

Biogas from Energy Crops

Results from Long-Term Lab Scale Experiments

Bernd Linke

Institut für Agrartechnik Bornim e. V., Potsdam

Biogas production from crushed rye grain and fodder sugar beets was studied in long-term lab scale experiments. For both energy crops and co-fermentation with animal waste slurry anaerobic digestion did not fail. The VS-biogas yield from mixtures of energy crops and slurry was proportional to the VS-portion of the single substrates. Application of a SBR (sequencing batch reactor) for anaerobic digestion of fodder sugar beets at 55°C resulted in VS methane yield and methane production rate of 1.1 m³kg⁻¹ and 3 m³m⁻³d⁻¹, respectively.

Schlüsselwörter

Biogas, animal waste slurry, energy crops

Einführung

In der Praxis der Biogaserzeugung gewinnt die gemeinsame Vergärung von Gülle mit anderen Biomassen zunehmend an Bedeutung. Diese Kofermentation führt in der Regel zu einer Leistungssteigerung der Biogasanlage und kann die Kosten der Biogasgewinnung durch Entsorgungserlöse aus betriebsfremden organischen Reststoffen reduzieren. Das Spektrum der in Deutschland angewendeten Verfahren und Ausgangsstoffe ist vielfältig [1] und reicht bei den Ausgangsstoffen von Abfällen aus der Agro- und Lebensmittelindustrie bis zu Energiepflanzen, die entsprechend dem Stand der Technik [2] vergoren werden. Für die Ermittlung der möglichen Biogasausbeute aus Gülle im Gemisch mit organischen Reststoffen [3, 4, 5] oder pflanzlichen Ko-substraten [6, 7] sind einfache Gärtests geeignet, die eine Einschätzung über das mögliche Biogaspotential zulassen.

Aussagen über das Prozessverhalten und die Belastbarkeit der Biogasfermentoren sind dagegen nur über Langzeitversuche bei quasi-kontinuierlicher Beschickung möglich, da sich der Gleichgewichtszustand (steady state) einer Biogasanlage in der Regel erst nach einer Zeit einstellt, die etwa der 3-fachen mittleren hydraulischen Verweilzeit entspricht. Versuche in einem vollständig durchmischten 18 l Fermenter bei 21 d Verweilzeit und 35°C ergaben, dass eine Erhöhung des Anteiles von Frucht- und Gemüseabfällen in Rindergülle von 20 % auf 50 % in der Mischung eine Steigerung der Methanausbeute von

0,23 auf 0,45 m³kg⁻¹ bewirkte. Im Bereich der gewählten oTS-Faulraumbelastung von 3,19 bis 5,01 kg m⁻³d⁻¹ wirkte sich die Zugabe von Geflügelkot durch Hemmung von freiem Ammoniak negativ auf die Biogasproduktion aus [8].

Ergebnisse zur kontinuierlichen Vergärung von Gras über einen Zeitraum von mehreren Monaten im halbtechnischen Maßstab sind [9] zu entnehmen. Für Grassilage wurden im mesophilen Temperaturbereich bei TS-Raumbelastungen von 1 und 2,6 kg m⁻³d⁻¹ Biogasausbeuten von 0,47 bzw. 0,43 m³kg⁻¹ gemessen. Interessant ist die lineare Abnahme der Biogasausbeute mit steigender TS-Raumbelastung. Für frisch geerntetes Gras, das bei TS-Raumbelastungen von 0,6 bis 1,5 kgm⁻³d⁻¹ vergoren wurde, stellte sich eine um etwa 10% geringere Biogasausbeute im Vergleich zur Silage ein. Umfangreiches Datenmaterial liegt für Rübensilage als pumpfähiges Substrat mit einer oTS-Konzentration von 100 kg m⁻³ vor, die in Mischungen mit Rindergülle und oTS-Anteilen aus Rübensilage im Gemisch von 2 %, 50 % und 75 % bei 34°C und 54°C sowie bei 15 Tagen und 20 Tagen Verweilzeit vergoren wurde. In beiden Temperaturbereichen lag die maximale Methanausbeute bei 0,56 m³ je kg zugeführter oTS. Bei reiner Rübensilagevergärung reduzierte sich die Methanausbeute bei 34°C und 54°C auf 0,336 bzw. 0,39 m³ je kg oTS, da die oTS-Raumbelastung bereits auf 4,9 kg m⁻³d⁻¹ angestiegen war [10]. Ergebnisse zur Gewinnung von Biogas aus diesem Substrat sind auch [11] zu entnehmen. Mit einer vergleichbaren Rüb-

ensilage (oTS-Konzentration 94 und 98 kgm⁻³) konnten bei oTS-Raumbelastungen von ca. 4 kg m⁻³d⁻¹ bei mesophiler und thermophiler Prozessführung und Monovergärung der Rübensilage oTS-Methanausbeuten von 0,47 m³kg⁻¹ erzielt werden. Eine Mischung mit Rindergülle erhöhte die Stabilität der Vergärung und ermöglichte oTS-Raumbelastungen bis 4,5 kg m⁻³d⁻¹.

In den nachfolgend beschriebenen Langzeitversuchen wurden Roggenschrot und Rübensilage in Monovergärungen und in Gemischen mit Gülle hinsichtlich der Prozessstabilität und der erzielbaren Biogasausbeuten bewertet und mit den Ergebnissen aus einfachen Gärtests verglichen. Ein weiteres Ziel der Untersuchungen bestand darin, ob durch den Betrieb eines mit Rübensilage beschickten und als SBR (sequencing batch reactor) betriebenen Biogasreaktors eine Leistungssteigerung im Vergleich zum konventionellen Rührkessel erreicht werden kann.

Material und Methoden

Die in den Versuchen verwendeten Substrate (**Tabelle 1**) liegen für die untersuchten Parameter im üblichen Bereich. Lediglich die im SBR geprüfte Rübensilage hatte wegen eines zu hohen Anteils Erde bei der Einlagerung nur 65,2 % oTS in der TS. Als Fermentoren für die quasi-kontinuierlichen Versuche kamen mit Wassermantel und gasdichten Rührwerken ausgerüstete 2,5 l Glasgefäße (Technisches Glas Ilmenau) zum Einsatz (**Bild 1**). Die Biogasmenge wurde mit Präzisionsgaszählern (Fa. Ritter) gemessen und der Methangehalt aus der täglich produzierten Gasmenge (Gastemperatur 20°C) mit einem Gasanalysengerät SSM 6000 (Fa. Pronova) bestimmt. Die als Rührkessel betriebenen Fermentoren erhielten einmal täglich an 5 Tagen pro Woche Substrat, nachdem die gleiche Menge Gärrest aus dem homogenen Fermenterinhalt entnommen wurde. Die Beschickung des SBR erfolgte alle 6 Stunden an 6 Tagen pro Woche mittels Schlauchpumpe. Die täglich zugeführte Menge Rübensilage wurde als Überstand

Table 1: Analyses of the investigated substrates in the experimental runs

		Rührkessel		Rührkessel		SBR
		Roggen-schrot	Gülle ¹⁾	Rüben-silage	Gülle ¹⁾	Rüben-silage
TS	g kg ⁻¹	879	56,0	104	53,8	112,5
oTS	% TS	99,1	71,9	90,5	71,3	65,2
oTS	g kg ⁻¹	871	40,3	94,1	38,4	73,4
N _{ges}	g kg ⁻¹	13,1	2,97	1,51	4,6	1,53
NH ₄ -N	g kg ⁻¹	0,03	1,49	0,34	2,68	0,11
fl.FS	g kg ⁻¹	0,1	1,80	12,1	7,26	7,4
MS	g kg ⁻¹	-	-	30,3	-	-
pH	-	6,20	7,51	3,3	7,24	3,5

¹⁾ Mischgülle: 50% Rindergülle + 50% Schweinegülle

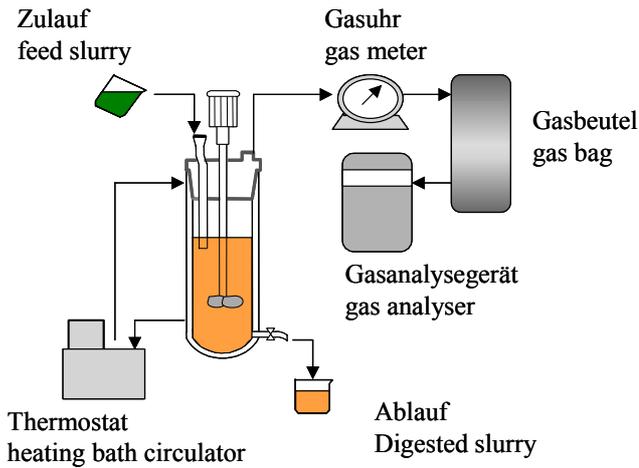


Figure 1: Schematic layout of lab-scale semi-continuous test facility

(Schlammwasser) des SBR mit Hilfe einer Schlauchpumpe abgezogen. Zur Kontrolle des Fermentationsprozesses wurden die wasserdampfvlüchtigen Fettsäuren (fl. FS) bestimmt.

Ergänzend zu den quasi-kontinuierlichen Versuchen bestand das Ziel der Gärtests in der Ermittlung der maximal möglichen Biogasausbeute. Hierfür wurden thermostatisierbare und gasdichte Steilbrustflaschen mit einem Nutzvolumen von 2000 ml aus Polyethylen verwendet, die mit kalibrierten Gasmäusen aus Glas verbunden waren. Über ein Ventil, das sich an der Gasmaus befindet, konnten Gasproben entnommen werden. Die täglich gebildete Biogasmenge wurde aufsummiert und in einer Biogassummenkurve dargestellt.

Ergebnisse und Diskussion

Biogasausbeuten im Gärtest

Durch Mischung von ausgefaultem Impfschlamm, in dem sich die methanogene Mischpopulation schon ausgebildet hat, mit Substrat in einem oTS-Verhältnis Impfschlamm/Substrat von etwa 2 und anschließender Lagerung bei 35°C kann die Biogasmenge erfasst und auf die ein-

gesetzte oTS aus dem Substrat bezogen werden. Für die beiden geprüften Substrate Roggenschrot (oTS = 871 g kg⁻¹) und Rübensilage (oTS = 94,1 g kg⁻¹) ergab sich der typische Verlauf der Biogassummenkurve (Bild 2). Nach etwa 15 Tagen erhöhte sich die Biogasmenge nur noch geringfügig, so dass nach einer Faulzeit von 21 Tagen der Gärtest beendet werden konnte. Die aus den beiden Substraten zu erwartende maximale Bio-

gasausbeute kann mit Hilfe einer Kurvenanpassung bestimmt werden und ergab eine für Roggenschrot und Rübensilage Werte von 0,92 bzw. 1,06 m³kg⁻¹.

Langzeitversuche im Rührkessel

Zur Ermittlung der Biogasausbeute und der Prozessstabilität wurden Versuche über einen Zeitraum von etwa 250 Tagen mit Roggenschrot und Rübensilage durchgeführt. Dabei erfolgte die Biogasgewinnung als Monovergärung, im Gemisch mit Gülle (Kovergärung) und als reine Güllevergärung (Bild 3 und 4). Als Impfmateriale für die Inbetriebnahme der Fermenter diente ausgefaulte Rindergülle mit einem TS-Gehalt von 14,5 g kg⁻¹ (Fermenter für Roggenschrot) und 22,2 g kg⁻¹ (Fermenter für Gülle und Gemisch aus Gülle und Roggenschrot). Obwohl der Impfschlamm sehr gut ausgefault war (oTS-Anteil von 49 bzw. 55 % der TS) konnte die für Roggenschrot nach Inbetriebnahme gewählte oTS-Raumbelastung von 1,5 bis 2 kg m⁻³d⁻¹ nicht aufrechterhalten werden, da die Biogasausbeute zurückging (Bild 3). Bis 60 Tage nach der Inbetriebnahme wurde die Raumbelastung auf etwa 0,6 kg m⁻³d⁻¹ eingestellt und anschließend wieder auf 2,5 kg m⁻³d⁻¹ erhöht. Die oTS-Biogasausbeute erreichte einen Wert von etwa 0,8 m³kg⁻¹. Während bis zu diesem Zeitpunkt die Zugabe des Roggenschrotes direkt in den Fermenter erfolgte, wurde in der Folgezeit bis zum Versuchsende das Roggenschrot als Suspension (10 g in 50 ml Wasser) zugegeben und der Fermenter mit einer geringen oTS-Raumbelastung gefahren. Grundlage für die Berechnung der Biogasausbeute bildete die in einer Woche gebildete Biogasmenge und die im

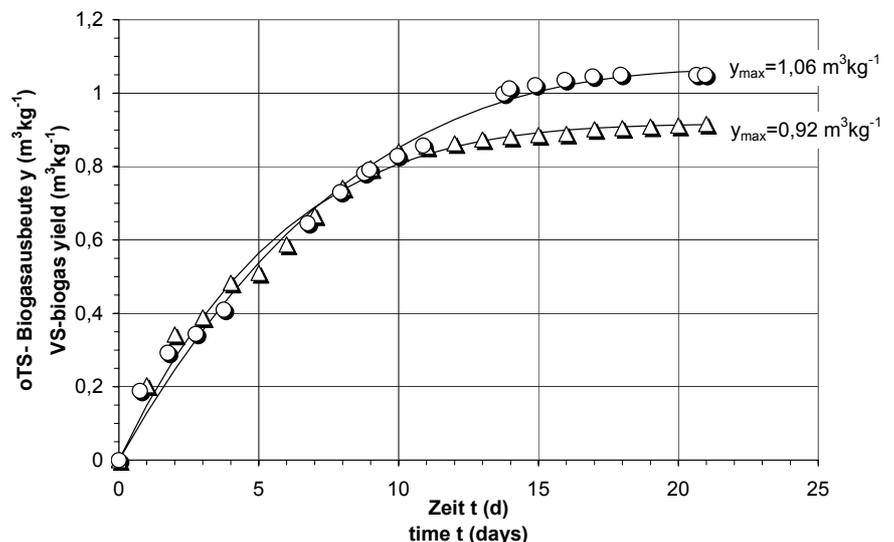


Figure 2: VS-biogas yield from crushed rye grain (Δ) and fodder sugar beets (\circ) in batch-experiments

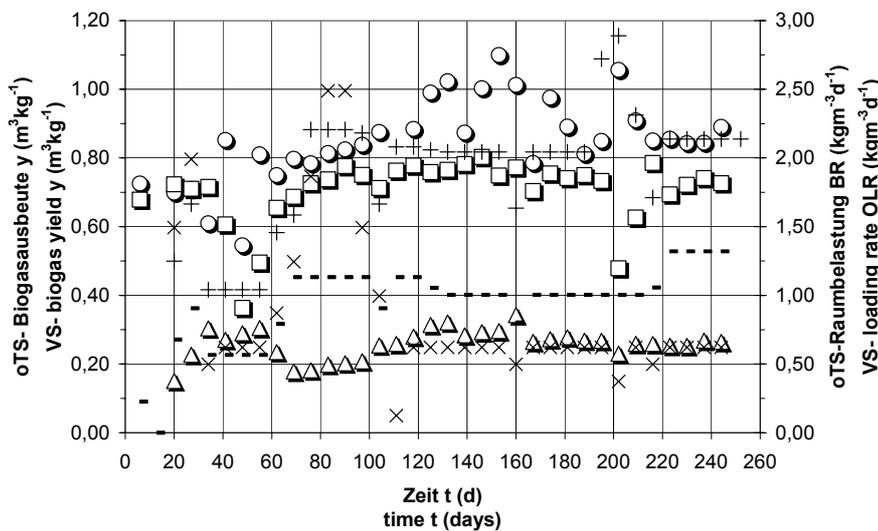


Figure 3: VS- biogas yield and VS loading rate from semi continuously processing fully mixed 2.5 l lab fermenters digesting crushed rye grain and animal waste slurry: (○) y, (×) OLR, 100 % crushed rye grain; (□) y, (+) OLR, 19/81 mass % crushed rye grain/animal waste slurry; (△) y, (5) OLR, 100 % animal waste slurry

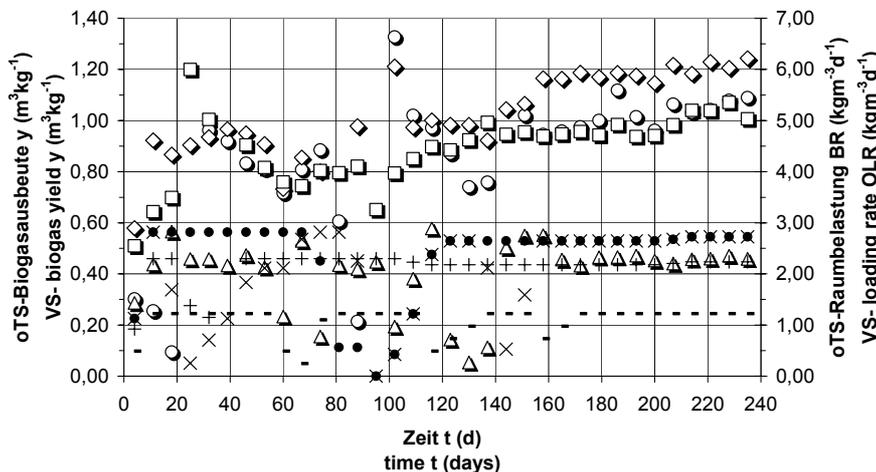


Figure 4: VS- biogas yield and VS loading rate from semi continuously processing fully mixed 2.5 l lab fermenters digesting fodder sugar beets and animal waste slurry: (○) y, (×) OLR, 100 % fodder sugar beets 35°C; (◇) y, (●) OLR, 100 % fodder sugar beets 55°C; (□) y, (+) OLR, 70/30 mass % fodder sugar beets/animal waste slurry; (△) y, (5) OLR, 100 % animal waste slurry

gleichen Zeitraum dem Fermenter zugeführte oTS-Masse. Die oTS-Biogasausbeute bei der Monovergärung von Roggenschrot schwankte zwischen 0,8 und 1,1 m³kg⁻¹ mit Methangehalten im Biogas von durchschnittlich 54 %.

Stabiler verlief dagegen die Kofermentation von Roggenschrot und Gülle, bei der in der Mischung 19 Masse-% ($p_E^M=0,19$) bzw. 84 % der oTS ($p_E=0,84$) aus dem Roggen kamen (**Tabelle 2**). Bei dieser Variante hatte sich nach etwa 80 Versuchstagen ein stabiler Zustand mit Biogasausbeuten um 0,73 m³kg⁻¹ eingestellt. Interessant ist der Abfall der Biogasausbeute von 0,7 auf 0,5 m³kg⁻¹ nachdem die oTS-Raumbelastung von etwa 2 auf 2,8 kg m⁻³d⁻¹ gesteigert wurde. Nach Reduzierung der Belastung ließ sich innerhalb von 2 Wochen der ursprüngliche Zu-

stand wieder herstellen. Durch den hohen Gülleanteil war auch ein Anstieg des Methangehaltes im Biogas auf 59 % zu ver-

zeichnen. Die als Kontrollvariante durchgeführte Vergärung von Gülle verlief problemlos mit einer oTS-Biogasausbeute von durchschnittlich 0,27 m³kg⁻¹ bei einer oTS-Raumbelastung von 1,1 kg m⁻³d⁻¹ und Methangehalten von 66 %.

Bei der Inbetriebnahme des Fermenters bei 35°C mit Rübensilage als Monofermentation (Bild 4) führte die zu starke Steigerung der oTS-Raumbelastung auf einen Wert von 2,8 kg m⁻³d⁻¹ innerhalb der ersten 10 Tage zu einer Übersäuerung des Fermenterinhalt, so dass der Fermenter neu mit Impfaschlamm befüllt werden musste. Trotz schrittweiser Steigerung der Belastung auf 2,8 kg m⁻³d⁻¹ ging die oTS-Biogasausbeute stetig zurück und der Fermenter übersäuerte erneut. Erst eine nochmalige Inbetriebnahme mit bereits gewonnenem Ablauf ermöglichte eine schnelle Steigerung der oTS-Raumbelastung auf den angestrebten Wert und führte zu oTS-Biogasausbeuten im Bereich von 0,9 bis 1,1 m³kg⁻¹ mit steigender Tendenz. Kaum Probleme bereiteten die Rührkeselfermentoren, die mit einem Gemisch aus Gülle und Rübensilage sowie mit Rübensilage bei 55°C beschickt wurden. Bei der Mischung Gülle + Silage wurde nur einmal nach 20 Tagen die Belastung durch einen Anstieg der organischen Säuren reduziert. Der mit Rübensilage beschickte und bei 55°C betriebene Fermenter musste nur einmal mit bereits gewonnenem Ablauf neu angefahren werden, nachdem durch einen Defekt am Thermostaten der Fermenterinhalt für etwa 1 Stunde auf 75°C aufgeheizt wurde. Da eine bereits an das Substrat und die thermophilen Bedingungen adaptierte methanogene Mischkultur verwendet wurde, konnte bereits nach 4 Wochen die ursprüngliche oTS-Raumbelastung von 2,7 kg m⁻³d⁻¹ gefahren werden.

Trägt man die während des stabilen Versuchsbetriebs ab dem 120. Versuchstag gemessenen mittleren Biogasausbeuten

Table 2: Reactor performance data at steady state from long-term lab scale experiments

Substrate	Parameter					
	$c_0^{1)}$ g kg ⁻¹	p_E^M	p_E	BR kg m ⁻³ d ⁻¹	y m ³ kg ⁻¹	CH ₄ Vol. %
Roggenschrot/Gülle						
Gülle	40,3	-	-	1,1	0,27	66
Gülle + Roggen	198	0,19	0,84	2,1	0,73	59
Roggenschrot	871	-	-	0,7	0,9	54
Rübensilage/Gülle						
Gülle	38,4	-	-	1,2	0,47	64
Gülle + Silage	77,4	0,70	0,85	2,2	0,96	60
Rübensilage	94,1	-	-	2,7	1,02	58
Rübensilage (55°C)	94,1	-	-	2,7	1,15	55

¹⁾ oTS- Konzentration im Substrat

aus der Mischung von Gülle, Roggenschrot und Rübensilage bzw. aus den Einzelsubstraten als Funktion des oTS-Anteils in den jeweiligen Substraten oder Mischungen auf (Tabelle 2), lässt sich eine lineare Abhängigkeit mit einem mittleren Fehler von etwa 7 % darstellen (Bild 5). Hieraus lässt sich die Biogasausbeute anderer Mischungen bestimmen, da Synergieeffekte zwischen Gülle und den untersuchten Energiepflanzen nicht festgestellt werden konnten.

Biogas aus Rübensilage im SBR

Die hohen oTS-Biogasausbeuten von Energiepflanzen im Vergleich zu Gülle spiegeln sich auch in einem deutlich höheren oTS-Abbau wider. So wird z.B. die organische Substanz der Rübensilage um etwa 90 % abgebaut, während die Flüssigkeit weitgehend im Gärrest verbleibt. Damit besteht die Möglichkeit, durch Sedimentation aktive, an der Biogasbildung beteiligte Mikroorganismen im Fermenter zurückzuhalten und somit im Vergleich zum konventionellen Rührkessel eine höhere Mikroorganismendichte im Fermenter zu halten. Dieser Fermentertyp wird bereits erfolgreich als SBR (sequencing batch reactor) bei der anaeroben Abwasserreinigung eingesetzt [12], da man die Verweilzeiten für die Substratmasse und die aktive Biomasse im Fermenter entkoppelt. Durch Entnahme von Überstand nach einer Sedimentationsphase von etwa 2 Stunden stellte sich eine oTS-Konzentration im SBR bei etwa 2,5 % ein. Durch diese Maßnahme konnte über einen Zeitraum von 2 Monaten eine Biogasrate von durchschnittlich $5,6 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3} \text{ d}^{-1}$ mit 55 % Methangehalt im Biogas eine mittlere Methanbildungsrate von über $3 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3} \text{ d}^{-1}$ erreicht werden (Bild 6). Der Spitzenwert der Biogasbildungsrate lag sogar bei über $8 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3} \text{ d}^{-1}$ und übertrifft damit die bisher mit diesem Substrat erzielten Werte. Der annähernd parallele Verlauf zwischen oTS-Raumbelastung und Biogasrate bei nahezu gleichbleibender Biogasausbeute deutet darauf hin, dass das System stabil arbeitete und die Grenze der Belastbarkeit noch nicht erreicht war.

Schlussfolgerungen

Aus Energiepflanzen lassen sich sowohl in Kofermentation mit Gülle als auch als Monofermentation hohe Biogasausbeuten erzielen. Der Prozess der Biomethanisierung kann auch ohne Zusatz von Gülle für Rübensilage und Roggenschrot stabil über einen langen Zeitraum gefahren werden. Die hierbei ermittelten Biogas-

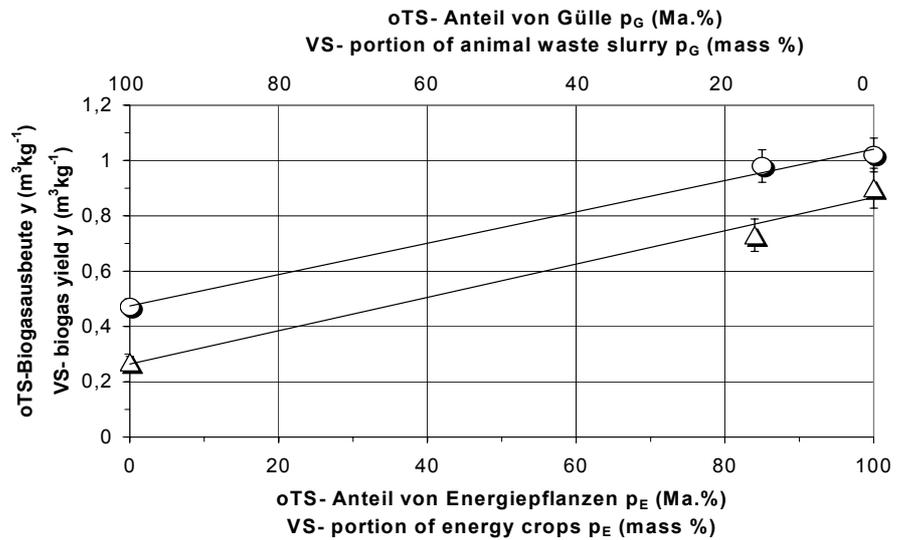


Figure 5: VS-biogas yield for different VS- portions of animal waste slurry p_G and energy crops p_E from semi-continuously experiments, (○) fodder sugar beets silage, (△) crushed rye grain

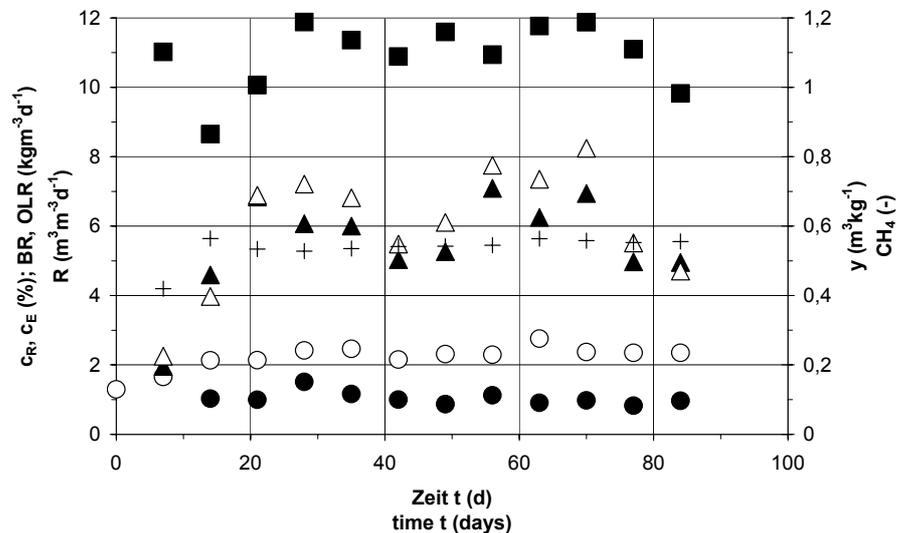


Figure 6: VS concentration of fermenter c_R (○), of sludge liquor (●), VS-loading rate OLR (▲), rate of biogas production R (△), VS-biogas yield y (■) and proportion of CH_4 in the biogas (+) in course of time from a thermophilic (55°C) operating 2,5 l Fermenter fed with fodder sugar beets silage, fed batch, 4 charges per day

ausbeuten bei quasi-kontinuierlicher Prozessführung stimmen mit Werten aus Gärtests gut überein. Eine zu hohe Anfangsbelastung und die hieraus resultierende Übersäuerung der Reaktionsmasse kann die Inbetriebnahme des Fermenters verzögern. Die oTS-Biogasausbeute einer Mischung aus Gülle und Energiepflanzen verhält sich annähernd proportional zum oTS-Anteil aus den Einzelsubstraten. Im Hinblick auf die Ermittlung von Leistungsgrenzen bei der Mono- und Kovergärung sind systematische Belastungssteigerungsversuche notwendig. Wie am Beispiel von Rübensilage Die Auslegung des Fermenters nach der oTS-Raumbelastung sollte substratspezifisch erfolgen und die jeweilige Prozessführung berücksichtigen.

References

Books are indicated by •.

- [1] Weiland, P., Anaerobic waste digestion in Germany - Status and recent developments. *Biodegradation*, 11, 415-421 (2000).
- [2] • N.N.: Biogas, Strom aus Gülle und Biomasse, top agrar Fachbuch Landwirtschaftsverlag Münster-Hiltrup, 2002
- [3] Almasri, M.R., Changes in biogas production due to different ratios of some animal and agricultural wastes. *Bioresource Technology*, 77, 97-100 (2001).
- [4] Misi, S.N. and Forster, C.F., Batch co-digestion of multi-component agro-wastes. *Bioresource Technology*, 80, 19-28 (2001).
- [5] Kaparaju, P., Luostarinen, S., Kalmari, E., Kalmari, J. and Rintala, J., Co-digestion of energy crops and industrial confectionery by-products with cow manure: batch-scale and farm-scale evaluation. *Water Science and Technology*, 45, 275-280 (2002).

- [6] *Heiermann, M.; Plöchl, M.; Linke, B. and Schelle, H.:* Preliminary evaluation of some cereals as energy crops for biogas production. Renewable Energy: Proceedings of the World Renewable Energy Congress VII, 29 June – 05 July 2002, Cologne (D) (ed A.A.M. Sayigh), Pergamon: CD-Version
- [7] *Mähnert, P.; Schelle, H.; Heiermann, M.:* Futtergräser als Kosubstrat für die Biomethanisierung. In: Tagungsband: Biogas und Energielandwirtschaft – Potential, Nutzung, Grünes Gas™, Ökologie und Ökonomie. 18.-19. November 2002 in Potsdam, Bornimer Agrartechnische Berichte 32, Institut für Agrartechnik Bornim.
- [8] *Callaghan, F.J., Wase, D.A.J., Thayanithy, K. and Forster, C.F.,* Continuous co-digestion of cattle slurry with fruit and vegetable wastes and chicken manure. Biomass & Bioenergy,; 22, 71-77 (2002).
- [9] *Krieg, A.; Braun, M; Bugar, R.:* GRAS-KRAFT, Abschlußbericht des Forschungsprojektes, Förderkennzeichen FKV 0026901R4, Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen „Otto von Guericke“ e.V. 1995
- [10] *Abdel-Hadi, M.; Beck, J. Jungbluth, T.:* Methanerträge bei der Kofermentation flüssig siliierter Gehaltsrüben, Landtechnik, 57 (2002), H. 2, S. 96-97
- [11] *Hassan, E.; Weiland, P.:* Untersuchungen zur Vergärung von Futterrübensilage, Förderkennzeichen AZ. 99UM031, Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung, BLE, 2001
- [12] *Ruiz, C; Torrijos, M; Sousbie, P:* The anaerobic SBR process: basic principles for design and automation. Water Science and Technology 43(3), 201-208, 2001.

Author

PD Dr. Bernd Linke
Institut für Agrartechnik Bornim e. V.
Abteilung Bioverfahrenstechnik
Max-Eyth-Allee 100
144690 Potsdam
Tel.: +49/(0)331/5699-110
Fax: +49/(0)331/5496-310
E-Mail: blinke@atb-potsdam.de