuschreckenerfassung

Die Hauptuntersuchung mit den Fangschleusen erfolgte auf Niedermoorflächen, die seit mindestens fünf Jahren eine zweimalige Mahd erfahren. Insgesamt wurden sechs Arten mit insgesamt 1.424 Individuen erfasst.

Die Heuschreckenbestände erleiden durch die Mahd ausnahmslos hohe Verluste. Größere, in den höheren Straten lebende Arten (*Conocephalus dorsalis*, *Metrioptera roeselii*, *Stethophyma grossum*) werden durch die Mahd stärker geschädigt als kleinere Arten (*Chorthippus montanus*, *C. dorsatus*, *C. albomarginatus*). Vor der Mahd bestanden die Populationen aus 433 bis 1.033 Individuen pro 100 m², und sanken nach der Mahd und Abfuhr des Grasschnittes auf 22 - 111 Individuen pro 100 m².

Im Hinblick auf das Mähgerät führ-



Abbildung 4: Aufsammeln der Heuschrecken in der Fangschleuse

te die Mahd mit dem Scheibenmäher – allein (32,7 %), wie auch in Kombination mit dem Aufbereiter (38,9 %) - zu den stärksten Einbußen der Artengemeinschaft. Beim Trommelmäher und beim Mulcher lagen die Schädigungsraten zwischen 19,8 % und 22,7 %. In der Heuballenanalyse wurde keine einzige tote Heuschrecke gefunden. Das deutet darauf hin, dass bereits vor Abtransport der Mahd Tiere abwandern und wird durch die Ergebnisse der Isolationsrechtecke bestätigt. Ein bis zwei Tage nach der Mahd fallen die Dichten in allen Mahdvarianten auf Werte zwischen 11,2 % und 34,4 % der Ausgangsdichten. Den Abwanderungsbewegungen der Tiere ist somit eine größere Rolle beizumessen, als dem Abtransport im Mahdgut.

Tabelle 3 : Schädigungsraten (prozentualer Anteil schwer verletzt und toter Tiere am jeweiligen Fang) aller Heuschrecken-Arten auf fünf Mahdvarianten. (Versuchsreihe im Delmetal am 19. und 20.8.2010.)

	Folie	Parzelle	Prozent Individuen		Summe Individuen [N]
			unverletzt oder leichtverletzt	schwer verletzt oder tot	
A Trommelmäher (7cm)	nein	I	80,2	19,9	486
B Trommelmäher (7cm) mit Mulcher (10 cm)	ja	V	78,0	22,0	218
C Mulcher (4 cm)	ja	II	77,3	22,7	291
D Scheibenmäher (4 cm)	nein	IV	67,3	32,7	226
E Scheibenmäher (4 cm) mit Aufbereiter	ja	III	61,1	38,9	203
A-E Alle Mahdvarianten	—	—	74,5	25,5	1.424

Biogaserträge

Ermittlung der Biogaserträge

Die Biogasausbeute wurde mit einer Bioferm-Trockenfermentationsanlage von 50 KW_{el} mit zwei Fermentern mit einem Volumen von je 408 m³ ermittelt.

Pro Charge wurde die Anlage mit ca. 60 Rundballen (1,20 m Durchmesser, ca. 12 t organische Trockensubstanz) beschickt und verblieb lediglich unter Besprühung durch die umlaufende Sickerflüssigkeit (pH~7,6) 3 - 4 Wochen im Fermenter. Alle drei Wochen erfolgte ein Fermenter-Wechsel bei dem als Neufracht 1/3 des Gesamtsubstrates zugegeben wurde. Insgesamt betrug die Gesamtmenge pro Fermenter 36 t organische Trockensubstanz und die Substratverweildauer im Fermenter 60 Tage, wobei Tage mit Fermenterwechsel

Tabelle 3: Biogasausbeuten der untersuchten Substrate in Norm L/kg Trockensubstanz der einzelnen Konservierungen, Mahdtechniken und Bodentypen

		Hochmoor	Niedermoor	Moormarsch	Ackergras
	Ø Futterwert	3,9	4,6	3,39	5,1
Konservierung	Mahdtechnik				
Frischschnitt	Mähschnitt einschürig	205,15	265,65	202,40	
Frischschnitt	Mähschnitt 1.Schnitt	273,90	292,05	267,30	305,80
Frischschnitt	Mähschnitt 2.Schnitt	273,90	290,40	281,60	310,75
Heu	Mähschnitt einschürig	193,05	262,90	232,65	
Heu	Aufbereiter einschürig	232,65	243,65	239,25	
Heu	MähMulch einschürig	250,80	261,80	242,55	
Silage	Mähschnitt einschürig	133,65	159,50	163,90	
Silage	Mähschnitt 1.Schnitt	210,65	245,30	200,75	
Silage	Mähschnitt 2.Schnitt	232,10	262,90	255,75	
Silage	Aufbereiter einschürig	207,90	264,00	262,90	
Silage	Mähschnitt 1.Schnitt	281,60	282,25	273,90	
Silage	Mähschnitt 2.Schnitt	287,65	286,00	268,95	
Silage	MähMulch einschürig	282,15	273,90	266,75	
Silage	Mähschnitt 1.Schnitt	287,65	298,65	282,15	
Silage	Mähschnitt 2.Schnitt	292,05	294,25	290,40	

wegen der anschließend geringeren Gasausbeute nicht mitgezählt wurden (21 + 3 = 63; 63 - 3 Tage Fermenterwechsel = 60 Tage).

Zur Berechnung der Trockensubstanz der einzelnen Chargen wurde die Trockensubstanz von Mischproben im Labor bestimmt und Temperatur und Feuchte der Rundballen direkt nach der Ernte ermittelt.

In einem System, in dem beim Fermenterwechsel nur 1/3 neues zu untersuchendes Material, 1/3 älteres Material und 1/3 altes Material zugeführt wird, ist es schwierig, die Gasausbeute des neuen Materials zu bestimmen. Allerdings werden Unterschiede im Ga-

sertrag hauptsächlich zum Anfang des Prozesses erzielt, nach den ersten zehn Tagen fällt der Gasertrag auf einen gleichbleibenden Wert ab. Die schwerer vergärbaren Substanzen weisen bei der Monofermentation von Gras in etwa gleiche Tageswerte auf und können damit für alle untersuchten Substrate der 2. und 3. Vergärungsperiode gleich gesetzt werden. Die Volumenbestimmung des erzeugten Gases erfolgte über eine Blendenmessung (Siemens, Sitrans b) in der Gasleitung zum Gasverdichter und wurde stündlich durch ein Accessdatenbankprogramm (Albrecht 2006) aufgezeichnet. Zu Vergleichszwecken wurde das Gas auf ein Normvolumen umgerechnet (Volumen von Gas im Normzustand nach DIN 1343). Da der Feuchtegehalt in Biogas den Heizwert mindert, wurde das Normvolumen auf wasserfreies Gas bezogen. Dafür wurden folgende Parameter verwendet: Gastemperatur im Sommer: 30 °C, im Winter: 25 °C; mittlerer Luftdruck: 1013 bar; Gasfeuchte: 100 %. Bei der Ermittlung der Gasausbeute wurde dem tatsächlich gemessenen Wert 120 m³ Biogas hinzugerechnet, welches in etwa das Gasvolumen ist, welches beim Fermenterwechsel über den Biofilter abgeführt wird. Die Gesamtmenge Biogas wurde auf die Gesamtmenge Methan umgerechnet, wobei die verwendete Anlage ca. 55 % Methan und 45 % Kohlendioxid erzeugte.

Ergebnisse der Biogaserträge

Die Biogasausbeute der Substrate ist sehr abhängig von den Mahdregimen „einschürig“ und „zweischürig“ und von den Futterwerten der Vegetation (siehe Tabelle 3). Die Konservierung führt bei der Biogasausbeute nur zu geringen Unterschieden zwischen Heu und Silage.

Den tiefsten Wert weist die Silage der einschürigen Mahd auf. Die höchsten Gasausbeuten wurden beim zweischürigen Mahdregime in Kombination mit dem Mähmulchen erreicht. Auffällig ist, dass das Mähmulchen selbst bei der einschürigen Mahd noch gute Biogasausbeuten erzielt. Die starke mechanische Zerkleinerung beim Mähmulchen führt zu einer besseren Silierung und bietet den Methanbakterien eine bessere Angriffsfläche.

Energiebilanz

Verbrauch fossiler Energieträger bei der Ernte

Die Ernte (Mähen und Trocknen) von Landschaftspflegematerial kann, vor allem bei großen Entfernungen der einzelnen Flächen, mit einem hohen Verbrauch von fossilen Brennstoffen verbunden sein. Da Naturschutzflächen eine sehr heterogene Vegetation und Struktur aufweisen, wurde für jedes Verfahren der Kraftstoffverbrauch fünfmal pro Hektar ermittelt und dann der Durchschnittswert errechnet. Der Kraftstoffverbrauch des Transportes richtet sich nach dem durchschnittlichen Gewicht der gewonnenen Rundballen. Tabelle 4 zeigt, dass auf Feuchtgrünland-Naturschutzflächen die konventionelle Heuwerbung am meisten Energie- und Zeiteinsatz erfordert. Am günstigsten ist die Silagewerbung „Mähen mit Aufbereiter“.

Energiegewinnung durch Mähverfahren und Konservierungen

Der Energiegewinn (abzüglich des Energieverbrauchs für Ernte und Transport) für die verschiedenen Mähverfahren ist für die Konservierungsmethode Silage in Tabelle 5 darge-

Tabelle 4: Darstellung durchschnittlicher Kraftstoffverbräuche in L Diesel/ha Naturschutzfläche

Ernteverfahren	Mähen Heu	Aufbereiter Heu	Mähmulch Heu	Mähen Silage	Aufbereiter Silage	Mähmulch Silage
Arbeitsverfahren	Mähen	Mähen	Mähen	Mähen	Mähen	Mähen
	Wenden (4 mal)	Wenden (2 mal)	Wenden	Wenden		
	Schwadern	Schwadern	Schwadern	Schwadern		
	Pressen	Pressen	Pressen	Pressen	Pressen	Pressen
				Wickeln	Wickeln	Wickeln
	Transport	Transport	Transport	Transport	Transport	Transport
Summe Kraftstoffverbrauch [L Diesel/ha]	202	181	181	176	154	168
Summe Zeiteinsatz [d]	7	5	4	5	3	3

Tabelle 5: Energiegewinn durchschnittlicher Biogasausbeuten für Silage verschiedener Bodentypen und Mahdtechniken

	Silage								
	Mähschnitt			Aufbereiter			Mäh-Mulch		
	einschürig	1. Schnitt	2. Schnitt	einschürig	1. Schnitt	2. Schnitt	einschürig	1. Schnitt	2. Schnitt
Hochmoor									
KWh _{el} /Charge	5.249	8.273	9.115	8.165	11.059	11.297	11.081	11.297	11.470
Energiegewinn [KW/h]	2.860	5.884	6.726	6.003	8.897	9.135	8.731	8.947	9.120
Niedermoore									
KWh _{el} /Charge	6.264	9.634	10.325	10.368	11.081	11.232	10.757	11.729	11.556
Energiegewinn [KW/h]	3.875	7.245	7.936	8.206	8.919	9.070	8.407	9.379	9.207
Moormarsch									
KWh _{el} /Charge	6.437	7.884	10.044	10.325	10.757	10.562	10.476	11.081	11.405
Energiegewinn [KW/h]	4.048	5.495	7.655	8.163	8.595	8.401	8.127	8.731	9.055

stellt. Der Energiegewinn für eine gute Silage mit dem Mähmulchverfahren liegt bei bis zu 9.379 KW/h im Vergleich zu dem einfachen Mähschnitt mit bis zu 7936 KW/h, was die hohe Effizienzsteigerung durch das Mähmulchverfahren unterstreicht. Das Mahdregime

ein- oder zweischürig hat einen großen Einfluss auf den Energiegewinn. Das Mähmulch-Arbeitsverfahren hat gegenüber dem Aufbereiter einen wenn auch geringeren Mehrgewinn an Energie, obwohl der Energieverbrauch durch Ernte und Transport höher liegt.

Wirtschaftlichkeit

Die Substratkosten wirken sich sehr stark auf die Wirtschaftlichkeit einer Biogasanlage aus. In den Berechnungen wurde von einer durchschnittlichen Erntemasse pro ha Fläche von ca. 6 t Trockensubstanz oder 30 Rundballen ausgegangen. Bei einem Vergleich von drei Szenarien (Rohkosten, Kosten bei einer Flächenprämie von 99 €/ha (2005) und 360 €/ha (2013), Kosten mit und ohne Ökoprämie) entstehen Kosten von -0,44 € bis 20,23 € pro Ballen bei der Rundballensilage und Kosten von -16,33 € bis 69,00 € bei Bewirtschaftung durch Ladewagen. In einschlägigen Veröffentlichungen wird von einer Wirtschaftlichkeit bei Biogasanlagen von 35 - 45 €/t Trockensubstanz ausgegangen. Wenn die landwirtschaftliche Flächenprämie (2013) und die Ökoprämie eingerechnet werden, werden die Substratkosten so gefördert, dass keine Kosten anfallen und Wirtschaftlichkeit gegeben ist.

Für die Berechnung der Wirtschaftlichkeit der BUND-Biogasanlage bei der Verwendung von Naturschutzgras wurden zwei Szenarien berechnet (ohne jegliche Förderung, mit Flächenprämie (2013) und Ökoprämie).

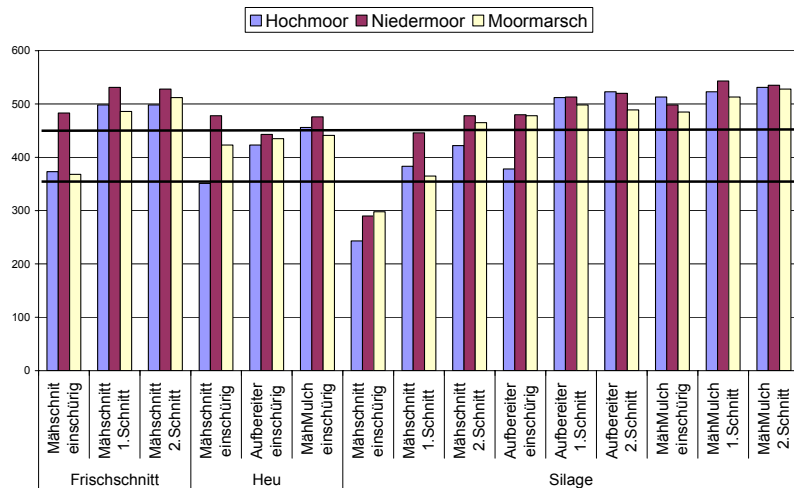


Abbildung 4: Wirtschaftlichkeit der Biogasausbeuten von Rundballensilage: unter 350 L/kg oTS = unwirtschaftlich; 351-450 L oTS = wirtschaftlich indifferent; über 451 L = wirtschaftlich.

Tabelle 6: Darstellung der Wirtschaftlichkeit der BUND Biogasanlage bei 26 Wechsel /Jahr - landwirtschaftliche Förderung - 2013.

Förderung der Flächenbearbeitung	Ohne jegliche Förderung	Flächenprämie 2013 + Ökoprämie
	Ballenpreis 16,89 Ladewagen 69,00 €/t	Ballenpreis -0,44 €/t Ladewagen -16,33 €/t
Vergütung nach EEG- 0,2467 €/KW/h 240000 KW/h	59.208,00 €	59.208,00 €
Wärme 0,06 € / KW/h 200000 KW/h	12.000,00 €	12.000,00 €
Umsatzerlöse Summe	71.208,00 €	71.208,00 €
Energiebedarf Anlage/Wärmetransport	3.000,00 €	3.000,00 €
Personal 365 Tage à 1.5 Stunden = 547,5 h	12.072,38 €	12.072,38 €
8 Maschinenstunden/ Wechsel à 60 €/h	21.000,00 €	21.000,00 €
Allgemeine Kosten	1.102,50 €	1.102,50 €
Wartung Reparaturen	2.000,00 €	2.000,00 €
Kosten Rundballen 780 Ballen	13.244,40 €	-343,5 €
Kosten Ladewagen TS = 156 t	10.764,00 €	-2.547,48 €
Kreditkosten-Abschreibung	24.714,24 €	24.714,24 €
Kosten Summe	87.897,52 €	61.341,64 €
Betriebsergebnis	-16.689,52 €	9.522,86 €

Es wurde eine Stromvergütung nach EEG von 0,2467 €/KW/h zugrunde gelegt. Das Betriebsergebnis variiert zwischen -16.689,52 € und -9.522,86 €. Eine Wirtschaftlichkeit ohne landwirtschaftliche Förderung lässt sich trotz hoher Vergütung durch den Stromverkauf nicht darstellen.

Empfehlungen

Mahdregime

Für den Naturschutz und die Wirtschaftlichkeit scheint es unabhängig vom Bodentyp notwendig, dass die Flächen kurzrasig in den Winter gehen. Die Kurzrasigkeit bedeutet im Naturschutz, dass die Artenvielfalt der Vegetation durch Lichtkeimer im Frühjahr erhöht wird. Auch ein höherer Bruterfolg der Wiesenbrüter ist zu erwarten.

Selbst bei einem späten Naturschutzschnitt kann eine qualitativ höhere Ernte eingefahren und die Biogasausbeuten erhöht werden. Sollte durch Naturschutzaufgaben nur eine Mahd erlaubt sein, empfiehlt es sich, diese auf einen sehr späten Schnittermin (Ende August) zu legen. Die Vorschrift nur eines Schnittes im Naturschutz sollte überdacht werden, da nach unseren Erfahrungen nur die zweimalige Mahd zur positiven Entwicklung der Wiesenvegetation beiträgt. Die unterschiedlichen Wetterbedingungen verändern jedes Jahr die Phänologie der Vegetation. So kann beim erlaubten Mahdtermin die Blühphase schon lange vorbei sein oder aber durch widrige Wetterzustände (Trockenheit und Kälte im Frühjahr) so wenig Aufwuchs auf der Fläche sein, dass zum erlaubten Mahdtermin eine Ernte sich kaum lohnt. Unser Vorschlag lautet: Die eher extensive Landwirtschaft der 50-iger Jahre des vorherigen Jahrhunderts als Vorbild zu nehmen und in Naturschutzgebieten im Feuchtgrünland zwei Schnitte zu erlauben. Der Landwirt legt seine Mahdtermine selber fest und wird individuell auf Wetter und Aufwuchs reagieren und mit den anderen Berufskollegen ein Mosaik von gemähten und ungemähten Flächen schaffen.

Betrachtung der Wirtschaftlichkeit von Feuchtgrünland im Naturschutz

Die Wirtschaftlichkeit der Biogasanlage steigt mit dem Abnehmen des Verhältnisses Investition zur elektrischen Leistung. Die vorgestellte BUND-Biogasanlage ist mit 50 KW und der Investition von ca. 7000 €/KW/h nur bedingt wirtschaftlich.

Eine 500 KW/h-Anlage weist ein Investitionsverhältnis von ca. 4000 €/KW/h auf und ist damit sicherlich wirtschaftlicher. Nur muss hier bedacht werden, dass für diese Anlage mindestens 500 ha Feuchtgrünland benötigt werden, wenn ausschließlich Mahdgut von Naturschutzflächen fermentiert werden soll. Hier kann sicherlich eine Kombination mit unkonservierbaren Substraten, wie kommunalem Landschaftspflegegut, Gartenabfällen etc. in den Sommermonaten helfen, so dass nur in den Wintermonaten konserviertes Substrat von Naturschutzflächen eingesetzt werden muss und sich damit die benötigte Feuchtgrünlandfläche halbiert.

Als Alternative zur Biogastechnologie bietet sich noch eine thermische Verwertung oder die Kompostierung des Aufwuchses an. Die thermische Verwertung ist aus Immissionschutzgründen problematisch und es ist fraglich, ob die technische Investition für eine Verbrennungsanlage zur Energiegewinnung günstiger als eine Biogasanlage ist.

Eine Kompostierung der jährlichen Ernte wäre sicherlich möglich, würde jedoch bedeuten, dass 312 Ladewagen mit jeweils 3 t Frischmasse in das Kompostwerk gefahren würden. Da das Kompostwerk die Tonne Frischmasse berechnet, wäre hier bei einem Preis von 80 €/t und der Masse von 936 t Frischmasse ein Summe von 74.880 € nur für die Kompostierung aufzubringen. Zusätzlich kämen noch die Bewirtschaftungskosten von 312 Ladewagen à 69 € = 21.528 € hinzu.

Die ideale Biogasanlage für Naturschutzgras

Die Trockenfermentation ist das geeignete Mittel, um das in anderen Biogastechniken problematische Naturschutzgras erfolgreich zu fermentieren. Ideal wäre eine Trockenfermentationsanlage mit vier Fermentern mit einer Leistung von 150 KW/h in wöchentlichem Wechsel betrieben. Die Abwärme der Anlage mit 150 KW/h Stunden ließe sich in ein nicht so aufwendiges Wärmekonzept einbringen. Die benötigte Fläche Feuchtgrünland würde 200 ha betragen. Wichtig ist, dass die Flächen landwirtschaftlich angemeldet werden, um

die landwirtschaftlichen Prämien zu erhalten. Ideal wäre noch eine Anmeldung zur ökologischen Landwirtschaft. Ab dem Jahr 2013 werden die landwirtschaftlichen Prämien zwar neu festgelegt, und die EU hat schon signalisiert, dass die Prämien sinken werden. Aber gleichzeitig sollen Dauergrünland und die ökologische Landwirtschaft bevorzugt behandelt werden.

Fazit

Für die Heugewinnung waren alle Mahdverfahren geeignet, allerdings war sie zeitaufwändiger als die Silagegewinnung, die vor allem bei der Ernte durch Mähmulchen überzeugte. Das einfache Mahdverfahren war für die Silagegewinnung aufgrund der heterogenen Feuchte nicht annehmbar.

Die Schädigung der Heuschreckenfauna war beim Mähen mit Tellermäher und Trommelmäher aufgrund der Schnitthöhe von 7 cm geringer als bei einer Schnitthöhe von 4 cm. Die Schädigung der Heuschrecken bei einer Schnitthöhe von 7 cm muss in diesem Fall akzeptiert werden. Die geringe Schädigung durch zusätzliche Aufbereiter und Mulcher kann ebenfalls angenommen werden, da beide zu einer Effizienzsteigerung bei der Energiegewinnung und zu erhöhter Wirtschaftlichkeit der Biogasanlage führten.

Das zweischürige Mahdregime förderte nicht nur die Diversität der Flächen und beugte einer Verbrachung vor, sondern führte auch zu einer erhöhten Biogasausbeute im Vergleich zu Grünlandmaterial des einschürigen Mahdregimes.

Das Projekt mit seiner erreichten Effizienzsteigerung konnte dazu beitragen, dass der Teilbereich Grünlandaufwuchs aus der Landespflege von Naturschutz-Grünland als eine weitere Ressource für die Energiegewinnung angesehen werden kann.





Foto: Gröber/DBFZ

Bioabfallvergärung – Beiträge zur Prozessoptimierung und zur verbesserten Gasnutzung

Joachim Krassowski¹, Jorge Salazar Gomez¹, Elmar Fischer²

Vorhaben: Bioabfallvergärung – Beiträge zur Prozessoptimierung und zur verbesserten Gasnutzung

FKZ-Nr.: O3KB032

Laufzeit: 01.10.2009 – 30.09.2011

Zuwendungssumme: 327.000 €

Koordination:

¹ Fraunhofer-Institut für Umwelt-, Sicherheits- und Energietechnik UMSICHT
Osterfelder Straße 3, 46047 Oberhausen
www.umsicht.fraunhofer.de

Projektpartner:

² Deutsches Biomasseforschungszentrum gGmbH
Torgauer Straße 116, 04347 Leipzig

Kontakt:

Joachim Krassowski
Telefon: +49 (0)208 8598 1162
E-Mail: joachim.krassowski@umsicht.fraunhofer.de

Elmar Fischer
Telefon: +49 (0)341 2434 452
E-Mail: elmar.fischer@dbfz.de

Joachim Krassowski (Projektkoordinator):

Die Biogaserzeugung aus Bioabfall ist oftmals nicht auf einen maximalen Gasertrag, sondern eine gleichbleibende Qualität der Gärreste ausgerichtet. Das hohe technische Niveau von Anlagen zur Bioabfallvergärung, würde es jedoch häufig mit bereits geringfügigen Anpassungen ermöglichen auch den Gasertrag zu verbessern. Allerdings fehlen an den Anlagen oft die relevanten Daten und Messwerte. Das Projekt liefert hierzu wertvolle Grundlagen für verbesserte die Auslegung und den stabilen Anlagenbetrieb.



Zusammenfassung

Die Nutzung von Bioabfällen zur Biogaserzeugung trägt dazu bei, Treibhausgasemissionen zu vermindern. Doch oftmals werden die Abfälle in den Biogasanlagen nicht effizient genug zu Biogas umgesetzt. Eine Ursache liegt in der stark variierenden Zusammensetzung der Abfallgemische. Fraunhofer UMSICHT und das Deutsche Biomasseforschungszentrum gGmbH untersuchten in einem Projekt den Betrieb von drei Anlagen, die biogene Abfälle verwerten. Die jeweilige Anlagentechnik, die genutzten Substrate und die Gaszusammensetzung wurden erfasst und systematisiert. Diese Datenbasis dient dazu, Anlagen zukünftig effizienter zu betreiben.

Optimierung von Bioabfallanlagen

Hintergrund

Bei der Vergärung organischer Abfälle sind ein stabiler und störungsfreier Anlagenbetrieb sowie das Erreichen hoher Gasausbeuten und Umsatzraten oft nicht in ausreichendem Maße gewährleistet. Starke Schwankungen von Gasmenge und -qualität erschweren die Gasnutzungsmöglichkeiten. Die Ursache hierfür ist vor allem in der oft wenig bekannten und auch zeitlich stark veränderlichen Zusammensetzung der bei der Vergärung eingesetzten Reststoffgemische zu sehen. Die variierenden Eigenschaften der verwendeten Substrate führen zu ständigen Schwankungen der Prozessbedingungen und in der Folge zu einer mangelnden Stabilität der biologischen Prozesse mit direkten Auswirkungen auf die Gasausbeute und -qualität. Messungen erfolgen bislang zumeist unsystematisch, es werden kaum Rückschlüsse zu den eingesetzten Substraten gezogen und es gibt keine Langzeitbeobachtungen (Besgen 2004), (Ahrens 2007), (Ebertsch 2004). Das bei den Anlagenbetreibern vorhandene Wissen und die lokal erfassten Daten werden darüber hinaus nicht in ausreichendem Maße aufgearbeitet und für die Prozesskontrolle nutzbar gemacht. In der Folge werden bestehende Potenziale bei der Abfallvergärung nicht effizient genutzt. Darüber hinaus führen die ungenügenden Kenntnisse über die Zusammensetzung des Ga-

ses, insbesondere auch in Bezug auf gering enthaltene potenziell schädliche Komponenten und Störstoffe, zu Akzeptanzproblemen bei innovativen Nutzungspfaden wie z. B. der Einspeisung in das Erdgasnetz.

Im Vergleich zu landwirtschaftlichen Biogasanlagen werden an Bioabfallvergärungsanlagen häufig höhere Ansprüche hinsichtlich der Steuerbarkeit des Prozesses gestellt, da der anaerobe Abbau durch eine nachgeschaltete Kompostierung ergänzt wird, die ein hinreichendes Energiepotenzial und gleichmäßige Beschaffenheit des anfallenden Gärrests erfordert. Betriebserfahrungen an landwirtschaftlichen Vergärungsanlagen zeigen, dass durch eine sehr gute Kenntnis über die Eigenschaften der eingesetzten Substrate ein zuverlässiger Anlagenbetrieb erreicht wird. Ein fundiertes Wissen über die Eigenschaften von Reststoffen ist also die Voraussetzung für einen optimalen und störungsarmen Betrieb von Abfallvergärungsanlagen. Im Hinblick auf die großflächige energetische Nutzung von Biomassen wird auch in der Literatur auf den hier noch bestehenden Forschungsbedarf hingewiesen (Hohmann 2008).

Bei steigenden Anteilen der erneuerbaren Energien an der Stromerzeugung in Deutschland kommt der Biogaserzeugung als einer der wenigen prinzipiell regelbaren Quellen wachsende Bedeutung zu. Hier stellt sich zukünftig die Frage, wie Wechsel zwischen Spitzenlast- und Grundlastbetrieb mit hoher Betriebssicherheit vereinbar sind. Definierte Prozessergebnisse in Bezug auf Menge und Qualität des erzeugten Biogases sind unter den genannten Bedingungen auf Abfallbehandlungsanlagen nur mit einer effizienten Prozesskontrolle möglich.

Vorgehensweise

In einem dreigliedrigen Untersuchungs- und Optimierungsprogramm wurde vom Fraunhofer-Institut für Umwelt-, Sicherheits- und Energietechnik UMSICHT (Fraunhofer UMSICHT) und dem Deutschen Biomasseforschungszentrum (DBFZ) an drei großtechnischen Anlagen zur Vergärung biogener Abfälle eine Datensammlung der Prozessparameter geschaffen. Auf dieser Basis war es möglich, das Optimierungspotenzial für den Betrieb dieser Biogasanlagen weitreichend auszuschöpfen und die Gasqualitäten entscheidend zu verbessern. Die Untersuchungen umfassten:

- eine Substrat- und Flüssigphasencharakterisierung sowie die Erstellung eines Substratkatalogs,
- die Prozessbeurteilung und Ableitung von Optimierungsmaßnahmen zur Erhöhung der Prozessstabilität sowie
- eine Spurengasanalytik und die Ableitung von Maßnahmen zur Gasreinigung.

Substrat- und Flüssigphasencharakterisierung

Im Gegensatz zu landwirtschaftlichen Anlagen weisen Abfallbiogasanlagen stark variierende Substratzusammensetzungen auf, was die Prozessführung deutlich erschwert. Für die Vergärung von Bioabfällen werden in der Literatur große Spannbreiten für die Stoffzusammensetzung, den Gasertrag und die Gaszusammensetzung angegeben (Tabelle 1). Bereits daraus wird die im Gesamtbild nicht zufriedenstellende Datenlage ersichtlich.

Tabelle 1: Zusammenstellung von Gasertragspotenzialen aus Bioabfall

Substrat	TS [%]	oTS [% TS]	Biogasertrag [m ³ *t ⁻¹ *FM]	Biogasertrag [m ³ *t ⁻¹ *oTS]	Methan- gehalt [%]	Methanertrag [m ³ CH ₄ *t ⁻¹ *oTS]
Bioabfall (KTBL 2010)	40	50	120	615	60	370
Bioabfall (Gronbach oJ)	20-35	-	60-200	-	-	-
Bioabfall (Jäkel 2000)	56	50	182*	650	61,5*	400
Biomüll (Archea 2001)	67,5	50	151,9	450	-	-
Bioabfall (Wiegand oJ)	60-75	30-70	-	200-600	-	-
Bioabfälle (Linke 2000)	65	45	-	400	-	-
Bioabfall (Eggersglüß 2001)	60-75	30-70	-	300-900	-	-
Biotonne (FNR 2005)	40-75	50-70	80-120	150-600	58-65	-
Spannbreite	20-75	30-70	60-182	150-900	58-65	369-400

* Kursiv dargestellte Zahlen wurden auf Basis der zur Verfügung stehenden Daten berechnet.

Nach dieser Auflistung sind Angaben zu Stoffdaten und Gaserträgen der Bioabfallvergärung im Vergleich zur Nutzung nachwachsender Rohstoffe relativ hohen Spannbreiten unterworfen, teilweise sind die Angaben unvollständig. Saisonale Unterschiede werden ebenfalls nicht berücksichtigt. Somit kann der Betreiber einer Bioabfallanlage auf Basis der Literaturdaten nur schwer die zu erwartenden Trockensubstanzgehalte und Gasproduktion prognostizieren.

Auf Basis der im Vorhaben durchgeführten intensiven Analyse der Substrate und der Gärreste wurde für die Anlagen ein Substratkatalog erstellt. Hiermit wurden die Voraussetzungen für eine bessere Beurteilung des Vergärungsprozesses und der eingesetzten Anlagentechnik geschaffen.

Die an Substrat und Gärrest vorgenommene Analytik umfasste die Parameter pH-Wert, Trockensubstanz (TS), organische Trockensubstanz (oTS), flüchtige organische Säuren (FOS), Ammonium-Stickstoff (NH₃-N), Gesamt-Stickstoff (N), Rohprotein (RP), Rohfaser (RFA), Säure-Detergentien-Faser (ADF), Neutral-Detergentien-Faser (NDF), Rohfett (RFE), Brennwert und Wassergehalt.

Exemplarische Ergebnisse der betriebsspezifischen Messprogramme

Der folgende Abschnitt stellt die Ergebnisse der durchgeführten Analytik für eine der beteiligten Biogasanlagen exemplarisch dar. Die stoffgruppenspezifische Analytik (RP, RFA, AFD, NDF, RFE) bietet die Möglichkeit, den pauschalen Parameter oTS zu differenzieren. Mit Kenntnis der spezifischen Abbaukoeffizienten der Einzelfractionen ist eine Abschätzung

des potenziellen Gasertrags eines Substrats und des damit korrelierenden Abbaugrads deutlich besser möglich.

Die Analyse der Parameter RP, RFA, ADF und NDF, deren Herkunft in der Futtermittelcharakterisierung liegt, erfolgte nach der Methodenvorschrift der VDLUFA¹.

Abbildung 1 zeigt den Verlauf der analysierten Parameter über den Untersuchungszeitraum von November 2010 bis August 2011.

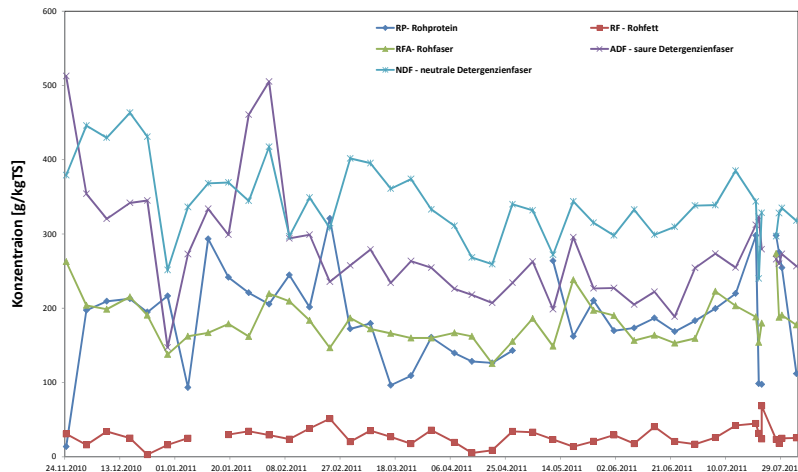


Abbildung 1: Änderungen in der Zusammensetzung der Futtermittelparameter bei einer Bioabfallvergärungsanlage über einen Untersuchungszeitraum von 37 Wochen

Die Darstellung zeigt insbesondere im Winterhalbjahr 2010/2011 mit Ausnahme des Rohfettgehalts eine relativ starke und unregelmäßige Schwankung der untersuchten Futtermittelparameter. Für eine bessere Interpretierbarkeit wurden eine Mittelwertbestimmung für den gesamten Untersuchungszeitraum und eine getrennte Berechnung für den Winter (November 2010 bis Februar 2011) und die Frühjahr-/Sommerperiode (März bis August 2011) vorgenommen.

Tabelle 2: Ergebnisse der Substratanalysen einer Abfallvergärungsanlage im Zeitraum November 2010 bis August 2011

Zeitraum	TS [%]	oTS [%TS]	TKN [g*kg ⁻¹ TS]	RP [g*kg ⁻¹ TS]	RF [g*kg ⁻¹ TS]	RFA [g*kg ⁻¹ TS]	ADF [g*kg ⁻¹ TS]	NDF [g*kg ⁻¹ TS]
Winter	43±3	66±6	35±12	219±73	27±11	183±32	324±96	370±59
Sommer	44±9	55±7	29±10	178±59	25±10	179±30	250±33	326±39
Gesamt	43±8	59±8	31±11	187±66	26±10	182±31	280±75	341±51

¹ VDLUFA, Methodenbuch III, Futtermitteluntersuchung, Amtliche Methode, Hamburg 1988.

Die Analysenergebnisse für Trockensubstanz und organische Trockensubstanz liegen mit 43±8 % bzw. 59±8 % im Bereich der in der Literatur dokumentierten Werte. Nach Aussagen des Betreibers schwankt die Zusammensetzung des Bioabfalls im Jahresverlauf aufgrund des saisonal verstärkten Anfalls von Grünschnitt und Laub, was im Rahmen der Betrachtung der wochenweise erfolgten Analysen auch nachvollzogen werden kann und die Notwendigkeit einer längerfristigen Untersuchung bei der Planung von Abfallvergärungsanlagen erklärt. Im Mittel liegt der Trockensubstanzgehalt des Inputs im Sommer geringfügig höher, ist aber auch größeren Abweichungen unterworfen. Die Fraktionen der Futtermittelanalyse zeigen hingegen im Sommer durchweg niedrigere Konzentrationen, was sich auch mit dem deutlich geringeren mittleren organischen Trockensubstanzgehalt von 55±7 % gegenüber 66±6 % im Winterhalbjahr deckt. Zur Beurteilung der unterschiedlichen Gasertragspotenziale wurde eine Berechnung nach Mauky vorgenommen (Mauky 2011).

Tabelle 3: Abschätzung des Gasertragspotenzials für Bioabfall auf Mittelwertbasis der untersuchten Fraktionen. Berechnungen mit einem angenommenen Abbaugrad von 70 % auf Basis von (Mauky 2011)

Zeitraum	TS [%]	oTS [%TS]	Biogas [m ³ *t ⁻¹ FM]	Anteil CH ₄ [%]
Winter	43	66	92	51
Sommer	44	55	66	52
Gesamt	43	59	74	52

Die Gasertragsberechnungen liegen innerhalb des in der Literatur dokumentierten breiten Wertebereiches von 60 - 182 m³*t⁻¹FM. Aufgrund des deutlich höheren Anteils organischer Trockensubstanz im Winterhalbjahr ist das theoretische Gasertragspotenzial bei annähernd gleichem Trockensubstanzanteil um rund 39 % größer. Abweichend von den Literaturdaten fällt der Methananteil bei der Berechnung geringer aus. Dies wird durch die Festlegung der Abbaugrade und/oder durch physikalische und biologische Prozesse im Fermenter beeinflusst, die durch ein stöchiometrisches Prozessmodell nicht abgebildet werden können.

Auch in den Gärprodukten wurden die Futtermittelparameter bestimmt. Die Ergebnisse werden nachfolgend dargestellt.

Tabelle 4: Ergebnisse der Gärproduktanalysen im Zeitraum November 2010 bis August 2011

Zeitraum	TS [%]	oTS [%TS]	TKN [g*kg ⁻¹ TS]	RP [g*kg ⁻¹ TS]	RF [g*kg ⁻¹ TS]	RFA [g*kg ⁻¹ TS]	ADF [g*kg ⁻¹ TS]	NDF [g*kg ⁻¹ TS]
Winter	25±1	49±4	25±8	129±77	13±15	175±39	367±97	319±21
Sommer	29±2	43±6	27±11	133±65	17±15	167±32	275±38	280±75
Gesamt	28±2	45±6	26±10	132±69	16±15	170±34	306±78	294±65

Die Analyse der Gärprodukte zeigt deutliche Parallelen zum Substrat auf. Im Sommerhalbjahr werden Substrate mit höherem Trockensubstanzgehalte eingesetzt, die jedoch in der Summe einen niedrigeren Anteil organischer Trockensubstanz aufweisen. Entsprechend fallen auch die Fraktionen der Futtermittelanalyse geringfügig ab.

Optimierungsansätze für Abfallvergärungsanlagen

Der Projektansatz, der mit Untersuchungen an drei unterschiedlich aufgebauten großtechnischen Vergärungsanlagen sehr praxisorientiert angelegt war, ermöglichte eine sehr detaillierte Betrachtung der drei unterschiedlichen Anlagentechnologien (siehe Tabelle 5). Alle drei Anlagen waren während des Untersuchungszeitraumes kontinuierlich in Betrieb und erfüllten grundsätzlich ihre Aufgabe, den Großteil der in den Bioabfällen vorhandenen Organik in verwertbares Biogas umzusetzen. Bei allen Anlagen zeigten die Untersuchungen jedoch unabhängig von der Verfahrenstechnik deutliche Fluktuationen bei der Gasproduktion, bei den Methangehalten sowie beim Abbau der organischen Fracht.

Der Methangehalt im Biogas schwankte um bis zu 18 % und die Gasausbeuten aus der eingebrachten organischen Fracht variierten innerhalb kurzer Zeiträume teilweise um bis zu 100 %, wobei es sich auch bei den schlechten Betriebszuständen nicht um Betriebsstörungen, sondern lediglich um die Fluktuationen des Betriebszustands handelte. Hieraus lässt sich ablesen, dass auch bei regulär betriebenen Abfallvergärungsanlagen ein großes Potenzial für Optimierungen besteht. Im Projektverlauf konnten vom Projektteam verschiedene Optimierungspotenziale identifiziert werden. Die Umsetzungen wurden von den Betreibern bereits durchgeführt bzw. befinden sich in der Bau- und Planungsphase.

Aus den Arbeiten der praktischen Anlagenoptimierung konnte das Fazit gezogen werden, dass selbst an Biogasanlagen mit regulärem Betrieb ein großer Spielraum für effizienzsteigernde Maßnahmen besteht. Vergleicht man hinsichtlich der Ableitung von Optimierungsstrategien die Erkenntnisse des vorliegenden Projekts mit vorhandenen Ergebnissen von anderen Vorhaben zur Optimierung von Vergärungsanlagen, z. B. „Substratspezifische Verfahrens Anpassungen bei der Biogasgewinnung aus Abfällen“ (Busch 2011), oder mit der Handreichung zur Optimierung von Biogasanlagen (Zörner 2010) lässt sich feststellen, dass die Probleme bei der praktischen Durchführung von Optimierungsschritten nur selten durch das Fehlen technischer Erkenntnisse bedingt sind.

Problematisch erweist sich vielmehr die systematische Identifizierung der wichtigsten Maßnahmen zur Optimierung. Hierzu wurden im Projekt die notwendigen Voraussetzungen geschaffen und an den im Projekt beteiligten Anlagen erfolgreich umgesetzt.

Spurengasanalytik und Ableitung von Maßnahmen zur Gasreinigung

Insbesondere bei der Bioabfallvergärung existiert eine große Bandbreite unterschiedlicher Fermenter- und Verfahrenskonzepte. Anhand der untersuchten Biogasanlagen konnte daher nur eine kleine Auswahl aus den verschiedenen Konzepten betrachtet werden. Es wurde versucht, im Rahmen der Möglichkeiten eine große Bandbreite abzudecken. Tabelle 5 zeigt die Charakteristika der verschiedenen Anlagenkonzepte auf. Bei einer Biogasanlage handelt es sich um eine Covergärungsanlage von Gülle und Abfällen (Anlage A), zwei Anlagen sind reine Abfallvergärungsanlagen (Anlage B und C). Bei Anlage A und C werden die Fermenter im mesophilen Temperaturbereich (ca. 40 °C) betrieben, Anlage B arbeitet im thermophilen Bereich (ca. 52 °C). Auch die Art der Homogenisierung unterscheidet sich zwischen den Anlagen und in der Anlage A sogar zwischen den Fermentern.

Tabelle 5: Übersicht über die betrachteten Biogasanlagen

Standort Merkmal	Anlage A	Anlage B	Anlage C
Wassergehalt im Reaktor	Nassvergärung	Trockenvergärung	Nassvergärung
Temperatur	mesophil	thermophil	mesophil
Prozessführung	einstufig	zweistufig	einstufig
Durchmischung	Fermenter 1: Gaseinpressung	Fermenter 1: Pfpfenstrom	Fermenter 1: Pumpen, Wärmetauscher, Gaseinpressung
	Fermenter 2: Paddelrührwerk	Fermenter 2: Pfpfenstrom	Fermenter 2: Pumpen, Wärmetauscher, Gaseinpressung
	Fermenter 3: Zentralrührwerk	-	-
Inputmaterialien	Covergärung	Abfallvergärung	Abfallvergärung
Gesamtdurchsatz	14.000 t/a	30.000 t/a	8.000 t/a

Werden die Spurengaskonzentrationen der untersuchten Anlagen über die Dauer der Messkampagne verglichen, lassen sich keine Gemeinsamkeiten der Konzentrationsverläufe der Stoffverbindungen ausmachen. Da die Temperatur im Fermenter jeweils konstant gehalten wird, werden Konzentrationsschwankungen vorrangig durch die Änderungen im Substratmix oder in der Vorbehandlung der Substrate bedingt. Auch ein diskontinuierlicher Betrieb durch Störungen im Betriebsablauf oder Wartungsarbeiten kann Konzentrationsschwankungen hervorrufen.

Die Messreihen zeigen, dass das Biogas von Anlage B (thermophile Betriebsführung) am stärksten mit Spurengasverbindungen belastet ist. Abbildung 2 zeigt einen Vergleich der Spurengaskonzentrationen in den drei Anlagen. Der thermophile Betrieb führt generell zu einer schnelleren Umsetzung der Biomasse und kommt so mit einer kürzeren Verweildauer aus. Jedoch stellt sich ein niedrigerer Methangehalt im Biogas ein und es wird verstärkt CO₂ gebildet.

Aus Abbildung 2 ist zu erkennen, dass Anlage C im ausgewählten Beispiel eine etwas höhere Spurengasbelastung aufweist als Anlage A. Die Anzahl und Höhe der Peaks ist jedoch stark abhängig von der Substrataufgabe. Ein Zusammenhang zwischen bestimmten identifizierten Substanzen und den Substraten ist dennoch nur schwer auszumachen, da die Fermenter in der Regel mit einem Mischsubstrat gefüttert werden, welches aus einer Vielzahl an Einzelsubstraten besteht.

Auffällig ist jedoch, dass bestimmte Substanzen wie z. B. 2-Butanon, α -Pinen oder D-Limonen in allen Anlagen gefunden werden. Diese variieren jedoch in ihrer Konzentration nicht nur in den verschiedenen Anlagen, sondern auch bei verschiedenen Messungen in derselben Anlage.

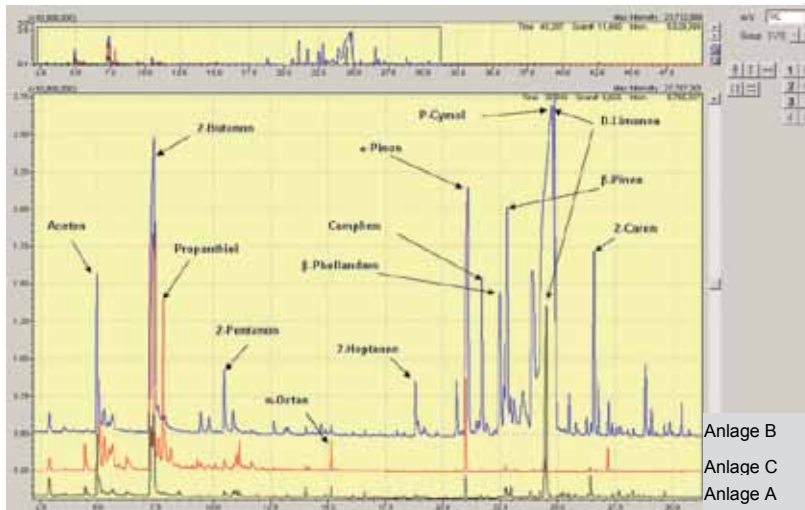


Abbildung 2: Vergleich der Gaszusammensetzung der untersuchten Biogasanlagen

Zusammenführung der Ergebnisse

Die Ergebnisse aller drei Arbeitsschwerpunkte zeigen, dass es Zusammenhänge zwischen den eingesetzten Substraten und den Spurengaskonzentrationen gibt. Sie deuten ebenso darauf hin, dass Beziehungen zwischen dem Auftreten verschiedener Spurengase und dem Prozesszustand bestehen. Konkrete Abhängigkeiten konnten jedoch aus den vorliegenden Ergebnissen insbesondere hinsichtlich des Prozesszustands noch nicht abgeleitet werden. Die Ergebnisse des Projekts ermöglichen es jedoch, konkrete Vorgaben für weitere Untersuchungen zu erarbeiten. In der weiterführenden Forschungsarbeit sollen die gefundenen Ansatzpunkte weiter untersucht werden. Insbesondere die unterschiedlichen Verweilzeiten der Substrate in den Fermentern der Biogasanlagen (z. B. Anlage B) erschweren die Auswertung der Ergebnisse der Gasphase, da aus den bisherigen Messungen gefolgert werden kann, dass Spurengaskomponenten stark verweilzeitabhängig sind und in einem Fermenter mit kürzeren Verweilzeiten eine höhere Konzentration aufweisen können als bei dem Fermenter mit längeren Verweilzeiten. Zudem erscheint es sinnvoll, die Messungen in den Fermentern durch ein Screening der Gasphase (Dämpfe) der verschiedenen Substrate mittels Headspace in Kopplung mit Thermodesorption-GCMS zu ergänzen. Dadurch kann möglicherweise festgestellt werden, ob bestimmte Substanzen wie z. B. Siloxane, Aromaten oder Terpene schon in den Substraten vorhanden sind, oder erst während der Vergärung auf- bzw. abgebaut werden.

Deutlicher erkennbar ist der Bezug zwischen den Prozessgrößen und den eingesetzten Substraten. Der Aufbau des Substratkatalogs zeigt einen zielführenden Weg zu einer kontinuierlicheren Beschickung der Fermenter und damit auch zu einer Erhöhung der Anlageneffizienz auf. Anhand der analysierten Parameter lassen sich viele Einsatzsubstrate zu Klassen mit ähnlichen Abbaueigenschaften zusammenfassen. Aus getrennten Vorlagebe-

halten mit unterschiedlichen Substratklassen kann dann eine optimierte Anlagenbeschickung erfolgen, die den Anlagenbetrieb verstetigt und die Ausbeute aus den Substraten erhöht.

Die Analyse der einzelnen Anlagen hat zudem gezeigt, dass ein großes Hemmnis bei der Betriebsoptimierung für die einzelnen Betreiber nicht das Fehlen technologischer Möglichkeiten ist, sondern das Fehlen eines Konzepts zur systematischen Analyse der Anlagen. Obwohl es sich hier bei den drei betrachteten Anlagen nicht um eine repräsentative Menge handelt, liegt die Vermutung nahe, dass es sich hier um ein generelles Problem handelt. Die gewonnenen Ergebnisse sollen daher weiter ausgearbeitet und zu einem Handlungsleitfaden für Biogasanlagenbetreiber ausgebaut werden, mit dem bestehende Anlagen systematisch analysiert und die Optimierungsschritte mit dem besten Kosten/Nutzenverhältnis ermittelt werden können.



Literaturverzeichnis

Archea (2001): Firmeninformation. In: Mitterleitner (o.J.): Inputmaterialien für die Biogaserzeugung, LfL Landtechnik.

Ahrens, T. (2007): Optimierung der Spurengasanalytik von Biogasen zur Bewertung und Weiterentwicklung von Gasaufbereitungstechniken und -verfahren im Hinblick auf den Einsatz neuartiger und hocheffizienter Energiekonverter. Abschlussbericht, BMBF-Verbundprojekt 01SF0306 Regasnet.

Besgen, S.; Kempkens, K. (2004): Energie- und Stoffumsetzung in Biogasanlagen – Ergebnisse messtechnischer Untersuchungen an landwirtschaftlichen Biogasanlagen im Rheinland. Abschlussbericht 2004, Landwirtschaftskammer Nordrhein-Westfalen.

Busch, G. (2011): Substratspezifische Verfahrensanpassungen bei der Biogasgewinnung aus Abfällen. Vortrag auf dem 17. Kolloquium „Abfall und Altlasten aktuell“ 9. Dezember 2010, TU Dresden.

Eggersglüß, W., Kraschinski, S. (2001): Biogas II, RKL-Schrift 2001. In: Mitterleitner (o.J.): Inputmaterialien für die Biogaserzeugung, LfL Landtechnik.

Ebertsch, G.; Zell, B. (2004): Energetische Nutzung von Biogas aus der Landwirtschaft – Untersuchung der Biogaszusammensetzung bei Anlagen aus der Landwirtschaft. Bayerisches Landesamt für Umweltschutz (LfU). Augsburg. URL: <http://www.bavaria.de/LFU/luft/biogas/biogas4.htm> (Stand: 16.12.2004).

Fachagentur nachwachsende Rohstoffe e. V. (Hrsg.) (2005): Handreichung Biogasgewinnung und –nutzung.

Gronbach, G. (2001): Biogasanlage im Nahrungskreislauf. Tagungsband der Landesvolksschule Feuerstein. In: Mitterleitner (o.J.): Inputmaterialien für die Biogaserzeugung, LfL Landtechnik.

Hohmann, U. (2008): Umsetzung von Biomasse zu Gas. In: *forum.new power – Magazin für erneuerbare Rohstoffe und Energie* 3, S. 14-17.

Jäkel, K. (2000): Grundlagen der Biogasproduktion. In: Mitterleitner (o. J.): Inputmaterialien für die Biogaserzeugung, LfL Landtechnik.

KTBL, Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft. e. V. (2010): Gasausbeute in landwirtschaftlichen Biogasanlagen, KTBL-Heft 88.

Linke, B. (2000): Biogas in der Landwirtschaft – Leitfaden für Landwirte und Investoren im Land Brandenburg, Potsdam. In: Mitterleitner (o.J.). Inputmaterialien für die Biogaserzeugung, LfL Landtechnik.

Mauky, E., Liebetrau, J., Fritsche, B., Schreiber, A., Schmidt, T. (2011): Robustes Prozessmodell zur dynamischen Simulation der anaeroben Fermentation. DBFZ-Report Nr. 8, S. 35-72. URL: http://www.dbfz.de/web/fileadmin/user_upload/DBFZ_Reports/dbfz_report_kompakt_web.pdf (Stand: 16.12.2004).

Wiegand, S., Grepmeier, M., Behmel, U. (o. J.): Zur Cofermentation geeignete Substrate. In: Mitterleitner (o. J.): Inputmaterialien für die Biogaserzeugung, LfL Landtechnik.

Zörner, W.; Häring, G.; Brüggling, E.; Bücken, C.; Wetter, C.; Vogt, R. (2010): Handreichung zur Optimierung von Biogasanlagen, Hochschule Ingolstadt. URL: https://www.fh-muenster.de/fb4/downloads/personen/wetter/Broschuere_Biogas_Endfassung.pdf (Stand: 19.09.2013).



Imageanalyse und Imagewandel der Biogastechnologie

Ulrike Ehrenstein¹, Sabine Strauch¹, Jan Hildebrand²

Vorhaben: Imageanalyse und Imagewandel der Biogastechnologie unter Einbeziehung sozialwissenschaftlicher und technologischer Aspekte

FKZ-Nr.: O3KB034

Laufzeit: 01.10.2009 – 31.12.2011

Zuwendungssumme: 254.438 €

Koordination:

¹ Fraunhofer-Institut für Umwelt-, Sicherheits- und Energietechnik UMSICHT
Osterfelder Str. 3, 46047 Oberhausen
www.umsicht.fraunhofer.de

Projektpartner:

² Forschungsgruppe Umweltpsychologie an der Universität des Saarlandes
Postfach 151150, 66041 Saarbrücken
www.fg-umwelt.de

Kontakt:

Dr.-Ing. Ulrike Ehrenstein – Projektkoordinatorin
Telefon: +49 (0)208 8598 1156
E-Mail: ulrike.ehrenstein@umsicht.fraunhofer.de

Dr.-Ing. Stephan Kabasci – Projektleiter
 Telefon: +49 (0) 208 8598 1164
 E-Mail: stephan.kabasci@umsicht.fraunhofer.de

Prof. Dr. Petra Schweizer-Ries – Projektpartner
 Telefon: +49 (0) 681 9762 830
 E-Mail: petra.schweizer-ries@fg-upsiy.com

Dipl.-Psych. Jan Hildebrand – Projektpartner
 Telefon: +49 (0) 681 9762 829
 E-Mail: jan.hildebrand@fg-upsiy.com

Ulrike Ehrenstein (Projektkoordinatorin):

Die Biogastechnologie trägt derzeit zu etwa 5 % zur Energieversorgung in Deutschland bei. Das erscheint nicht viel, doch ihre Flexibilität und die Speicherbarkeit des Gases machen sie zu einem bedeutenden Baustein in unserem zukünftigen Energiesystem. Umso wichtiger ist es, den weiteren Ausbau der Biogastechnologie so zu gestalten, dass sie für möglichst breite Bevölkerungsschichten eine akzeptable Form der Energieerzeugung darstellen kann.



Zusammenfassung

Trotz der allgemein hohen Akzeptanz regenerativer Energien bei der Bevölkerung in Deutschland gestaltet sich die Umsetzung der Energiewende häufig schwierig. Der Neubau von Anlagen zur regenerativen Energieerzeugung wird unter Umständen lokal von Protesten begleitet und in manchen Fällen sogar verhindert. Hiervon betroffen ist auch die Biogastechnologie.

Das Forschungsvorhaben „Imageanalyse und Imagewandel der Biogastechnologie“ wurde im Rahmen der Nationalen Klimaschutzinitiative mit dem Ziel gefördert, das Image der Biogastechnologie zu untersuchen und die dafür relevanten Einflussfaktoren zu identifizieren. Durch die Analyse gelungener und misslungener Implementierungsprozesse verschiedener Biogasanlagen sowie durch Interviews mit Vertretern der Branche konnte eine ganzheitliche und perspektivenübergreifende Untersuchung realisiert werden. Anhand der empirisch ermittelten Daten wurden sowohl positive Faktoren als auch Konfliktpunkte und deren Bewältigungspotenziale herausgearbeitet.

Die Forschungsergebnisse des Projekts mündeten in Handlungsempfehlungen, die dazu beitragen sollen, akzeptable Lösungen für den weiteren Ausbau der Biogastechnologie zu entwickeln. Diese umfassen sowohl Maßnahmen im technischen Bereich als auch Kommunikationsstrategien. Sie ermöglichen den beteiligten Akteuren ein konstruktives Agieren innerhalb des „Spannungsfeldes Biogastechnologie“ (Abbildung 1). Durch die interdisziplinäre Zusammenarbeit von sozialwissenschaftlichen und ingenieurtechnischen Wissenschaftlern konnten die Fragestellungen ausgewogen, sich ergänzend und dadurch umfassend bearbeitet werden.

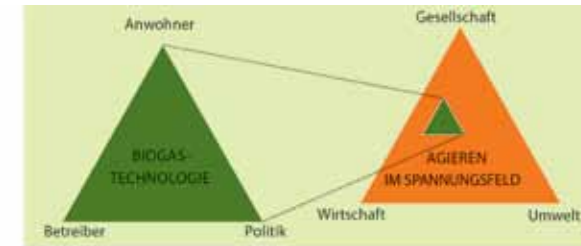


Abbildung 1: Spannungsfeld Biogastechnologie

Biogastechnologie in Deutschland

Der Umbruch auf dem Energiemarkt ist gegenwärtig durch dynamische Entwicklungen gekennzeichnet und wird von Unsicherheiten hinsichtlich der zukünftigen Ausgestaltung des Marktes begleitet. Weitere Entwicklungsschritte und Innovationen sind unbekannte Größen in den Zukunftsszenarien der Energieversorgung. Die Umstellung auf eine regenerative Energieversorgung erfordert die Entwicklung eines leistungsfähigen Energiemixes, in dem sich die spezifischen Vorteile der unterschiedlichen Erzeugungswege regenerativer Energie ideal ergänzen.

Im Zuge des verstärkten Ausbaus der erneuerbaren Energien in den vergangenen 20 Jahren gerät in jüngster Zeit auch die Relevanz der Akzeptanz dieser neuen Technologien in Deutschland zunehmend in den Blickpunkt. Im Rahmen des Projektes wurde das Image und die Akzeptanz der Biogastechnologie in Deutschland analysiert und die für das Ansehen der Technologie relevanten Einflussfaktoren identifiziert. Ziel des Vorhabens war es, die Projektergebnisse in konkrete Handlungsempfehlungen für Praxisakteure zu überführen, um so eine Grundlage für die konstruktive Weiterentwicklung und den Ausbau der Technologie abzuleiten.

Zum Zeitpunkt des Projektbeginns wurden in Deutschland ca. 6.500 Biogasanlagen betrieben. Gegenwärtig tragen bereits über 7.200 Anlagen mit einer installierten Gesamtleistung von mehr als 2.900 MW (FNR 2012) zur Grundlastversorgung bei. Eine wichtige Funktion des speicherbaren Biogases wird zukünftig auch in der Verwendung als Regelenergie liegen, um z. B. die Schwankungen der Windkraft und der Solarenergie auszugleichen.

Datenerhebungen

Die Projektbearbeitung basierte auf einem vierstufigen Prozess (Abbildung 2) unter Berücksichtigung verschiedener Akteurebenen. Nach einer ersten Sondierung möglicher Einflussfaktoren erfolgten umfangreiche fragebogengebundene Datenerhebungen auf Anwohner- und Betreiberbene. Planer und Hersteller von Biogasanlagen wurden hinsichtlich ihrer Erfahrungen und Einschätzungen befragt. Zusätzliche Experteninterviews ergänzten die Datenaufnahme. Die aus der Datenanalyse gewonnenen Erkenntnisse bildeten die Grundlage für vertiefende Diskussionen in mehreren Workshops.

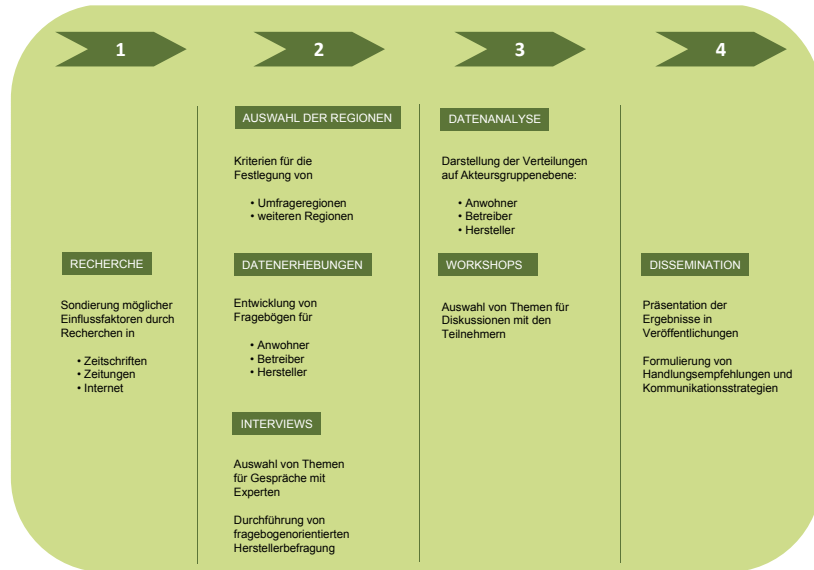


Abbildung 1: Spannungsfeld Biogastechnologie

Die Teilnahme an verschiedenen Fachveranstaltungen öffnete zudem die Sicht auf weitere akzeptanzrelevante Aspekte. Dies betrifft vor allem Fragen der Anlagensicherheit und der Genehmigungsanforderungen. Weiterhin wurde ein beständiger Austausch mit Projekten aus dem Bioenergieregionen-Wettbewerb des BMELV, insbesondere zu den Bioenergieregionen Altmark und Cochem, sowie mit Regionen des BMU-Projektes 100 %-EE-Regionen, hier vor allem dem Zukunftskreis Steinfurt, gepflegt.

Die Bearbeitung des Vorhabens wurde von konkreten Fragestellungen im Hinblick auf die akzeptanzrelevanten Einflussfaktoren geleitet. In einer ersten Einteilung wurden drei Ebenen unterschieden, die für die Imagebildung der Biogastechnologie relevant erschienen: allgemeine Imagefaktoren, regionalspezifische Unterschiede sowie Akteursunterschiede (Tabelle 1). Mit diesen Ebenen sind Fragestellungen verbunden, die Einfluss auf das methodische Vorgehen (Fragebogenkonstruktion, Stichprobenauswahl) im Verlauf der Projektarbeit genommen haben.

Tabelle 1: Akzeptanzrelevante Einflussfaktoren

Allgemeine Imagefaktoren	Regionalspezifische Unterschiede	Akteursunterschiede
Sichtbarkeit und Größe der Anlage	Einfluss bestehender landwirtschaftlicher Strukturen	Bild der Biogastechnologie in der Bevölkerung
Standortwahl	Betrachtung möglicher Nord-Süd- oder Ost-West-Unterschiede	Einfluss der Betreiber von Biogasanlagen
Emissionen (Geruch und Lärm; Verkehrszunahme durch Substrattransport)	Situation in Biogas-Ballungsgebieten	Rolle der Planer und Hersteller von Biogasanlagen
Substratwahl		Positionen von Interessensverbänden
Wissen über Biogastechnologie (technische Abläufe, Anlagenbetrieb, rechtliche Rahmenbedingungen)		Image der Bioenergie auf Ebene verschiedener Akteursgruppen (z. B. Naturschutz, Jägerschaft)
Bewertung des Planungsprozesses hinsichtlich Fairness und Informationsgüte		Rolle politischer Entscheidungsträger
Zusätzliche Einflussfaktoren		weitere relevante Akteure (z. B. Genehmigungsbehörden, Raumplanung)

Für das Projekt wurden drei Fragebogenvarianten erstellt: eine Anwohner-, eine Betreiber- sowie eine Herstellerversion. Zentrale Inhalte des Anwohnerfragebogens sind:

- Standortauswahl: Kriterien und Alternativen
- Planung der Anlage: Informationen zur Planung und technischen Aspekten, Fairness und Transparenz im Planungsverfahren
- Geruchs- und Lärmemissionen
- Verkehr: Qualität, Quantität, Frequenz, Wirkung
- Unfallrisiko: subjektives Risikoempfinden
- Betriebsweise: Aspekte der Landwirtschaft, Konkurrenz zur Nahrungsmittelproduktion, Einfluss auf Immobilienwerte
- Umwelt- und Klimaaspekte: wahrgenommene Umweltauswirkungen
- Medienberichte, Wissen, soziodemografische Angaben

Der Betreiberfragebogen umfasst folgende Schwerpunkte:

- Allgemeine Angaben zur Biogasanlage
- Angaben zum landwirtschaftlichen Betrieb
- Planungs- und Bauphase
- Akzeptanz in der Bevölkerung
- Geräusch- und Geruchsemissionen
- Potenzielle Konfliktfelder
- Erfahrungen mit der Lokalpresse

Die Themengebiete des Herstellerfragebogens sind:

- Angaben zum Unternehmen
- Angaben zum Geschäftsbereich Biogas
- Angaben zu den Auftraggebern
- Spezifizierung der geplanten Biogasanlagen
- Genehmigungsprozess
- Potenzielle Konfliktfelder
- Erfahrungen mit der Lokalpresse

Ein Großteil der Fragen in den Fragebögen ist durch Ankreuzen auf einer Skala von 1 („trifft gar nicht zu“) bis 5 („trifft voll zu“) zu beantworten. Eine weitere Gruppe von Fragen sind die semantischen Differentiale, die dazu dienen, die mit Biogasanlagen assoziierten Begriffe näher zu bestimmen, z. B. ob Biogasanlagen als eher industriell oder als ländlich angesehen werden. Um den befragten Akteuren auch Gelegenheit zu geben, ihren persönlichen Standpunkt zu präzisieren, sind zusätzlich offene Fragestellungen eingebaut, die durch eigene Anmerkungen frei zu beantworten sind. In diesem Bereich waren erfragte Themen z. B. Vor- und Nachteile der Bioenergienutzung in der Befragungsregion, Vor- und Nachteile der Standortwahl, Annahmen über Vergärungsstoffe und Gesundheitsaspekte sowie sonstige Anmerkungen zum Thema Bioenergienutzung.

Für die Anwohnerbefragungen mussten geeignete Standorte ausgewählt werden. Die in die Befragungen einbezogenen sechs Untersuchungsregionen befinden sich in verschiedenen Bundesländern und unterscheiden sich hinsichtlich charakteristischer Merkmale, wie z. B. der Bewirtschaftung oder der Biogasanlagendichte (Abb. 3). Ein bewusster Schwerpunkt innerhalb der Datenerhebungen wurde auf Regionen mit Abfallvergärungsanlagen gelegt.

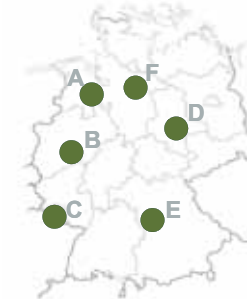


Abbildung 3: Regionen der sechs Anwohnerbefragungen

In die Datenanalyse eingeflossen sind die Antworten aus:

- 364 ausgefüllten von 2.401 ausgeteilten Anwohnerfragebögen,
- 163 ausgefüllten von 1.000 bundesweit versandten Betreiberfragebögen,
- 14 ausgefüllten Herstellerfragebögen bzw. durchgeführten Interviews,
- vertiefende Erkenntnisse aus zwölf Expertengesprächen mit Vertretern aus den Bereichen Kommunalpolitik, Wissenschaft, Journalismus.

Ergebnisse

Die Auswertung der Befragungen, Interviews und Workshops verdeutlicht, dass die Diskussionen um die Biogastechnologie in Deutschland vielschichtig geführt werden (Abbildung 4). Die Diskussionspunkte erstrecken sich dabei auf der einen Seite von Sicherheitsaspekten über das Landschaftsbild und die Flächennutzung bis hin zur Nutzung der Anbauprodukte und den Nährstoffkreisläufen. Auf der anderen Seite werden wirtschaftliche Aspekte der Biogasnutzung diskutiert. Das Beispiel der Wärmenutzung zeigt, dabei die enge Verbindung von Nachhaltigkeit und Wirtschaftlichkeit.

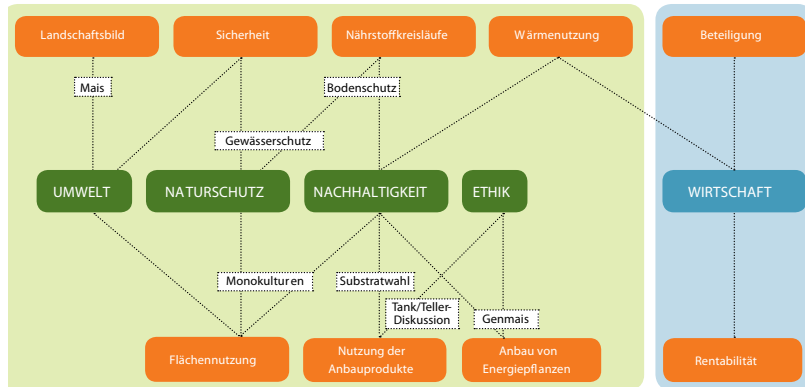


Abbildung 4: Vielschichtige Diskussionen um die Einflüsse der Biogastechnologie

Die befragten Anwohner von Biogasanlagen halten die Biogastechnologie überwiegend für eine geeignete Form der Energiegewinnung (Abbildung 5).

Die Nutzung von Biogas stellt eine geeignete Form der Energiegewinnung dar.

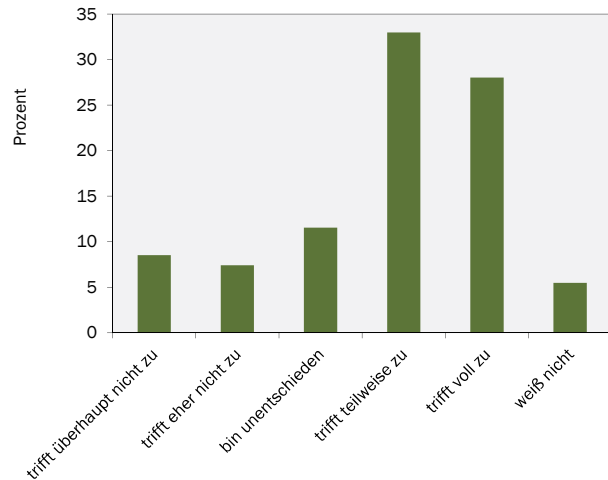


Abbildung 5: Eignung von Biogas für die Energiegewinnung nach Einschätzung der Anwohner

Sie kritisieren jedoch häufig die Standortwahl und die aus ihrer Sicht oft mangelhafte Informationspolitik im Planungsprozess. Viele der Anwohner wünschen sich auch mehr Informationen über die Biogastechnologie im Allgemeinen, z. B. durch die Medien. An einen positiven ökonomischen Effekt der Biomassennutzung glaubten nur 17,1 % der Befragten, 34,1 % standen dem skeptisch gegenüber und ein hoher Anteil von deutlich mehr als 40 % ist in dieser Frage unentschieden oder weiß den Effekt nicht einzuschätzen (Abbildung 6).

Die Nutzung von Biomasse wirkt sich positiv auf unsere Region als Wirtschaftsstandort aus.

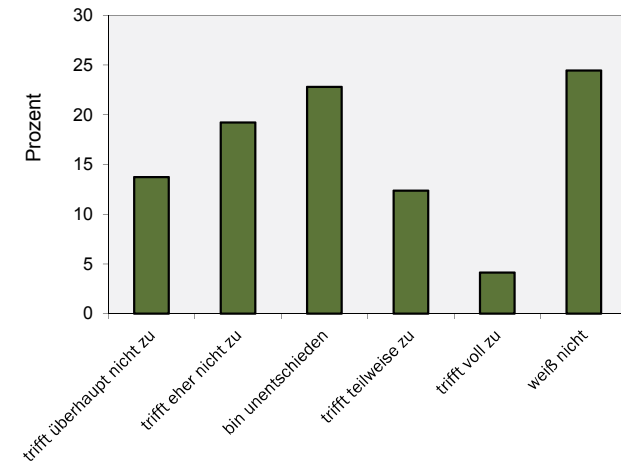


Abbildung 6: Einfluss der Biomassennutzung auf die Region als Wirtschaftsstandort nach Einschätzung der Anwohner

Von den 163 befragten Anlagenbetreibern geben 15 Betreiber an, dass ihre Biogasanlage von den Anwohnern abgelehnt wird. Die Entfernung zu den nächsten Nachbarn spielt hierbei nur eine untergeordnete Rolle (Abbildung 7).

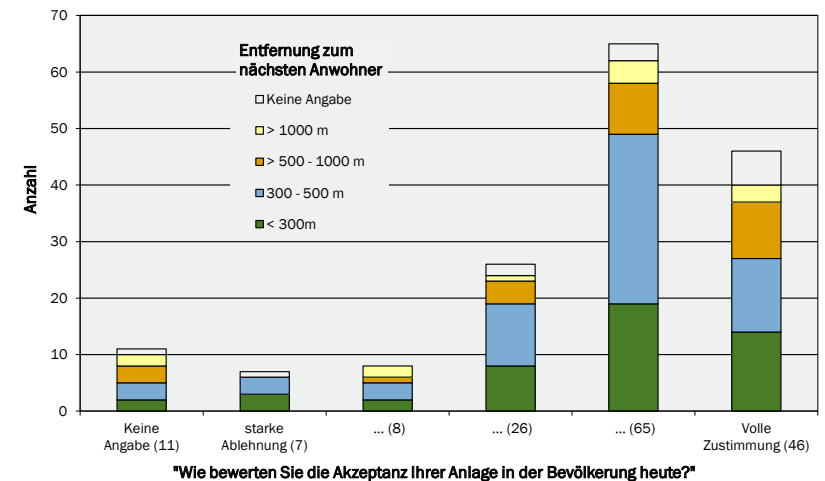


Abbildung 7: Die heutige Akzeptanz der Biogasanlage in der Bevölkerung nach Einschätzung des Anlagenbetreibers in Relation zur Entfernung zum nächsten Anwohner

Die Antworten der Anlagenbetreiber zur Art und Weise der von ihnen betriebenen Öffentlichkeitsarbeit zeigen gleichzeitig, dass sich eine aktive Öffentlichkeitsarbeit positiv auf die Akzeptanz der Biogasanlage in der Nachbarschaft auswirkt: Unter denjenigen, die die Akzeptanz heute positiv (Zustimmung bzw. volle Zustimmung: 111 Betreiber) beurteilen, gaben 76,6 % an, frühzeitig über das Projekt informiert zu haben und 69,4 % aktive Öffentlichkeitsarbeit zu betreiben. Bei denjenigen, die die gegenwärtige Akzeptanz als negativ (Ablehnung bzw. starke Ablehnung: 15 Betreiber) oder mit einem mittleren Wert (26 Betreiber) angaben, liegen die Werte dagegen bei 42,3 - 53,8 % (Abbildung 8).

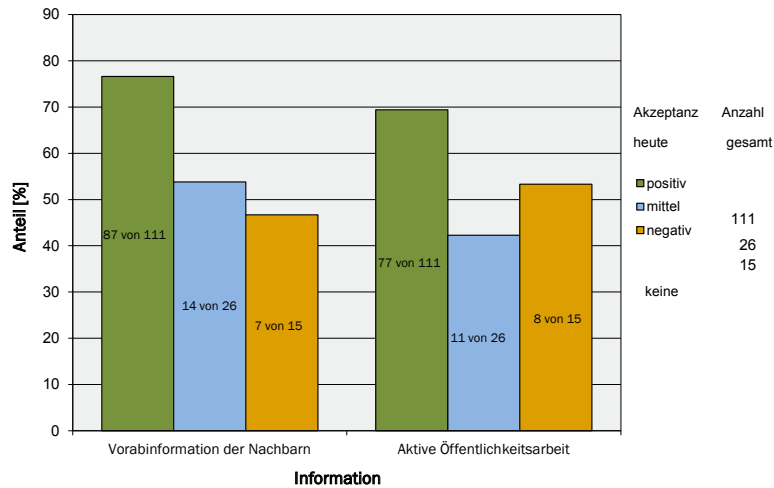


Abbildung 8: Frühzeitige Information der Nachbarn und aktive Öffentlichkeitsarbeit seitens des Betreibers in Bezug zur Bewertung der Akzeptanz heute

Die meisten der befragten Hersteller von Biogasanlagen bieten ihren Kunden Unterstützung bei Konflikten mit Anwohnern an. Bei Anlagenbesichtigungen oder Bürgerversammlungen wird der Anlagenhersteller zur Klärung von technischen Fragen hinzugerufen. Unter den befragten Unternehmen liegt der Anteil der aufgrund von Bürgerprotesten verzögerten Projekte bei 1 - 10 %. Unternehmen, welche z. B. als Projektentwickler bereits zu einem früheren Zeitpunkt in die Vorhabensplanung einbezogen sind, berichten jedoch von einem deutlich höheren Anteil an Biogasprojekten, welche aufgrund von Akzeptanzproblemen verzögert oder sogar verhindert werden (25 - 30 %).

Die in den Datenerhebungen gefundenen Perspektiven wurden durch Experteninterviews themenspezifisch vertieft und ergänzt. Hierbei wurden insgesamt zwölf verschiedene thematische Schwerpunkte beleuchtet (Tabelle 2).

Tabelle 2: Thematische Schwerpunkte der Experteninterviews

Interview	Schwerpunkt	Interview	Schwerpunkt
1	Ausgangslage und Imagefaktoren	7	Sicherheit von Biogasanlagen
2	Anlagenbetrieb und Öffentlichkeitsarbeit	8	Energiepolitik auf Kreiserebene
3	Projektentwicklung	9	Kommunalpolitische Perspektive
4	Biogasenerzeugung aus dem Blickwinkel der Landwirtschaft	10	Regionalplanung
5	Beteiligungsmöglichkeiten an Projekten aus dem Bereich der erneuerbaren Energien	11	Journalistische Beiträge zum Thema Biogastechnologie
6	Mediation im Umweltbereich	12	Vermittlung von Nachhaltigkeitsthemen

Implikationen für die Planungspraxis

Die Ergebnisse zeigen eine hohe allgemeine Akzeptanz von Biogasanlagen. Im spezifischen Anwendungsfall kommen Einflussfaktoren hinzu, welche sich regional und akteursabhängig unterscheiden können. Bezogen auf die lokale Ebene und einzelne Anlagenprojekte zeigen sich die Heterogenität der Einflussfaktoren und die Komplexität der Sachverhalte. Die jeweiligen Erfahrungen unterscheiden sich sowohl zwischen den Regionen als auch auf den verschiedenen Akteurebenen. Generell gilt, dass ein transparenter Planungsprozess eine wichtige Einflussgröße ist und dementsprechend mehr Augenmerk auf Information und Kommunikation gelegt werden müsste.

Aus den Projektergebnissen wurden technologische Maßnahmen (Tabelle 3) und Handlungsempfehlungen für Praxisakteure aus unterschiedlichen Bereichen (Tabelle 4) abgeleitet. Die Empfehlungen sollen zur Konfliktvermeidung beitragen und wenden sich an politische Entscheidungsträger, an die Berufsgenossenschaft, an die Regionalplanung sowie an Planer, Hersteller und Betreiber von Biogasanlagen. Aber auch die Bürger werden als Verantwortung tragende Energieverbraucher mit angesprochen.

Tabelle 3: Technologische Maßnahmen

Technische Auslegung	Wärmenutzung	Transporte	Gewässerschutz
Standortangepasste Anlagengrößen	Frühzeitige Berücksichtigung in der Planungsphase	Gute logistische Konzepte, z. B. Vermeidung von Leerfahrten	Nährstoffmanagement
	Nutzung vorrangig für unabhängig bestehende Wärmebedarfe		

Sicherheit	Geruch	Lärm	Substrate
Einhaltung der guten fachlichen Praxis: Schulung der Anlagenbetreiber	Abdeckung von Gärrestlagern und Fahrsilos	Angepasste Schallschutzkonzepte (z. B. in Bezug auf tiefrequenten Schall)	Ausschöpfen der Nutzungspotenziale von Gülle und Abfällen
Methanschlupf vermeiden	Substratannahme in geschlossenen Hallen bei Abfallanlagen		

Tabelle 4: Handlungsempfehlungen

Empfehlungen an ...	Themen
... politische Entscheidungsträger	Informationstransfer, Strukturen und Rahmenbedingungen (Datengrundlage, Netzwerke, standortangepasste Anlagenkonzepte), sicherheitstechnische Regelungen, Gülle- und Abfallnutzung
... die Berufsgenossenschaften	Vereinheitlichte Betreiberschulungen, Einforderung von Betreiberzertifikaten
... die Regionalplanung	Regionale Energiekonzepte, Raumbedeutsamkeit der BGAs, Öffentlichkeitsarbeit (regionale Wertschöpfung)
... Planer, Hersteller und Betreiber von Biogasanlagen	Öffentlichkeitsarbeit, Kommunikationsatmosphäre, Mediatoren, Standortfrage, Verkehrskonzept, verantwortungsvolle Betriebsführung, Beteiligungskonzepte
... die Anwohner von Biogasanlagen und die Bevölkerung allgemein	Informationsquellen nutzen, sich an Diskussion um die örtliche Energieversorgung beteiligen, aktiv werden

Die Projektergebnisse und daraus abgeleitete Empfehlungen wurden in einer Broschüre zusammengefasst, die kostenfrei zum Download zur Verfügung steht:

QR-Code scannen und Broschüre online abrufen



Literaturverzeichnis

Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. (FNR): Bestandsentwicklung Biogasanlagen, <http://mediathek.fnr.de/grafiken/daten-und-fakten/bioenergie/biogas/entwicklung-biogasanlagen.html> (Stand: 20.02.2013)



Grünlandenergie Havelland - Die energetische Nutzung von Gras und Schilf

Philipp Sauter¹, Yulia Lochmann², Sven Schicketanz³, Eric Billig¹, André Brosowski¹, Wolfgang Peters³

Vorhaben: Grünlandenergie Havelland - Entwicklung von übertragbaren Konzepten zur naturverträglichen energetischen Nutzung von Gras und Schilf am Beispiel der Region Havelland

FKZ-Nr.: O3KB035

Laufzeit: 01.11.2009 – 31.07.2012

Zuwendungssumme: 256.260 €

Koordination:

¹Deutsches Biomasseforschungszentrum gGmbH
Torgauer Straße 116, 04347 Leipzig
www.dbfz.de

Projektpartner:

²Leibniz-Institut für Agrartechnik Potsdam-Bornim e. V. (ATB)
Max-Eyth-Allee 100, 14469 Potsdam

Unterauftragnehmer:

³Bosch & Partner GmbH

Kontakt:

Dr. Torsten Schmidt-Baum
Telefon: +49 (0)341 2434 597
E-Mail: torsten.schmidt-baum@dbfz.de



**Philipp Sauter
(Projektleiter a. D.):**

Heute schon und vor allem mit zunehmender technischer Entwicklung kann Gras in Biogasanlagen eingesetzt werden und Anbau-biomasse je nach Region in großem Umfang ersetzen. Dies geht in vielen Fällen mit Naturschutzzieleinher und kann darüber hinaus auch dazu beitragen die gesellschaftliche Akzeptanz der Bioenergie zu verbessern.

Zusammenfassung

Viele Regionen Deutschlands verfügen über ein hohes Biomassepotenzial aus Gras und Schilf, das bisher ungenutzt ist. Gleichzeitig besteht auch in ländlichen Regionen ein Wärmebedarf, der durch Biogasanlagen gedeckt werden könnte. Ein Teil der Einsatzstoffe kann bereits in den vorhandenen Konversionsanlagen als Substrat neben weiteren üblichen Biogassubstraten eingesetzt werden. Je nach Substratqualität, verfügbaren Mengen, den Wärmebedarf sowie infrastrukturellen Voraussetzungen kann es auch interessant sein, neue Biogasanlagen zur Verwertung von Gras in Betrieb zu nehmen. Bei günstigen Voraussetzungen ist eine gute Wirtschaftlichkeit und im Vergleich zur Verwertung von klassischer Anbaubiomasse eine noch günstigere Treibhausgasbilanz zu erwarten.

Hintergrund und Zielstellung

Energieerzeugung aus Biomasse leistet einen zunehmenden Beitrag zur Energiebereitstellung in Deutschland. Zur Wärme- und Stromerzeugung wird dafür in Biogasanlagen vorwiegend Gülle und Maissilage eingesetzt. Während der steigende Anteil erneuerbarer Energieträger von vielen Seiten begrüßt wird, steht demgegenüber häufig die Kritik, dass die energetische Nutzung von Biomasse in Konkurrenz zur Nahrungsmittelerzeugung steht. So ist es aus ökologischer, wie auch aus der Perspektive sozialer Akzeptanz wünschenswert, alternative Konzepte zur Bioenergiebereitstellung zu untersuchen und hinsichtlich ihrer Praxistauglichkeit zu prüfen. Dabei rücken vor allem biogene Abfälle und Reststoffe verstärkt in den Fokus der Betrachtung. Hier knüpft das Projekt „Grünlandenergie Havelland“ an, welches die energetische Nutzung von bisher ungenutztem Landschaftspflegeheu und Schilf zum Inhalt hat.

Grünland wird in der klassischen Landwirtschaft vorwiegend für die Viehwirtschaft genutzt. Frisches Gras, Grassilage und Heu stellen wesentliche Bestandteile des Nutztierfutters in Deutschland dar. Durch die zunehmende Nutzung nährstoffreicherer Futterpflanzen wie beispielsweise Soja sowie durch den Rückgang der Rinderhaltung ist die Nutzung von Grünland aus landwirtschaftlicher Perspektive ungewiss. In dessen Folge wurden Grünlandflächen zu Ackerland umgebrochen, aufgeforstet oder schlicht vernachlässigt, wovon bestimmte Regionen wie das Havelland, der Schwarzwald oder der Bayerische Wald stark betroffen sind. Um aus ökologischen und landschaftsästhetischen Gründen die Grünlandflächen zu erhalten, wurden seitens der Politik Maßnahmen – wie ein partielles Umbruchverbot oder die Veranlassung von Direktzahlungen für Brachflächen – ergriffen. Hierfür müssen die Flächen regelmäßig gepflegt werden, was mindestens eine Mahd pro Jahr sowie teilweise auch die Entfernung des Grünschnitts von der Fläche voraussetzt. Dadurch soll das sukzessive Zuwachsen des Grünlandes durch Büsche und Bäume verhindert und typische Wiesenarten erhalten werden.

Ähnliche Materialien fallen auch bei den regelmäßig stattfindenden Pflege- und Unterhaltungsarbeiten der Gewässerkanäle an. Eine Nutzung des Grünschnitts aus der Gewässerpflege findet in Deutschland bisher nicht statt, er verbleibt häufig im Bereich der Gewässerränder oder muss gar entsorgt werden. Vor allem die Tatsache, dass eine weitere, konkurrierende Nutzung dieser Substrate nicht gegeben ist und diese Reststoffe oft in bereits konzentrierter Form vorliegen, macht sie wirtschaftlich interessant für eine energetische Verwertung.

Ziel des Projekts war die Entwicklung und anschließende Bewertung von Konzepten zur energetischen Nutzung des anfallenden Grünguts von extensiven Grünlandflächen, Gewässerrändern und Biotopen. Diese Nutzungskonzepte schließen unter Betrachtung der verfügbaren Technologien alle wesentlichen Schritte von der Rohstoffquelle bis zur energetischen Verwendung ein. Die Untersuchungen erfolgten anhand der Modellregion Havelland. In der Region bestehen hohe Überschüsse an Gras aus der extensiven Grünlandbewirtschaftung, der Gewässer- und Biotoppflege. Diese Region wurde stellvertretend für weitere grünland- oder gewässerreiche Regionen Deutschlands herangezogen. Die Bewertung der Nutzungskonzepte erfolgte anhand der Parameter Wirtschaftlichkeit, Treibhausgasemissionen und praktische Umsetzbarkeit.

Potenzialermittlung

Wichtige Grundlage von tragfähigen Konzepten zur energetischen Nutzung von überschüssigem Gras und Schilf sind möglichst detaillierte Kenntnisse über die Menge, die regionale Verteilung und die Qualität der verfügbaren Rohstoffe. Sowohl die Dimensionierung der Biogasanlagen als auch die Transportentfernung ist von den verfügbaren Biomassepotenzialen abhängig. Die Qualität des Substrats ist ein wesentlicher, limitierender Faktor für die Wirtschaftlichkeit des Biogasprozesses. Geeignete Methoden zur Erhebung energetisch nutzbarer Biomassepotenziale, die neben den Substratmengen auch die Qualität der Substrate und deren räumliche Verteilung ermitteln, sind daher ein Schlüssel zu erfolgreichen Nutzungskonzepten.

Die Analyse des Biomassepotenzials erfolgt auf der Grundlage geographischer und statistischer Daten wie z. B. aggregierte InVeKoS-Daten (2009). Zur Bestimmung der relevanten Parameter Menge, Qualität und räumliche Lage etc. werden verschiedene Einflussfaktoren ermittelt und mit Hilfe des GIS räumlich ausgewertet und abgebildet (Abbildung 1).

Der im Rahmen des Projekts entwickelte und erprobte Ansatz zur Potenzialermittlung umfasst zwei Stufen. Auf der ersten Stufe wird die Ausprägung der Parameter Biomasseertrag, räumliche Lage der Biomasse und Biomassequalität zur Bestimmung des theoretischen Potenzials abgeschätzt. Die Berechnung des technischen Potenzials, unter besonderer Berücksichtigung der für den Biogasprozess nötigen Biomassequalität, erfolgt auf der zweiten Stufe. Dort werden die Parameter Biomasseverluste und Nutzungskonkurrenzen ermittelt.

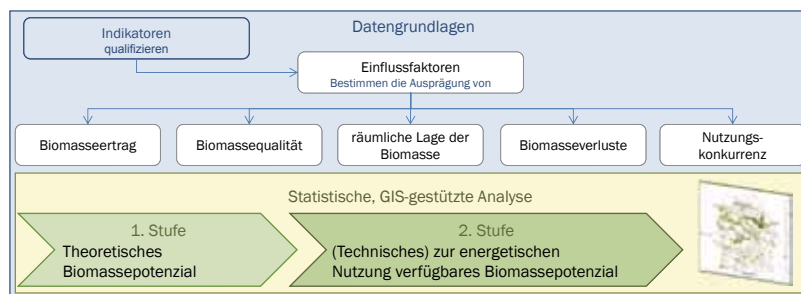


Abbildung 1: Schaubild der Analysestufen und Parameter der Biomassepotenziale

Die auf diese Weise ermittelten Biomassepotenziale können räumlich differenziert für das Untersuchungsgebiet ausgewertet werden. So können Gebiete mit besonders hohem und konzentriertem Aufkommen (Hotspots) identifiziert werden, welche sich für die Entwicklung von Konzepten zur energetischen Nutzung besonders anbieten.

Im Ergebnis der Potenzialanalyse im Untersuchungsgebiet wurde ein energetisch nutzbares Biomassepotenzial der betrachteten Biomassesortimente von jährlich 40.800 t TM berechnet. Davon sind rund 15.600 t TM/a besonders gut für die Verwertung in Biogasanlagen geeignet.

Wärmebedarfsermittlung

Die betrachteten Biomassesortimente Gras und Schilf sollen bei einer energetischen Verwendung vornehmlich für die Stromerzeugung in BHKWs eingesetzt werden. Um die dabei anfallende Wärme wirtschaftlich nutzen zu können, bedarf es geeigneter Wärmeabnehmer. Daher war es ein Ziel dieses Projekts, die potenziellen Wärmenutzer in der Untersuchungsregion zu identifizieren und regional zuzuordnen. Ein besonderer Fokus lag auf den potenziellen Wärmenutzern, bei denen die Abwärmenutzung von Biogasanlagen in Frage kommt. Potenzielle Wärmenutzer wurden über die Analyse von Statistiken (www.regionalstatistik.de) und der Verwendung branchenspezifischer, internetbasierter Suchmaschinen identifiziert. Die Quantifizierung des Wärmebedarfs erfolgte anhand von Berechnungen individuell für jeden potenziellen Wärmenutzer. Dafür wurden die jeweiligen Größenangaben mit den spezifischen Kennwerten zum Wärmeverbrauch aus der Literatur herangezogen (v. a. Schlomann 2004, RWI/forsa 2011, ages 2010). Zur Validierung der Berechnungsergebnisse erfolgte parallel auch eine Befragung der Betriebe und Einrichtungen zu ihrem Wärmebedarf sowie zu weiteren relevanten Parametern. Neben der Analyse der Wärmesenken wurde auch eine Analyse der bestehenden Biogasanlagen durchgeführt, um festzustellen, inwieweit derzeit verwendete Biomassesortimente durch Grüngut ersetzt werden können.

Im Ergebnis der Untersuchung zeigte sich, dass die Berechnung des Wärmebedarfs anhand spezifischer Kennwerte aus der Literatur für eine erste Einschätzung gut geeignet ist. Für eine detailliertere regionale Überprüfung empfiehlt sich jedoch eine Befragung der Wärmenutzer, um die Berechnungsergebnisse anhand von Literaturangaben zu präzisieren beziehungsweise zu vervollständigen. Erwartungsgemäß ist ein Großteil der Wärmenutzer vorwiegend in größeren Ballungsräumen wie beispielsweise in Brandenburg an der Havel, Rathenow oder Neuruppin zu finden (vgl. Abbildung 3). Aber auch in ländlich geprägten Gebieten befinden sich vielfach Wärmenutzer wie Wohngebäude, Gewerbebetriebe oder Landwirtschaftsbetriebe (Abbildung 3), die bei genauer Betrachtung potenzielle Wärmeabnehmer von Biogasanlagen darstellen. Insgesamt beläuft sich der Wärmebedarf im Untersuchungsgebiet auf ca. 3,5 (\pm 1,5) TWh/a. Dieser Bedarf verteilt sich zu rund 3,2 TWh/a auf Haushalte und zu rund 0,2 TWh/a auf öffentliche und gewerbliche Einrichtungen. Daraus wird ersichtlich, dass Wärme vor allem zur Raumbeheizung benötigt wird. Da sich eine ungleichmäßige Verteilung des Wärmebedarfs im Jahresverlauf negativ auf den wirtschaftlichen Betrieb einer Biomasseanlage auswirkt, könnte die Abwärme von Biogasanlagen in Kombination mit (Satelliten-) BHKWs vor allem den Grundbedarf der Wärmenutzung decken. Besonders in der Region Havelland können Biogasanlagen aufgrund der guten Er-

schließung einiger Dörfer und von Städten wie Neuruppin oder Nauen mit Nah- und Fernwärmenetzen in ein entsprechendes Wärmekonzept eingebunden werden. Zudem können Betriebe und Einrichtungen, die über einen hohen Wärmebedarf verfügen, direkt (ohne ein Wärmenetz) mit der Abwärme von Biogas-BHKWs versorgt werden.



Foto: siepmannH/pixelio.de

Einsatz von Gras in der Biogasproduktion

Die Nutzung von Gras in der Biogasanlage stellt einen wesentlichen energetischen Konversionspfad dar. Allerdings sind bei Gras und Schilf im Vergleich zu den sonst häufig verwendeten Substraten besondere Herausforderungen an die Biologie und insbesondere an die Technik der Vergärung gestellt (vgl. Tabelle 1).

Tabelle 1: Eigenschaften von Gras und ihre Auswirkungen auf den Biogaserzeugungsprozess

Einflussfaktoren	Bedeutung für den Biogaserzeugungsprozess	
Herkunft des Grasses	<ul style="list-style-type: none"> • Intensivgrünland • Extensiv bewirtschaftetes Grünland • Landschaftspflege • Naturschutzmaßnahmen 	<ul style="list-style-type: none"> • Je nach Art der Gräser können vergleichsweise höhere Ligninanteile bestehen, die den Substrataufschluss in der Biogasanlage erschweren. • Je nach Naturschutzkategorie gibt es Auflagen zum Schnittzeitpunkt, was sich wiederum auf die Qualität des Grasses auswirkt.
Ernte des Grasses	<ul style="list-style-type: none"> • Schnittzeitpunkt (Jahreszeit) • Schnitthäufigkeit • Schnitthöhe • Bergung (Sand- und Erdanhaftung) • Häcksellänge 	<ul style="list-style-type: none"> • Das früh gemähte Gras ist reich an Rohprotein, Rohfett und Zucker und wird daher für die Biogaserzeugung empfohlen. • Durch eine hohe Schnitthöhe kann der Anteil lignozelluloser Bestandteile, aber auch die Einmischung von Sand- oder Erdanteilen verringert werden. Sand- oder Erdanhaftungen können zu Sedimentation und somit Verringerung des Gärraumvolumens führen. • Je kürzer die Häcksellänge, im günstigsten Fall < 1 cm, umso besser ist das Gras zur Silierung und zur anaeroben Vergärung geeignet.

Grundsätzlich ist Gras gut anaerob vergärbar und kann hohe, an Mais heranreichende Biogasausbeuten erbringen (Mähnert 2002). Voraussetzung hierfür ist eine ausreichende Zerkleinerung beziehungsweise Hydrolyse des Materials vor der eigentlichen Biogasbildung. Ziel dieser Vorbehandlung ist zum einen eine Vergrößerung der Oberfläche für den Angriff der Bakterien und zum anderen eine Minimierung der Tendenz zur Verklumpung des Grasses, die Störungen im Fermenter oder bei der Materialzuführung verursachen kann. Dazu stellen einige Landwirte beim Häckseln des Grasses für die Biogasgewinnung den Feldhäcksler auf eine sehr niedrige Schnittgröße ein. Die weitere Zerkleinerung der Grassilage erfolgt meist bei der Zuführung in die Fermenter. Entsprechende Zerkleinerer werden vor



Abbildung 2: Nass-Zerkleinerer (hier RotaCut von Vogelsang): Schneidmesser und Schneidsieb (links) und das in Pump- und Leitungssystem eingebaute Gerät (rechts), Quelle: ATB

den Pumpen in das Leitungssystem eingebaut (Abbildung 2). Fremdkörper wie Steine oder Metallteile werden vorher abgeschieden und sammeln sich in einem unterhalb platzierten Steinfang. Dadurch wird ein reibungsloser Betrieb der Pumpen sowie eine bessere Durchmischung der Substrate im Fermenter gewährleistet.

In einem weiteren Schritt wird die Grassilage mittels einer Hydrolyse aufbereitet. Hierzu ist eine Reihe von physikalischen, biologischen und chemischen Verfahren einsetzbar.

Zu den physikalischen Vorbehandlungen gehören rein mechanische Verfahren, wie beispielsweise die Zerkleinerung mit Hammermühle, Prallreaktor, Extruder oder Thermodruckhydrolyse. Die biologischen Verfahren basieren auf einer Beschleunigung der Hydrolyse mittels der Zugabe von hydrolytischen Enzymen und die vorgeschaltete externe Hydrolyse mit verstärkter Präsenz der hydrolytischen Bakterien. Aus vielen Praxisanwendungen mit Enzymen und externen Hydrolysen werden dabei deutliche Ausbeutesteigerungen berichtet (Quiñones 2009). Chemische Verfahren werden nur vereinzelt eingesetzt.

Da Gras stark abrasive Eigenschaften und einen hohen Volumenbedarf aufweist, sollten bei höherem Grasanteil zusätzlich robuste und verschleißfeste Eintragungssysteme und Förderschnecken mit großem Durchmessers eingeplant werden. Auch die Überlaufrohre zwischen den Gär- und Lagerbehältern sollten etwas größer dimensioniert werden, als es bei Gülle basierten Biogasanlagen üblich ist. Das Mischen des Materials im Fermenter wird durch den hohen Fasergehalt erschwert. Daher erweisen sich langsam laufende, großflügelige Rührwerke als vorteilhaft. Insgesamt bedarf es mehrerer technischer Erweiterungen für die Nutzung von Gras und Schilf. Dafür existieren bereits marktreife Ansätze, welche die vorhandenen technischen Probleme hinreichend verringern. Damit verbunden sind jedoch ein erhöhter Bedarf an Investitionsmitteln und Prozessenergie.

Bei der Umstellung einer Biogasanlage auf einen verstärkten Einsatz von faserreichen Grünschnitt aus extensiven Nutzungen muss beachtet werden, dass bei derzeitiger Aufbereitungstechnik die Gasausbeute gegenüber Maissilage deutlich geringer ist. Daher müssen höhere Mengen an Grünschnitt in die Biogasanlage eingebracht werden, um gleich hohe Strommengen zu produzieren. Für Gras wird eine Gasausbeute von durchschnittlich 150 m³ i.N./t FM und im Vergleich dazu für Mais von 173 m³ i.N./t FM angenommen (KTBL 2010a). Damit einhergehend ist auch ein höherer Raumbedarf in Silo und Fermenter. Das dafür erforderliche Mehrvolumen des Fermenters kann allerdings bei einer vorgeschalteten Hydrolyse eingespart werden, da diese die Abbauprozesse beschleunigt und die Verweilzeit des Substrates im Fermenter verringert.

Nutzungskonzepte für die energetische Verwendung halmgutartiger Biomasse in Biogasanlagen

Grundsätzlich ergeben sich zwei verschiedene Ansätze, das Substrat im Biogasprozess zu nutzen. Entweder es werden für die Substrate Gras und Schilf extra dafür ausgelegte Biogasanlagen gebaut, die dann auch ausschließlich Gras und Schilf einsetzen oder die Substrate werden als Co-Substrat in bestehenden Biogasanlagen eingesetzt. Entsprechend der beiden unterschiedlichen Herangehensweisen wurden die nachfolgenden zwei Nutzungskonzepte entwickelt.

- **Nutzungskonzept I:** Neubau einer Biogasanlage mit einer elektrischen Leistung von 300 kW oder 500 kW, speziell für die ausschließliche Nutzung von Grassilage. Vergütung der Stromerzeugung erfolgt nach EEG 2012. Die erzeugte Wärme wird über ein Nahwärmenetz an eine nahe gelegene Siedlung vermarktet.
- **Nutzungskonzept II:** In bestehende Biogasanlagen wird Maissilage durch Grassilage substituiert, wobei je nach Anteil der Grassilage technische Erweiterungen vorgenommen werden. Für die Vergütung der Stromerzeugung wird vom EEG 2009 ausgegangen. Eine Wärmenutzung wird nicht betrachtet.

Die Anlagengrößen von 500 kW_{el} im Nutzungskonzept I ist die mittlere und gleichzeitig die am meisten verbreitete im Havelland. Vorteilhaft bei dieser Größe sind die geringeren spezifischen Investitionskosten im Vergleich zu kleineren Anlagen und eine höhere Vergütung durch das EEG als größere Anlagen. Die zweite gewählte Anlagengröße von 300 kW_{el} hat den Vorteil des deutlich geringeren Substratbedarfs, was sie für Gegenden mit wenig Grünschnittüberschuss interessant macht.

Wesentlich für die wirtschaftliche und ökologische Bewertung von Biogasanlage ist der Standort. Im Optimalfall ist in direkter Nähe zur Biogasanlage ein hohes Vorkommen an Substraten zu verzeichnen, die den Qualitätsanforderungen des Biogasprozesses genügen. Des Weiteren sollten in unmittelbarer Umgebung potenzielle Wärmenutzer vorhanden sein, um die erzeugte Wärme sinnvoll verwerten zu können. Dazu wurden anhand der Ergebnisse von Potenzial- und Wärmenutzungsanalysen im Untersuchungsgebiet entsprechend fünf mögliche Standorte identifiziert: Kremmen, Neuruppin, Fehrbellin, Friesack und Rathenow. Mit Hilfe eines Geoinformationssystems (GIS) wurden für die energetische Nutzung verfügbaren Grünschnittmengen in räumlicher Nähe der jeweiligen Standorte eingeschätzt und mittlere Transportentfernungen berechnet.

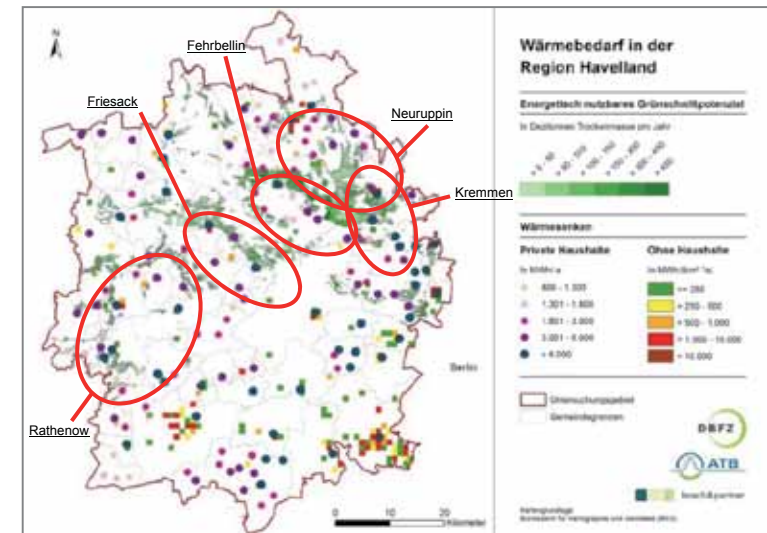


Abbildung 3: Potenzielle Standorte für neue dezentrale Biogasanlagen (Nutzungskonzept I)

Ökonomische Bewertung

Die Berechnung der Bereitstellungskosten erfolgte anhand einer Simulation der Verfahrensschritte deren Kosten auf KTBL-Daten (KTBL 2010b) beruhen. Die gesamten Bereitstellungskosten des Grünschnittes belaufen sich danach je nach Transportentfernung auf 37 bis 53 €/t FM. Maßgeblich für die Kosten der Substratbereitstellung ist auch die dabei anfallende Flächenprämie. Fachleute rechnen infolge der Reformierung der Gemeinsamen Agrarpolitik der EU in 2013 mit einer Flächenprämie in Höhe von 200 bis 240 €/ha (HMU-ELV 2009). Wird auf den betrachteten Grünlandflächen einer von zwei Schnitten für die Biogasproduktion verwendet, können 100 €/ha Flächenprämie für die Substratbereitstellung zur Biogasproduktion angerechnet werden. Dadurch reduzieren sich die Bereitstellungskosten deutlich auf 16 bis 26 €/t FM.

Eine Übersicht zu den weiteren Kosten und Erlösen ist in folgender Abbildung 4 gegeben. Danach bestehen im Vergleich zu üblichen Biogasanlagen, die beispielsweise überwiegend Maissilage einsetzen, höhere Investitionskosten aufgrund zusätzlicher Bauteile für die vorgeschaltete Hydrolyse. Die Erlöse für das Nutzungskonzept I begründen sich zum einen aus der Stromeinspeisung, die nach EEG 2012 entsprechend der Einsatzstoffvergütungskategorie H II (BiomasseV 2012) vergütet wird und den Wärmeverkauf über ein Nahwärmenetz an eine nahegelegene Siedlung mit 6 ct/kWh.

Für den wirtschaftlich vorteilhaftesten Standort Fehrbellin ergibt sich entsprechend Abbildung 4 ein durchschnittlicher jährlicher Annuitätengewinn von 44.000 €. Die Stromgestehungskosten (VDI 2067) belaufen sich bei diesen Nutzungskonzept unter Einbezug der

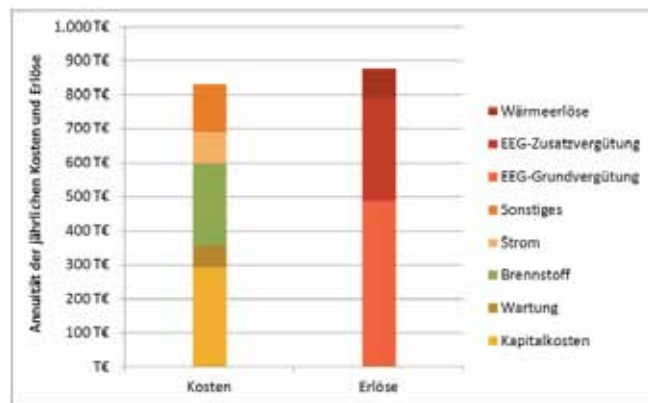


Abbildung 4: Kosten und Erlöse einer 500 kW_{el}-Biogasanlage am Standort Fehrbellin

Wärmeerlöse und Flächenprämien auf 19,8 ct/kWh bei der 500 kW_{el}-Biogasanlage beziehungsweise 20,19 ct/kWh bei der 300 kW_{el}-Biogasanlage.

Bei dem Nutzungskonzept II – der Umrüstung von bestehenden Biogasanlagen für die Nutzung von höheren Grasanteilen – werden die Grassilagekosteneinschließlich eventueller Investitionskosten für zusätzliche Aufbereitungstechnologien, alternativen Maissilagekosten gegenübergestellt (Abbildung 5).

Die Beimischung von kleineren Grasanteilen ist dabei ohne zusätzliche Technologien möglich. Bei einer Substitution von 25 % oder gar 50 % der Maissilage wird der Einsatz einer vorgeschalteten Hydrolyse oder anderen Aufbereitungsverfahren meist notwendig, weshalb

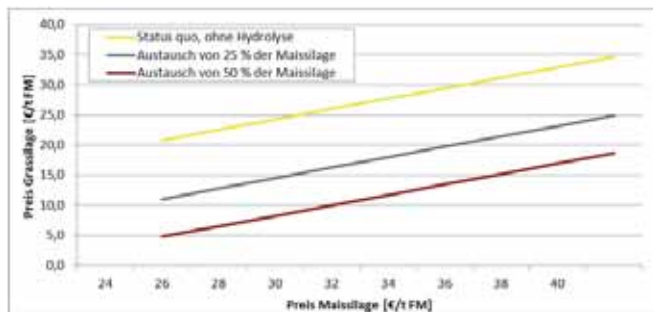


Abbildung 5: Maximale Zahlungsbereitschaft für Grassilage in Abhängigkeit vom Preis für Maissilage von einer bestehenden Biogasanlage

zusätzliche Investitionskosten für die Nutzung von Gras erforderlich werden. In Abbildung 5 wird deutlich, dass die Umrüstung einer Biogasanlage gerade bei steigenden Preisen für Maissilage rentabel sein kann. Bei derzeitigen Maissilagepreisen von rund 30 €/t FM lohnt

sich die teilweise Substitution mit Gras von extensiven Flächen nur für den Fall, dass die Beschaffungskosten von Gras unter 26 €/t FM liegen. Sollten die ursprünglichen Substrate wie Mais knapp werden beziehungsweise deren Preis steigen oder die Flächenprämien wie erwartet eingeführt werden, dann kann Gras von extensiven Flächen aus betriebswirtschaftlichen Gründen eine gute Option sein.

Bewertung anhand der Treibhausgasemissionen

Die Berechnung der THG-Emissionen für das Nutzungskonzept I erfolgt entsprechend der IPCC-Richtlinien. Für weitere Annahmen wurde das im Förderprogramm „Energetische Biomassenutzung“ zusammengestellte Methodenhandbuch (Thrän/Pfeiffer 2012) herangezogen.

Um die berechneten Emissionen auf die Strom- und Wärmeerzeugung aufzuteilen, wurde eine vereinfachte Methode der Energieallokation angewendet (Thrän et al. 2011). Bei dieser Methode werden die gesamten Emissionen zwischen allen Endprodukten aufgeteilt. Elektrische Arbeit und Nutzwärme werden dabei vereinfachend als gleichwertig betrachtet. Das Treibhausgasemissionsminderungspotenzial durch Biogasstrom liegt zwischen 78 % und 83 % im Vergleich zu Strom aus ausschließlich fossilen Energieträgern (vgl. Abbildung 6). Bei der Nutzwärmeerzeugung besteht eine 48 %- bis 60 %-ige Treibhausgasemissionssparung gegenüber fossilen Brennstoffen.

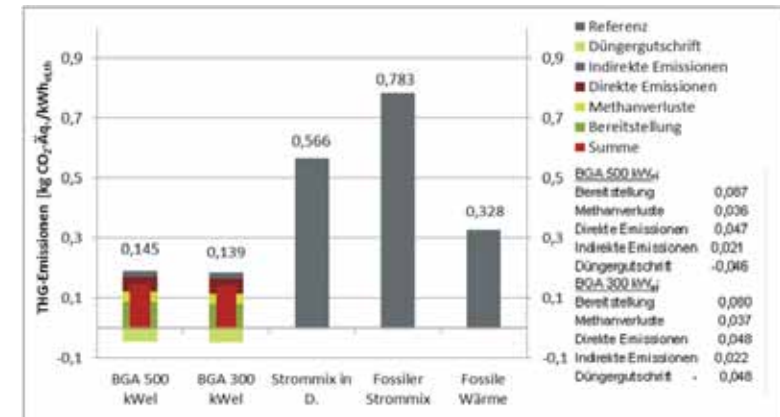


Abbildung 6: Durchschnittliche THG-Emissionen aus der Vor-Ort-Verstromung von Biogas nach der energetischen Allokationsmethode von Nutzungskonzept I an den Standorten Fehrbellin, Friesack, Kremmen, Neuruppin und Rathenow

Die Treibhausgasemissionen bei Nutzungskonzept II basieren weitestgehend den Berechnungen von Nutzungskonzept I. Durch die ausschließliche Betrachtung von Strom und somit ohne die Verwendung der energetischen Allokationsmethode fallen die THG-Emissionen für die reine Stromerzeugung aus Biogas um ca. 40 % höher aus. Ein Durchschnittswert aus allen betrachteten Standorten und Anlagengrößen liegt bei 0,204 kg CO_{2,Äq.}/kWh_{el}. Dem gegenüber stehen die THG-Emissionen für Strom aus Maissilage (Landbaugebiet II)

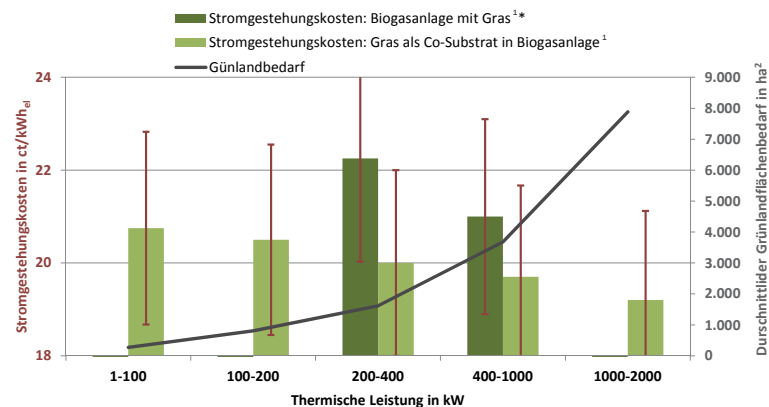
* In Nutzungskonzept II wurde die Wärmenutzung nicht betrachtet.

mit $0,346 \text{ kg CO}_{2\text{-Äq.}}/\text{kWh}_{\text{el}}$. Das bedeutet, dass bei jeder aus Gras anstatt Mais erzeugten Kilowattstunde $0,142 \text{ kg CO}_{2\text{-Äq.}}/\text{kWh}_{\text{el}}$ eingespart werden können.

Ausblick zur praktischen Anwendbarkeit

Die Erarbeitung eines passenden Nutzungskonzeptes muss im Hinblick auf die konkreten Bedingungen vor Ort erfolgen, weshalb nur selten pauschalisierte Standardlösungen möglich sind. Die wesentlichen Faktoren, nach denen sich die Auswahl geeigneter Konzepte richtet, sind die Substratverfügbarkeit und die Verwertung der Wärme in der Anlagenumgebung sowie die technische Reife der angewandten Technologien.

Nach dem derzeitigen **technischem Stand** ist die Nutzung von Gras und Schilf zur Energieerzeugung in Biogasanlagen möglich, wobei Einschränkungen bei Substraten mit hohem Ligningehalt wie spät im Jahr gemähtes Gras oder Schilf bestehen. Es gibt bereits eine Vielzahl von guten Praxiserfahrungen für die Nutzung von Gras als Co-Substrat in Nassfermentationsanlagen (Sauter et al. 2013). Für den ausschließlichen Einsatz von Gras zur Biogaserzeugung wurden bisher jedoch nur wenige praktische Erfahrungen gesammelt. Für diese Biogasanlagentypen besteht hinsichtlich der effizienten Substratausnutzung noch zusätzlicher Optimierungsbedarf. Hier wird seitens mehrerer Biogasanlagenhersteller intensiv an der effizienteren Nutzbarmachung des Substrats Gras gearbeitet (Carius 2010). Hinsichtlich der **Wärmenutzung** sollte gewährleistet sein, dass über die Dauer der Anlagenlaufzeit eine ausreichend hohe Auslastung der Anlage besteht, da Biogasanlagen im Jahres- und Tagesverlauf nahezu konstant neben Strom auch Wärme erzeugen. Sehr gut geeignete Einsatzgebiete sind beispielsweise die Brauchwasserversorgung von Haushal-



* THG-Minderungspotenzial gegenüber Stormerzeugung aus fossilen Energieträgern: rund 75 %

¹ Zugrunde gelegte Wärmeerlöse sind $6 \text{ ct/kWh}_{\text{th}}$

² Berechnung des Flächenbedarfs für BGA auf 100 % Gras-Basis anhand folgender Angaben: Nutzungsgrad thermisch 37 %, 7.500 jährliche Vollbenutzungsstunden, Heizwert von Methan 10 kWh/m^3 , Methangehalt im Biogas 52 %, Biogasausbeute von Gras $480 \text{ m}^3/\text{t TM}$, Grünlandertrag $1,9 \text{ t TM/a}$ bei einem Schnitt, 30 % Ernte- und Lagerungsverlust; bei der Nutzung von Gras als Co-Substrat besteht nur ein entsprechend anteiliger Grünlandflächenbedarf

Abbildung 7: Schematische Darstellung zur Anwendung der Nutzungskonzepte in Abhängigkeit vom Wärmebedarf potenzieller Wärmenutzer, von den Wärme- beziehungsweise Stromgestehungskosten sowie von der verfügbaren Grünlandfläche

ten, Wärmenutzung für die Kälteerzeugung von Kühlhäusern oder die ganzjährige Nutzung in Trocknungsanlagen.

Bei der Planung und Umsetzung muss zunächst darauf geachtet werden, dass in Abhängigkeit der erforderlichen thermischen Leistung zur Deckung des Wärmebedarfs potenzieller Nutzer auch der entsprechende Substratbedarf gedeckt werden kann. Dieser ist in Abbildung 7 als **Flächenbedarf** angegeben. Wobei neben den quantitativen Voraussetzungen auch Qualitätsbedingungen bestehen. Für Biogasanlagen sollte vorwiegend ligninarmes Gras eingesetzt werden. Eine genaue Abstimmung muss im Einzelfall in Abhängigkeit von der verwendeten Technologie zur Biogaserzeugung erfolgen. Generell vorteilhaft bei der Einsatzstoffbeschaffung sind die derzeit begrenzten alternativen Verwendungsmöglichkeiten von Gras und anderen halmgutartigen Biomassen von extensiv bewirtschafteten Grünland sowie aus der Gewässer- und Biotoppflege. Da die Nutzung des Grünguts häufig mit Naturschutzzielen einhergeht, ist von einer hohen Akzeptanz seitens der Bevölkerung auszugehen. Die Biogaskonzepte lassen sich gut in die landwirtschaftlichen Betriebsabläufe integrieren, da es keiner größeren zusätzlichen Infrastruktur zur Brennstoffaufbereitung bedarf.

Literaturverzeichnis

- (ages 2010) Gesellschaft für Energieplanung und Systemanalyse m.b.H. (ages): Verbrauchskennwerte 2005, Energie- und Wasserverbrauchskennwerte der Bundesrepublik Deutschland; Münster, 2010
- (Carius 2010) Carius, W.: Neue Projektentwicklungen auf dem BUND Hof Wendbüdel; Fachtagung Bioenergie aus der Landschaftspflege am 09.-10. Februar 2010, Berlin.
- (HMUELV 2009) Hessischen Ministerium für Umwelt, Energie, Landwirtschaft und Verbraucherschutz: Hessisches Integriertes Agrarumweltprogramm; StAnz 51/2009, 3040, 2009.
- (InVeKoS 2009) Integriertes Verwaltungs- und Kontrollsystem; ausgewählte Landkreise Brandenburgs, LELF; 2009.
- (KTBL 2010a) Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft (Hrsg.): Gasausbeute in landwirtschaftlichen Biogasanlagen; KTBL, Darmstadt, 2010, 2. Aufl. ISBN: 978-3-941583-42-9
- (KTBL 2010b) Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft (KTBL), (Hrsg.): Betriebsplanung Landwirtschaft 2010/11; KTBL, Darmstadt, 2010, 22. Aufl. – ISBN 978-3-941583-38-2

- (Mähnert et al. 2002) Mähnert, P.; Heiermann, M.; Plöchl, M.; Schelle, H.; Linke, B.: Verwertungsalternativen für Grünlandbestände - Futtergräser als Kosubstrat für die Biomethanisierung. In: *Landtechnik* 58 (5), 2002, S. 260-261.
- (Quiñones et al. 2009) Quiñones, T. S.; Plöchl, M.; Budde, J.; Heiermann, M.: Do hydrolytic enzymes enhance methane formation of agricultural feedstock? Internationale Wissenschaftstagung Biogas Science. (Schriftenreihe der Bayerischen Landesanstalt für Landwirtschaft 1), Freising 2009, S. 137-150.
- (RWI/forsa 2011) RWI/forsa: Erhebung des Energieverbrauchs der privaten Haushalte für die Jahre 2006-2008; Köln, 2011.
- (Sauter et al. 2013) Sauter, P.; Billig, E.; Döhling, F.; Pilz, A.; Brosowski, A.; Kirsten, C.; Bosch, J.; Büchner, D.; Weller, N.; Witt, J.; Seidenberger, T.; Schicketanz, S.; Peters, W.; Lochmann, Y.; Prochnow, A.: Grünlandenergie Havelland - Entwicklung von übertragbaren Konzepten zur naturverträglichen energetischen Nutzung von Gras und Schilf am Beispiel der Region Havelland; Endbericht, Deutsches Biomasseforschungszentrum (DBFZ), Leipzig, 2013.
- (Schlomann et al. 2004) Schlomann, B.; Gruber, E.; Eichhammer, W.; King, N.; Diekmann, J.; Ziesing, H.-J.; Rieke, H.; Wittke, F.; Herzog, T.; Barbosa, M.: Energieverbrauch der privaten Haushalte und des Sektors Gewerbe, Handel, Dienstleistung (GHD); Karlsruhe, Berlin, Nürnberg, München, Leipzig, 2004.
- (Thrän et al. 2011) Thrän, D.; Majer, S.; Gawor, M.; Bunzel, K.; Daniel-Gromke, J.; Bauermann, K.; Eickholt, V.; Schultz, R.; Hoch, J.; Person, H. (2011): Optimierung der marktnahen Förderung von Biogas/Biomethan unter Berücksichtigung der Umwelt- und Klimabilanz, Wirtschaftlichkeit und Verfügbarkeit. Studie im Auftrag vom Biogasrat e.V., Berlin, 2011.
- (Thrän/Pfeiffer 2011) Thrän, D.; Pfeiffer, D. (Hrsg.): Methodenhandbuch – Stoffstromorientierte Bilanzierung der Klimagaseffekte. Im Rahmen des BMU-Förderprogramms „Energetische Biomassenutzung“. (Schriftenreihe des BMU-Förderprogramms „Energetische Biomassenutzung“, Band 04), Leipzig 2011.
- (VDI 2067) Verein Deutscher Ingenieure (Hrsg.): VDI 2067 Blatt 40 Wirtschaftlichkeit gebäudetechnischer Anlagen, Grundlagen und Kostenberechnung; VDI, Düsseldorf, 2012.
- (www.regionalstatistik.de) Statistische Ämter des Bundes und der Länder: Regionaldatenbank Deutschland. URL: <https://www.regionalstatistik.de> (Stand: 12.5.2010).



Foto: A. Gröber, DBFZ

Bestimmung der Biogaserträge für Presswasser aus der mechanischen Entwässerung von Läuterbottichtreber

Andreas Weger¹, Samir Binder², Winfried Ruß¹, Rolf Jung², Matthias Franke², Andreas Hornung², Wolfgang Mayer¹

Vorhaben: Optimierte energetische Nutzung eines nassen Abfalls (Biertreber) durch Kombination biologischer, mechanischer und thermischer Verfahren

FKZ-Nr.: O3KB038

Laufzeit: 01.10.2009 – 30.09.2011

Zuwendungssumme: 296.000 €

Koordination:

¹ Technische Universität München
Lehrstuhl für Rohstoff- und Energietechnologie
Prof. Wolfgang Mayer
Petersgasse 18, 94315 Straubing
www.rohstofftechnologie.de

Endbericht:

<http://edok01.tib.uni-hannover.de/edoks/e01fb12/727514156.pdf>

Projektpartner:

² Fraunhofer UMSICHT – Institutsteil
Sulzbach-Rosenberg
Harburg-Freudenberger Maschinenbau GmbH
GEA Brewery Systems GmbH



Andreas Weger (Projektleiter):

Ansätze zur Vergärung von Biertrebern gibt es bereits einige, durch eine vorgeschaltete mechanische Entwässerung wird ein alternatives Konzept eingeführt. Kombiniert man die Vergärung des erzeugten Presswassers noch mit Brauereiabwässern, ist nicht nur ein energetischer sondern auch ökonomischer Mehrwert durch Kosteneinsparungen bei der Abwasserreinigung erzielbar.

Kontakt:

Andreas Weger

Telefon: +49 (0) 9661 908 434

E-Mail: andreas.weger@umsicht.fraunhofer.de

Zusammenfassung

Die traditionelle Verwertung von Biertrebern als Futtermittel gestaltet sich zunehmend schwieriger, ein wirtschaftlich tragfähiges Konzept zur energetischen Nutzung existiert bis heute nicht. In Biogasanlagen stört der Faseranteil, bei der Verbrennung stören die Proteinfraktion und der hohe Wasseranteil. Eine Trocknung ist aus energetischer Sicht nicht sinnvoll. Im Projekt wurde daher eine mechanische Entwässerung (Schneckenpresse) vorgeschaltet, um Biertreber zu entwässern und in eine Fest- und Flüssigphase zu fraktionieren. Der biologisch gut verwertbare Protein- und Fettanteil wird so in die Flüssigphase transferiert. Zur Verbesserung der Entwässerungsleistung wurde zusätzlich auch der Einsatz verschiedener Detergenzien (Entwässerungshilfsmittel) wie Tenside oder Enzyme getestet. In einer Serie von Batch-Gärtests wurde dann der erreichbare Biogasertrag bestimmt und die Vergärbarkeit der einzelnen Presswasserproben untersucht. Insgesamt konnte gezeigt werden, dass das erzeugte Presswasser mit und ohne Zugabe von Detergenzien gut vergärbbar ist. Mit den Presswasserproben wurden Biogaserträge von bis zu 725 lN/kg_{oTS} erzielt und damit deutlich höhere Erträge gegenüber nicht entwässerten Biertrebern erreicht.

Hintergrund

Im Forschungsprojekt „Optimierte energetische Nutzung eines nassen Abfalls (Biertreber) durch die Kombination biologischer, mechanischer und thermischer Verfahren“ (FKZ O3KB038) soll ein innovatives und wirtschaftlich tragfähiges Konzept entwickelt werden, um nasse biogene Reststoffe aus der Lebensmittelindustrie energetisch zu nutzen.

Generell ist die Entsorgung oder Verwertung dieser Reststoffe aufgrund der biologischen Stabilität, des möglichen Wachstums pathogener Keime, des hohen Wassergehalts, der schnellen Autoxidation wenn Fette enthalten sind und biochemischen Veränderungen durch Enzyme und Autolyse schwierig (Russ & Meyer-Pittroff 2004). Reststoffe aus der Lebensmittelindustrie sind typischer Weise durch chemisch-physikalische Separation oder mechanische Abtrennung der wertbestimmenden Bestandteile entstanden.

Biertreber ist ein typischer Lebensmittelabfall und damit gut geeignet für eine exemplarische Untersuchung. Treber fallen bei der Bierherstellung an, dabei wird Malz (gekeimtes und gedarrtes Getreide) im Sudhaus mit Wasser extrahiert. Ziel der Extraktion ist es, aus dem Malz die Stärke, die Zucker und bestimmte Eiweißfraktionen unter Zuhilfenahme der malzeigenen Enzyme in Wasser zu lösen. Der Feststoffrest (Treber) wird im Anschluss mechanisch abgetrennt, weist jedoch immer noch einen Wassergehalt von ca. 80 % auf. Deutschlandweit fallen jährlich etwa zwei Millionen Tonnen (Frischmasse) Biertreber an, die traditionell fast ausschließlich als Futtermittel genutzt werden.

Allerdings gestaltet sich die traditionelle Verwertung zunehmend schwieriger, da es zu Umstrukturierungen in der Landwirtschaft sowie zu Unternehmenskonzentrationen in der Lebensmittelindustrie und damit verbunden zu einem Anstieg der Abfallmassen kommt.

Aufgrund des hohen organischen Anteils sind Biertreber aber auch für eine energetische Verwertung äußerst interessant. Vor allem die Brauereien selbst haben ein großes Interesse daran, da Treber für eine direkte Nutzung als quasi kostenloser Energieträger zur Verfügung steht.

Durch den Einsatz regenerativer Energieträger zur Wärmeversorgung von Brauereien könnten fossile Energieträger eingespart und CO₂-Emissionen vermieden werden. Aus diesem Grund wurden innerhalb der letzten 20 bis 30 Jahre immer wieder Konzepte zur energetischen Nutzung von Trebern untersucht. Trotzdem gibt es bis heute immer noch kein schlüssiges Konzept zu deren energetischer Nutzung.

Zielstellung

Bisherige Konzepte zur energetischen Treberverwertung konzentrierten sich entweder auf die Vergärung zu Biogas oder die direkte thermische Verwertung als Brennstoff (Meyer-Pittroff 1988; Herfellner et al. 2006; Becher, Wüst 2007; Voigt et al. 2009; Pesta et al. 2010). Bei der Vergärung stört der hohe Anteil an Cellulose, Hemicellulose und Lignin, die anaerob nur langsam bzw. nicht abgebaut werden, was hohe Verweilzeiten im Gärprozess bedingt. Bei der thermischen Verwertung erweist sich der hohe Wasser- und Proteingehalt als problematisch. Eine Trocknung von Biertrebern ist aus energetischer Sicht nicht sinnvoll (Kepplinger 2008). Die Aufbereitung durch mechanische Entwässerung mittels Siebbandpresse wurde bereits untersucht. Allerdings konnte der geforderte Wassergehalt von 58 % zur späteren thermischen Nutzung der entwässerten Treber nicht kontinuierlich gewährleistet werden (Herrfeller et al. 2006).

Im aktuellen Forschungsvorhaben wurde daher eine Seiherschneckenpresse zur mechanischen Entwässerung genutzt, um die Biertreber auf TS-Gehalte $\geq 40\%$ zu entwässern und so eine Fraktionierung in eine Fest- und Flüssigphase zu erreichen. Beide Phasen könnten dann durch die Kombination biologischer, mechanischer und thermischer Verfahren einer optimalen energetischen Nutzung zugeführt werden (Abbildung 1).

In die Flüssigphase (Presswasser) werden biologisch gut abbaubare Bestandteile wie Fette und Proteine transferiert. Das Presswasser eignet sich gut zur Vergärung. In der Festphase (Pressrückstand) verbleiben hauptsächlich Cellulose, Hemicellulose und Lignin, der Press-

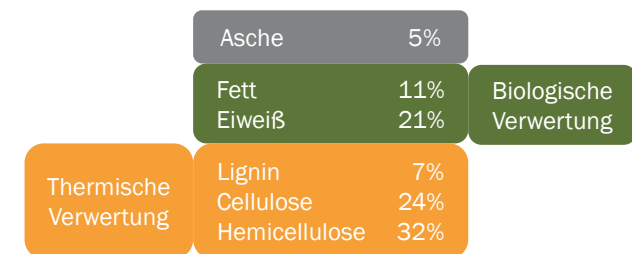


Abbildung 1: Optimale energetische Verwertung der biochemischen Bestandteile von Biertrebern in % TS (verändert nach Pesta 2008)

rückstand könnte bei einem geeigneten Wassergehalt damit auch ohne weitere Trocknung direkt thermisch verwertet werden. Ziel war die mechanische Entwässerung von Biertrebern auf TS-Gehalte $\geq 40\%$ ohne und mit Zugabe von Detergenzien wie Tensiden, Netzmitteln, Säuren, Laugen oder Enzymen. Weitere zentrale Aspekte waren die Verwertung des Presswassers und des Pressrückstands.

Im Folgenden wird speziell auf die Vergärungsversuche mit Läuterbottichtrebern (LBT) eingegangen.

Material und Methoden

Trockensubstanz und Glühverlust

Die Trockensubstanz (TS) wurde nach DIN 38414 (S2) ermittelt. Dabei wird die Probe bei 105 °C bis zur Gewichtskonstanz getrocknet und dann der Gewichtsverlust bestimmt. Der Glühverlust (GV) ergibt sich durch Glühen der getrockneten Probe bei 550 °C gemäß DIN 38414 (S3). Zur Berechnung der Trockensubstanz und des Glühverlusts wurden For-

$$TS = \frac{m_{\text{Schale nach Trocknen}} - m_{\text{Schale}}}{m_{\text{Schale+Probe}} - m_{\text{Schale}}} \cdot 100\% \quad (1)$$

$$GV = \frac{m_{\text{Schale nach Trocknen}} - m_{\text{Schale nach Glühen}}}{m_{\text{Schale+Probe}} - m_{\text{Schale}}} \cdot 100\% \quad (2)$$

mel (1) und (2) benutzt.

Tabelle 1: Parameter zur Bestimmung der Trockensubstanz und des Glühverlusts, DIN 38414 (S2), DIN 38414 (S3)

Parameter	Symbol	Einheit
Trockensubstanz	TS	%
Glühverlust	GV	%TS
Masse Schale (leer)	m_{Schale}	g
Masse Schale + eingesetzte Probe	$m_{\text{Schale+Probe}}$	g
Masse Schale + Probe nach Trocknen	$m_{\text{Schale nach Trocknen}}$	g
Masse Schale + Probe nach Glühen	$m_{\text{Schale nach Glühen}}$	g

Biogasertrag

Zur Bestimmung der Biogaserträge wurden die gemessenen Biogasvolumina (V_i) auf Norm-Biogasvolumina (V_N) mit Formel (3) umgerechnet.

$$V_N = V_i \cdot \frac{(p_i - p_v)}{p_N} \cdot \frac{T_N}{T_i} \quad (3)$$

Tabelle 2: Parameter zur Berechnung der Norm-Biogasvolumina (verändert nach VDI 4630)

Parameter	Symbol	Einheit
Norm-Biogasvolumen	V_N	l_N
Mess-Biogasvolumen	V_i	l
Norm-Druck (1013,25 mbar)	p_N	mbar absolut
Mess-Druck	p_i	mbar
Norm-Temperatur (273,15 K)	T_N	K
Mess-Temperatur	T_i	K
Wasserdampf-Partialdruck (73,9 bei 40 °C)	p_v	mbar

Versuchsanlage

Die Batch-Gärtests wurden in Anlehnung an DIN 38414 (S8) und VDI-Richtlinie 4630 durchgeführt, Abbildung 2 zeigt die Versuchsanlage im Technikum.

Die Versuchsanlage besteht aus einem kontinuierlich durchmischten und beheizten Fermenter mit einem Netto-Volumen von 17 Litern (1). Die quantitative Gaserfassung (2) erfolgt mit einem Milligascounter®. Das Biogas wird in einem Gassack (3) gespeichert und stichprobenartig mit einem Gasanalysegerät (4) vermessen. Einschränkung muss ergänzt werden, dass repräsentative Messungen der Biogasqualität nur im Rahmen von kontinuierlichen Versuchsreihen möglich sind.

Ergebnisse

Läuterbottichtreber

Zur Beurteilung der Vergärbarkeit der einzelnen Presswasserproben wurde zuerst ein Batch-Gärtest mit frischen Läuterbottichtrebern (LBT) ohne mechanische Vorbehandlung als Referenzwert durchgeführt (Abbildung 3).



Abbildung 2: Versuchsanlage zur Bestimmung der Biogaserträge

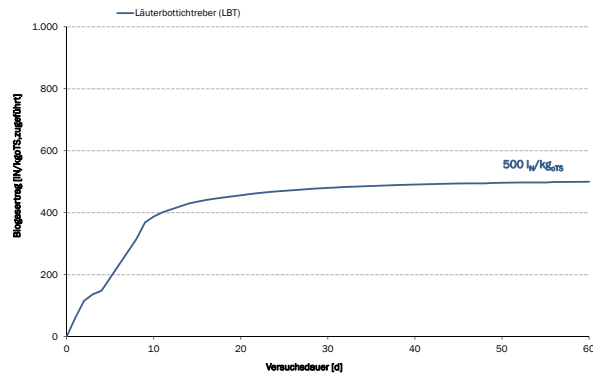


Abbildung 3: Biogasertag für Läuterbottichtreber (LBT) ohne mechanische Vorbehandlung

Für Läuterbottichtreber wurde ein maximaler Biogasertag von $500 \text{ l}_N/\text{kg}_{\text{GoTS}}$ im Zeitraum von 60 Tagen gemessen. Der Wert korrelierte gut mit dem Literaturwert von $533 \text{ l}_N/\text{kg}_{\text{GoTS}}$ (LFL 2012). Insgesamt betrug der Abbau aber nur 56 % der zugeführten Organik. Der Wert ergibt sich aus dem Quotienten des gemessenen zum theoretischen Biogasertag. Der theoretische Biogasertag berechnet sich aus dem Kohlenstoffanteil in Trebern, der bezogen auf organische Trockensubstanz etwa 50 % ausmacht. Da 1 kg abgebauter Kohlenstoff ca. $1,81 \text{ m}^3_N$ Biogas ergibt, berechnete sich ein theoretischer Biogasertag von $883 \text{ l}_N/\text{kg}_{\text{GoTS}}$.

LBT-Presswasser

Im Forschungsvorhaben wurden mehrere Presskonfigurationen getestet, hierunter versteht man die Anordnung der Schneckenbauteile in der Seiherschneckenpresse. In den Entwaserungsversuchen wurde auch die Wirkungsweise einzelner Detergenzien (Entwaserungshilfsmittel) untersucht. Nachfolgend wird bei der biologischen Verwertung daher zwischen LBT-Presswasser mit und ohne Zugabe von Detergenzien unterschieden. Im Folgenden werden nur die Ergebnisse mit derjenigen Konfiguration gezeigt, bei denen Biertreber auf TS-Gehalte $\geq 40 \%$ entwasert wurde.

Abbildung 4 zeigt die Ergebnisse der LBT-Presswasser aus den Versuchen mit Konfiguration (1) und (3) ohne Zugabe von Detergenzien.

Mit dem LBT-Presswasser aus Konfiguration (1) wurde ein Biogasertag von $704 \text{ l}_N/\text{kg}_{\text{GoTS}}$ erreicht, bei Konfiguration (3) ein geringfügig höherer Ertrag von $725 \text{ l}_N/\text{kg}_{\text{GoTS}}$. Anhand des Kurvenverlaufs konnte von einer sehr hohen biologischen Verfügbarkeit und sehr guten Verwertbarkeit ausgegangen werden. In den ersten fünf Tagen wurden bereits 80 % der zugeführten Organik zu Biogas umgesetzt. Sowohl der Biogasertag als auch der Abbau der zugeführten Organik lag mit 79 bis 82 % deutlich über den 56 % des Referenzwerts. Das gute Abbauverhalten wurde vor allem auf die hohen Transferaten der biologisch schwer abbaubaren Rohfaser-Anteile in die Festphase zurückgeführt. Insgesamt lag der Biogasertag bezogen auf zugeführte Organik um ca. $200 \text{ l}_N/\text{kg}_{\text{GoTS}}$ höherer als der Referenzwert.

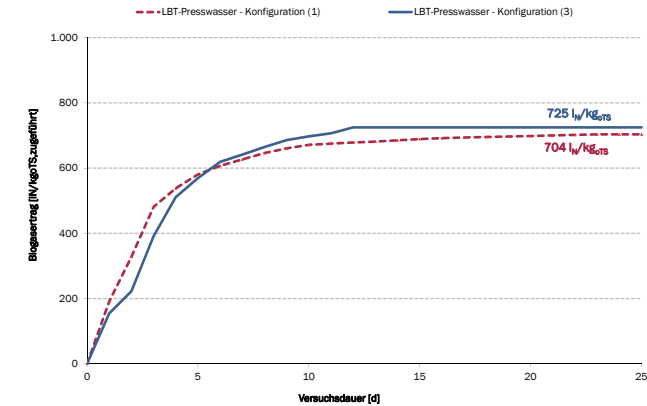


Abbildung 4: Biogasertage für LBT-Presswasser ohne Zugabe von Detergenzien mit Konfiguration (1) und (3)

In den Versuchen zur Entwaserung von Biertrebern durch Einsatz von Detergenzien konnten nur mit Konfiguration (3) TS-Gehalte $\geq 40 \%$ erreicht werden. Hier galt es zu prüfen, ob es durch Transferierung der Detergenzien ins Presswasser zu Hemmeffekten im anaeroben Abbau kommt. Abbildung 5 zeigt die Biogasertage für LBT-Presswasser beim Einsatz der Detergenzien A, B, C und D mit Konfiguration (3).

In den Versuchen für LBT-Presswasser mit Detergenz A (Tensid), B (Netzmittel), C (Siliermittel) und D (Lauge) wurden Biogasertage zwischen 704 und $860 \text{ l}_N/\text{kg}_{\text{GoTS}}$ ermittelt. Im Vergleich zu den Versuchen mit LBT-Presswasser ohne Zugabe von Detergenzien wurden mit Ausnahme von Detergenz B deutlich höherer Biogasertage gemessen. Aus den Biogasertagen ergab sich ein Abbau der zugeführten Organik von bis zu 97 %. Es wurde vermutet, dass das Inokulum noch nicht vollständig ausgegoren und dadurch die Biogasertage zu hoch waren. Bekräftigt wurde dies durch die täglichen Gasbildungsraten, die auf einen

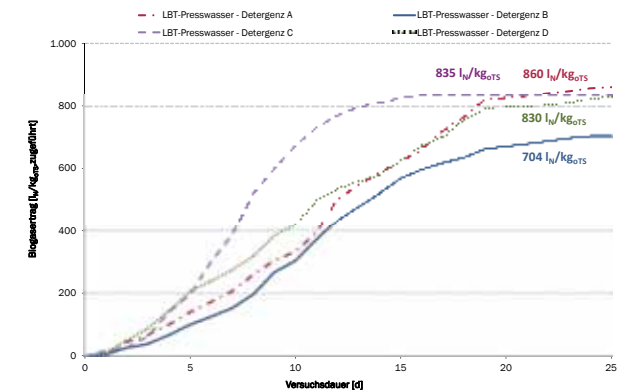


Abbildung 5: Biogasertage für LBT-Presswasser beim Einsatz der Detergenzien A, B, C und D mit Konfiguration (3)

verzögerten Abbau hindeuteten. Bei LBT-Presswasser ohne Zugabe von Detergenzien wurde bereits nach fünf Tagen 80 % der Organik zu Biogas umgesetzt. In den Versuchen mit den Detergenzien wurde dieser Wert vor allem bei Detergenz A erst nach 15 bis 20 Tagen erreicht. Prinzipiell konnte jedoch die Vergärbarkeit nachgewiesen werden.

Neben den Detergenzien A bis D wurden zusätzlich zwei Enzyme hinsichtlich ihrer Eignung zur Entwässerung untersucht, Abbildung 6 zeigt die Biogaserträge für LBT-Presswasser beim Einsatz von Enzym (1) und (2) mit Konfiguration (3).

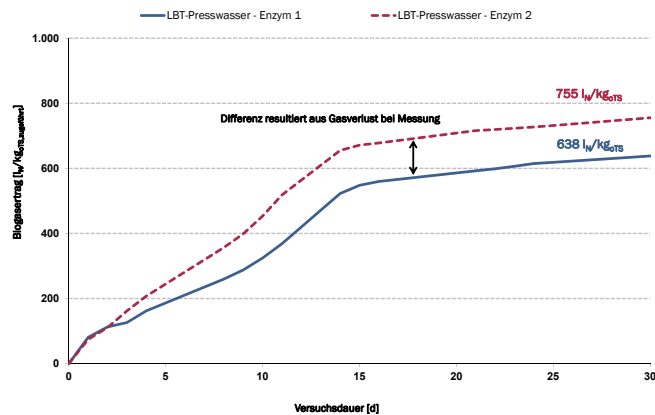


Abbildung 6: Biogaserträge für LBT-Presswasser beim Einsatz von Enzym (1) und (2) mit Konfiguration (3)

Im Vergleich zu LBT-Presswasser ohne Zugabe von Detergenzien deutete die Gasbildungsrate auch hier auf einen verzögerten Abbau hin. Die Biogaserträge waren mit 683 und 755 I_N/kg_{OTS} ähnlich hoch wie die Biogaserträge für LBT-Presswasser ohne Zugabe von Detergenzien, aber unterhalb der Werte aus den Detergenzienversuchen. Die abweichenden Biogaserträge der beiden Enzymversuche erklärten sich durch einen defekten Gaszähler. Im Versuch mit Enzym 1 wurde zu Beginn die Gasmenge nicht erfasst. Da die tägliche Gasbildung im gesamten Verlauf aber ansonsten fast identisch war, wurde vermutet, dass für beide Ansätze ein ähnlich hoher Biogasertrag erreicht werden kann. Für das LBT-Presswasser mit Enzym 2 konnte eine Ertragssteigerung um ca. 250 I_N/kg_{OTS} gegenüber dem Referenzwert erzielt werden, was auch den hohen Abbau der zugeführten Organik von 85 % widerspiegelte.

Nachhaltigkeitsaspekte

Die Ergebnisse aus den Versuchen zur mechanischen Entwässerung und anschließenden biologischen und thermischen Verwertung wurden dazu genutzt, das prinzipiell mögliche THG-Einsparpotenzial abzuschätzen. Zur Bilanzierung wurde eine Brauerei mit einem Bierausstoß von 100.000 hl/a angesetzt. Pro hl Bier fallen ca. 20 kg_{FM} Biertreber an. Hieraus ergibt sich eine theoretisch verfügbare Biertrebermenge von 2.000 Mg_{FM}/a. Es wurden

zwei Varianten berechnet. In Variante (1) wurde der Biertreber zu 100 % und in Variante (2) zu 50 % energetisch verwertet. Bei Variante (1) muss berücksichtigt werden, dass Biertreber nicht mehr als Futtermittel verfügbar ist. Wird dies durch importierte Futtermittel kompensiert, können sich die THG-Einsparpotenziale wieder reduzieren. Da die Verwertung als Futtermittel von Brauerei zu Brauerei aber sehr unterschiedlich ist, wurde in Variante (2) vereinfacht nur 50 % der Biertrebermenge als energetisch nutzbar angesetzt. Die THG-Bilanzierung umfasste die thermische Verwertung des Pressrückstands, den Energiebedarf der mechanischen Entwässerung und die biologische Verwertung des Presswassers zu Biogas.

THG-Bilanzierung

Im Unterschied zu anderen Forschungsansätzen wird im Projekt eine kombinierte thermische und biologische Verwertung der Biertreber angestrebt. Die THG-Bilanzierung ergab, dass durch den gewählten Ansatz für Variante (1) und (2) insgesamt 374 bzw. 187 Mg CO₂-Äq. pro Jahr eingespart werden könnten. Abbildung 7 zeigt die THG-Einsparungen für die beiden Varianten, aufgeteilt in thermische und biologische Verwertung für den Pressrückstand und das Presswasser.

Betrachtet man alleine die THG-Einsparpotenziale der biologischen Verwertung, könnte mit Variante (1) durch Verstromung des Biogases eine THG-Gutschrift von 72 Mg CO₂-Äq. pro Jahr erzielt werden. Wird die dabei erzeugte Wärme auch genutzt, erhöht sich die THG-Gutschrift um weitere 28 Mg CO₂-Äq. pro Jahr. Damit ergibt sich in Summe für Variante (1) eine THG-Gutschrift von 100 Mg CO₂-Äq. pro Jahr. In Variante (2) halbiert sich die THG-Gutschrift für Strom und Wärme auf 36 bzw. 14 Mg CO₂-Äq. pro Jahr, in Summe lassen sich bei Variante (2) demnach 50 Mg CO₂-Äq. pro Jahr einsparen.

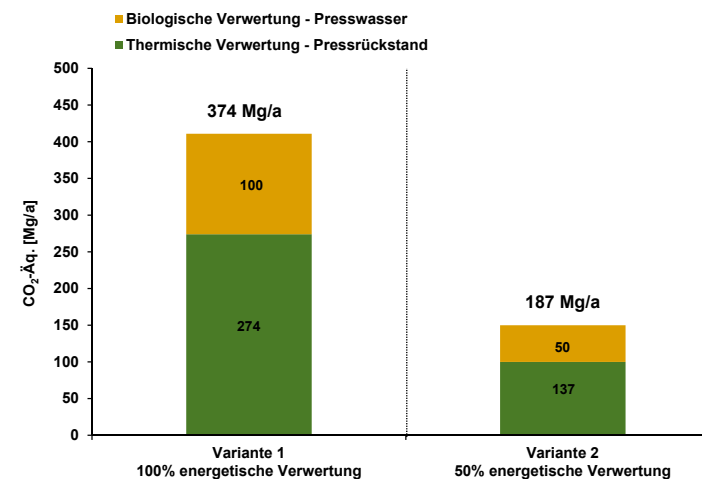


Abbildung 7: THG-Einsparpotenziale aufgeteilt in thermische und biologische Verwertung

Übertragbarkeit

Maßgebend für eine großtechnische Umsetzung ist die Wirtschaftlichkeit des vorgestellten Verfahrenskonzepts. Um Zielkonflikte mit der Futtermittelindustrie zu vermeiden, muss im Vorfeld geprüft werden, ob ein wirtschaftlich tragfähiges Konzept realisierbar ist, wenn nur ein Teil der Biertreber genutzt wird. Hierzu erfolgte eine erste Abschätzung im abgeschlossenen Forschungsvorhaben. Werden nur 50 % der verfügbaren Trebermengen wie in Variante (2) energetisch genutzt, könnten Wärmegestehungskosten von 69 €/MWh erreicht werden. Setzt man im Vergleich dazu Kosten von 75 €/MWh beim Einsatz von Heizöl EL an, ist das Verfahrenskonzept eine wirtschaftliche Alternative. Die Umsetzung ist aber stark von einzelnen Faktoren wie der Anlagengröße der Biomassefeuerung oder den Kosten für eine Biogasanlage abhängig. Der Einsatz von Biertrebern ist demnach sowohl aus energetischer als auch wirtschaftlicher Sicht nur sinnvoll, wenn noch andere erneuerbare Energieträger wie Holzhackschnitzel eingesetzt werden. Die energetische Verwertung von Biertrebern bildet daher einen Anreiz, Biomasse als Energieträger in Brauereien zu nutzen, um die Wärmeversorgung nahezu CO₂-neutral zu gestalten.

Fazit

Die im Forschungsvorhaben angestrebten Ziele zur mechanischen Entwässerung von Biertrebern auf TS-Gehalte ≥ 40 % und die technischen Nachweise zur prinzipiellen Verwertbarkeit des Presswassers bzw. Pressrückstands wurden erreicht. Im nächsten Schritt ist speziell bei der biologischen Verwertung die kontinuierliche Co-Vergärung des Presswassers in Kombination mit Brauereiabwässern zu untersuchen. Durch die anaerobe Vergärung des Abwassers könnten zusätzlich auch noch Abwasserkosten eingespart werden. Die Aspekte werden aktuell im dreijährigen Forschungsvorhabens „Demonstrationsanlage zur kombinierten Treberverbrennung/ -vergärung am Standort einer Brauerei“ (FKZ: 03KB075) mit den Kooperationspartnern (TU München, Weisses Bräuhaus G. Schneider & Sohn GmbH, Harburg-Freudenberger Maschinenbau GmbH) betrachtet. Bei einer erfolgreichen Umsetzung ist davon auszugehen, dass der Lösungsansatz von der Branche angenommen wird, da es bis jetzt keine sichere Lösung des Biertreberproblems gibt und gleichzeitig viele Brauereien über den Einsatz von Biomasse unter den Gesichtspunkten Nachhaltigkeit und Imagegewinn nachdenken.

Literaturverzeichnis

- Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft – LfL (Hrsg.): Biogausausbeuten verschiedener Substrate. URL: http://www.lfl.bayern.de/ilb/technik/10225/?sel_list=26%2Cb&strsearch=&pos=left (Stand: 01.03.2012).
- Becher, T.; Wüst, O.: Versuchsanlage zur thermischen Verwertung von Biertreber. In: *Brauwelt* 41-42 (2007), S. 1140-1143.
- DIN 38 414 (S2): Bestimmung des Wassergehaltes und des Trockenrückstandes. In: Deutsche Einheitsverfahren zur Wasser-, Abwasser- und Schlammuntersuchung (1985).
- DIN 38 414 (S3): Bestimmung des Glührückstandes und des Glühverlustes der Trockenmasse. In: Deutsche Einheitsverfahren zur Wasser-, Abwasser- und Schlammuntersuchung (1985).
- DIN 38 414 (S8): Bestimmung des Faulverhaltens. In: Deutsche Einheitsverfahren zur Wasser-, Abwasser- und Schlammuntersuchung (1985).
- Herfellner, T.; Bochmann, G.; Meyer-Pittroff, R.: Wirtschaftlich sinnvolle Verfahren? Die Verwertung von Biertrebern – Derzeitiger Stand und neue Ansätze zur energetischen Nutzung. In: *Brauindustrie* 8 (2006), S. 42-45.
- Kepplinger, W.: Der Einsatz von Biertrebern für die Energiebereitstellung in einem Brauereiverbund. In: *Brauwelt* 6 (2008), S. 120-125.
- Meyer-Pittroff, R.: Der Einsatz von Biertreber zur Energiebereitstellung. In: *Brauwelt* 128, 26 (1988), S. 1156-1158.
- Pesta, G.: Biogaserzeugung aus Biertrebern – Die Neuerfindung des Rades. In: *Brauwelt*, 37-38 (2008), S. 1086-1089.
- Pesta, G.; Grasmug, M.: Biogas aus Biertrebern – 47% weniger Energiezukauf. In: *Brauwelt*, 11 (2010), S. 318-320.
- Russ, W.; Meyer-Pittroff, R.: Utilizing waste products from the food production and processing industries. In: *Critical Reviews in Food Science and Nutrition* 44 (2004), Nr. 1, S. 57-62.
- VDI-Richtlinie 4630: Vergärung organischer Stoffe – Substratcharakterisierung, Probenahme, Stoffdatenerhebung, Gärversuche. In: VDI-Handbuch Energietechnik, VDI-Handbuch Landwirtschaft/Landtechnik, Hrsg. v. VDI-Gesellschaft Energietechnik – Fachausschuss Regenerative Energien, Verein Deutscher Ingenieure (VDI), Düsseldorf (2006), Beuth Verlag GmbH, Berlin.
- Voigt, J.; Haeffner, B.; Schieder, D.; Ellenrieder, J.; Faulstich, M.: Biogas aus Reststoffen der Getränkeindustrie. In: *Brauwelt*, 46 (2009), S. 1384-1388.



Foto: Trebersilo Weisses Bräuhaus
G. Schneider & Sohn GmbH



Ankündigung

Neue Wege zur Prozessoptimierung in Biogasanlagen –
Abgeschlossene Vorhaben im Förderprogramm „Energetische Biomassenutzung“ Teil II

Die Themen:

- Analyse von Emissionen klimarelevanter Gase durch Biogasanlagen im Hinblick auf die ökologische Bewertung der Biogasgewinnung aus Abfällen
- Entwicklung eines neuartigen energie- und rohstoffeffizienten Entschwefelungssystems für die Erzeugung von Bio-Erdgas – Entwicklung eines Substrates mit Beschichtung zur Entschwefelung von Bio-SNG
- Mobile Versuchsanlage zur Ertragssteigerung/Prozessoptimierung von Biogasanlagen
- Q-BioNES – Qualitätsverbesserung der Bioerdgas – Netzeinspeisung durch Sauerstoffentfernung
- Ligno-Biogas – Breitenwirksame, wirtschaftliche Biogasgewinnung aus hoch lignozellulosehaltigen biogenen Reststoffen
- MultiSens – Effizientere Nutzung von biogenen Reststoffen durch den Einsatz funkbasierter Multipositionssensoren in Biogasanlagen



Innerhalb der Schriftenreihe sind bisher erschienen:

Abzurufen unter: <http://www.energetische-biomassenutzung.de/de/downloads/veroeffentlichungen.html>

- 01 Landschaftspflegematerial, 2011.
- 02 Basisinformationen für eine nachhaltige Nutzung landwirtschaftlicher Reststoffe zur Bioenergiebereitstellung, 2011.
- 03 Basisinformationen zur Entwicklung des Biokraftstoffsektors bis 2011, 2012.
- 04 Methodenhandbuch Stoffstromorientierte Bilanzierung der Klimagaseffekte, 2012.
- 05 Innovative Konzepte für die energetische Nutzung von biogenen Reststoffen, 2012.
- 06 Brückenschlag nach Osteuropa: Biomassepotenziale und -nutzungsoptionen in Russland, Weißrussland und der Ukraine, 2012.
- 07 Messmethodensammlung Biogas: Methoden zur Bestimmung von analytischen und prozessbeschreibenden Parametern im Biogasbereich, 2012.
- 08 Messmethodensammlung Feinstaub: Methodenvorschlag zur Feinstaubmessung an Feuerungsanlagen für feste biogene Brennstoffe, 2014.
- 09 Konferenzband Energetische Biomassenutzung: Neue Technologien und Konzepte für die Bioenergie der Zukunft, 2013.
- 10 Grünlandenergie. Praxishinweise für die Entwicklung von Gras und Schilf basierten Nutzungskonzepten zur Energiegewinnung, 2013.
- 11 Neue Wege zur Prozessoptimierung in Biogasanlagen Teil 1, 2014.
- 12 Effizient, umweltverträglich, dezentral. Neue Konzepte für die Nutzung von biogenen Festbrennstoffen Teil 1, 2013.
- 13 Alternative Verfahren zur Herstellung von Biokraftstoffen aus Reststoffen, 2013.



www.energetische-biomassenutzung.de

ISSN: 2192-1806

Gefördert vom



Bundesministerium
für Umwelt, Naturschutz,
Bau und Reaktorsicherheit

Koordiniert vom



Wissenschaftlich
begleitet vom

