

Gülzower Fachgespräche

Band 32

Tagungsband „Biogas in der Landwirtschaft – Stand und Perspektiven“



Bundesministerium für
Ernährung, Landwirtschaft
und Verbraucherschutz



Güzlöwer Fachgespräche, Band 32

Biogas in der Landwirtschaft – Stand und Perspektiven

Tagungsband zum KTBL/FNR-Biogas-Kongress
vom 15. bis 16. September 2009 in Weimar



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

FNR 2009

Herausgeber

Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR)
Hofplatz 1 • 18276 Gülzow
Tel.: 0 38 43 / 69 30-0
Fax: 0 38 43 / 69 30-102
E-Mail: info@fnr.de
Internet: www.fnr.de

Redaktion

Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR)
Abt. Öffentlichkeitsarbeit

Layout und Herstellung

nova-Institut GmbH • 50354 Hürth
www.nova-institut.de/nr

Druck und Verarbeitung

Media Cologne Kommunikationsmedien GmbH • 50354 Hürth
www.mediacolonne.de

Förderung

Erstellt mit finanziellen Mitteln des Bundesministeriums für Ernährung,
Landwirtschaft und Verbraucherschutz (BMELV).

Für die Ergebnisdarstellung mit Schlussfolgerungen, Konzepten und fachlichen Empfehlungen sowie die Beachtung etwaiger Autorenrechte sind ausschließlich die Verfasser zuständig. Daher können mögliche Fragen, Beanstandungen oder Rechtsansprüche u. ä. nur von den Verfassern bearbeitet werden. Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen und dergleichen in dieser Veröffentlichung berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutzgesetzgebung als frei betrachtet und damit von jedermann benutzt werden dürften. Ebenso wenig ist zu entnehmen, ob Patente oder Gebrauchsmusterschutz vorliegen. Die aufgeführten Bewertungen und Vorschläge geben nicht unbedingt die Meinung des Herausgebers wieder.

Alle Rechte vorbehalten.

FNR-Bestellnummer: 400
ISBN: 978-3-942147-00-2

Inhalt

Vorwort	11
1. Plenarvorträge	13
Ergebnisse aus dem aktuellen Biogas-Messprogramm II.	14
<i>Peter Weiland</i>	
Rührwerke in Biogasanlagen – Technik mit zentraler Bedeutung	26
<i>Kay Rostalski</i>	
Wie viel Wärme benötigt ein Biogasfermenter?	37
<i>Ludwig Heinloth</i>	
Das Fermenterkonzept der Rückert NatUrgas GmbH	41
<i>Claus Rückert, Dominic Pfeufer</i>	
Erfahrungen aus der Konstruktion für die Praxis der Firma MT-Energie GmbH	49
<i>Bodo Drescher</i>	
Fermenter-/Technikkonzept der Schmack Biogas AG	54
<i>Thomas Möslinger</i>	
2. Wirtschaftlichkeit	62
Biomasetransport – Was kostet die Logistik von Gülle & Co?	63
<i>Thore Toews</i>	
Welche Faktoren bestimmen die Wirtschaftlichkeit von Biogasanlagen?	76
<i>Gerd Reinhold</i>	

Finanzierung von Biogasanlagen – aus Sicht einer Bank 87
Hendrik Reimer

3. Biologische Prozessführung 97

Mikrobielle Diversität in Biogasreaktoren bei der
Vergärung von nachwachsenden Rohstoffen 98
Michael Klocke, Edith Nettmann, Ingo Bergmann

Was leisten Zusatzstoffe & Hilfsmittel zur
Optimierung der Biogasproduktion? 108
Udo Hölker

Prozessoptimierung – ein Zusammenspiel
von Technik und Mikrobiologie 120
*Andreas Gronauer, Diana Andrade, Christoph Bauer, Mathias Effenberger,
Hauke Heuwinkel, Michael Lebuhn, Carmen Marin-Perez*

4. Umwelt 141

Emissionen bei der Biogasproduktion –
eine Analyse der Umweltrelevanz 142
Joachim Clemens, Carsten Hafermann, Carsten Cuhls

Anbauverfahren für Energiepflanzen –
Auswirkungen auf Boden und Umwelt 148
*Matthias Willms, Detlef Deumlich, Johannes Hufnagel, Frank Reinicke,
Bernhard Wagner, Christine v. Buttlar*

Wie ökologisch ist Biogas? 163
Sven Gärtner

5. Rechtliche Rahmenbedingungen	173
Biogasanlagen – Analyse von Bau und Betrieb aus genehmigungsrechtlicher Sicht	174
<i>Hans-Walter Schneichel</i>	
Biogasanlagen – Analyse von Bau und Betrieb aus vertragsrechtlicher Sicht	181
<i>Florian Valentin</i>	
Biogasanlagen-Analyse von Bau und Betrieb aus vergütungsrechtlicher Sicht	190
<i>Helmut Loibl</i>	
6. Aufbereitung und Nutzung von Gärresten	197
Verfahren und Kosten der Gärrestaufbereitung	198
<i>Sebastian Wulf, Helmut Döhler</i>	
Wie wirken NaWaRo-Gärreste auf den organischen Bodenkohlenstoff?	210
<i>Peter Dominik, Nadine Jäger, Anja Sänger, Heinz Flessa</i>	
Düngewirkung von Gärresten	223
<i>Helmut Döhler, Sven Grebe, Uwe Häußermann</i>	
7. Biogasaufbereitung und -einspeisung	236
Biogaseinspeisung in das Erdgasnetz: neueste Marktentwicklungen im Bereich Gasaufbereitung und Netzeinspeisung	237
<i>Wolfgang Urban</i>	
Praxiserfahrungen bei der Substituierung von Erdgas durch Biomethan in Deutschland	249
<i>Michael Beil</i>	

Biogasanlagen – der Netzzugang aus technischer Sicht 259
Uwe Klaas, Andreas Schrader

8. Rohstoffbereitstellung und -effizienz 266

Optimierter Energiepflanzenanbau für Biogasanlagen. 267
Christoph Strauß

Desintegrationsverfahren – Aufwand und
Nutzen für die Biogaserzeugung 278
*Björn Schwarz, Eberhard Friedrich, Hannelore Friedrich,
Karin Jobst, Marc Lincke*

Biogassubstrate – welche „Exoten“ haben
Potenzial für die Zukunft 289
Armin Vetter

Die Hydrolysephase bei der Vergärung nachwachsender
Rohstoffe – Führt sie zu Effizienzsteigerung? 299
Hans Oechsner, Andreas Lemmer, Daniel Preißler, Simon Zielonka

Qualitätssilage für die Biogasproduktion 314
Christiane Herrmann, Monika Heiermann, Christine Idler

Möglichkeiten zur Optimierung von
Rohstoffmischungen an Beispielen 325
Thomas Amon

9. Technischer Fortschritt 339

Zündstrahl-BHKW – Stand der Technik und Perspektiven
am Beispiel der effektiven Abgasnachverstromung 340
Wolfram Dreier, Kai Liesendahl

Gas-Otto Motor – Stand der Technik und Perspektiven 346
Thomas Elsenbruch

Biogasverstromung in der Brennstoffzelle	365
<i>Peter Landgraf</i>	
Mikrogasturbine – Stand der Technik	373
<i>Tobias Panne, Axel Widenhorn</i>	
Möglichkeiten zur Senkung des Energiebedarfs von Biogasanlagen	380
<i>Andreas Lehner, Mathias Effenberger</i>	
EEG-konforme Abwärmenutzung landwirt- schaftlicher Biogasanlagen	389
<i>Wolfgang Schulz</i>	
10. Kurzbeschreibungen der Posterbeiträge	396
Economic modeling of optimal sites for biogas plants	397
<i>A. Plata, F. Kuhlmann</i>	
Greenhouse Gas Emissions and Mitigation costs in two European Biogas Plants	399
<i>Helmut Döhler, Anke Niebaum, Ursula Roth Thomas Amon, Paolo Balsari, George Friedl</i>	
Vergärung von Zuckerrüben in Biogasanlagen – Lohnt sich das?	402
<i>Stefan Hartmann, Helmut Döhler</i>	
Strategien zur optimierten Einfahrphase batch- betriebener Feststoffvergärungsprozesse	404
<i>Eckhard Kraft, Stefan Sebök</i>	
Übertragung eines Regelalgorithmus zur Prozessstabilität auf großtechnische Anlagen	406
<i>Eckhard Kraft, Laura Weitze, Thomas Haupt</i>	

Effizienzerhöhung von Biogasanlagen durch den Einsatz von hydrolytischen Enzymen	408
<i>Matthias Gerhardt, Robert van den Heuvel</i>	
Grünroggen als Substrat für die Biogasproduktion	410
<i>Ewald Sticksel, Alois Aigner, Georg Salzeder, Joachim Eder</i>	
Veränderte Energiebilanzen bei reduziertem Produktions- mitteleinsatz im Energiepflanzenanbau	412
<i>Kathrin Deiglmayr, Franz Heimler, Maendy Fritz, Matthias Willms</i>	
Integrated evaluation of biogas production at the landscape scale. . .	414
<i>M. Bach, H.-G. Frede, S. Julich, S. Gäth, B. Hundt, O. Ginzler, A. Otte, R. Waldhardt, F. Kuhlmann, A. Plata</i>	
Modelling multiscale effects of energy crop production on phytodiversity	417
<i>O. Ginzler, A. Otte, R. Waldhardt</i>	
Energy balances and greenhouse gas saving potential of energy crop production	419
<i>B. Hundt, St. Gäth</i>	
Nachhaltige Nutzung von Bioenergie im Spannungsfeld von Klimaschutz, Landschaft und Gesellschaft	421
<i>Jens Ibendorf</i>	
Auswirkungen der Biogasproduktion auf Agrarstruktur und Gewässerschutz am Beispiel Niedersachsens	423
<i>Andrea Rothe</i>	
Konservierung von Zuckerrüben im Folienschlauch zur Biogaserzeugung	425
<i>A. Wagner, U. Weber, G. Weber, M. Scholtissek, H. Auerbach, F. Weissbach</i>	
Monofermentation von Maissilagen aus Standorten unterschiedlicher Bodenbeschaffenheit.	427
<i>Gerd-Rainer Vollmer, Andreas Krieg, Garnet Wachsmann</i>	

Biogaserzeugung aus Silomais – CO ₂ -Bilanz für den gesamten Prozess	429
<i>B. Eder, C. Papst, B. Darnhofer, J. Eder, H. Schmid, K.J. Hülsbergen</i>	
Erprobung von Energiefruchtfolgen für D-Südstandorte zur Biogasproduktion	432
<i>Ch. Röhricht, S. Freydank, J. Grunewald, S. Schröder</i>	
Energiepflanzenanbau zur Biogasgewinnung auf ostdeutschen Diluvialstandorten	433
<i>G. Ebel, G. Barthelmes</i>	
Saatzeitoptimierung und Praxiserhebung zum Sorghumanbau – erste Ergebnisse 2008.	435
<i>M. Martin, G. Barthelmes</i>	
Durchwachsene Silphie (<i>Silphium perfoliatum</i> L.) – eine alternatives Koferment	438
<i>Michael Conrad, Andrea Biertümpfel, Armin Vetter</i>	
Sudangras und Mais in Haupt- und Zweitfruchtstellung – Ergebnisse Thüringer Anbauversuche.	440
<i>Andrea Biertümpfel, Michael Conrad, Armin Vetter</i>	
Biogasanlagen und Maisanbau in Brandenburg, Entwicklung von 2005 – 2009	442
<i>Siegfried Grimmert, Hermann Harders, Rudolf Vögel, Jörg Peil</i>	
Signifikante Weiterentwicklung der Biogas-Motorentchnik bzw. deutliche Erhöhung des Wirkungsgrades	444
Die Rolle des Stroms aus Biogas in zukünftigen Energieversorgungsstrukturen	446
EMSE – Energie Management System Eichhof	448
<i>Uwe Hoffstede</i>	

Der Rostocker Aktivitätstest – Entwicklung eines Verfahrens
zur praxisnahen vergleichenden Quantifizierung der
biologischen Aktivität von NawaRo-Biogasfermentern 452
Nils Engler, Michael Nelles, Thomas Fritz

Vorwort

Heinrich de Baey-Ernsten

Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V. (KTBL)

Andreas Schütte

Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR)

Die Erzeugung und Nutzung von Biogas avancierte in der vergangenen Dekade nicht nur zu einem wesentlichen Eckpfeiler unter den erneuerbaren Energien, sondern schuf auch für viele landwirtschaftliche Betriebe und ländliche Regionen neue Perspektiven. Bereits heute ersetzen die mehr als 4.000 Biogasanlagen mit einer elektrischen Leistung von insgesamt über 1.400 MW ein Kernkraftwerk. Zudem speisen bereits mehr als 20 Biogasanlagen eine jährlichen Gasmenge von über 187 Mio. Nm³ Biomethan in Erdgasnetze ein.

Die Bundesregierung stellt sich der Herausforderung des 21. Jahrhunderts und legt mit dem nationalen Energie- und Klimaprogramm den Grundstein für eine umweltschonende, wirtschaftliche und sozialverträgliche Energieversorgung. Hierbei spielen der weitere Ausbau der regenerativen Energien, die gleichzeitige Steigerung der Produktivität und die Effizienz der Energieerzeugung eine wichtige Rolle.

Welchen Beitrag kann Biogas dazu leisten? Welche Perspektiven bietet dieser Energieträger für die Zukunft? Welche Entwicklungen sind notwendig, damit Biogas konkurrenzfähig bleibt? Auf diese Fragen suchten das Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V. (KTBL) und die Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR) während des gemeinsamen Kongresses „Biogas in der Landwirtschaft – Stand und Perspektiven“ am 15. und 16. September 2009 in Weimar kompetente Antworten.

36 Fachreferate und 26 Posterbeiträge zeigten das breite Themenspektrum von der Biogaserzeugung bis hin zur Verwertung und erörterten Aspekte aus den Themenbereichen Biologie, Recht, Ökologie und Technik. Aus Expertensicht bieten gerade der Energiepflanzenanbau, die Vergä-

rungsbiologie und die Biogas-Verwertungstechnik hohes Optimierungspotential. So spielen verbesserte Energiepflanzenanbausysteme und die Nutzung landwirtschaftlicher Koppelprodukte für die nachhaltige Biomassebereitstellung eine wichtige Rolle. Die Prozessbiologie steht vor der Herausforderung, zusätzliche vergärbare Biomasse aus den pflanzlichen Gerüstsubstanzen, z. B. durch Desintegrationsverfahren oder den Einsatz von Enzymen, zu erschließen. Weiter ausbaufähig ist nach Einschätzung der Fachleute die Erhöhung des elektrischen Wirkungsgrades bei der BHKW- und der Mikrogasturbinentechnologie. Zudem eröffnet die Aufbereitung des Biogases auf Erdgasqualität neue Vermarktungswege.

Insgesamt sind sich die Experten einig, dass die Potenziale der Biogaserzeugung und -verwertung noch lange nicht ausgeschöpft sind. Damit Biogas dauerhaft konkurrenzfähig bleibt, müssen Forschung und Entwicklung jedoch weiter vorangetrieben werden.

Das gute Gelingen des Kongresses und die Veröffentlichung dieses Tagungsbandes ist maßgeblich den Referenten geschuldet. Dafür gebührt ihnen unser herzlicher Dank. Der Dank richtet sich aber auch an die Teilnehmer, die den Kongress mit ihrer regen Beteiligung inhaltlich bereicherten.

Ihnen, liebe Leserin und Leser, wünschen wir eine anregende und informative Lektüre und hoffen, dass Ihnen die vorgestellten Ergebnisse aus Forschung und Entwicklung in der Praxis dienlich sein werden.

Anschrift der Autoren:

*Dr. sc. agr. Heinrich de Baey-Ernsten
Hauptgeschäftsführer
Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V. (KTBL)
Bartningstr. 49, 64289 Darmstadt
E-Mail: ktbl@ktbl.de*

*Dr.-Ing. Andreas Schütte
Geschäftsführer
Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR)
Hofplatz 1, 18276 Gülzow
E-Mail: info@fnr.de*

1.

Plenarvorträge

Ergebnisse aus dem aktuellen Biogas-Messprogramm II

Peter Weiland

Johann Heinrich von Thünen-Institut (vTI)

1 Einleitung

Mit der Novellierung des EEG im Jahr 2004 und der Einführung des NaWaRo-Bonus wurden die Rahmenbedingungen für die Erzeugung von Biogas maßgeblich verändert, so dass seither neu errichtete landwirtschaftliche Biogasanlagen überwiegend nachwachsende Rohstoffe verarbeiten und die bis dahin gängige Mitverarbeitung organischer Rest- und Abfallstoffe aus Industrie und Gewerbe fast vollständig an Bedeutung verloren hat. Als Folge stellten sich völlig neue technische und biologische Anforderungen an die Anlagentechnik und Prozessführung, so dass in kürzester Zeit eine Vielzahl neuartiger Lösungsansätze entwickelt werden musste, ohne dass auf Erfahrungen zurückgegriffen werden konnte. Gleichzeitig erfolgte durch neue Anbieter eine starke Diversifizierung der Anlagenkonzepte und Verfahrenskomponenten. Um mehr Transparenz bezüglich des Stands der Technik zu gewinnen, war es Ziel des Biogas-messprogramms zu untersuchen, wie sich die Veränderungen beim Substrateinsatz auf die Anlagenkonzeption und Betriebsweise sowie auf die Funktion, Leistung und Effizienz der Systeme ausgewirkt haben.

2 Vergleich BMP I und II

Ein Vergleich der Ergebnisse des Biogasmessprogramms I (BMP I) aus den Jahren 2001 – 2004 mit den Ergebnissen des Messprogramms II (BMP II) aus den Jahren 2006 – 2008 zeigt, dass hinsichtlich der Substrate, Anlagentechnik, Prozessführung und Gasverwertung ein erheblicher Wandel stattgefunden hat:

- Der Einsatz von Energiepflanzen hat sprunghaft zugenommen.
- Monovergärung von NaWaRos und Trockenfermentation finden zunehmend Anwendung.
- Der Input an Wirtschaftsdünger sinkt auf unter 40 %.
- Der Direkteintrag von Feststoffen wird zur dominierenden Beschickungstechnik.
- Es kommen überwiegend mehrstufige Anlagen zum Einsatz.
- Die hohe Viskosität des Gärguts erfordert den Einsatz neuartiger Rührtechniken.
- Der Eigenstrombedarf der Anlagen steigt infolge des erhöhten Rühr- und Pumpbedarfs.
- Die gleichmäßigere Beschickung der Biogasanlagen ermöglicht eine effizientere BHKW-Auslastung.
- Die elektrischen Wirkungsgrade der BHKWs nehmen deutlich zu.
- Die Nutzung der BHKW-Abwärme für Heiz- und Trocknungszwecke nimmt zu, ist aber weiterhin unzureichend.

3 Substrateinsatz

Der Substrateinsatz hat sich bezüglich der Inputstoffe und hinsichtlich der Konstanz der Substratzusammensetzung wesentlich verändert. Da die Anlagen des BMP I industrielle Abfallstoffe mitverarbeitet haben, die nur temporär verfügbar waren, kam es häufig zu Prozessinstabilitäten infolge des Substratwechsels. Durch die Verwendung von ausschließlich wirtschaftseigenen Substraten wird eine gleichmäßigere Anlagenauslastung erzielt, wodurch biologische Prozessstörungen weitgehend vermieden werden. Der NaWaRo-Bonus verbunden mit dem Technologiebonus für Trockenvergärung hat dazu geführt, dass die nach 2004 errichteten Biogasanlagen mit einem hohen Anteil an Energiepflanzen von durchschnittlich über 60 % betrieben werden bei gleichzeitig starkem Rückgang des Einsatzes von Wirtschaftsdünger (Abbildung 1). Lediglich nur noch $\frac{1}{4}$ der Anlagen setzt mehr als 50 % Wirtschaftsdünger ein, während bereits ca. 15 % ganz ohne Wirtschaftsdünger betrieben werden.

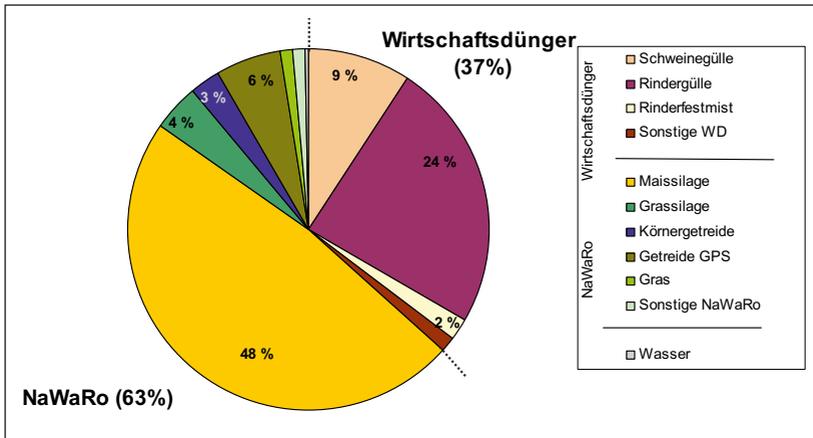


Abb. 1: Mittlere Massenanteile der eingesetzten Substrate

Maissilage ist mit großem Abstand das am häufigsten verwendete Substrat. Daneben finden lediglich Grassilage, Körnergetreide sowie Getreide-GPS und Grünroggen noch relativ häufig Anwendung, wohingegen andere Kulturen, wie Sonnenblumen, Zuckerrüben oder Sudangras nur von untergeordneter Bedeutung sind. Die angestrebte Erweiterung der Fruchtfolgen ist folglich bei Weitem noch nicht erreicht.

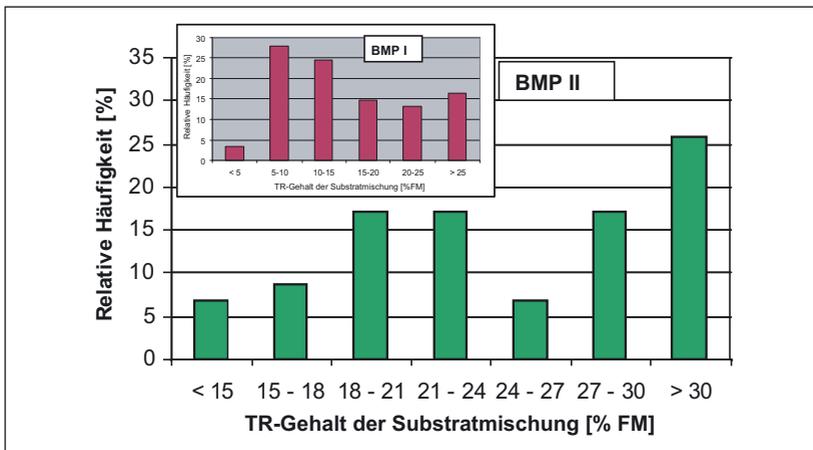


Abb. 2: Trockensubstanzgehalt der Substratmischung im Vergleich zum BMP I

Der Trockensubstanzgehalt der Substratmischungen hat massiv zugenommen. Während beim BMP I die Hälfte der Anlagen einen TR-Gehalt von $< 15\%$ aufwies, ist dieser Anteil auf unter 7% gesunken, wohingegen 85% der Substratmischungen Trockenmassegehalte von über 18% aufweisen (Abbildung 2). Daraus resultieren hohe Trockenmasse- und Stickstoffgehalte im Fermenter.

Als Folge weist das Gärgut, vor allem in der ersten Prozessstufe, eine hohe Viskosität sowie häufig sehr ungünstige Fließeigenschaften auf, die nicht unmittelbar mit dem Trockensubstanzgehalt korrelieren. Die Auswahl und Auslegung von Rührwerken stellt daher hohe Anforderungen an die Planung und machte teilweise die Nachrüstung von weiteren Rührwerken erforderlich.

Der hohe Anteil an Energiepflanzen mit leicht mineralisierbaren organischen Stickstoffverbindungen hat zur Folge, dass der Ammonium-Stickstoffgehalt im Verlauf der Vergärung vereinzelt um mehr als 300% zunimmt und Werte von $4-6\text{ g/l}$ erreicht (Abbildung 3).

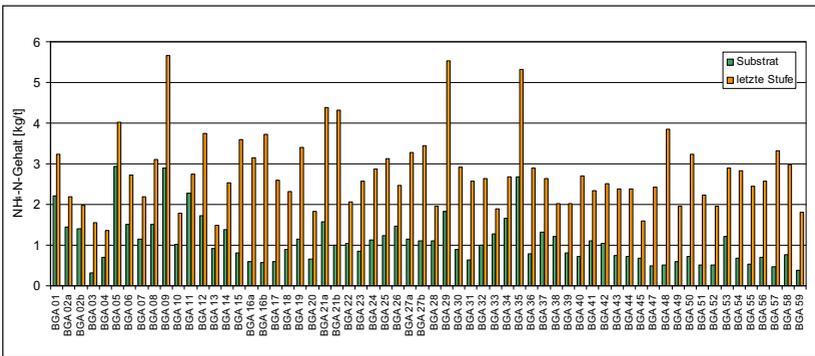


Abb. 3: Änderung des Ammonium-Stickstoffgehalts im Verlauf der Vergärung

Dies führt zu einer schnellen Düngewirkung des Gärrests, jedoch bei einzelnen Anlagen gleichzeitig zu einer Minderung der Abbauleistung infolge Ammoniakhemmung.

4 Veränderungen in der Anlagentechnik und Betriebsweise

Die Anlagentechnik und Betriebsführung hat sich wesentlich verändert. Durch die automatisierte Beschickung der Fermenter über Feststoffdosierer mit Wiegeeinrichtung wird eine gleichmäßigere Belastung der Fermenterbiologie erreicht, was sich positiv auf die Prozessstabilität und Gasausbeute auswirkt. Während beim Messprogramm I über 1/3 der Anlagen nur 1–2 mal täglich beschickt wurde, erfolgt jetzt bei sämtlichen Anlagen eine quasi-kontinuierliche Beschickung mit bis zu 48 Chargen pro Tag.

Bis auf die Entwicklung spezieller Fermenter für die diskontinuierliche oder kontinuierliche Trockenfermentation hat sich bezüglich der Fermenterbauweise nur wenig verändert.

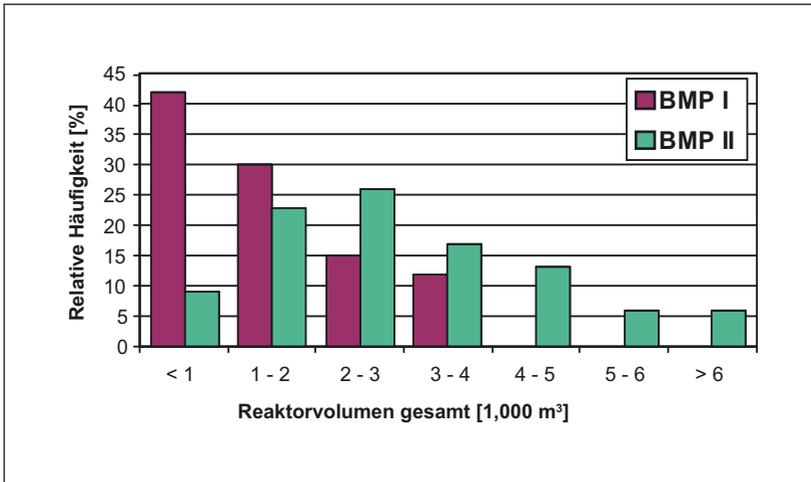


Abb. 4: Veränderung der durchschnittlichen Anlagengrößen gegenüber BMP I

Mit über 90 % Marktanteil dominieren weiterhin stehende durchmischte Reaktoren, wohingegen liegende Pfropfsysteme überwiegend in Kombination mit einem vollständig durchmischten Nachgärer Anwendung finden. Deutlich verändert hat sich das installierte Reaktorvolumen der Anlagen hin zu größeren Volumina. Während 2/3 der heutigen Anlagen über ein Reaktorvolumen von mehr als 2.000 m³ verfügen, lag dieser Anteil beim BMP I nur bei 27 % (Abbildung 4).

Trotz der für den NaWaRo-Abbau erforderlichen langen Fermenterweilzeiten konnte das pro kW_{el} notwendige spez. Arbeitsvolumen vermindert werden, was auf eine deutliche Effizienzverbesserung hinweist. Während aktuell die Mehrheit der Anlagen ein spez. Arbeitsvolumen von unter $6 \text{ m}^3/\text{kW}_{\text{el}}$ aufweist, lag bei der vorherigen Erhebung dieser Wert noch bei ca. $8 \text{ m}^3/\text{kW}_{\text{el}}$ (Abbildung 5).

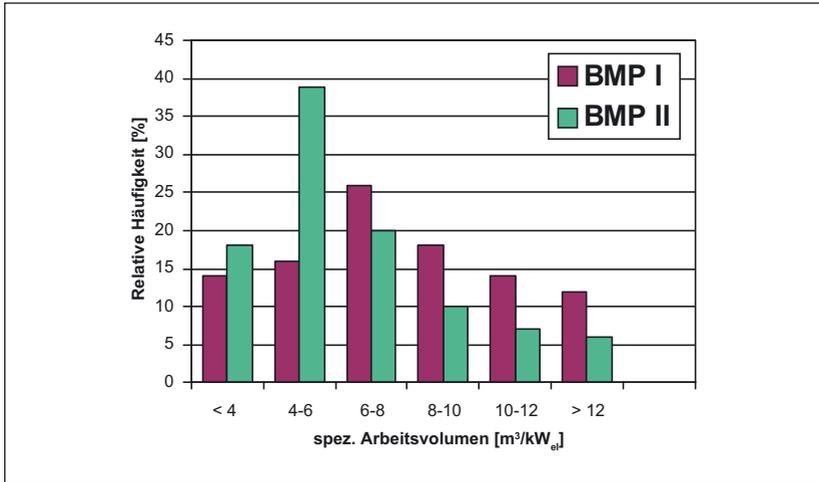


Abb. 5: Spezifisches Arbeitsvolumen pro kW_{el}

Wesentlich verändert hat sich aufgrund der hohen Feststoffanteile im Zulauf die Rührtechnik, die bezüglich der Funktion, Leistung und Effizienz von Biogasanlagen zunehmend eine Schlüsselfunktion einnimmt.

Um die gestiegenen Anforderungen an die Rührtechnik zu erfüllen, werden vielfältige neu entwickelte Rührsysteme eingesetzt, die sich vor allem in Drehzahl, Rührerdurchmesser und Rühreranordnung unterscheiden (Abbildung 6). In der Regel müssen 2 – 4 Rührwerke pro Fermenter eingesetzt werden, um eine ausreichende Durchmischung ohne Bildung von Schwimm- und Sinkschichten zu erreichen. Dabei dominieren zunehmend Tauchmotorrührwerke, die mit langsam laufenden Großflügeln ausgestattet sind und häufig in Kombination mit anderen Rührwerkstypen oder schnelllaufenden Tauchmotorrührwerken betrieben werden.

In der Ausgestaltung der Prozessführung hat es eine deutliche Verschiebung hin zu mehrstufigen Anlagen gegeben. Während in der Vergangen-

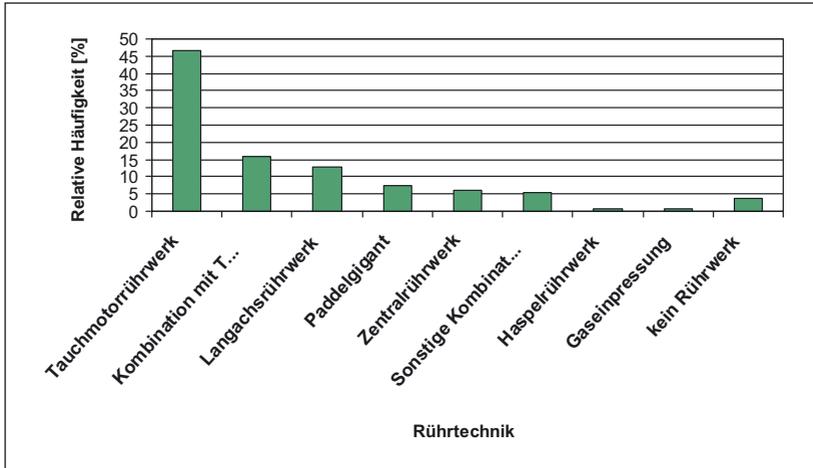


Abb. 6: Einsatzhäufigkeit verschiedener Rührtechniken

heit die einstufigen Anlagen dominierten, finden jetzt bei über 60 % der Anlagen mehrstufige Systeme Anwendung, um eine bessere energetische Substratausnutzung zu erreichen. Im Vergleich zu den einstufigen Anlagen werden diese mit wesentlich längeren Verweilzeiten betrieben, um eine möglichst vollständige energetische Ausnutzung der Gärsubstrate zu erreichen (Abbildung 7).

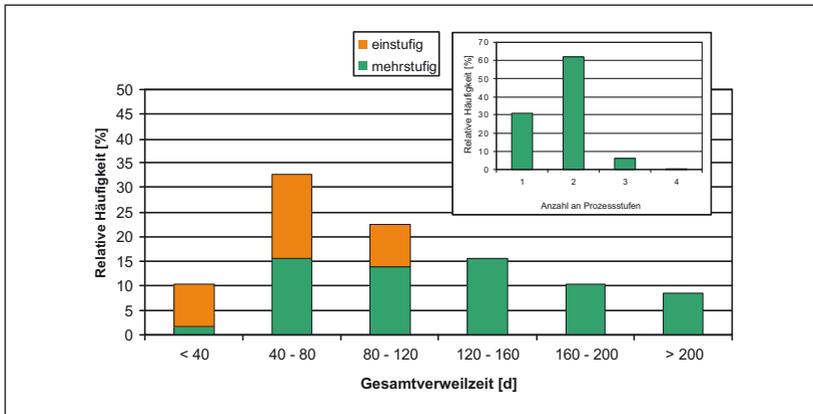


Abb. 7: Anzahl der Prozessstufen und Gesamtverweilzeit

Während die einstufigen Anlagen vorzugsweise mit Verweilzeiten unter 80 Tagen betrieben werden, beträgt die Verweilzeit der mehrstufigen Anlagen überwiegend mehr als 80 Tage. Mehrstufig betriebene Anlagen weisen daher eine bis zu 10 % höhere Methanausbeute auf.

Unbefriedigend ist, dass bundesweit nur etwa 30 % der neu errichteten Anlagen über ein gasdichtes Gärrückstandslager verfügen. Damit hat sich der Anteil der abgedeckten Gärrestlager gegenüber dem BMP I zwar verdreifacht, aber noch immer leisten viele Anlagen keinen ausreichenden Beitrag zum Klimaschutz (Abbildung 8).

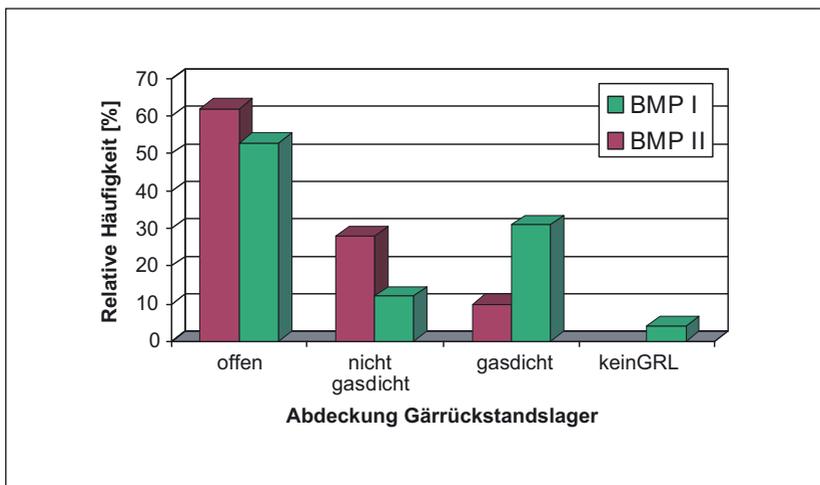


Abb. 8: Relative Häufigkeitsverteilung in Bezug auf die Abdeckung des Gärreststandslagers

Erhebliche technische und betriebliche Fortschritte wurden bei der Gasverwertung in Blockheizkraftwerken erzielt.

Aufgrund des ausschließlichen Einsatzes von Roh- und Reststoffen aus der Landwirtschaft konnte eine gleichmäßigere Gasproduktion und eine höhere Auslastung der BHKWs erreicht werden. Über 70 % der BHKWs erzielen mehr als 8.000 Betriebsstunden, allerdings werden von nur 40 % der Anlagen mehr als 8.000 theoretische Volllaststunden erreicht. Das weist darauf hin, dass bezüglich der Anpassung der BHKW-Leistung an die Biogasproduktionskapazität der Biogasanlage noch ein erhebliches Optimierungspotential besteht (Abbildung 9).

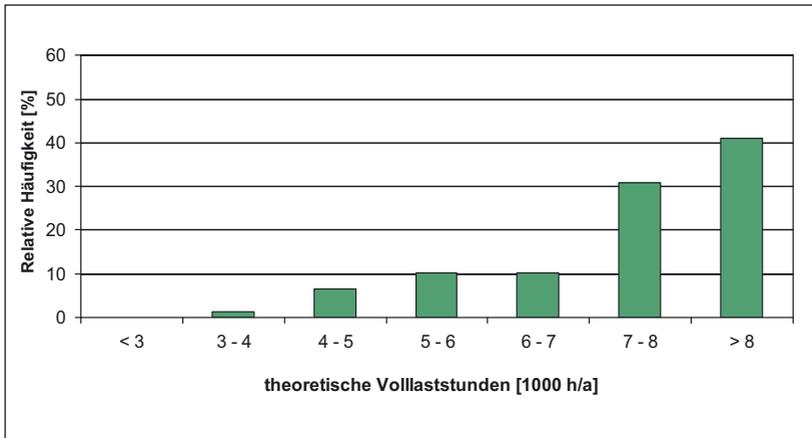


Abb. 9: Theoretische Volllaststunden der BHKW-Aggregate

Feldmessungen haben gezeigt, dass über 20 % der BHKWs Wirkungsgrade von über 40 % erreichen, womit sich der Anteil an hocheffizienten BHKWs gegenüber dem BMP I verdoppelt hat. Gleichzeitig ist jedoch zu beachten, dass ca. 60 % der Anlagen Wirkungsgrade von unter 38 % erreichen, so dass auch hier noch eine deutliche Steigerung der Effizienz möglich erscheint (Abbildung 10).

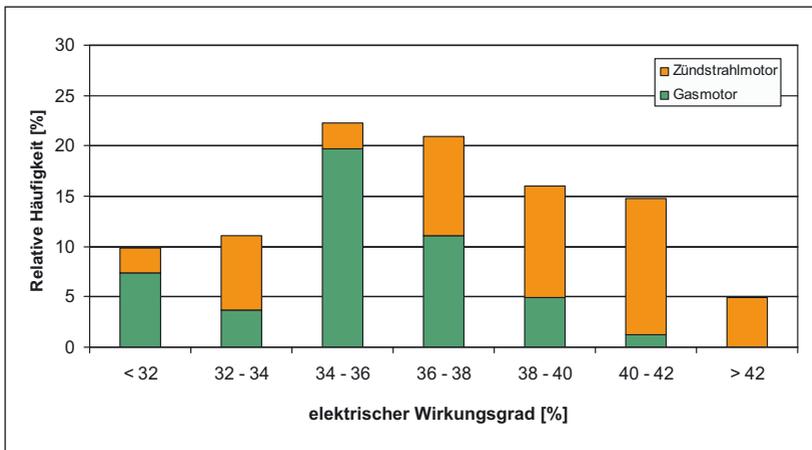


Abb. 10: Durch Feldmessung ermittelte elektrische Wirkungsgrade der BHKW's

Vieles weist darauf hin, dass durch eine bessere Wartung der Motoren und eine verbesserte Gasqualität, z.B. durch aktive Trocknung des Gases, höhere elektrische Wirkungsgrade erreichbar sind.

Zur bedeutsamsten Schwachstelle der untersuchten Anlagen gehört die unzureichende Wärmenutzung außerhalb der Biogasanlage. Zwar ist der Anteil der Biogasanlagen, welche die anfallende Wärme ausschließlich zur Beheizung des Biogasprozesses nutzen, von ursprünglich 80 % auf 10 % gesunken, dennoch wird lediglich bei 10 % der Anlagen mehr als die Hälfte der potentiell verfügbaren Wärme Fremdnutzern zugeführt (Abbildung 11).

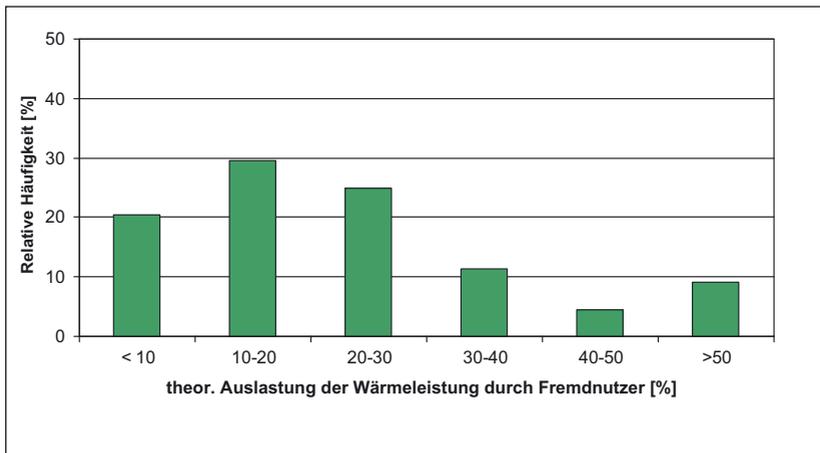


Abb. 11: Auslastung der theoretischen BHKW-Wärmeleistung durch Fremdnutzer

Dabei handelt es sich fast ausnahmslos um Anlagen, die über ein Nah- bzw. Fernwärmenetz Wärme zur Beheizung von Wohngebäuden bereitstellen.

5 Effizienzverbesserungen

Die Ergebnisse des Messprogramms zeigen, dass entlang der gesamten Verfahrenskette, d. h. vom Substratanbau bis hin zur Gärrestverwertung, noch vielfältige Möglichkeiten für Effizienzverbesserungen bestehen. Besonders zielführend sind Optimierungsmaßnahmen vor allem in folgenden Bereichen:

- **Silo und Dosierer:** Verminderung von Veratmungsverlusten durch Vermeidung des Eintrags von Sauerstoff und Bildung von Hefen
- **Fermenter:** Einsatz mehrstufiger Verfahren mit ausreichender Verweilzeit zur besseren Ausnutzung des verfügbaren Energiepotenzials
- **Rührwerke:** Gezielte Anpassung an die stofflichen Bedingungen im Fermenter zwecks Minderung des Eigenstrombedarfs und zur Vermeidung von Prozessstörungen
- **Prozess:** Zugabe von Mikronährstoffen zur Verbesserung der Raumabbauleistung
- **Gärrückstandslager:** Gasdichte Abdeckung unter Ausnutzung des Gärrestpotentials
- **BHKW:** Bessere Anpassung der installierten BHKW-Leistung an die Biogasproduktionskapazität der Anlage; Einsatz von BHKWs mit hohem elektrischen Wirkungsgrad
- **Wärmenutzung:** Ganzjährige Fremdnutzung der anfallenden Überschusswärme
- **Betrieb:** Verbesserung des Betriebsablaufs zwecks Minderung des Aufwands für Routinearbeiten

Um einen energieeffizienten und in wirtschaftlich-technischer Hinsicht erfolgreichen Anlagenbetrieb zu erreichen, muss bereits bei der Anlagenplanung das Umfeld berücksichtigt werden. Vor allem muss auf einen effizienten Energiepflanzenanbau geachtet werden, da die Gasgestehkosten bis zu 50 % von den Substratkosten bestimmt werden. Bei Berücksichtigung der geschilderten Maßnahmen zur Effizienzverbesserung stellt Biogas einen der effizientesten Wege zur Erzeugung und Nutzung erneuerbarer Energie dar.

6 Fazit

Die Ergebnisse des Biogas-Messprogramms II zeigen, dass hinsichtlich der Funktion, Leistung und Betriebssicherheit große Unterschiede zwischen den einzelnen Anlagen bestehen und insgesamt noch ein erhebliches Optimierungspotential zur Verbesserung der Prozessleistung verfügbar ist. Gegenüber den Ergebnissen des Biogas-Messprogramms I wurden insgesamt deutliche Verbesserungen bezüglich der Effizienz und Funkti-

onssicherheit erzielt, dennoch sind weitere Anstrengungen notwendig, um die Schwachstellen der Anlagen zu beseitigen. Durch eine fehlerhafte verfahrenstechnische Auslegung, aber auch durch unzureichende Materialqualitäten, waren häufig Nachrüstungen und Reparaturen notwendig, die zu Betriebsunterbrechungen führten und sich nachteilig auf die Wirtschaftlichkeit des Anlagenbetriebs auswirkten. Unbefriedigend ist fernerhin, dass bei der Anlagenkonzeption Aspekte des Klimaschutzes häufig unberücksichtigt blieben, obgleich die Förderung der Biogasnutzung durch das Erneuerbare Energien Gesetz insbesondere im Interesse des Klima- und Umweltschutzes erfolgt.

Die Ergebnisse des Biogas-Messprogramms geben vielfältige Hinweise auf Maßnahmen zur Verbesserung der Verfahren und Betriebsweise von Biogasanlagen und zeigen, bei welchen Funktionseinheiten besonders auf Schwachstellen zu achten ist. Gleichzeitig dokumentieren die Ergebnisse des Biogasmessprogramms, dass schnelle technologische Fortschritte erreichbar sind. Die Verfahrensentwicklung und Projektierung sollte zukünftig allerdings stärker systematisiert werden und unter mehr Berücksichtigung verfahrensspezifischer Basisinformationen erfolgen.

Der angestrebte weitere Ausbau der Biogaserzeugung setzt voraus, dass die Qualität der Anlagentechnik sowie die Betriebssicherheit und Effizienz der Gaserzeugung verbessert werden und die Umweltbelastung durch Emission klimawirksamer Spurengase weiter vermindert werden.

7 Literatur

- Gemmeke, B., Rieger, C., Weiland, P. (2009) Biogas-Messprogramm II. Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe (Hrsg.), Gülzow, 168 S.
- Weiland, P., et al (2005) Ergebnisse des Biogas-Messprogramms. Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe (Hrsg.), Gülzow, 163 S.

Anschrift des Autors:

*Dir. u. Prof. Dr.-Ing. Peter Weiland
Johann Heinrich von Thünen-Institut (vTI)
Institut für Agrartechnologie und Biosystemtechnik
Bundesallee 50, 38116 Braunschweig
E-Mail: peter.weiland@vti.bund.de*

Rührwerke in Biogasanlagen – Technik mit zentraler Bedeutung

Kay Rostalski
KSB AG

Eine erhebliche Anzahl der in Deutschland betriebenen Biogasanlagen arbeiten derzeit ohne positives Betriebsergebnis. Dies ist in vielen Fällen auf mangelnde Effizienz der Anlagen zurückzuführen.

Als Effizienz wird im Allgemeinen das Verhältnis aus Nutzen zu Aufwand bezeichnet. Ist also der stoffliche bzw. energetische Aufwand bei vorgegebenem Nutzen zu hoch, kann eine Biogasanlage trotz funktionierender Verfahrenstechnik nicht wirtschaftlich arbeiten.

Der Nutzen einer Biogasanlage ist definiert durch die installierte elektrische Anschlussleistung des BHKW. Entscheidend für den wirtschaftlichen Erfolg sind neben den Investkosten der *energetische* und *stoffliche Aufwand* welcher zur Erzielung der Nutzleistung betrieben werden muss.

1 Energetischer Aufwand

Eine der wichtigsten beschreibenden Größe zur Beurteilung des energetischen Aufwandes ist der Eigenenergieverbrauch der gesamten zur Erzeugung der Nutzleistung benötigten Anlagentechnik. Dieser Parameter beschreibt also direkt, neben anderen Größen, die Qualität einer Anlage.

Eines der größten Potentiale zur Senkung des Eigenenergieverbrauches bietet derzeit die Optimierung der Rührtechnik. Dies ist sehr häufig vor allem in landwirtschaftlich geprägten Anlagen zu beobachten. Hintergründe sind dabei oft fehlendes Fachwissen zur Vergleichbarkeit von Rührwerken und Rührergebnissen.

1.1 Wirtschaftlichkeit von Rührwerken

Grundsätzlich bestehen Rührwerke aus Antriebseinheit (Motor) und der Hydraulikeinheit (Propeller). Auch hier gilt für die Effizienz die Beantwortung der Frage: Welcher Nutzen kann mit welchem energetischen Aufwand erzeugt werden?

Sehr oft werden in der praktischen Arbeit zum Vergleich von Rührwerken lediglich die elektrischen Bemessungsleistungen P_2 betrachtet, also der energetische Aufwand. Dieser sagt aber nichts über den Nutzen des Rührwerkes aus, sondern gibt lediglich an welche Leistung maximal vom Motor abgegeben werden kann. Eine Aussage, wie viel von dieser Leistung aber dann in ein Rührergebnis umgewandelt werden kann, wird damit nicht getroffen.

Zum Verständnis sei hier das Beispiel einer Pumpe aufgeführt. Bei einer Pumpe wird zunächst der Nutzen in Form der Förderhöhe und der Fördermenge vorgegeben. Dann wird die Pumpe gemäß ihrer Kennlinie ausgelegt. Daraus ergibt sich in Abhängigkeit zur Motorkennlinie eine benötigte Leistungsaufnahme im Betriebspunkt. Dies entspricht dann dem Aufwand.

Bei der Beurteilung der Effizienz von Rührwerken muss ein Maß für den Nutzen, also das Rührergebnis, herangezogen werden.

Entscheidend für die Beurteilung der Rührwirkung von horizontalen Propellertauchmotorrührwerken ist nicht die Bemessungsleistung der Antriebseinheit, sondern die Kraft die mit Hilfe des Antriebes durch die Hydraulikeinheit erzeugt wird, um das Medium in horizontaler Richtung nach vorn zu beschleunigen. Diese Kraft wird als Axialschub bezeichnet.

Grundsätzlich gilt: Sollen zwei unterschiedliche Propellerrührwerke gleichen Rührerfolg erzielen, muss herstellerunabhängig die gleiche hydraulisch wirksame Kraft über gleiche Zeiträume in das Medium eingetragen werden. Leisten zwei Tauchmotorrührwerke gleichen Axialschub, so ist zeitunabhängig auch das Rührergebnis gleich. (Nutzen = Rührergebnis = Axialschub)

Daraus ergibt sich, dass die Qualität bzw. Effizienz eines Rührwerkes maßgeblich davon abhängt, wie viel elektrische Leistung aus dem Netz entnommen werden muss, um einen bestimmten Axialschub zu erzeugen. (Aufwand = aufgenommene Leistung im Betriebspunkt P_1) Die Beurteilung, ob ein Rührwerk effizient arbeiten kann, wird durch das Schub/Leistungsverhältnis beschrieben.

Effizienz eines Rührwerkes = Axialschub/aufgenommener Leistung im Betriebspunkt

Axialschub ist eine messbare Größe, deren Ermittlung nach der Iso-Norm 21630 „Pumps Testing Submersible mixers for wastewater and similar applications“ erfolgt und von allen führenden Herstellern anerkannt wird.

Die Grundlage dafür bildet eine Spannungsmessung an einer Kraftmessdose. Die Berechnung erfolgt dann über die Hebelgesetze. In der Abbildung 1 ist ein prinzipieller Versuchsaufbau für diese Art Messungen dargestellt.

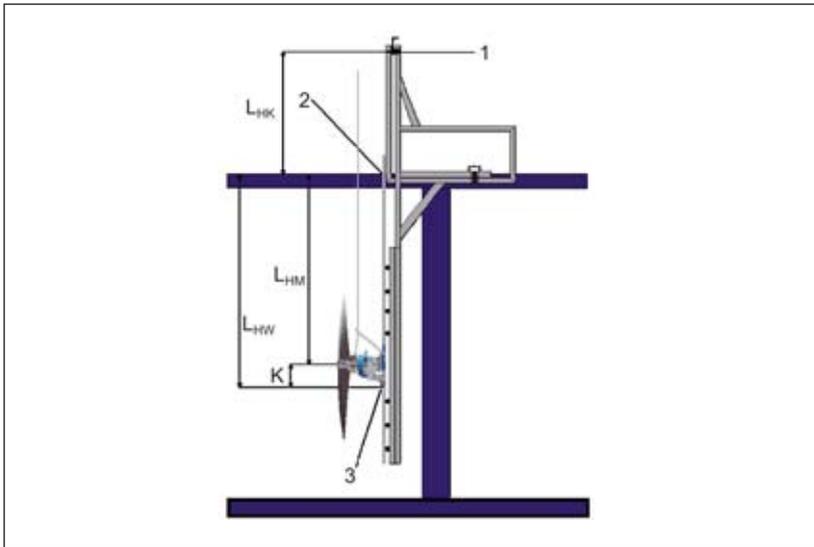


Abb. 1: Messanordnung Schubmessung

Rührwerke mit sehr gutem Schub/Leistungsverhältnis sind gekennzeichnet durch große Propeller. Der Propellerdurchmesser ist die entscheidende Größe für den Wirkungsgrad des Propellers. Aus der Impulsüberlegung folgt, dass es energetisch günstiger sein muss, wenn eine große Wassermenge wenig beschleunigt wird, als umgekehrt eine kleine Wassermenge stark. Vereinfacht ausgedrückt ist das auf die abnehmenden Verlus-

te durch geringere Abströmgeschwindigkeiten zurückzuführen. Natürlich können aufgrund von Festigkeitsbetrachtungen die Propeller nicht unendlich groß gewählt werden.

1.2 Praxisbeispiel

Zur Erläuterung des Zusammenhanges soll ein Praxisbeispiel dienen. Für einen Fermenter mit den kennzeichnenden Parametern:

Durchmesser: 23,0 m
 Füllhöhe : 6,0 m
 Substrat: Gülle, Mais, Gras
 TS-Gehalt: 10 %
 Fließverhalten: beschreibbar nach Ostwald – de Waele

soll ein definiertes Rührergebnis zu erreichen sein. Dafür ist eine Kraft von ca. 8500 N Axialschub unabhängig vom eingesetzten Rührwerk notwendig. Diese Kraft soll im Fall 1 mit einem schnelllaufenden Tauchmotorrührwerk (KSB, Amamix) erzeugt werden. Im Fall 2 wird dann ein langsam laufendes Rührwerk (KSB, Amaprop) gegenüber gestellt. In beiden Fällen muss insgesamt eine Kraft von mindestens 8500 N erzielt werden.

Dies bedeutet für das Beispiel den Einsatz von entweder vier Schnellläufern (Amamix) oder zwei Langsamläufern (Amaprop).

Tab. 1: Rührwerkseffizienzen im Vergleich

Bauart	Anzahl	Typ	Gesamt-schub	Leistung P _I	Betriebs-stunden	Investition	Energieverbrauch
Schnell-läufer	4	I	8.500 N	41,88 kW	30 min/h	4 x 5.000 € =20.000 €	20,94 kWh/h
Langsam-läufer	2	II	8.500 N	11,04 kW	30 min/h	2 x 14.000 € = 28.000 €	5,52 kWh/h
Differenz							15,42 kWh/h

Energieeinsparung mit Langsamläufer ca. 73 %

Betrachtet man dann die Summe der aufgenommenen Leistungen im Betriebspunkt, erkennt man, dass die vier Schnellläufer gegenüber den zwei Langsamläufern ca. vier mal so viel Energie aufnehmen müssen, um ein gleiches Rührergebnis erzielen zu können.

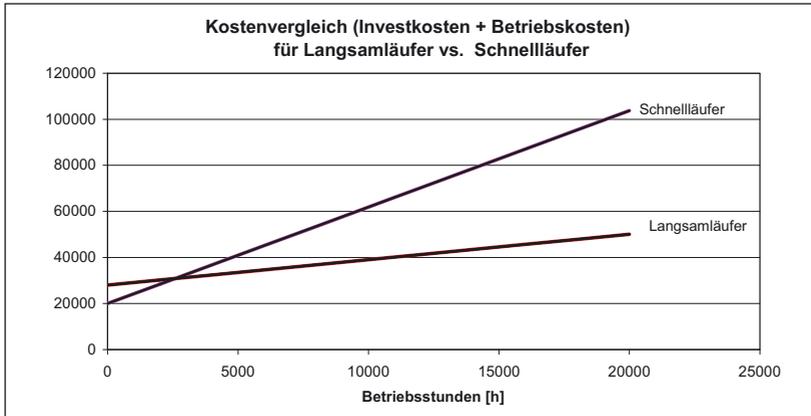


Abb. 2: Darstellung Amortisation Langsamläufer vs. Schnellläufer

Wie in der Abbildung 2 erkennbar bedeutet dies, dass sich die Anschaffung von Langsamläufern für das verwendete Beispiel bereits nach ca. 3000 Betriebsstunden amortisiert hätte.

2 Stofflicher Aufwand

Neben dem energetischen Aspekt spielt die stoffliche Effizienz eine wesentliche Rolle bei der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung einer Biogasanlage. Das Ziel besteht darin, möglichst viel des in dem Substrat vorhandenen Biogasbildungspotentials für die energetische Verwertung nutzbar zu machen. Denn jeder Liter Methan verbliebenes Biogasbildungspotential, welches über den Gärrest ungenutzt die Anlage verlässt, bedeutet wirtschaftlichen Verlust. Untersuchungen zeigen gerade an dieser Stelle ein erhebliches Optimierungspotential.

Ziel jeder Optimierung zur besseren Stoffumsetzung, ist es innerhalb der Prozesskette in jedem Prozessschritt optimale Reaktionsbedingungen zu erreichen. Neben anderen Möglichkeiten, wie Aufschlussverfahren,

Hochtemperaturverfahren oder dem Einsatz spezieller Substrate, bietet auch die Rührtechnik enorme Potentiale, der in der Praxis sehr häufig keine Relevanz zukommt. Die einzelnen unterschiedlichen verfahrenstechnischen Maßnahmen machen andere Optimierungsansätze keineswegs überflüssig, sondern steigern die Summe der positiven Effekte. Am Ende dieses Optimierungsprozesses stehen Anlagen mit kleineren Reaktionsvolumina, die in kürzerer Zeit mehr Biogasbildungspotential aus dem Substrat nutzbar machen.

2.1 **Vorraussetzung für optimale Reaktionsbedingungen**

Auf die Vermeidung der Auswirkungen von Schwimmschlammdecken soll an dieser Stelle nicht näher betrachtet werden. Ebenso wird auf die Erzielung einer homogenen Temperaturverteilung in diesem Vortrag nicht näher eingegangen. Beide Parameter haben jedoch unbestritten einen erheblichen Einfluss auf die Verfahrenstechnik von Anaerobreaktoren.

Anaerobe Fermenter werden, wie in der biologischen Reaktionstechnik üblich, für eine mittlere Raumbelastung ausgelegt. Das bedeutet, dass davon ausgegangen wird, dass unabhängig von der Größe des Reaktors an jedem diskreten Punkt eine vergleichbare Fracht vorliegen sollte, die dann in einer festgelegten theoretischen Aufenthaltszeit in die Reaktionsprodukte umgewandelt werden soll. Ausgangspunkt für diese Überlegungen sind in der Regel Versuche, die im Technikums- bzw. Pilotanlagenmaßstab durchgeführt Anhaltspunkte geben sollen, wie viel eines Substrates pro Volumeneinheit und Zeit unter definierten Randbedingungen abgebaut werden kann.

Häufig ist dann vor allem bei großen Reaktionsvolumina zu beobachten, dass diese im Forschungsmaßstab gewonnenen Werte nicht mit den Beobachtungen der Praxis übereinstimmen. Notwendige rechnerische Aufenthaltszeiten deutlich mehr als 100 Tage bei vergleichsweise gut abbaubaren Substraten müssen nicht selten realisiert werden, um die Substrate befriedigend ausfaulen zu können.

Die Abweichungen zu den in den Forschungseinrichtungen gewonnenen Erkenntnissen liegen unter anderem auch an den Stofftransportprozessen.

Betrachten wir den Reaktor zunächst als Batchsystem, wird das abzubauen Substrat in einer festgelegten Menge dem Reaktor zum

Zeitpunkt Null punktförmig zugegeben. An dieser Stelle kann die Reaktion erfolgen, da an diesem diskreten Punkt genügend Ausgangsstoffe vorliegen. Der Stoffwechsel der Mikroorganismen sorgt für die gewünschte Stoffumwandlung. Die Reaktion kann aber nur da stattfinden, wo Substrat an aktive Zentren zur Stoffwandlung gelangen. Dabei korreliert die Anzahl der aktiven Zentren mit der Geschwindigkeit mit welcher die Menge des Substrates abgebaut werden kann. Umgesetzt wird theoretisch solange bis alles organisch verwertbare Material zum Zeitpunkt Eins umgesetzt wurde. Die Zeit, die dafür benötigt wird, ist durch die Reaktionskinetik vorgegeben.

Je weiter weg sich der Betrachtungspunkt von der Fütterung befindet, umso größer wird der Einfluss der Transportprozesse auf die Stoffumwandlungsgeschwindigkeit und damit auf die tatsächlich notwendige rechnerische Verweilzeit, um einen bestimmten Abbaugrad zu erreichen. (Stoffumwandlungsgeschwindigkeit = Transportgeschwindigkeit + Reaktionsgeschwindigkeit) Denn die Reaktorbereiche, welche nicht mit Substraten versorgt werden, können auch keinen Beitrag zum Abbau der Menge Substrat leisten. Die Folge ist eine längere notwendige Verweilzeit durch lokal deutlich erhöhte bzw. zu geringe Raumbelastung. Ziel ist es also, dafür zu sorgen, dass alle verfügbaren Mikroorganismen Zugang zu den Ausgangsstoffen in der optimalen Raumlaster der Reaktion erhalten, da sie nur dann die Stoffe auch optimal umsetzen können.

In natürlichen Umgebungen erfolgen die Transportprozesse durch konvektive und migrative Effekte. Dies würde für große Fermenter unrealistische Verweilzeiten bzw. Reaktionsvolumina bedeuten. Deshalb muss zum Zweck des Transportes des Substrates zu den Stoffumwandlungspunkten gerührt werden.

Rührwerke sollten danach ausgelegt werden, welches Fermentervolumen erreicht werden und somit nutzbar gemacht werden kann, insbesondere auch in Hinblick auf die in der Praxis häufig beobachtete Kavernenbildung.

2.2 Kavernenbildung

Gerade bei großen Raumbelastungen und kritischen Substraten wie Hühnertrockenkot, Roggen-GPS oder Grassilage stellt sich ausgeprägt strukturviskoses Fließverhalten ein. Strukturviskos heißt: mit zunehmenden

der Schergeschwindigkeit nimmt die dynamische Viskosität ab. Dabei ist es wichtig festzustellen, dass Viskosität kein Wert sondern eine Funktion ist. Zu jeder induzierten Scherrate stellt sich eine zugehörige Viskosität ein.

Scherraten werden beispielsweise durch die Bewegung eines Propellers erzeugt. Im Bereich des Propellers wird also durch diesen Effekt das Substrat scherverdünnung. Wählt man den Betrachtungspunkt in größerer Entfernung von diesem Vortriebsorgan, wird die Schergeschwindigkeit deutlich geringer und damit die sich lokal ergebende Viskosität größer. Dadurch ändert der Propeller sein Förderverhalten wesentlich. Er fördert zunehmend nicht mehr unverdünntes Material in axialer Richtung sondern nutzt das vorverdünnte Substrat und saugt es radial wieder an. Dadurch entstehen propellernahe Bereiche, in welchen das Substrat mit hohen Geschwindigkeiten in nur vergleichsweise kleinem Volumen „im Kreis“ transportiert wird. Dies wird als Kaverne bezeichnet und führt dazu, dass das Substrat nicht im gesamten Fermenter verteilt werden kann. In der Praxis wird dabei „...von Rührwerken im eigenen Saft“ gesprochen.

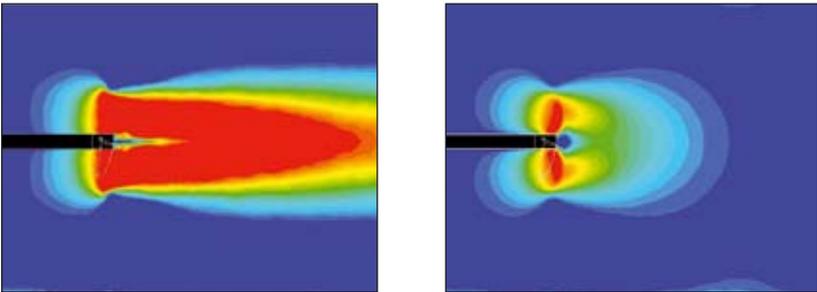


Abb. 3 und 4: Quelle: Hr. Springer, KSB Frankenthal

Abbildung 2 zeigt zur Verdeutlichung des Effektes eine CFD-Simulation, in der das Förderverhalten eines Modellpropellers in Wasser dargestellt ist. Zum Vergleich dazu ist in Abbildung 3 zu erkennen, wie sich das Förderverhalten desselben Propellers in ausgeprägt strukturviskosen Medien ändert. Die Farbbereiche markieren dabei bestimmte Geschwindigkeiten, wobei blau niedrigen und rot hohen Geschwindigkeiten entspricht. Die CFD-Simulationen wurden durch Hr. Peer Springer, KSB in Frankenthal erstellt und zur Verfügung gestellt. Da jede Art Rührwerk in ausgeprägt strukturviskosen Fließverhalten bei hohen Raumbelastungen mehr oder weniger ausgeprägt Kavernen erzeugen wird, kann Substrat

in diesen Hochlastreaktoren immer nur innerhalb dieser Kavernen transportiert werden. Deshalb besteht das Know-How eines Rührwerksherstellers darin, die Kaverne möglichst groß zu gestalten bzw. im Idealfall auf den gesamten Fermenter auszudehnen. Siehe dazu Abbildung 5 bzw. Abbildung 6.



Abb. 5: Kaverne lokal arbeitende Rührwerke



Abb. 6: Kaverne Rührwerkskorrespondenz

Nur wenn dies zutrifft, ist ein Stofftransport in alle Bereiche des Fermenters möglich. Grundvoraussetzung dafür ist eine optimale Positionierung.

2.3 Optimale Positionierung

Arbeiten Rührwerke lediglich lokal in einer Kaverne, wird Substrat nur durch passiven Transport im Fermenter verteilt. Dies bedeutet für nicht erreichte Fermenterbereiche nicht optimale Reaktionsbedingungen, da die Raumbelastung lokal zu hoch oder zu niedrig sein kann bzw. sich keine gleichmäßige Temperaturverteilung einstellt.

Die Positionierung von Rührwerken muss deshalb so gestaltet werden, dass die Rührwerke nicht lokal begrenzt, sondern in Korrespondenz zueinander arbeiten. Das bedeutet: ein Rührwerk wird so positioniert, dass es Substrat zunächst vorverdünnt. Statt dann in einer Kaverne zu fördern, macht es so das Material im Saugbereich für ein oder mehrere andere Rührwerk förderbar. Siehe Abbildung 6.

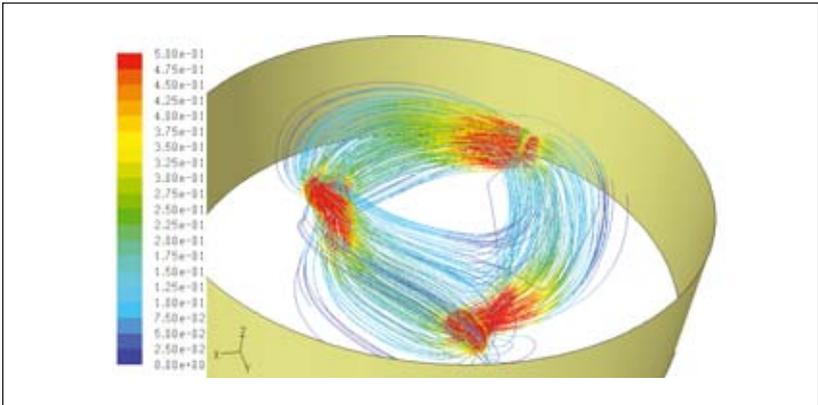


Abb. 7: Strombahnen von Strukturmaterial im Fermenter

Darüber hinaus ist es wichtig so zu positionieren, dass ein schnelles Erfassen der Substrate im Bereich der Fütterungssysteme und der Weitertransport in den gesamten Fermenter erfolgen kann. Durch eine Anordnung in unterschiedlichen Höhen wird Substrat in der Nähe der Aufgabe vom Flüssigkeitsstrom erfasst und, wie in Abbildung 7 dargestellt, durch die Korrespondenz der Rührwerke direkt von der Oberfläche in Richtung Fermenterboden bzw. gesamten Fermenterbereich transportiert.

2.4 Kurzübersicht Versuchsergebnisse einer ausgewählten Anlage

Ausgangspunkt der Versuche auf einer Anlage in der Nähe von Celle war eine ungenügende Ausfaltung bzw. ein deutlich erhöhtes Biogasbildungspotential im Gärrest. Die zweistufige Anlage war mit einer Rührtechnik ausgestattet, die aus einem schnell laufenden Tauchmotorrührwerk und einem Paddelrührwerk im Hauptfermenter bestand.

Zu Beginn der Untersuchungen wurden zunächst die beschreibenden Parameter der Anlage dokumentiert. Hinsichtlich der Relevanz zu diesem Beitrag finden Sie beigefügt eine Auswahl davon:

- Rührtechnik: Schnellläufer (13 kW) + Paddelrührwerk (15 kW)
- Eigenenergieverbrauch Rührtechnik: 287 kWh/d

- Substratverbrauch pro Tag: 25t Maissilage + 4t Roggen GPS + 1 t Hühnertrockenkot
- Biogasbildungspotential im Gärrest: 302 l_n/kg_{oTS}

Danach wurde das schnell laufende Tauchmotorrührwerk durch zwei langsam laufende in optimaler Positionierung im Hauptfermenter ersetzt. Das Paddelrührwerk wurde nicht demontiert, aber in seiner Betriebszeit eingeschränkt. Dem Betreiber wurde es überlassen, die Betriebsparameter der Rührwerke nach seinen Vorstellungen einzustellen. Voraussetzung war jedoch gleicher Rührerfolg. Als integrale Kenngröße dafür wurde das Erzeugen von 530 kW elektrischer Leistung gewählt. Alle relevanten Randbedingungen wurden weitestgehend konstant gehalten.

Folgende Verbesserungen wurden erzielt:

- Eigenenergieverbrauch Rührtechnik: 173 kWh/d
- Substratverbrauch pro Tag: 21 t Maissilage + 3 t Roggen GPS + 1 t Hähnchenmist
- Biogasbildungspotential im Gärrest: 263 l_n/kg_{oTS}

Damit ließ sich an diesem Beispiel nachweisen, dass der Eigenenergieverbrauch der Rührtechnik bei mindestens gleichen Rührerfolg auf ca. 60 % des ursprünglichen Wertes gesenkt werden konnte. Darüber hinaus wurden gegen Ende des Versuchszeitraumes bis zu 5 Tonnen/pro Tag Substrat eingespart. Bestätigt werden die Ergebnisse durch die gegenüber dem Ausgangszustand um 12 % deutlich verbesserte Ausfäulung, die im Gärrest aus dem Endlager nachgewiesen wurde.

Durch intelligente Art der Strömungsführung und effiziente Rührwerke lässt sich bei konstanten Randbedingungen mehr Methan pro Zeiteinheit produzieren, weniger Eigenenergie verbrauchen und der Verschleiß nachgeschalteter Anlagenteile verringern.

Anschrift des Autors:

Kay Rostalski

KSB AG

Trumstr. 93, 06110 Halle/Saale

E-Mail: Kay.Rostalski@ksb.com

Wie viel Wärme benötigt ein Biogasfermenter?

*Ludwig Heinloth
ENERPIPE GmbH*

Das EEG 2009 sieht eine höhere Stromvergütung für Biogasanlagen vor, welche mit mindestens 30 Massenprozent Gülle oder Mist gefüttert werden. Dann erhält der Betreiber einen Bonus in Höhe von 4 Cent pro gelieferte kWh Strom bei einer Anlagenleistung bis 150 kW_{el}. Bis zu einer Anlagenleistung von 500 kW_{el} wird 1 Cent pro gelieferte kWh Strom vergütet. Die Voraussetzungen sind aber die Gleichen.

Das Aufheizen des Frischguts (Gülle, Mist, Substrate, etc.) benötigt einen hohen Anteil der von dem BHKW erzeugten Abwärme. Im Winter ist der Wärmeeaufwand wesentlich größer als im Sommer, da das Frischgut kühler ist und somit mehr Wärme aufnimmt.

Die Wärme aus einer Biogasanlage kann aber in der Regel im Winter am besten genutzt werden. Gerade in dieser Jahreszeit benötigt aber der Fermenter durch Wärmeverluste und Aufheizen von Gülle, Mist und Frischsubstrate einen höheren Anteil an Wärme. Der Wärmeverlust der Fermenter kann durch Einsatz von Dämmung vermindert werden. Bei in Erdreich gebauten Fermenter ist der Wärmeverlust in der Regel geringer. Sollte aber der Fermenter mit Oberflächenwasser in Berührung kommen, kann das Wasser an den Isolierplattenstößen vorbei, direkt an die Fermenteraußenwand gelangen und somit die Wärme von Fermenterwand in das Erdreich leiten. Hier sollte das Wasser über eine Sickerschicht an eine unten liegende Drainage abgeleitet werden.

Ein großer Wärmebedarf wird für einen Gasspeicher aus EPDM-Folie in einfacher Ausführung benötigt. Bei dieser Bauart wird die Wärme über die ca. 5 mm dicke Folie an die Außenluft abgeben. Besonders bei tiefen Temperaturen oder starken Wind ist der Wärmeverlust bei diesen Folienarten besonders hoch. Etwas abgemildert kann der Wärmeverlust durch eine im Fermenter liegende Holzdeckenkonstruktion werden, die zusätzlich mit PUR-Platten bedeckt ist. Diese hindert aber das aufsteigende feuch-

te Biogas nicht daran, an der Folie zu kondensieren und als kaltes Kondensat in den Gärraum zurückzulaufen. Im Gärraum muss wieder eine entsprechende Wärmemenge zugeführt werden. Wesentlich besser eignen sich die sogenannten Tragluftdächer oder Membrandächer. Durch den Luftzwischenraum wird eine relativ gute Dämmwirkung erreicht. Zudem schützt diese Folienart auch vor Überhitzung im Sommer.

Nachfolgendes Anlagenbeispiel zeigt wie viel Wärme eine Biogasanlage im Betrieb benötigt. Um einen Vergleich zu erhalten sind drei Fermentertypen berechnet worden:

- Typ 1a: Membran-Dach mit Folienhöhe 4 m und 8 cm
Behälterdämmung
- Typ 1b: Membran-Dach mit Folienhöhe 4 m und 10 cm
Behälterdämmung
- Typ 2: Einfachfoliendach mit Folienhöhe 4 m und 8 cm
Behälterdämmung
- Typ 3: 30 cm Betondecke mit 10 cm Dämmung und 8 cm
Behälterdämmung

Anlagendaten auf Basis 240 kW_{el} und 260 kW_{th}

Baudaten Vorfermenter:

- Durchmesser 15 m / Höhe 6 m
- Im Erdreich 1 m
- Wanddicke 25 cm
- Wandisolierung 8 cm (Typ 2 10 cm)
- Folienhöhe 4 m (Typ 1 und 2)
- Einfachfolie Holzkonstruktion (Typ 2)
- Betondecke 30 cm (Typ 3)

Baudaten Nachfermenter:

- Durchmesser 18 m / Höhe 6 m
- Im Erdreich 1 m
- Wanddicke 25 cm
- Wandisolierung 8 cm (Typ 2 10 cm)
- Folienhöhe 4 m (Typ 1 und 2)
- Einfachfolie Holzkonstruktion (Typ 2)
- Betondecke 30 cm (Typ 3)

Betriebsdaten Vorfermenter:

- Frischgutmenge 0,7 t/h
- Frischguttemperatur 5 °C
- Gärtemperatur 40 °C
- Außentemperatur -15 °C

Betriebsdaten Nachfermenter:

- Frischgutmenge 0,7 t/h
- Frischguttemperatur 30 °C
- Gärtemperatur 40 °C
- Außentemperatur -15 °C

Ergebnisse nach oben genannten Grunddaten:	Typ 1a mit Membrane Behälter mit 8 cm Dämmung	Typ 1b mit Membrane Behälter mit 10 cm Dämmung	Typ 2 mit Einfachfolie Holzdecke mit 8 cm Dämmung	Typ 3 mit Betondecke 10 cm Dämmung
Wärmeverlust Fermenter	16,1 kW	15,1 kW	28,5 kW	13,0 kW
Wärmeverlust Nachfermenter	21,4 kW	20,2 kW	39,9 kW	17,5 kW
Heizleistung Fermenter	28,6 kW	28,6 kW	28,6 kW	28,6 kW
Heizleistung Fermenter	8,1 kW	8,1 kW	8,1 kW	8,1 kW
Summe	74,2 kW	72,0 kW	105,1 kW	67,2 kW
*Wärmeverbrauch	495.000 kWh	487.000 kWh	620.000 kWh	449.000 kWh

* Jahreswärmeverbrauch bei 12 °C Durchschnittstemperatur und 8600 Stunden Betriebszeit. Die Wärmerückgewinnung durch Sonneneinstrahlung wurde nicht berücksichtigt.

Fazit

Die Darstellung zeigt, dass es bei dem Wärmeverlust der Fermenter besonders auf die Behälterabdeckung ankommt. Durch eine dickere Dämmung kann der Wärmeverlust nur gering verbessert werden. Der geringste Wärmeverlust wird mit vollkommen in das Erdreich eingebaute und mit einer isolierten Betondecke erzielt. Gerade bei Biogasanlagen mit hohem Gülleanteil und Folienspeicher muss im Winter mit einer größeren Heizleistung gerechnet werden. Der Gesamtwärmeverbrauch über das Jahr

gerechnet wirkt sich dabei nicht so stark aus. Bei der Auswahl der Fermenterheizung ist darauf zu achten, dass diese im Winter die höhere Heizleistung bringen kann. Es eignen sich besonders Heizsysteme aus Stahlrohr in Spiralausführung. Dadurch wird das im Rohr laufende Wasser gewirbelt und gewährleistet somit eine optimale Wärmeübergabe an die Biomasse.

Anschrift des Autors:

*Ludwig Heinloth
ENERPIPE GmbH
Ohmstr. 11, 91161 Hilpoltstein
E-Mail: ludwig.Heinloth@enerpipe.de*

Das Fermenterkonzept der Rückert NatUrgas GmbH

*Claus Rückert, Dominic Pfeufer
Rückert NatUrgas® GmbH*

Die Rückert Naturgas GmbH

Die Rückert Naturgas GmbH plant seit über 16 Jahren Biogasanlagen nach dem NatUrgas® Verfahren und hat in dieser Zeit die Anlagenentwicklung stets vorangetrieben. In dieser Zeit sind über 50 Biogasanlagen nach dem EU-weit patentierten NatUrgas® Verfahren von 100 kW bis 2,1 MW geplant, genehmigt und in Betrieb genommen worden. In diesen Anlagen sind über 20 MW elektrische Leistung installiert und über 85 Mio. investiert worden. Rückert NatUrgas® Anlagen finden Sie bereits in den Ländern Deutschland, Österreich, Tschechien und Japan.

Seit 2008 bietet die Rückert NatUrgas GmbH speziell für die Geflügelwirtschaft geplante Anlagen mit bis zu 70 % Hühnertrockenkot an.

1 Einleitung

Vor dem Bau einer neuen Biogasanlage steht der Betreiber/Investor vor der Frage, welches Verfahren für sein Projekt das optimale Kosten- und Nutzenverhältnis darstellt. Oft wird hierbei die Möglichkeit außer Acht gelassen, anstelle einer konventionellen Biogasanlage mit rundem Fermenter eine kompakte Rückert NatUrgas® Anlage mit liegendem Fermenter zu errichten – aus Kostengründen! Im Folgenden soll gezeigt werden, dass neben den Investitionskosten vor allem die Betriebskosten über mindestens 20 Jahre ebenfalls entscheidenden Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit haben und sich ein geringfügig höherer Invest durchaus lohnen kann.

2 Worauf kommt es an: Das richtige Fermenterkonzept

Biogasfermenter mit den jeweiligen Größen und Ausstattungen sollten immer an die individuellen Gegebenheiten vor Ort angepasst sein. Hierbei ist vor allem auf **Verweilzeit, Raumbelastung, Durchmischung** und **TS-Gehalte** zu achten.

2.1 Mischen oder Rühren

Viele der eingesetzten Rührwerkstechniken in Rundfermentern sind lediglich dazu in der Lage, den Reaktorinhalt in eine zirkulierende Bewegung zu bringen oder nur Teilbereiche im Fermenter – z. B. durch horizontal aktive Rührwerke – zu mischen. Die dabei eingesetzten Rührwerkssysteme sind immer ein Kompromiss aus Bewegung/Durchmischung des Fermenterinhalt und dem damit verbundenen Aufwand.

Fakt ist, dass bis zu einem gewissen Grad die Verbesserung der Durchmischung im Fermenter zu einer besseren Biogasertrag bei gleichzeitig geringerer Verweilzeit führt.

2.1.1 Kompromisse bei der Auslegung der Biogasanlage

Normalerweise ist bei der Auslegung einer konventionellen Biogasanlage immer der Kompromiss aus Fermentergröße und eingesetzter Rührtechnik entscheidend. Sind die Fermenter größer, wird durch die längere Verweilzeit ein besserer Gasertrag sichergestellt, jedoch sind die Investitionskosten für Bau und Rührwerke hoch, ebenso wie die Betriebskosten durch viel Rühraufwand des Substrates im Fermenter. Sind die Fermenter kleiner, muss die geringere Verweilzeit der Substrate durch eine bessere Durchmischung des Inhaltes ausgeglichen werden, um den Biogasproduktion zu beschleunigen. Dies führt zu hohen Investitionskosten für aufwändige Rührwerkstechnik, sowie zu hohen Betriebskosten wegen sehr langer Rührintervalle durch hohen Rühraufwand.

2.1.2 Keine Kompromisse – die Rückert NatUrgas® Reaktoren!

Jede Rückert NatUrgas® Anlage ist individuell auf die jeweiligen Bedürfnisse abgestimmt. Die Basis unseres Systems bildet der Rückert NatUrgas® Reaktor mit den Nutzvolumina

- Typ: NatUrgas® R-1200 (1200 m³ für 250 – 360 kW)
- Typ: NatUrgas® R-2000 (2000 m³ für 500 – 715 kW)
- Typ: NatUrgas® R-2400 (2400 m³ für 750 – 1000 kW)

und ggf. nachfolgendem Nachgärbehälter. Durch zwei parallel laufende, horizontale Haspelrührwerke ist immer eine sehr gute Durchmischung bei geringstem Aufwand möglich – ohne Kompromisse. Der Erfolg rechtfertigt die Mittel.

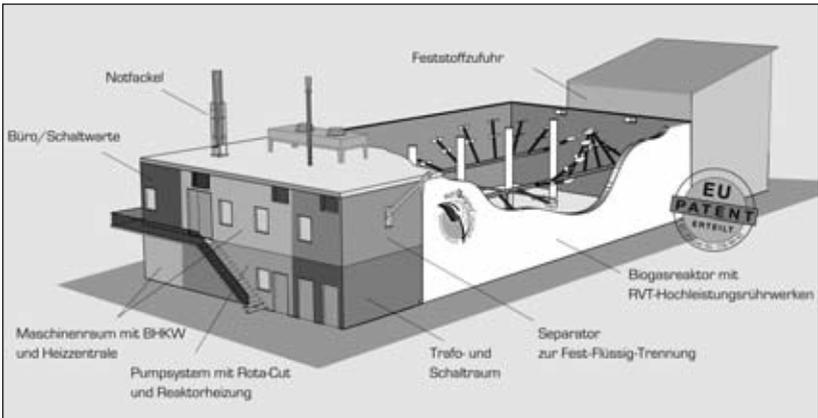


Abb. 1: Ansicht des NatUrgas® Reaktors integriert in eine Rückert Biogasanlage

2.2 Installierte Leistung als Basis – Beispiel 500 kW

Als Basis für einen Vergleich zwischen zwei 500 kW-Systemen wurde der Rückert NatUrgas® Reaktor R-2000 mit ca. 2000 m³ und ein runder Fermenter mit ca. 2450 m³ Nutzvolumen gewählt.

2.2.1 Abmessungen/Platzbedarf

Aufgrund der Vorgaben ist in Abbildung 2 folgender Größenvergleich dargestellt.

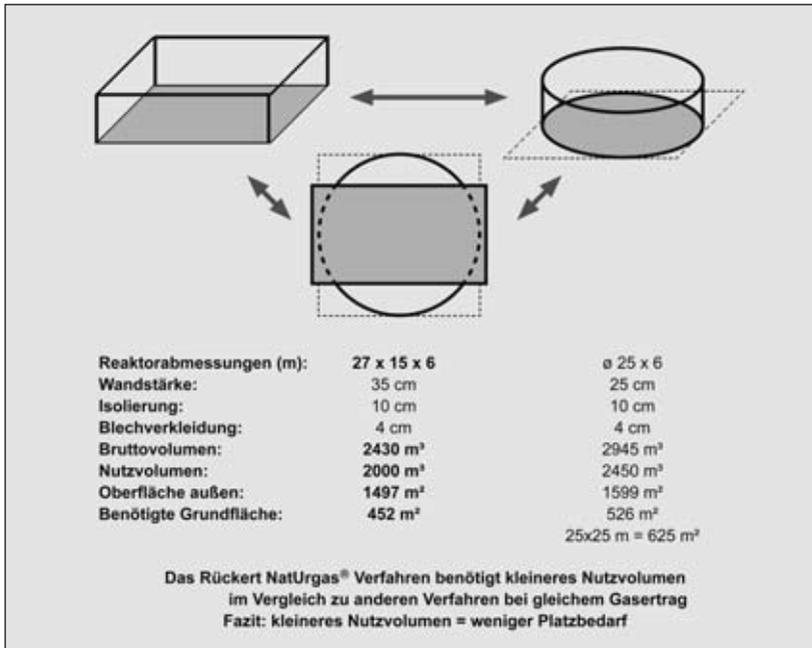


Abb. 2: Größen- und Volumenvergleich

2.2.2 Durchmischung und Rührverhalten in den Fermentern

Bei runden Fermentern (Abbildung 3) sind bei zwei unterschiedlichen Rührwerkstechniken nur „Teilerfolge“ zu verzeichnen. Es wird nur ca. 7 % des Reaktorinhalts überstrichen.

Wie jedoch in Abbildung 4 zu sehen ist, wird mit den beiden horizontal liegenden, gegeneinander laufenden Haspelrührwerken 67 % des kompletten Reaktornutzinhaltes überstrichen. Die Durchmischung des Substrats ist im gesamten Reaktor gewährleistet, sodass eine größere Auswahl der Einsatzstoffe möglich ist.

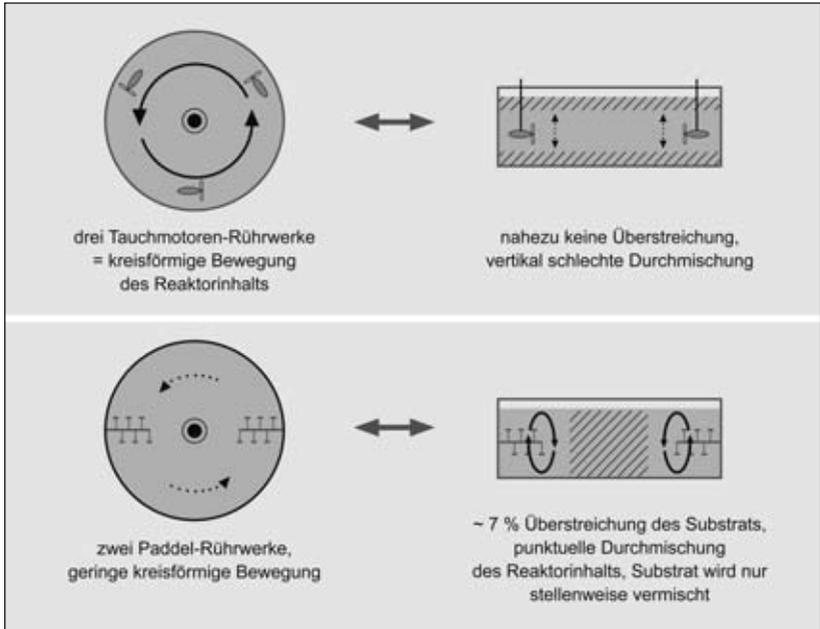


Abb. 3: Rührverhalten im Rundbehältern (Rührwerksbeispiele)

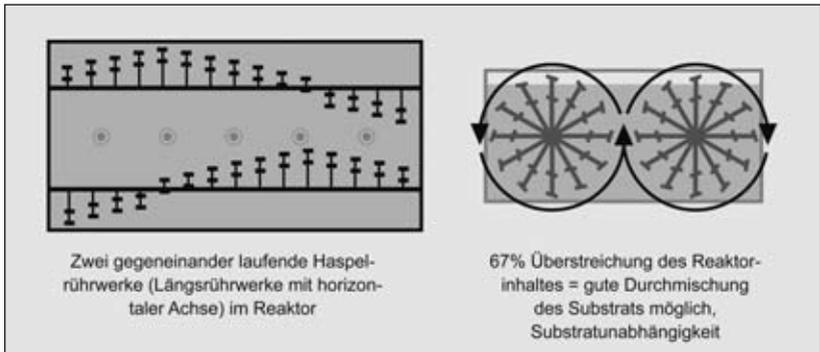


Abb. 4: Rührverhalten im Rückert NatUrgas® Reaktor

2.3 Grundlagen des Kostenvergleiches

Es wurde versucht, bei der Berechnung der Investitionskosten gleiche Grundlagen zu schaffen. Bei den Investitionskosten sind folgende Posten berücksichtigt: Stahlbeton, Isolation, Korrosions-Schutzfolie, Außenverkleidung, Leckageerkennung.

Bei den Betriebskosten wurden folgende Annahmen getroffen: Strombezugskosten aus dem Netz zu 15 ct/kWh, Rührwerklaufleistung angepasst auf ausreichende Durchmischung (Praxiswerte).

2.3.1 Eigenstromverbrauch der Rührwerke

Zum Vergleich wurden als Rührwerkstechnik 3 Tauchmotorrührwerke (TMR) im runden Fermenter gewählt. Bei den Tauchmotorrührwerken handelt es sich um Schnellläufer (> 200 U/min), die Haspelrührwerke der Firma RVT im Rückert NatUrgas[®] Reaktor sind Langsamläufer (3–5 U/min). Um ähnliche Misch- bzw. Rührverhältnisse in den Fermentern darstellen zu können, sind die Rührintervalle angepasst. Bei den TMR wird von einem Rührintervall von 10 min in 20 min ausgegangen, bei dem Rückert NatUrgas[®] Verfahren kann aufgrund von langjährigen Betriebserfahrungen von 4 min in 20 min ausgegangen werden. Im Vergleich sind dies also 4380 Bh/a bei TMR und 1752 Bh/a bei dem NatUrgas[®] Verfahren. Es ergibt sich somit, dass eine 100 % Auslastung der TMR vorliegt. Im Vergleich hierzu liegt die Kapazität des Rührsystems des NatUrgas Verfahrens bei ca. 60–70 %. Es stehen Reserven für zeitweise höheren Rührbedarf zur Verfügung.

2.3.2 Darstellung der Amortisationszeit – Kosten und Nutzen

Vergleicht man die Investitionskosten des runden Fermenters mit 2450 m^3 Nutzvolumen und 3 Tauchmotorrührwerken mit jenen des Rückert NatUrgas[®] Reaktors mit 2000 m^3 und 2 Haspelrührwerken ist erkennbar, dass die geschätzten Investitionskosten für den runden Fermenter mit ca. 260.000 € rund 100.000 € geringer sind als für den NatUrgas[®] Reaktor mit ca. 360.000 €. Diese Mehrkosten sind im Wesentlichen durch die höhere Menge Beton (Wandstärke 35 cm statt 25 cm bei runder Bauweise) sowie

die 2 großen, jeweils 27 m langen Rührwerke zu erklären. Bei den Kosten für Isolierung, Korrosionsschutz und Leckageerkennung sind kaum Unterschiede festzustellen.

Bei den Betriebskosten, in diesem Fall die Stromgestehungskosten, ist durch die geringere Laufzeit der RVT-Rührwerke mit nur ca. 11.600 € Stromkosten p. a. zu rechnen. Die Tauchmotorrührwerke hingegen sind mit ca. 44.200 € Stromkosten p. a. um ein vielfaches höher.

In 20 Jahren Betrieb ist durch den geringeren Verbrauch eine Differenz von ca. 650.000 € zu erwarten, weshalb sich die Mehrinvestition in einen NatUrgas® Reaktor schon nach ca. 3 Jahren amortisiert.

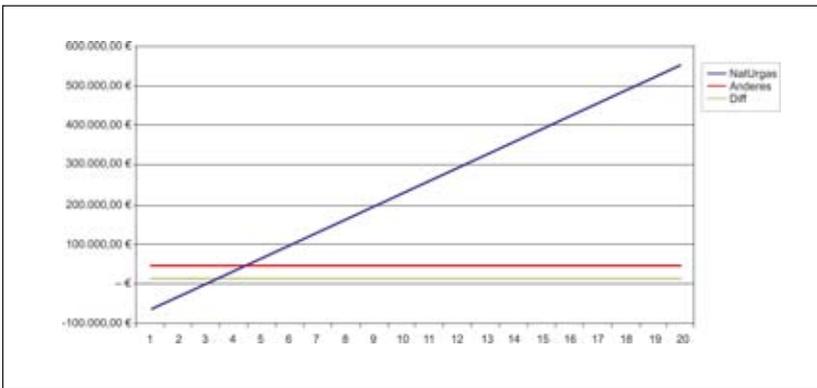


Abb. 5: Darstellung der Betriebskosten nach 20 Jahren und die Ersparnis

3 Weitere Vorteile des Rückert NatUrgas® Verfahrens

- modulare, Platz sparende Bauweise mit ansprechender Architektur
- geringere Marktabhängigkeit durch höhere Einsatzstoffvariabilität
- höhere TS-Gehalte im Reaktor möglich
- bessere Substratausnutzung, höhere Effizienz
- hohe Betriebssicherheit durch etablierte Hersteller mit langjähriger Erfahrung im Bereich Biogas
- lückenlose Aufzeichnung aller wichtigen Prozessparameter
- bei gleicher Leistung kein Nachgärer notwendig

4 Fazit

Grundsätzlich sollte die Entscheidung für eine passende Technologie von mehreren Faktoren abhängen. Trotzdem darf bei der Planung nicht vergessen werden, dass sich eine höhere Flexibilität über die Betriebszeit nur positiv auf den Betrieb auswirken kann.

Aus Erfahrung hat sich gezeigt, dass die Höhe der Investitionskosten einer Biogasanlage nur geringe Auswirkungen auf die Wirtschaftlichkeit haben. So lassen in der Regel die geringen Mehrinvestition des Rückert NatUrgas[®] Reaktors bzw. Systems auch bei klassischen NaWaRo-Anlagen eine Wirtschaftlichkeit sehr gut zu, nicht zuletzt wegen höherer Substratnutzung und Anlagenverfügbarkeit.

Die Vorteile für den Betreiber sind mindestens 20 Jahre höchste Betriebssicherheit und Zuverlässigkeit bei maximaler Effizienz.

Anschrift der Autoren:

*Claus Rückert, Dominic Pfeufer
Rückert NatUrgas[®] GmbH
Marktplatz 17, 91207 Lauf a.d. Pegnitz
E-Mail: mail@rueckert-naturgas.de*

Erfahrungen aus der Konstruktion für die Praxis der Firma MT-Energie GmbH

Bodo Drescher

MT-Energie GmbH & Co. KG

Die Firma MT-Energie ist seit Mitte der 90er Jahre im Biogasmarkt etabliert und bietet sowohl hochwertige Komponenten als auch schlüsselfertige Biogasanlagen für den deutschen als auch den ausländischen Markt an. Von Beginn an zeichnet sich die mittlerweile tausendfach bewährte Technik der MT-Energie durch einen hohen Grad an Eigenfertigung sowie Detailtiefe aus, die heute durch stetige Weiterentwicklung in vielen Details fortlaufend optimiert wird. Aufgrund der hohen Standardisierung der MT-Biogasanlagen, die grundsätzlich mit den von MT-Energie bereits in den 90er Jahren entwickelten Tragluftfolienabdeckungen ausgestattet werden, ergeben sich durch die schlüssige und unkomplizierte Technik eine Vielzahl von Vorteilen für die Betriebsführung als auch für die Wartung. Beispielsweise sind an dieser Stelle die sehr einfache und schnelle Wartung der eingesetzten Rührwerke oder die unkomplizierte Öffnung der Tragluftfolienabdeckung zu nennen.

Um den mittlerweile vielfältigen Anforderungen im Biogasmarkt gerecht zu werden (NaWaRo-Anlagen, Gülleanlagen, Kofermentationsanlagen etc.), hat MT-Energie für jedes Anlagensegment spezielle Anlagenkonzepte unter Einbeziehung der bewährten Standardkomponenten entwickelt, so dass den jeweils unterschiedlichen Ansprüchen an die Anlagentechnik optimal Rechnung getragen werden kann.

In den „Standardanlagen“ wird über ein ausreichendes Gärvolumen ein einfacher und sicherer Betrieb bei zügigem Abbau der Organik gewährleistet. Dabei liegen in den zurückliegenden Jahren folgende Faulraumbelastungen der Standards zugrunde.

Die gut erweiterbare Anlagen mit ihrer bewährten Technik haben eine hohe Fertigungstiefe und einen hohen Eigenfertigungsgrad. Die hohe Detailtiefe bei dem Einbau und Anordnung der Komponenten angeht ermöglicht eine schnelle und einfache Revision bzw. Wartung. So können

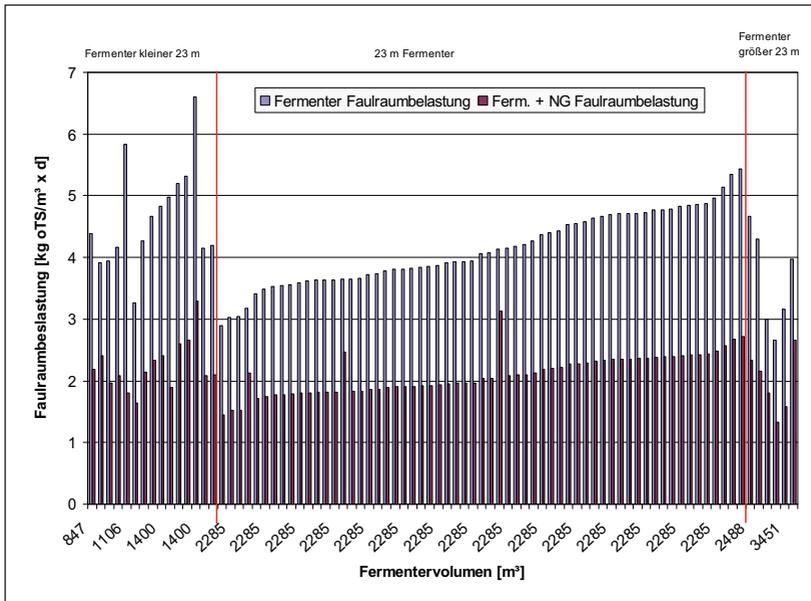


Abb. 1: Faulraumbelastung nach Fermenter-Größe

Rührwerke in kurzer Zeit getauscht werden, bei nur geringer Füllstandsenkung (1,5 m) und ohne die Abdeckung komplett abzunehmen. Die Technik (insbesondere der Feststoffeintrag und Rührwerke) wird den Substraten angepasst, s. d. auch Kofermente und NawaRos möglich sind. Grenzen werden erreicht bei zu hohen Trockensubstanzgehalten (z. B. durch viel Landschaftspflegematerial oder zu hohe Anteile langfaserigem Mist).

Neben den technischen Schwerpunkten legt MT-Energie den Fokus auf eine hohe Effizienz der Biogasanlagen. Um den bestmöglichen Erfolg einer Biogasanlage sicher zu stellen, verfolgt MT-Energie konsequent die Optimierung des Zusammenspiels von Technik, Biologie sowie dem Faktor Mensch. Dazu werden in Anlagen die Daten abgelegt und ausgewertet. Damit sind Ergebnislagen transparent und vergleichbar.

Diese ermöglicht persönliche Schwächen zu erkennen und hilft eventuelle Folgeinvestitionen zu strukturieren. Stellvertretend sei der Eigenstromverbrauch genannt. Durch den Einbau von Eigenstromzählern in allen MT-Anlagen kann sauber der Eigenstrombedarf dargestellt werden. Dieser

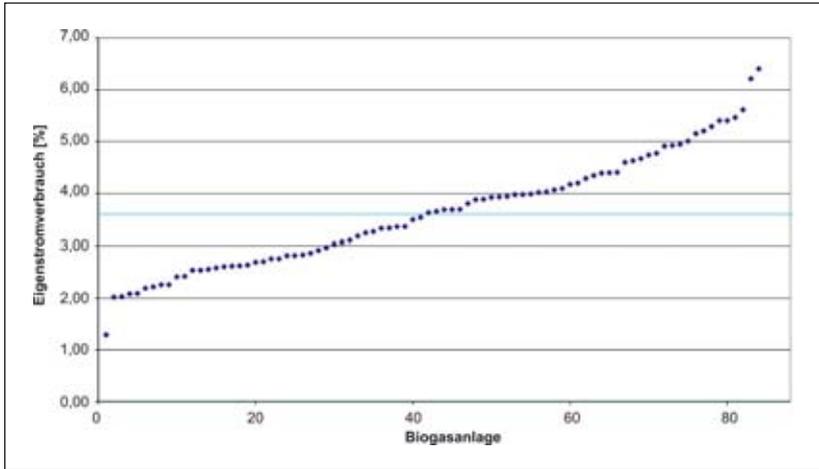


Abb. 2: Eigenstromverbrauch von MT-Energie Biogasanlagen

umfasst neben der Einbringtechnik auch die Bereiche Pumpen, Rühren und Transportieren in der Biogasanlage.

Anhand der Daten kann klar abgebildet werden, dass die persönliche Qualifikation eine erhebliche Rolle spielt. So sind vereinzelt Anlagen mit einer Faulraumbelastung von gut 3 kg oTS je m³ Faulraum bei den Stromverbräuchen in dem Bereich von 5 % und andere Betreiber haben 5,5 kg Faulraumbelastung bei Eigenstromverbräuchen von gut 2 %. Hier spiegelt sich die Qualität der Betreuung bei der Anlage deutlich wieder.

Die ständige Weiterentwicklung der eingesetzten technischen Komponenten, die kontinuierliche prozessbiologische Forschung als auch die Schulung und Weiterbildung der Betriebsführer spielen eine ganz entscheidende Rolle. Erst durch die gesamtheitliche Betrachtung aller betriebsrelevanten Faktoren lassen sich hohe Faulraumbelastungen bei gleichzeitig hohen spezifischen Gasproduktionen sowie ein geringer Eigenstromverbrauch und effiziente Arbeitsabläufe erzielen.

Eine Auswertung von MT-Anlagen über einen längeren Zeitraum zeigt bei „Maislastigen“ Anlagen (min. 95 % Maisinput) folgende Ertragslage (siehe Abbildung 3).

Die gute Vergleichbarkeit der Anlagen zeigt dass eine gesicherte Basis für zukünftige Kalkulation von Biogasanlagen gegeben ist. Allerdings darf auch nicht verschwiegen werden, dass man fundierte Kenntnisse in der

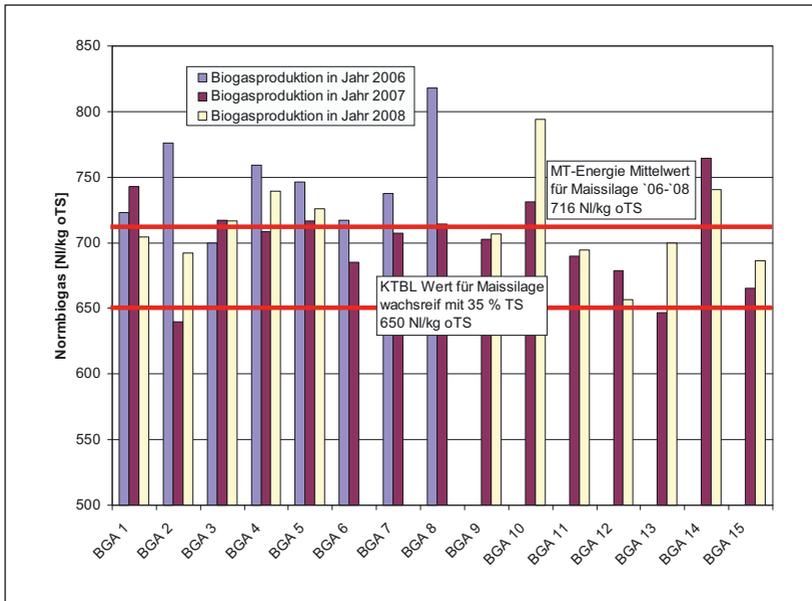


Abb. 3: Maismonovergärer und Anlagen bis max. 5 % weitere Substrate

Mikrobiologie braucht, um eine gute Betreuung den Anlagen zuteil werden zu lassen. Mit der Erfahrung aus 300 betreuten Biogasanlagen sind mittlerweile „Risikolose“ Inbetriebnahmen möglich und der wirtschaftlich stabile Betrieb ist nicht mehr dem Zufall überlassen.

Mit dem Einsatz von Spurenelementen ist die Biologie deutlich stabiler geworden. Wie die folgenden Beispiele zeigen, wirkt nicht jedes Mittel gleich gut.

Mit der Mischung 1 wurde eine leichte Reduzierung der Essigsäurekonzentration erreicht. Es wurden bei der Propionsäure keine Auswirkungen registriert. Bei der 2. Mischung wurde in einem Zeitraum von 14 Tagen die vorhandene Propionsäure um > 95 % reduziert. Innerhalb von 28 Tagen wurde bei der Essigsäure ebenfalls eine Reduktion um > 95 % festgestellt. Der Prozess der 2. Mischung läuft seit 8 Monaten auf einem stabilen niedrigen Belastungsniveau. Insofern kann man die Aussage treffen, dass eine optimal auf die Bedürfnisse der Anlage abgestimmte Mineralfuttermischung eine Steigerung der Raumbelastung ermöglicht.

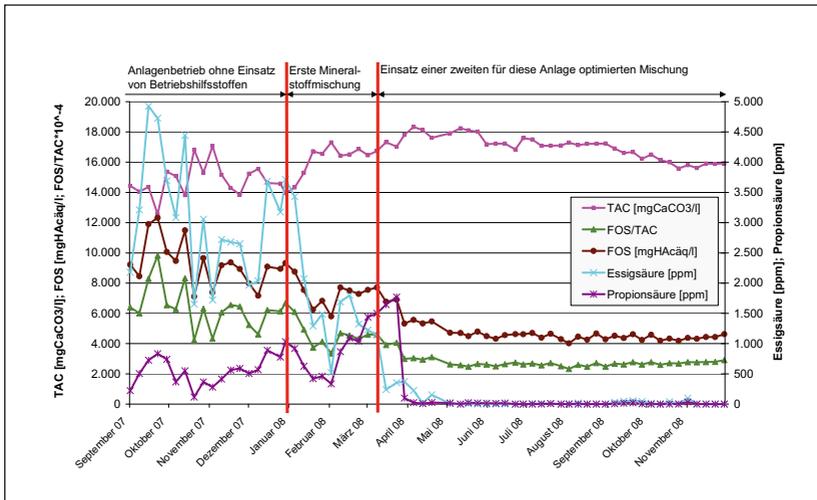


Abb. 4: Vergleich verschiedener Mineralstoffmischungen

Fazit

Nur wer sich kontrolliert, kann sich verbessern. Neben dieser Erkenntnis haben die letzten Jahre auch gezeigt, dass es nicht auf die ausschließliche Betrachtung von einzelnen Betriebsparametern (z. B. Raumbelastung) ankommt. Für einen optimalen Betriebserfolg ist vielmehr entscheidend, dass eine hohe Faulraumeffizienz bei gleichzeitig hoher Substrateffizienz erreicht wird, so dass auch in Zeiten hoher Substratkosten ein wirtschaftlicher Anlagenbetrieb möglich ist.

Anschrift des Autors:

Bodo Drescher
 MT-Energie GmbH & Co. KG
 Ludwig-Elsbett-Str. 1, 27404 Zeven
 E-Mail: info@mt-energie.com

Fermenter-/Technikkonzept der Schmack Biogas AG

Thomas Möslinger
Schmack Biogas AG



Philosophie der Systeme

Flexibilität	Effizienz	Technik & Biologie
<ul style="list-style-type: none">Bei den EinsatzstoffenDurch professionelle Pump-, Rühr- und SteuerungstechnikBei der Wartung- und InstandhaltungBeim Service 	<ul style="list-style-type: none">Bei der AbbauleistungBei der GasausbeuteBei den Wartungs- und InstandhaltungskostenBeim Service → Alles aus einer Hand 	<ul style="list-style-type: none">Anlagentechnik und prozessbiologische Betreuung sind perfekt aufeinander abgestimmtZertifiziertes und akkreditiertes Labor → Alles aus einer Hand 

Schmack
Biogas AG 

Fermentersysteme

EUCO®	COCCUS®
	

Schmack
Biogas AG 

Pfropfenstromfermenter EUCO®

Pfropfenstromfermenter EUCO®	
<ul style="list-style-type: none">⇒ 400–1.000 m³ Fermentervolumen⇒ horizontal liegendes Haspelrührwerk⇒ integrierte Heizung im Rührwerk⇒ selbstschmierende Lagerstellen⇒ Antriebsleistung nur 3kW	

Grubenspeicherfermenter COCCUS®

Grubenspeicherfermenter COCCUS®

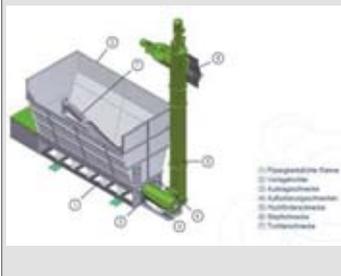
- ➔ 800–4.000 m³ Fermentervolumen
- ➔ von EUCCO® modifiziertes Remex-Rührwerk
- ➔ Wandheizung
- ➔ integrierter Gasspeicher mit Entschwefelung
- ➔ selbstschmierende Lagerstellen
- ➔ Über-/Unterdrucksicherung im Gasraum (frostsicher)
- ➔ Sämtliche Wartungsteile außerhalb des Füllstandes



Feststoffbeschicker PASCO 20/30

Schneckensystem PASCO 20/30

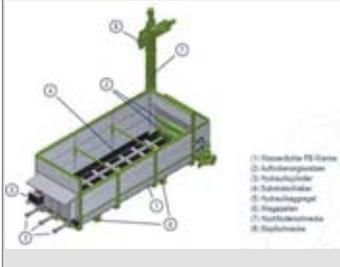
- ➔ Entwickelt zusammen mit Stelzenberger Biogas
- ➔ 20-30 m³ Fassungsvermögen



Feststoffbeschicker PASCO 80

**Schubbodensystem
PASCO 80**

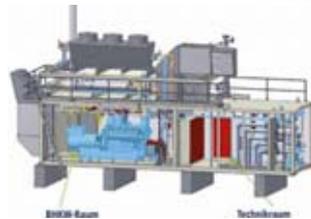
- ⇒ Entwickelt zusammen mit Stelzenberger Biogas
- ⇒ 60-80 m³ Fassungsvermögen



All-in-one Container

**Anlagentechnik & BHKW
AIO Container**

- ⇒ entwickelt zusammen mit Köhler&Ziegler
- ⇒ vorgefertigte Einheit
- ⇒ wenig Schnittstellen
- ⇒ kompakte Bauweise
- ⇒ von 185-1.000 kW
- ⇒ inkl. Gaskühlung



Gaserträge – **GARANTIERT**

KTBL-Werte=>600Nm³/t oTS

- ⇒ Coccus Anlagen einstufig:
684 Nm³/t oTS = **114%**
- ⇒ EUCO-Coccus zweistufig:
698 Nm³/t oTS = **116%**
- ⇒ EUCO-Coccus-Endlager
überdacht dreistufig:
725 Nm³/t oTS = **120%**



„Schwierige“ Einsatzstoffe

PASCO

- ⇒ kurz häckseln
- ⇒ zusätzliche
Auflockerungsschnecke bei
20/30m³



„Schwierige“ Einsatzstoffe

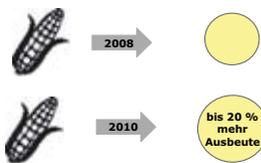
Fermenter

- ➔ durch Reichweite bis über Füllstand sind Schwimmschichten leicht zerstörbar
- ➔ „Flüssig halten“ (10-11% im EUCCO, 9-10% TS im COCCUS) Zugabe von Gülle, Separationsrückführung
- ➔ Fasriges Material findet sich in den Pumpen wieder



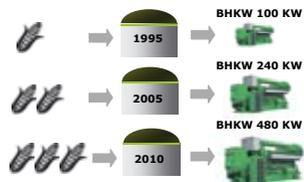
Upside Potenzial für höhere Effizienz

Erhöhung der Gasausbeute



- ♦ **Erhöhung der Gasausbeute** aus einer bestimmten Mengeneinheit Rohstoff
- ♦ **Reduzierung der Stoffkosten**

Erhöhung der Raumbelastung



- ♦ **Erhöhung der Raumbelastung im Fermenter**
- ♦ **Reduktion der Kapitalkosten pro erzeugter Kilowattstunde**

Schmack
Biogas AG

Optimierungspunkte

Gärrestlager	Gaseinspeisung in der Landwirtschaft
	
<ul style="list-style-type: none">♦ effektives Aufrühren der Endlager♦ Sicherheitstechnik	<ul style="list-style-type: none">♦ Vereinfachung der Zugangsvoraussetzungen als wichtiger Schritt für kleinere Projekte

Anschrift des Autors:

*Thomas Möslinger
Schmack Biogas AG
Bayernwerk 8, 92421 Schwandorf
E-Mail: info@schmack-biogas.com*

2.

Wirtschaftlichkeit

Biomassetransport – Was kostet die Logistik von Gülle & Co?

*Thore Toews
Fachhochschule Bingen*

1 Einleitung

Um Strom erzeugen zu können, benötigt eine Biogasanlage erhebliche Mengen an Gärsubstraten. Eine 190 kW Biogasanlage die nur mit Silomais betrieben wird, muss allein über 3.800 t Silomais ernten. Im Schnitt sind dies pro Tag mehr als 10 t. Neben dem Antransport müssen die Gärreste wieder auf die ursprünglichen Flächen ausgebracht werden, so dass pro Tag nochmal grob 7 t an Gärresten abtransportiert werden müssen. Wenn also bereits bei einer „kleineren“ Hofbiogasanlage ein tägliches Transportvolumen von 17 t anfällt und eine Direkteinspeisungsanlage mit einer Methanaufbereitungskapazität von 700 m³/h den 17-fachen Substratbedarf aufweist, dann kann bereits vermutet werden, dass die Gestaltung der Logistik die Rentabilität von Biogasstrom stark beeinflusst.

Die tatsächlichen Erntekosten von Silomais und die Gärrestausrückungskosten hängen von einer Reihe von Faktoren ab, so dass keine allgemeingültige Hausnummer existiert, die die Zusammenhänge für den Einzelfall richtig darstellen kann. Neben der Transportentfernung, der gewählten Technik, der Auslastung, der Ablauforganisation, der Dieselpreise und Löhne spielt auch das Gelände, die Verteilung der Schläge im Raum und die Schlaggröße eine Rolle. Wenn beispielsweise bei der Gärrestausrückung 100 Höhenmeter überwunden werden müssen (z. B. 2 km à 5 % Steigung) dann fallen allein hierfür mindestens 0,10 € je Tonne Gärrest für den zusätzlichen Dieselaufwand an.

Der Beitrag betrachtet die wichtigsten Zusammenhänge der Logistikkosten von Biogasanlagen. Es wird untersucht, wie die Logistikkosten mit steigender Entfernung ansteigen und wie sich diese auf die Energiegestehungskosten von unterschiedlich großen Biogasanlagen auswirken. Weiter

von der Biogasanlage entfernt liegende Silomaisflächen haben wegen der höheren Logistikkosten einen geringeren Wert für die Biogasanlage. Wie stark der Wert sinkt, wird in einer Beispielkalkulation gezeigt. Und schließlich wird in einer Variantenrechnung gezeigt, welche Auswirkungen von unterschiedlichen Dieselpreisen und Löhnen auf die Logistikkosten ausgehen.

2 Ernte- und Gärrestausbringungskosten

Auf Dieselmotorkraftstoff liegt in Deutschland ein Steuersatz von 47,04 ct/l. Von dieser zu zahlenden Steuer erhalten Landwirte im Rahmen der Agrardieselselvergütung je verbrauchtem Liter Diesel 21,48 ct/l zurück. Diese Rückvergütung war bis 2008 auf 1798 € (10.000 l, 350 € Selbstbehalt) je Betrieb begrenzt. Für die Verbrauchsjahre 2008 und 2009 wird der Selbstbehalt und die Obergrenze für 2 Jahre ausgesetzt, so dass gegenwärtig – unabhängig vom einzelbetrieblichen Verbrauch – nur 25,56 ct/l an Mineralölsteuer für landwirtschaftliche Betriebe anzusetzen sind.

Von der aktuellen Sonderregelung der Dieselsbesteuerung können auch Biogasanlagen dann (indirekt) profitieren, wenn der Substratanbau getrennt von der Biogasanlage in landwirtschaftlichen Unternehmen erfolgt. Da Landwirte die Gasölverbilligung auch für den Diesel erhalten, den Lohnunternehmer in Ihrem Auftrag verbrauchen, ist also ein Steuersatz von 25,56 ct/l Diesel für die folgenden Rechnungen anzusetzen. Beim gegenwärtigen Rohstoffwert von Diesel ergibt sich hieraus also ein Dieselpreis von 90 ct/l.

Als Bruttolohn werden 20 €/h angesetzt und der Zinssatz beträgt 5 %.

2.1 Erntekosten von Silomais

Ausgangsbasis zur Berechnung der Erntekosten von Silomais sind zunächst die Angaben des Feldarbeitsrechners des KTBL (2009). Als technisches Verfahren wird ein 10-reihiger Maishäcksler (450 kW), Schlepper gezogene Häckselguttransportwagen mit 50 m³ Ladevolumen (140 kW) und ein Radlader zum Verdichten mit 13,5 t Eigengewicht (105 kW) gewählt. Abweichend von den Standardwerten des KTBL werden jedoch die oben beschriebenen Diesel- und Faktorpreise verwendet (siehe Abschnitt: 2.1).

Bei einer Feldgröße von 5 ha ergeben sich spezifische Erntekosten zwischen 5,1 €/t FM und 24,3 €/t (siehe Tabelle 1). Je höher der Ertrag, je niedriger die Entfernung und – dies ist in Tabelle 1 nicht dargestellt – je größer die Fläche, desto niedriger sind die spezifischen Erntekosten.

Tab. 1: Spezifische Erntekosten von Silomais (€/t FM) nach Mengengerüsten des KTBL (Diesel: 0,9 €/l, Lohn: 20 €/h, Zins: 5 %, Schlaggröße: 5 ha)

Ertragsniveau	Feld-Hof-Entfernung									
	1 km	2 km	3 km	4 km	5 km	6 km	10 km	15 km	20 km	30 km
30 t/ha	7,2	7,7	7,8	8,4	8,6	8,9	10,5	12,3	15,2	24,3
40 t/ha	6,2	6,4	6,8	7,1	7,5	7,7	9,1	11,0	13,5	22,3
50 t/ha	5,4	5,8	6,0	6,4	6,5	6,9	8,2	10,2	12,4	20,8
60 t/ha	5,1	5,5	5,8	6,0	6,4	6,6	7,8	9,7	12,2	20,4

Betrachtet man den Anstieg der spezifischen Erntekosten in Abhängigkeit von der Entfernung exemplarisch für das Ertragsniveau von 50 t/ha (siehe Abbildung 1), dann steigen die spezifischen Kosten insgesamt und für jede Teilarbeit (Festfahren, Transport, Feldarbeit) mit der Entfernung überproportional an. Das KTBL geht also davon aus, dass es mit zunehmenden Transportentfernungen nicht mehr möglich ist die potenzielle Häckselleistung voll aufrechtzuerhalten, sondern dass der Häcksler mit wachsenden Entfernungen häufiger auf dem Feld warten muss.

Diese Annahme ist nicht unrealistisch, weil ein Lohnunternehmer mit nur einer Häckselkette nicht für unterschiedliche Feld-Hof-Entfernungen Transportkapazitäten vorhalten kann. Auf der anderen Seite ist dieses aber für große Lohnunternehmen, die über mehrere Häckselketten verfügen oder für Zusammenschlüsse von Lohnunternehmen möglich. Denn, indem mehrere Häcksler so auf weiten und nah gelegenen Flächen zeitgleich eingesetzt werden, dass die durchschnittliche Feld-Hof-Entfernung weitestgehend konstant gehalten wird, kann, wenn die Transportkapazität für die durchschnittliche Feld-Hof-Entfernung im Einsatzgebiet ausgelegt ist, ein kontinuierliches Häckseln gewährleistet werden. In den KTBL-Daten ist dieser Organisationsvorteil nach dem Motto „big is beautiful“ noch nicht berücksichtigt.

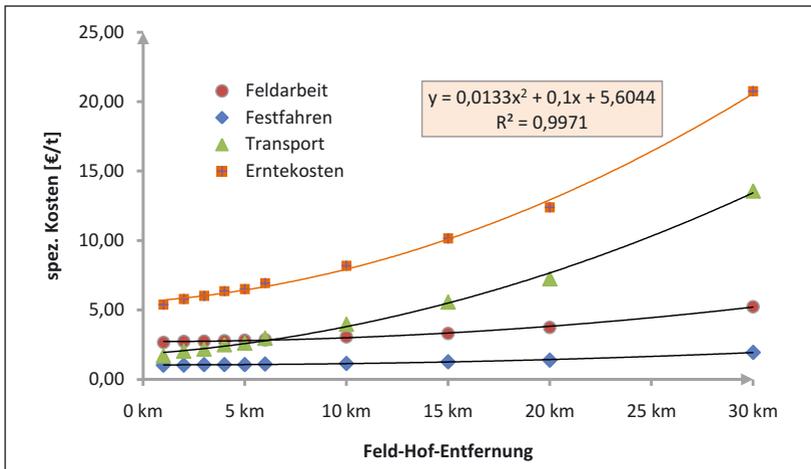


Abb. 1: Spezifische Erntekosten (Schlaggröße: 5 ha) in Abhängigkeit von der Feld-Hofentfernung

2.2 Gärrestausbringungskosten

Die Kosten für die Ausbringung der Gärreste werden ebenfalls mit den Mengengeräten des KTBL (2009) und den genannten Preisen berechnet. Es wird ein direktes Ausbringverfahren mit einem 24 m³ Pumptankwagen, mit 18 m Schleppschauchverteiler, gezogen von einem 200 kW Schlepper gewählt. Die Kosten für die Ausbringung und das Befüllen des Güllefasces sind unabhängig von der Feld-Hof-Entfernung. Lediglich die Kosten für den Straßentransport steigen linear mit jedem Kilometer an. Wie aus der Ausgleichsgeraden in Abbildung 3 zu sehen ist, betragen die Kosten für die Ausbringung und das Befüllen 2,7 €/t. Und mit jedem Kilometer fallen weitere Kosten in Höhe 16 ct/t an.

Indem der Transport und die Ausbringung auf dem Feld jeweils durch Spezialfahrzeuge durchgeführt wird, kann durch angepasste Spezialfahrzeuge (LKW auf der Straße, selbstfahrende Gülleausbringtechnik auf dem Feld) und spezielle Bereifungen der Bodendruck auf dem Feld und die Kosten (Verschleiß, Diesel) reduziert und die Schlagkraft erhöht werden. Und schließlich ist bei diesem absetzigen Verfahren eine sofortige Einarbeitung der Gärreste mit der Ausbringung möglich.

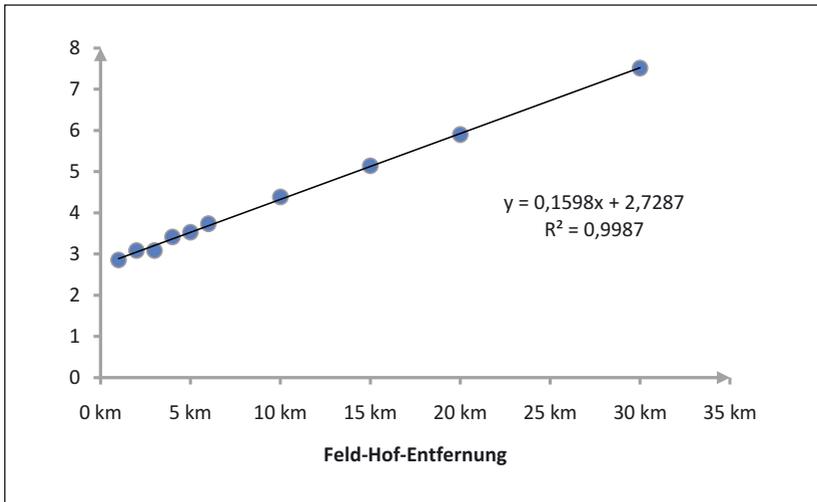


Abb. 2: Gärrestausbringungskosten in Abhängigkeit von der Entfernung (24 m³, 200 kW, Schleppschlauchverteiler, Flächengröße: 10 ha) (Quelle: Eigene Berechnungen nach KTBL 2009)

Die Vorteile solcher Gülleketten kommen allerdings erst dann voll zum Tragen, wenn in einem Lohnunternehmen bzw. einem Unternehmensverbund mehrere solcher Gülleketten vorhanden sind, weil sich erst dann Möglichkeiten ergeben durch eine entsprechende Ablauforganisation (siehe auch Abschnitt 2.1) eine hohe Auslastung der Fahrzeuge zu erreichen.

3 Logistikkosten in Abhängigkeit von der Anlagengröße und Flächenverfügbarkeit

Unabhängig von den Einspeisevergütungen des EEG, existiert ein „trade-off“ bei der Größe einer Biogasanlage. Auf der einen Seite sinken die spezifischen Produktionskosten mit steigender Anlagengröße durch economies of scale erheblich, auf der anderen Seite steigen aber die Logistikkosten. In wie weit die Logistikkosten mit der Anlagengröße die erzeugte Kilowattstunde Strom bzw. das erzeugte Methan belasten, wird im Folgenden gezeigt.

3.1 Vorgehensweise

Im Modell wird davon ausgegangen, dass um eine Biogasanlage 10% der Gesamtflächen für den Silomaisanbau zur Verfügung stehen und dass die Gärreste wieder auf die Flächen zurückgebracht werden auf denen der entsprechende Maisanbau zuvor erfolgte. Die Fläche um die Biogasanlage ist nach dem Vorbild von Thünen in konzentrische Kreise mit den in Tabelle 2 angegebenen Innen- und Außenradien aufgeteilt. Zur Illustration sind die Modellannahmen in Abbildung 3 für eine exemplarische Biogasanlage visualisiert. Der gelbe Punkt in der Mitte kennzeichnet die Lage der Biogasanlage. Die Fläche im Umkreis bis 1,5 Kilometer um die Biogasanlage hat eine Gesamtfläche von 707 ha (transparent gelb). Die grün eingezeichneten Ackerflächen entsprechen mit einer Gesamtfläche von 71 ha einem Anteil von 10 % (durchschnittliche Feldgröße: 5,8 ha). Der zweite rote Ring reicht von > 1,5 km bis < 2,5 km. Die Gesamtfläche dieses Ringes entspricht 1.260 ha. Ca. 10 % dieser Fläche werden durch die blauen Ackerflächen (120 ha, durchschnittliche Feldgröße: 3,8 ha) abgedeckt.

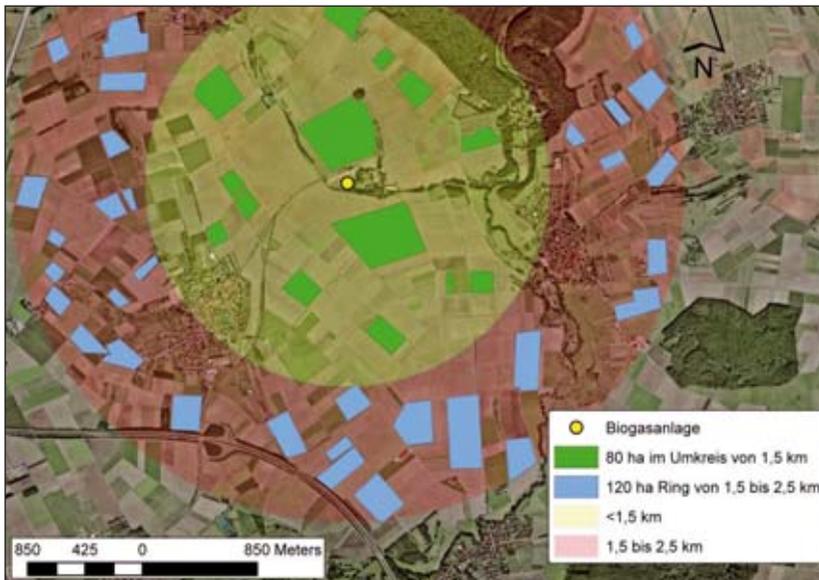


Abb. 3: Flächenverfügbarkeit einer beispielhaften Biogasanlage (Quelle: eigene Darstellung, Luftbild: Google Earth)

Neben der Verdeutlichung der Modellannahmen zeigt Abbildung 3, dass die Vorgabe, dass 10 % der Gesamtfläche um eine Biogasanlage für den Substratanbau zu Verfügung stehen, nicht pessimistisch ist. In existierenden Biogasanlagen ist die Flächenverteilung häufig deutlich ungünstiger. Nicht berücksichtigt wird, dass selbst wenn der Biogasanlage potenziell 10 % der Gesamtfläche für den Substratanbau zur Verfügung stehen, dass diese Flächen aus Fruchtfolgegründen nicht in jedem Jahr mit Silomais kultiviert werden sollten. Dies führt zu einer gewissen Unterschätzung der Logistikkosten.

Die Feld-Hof-Entfernung entspricht nicht der Luftlinie von der Biogasanlage zu einer jeweiligen Fläche, weil zum Erreichen vorhandene Wege benutzt werden müssen. Vereinfachend wird in den Kalkulationen deshalb davon ausgegangen, dass die durchschnittliche Feld-Hof-Entfernung in den einzelnen Ringen dem 1,5-fachen des äußeren Radius entspricht.

3.2 Ergebnisse

Bei einem elektrischen Wirkungsgrad von 38 % können bei einer Auslastung von 8000 h/a aus 1 t Silomais 427 kWh Strom gewonnen werden bzw. eine installierte Anlagenleistung von 0,05 kW_{el} bedient werden. Wenn von einem Silomaisertrag von 50 t/ha und einem Lagerverlust von 10 % ausgegangen wird, dann können von einem ha Mais ca. 19 MWh Energie erzeugt werden bzw. eine Anlagenleistung von 2,39 kW versorgt werden. Bei einer Nutzung von 10 % der Gesamtfläche um eine Biogasanlage bis 1,5 km ist eine 169 kW Anlage möglich; bis 2,5 km ist es bereits eine 470 kW Anlage (siehe Tabelle 2). Erhöht man den Einzugsradius weiter, dann reicht die Substratproduktion im Umkreis von 15 km um die Anlage für eine elektrische Leistung von immerhin fast 17 MW bzw. über 4400 m³ Methan pro Stunde.

Mit den in Kapitel 2 abgeleiteten Kosten werden die Ernte- und Gärrestausbringungskosten für jeden Ring und für die Gesamtflächen bis zum jeweiligen Außenradius des letzten Ringes berechnet. Diese Logistikkosten werden dann auf den produzierten Strom bzw. auf das produzierte Methan umgelegt.

Während in einer 169 kW Biogasanlage die Stromproduktion bzw. die Methanproduktion mit 1,9 ct/kWh bzw. 7,2 ct/m³ belastet sind, steigen diese Werte bei Einzugsradien von 6 km auf 2,4 ct/kWh bzw. 9,1 ct/m³ an.

Bis zu diesem Außenradius von 6 km ergibt sich bereits eine Anlagenleistung von 2,7 MW (713 m³ Methan/h). Eine Kostendifferenz von lediglich 0,5 ct/kWh_{el} bzw. 1,7 ct/m³ CH₄ wirkt bei diesem Leistungssprung gering. Prozentual erhöht sich der spezifische Logisikaufwand zwar beim Übergang von der 169 kW auf die 2,7 MW Anlage um 24 %, aber dennoch steigen auch bei große Biogasanlagen, wenn Sie einen großen Anteil der umliegenden Ackerflächen nutzen können, die Logistikkosten nicht ins Unermessliche. Darüber hinaus ist die Rentabilität einer Direkteinspeisungsanlage (700 m³/h) deutlich höher als die der 169 kW-Anlage, so dass der hier ausgewiesene Anstieg der Logistikkosten die wirtschaftlichen Vorteile der 2,7 MW-Anlage kaum schmälert.

Tab. 2: Logistikkosten in Abhängigkeit vom Einzugsradius (Quelle: Eigene Berechnungen)

Radius	1,0 km	1,5 km	2,5 km	6,0 km	15,0 km
Fläche je Ring [ha]	314	393	1.257	9.346	59.376
nutzbare Fläche je Ring [ha]	31	39	126	935	5.938
nutzbare Gesamtfläche [ha]	31	71	196	1.131	7.069
Silomaisproduktion je Ring [t/a]	1.414	1.767	5.655	42.058	267.192
Silomaisproduktion [t/a]	1.414	3.181	8.836	50.894	318.086
elektrische Leistung [kW]	75	169	470	2.708	16.922
Methanproduktion [m ³ /h]	20	45	124	713	4.453
Stromproduktion [MWh/a]	596	1.340	3.723	21.444	134.024
Feld-Hof-Entfernung [km]	1,5	2,25	3,75	9	22,5
Kosten Maisernte je Ring [€/t]	5,76	5,88	6,15	7,58	14,58
Gärrestausbringung je Ring [€/t]	2,98	3,10	3,34	4,18	6,32
Gesamtlogistikkosten [1000 €/a]	11	26	74	520	5.639
durch. Logistikkosten [€-ct/kWh]	1,9	1,9	2,0	2,4	4,2
CH ₄ -Produktion [tausend m ³ /a]	158	356	990	5.700	35.626
Logistikkosten [€-ct/m ³ CH ₄]	7,1	7,2	7,5	9,1	15,8

Durch das neue EEG weisen einmal kleinere Biogasanlagen im Leistungsbereich um 190 kW, die den Güllebonus realisieren und direkt Strom produzieren und zum anderen Direkteinspeisungsanlagen mit einer

Leistung von 700 m³ Bioerdgas je Stunde eine besonders hohe Rentabilität auf. Der Veredelungswert von Mais der zum Erntezeitpunkt an die Biogasanlage geliefert wird, beträgt bei der oben genannten 190 kW Anlage über 40 €/t; bei einer entsprechenden Direkteinspeisungsanlage mit 700 m³ Bioerdgas/h sind es sogar über 50 €/t.

Landwirte sind dann bereit Silomais für Biogasanlagen anzubauen, wenn sie damit mindestens genauso viel verdienen können, wie mit einer alternativen Ackernutzung, wie beispielsweise Winterweizen. In Tabelle 3 ist eine solche Indifferenzpreiskalkulation für einen Weizenpreis von 140 €/t gezeigt. Der entsprechende Indifferenzpreis von stehendem Silomais frei Feld beträgt 19,7 €/t.

Tab. 3: Indifferenzpreiskalkulation für stehenden Mais im Vergleich zu Winterweizen (Quelle: geändert nach Toews 2009)

		W.Weizen	Mais stehend ab Feld
Ernteertrag	t FM/ha	8,0	50
nach Lagerverlusten	t FM/ha	7,9	
Preis	€/t	140	19,7
Leistung	€/ha	1104	987
Saatgut	€/ha	62	160
Pflanzenschutz	€/ha	113	65
Dünger	€/ha	241	424
flächengebundene ArEr-Kosten	€/ha	340	245
Erntekosten	€/ha	116	
Lagerkosten	€/ha	139	
Gärrestausbringungskosten	€/ha	–	
Summe Kosten	€/ha	1012	895
Deckungsbeitrag	€/ha	92	92

Die Logistikkosten dürfen maximal die Differenz zwischen dem Wert, den eine Biogasanlage maximal für Mais am Ort der Anlage zu zahlen bereit ist (40 – 50 €/t), und dem, den ein Landwirt mindestens für Mais stehend frei Feld verlangt, betragen. Wie Tabelle 4 entnommen werden kann, kann bei einer 190 kW-Biogasanlage also die durchschnittliche Feld-

Hof-Entfernung 20 km betragen, ohne dass ein Unternehmerverlust entsteht. Und bei der Direkteinspeisungsanlage können es im Schnitt sogar 30 km sein. Ohne Zwang sollte aber keine Biogasanlage weitere Entfernungen in Kauf nehmen als unbedingt nötig, denn mit jedem weiteren Kilometer schmälert sie natürlich ihren Unternehmensgewinn.

Tab. 4: Rohstoffwert und Logistikkosten bezogen auf 1 t Maissilage in Abh. von der Feld-Hof-Entfernung

	1 km	5 km	10 km	15 km	20 km	30 km
Rohstoffwert	19,7	19,7	19,7	19,7	19,7	19,7
Ernte	5,70	6	8	10	13	21
Gärrestausbringung	2,10	2,56	3,14	3,71	4,29	5,44
Gesamtkosten	27	29	31	34	37	46

4 Vorteil von dichter gelegenen Flächen

Wie im vorherigen Kapitel gezeigt, ist es sinnvoll einen möglichst hohen Flächenanteil im Umkreis einer Biogasanlage für den Substratanbau zu gewinnen. Mit anderen Worten sind Maisflächen in der Nähe der Biogasanlage mit geringeren Logistikkosten verbunden und haben deshalb einen höheren Wert für das Biogasunternehmen als weiter entfernte Flächen. Wenn eine 10 ha Fläche (Ertragsniveau 50 t/ha) in 1 km Entfernung mit Logistikkosten von 369 €/ha (Maisernte + Gärrestausbringung) die Referenz darstellt, dann ist in Abbildung 4 gezeigt, um welche Beträge weiter entfernt gelegene Flächen in ihrem Nutzen für die Biogasanlage sinken.

Geht man davon aus, dass Silomais (50 t/ha) für 1.120 €/ha stehend ab Feld in 1 km Distanz angeboten wird, dann sinkt der Wert derselben Fläche in 10 km Entfernung auf 930 €/ha. In 20 km Entfernung sind es sogar nur noch 656 €/ha (siehe Abbildung 4).

In einem funktionierenden Markt sollten die sinkenden Zahlungsbereitschaften von Biogasanlagenbetreibern und anderen Landbewirtschaftern für Flächen mit größerer Distanz zur Betriebsstätte eigentlich dafür sorgen, dass der Flächennutzungsanteil in geringen Distanzen deutlich höher ist als in weiten. In der Realität ist dies aber häufig nicht zu beobach-

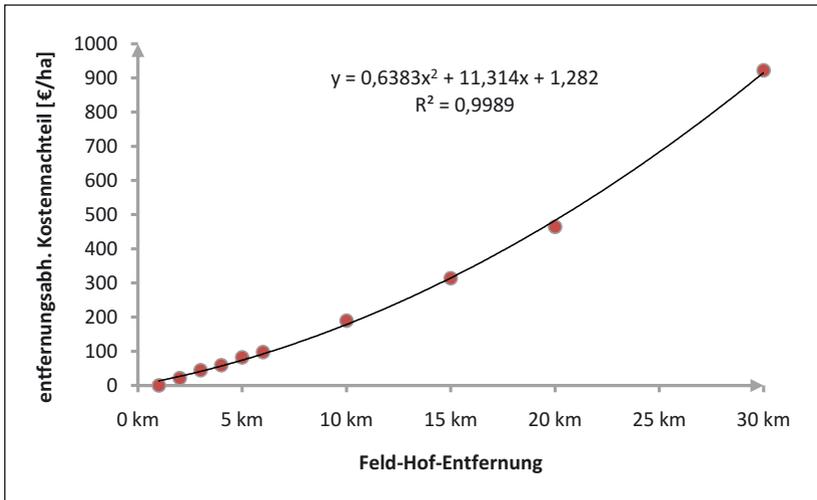


Abbildung 4: Kostennachteil einer 10 ha Silomaisfläche (50 t/ha) durch ansteigende Erntekosten mit zunehmender Feld-Hof-Entfernung (Quelle: Eigene Berechnungen nach KTBL 2009)

ten, weil der Bodenmarkt durch eine ganze Reihe an Verzerrungen eben kein gut funktionierender Markt ist. Hinzu kommt auch, dass die Logistikkosten im Getreideanbau deutlich geringer sind, so dass die Anreize für Marktfruchtproduzenten zum Flächentausch deutlich geringer sind.

5 Auswirkungen unterschiedlicher Dieselpreise und Löhne

Um zu prüfen, wie sich die Logistikkosten bei variierenden Dieselpreisen und Lohnkosten verändern, werden mit den Mengengerüsten des KTBL (s. o.) Sensitivitätsanalysen mit unterschiedlichen Dieselpreisen und Lohnsätzen durchgerechnet (siehe Tabelle 5). Ausgehend von einem Dieselpreis von 0,9 bzw. 1,8 €/l und einem Lohn von 15 €/h führt eine Verdoppelung des Lohnsatzes zu einer Erhöhung der spezifischen Kosten je Tonne Silomais um 26 % bzw. 23 %. Demgegenüber führt eine Verdoppelung des Dieselpreises zu einer geringeren Kostenerhöhung von lediglich 13 bis 16 %.

Tabelle 5: Logistikkosten je t Silomais in Abhängigkeit von variierenden Dieselpreisen und Lohnsätzen bei 10 km Feld-Hof-Entfernung und 10 ha Schlaggröße

Diesel	Lohn		
	15 €/h	30 €/h	100 %
0,9 €/l	8,55	10,81	26 %
1,8 €/l	9,92	12,18	23 %
100 %	16 %	13 %	

6 Zusammenfassung

Unter der Voraussetzung, dass schlagkräftige Ernte- und Gülletechnik eingesetzt wird, und ein höherer Anteil (10 % der Gesamtfläche) der Flächen um eine Biogasanlage für die Substratproduktion genutzt werden kann, halten sich die Transportkosten auch von größeren Biogasanlagen in Grenzen. Die Vorteile einer Direkteinspeisungsanlage mit einem elektrischen Leistungsäquivalent von 2.660 kW_{el} gegenüber einer kleinen Biogasanlage mit 190 kW_{el} überwiegen die ansteigenden Logistikkosten deutlich.

Dennoch sollten Biogasanlage natürlich versuchen Flächen mit geringen Entfernungen für die Substratproduktion zu gewinnen. Denn gegenüber einer 1 km entfernten Fläche sinkt der Wert einer Fläche in 15 km Entfernung um immerhin 314 €/ha.

Literatur

- BMELV (2009): Agrardieselvegütung. Online im Internet: URL: http://www.bmelv.de/cfn_102/SharedDocs/Standardartikel/Landwirtschaft/Foerderung/Beihilfen/Agrardiesel.html?nn=403312 Abrufdatum: 2009-08-19
- KTBL (2009): Feldarbeitsrechner – Maschinenkosten und Arbeitszeitbedarf. Online im Internet: URL: <http://daten.ktbl.de/feldarbeit/entry.html> Abrufdatum: 2009-08-19
- Toews, T. (2009): Der Preis für Mais: So kalkulieren Sie richtig. In: top agrar, Heft 9, S. 32 – 34

Anschrift des Autors:

*Prof. Dr. Thore Toews
Fachhochschule Bingen
Berlinstr. 109, 55411 Bingen
E-Mail: toews@fh-bingen.de*

Welche Faktoren bestimmen die Wirtschaftlichkeit von Biogasanlagen?

Gerd Reinhold

Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft (TLL)

1 Problemstellung

Die Wirtschaftlichkeit landwirtschaftlicher Verfahren wird durch die vom Anlagenkonzept, der Anlagengröße, die von den Standortbedingungen abhängige Inanspruchnahme von Kapital, Fläche und Arbeit sowie durch die Erlöse bestimmt. Besonders nach den deutlichen Preisanstiegen für Agrarprodukte in 2007, dem nachfolgenden Preisverfall und der Wirkung des EEG 2009 ist die Wirtschaftlichkeit landwirtschaftlicher Biogasanlagen zu prüfen. Das novellierte und am 1.1.2009 in Kraft gesetzte EEG übt durch die vielfältige Boni (Lenkungswirkung) einen dominanten Einfluss auf die Rentabilität aus. Somit sind sowohl die Kostenstruktur als auch die Erlöse der Biogasanlagen zu untersuchen. Ziel ist es dabei, die wichtigen Kosten- und Erlösarten zu erkennen und deren Einflussbereich zu charakterisieren.

2 Einordnung des Betriebszweiges Biogas

Landwirtschaftliche Biogasanlagen (BGA) sind, wie auch z. B. die Milcherzeugung, kapitalintensive Maßnahmen mit einer vergleichbaren Kapitalbindung je ha Flächeninanspruchnahme. Eine Milchkuh mit 8.000 l Jahresmilchleistung (ohne Nachzucht) hat 4.660 €/ha Kapitalbindung für Tierplatz, Siloraum und Technik in der Pflanzenproduktion (Flächenbedarf: 0,51 ha Grundfutter und ca. 0,25 ha für Kraftfutter je Kuh; 118 ha Flächenbedarf bei 153 Kühen (GRÄFE 2008). Bei einer 150 kW NAWARO-Biogasanlage auf Maisbasis (79 ha) beträgt die Kapitalbindung 6126 €/ha (DEGNER 2006), wovon ca. 50 % von der Biogasanlage und 50 % von der

Maisproduktion einschließlich Silo verursacht werden. Die Flächenbindung einer Biogasanlage ist mit 20 Jahren (EEG-Vergütungszeitraum), ebenso wie bei einer Investition in einen Milchviehstall, langfristig (Abbildung 1).

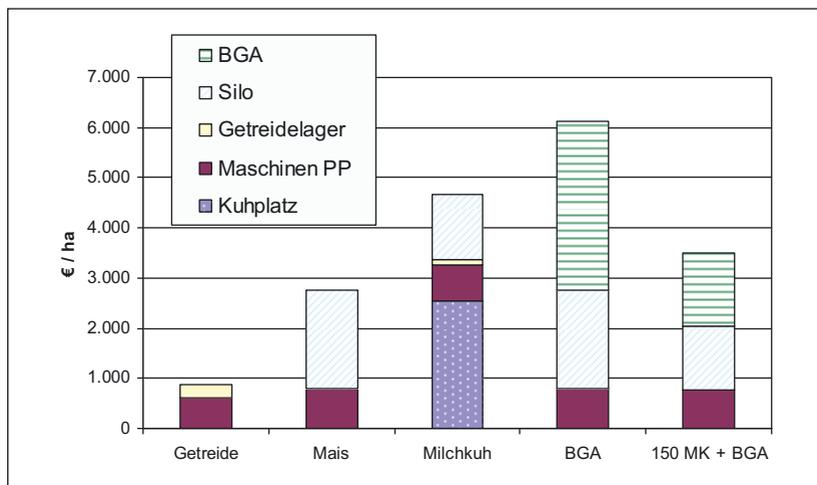


Abb. 1: Vergleich von Betriebszweigen hinsichtlich Kapitalbindung

Die Inanspruchnahme von Arbeit als einem Teil der Wertschöpfung liegt für die Biogasanlage flächenbezogen bei 31,1 h/ha, wobei jeweils ca. 50 % für die Maissilageproduktion und den Betrieb der Biogasanlage benötigt werden. Der Arbeitszeitbedarf ist damit aber doppelt bzw. drei Mal so hoch wie bei der Pflanzenproduktion (Getreide ca. 9,3 AKh/ha; Maissilage ca. 15,5 AKh/ha). Bei der Milcherzeugung werden von den benötigten 65,6 h/ha ca. 85 % im Stall verbraucht (Abbildung 2).

Der erreichbare Beitrag zum Betriebseinkommen ist stark abhängig von den unterstellten Preisbedingungen. Wichtig aus Sicht der Biogasproduktion ist, dass z. B. die ausschließlich Maissilage einsetzende Biogasanlage (NAWARO-BGA) ohne Wärmenutzung fast keinen positiven Beitrag leisten kann. Eine deutliche Verbesserung ist nur durch gute Wärmekonzepte bzw. den Einsatz von > 30 % Wirtschaftsdünger möglich.

Erfolgt eine Kombination von Biogasanlage mit 150 kW und Milcherzeugung (153 Milchkuhe, Flächenbedarf 184 ha, 66,7 Akh/ha), indem die Wirtschaftsdünger mit vergoren werden, so verbessert sich das betriebs-

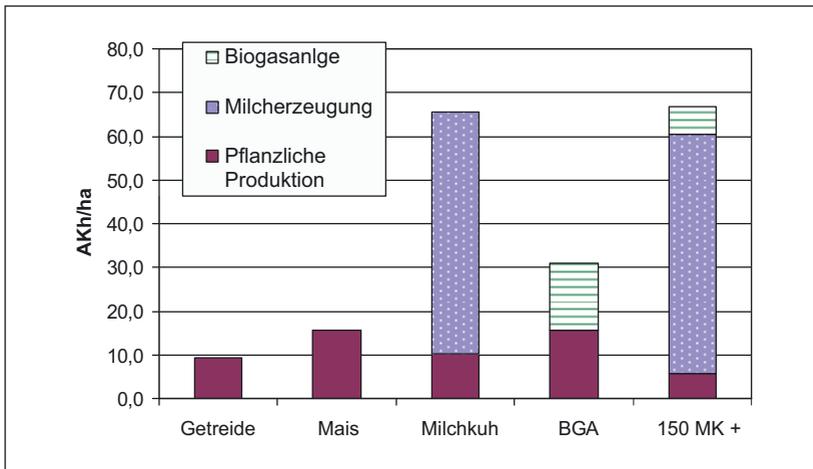


Abb. 2: Vergleich von Betriebszweigen hinsichtlich Arbeitszeitbedarf

wirtschaftliche Ergebnis deutlich. Die Biogasanlage benötigt von den eingesetzten 184 ha dann ca. 67 ha im Vergleich zur NAWARO BGA mit 79 ha Flächebedarf.

3 Wirtschaftlichkeitsfaktoren

Biogasanlagen realisieren den wesentlichen Teil der *Erlöse* aus der mit der EEG-Novelle 2009 festgelegten Vergütung. Zusätzliche Erlöse können aus dem Wärmeverkauf und über den Düngewert der eingesetzten nachwachsenden Rohstoffe sowie extern zugeführter Wirtschaftsdünger realisiert werden.

Die Lenkungswirkung im EEG wird durch das zum 1.1.2009 umgesetzte komplexe System von unterschiedlichen Boni erreicht. Das aufgebaute Vergütungssystem berücksichtigt sowohl die Anlagengröße, die Substratmischung als auch die eingesetzte Technik in den einzelnen Anlagenkonzepten und die Anlagengrößen sehr unterschiedlich. Deutlich wirken auch die Wirtschaftlichkeitsschwellen bei 150 kW, bedingt durch Grundvergütung und Güllebonus, sowie bei 500 kW, bedingt durch die Absenkung des NAWARO-Bonus über die zum Einsatz kommende Anlagengröße. Folgende Effekte der einzelnen Boni sind festzustellen:

- **Grundvergütung:** Die Anhebung im Bereich < 150 kW stärkt neue und kleine BGA.
- **NAWARO-Bonus:** Die Erhöhung um 1 ct/kWh zielt auf einen Ausgleich der 2007/08 deutlich gestiegenen Substratkosten ab und trägt heute zur wirtschaftlichen Stabilisierung der Biogasanlagen bei.
- **Gülle-Bonus:** Besonders im Bereich < 150 kW ist dies eine starker Anreiz zum Wirtschaftsdüngereinsatz.
- **Landschaftspflege-Bonus:** Aufgrund des festgelegten Mindestanteils von 50 % und die unklaren Substratdefinition, ist zzt. nur ein geringer Einsatz zu erwarten.
- **Technologie-Bonus:** Wirtschaftliche Wirkungen ergeben sich vorrangig bei Gaseinspeisung und ggf. bei Mikrogasturbineneinsatz.
- **Luftreinhaltungs-Bonus:** Schaffung von Anreizen zur Technikentwicklung und zur Nachrüstung von Tiefentschwefelung und Katalysatoren.

Die Beurteilung der Wirtschaftlichkeitsfaktoren erfolgt beispielhaft an einer Biogasanlage auf Basis von 153 Kühen, die durch den Einsatz von Maissilage auf 150 kW, 300 kW und 500 kW Leistung vergrößert wird. Für die 300 und 500 kW Anlage wurde die Belastung konstant gehalten, der Substrateinsatz, der Wirkungsgrad, die spezifischen Investitionen usw. angepasst. Folgende der Parameter wurden für die 150/300/500 kW BGA gewählt:

- **Biogasanlage:** 1200 m³ Faulraum, 150 kW Gas-Otto-Motor,
- **Substrateinsatz:** 4000 m³ Rindergülle und Maissilage (35 €/t),
- **Faulraumbelastung:** 2,4 kg/m³ und Tag, (67/84/96 Tage Verweilzeit),
- **Volllaststunden:** 7500 h (35/38/40 % elektr. und 40 % therm. Wirkungsgrad),
- **Prozessstrombedarf:** 10 W/m³ Faulraum sowie 30 W/kW Wärme für Notkühler,
- **Investition:** 3,6/3,0/2,6 T€/kW (kein Güllelager- und Siloneubau),
- **Finanzierung:** Annuitätendarlehen mit 5 %,
- **Vergütung:** EEG 2009 (incl. NAWARO- u. Güllebonus),
- **Inbetriebnahme:** 2009

3.1 Erlöse neben dem EEG als Wirtschaftlichkeitsfaktoren

Wärmeerlöse werden stark durch den Wärmebedarf am Standort der Biogasanlage bestimmt. Durch die Gewährung eines Kraft-Wärme-Bonus für die sinnvolle Verwertung der Wärme, werden Anreize gesetzt, am Standort der Biogasanlage in Wärmenetze zu investieren bzw. z. B. über Biogasleitungen die Verstromung am Ort der Wärmesenke zu platzieren. Allerdings ist der mögliche Einsatz von Wärme zu Heizzwecken für landwirtschaftliche Biogasanlagen meist auf das Winterhalbjahr beschränkt. In dieser Zeit ist auch der Prozesswärmebedarf zur Beheizung der Fermenter, besonders bei hohem Gülleinsatz, am höchsten. Verwertungsraten der verfügbaren Wärme von 50 % und mehr im Jahresdurchschnitt sind somit für landwirtschaftliche Biogasanlagen nur unter sehr günstigen Standortbedingungen erreichbar.

Der unterstellte Standort mit 50 kW Heizwärmeleistungsbedarf würde somit im Winter eine Kesselleistung von 200...250 kW benötigen. Die Leistungsspitzen im Winterhalbjahr kann z. B. die 150 kW BGA auch aufgrund des höheren Prozesswärmebedarfs für die Gülleaufheizung nur absichern, wenn auch ein Sommerwärmebedarf vorhanden ist. Bei der unterstellten sehr guten Wärmeverwertung (Erlös: 4 ct/kWh) der unterstellten 150 kW Biogasanlage ist ein Zusatzerlös von 17,3 T€ (7 % der Erlöse) möglich. Hierbei ist unterstellt, dass der KWK-Bonus (13,1 T€) für die Finanzierung des Investitionsbedarfs (Wärmetransport und -verteilung) eingesetzt wird.

Tab. 1: Ökonomische Wirkung der Wärmenutzung

BGA-Leistung	150 kW	300 kW	500 kW
Prozesswärme/% der Erzeugung	30 kW/21 %	41 kW/15 %	54kW/13 %
Wärmenutzung	43 %	22 %	13 %
Wärmewert (4 ct/kWh)	17,5 T€/a (+ 13,1 T€/a KWK-Bonus)		
Ökonomische Leistungssteigerung auf: (ohne KWK-Bonus)	107 %	104 %	102 %

Erlöse aus dem **Düngewert** der Biogasgülle resultieren aus dem Einsatz der Biogasgülle zur Düngung. Anzurechnen sind nur die eingesetzten NAWAROs und extern zugeführte Wirtschaftsdünger (z. B. Hühnertro-

ckenkot), da ja der Düngewert der eigenen Gülle ökonomisch der Tierhaltung anzurechnen ist. Der Wert der Biogasgülle bemisst sich nach den wirksamen Nährstoffen, wobei N zu 60 % (Ansatz wie Schweinegülle aufgrund des hohen $\text{NH}_4\text{-N}$ -Gehaltes in der DVO) sowie P und K zu 100 % angerechnet werden. Die Transport- und Applikationskosten sind gegen zu rechnen.

Unter den Bedingungen der 150 kW Modellanlage hat die aus der Maissilage entstehende Biogasgülle einen Düngewert von 6,02 €/m³ (bei N=0,60 €/kg; P=1,00 €/kg; K=0,80 €/kg), von dem die Applikationskosten (3,5 €/m³) für die im Vergleich zur Einsatzmenge auf 72 % reduzierte Menge abzuziehen sind. Es ergibt sich ein Erlös von 8,9 T€/a. Allerdings erfolgt bei Einsatz der Biogasgülle im Betrieb meist keine Bewertung der Nährstoffe, da diese mit dem Verrechnungspreis für Maissilage saldiert werden. Im Außenverhältnis sollte der Nährstoffwert aber Berücksichtigung finden.

Der **Gülleinsatz** ist, besonders für kleinere Anlagen von sehr hoher ökonomischer Relevanz. Der eingesetzte Wirtschaftsdünger trägt zur Gasbildung bei (Einspeiseleistung von 20 kW) und somit ist weniger Maissilage erforderlich. Zusätzlich wird über den Güllebonus eine deutliche Steigerung der Vergütung wirksam. In der Modellanlage ist eine Vergütungssteigerung durch den Güllebonus von 45 T€ und die Verringerung der Aufwendungen von 13,5 T€ festzustellen. Der Wert der Gülle für die Biogasanlage ist damit deutlich höher als die alleinige Gasbildung, zumal zusätzliche Effekte durch die Stabilisierung des anaeroben Prozesses festzustellen sind.

3.2 Wirkung der Kostenbeeinflussung auf die Wirtschaftlichkeit

Die einzelnen Kosten der Biogaserzeugung und -verstromung sind von vielfältigen Faktoren abhängig. Der Substrat-Mix, mit dem Wirtschaftsdünger als meist kostenfreies Substrat, hat deutlichen Einfluss auf die Kosten (Tabelle 2) Ebenso bestimmen Grad der Automatisierung und die zum Einsatz kommende Technik über die Investitionssumme und die Wartungskosten.

Tab. 2: Kostengliederung in den Modellanlagen

BGA	150 kW	300 kW	500 kW
Kapitalbedingte Kosten	28 %	28 %	27 %
Versicherung	1 %	1 %	1 %
Biomassekosten	39 %	43 %	46 %
Personalkosten	8 %	6 %	6 %
Wartung, Instandhaltung	10 %	9 %	7 %
Hilfsstoffe (Prozessstrom)	9 %	9 %	9 %
Verwaltung/sonstiges	1 %	1 %	1 %
Lagerabdeckung	4 %	3 %	2 %

Die **kapitalbedingten Kosten** werden von den größenabhängigen, spezifischen Investitionskosten und dem Zinssatz bestimmt. Eine Verringerung der Investition, z. B. durch Einsatz qualitativ minderwertiger Materialien und Technik, ist bei einer vorgesehenen Nutzungsdauer der Anlagen von 20 Jahren auf keinen Fall zu empfehlen.

Für die 150 kW Modellanlage wird von rund 3600 €/kW Investitionskosten (ohne Silo und Güllelager) ausgegangen. In der Modellanlage verursacht eine 10 %ige Erhöhung des Investitionsaufwandes eine Steigerung der Stromerzeugungskosten um 0,51 ct/kWh bzw. 2,5 % Gesamtkostensteigerung (Tabelle 3).

Die **Biomassekosten** sind ein zweiter wesentlicher und auf keinen Fall zu unterschätzender Kostenfaktor, auch wenn bei Eigenbereitstellung der Biomasse die Kosten nicht direkt sichtbar sind. Für die Bewertung der Kosten der nachwachsenden Rohstoffe sind der Ansatz des Gleichgewichtspreises für alternative Marktfrüchte (Zielstellung gleiche Flächenrentabilität) bzw. der Herstellungskosten nutzbare Methoden. Zur Zeit beginnen sich für die Biogassubstrate Märkte herauszubilden, die aber aufgrund der Transportwürdigkeit und der begrenzten Lagerfähigkeit nur regional wirken.

Aus Sicht der Biogasanlagen ist zu ermitteln, bei welchen Grenzkosten für Biomasse die eingesetzten Faktoren Arbeit und Kapital noch ausreichend entlohnt werden. Dabei gilt Folgendes: Ist der Gleichgewichtspreis höher als der von der Biogasanlage ermittelte Grenzpreis, dann kann die Biogasanlage nicht wirtschaftlich betrieben werden. Bei der Einschätzung

der Wirkung der Biomassekosten ist auffällig, dass mit steigenden Biomassekosten der Einfluss auf das Betriebsergebnis deutlich sinkt, so dass bei Kosten über 40 €/t eine steigende Anlagengröße zur Verringerung des Ergebnisbeitrages führt (Abbildung 3).

Bei 35 €/t Silagepreis führt z. B. eine 10 %ige Erhöhung zur Verringerung der Stromerzeugungskosten um 0,80...0,78 ct/kWh bzw. zu einer erheblichen Verringerung des Ergebnisses 62...64 % (Tabelle 3).

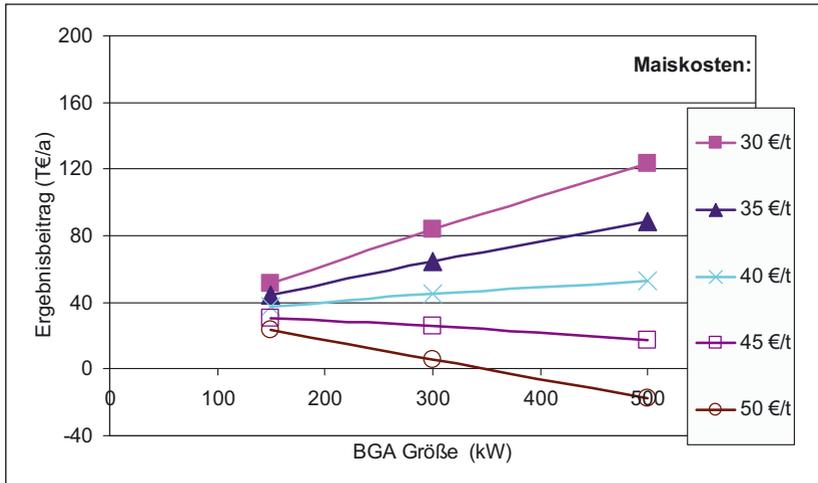


Abb. 3: Einfluss der Maissilagekosten auf den Ergebnisbeitrag der BGA

Der elektrische **Wirkungsgrad** der BHKW- Anlage hat einen dominanten Einfluss auf das Ergebnis. 10 % Verschlechterung bewirken eine Reduzierung des Ergebnisses auf 22 bis 44 %. In den letzten Jahren ist durch technische Entwicklung eine deutliche Verbesserung des Wirkungsgrades der Biogas-BHKW`s erreicht worden. In einer einmal gekauften Anlage wird der Wirkungsgrad nur durch die Motorauslastung (Volllaststunden) und den Verschleiß beeinflusst.

Die erreichten **Volllaststunden** üben ebenfalls einen wesentlichen Einfluss auf die Kosten aus. Höhere Volllaststunden ermöglichen zusätzlich oft einen besseren Wirkungsgrad, da im Nennlastbereich gefahren wird. Weiter verringern sie die Investsumme, da weniger Leistung vorgehalten werden muss. Voraussetzungen dafür sind eine hohe Stabilität der Biogaserzeugung und eine geringe Ausfallhäufigkeit der Anlage. Auch

sind ein ausreichend dimensionierter Gasspeicher und ein effektives Gasspeichermanagement erforderlich.

Die Modellanlage wird mit einer 10 % niedrigeren Volllaststundenzahl (6750 h) allein aus den reduzierten Investitionen eine deutliche Kostensteigerung um 0,63...0,51 ct/kWh bzw. eine Ergebnisverringeringung auf 70...73 % erreicht.

Zu beachten ist hier aber zusätzlich, dass die in der Planung oft unterstellten 8000 Volllaststunden und mehr in der Praxis nur von ca. 21 % der Anlagen erreicht werden, wie eine Analyse der Stromeinspeisung im Vattenfall-Gebiet für 2008 zeigt. Neben der Leistungsabhängigkeit der erreichten Volllaststunden ist besonders auch bedenklich, dass in 2008 nur 40 % der Anlagen über 7000 Volllaststunden erreicht haben (Abbildung 4).

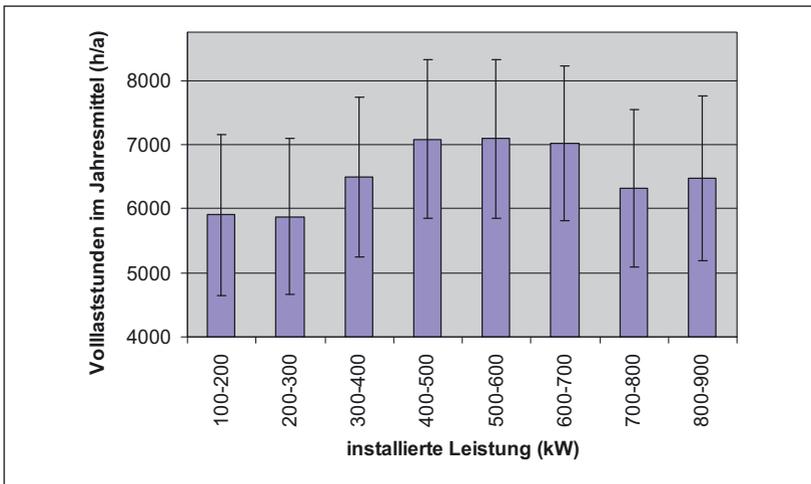


Abb. 4: Ausnutzung der installierten Leistung im Vattenfallgebiet in 2008 (n = 696; Anlagen > 100 kW und Inbetriebnahme vor 1.1.2008, ohne Anlagen mit Auslastung < 40 % (VATTENFALL 2009))

Der **Prozessstrombedarf** (15 ct/kWh) hat ebenfalls einen deutlichen Einfluss auf das ökonomische Ergebnis. Durch Unterstellung von 10 W/m³ Faulraum Leistungsbedarf für Homogenisierung, Pumpen usw. sowie 30 W/kW Wärme für den Notkühler lässt sich die ökonomische Wirkung einer 10 %igen Steigerung der elektrischen Prozessenergie abschätzen. Im Ergebnis verschlechtert sich der Ergebnisbeitrag auf 93 bis 95 %.

Tab. 3: Ökonomische Wirkung der Parametervariation

Parameter Ausgangswert		Veränderung des ökonomischen Ergebnisses (auf ... %)			Anstieg der Stromerzeugungs- kosten um ... ct/kWh		
		150 kW	300 kW	500kW	150 kW	300 kW	500 kW
Anlagengröße							
Investition 3,6/3,0/2,6 T€/kW	+10 %	76 %	80 %	83 %	0,51	0,42	0,37
Substratkosten 35 €/t	+10 %	62 %	62 %	64 %	0,80	0,80	0,78
Wirkungsgrad 35/38/40 %	-10 %	22 %	42%	42 %	1,61	1,46	1,37
Volllaststunden 7500 h	-10 %	70 %	73 %	76 %	0,63	0,56	0,51
Strombedarf 10 W/m ³	+10 %	93 %	94 %	95 %	0,14	0,12	0,11

4 Zusammenfassung

Insgesamt ergibt sich, dass entsprechend den heutigen Rahmenbedingungen besonders kleinere Anlagen mit Erschließung von Wärmesenken und Wirtschaftsdüngerpotentialen zum wirtschaftlichen Erfolgsmodell werden. Aufgrund der begrenzten Transportwürdigkeit von Silage, Gülle und Biogasgülle sowie der Wärmeverwertung hat der Standort einen hohen Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit. Eine Steigerung der Wärmenutzung für bestehende Anlagen lässt sich z. B. auch erreichen, wenn ein BHKW an den Standort des Wärmebedarfs verlagert wird (Satelliten-BHKW). Die Kosten der Gasleitungen müssen dabei aber in Grenzen gehalten werden.

Die Begrenzung der Investitionshöhe und Vermeidung überhöhter Biomassekosten sind wichtige, die Rentabilität sichernde Maßnahmen. Ein stabiler Anlagenbetrieb mit hoher Volllaststundenanzahl stellt dabei ebenfalls eine Voraussetzung für den wirtschaftlichen Erfolg der Anlage dar. Hier sind besonders bei kleineren Anlagen Defizite zu erkennen. Die zzt. wirkenden Agrarpreise stärken den Trend zur Wertschöpfung über Biogas in der Landwirtschaft.

Literatur

- Gräfe, E.: Betriebswirtschaftliche Richtwerte Milchproduktion mit Färsenzukauf auf Ackerstandorten. – Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft. – Jena, 2008
- Degner, J.: Betriebswirtschaftliche Richtwerte für die Produktion von Wintergerste. – Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft. – Jena, 2006
- Degner, J. Betriebswirtschaftliche Richtwerte für die Produktion von Silomais. – Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft. – Jena, 2006
- Vattenfall EEG Jahresabrechnung 2008. – www.vattenfall.de am 10.9.2009

Anschrift des Autors:

*Dr. Gerd Reinhold
Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft
Naumburger Str. 98, 07743 Jena
E-Mail: g.reinhold@jena.tll.de*

Finanzierung von Biogasanlagen – aus Sicht einer Bank

Hendrik Reimer
Deutsche Kreditbank AG

Einleitung

Die DKB ist als 100 %-ige Tochter der BayernLB mit 1.200 Mitarbeitern in den Bereichen Infrastruktur, Privatkunden und Firmenkunden tätig. Neben Land- und Ernährungswirtschaft, Tourismus und Gewerblichen Investoren bildet der Bereich Erneuerbare Energien einen wesentlichen Fokus im Firmenkundengeschäft. Die DKB finanziert seit 1996 im Bereich der Erneuerbaren Energien zahlreiche Projekte in den Segmenten Windenergie, Bioenergie und Photovoltaik. Dabei profitiert die Bank auch von ihrer starken Position in der Landwirtschaft mit über 3.600 Kunden.



Abb. 1: Portfolio der DKB AG im Segment Erneuerbare Energien

Im Teilsegment Bioenergie werden derzeit durch unser Haus ca. 280 Biogasanlagen, Holzheizkraftwerke mit einer elektrischen Gesamtleistung von ca. 90 MW und 9 Biodieselproduktionsanlagen begleitet, was über die letzten Jahre zu einem erheblichen Know-how-Aufbau in diesem Segment geführt hat. Die Bank verfügt über eigene Verfahrens- und Agraringenieure, die umfassendes Fachwissen zur Biogasverfahrens- und Anlagentechnik sowie zur Produktion landwirtschaftlicher Substrate vorhalten.

Jedes einzelne Bioenergieprojekt erfordert aufgrund der stark variierenden Rahmenbedingungen eine individuelle Betrachtung! Die Qualität des jeweiligen Projektes entscheidet über seine Finanzierungsmöglichkeit.

Für eine bedarfsgerechte Biogas-Anlagenfinanzierung müssen zahlreiche quantitative als auch qualitative Aspekte eines Biogasprojektes berücksichtigt werden. Schwerpunkt jeder Finanzierungsplanung ist die Ermittlung eines ausreichenden Finanzierungsrahmens. Damit soll eine Nachfinanzierung, die sowohl für den Kreditnehmer als auch den Kreditgeber immer unbequem ist und meist die Rentabilität des Vorhabens gefährdet, von vornherein ausgeschlossen werden.

Finanzierungsmodelle

Eine an die Bank gerichtete Finanzierungsanfrage beinhaltet im Wesentlichen die Verfahrensbeschreibung, das Angebot eines Anlagenbauers oder -planers, betriebswirtschaftliche Planung und Bestandsdaten, Genehmigungen, Lieferverträge für die vorgesehenen Biomassen sowie die notwendigen Einspeiseverträge mit dem Energieversorger für den produzierten Strom und die Wärmeabnahmeverträge.

Die Unterlagen werden als erstes durch die Bank gesichtet, eventuell fehlende Unterlagen werden anschließend in Absprache zwischen dem Kunden und der Bank ergänzt. Nach Herbeiführen einer Kreditentscheidung werden die Kreditverträge inkl. der erforderlichen Auszahlungs Voraussetzungen abgeschlossen. Die Auszahlung erfolgt gemäß Baufortschritt inkl. Bautenstandsbesichtigungen seitens der Bank und einer finanztechnische Begleitung des Projektes während der Betriebsphase.

Bei der Umsetzung der Finanzierung ist zwischen einer klassischen Unternehmensfinanzierung und einer Projektfinanzierung zu unterscheiden:

Unternehmens- finanzierung	Projekt- finanzierung
Unternehmen	Einzweck- gesellschaft
<ul style="list-style-type: none"> - Landwirtschaftsbetriebe (Anlage ist integraler Bestandteil des landwirtschaftlichen Betriebes) - Stadtwerke - kommunalnahe Unternehmen - Gasversorgungsunternehmen 	<p>initiiert durch:</p> <ul style="list-style-type: none"> - mehrere Landwirte - Anlagenbauer - regionale Energieversorger - Stadtwerke - Finanzinvestoren / Fonds

Abb. 2: Finanzierungsmodelle

Aspekt	Unternehmensfinanzierung	Projektfinanzierung
▪ Einschätzung	<p>...der Bonität des Unternehmens</p> <p>=> Darlehen wird vom Unternehmen bedient</p>	<p>...der Wirtschaftlichkeit des Projektes</p> <p>=> alles muss aus den Plan-cash-flow's bedient werden</p>
▪ Besicherung	<p>Vollständige Haftung des gesamten Unternehmens</p> <p>=> full recourse</p>	<p>1. Priorität = Projekt-Aktiva</p> <p>2. Priorität = cash-flow</p> <p>=> non / limited recourse</p>
▪ Perspektive	<p>Jahresabschluss- orientiert</p> <p>Rating</p>	<p>Planzahlen- orientiert</p> <p>Zweckgesellschaft hat keine Historie</p>

Abb. 3: Bewertung der Finanzierungsmodelle

Die DKB prüft Bioenergieprojekte grundsätzlich nach den Standards einer Projektfinanzierung (cash flow bezogene Analyse). Dabei wird in den Anforderungen zwischen landwirtschaftlichen Biogasanlagen (klassische Hofanlage) und Investorenprojekten unterschieden. Der Prüfprozess erfolgt bankintern Hand in Hand zwischen den Experten für die Technologie und für Landwirtschaft. Dieses Konzept trägt den Rahmenbedingungen

Rechnung und führt in der Praxis zu einer sehr hohen Beratungs- und Abwicklungskompetenz, die dem Kunden zur Verfügung steht.

Finanzierungsbedarf

Zur Ermittlung des bedarfsgerechten Finanzierungsrahmens müssen zunächst die so genannten „harten“ Investitionskosten umfassend ermittelt werden. Bei Biogasanlagen z. B. gehören neben den Fermentern sowie der Gastechnik inkl. BHKW und Fackel als wesentlichste Kostenpositionen auch die Substratzufuhrtechnik, Netzanschluss und Wärmeauskoppelung, MSR-Technik, erforderliche Lagerflächen, Betriebsgebäude und die gesamte sonstige Infrastruktur (inkl. Leitungsnetzen und Verkehrsanbindung) dazu. GÜ-Verträge, die grundsätzlich von Seiten der Bank begrüßt werden, müssen kritisch auf Berücksichtigung der Nebengewerke geprüft werden.

Ferner sind nicht unerhebliche Investitions- und Finanzierungsnebenkosten wie aus Projektentwicklung, Planungs- und Ingenieursleistungen, Genehmigung, Gutachten, Ausgleichsmaßnahmen, Rechts- und Steuerberatung, Notar- und Grundbuchkosten, Bankgebühren, Zwischenfinanzierungszinsen, Avalprovisionen und ein eventuelles Disagio in ausreichendem Maße zu berücksichtigen.

Darüber hinaus ist eine genaue Planung des Betriebsmittelbedarfs erforderlich (u.a. Sicherstellung Biomasseeinkauf bzw. -produktion). Für den abzusichernden Liquiditätsrahmen des ersten Betriebsjahres ist insbesondere die hinreichende Berücksichtigung der Inbetriebnahme- und Anfahrphase, die durchaus bis zu einem halben Jahr andauern kann, notwendig. Hier stehen regelmäßig erhebliche Kosten fehlenden bzw. noch ungenügenden Erträgen gegenüber. Eine externe Begleitung des Anlagenbetriebs oder notwendige Analysen erhöhen ggf. den Kostenrahmen. Der Betriebsmittelbedarf wird erfahrungsgemäß sehr häufig unterschätzt. Die Darlehenstilgung darf dementsprechend nicht zu früh beginnen.

Die nachfolgende Darstellung zeigt (stark vereinfacht) den typischen Liquiditätsverlauf eines Bioenergieprojektes.

Einzusetzendes Eigenkapital (inklusive Eigenleistungen) muss realistisch kalkuliert werden und frei zur Verfügung stehen! Die erforderliche Eigenkapitalausstattung beträgt für reine Projektfinanzierungen wenigstens 20 % der Gesamtinvestitionskosten und wird für jedes Projekt einzeln

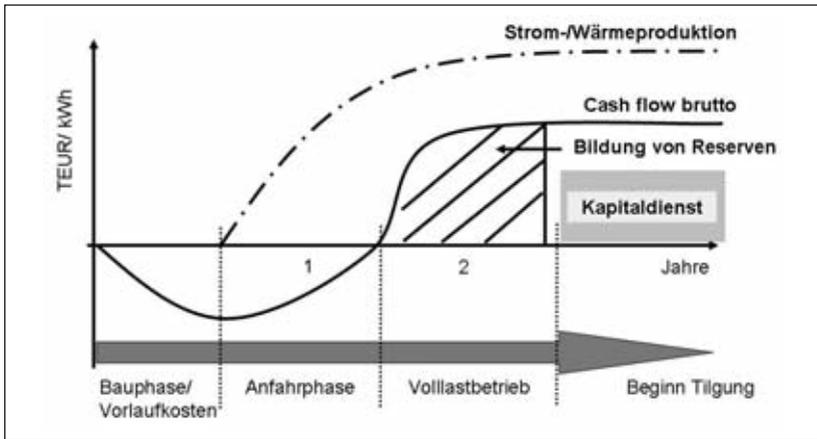


Abb. 4: Operative Liquidität im Projektverlauf

ermittelt. Insbesondere finden hier die Standortgüte, Investitionskosten, die Substratversorgung sowie die Betriebskosten Berücksichtigung.

Die Finanzierung von Bioenergieanlagen begleitet die DKB mit einer maximalen Finanzierungslaufzeit von 15 Jahren ab Inbetriebnahme bei üblicherweise einem tilgungsfreien Jahr.

Eine Zwischenfinanzierung der Umsatzsteuer während der Bauphase sowie eine Kreditlinie zur Vorfinanzierung der einzusetzenden Biomasse während der ersten Betriebsjahre wird bei Bedarf ebenfalls zur Verfügung gestellt.

Die Konditionen richten sich nach dem Risiko der Projektfinanzierung und werden für jedes Projekt separat ermittelt.

Voraussetzung der Sicherstellung eines bedarfsgerechten Finanzierungsrahmens ist eine vollständige und realistische Kostenplanung. Wie bei jeder anderen Finanzierung auch, sollte immer ein ausreichender Puffer für unvorhergesehene Mehrkosten eingeplant werden, um so eine Nachfinanzierung zu vermeiden.

Durch die DKB wird die Finanzierungsstruktur mittels Einbindung zinsgünstiger Finanzierungsmittel z. B. der KfW-Bankengruppe, der Europäischen Investitionsbank, der Entwicklungsbank des Europarates oder der Landwirtschaftlichen Rentenbank optimiert.

Eine bedarfsgerechte Finanzierung setzt voraus, dass sich die Bank detailliert mit dem Projekt auseinandersetzen kann. Hierzu müssen ihr

rechtzeitig alle Detailunterlagen vorliegen. Neben dem technischen Anlagenkonzept (Stand der Technik oder Innovationen) und der Wirtschaftlichkeitsberechnung (inkl. möglichst detaillierter Erläuterung der Kostenansätze) stellt die Plausibilisierung des Stoffstromkonzeptes einen wesentlichen Baustein der Finanzierungsprüfung dar. Bereits bei den Substraterzeugungs- und/oder Einkaufskosten entscheidet sich die Rentabilität einer Biogasanlage.

Besonderheiten des Liquiditätsverlaufs eines Biogasprojektes müssen bei der Festlegung der Finanzierungsbedingungen berücksichtigt werden. Insbesondere Reserven für die Instandsetzung, für Ersatzinvestitionen und den Kapitaldienst gehören in jede Finanzplanung.

Der Antragsteller/Kreditnehmer darf die intensive Diskussion seines Projektes mit der Bank nicht scheuen! Er sollte das intensive Gespräch suchen und sich darauf detailliert vorbereiten. Es ist nicht selten, dass ein erfahrener Finanzierungspartner Schwachstellen im Projekt aufdeckt.

Einflussfaktoren auf die Wirtschaftlichkeit

Zahlreiche Faktoren beeinflussen die Rentabilität einer Bioenergieanlage. Im Gegensatz zu den Kapitalkosten können die Betriebskosten durch zahlreiche Parameter beeinflusst werden. Wenn die Anlage einmal errichtet ist, stehen aber aufgrund der realisierten Technik viele Parameter fest, die kaum noch beeinflusst werden können (z. B. Wirkungsgrad, Prozessenergiebedarf). Insofern müssen alle Einflussfaktoren im Vorfeld erfasst und möglichst optimal berücksichtigt werden.

Zentralen Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit hat die Verfügbarkeit, der Preis und die Qualität der Einsatzstoffe. Jedes Jahr aufs neue kann beim Anbau/Einkauf der Biomassen vieles entscheidend positiv oder negativ beeinflusst werden. Dabei spielen nicht nur die direkten Kosten sondern insbesondere z. B. bei Biogasanlagen die Qualität der Substrate eine herausragende Rolle. Je höher der Biogasertrag aus einer feststehenden Substratmengemenge ist, umso ertragreicher ist das Projekt.

Weitere Kostenpositionen, wie z. B. Wartungskosten, Instandsetzungskosten, Versicherungskosten und Personal-/Arbeitskosten, müssen ausreichend berücksichtigt sein. Auch hier muss das individuelle Anlagenkonzept berücksichtigt werden. Der Abschluss eines Voll- oder Teilwartungsvertrages für die gesamte Anlage ist aus Bankensicht wünschenswert. Die

energetische Nutzung einiger Einsatzstoffe oder Technologien ist verbunden mit einem höheren Verschleiß, der vorzeitige Ersatzinvestitionen zur Folge haben kann, die durch ausreichende Rücklagen abgesichert werden müssen. Es kann mit etwa 0,8 bis 1 % der Investitionssumme pro Jahr für Versicherungen gerechnet werden. Erforderlich sind Sach-, Betriebsunterbrechungs- und Haftpflichtversicherungen.

Auch bei Einsatz von MSR-Technik ist der Automatisierungsgrad von Bioenergieanlagen beschränkt. Im Vergleich zu mit fossilen Energieträgern betriebenen Konversionsanlagen ist insbesondere durch die erheblichen Stoffmenge, die bewegt und gelagert werden muss, ein höherer Personalaufwand erforderlich.

Ein Schwerpunkt bereits in der Planungsphase sollte immer die Suche nach einem umfassenden, gewinnbringenden Wärmekonzept sein!

Hauptrisiken in einem Bioenergieprojekt

Nachfolgend sind die Hauptrisiken im Verlauf eines Bioenergieprojektes sowie die Maßgaben der finanzierenden Bank zur Risikominimierung aufgeführt.

Genehmigungsrisiko

- versierter Planer mit entsprechenden Referenzen
- ggf. juristische Unterstützung durch Fachanwalt

Errichtungs- / Fertigstellungsrisiko

- renommierte Lieferanten
- Verträge detailliert prüfen
- Bautagebuch/Fotodokumentation

Inbetriebnahmerisiko

- erfahrener Partner
- Betriebstagebuch

Funktionsrisiko

- Garantien
- Versicherung
- Wartungsverträge

Technisches Betriebsführungsrisiko

- fachlich qualifiziertes, erfahrenes Personal

Kaufmännisches Betriebsführungsrisiko

- realistische Planung
- zeitnaher Soll-/Ist-Abgleich

Prozessrisiko

- Messtechnik
- regelmäßige, zeitnahe Überwachung Analyse
- Laboruntersuchung

Versorgungsrisiko (Preis, Menge, Qualität)

- langfristige Verträge (Alternativszenarien)
- verlässliche Partner
- langfristig realistische Preise

Abnehmerisiko (Strom, Wärme, Reststoffe)

- EEG
- langfristige Verträge
- verlässliche Partner
- marktübliche Preise

Sicherheiten in einem Bioenergieprojekt

Die Besicherung eines Bioenergieprojektes erfolgt rein aus der Projektgesellschaft mit dem grundsätzlichen Ziel einer Fortführung des Projektbetriebs auch bei Wegfall des Kreditnehmers durch nachfolgend aufgeführte Instrumente.

Sicherung des Eigentums an der Anlage

- Grundschuld
- Sicherungsübereignung

Sicherung der Betriebsrechte

auf fremden Grundstücken:

- Dienstbarkeiten (einschl. Leitungs- u. Wegerechten)

Anforderungen an den Pacht-/Nutzungsvertrag Regelungen zu:

- Vertragslaufzeit (≥ 25 Jahre)
- Ausschluss ordentlicher Kündigung durch Eigentümer
- Nutzungsentgelt (Höhe Fälligkeit)
- Rechtsnachfolge (Übertragungsverpflichtung)
- Rückgabe/Beseitigungspflichten

Zession der Rechte und Ansprüche aus:

- GÜ-/Kaufverträgen
- Gestattungsverträgen (Kabel-/Wärmetrasse)
- Wartungsverträgen

Sicherung der Belieferungs- und Entsorgungsrechte

Zession der Rechte und Ansprüchen aus:

- Anbau- / Lieferverträgen
- Abnahme / Entsorgungverträgen

Sicherung der Liquidität

- erstrangige Zession der Einspeiserlöse (i. d. R. offene Zession)
- Reserven: Kapitaldienst-/Instandhaltungsreserve
- Zession der Rechte und Ansprüche aus Versicherungsverträgen

Fazit

Die wichtigste Voraussetzung für ein erfolgreiches Investitionsprojekt ist ein gutes und auf die jeweiligen Betriebsbedingungen abgestimmtes Anlagenkonzept mit realistischen Planungsgrößen. Bei Bioenergieanlagen sollte eine standfeste und für die unterschiedlichen Inputstoffe geeignete, ausgereifte Technologie angewendet werden.

Ein abgestimmtes Sicherheitenkonzept sowie ein vorausschauendes und permanent betriebenes Risikomanagement ist wesentlicher Bestandteil der Projektfinanzierung. Dabei müssen zahlreiche Parameter, die Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit haben, individuell berücksichtigt werden.

Für eine maßgeschneiderte Finanzierung sind zahlreiche Aspekte zu berücksichtigen. Es sollte daher immer frühzeitig eine finanzierende Bank eingebunden werden, die im Bioenergie-Segment über umfassende praktische Erfahrungen verfügt.

Anschrift des Autors:

*Hendrik Reimer
Deutsche Kreditbank AG
Fachbereich Erneuerbare Energien
Taubenstr. 7 – 9, 10117 Berlin
E-Mail: hendrik.reimer@dkb.de*

3.

Biologische Prozessführung

Mikrobielle Diversität in Biogasreaktoren bei der Vergärung von nachwachsenden Rohstoffen

*Michael Klocke, Edith Nettmann, Ingo Bergmann
Leibniz-Institut für Agrartechnik Potsdam-Bornim e.V. (ATB)*

Anaerober Abbau pflanzlicher Biomasse durch Mikroorganismen

Pflanzen nutzen Sonnenenergie zum Aufbau hochmolekularer Verbindungen, welche zum Aufbau von strukturellen Komponenten oder als Speicher für metabolische Energie verwendet werden. Nach dem Absterben geht die gespeicherte Energie nicht verloren, sondern kann von Tieren, Pilzen und Mikroorganismen wiederum für deren Bau- oder Energiestoffwechsel genutzt werden. Aus chemischer Sicht handelt es sich bei dem Abbau einer organischen Substanz um eine schrittweise Oxidation, bei welcher der Energiegehalt kontinuierlich verringert wird. Die freigesetzte Energie kann dann im Stoffwechsel des Organismus umgesetzt und für Aufbaureaktionen genutzt werden. Endprodukte des Abbauprozesses, welcher nicht zwangsläufig von nur einem Organismus umgesetzt werden muss, sind maximal oxidierte Grundbausteine.

In einem Biogasreaktor wird dieses grundlegende biologische Prinzip genutzt, um mittels der Stoffwechselaktivität von Mikroorganismen aus pflanzlicher Biomasse und tierischen Gülle im großen Maßstab methanhaltiges Biogas zu erzeugen. Durch den Ausschluss von Sauerstoff wird die vollständige Oxidation von Kohlenhydraten durch aerobe Bakterien zu Kohlendioxid (CO_2) und Wasser (H_2O) verhindert. Stattdessen sind Endprodukte der bakteriellen Gärung kurzkettige Fettsäuren (volatile fatty acids, VFA) insbesondere Acetat (Abbildung 1). Bei diesem Prozess, der auch als Acidogenese bezeichnet wird, entsteht trotz der anaeroben Bedingungen durch Decarboxylierungsreaktionen ebenfalls CO_2 , häufig parallel mit molekularem Wasserstoff (H_2). Bestimmte Arten von Bakterien sind

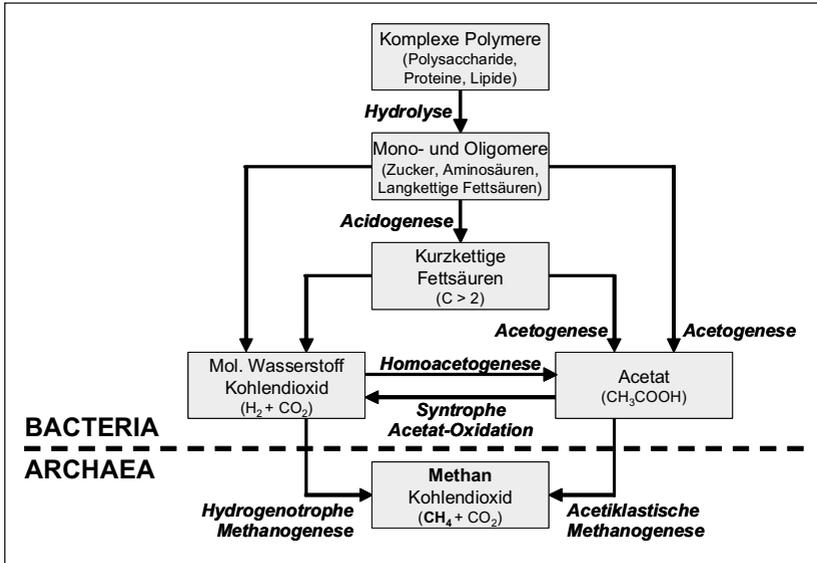


Abb. 1: Mikrobieller Abbau von Biomasse unter anaeroben Bedingungen (verändert nach Ahring, 2003).

in der Lage, CO_2 und kurzkettige Fettsäuren ineinander zu überführen (Acetogenese, Homoacetogenese, Acetat-Oxidation). Dieses kann sogar ungeachtet einer negativen Energiebilanz geschehen, entweder wenn Kohlenstoffeinheiten für den Baustoffwechsel benötigt werden oder aber wenn über eine symbiotische Partnerschaft mit anderen Mikroorganismen ein steter Verbrauch des Endproduktes erfolgt (Syntrophie) (Abbildung 1). Der Abbauprozess von Biomasse unter anaeroben Bedingungen wäre damit beendet, gäbe es nicht eine besondere Gruppe von Mikroorganismen, welche die Endprodukte der bakteriellen Gärung für ihren Energiestoffwechsel nutzbar machen können, indem sie hauptsächlich CO_2/H_2 und Acetat, seltener kurzkettige methylierte Verbindungen oder Methanol, zu Methan (CH_4) umsetzen (Methanogenese). Nach dem heutigen Stand der Wissenschaft sind hierzu nur einzelne Arten von Archaeen (taxonomisch korrekte Nomenklatur: Archaea) in der Lage. Es sind bislang keine Bakterien (taxonomisch korrekte Nomenklatur: Bacteria) bekannt, welche über den zur Methanogenese notwendigen Stoffwechselapparat verfügen.

Hydrolytisch-aktive und fermentative Bacteria im Biogasreaktor

In landwirtschaftlichen Biogasanlagen leben in einem Liter Prozessflüssigkeit zwischen 100 Milliarden bis zu einer Billion (10^{12}) Bakterien (Nettmann et al., eingereicht). Ein Großteil dieser Mikroorganismen ist bislang nicht taxonomisch beschrieben worden wie eine Studie von Klocke et al. (2009a) zeigte. In dieser Studie wurde die bakterielle Mikroflora in der Hydrolysestufe eines zweistufigen Systems zur Vergärung von Roggensilage untersucht. Hierzu wurde ein kulturunabhängiges Verfahren zur Typisierung der mikrobiellen Erbsubstanz (16S rRNA Gen) genutzt um eine Diskriminierung einzelner Arten durch selektive Kulturbedingungen auszuschließen. Aus dem Hydrolysereaktor wurden Proben zu drei Zeitpunkten (2, 4, 14 Tage) der Vergärung von Roggensilage entnommen, aus welchen insgesamt 1446 16S rRNA Gensequenzen, jedes repräsentativ für eine einzelne Bakterie in der Fermentation, untersucht wurden. Es konnten hiermit 444 verschiedene taxonomische Gruppen (operational taxonomic units, OTUs) nachgewiesen werden. Eine Auswertung der 120 am häufigsten nachgewiesenen OTUs ergab, dass über 92 % bezüglich der untersuchten DNA Region so große Unterschiede zu den bekannten Bakterienarten aufwiesen, dass sie nicht mehr einer bestimmten, bereits bekannten Art zu zuordnen waren. Teilweise unterscheiden sich die in Biogasreaktoren nachgewiesenen Bacteria in ihrer DNA-Sequenz für das 16S rRNA Gen um bis zu 25 % zu den am nächsten verwandten, bereits bekannten Arten, was für die Anwesenheit gänzlich unbekannter Großgruppen in dem Biogasreaktor spricht. Dementsprechend sind Aussagen über die konkrete Stoffwechselleistung dieser Arten und damit ihrer Bedeutung im Abbauprozess nur äußerst begrenzt möglich. Nichtsdestotrotz lassen sich auf Basis dieser Daten Aussagen über die Anwesenheit einzelner taxonomischer Gruppen im Biogasreaktor treffen (Abbildung 2).

Häufig nachgewiesen wurden Vertreter der Klassen Bacteroides und Clostridia, sowie etwas seltener der Spirochaetes, der Flavobacteria und der e-Proteobacteria. Zu ersteren zählen bekannte Vertreter des anaeroben Abbaus langkettiger organischer Verbindungen, während e-Proteobacteria nachgeordnete Reaktionen wie die Umwandlung kurzkettiger Kohlenhydrate vollziehen (Boone et al., 2001). So gehören zu der Klasse Clostridia bekannte Cellulose-Abbauer wie *Clostridium thermocellum* (Schwarz, 2001), oder Wasserstoffbildner wie *C. tyrobutyricum* (Jo et al., 2008). Flavob-

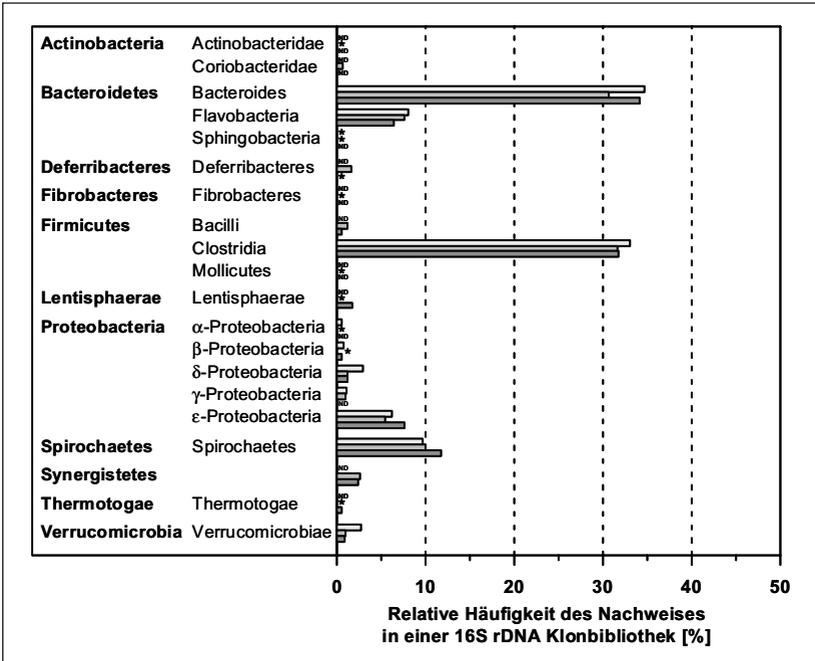


Abb. 2: Nachweis hydrolytischer und fermentativer Bacteria in einer Trockenvergärung von Roggensilage im zweistufigen Fermentersystem (verändert nach Klocke et al., 2009a). Dargestellt ist der relative Anteil von 16S rRNA Gensequenzen der jeweiligen taxonomischen Gruppe an der Gesamtheit aller untersuchten Sequenzen einer entsprechenden Klonbibliothek. Von der Auswertung ausgeschlossen wurden nur einmal detektierte taxonomische Einheiten (OTUs). Hellgrau= nach 2 d, grau= nach 4 d, dunkelgrau= nach 14 d. *= Relative Häufigkeit < 1 %; ND= Nicht nachgewiesen.

acteria hingegen sind bedeutende Destruenten organischer Biomasse in aquatischen Systemen (Kirchman, 2002). Wie aus Abb. 2 ebenfalls hervorgeht, gibt es auf Ebene der großen taxonomischen Einheiten nur wenige Änderungen im Verlauf der vierzehntägigen Fermentation. Auf Ebene der OTUs allerdings treten im Verlauf der Vergärung deutliche Unterschiede auf wie aus einem paarweisen Vergleich der bakteriellen Diversitäten mittels mathematischer Verfahren (Similaritätsindices nach Chao-Jaccard,

SI) ersichtlich wird. Mit Werten von 0,56 bzw. 0,60 fallen die Werte für den SI relativ gering aus, was für eine verhältnismäßig hohe Dynamik der bakteriellen Mikroflora selbst in dem vergleichsweise kurzen Zeitraum spricht. Bezieht man allerdings ausschließlich die wiederholt detektierten OTUs in die Berechnung ein, resultieren wesentlich höhere Werte von 0,84 bzw. 0,80. Dieses kann als Indiz gewertet werden, dass die hauptsächlichen Vertreter der hydrolytischen Bacteria-Biozönose während des vierzehntägigen Verlaufs der Hydrolyse im Verhältnis zur gesamten Bacteria-Population konstant bleiben.

Methanbildende Archaea im Biogasreaktor

Methanogene Archaea sind in landwirtschaftlichen Biogasanlagen mit einem zehntel bis einem hundertstel der Zelldichte von Bakterien zu finden (Nettmann et al., eingereicht). Häufig zu finden sind Vertreter der Methanomicrobiales wie *Methanocorpusculum* spp. und *Methanoculleus* spp. (Abbildungen 3 und 4) (Nettmann et al., 2008; Nettmann et al., eingereicht; unpublizierte Daten). In einzelnen landwirtschaftlichen Biogasanlagen kann die Archaea-Gemeinschaft sogar ausschließlich aus Methanomicrobiales bestehen. *Methanocorpusculum* spp. und *Methanoculleus* spp. sind hydrogenotrophe Methanbildner, das heißt sie nutzen vorrangig CO_2 in Verbindung mit H_2 als Basis für die Synthese von Methan. Bei einer solchen Struktur der methanogenen Lebensgemeinschaft wird Acetat nicht mehr direkt zur Methanbildung genutzt. In der Konsequenz würde dieses entweder bedeuten, dass Acetat in der Prozessflüssigkeit akkumuliert wird, was im Fall der untersuchten Biogasanlagen jedoch nicht der Fall war, oder aber dass das Acetat im Zuge einer möglicherweise syntrophen Acetat-Oxidation zu CO_2 umgewandelt wird. Zur direkten Verstoffwechslung von Acetat sind nach heutigem Stand der Wissenschaft nur einzelne Vertreter der Methanosarcinales wie *Methanosaeta* spp. und *Methanosarcina* spp. befähigt. Insbesondere *Methanosaeta* spp. ist angepasst an die Nutzung kleinster Mengen von Acetat und wird von manchen Autoren als Indikator für einen effektiven Biomasse-Abbau angesehen (McHugh et al., 2003). *Methanosaeta* spp. ist als sessiler, fädiger Organismus in Biogasreaktoren häufig als Aufwuchs auf den Oberflächen innerhalb des Reaktors zu finden und fester Bestandteil von Biofilmen und Granules (Abbildung 3). Nichtsdestotrotz erfolgt immer ein Abrieb und Transport der Zellen mit

der Prozessflüssigkeit (Abbildung 3), so dass in Biogasanlagen mit einer ausgeprägten Methanosaeta-Population diese auch in der Prozessflüssigkeit, durchaus auch mit größeren Anteilen, nachweisbar sind (Abbildung 4). Das Wachstum und die Stoffwechselaktivität von Methanosaeta spp. wird unter anderem durch hohe Gehalte an Ammonium gehemmt (2,5–8,0 g kg⁻¹ abhängig vom Substrat) (Poggi-Varaldo et al., 1997). Hierbei ist zu beachten, dass die hemmende Wirkung von Ammonium (NH₄⁺) eventuell primär auf der Umwandlung zu freiem Ammoniak (NH₃) beruht, welche wiederum auf der Temperatur in dem Reaktor sowie dem pH Wert und damit letztendlich von der Pufferkapazität des Gärsubstrats abhängt. In Biogasreaktoren wurden ab einem Ammoniumgehalt über 1,5 g l⁻¹ keine Methanosaetaeaceae mehr nachgewiesen (Karakashev et al., 2005), in landwirtschaftlichen Biogasanlagen auf Basis nachwachsender Rohstoffe lag die Grenze bei 1,5 bis 1,7 kg t⁻¹ (Nettmann et al., eingereicht).

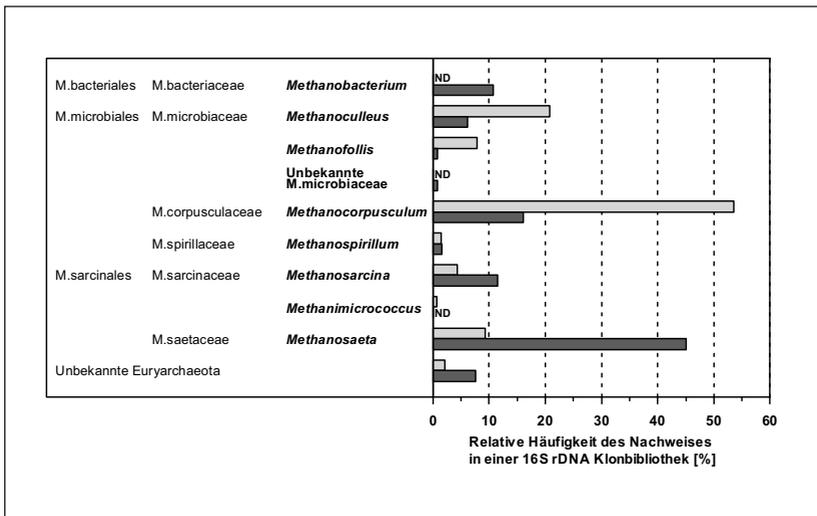


Abb. 3: Nachweis methanogener Archaea in dem Anaerobfilter (Festbettreaktor) eines zweistufigen Fermentersystems bei der Vergärung von Roggensilage. Dargestellt ist der relative Anteil der Sequenzen für das 16S rRNA Gen der jeweiligen taxonomischen Gruppe an der Gesamtheit aller untersuchten Sequenzen aus einer entsprechenden Klonbibliothek. Die Balken repräsentieren die Archaea Diversität in Proben genommen aus der Prozessflüssigkeit (hellgrau) und dem Biofilm auf der Oberfläche der Füllkörper (dunkelgrau). ND= Nicht nachgewiesen.

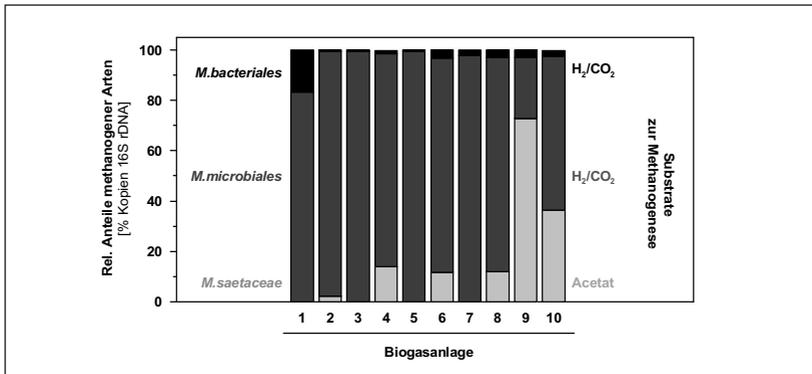


Abb. 4: Nachweis methanogener Archaea in landwirtschaftlichen Biogasanlagen in der Vergärung von nachwachsenden Rohstoffen (verändert nach Klocke et al., 2009b). Dargestellt sind die relativen Anteile der Kopienzahlen für das 16S rRNA Gen für verschiedene Gruppen methanogener Archaea in einem Nanogramm mikrobieller DNA isoliert aus der Prozessflüssigkeit des Fermenters. Der Nachweis der Archaea 16S rDNA erfolgte mittels quantitativer real-time PCR.

Perspektiven in Forschung und Entwicklung zur Optimierung der Mikrobiologie

Die Umwandlung von nachwachsenden Rohstoffen zu Biogas erfolgt durch eine komplexe und dynamische mikrobielle Lebensgemeinschaft, die sich aus mehreren hundert Arten von Bakterien und Archaeen zusammensetzt. Jedoch ist ein Großteil der beteiligten Arten bislang weder taxonomisch noch hinsichtlich ihrer Stoffwechselaktivität charakterisiert. Hier besteht noch erheblicher Forschungsbedarf (vgl. Antoni et al., 2007). Mittels klassischer und teilweise auch neu zu entwickelnder mikrobiologischer Kulturtechniken müssen wesentlich mehr Arten als bisher isoliert und beschrieben werden. Insbesondere die syntrophen Lebensgemeinschaften bilden in diesem Zusammenhang eine besondere Herausforderung. Neueste Entwicklungen auf dem Gebiet der molekulargenetischen Hochdurchsatzanalytik bieten die Möglichkeit, innerhalb kürzester Zeit die gesamte Erbinformation und damit gleichzeitig das metabolische Potential sowohl von isolierten Stämmen aber auch von mikrobiellen Biozönosen zu ermitteln (vgl. Schlüter et al., 2008). Hierdurch wird eine umfassende systembiolo-

gische Charakterisierung der Mikrobiologie eines Biogasreaktors sowohl auf Ebene ihres genetischen Potentials (Metagenom), der Genaktivität unter bestimmten Reaktorzuständen (Metatranskriptom), der produzierten Enzyme (Metaproteom) als auch auf Ebene der Intermediate des mikrobiellen Stoffwechsels (Metabolom) möglich. Basierend auf diesen Daten kann dann einerseits eine detaillierte Beschreibung der mikrobiellen Stoffwandlungsprozesse bis hin zur Modellierung des gesamten Abbauprozesses erfolgen (U.S. Department of Energy Office of Science, 2008), andererseits wird die Entwicklung verbesserter Nachweisverfahren für einzelne, besonders prozessrelevante Gruppen von Mikroorganismen möglich. Ein Ansatz hierfür wäre die Entwicklung von neuen DNA-Sonden zum Einsatz in DNA-/RNA-basierten Nachweisverfahren wie der Polymerasekettenreaktion oder für zellbasierte Nachweisverfahren wie der Fluoreszenz-Mikroskopie oder der Zytometrie. Die Entschlüsselung des genetischen Potentials, einerlei ob auf Basis isolierter Stämme oder resultierend aus einer Metagenom-Analyse, erlaubt den Zugriff auf Gene für Schlüsselenzyme des hydrolytischen Abbaus von Biomasse wie Cellulasen, Hemicellulasen, β -Glucanasen, Xylanasen und anderen. Es ist zu erwarten, dass hier eine Vielzahl neuer Enzyme oder bekannter Enzyme mit neuartigen Eigenschaften z.B. bezüglich Temperaturoptimum und Substratumsatzraten ermittelt werden. Hieraus ergibt sich die Chance, diese Gene mittels gentechnischer Ansätze in bakterielle Expressionssysteme (vgl. Fredrickson et al., 2008; Gibson et al., 2008) zu übertragen und diese zur Etablierung neuer biotechnologischer Verfahren zur Verwertung von pflanzlicher Biomasse einzusetzen (U.S. Department of Energy Office of Science, 2008). Obwohl die biotechnologische Nutzung „maßgeschneiderter“ Mikroorganismen über ein enormes wirtschaftliches Potential verfügt, ist derzeit die Anwendung gentechnisch erzeugter „Supermikroben“ in landwirtschaftlichen Biogasreaktoren aufgrund der aktuellen deutschen und europäischen Gesetzeslage nicht möglich. Fraglich ist zudem, ob solche Organismen überhaupt unter den unsterilen Bedingungen einer Biogasanlage eingesetzt werden könnten oder ob eine Verdrängung durch die in den Gärsubstraten enthaltene Mikroflora einsetzt. Eine vorherige Sterilisation der Gärsubstrate zur Vermeidung von Konkurrenzen oder eine Desinfektion der Gärreste zur Inaktivierung gentechnisch veränderter Organismen wird aus ökonomischen Gründen nicht sinnvoll sein. Eine Alternative zu gentechnisch veränderten Starterkulturen stellen Animpfkulturen von Wildtyp-Stämmen dar. Einzelne Kulturen oder Mischungen verschiedener

Arten von Mikroorganismen könnten die in dem Biogasreaktor vorhandene mikrobielle Lebensgemeinschaft hinsichtlich bestimmter StoffwechsellLeistungen sinnvoll ergänzen. Ein solche Strategie kann jedoch nur etabliert werden, wenn (1) geeignete Stämme verfügbar sind, die neben der gewünschten Stoffwechselleistung auch über die Fähigkeit verfügen, sich in dem Biogasreaktor rasch und in großer Zellzahl etablieren zu können, (2) Kenntnisse über die Struktur und damit über die Defizite der mikrobiellen Biozönose in dem jeweiligen Biogasreaktor vorliegen. Beides erfordert weitere Forschungsanstrengungen sowohl auf Ebene der Charakterisierung der Biogas-Mikrobiologie als auch zur Entwicklung neuer Verfahren zur mikrobiologischen Analyse.

Zitierte Literatur

- Ahring BK (2003) Perspectives for anaerobic digestion. *Adv Biochem Eng Biotechnol* Vol. 81, pp. 1-30.
- Antoni D, Zverlov VV, Schwarz WH (2007) Biofuels from microbes. *Appl Microbiol Biotechnol* Vol. 77, pp. 23-35.
- Boone DR, Castenholz RW, Garrity GM (2001) *Bergey's manual of systematic bacteriology*. Second Edition, Volume 1. Springer, Berlin.
- Fredrickson JK, Romine MF, Beliaev AS, Auchtung JM, Driscoll ME, Gardner TS, Nealson KH, Osterman AL, Pinchuk G, Reed JL, Rodionov DA, Rodrigues JLM, Saffarini DA, Serres MH, Spormann AM, Zhulin IB, Tiedje JM (2008) Towards environmental systems biology of *Shewanella*. *Nat Rev Microbiol* Vol. 6, pp. 592-603.
- Gibson DG, Benders GA, Andrews-Pfannkoch C, Denisova EA, Baden-Tillson H, Zaveri J, Stockwell TB, Brownley A, Thomas DW, Algire MA, Merryman C, Young L, Noskov VN, Glass JL, Venter JC, Hutchison CA, Smith HO (2008) Complete chemical synthesis, assembly, and cloning of a *Mycoplasma genitalium* genome. *Science* Vol. 319, pp. 1215-1220.
- Jo JH, Lee DS, Park JM (2008) The effects of pH on carbon material and energy balances in hydrogen-producing *Clostridium tyrobutyricum* JM1. *Bioresource Technol* Vol. 99, pp. 8485-8491.
- Karakashev D, Batstone DJ, Angelidaki I (2005) Influence of environmental conditions on methanogenic compositions in anaerobic biogas reactors. *Appl Environ Microbiol* Vol. 71, pp. 331-338.
- Kirchman DL (2002) The ecology of *Cytophaga-Flavobacteria* in aquatic environments. *FEMS Microbiol Ecol* Vol. 39, pp. 91-100.
- Klocke M, Mundt K, Sontag M, Schönberg M, Linke B. (2009a) Microbial community structure within a two-stage biogas reactor system with bioleaching of rye silage. *Bornimer Agrartechnische Berichte* Vol. 68, pp. 126-139.
- Klocke M, Nettmann E, Bergmann I (2009b) Monitoring der methanbildenden Mikroflora in Praxis-Biogasanlagen im ländlichen Raum: Analyse des Ist-Zustandes und

- Entwicklung eines quantitativen Nachweissystems. Bornimer Agrartechnische Berichte Vol. 67, pp. 1-90.
- McHugh S, Carton M, Mahony T, O'Flaherty (2003) Methanogenic population structure in a variety of anaerobic bioreactors. *FEMS Microbiol Lett* Vol. 219, pp. 297-304.
 - Nettmann E, Bergmann I, Mundt K, Linke B, Klocke M (2008) Archaea diversity within a commercial biogas plant utilizing herbal biomass determined by 16S rDNA and *mcrA* analysis. *J. Appl. Microbiol.* Vol. 105, pp. 1835-1850.
 - Nettmann E, Bergmann I, Pramschüfer S, Mundt K, Plogsties V, Herrmann C, Klocke M (eingereicht) Polyphasic analyses of methanogenic Archaea communities in agricultural biogas plants.
 - Poggi-Varaldo HM, Rodriguez-Vázquez R, Fernández-Villagómez G, Esparza-Gracia F (1997) Inhibition of mesophilic solid-substrate anaerobic digestion by ammonia nitrogen. *Appl Microbiol Biotechnol* Vol. 47, pp. 284-291.
 - Schlüter A, Bekel T, Diaz NN, Dondrup M, Eichenlaub R, Gartemann KH, Krahn I, Krause L, Kromeke H, Kruse O, Mussgnug JH, Neuweiger H, Niehaus, Pühler A, Runte KJ, Szczepanowski R, Tauch A, Tilker A, Viehover P, Goesmann A (2008) The metagenome of a biogas-producing microbial community of a production-scale biogas plant fermenter analysed by the 454-pyrosequencing technology. *J Biotechnol* Vol. 136, pp. 77-90.
 - Schwarz WH (2001) The cellulosome and cellulose degradation by anaerobic bacteria. *Appl Microbiol Biotechnol* Vol. 56, pp. 634-649.
 - U.S. Department of Energy Office of Science (2008) Systems biology knowledgebase for a new era in biology. <http://genomicsgtl.energy.gov/compbio/#downloads>.

Anschrift der Autoren:

*Dr. rer. nat. Michael Klocke, Edith Nettmann, Ingo Bergmann
Leibniz-Institut für Agrartechnik Potsdam-Bornim e.V. (ATB)
Max-Eyth-Allee 100, 14469 Potsdam
E-Mail: mklocke@atb-potsdam.de*

Was leisten Zusatzstoffe & Hilfsmittel zur Optimierung der Biogasproduktion?

Udo Hölker
Bioreact GmbH

Die Firma Bioreact wurde im Jahr 2000 an der Universität Bonn gegründet. Seit 2003 beschäftigen sich mittlerweile 30 Mitarbeiter mit der Erforschung, der Entwicklung, der Produktion und dem Vertrieb von Prozesshilfsmitteln zur Effizienzverbesserung von Biogasanlagen.

In dem nach DIN/ISO EN 17025 akkreditierten Prüflabor des Unternehmens wurden bislang Proben aus mehr als 1300 Biogasanlagen analysiert und mit auf den Anlagen gewonnenen Daten (z. B. Substratart, Substratmenge, Faulraumvolumen, installierte und erreichte elektrische Leistung) korreliert.

In vielen der untersuchten Anlagen werden unterschiedliche Zusatzstoffe und Hilfsmittel eingesetzt, die anhand ihres Einsatzspektrums klassifiziert werden können:

- Hilfsmittel zur Bekämpfung von akuten Problemen (z. B. Anti-Schaummittel, pH steigernde/Puffer stabilisierende Substanzen)
- Hilfsmittel zur Hemmstoff-Bindung, z.B. bei hohen Konzentrationen von H_2S oder NH_3 (Eisensalze, Algenpräparate, Tonminerale, Zeolithe etc.)
- Zusatzstoffe, die dem Aufschluss nachwachsender Rohstoffe dienen (z. B. Enzyme)
- Zusatzstoffe zur Verbesserung der Prozessstabilität (z. B. Spurenelemente)

Die Indikation für den Einsatz von Hilfsmitteln, die in aller Regel nicht direkt in den biologischen Prozess eingreifen, sondern über chemische Reaktionen akut auftretende Probleme lösen sollen, ist oft relativ leicht zu stellen. In vielen Fällen ist bei deren Einsatz, wie bei der Bekämpfung von plötzlich auftretendem Schaum, Eile geboten. Schaum, der aus unterschied-

lichen Ursachen entstehen kann, wird durch verschiedene Mittel, die zum einen selbst grenzflächenaktiv sind oder zum anderen die Oberflächenspannung des Wassers erhöhen, wirkungsvoll bekämpft. Ein ebenso schnelles Handeln ist bei einer Versäuerung des Fermenterinhalt angebracht. Bei Werten unter pH 6 kann z. B. durch Zugabe von Löschkalk schnell wieder ein optimaler pH-Wert über 7,3 erreicht werden. Ist der pH-Wert über pH 6, zeigt sich Natriumbicarbonat als besonders geeignet, da nicht nur der pH-Wert kontrolliert angehoben, sondern auch die Pufferkapazität des Fermenterinhalt verbessert wird. Vor dem kontinuierlichen Einsatz von Hemmstoffbindern, die nicht als reines Havariehilfsmittel eingesetzt werden sollen (z. B. Eisensalze oder Ton-Mineralen), sollte der Prozess zuvor gründlich analysiert werden und mögliche Alternativen (z. B. biologische Entschwefelung oder proteinärmere Substrate) in Betracht gezogen werden.

Vor jedem beabsichtigten Einsatz von Zusatzstoffen, die die Effizienz einer Biogasanlage verbessern sollen (Enzyme oder Spurenelemente), muss eine gründliche Analyse des Prozesses durchgeführt werden. Variable Faktoren wie z. B. Art und Menge der Inputstoffe, Verweilzeiten, Raumbelastungen, Gasmenge und Gasqualität müssen erfasst und mit im Labor bestimmten mikrobiologisch relevanten Werten (pH, EC, FOS, TAC, $\text{NH}_4\text{-N}$, TS, oTS, organische Säuren ($\text{C}_2 - \text{C}_6$), Analyse der Makro- und Spurenelemente) abgeglichen werden. Erst basierend auf den gewonnenen Daten kann über einen betriebswirtschaftlich sinnvollen Einsatz solcher Zusatzstoffe entschieden werden.

Enzyme

Die Spaltung biologischer Polymere (Polysaccharide, Proteine, Lipide etc.) in die von Bakterien nutzbaren Monomere (Zucker, Aminosäuren, Fettsäuren etc.) erfolgt hydrolytisch unter Wassereinlagerung. Diese Spaltung erfolgt im Fermenter in der Regel durch zellwandgebundene extrazelluläre bakterielle Enzyme. Die Hydrolyse kann, abhängig von den eingesetzten Substraten, zu einem geschwindigkeitslimitierenden Schritt der Biogasbildung werden. Dies ist insbesondere dann der Fall, wenn Substrate mit einem hohen Anteil an Cellulose oder Hemicellulose bei einer begrenzten hydraulischen Verweilzeit genutzt werden sollen.

Zur Beurteilung der Substratausnutzung haben sich die von der KTBL und der FNR publizierten Gasertragswerte als überaus geeignet erwiesen.

In einer fortlaufend durchgeführten Serienuntersuchung von bislang 1100 Biogasanlagen wurden die auf den Anlagen erreichten Gaserträge in Relation zu den von der KTBL publizierten Werten gesetzt. Es zeigte sich, dass diese Werte in der Praxis durchschnittlich zu 96,3 % erreicht werden (Abbildung 1).

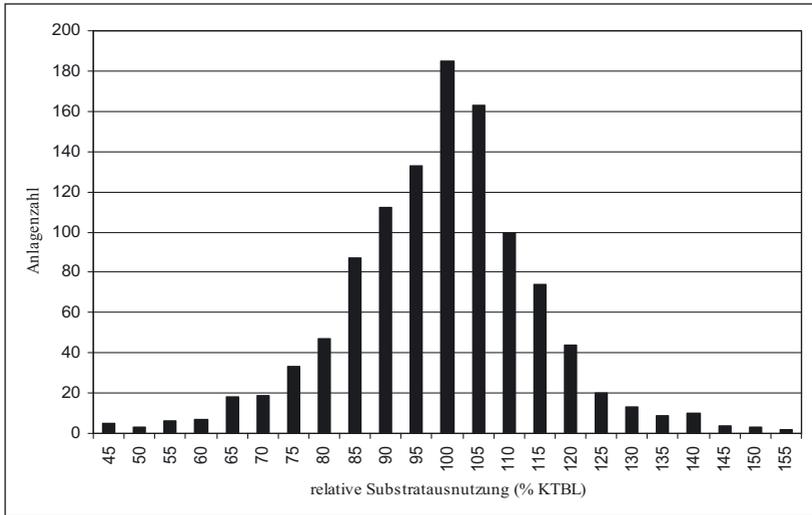


Abb. 1: Häufigkeitsverteilung der zu den KTBL-Werten (Heft 50) in Relation gesetzten Substratausnutzungsraten in 1100 Nawaro-Biogasanlagen. Im Mittel erreichen die Anlagen eine relative Substratausnutzung von 96,3 %. 54 % aller Anlagen liegen zwischen 90 und 110 %, 83 % zwischen 80 und 120 %.

Je länger Substrate wie Mais- oder Grassilagen in der Biogasanlage verweilen können, umso effektiver werden sie durch die Bakterien genutzt. Bei hydraulischen Verweilzeiten über ca. 150 Tagen werden die KTBL-Zahlen sogar leicht übertroffen. Eine darüber hinaus gehende Verweilzeit im beheizten Fermentationsvolumen bringt keinen Mehrertrag. Anlagen mit einem hohen Anteil leicht verfügbarer Bestandteile, wie z. B. Rindergüllen mit einer hohen Konzentration an niedermolekularen Fettsäuren erreichen schon bei relativ kurzen Verweilzeiten hohe Gaserträge (Abbildung 2).

Neben einer kurzen Verweilzeit ist auch eine hohe Raumbelastung für eine optimale Substratausnutzung abträglich. Bei Raumbelastungen unter

1,5 kg oTS / (m³ · Tag) werden die KTBL-Werte im Klassenmittelwert um bis zu 5 % übertroffen (Abbildung 3).

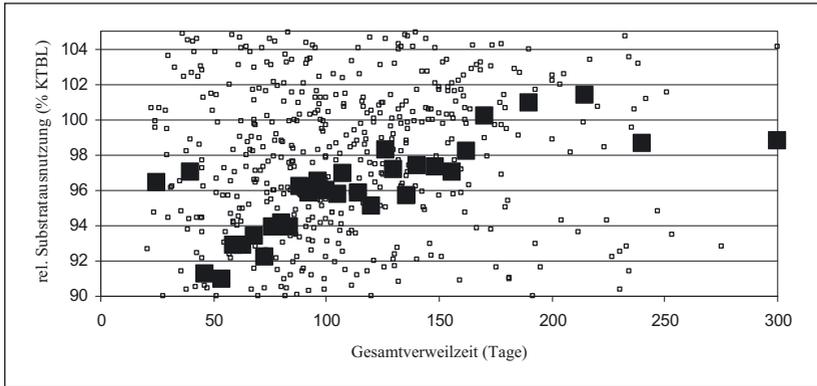


Abb. 2: Auftragung der Gesamtverweilzeit gegen die zu den KTBL-Werten (Heft 50) in Relation gesetzten Substratausnutzungsraten in 1100 Nawaro-Biogasanlagen. Zwischen einer Verweilzeit von 50 bis 150 Tagen steigt die mittlere Substratausnutzung an (dicke Quadrate = Klassenmittelwerte, kleine Quadrate = einzelne Anlage). Anlagen mit einem hohen Anteil an Rindergülle erreichen schon bei niedrigen Verweilzeiten eine hohe relative Substratausnutzung (ersten beiden dicken Quadrate).

Eine optimale Ausnutzung der in die Biogasanlage eingebrachten Substrate ist ein wirtschaftlich wichtiger Faktor. So verbraucht eine unter Volllast betriebene 500 kW-Biogasanlage mit einer relativen Substratausnutzung von 90 % 10.500 t Maissilage pro Jahr, eine Anlage mit 105 % relativer Substratausnutzung nur 8.950 t (bei einem Ertrag von 198 m³ Biogas pro Tonne FM (bei 32,6 % TS) mit 54 % Methankonzentration und bei einem elektrischen Wirkungsgrad von 39 % (KTBL Heft 50)). Bei einem Maispreis von 30 €/t entspräche dies einem Unterschied von 46.500 €/Jahr, 1 % Substratausnutzung entspricht folglich einem Gegenwert von 3.100 €/Jahr.

Die Wirkung von dem Prozess extern zugesetzten Enzymen ist im Wesentlichen in einer Beschleunigung des Abbaus der pflanzlichen Polymere zu sehen. Substanzen wie Cellulose oder Hemicellulose werden in kürzerer Zeit schneller abgebaut. Durch den Einsatz von Enzymen wird somit in der Regel nicht mehr Gas pro Tonne FM produziert, als auch bei langen Verweilzeiten freigesetzt würde. Somit dient der Enzymeinsatz einer „virtu-

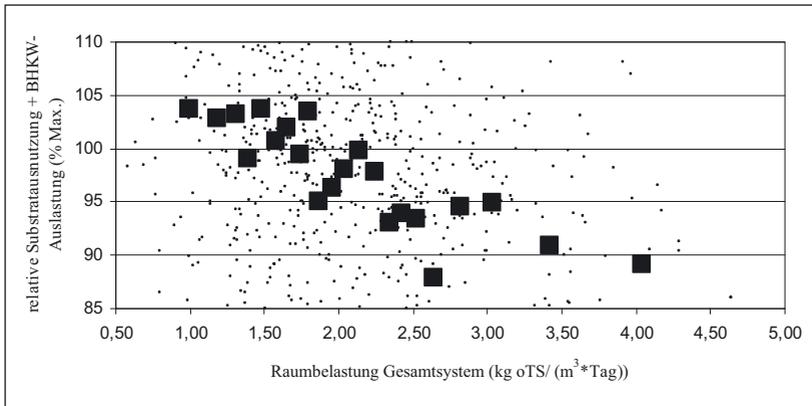


Abb. 3: Auftragung der Raumbelastung (Fermenter- + Nachgärervolumen) gegen die zu den KTBL-Werten (Heft 50) in Relation gesetzten Substratausnutzungsraten in 1100 Nawaro-Biogasanlagen. Bei einer Raumbelastung unter 1,5 kg oTS/(m³ · Tag) werden die KTBL-Werte übertroffen (dicke Quadrate = Klassenmittelwerte, kleine Quadrate = einzelne Anlage).

ellen“ Verlängerung der Verweilzeit.

In einem Versuch in 68 Anlagen wurde die Wirkung von Enzymen untersucht. In Anlagen mit langen Verweilzeiten oder zu Versuchsbeginn hohen bzw. auch sehr schlechten Substratausnutzungsraten, war eine deutliche Enzymwirkung nur in Ausnahmefällen gegeben. In Anlagen mit einer Verweilzeit zwischen 50 und 110 Tagen verbesserte sich die relative Substratausnutzung in einem Zeitraum von 2 bis 3 Monaten hingegen um durchschnittlich zwischen 10 und 15 %. Bis zu einer Verweilzeit von ca. 150 Tagen und Nutzung cellulosereicher Substrate kann Enzymeinsatz wirtschaftlich sinnvoll sein (Abbildung 4 und Tabelle 1).

Allerdings ist die Wirkung von Enzymen in der Biogasanlage von einer Vielzahl schwer vorhersehbarer Faktoren abhängig. Enzyme sind Proteine und werden in der Biogasanlage zeitabhängig inaktiviert und abgebaut. Dabei sind die Enzymaktivität und die Inaktivierung abhängig von einem Multifaktorensystem bestehend aus z. B. Temperatur, pH-Wert, Ammoniumkonzentration, Salzkonzentration aber auch der fermentereigenen Proteasekonzentration, also der Proteinabbaurate im Fermenter. Da sich diese Faktoren auf Biogasanlagen unterscheiden, ist ein Erfolg von Enzymen schwer zu garantieren.

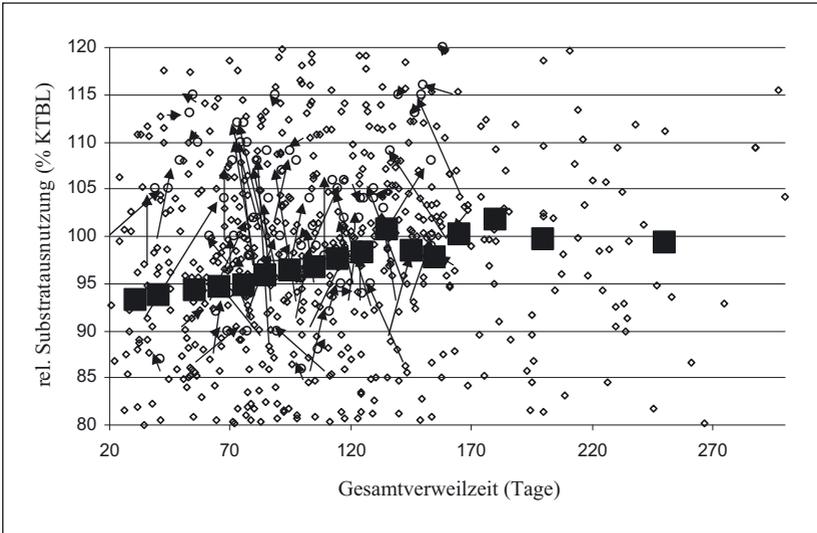


Abb. 4: Auftragung der Gesamtverweilzeit gegen die zu den KTBL-Werten (Heft 50) in Relation gesetzten Substratausnutzungsraten in 1.000 Navaro-Biogasanlagen mit weniger als 30 % Rindergülleanteil (dicke Quadrate = Klassenmittlerwerte, kleine Karos = einzelne Anlage). In 68 Anlagen wurde die relative Substratausnutzung vor (Karos) und nach (Kreise) 2 – 3monatigem Enzymeinsatz verglichen. Die Pfeile zeigen das Maß der Veränderung.

Tabelle 1: Wirkung von Enzymen nach 2 – 3monatigem Enzymeinsatz in 68 untersuchten Biogasanlagen.

Verweilzeit (Fermenter + Nachgärer)	Verbesserung der relativen Substrat-Ausnutzung um durchschnittlich
unter 50 Tage	5,56 %
50 – 70 Tage	13,45 %
70 – 90 Tage	14,98 %
90 – 110 Tage	13,97 %
110 – 130 Tage	9,32 %
130 – 150 Tage	7,65 %
über 150 Tage	2,35 %

Die Wirkung von Enzymen im Labor kann hingegen auf verschiedene Art quantifiziert werden. So setzten Enzyme Zucker frei, die analysiert werden können (Abbildung 5), durch Enzyme wird die Anfangsgeschwindigkeit der Biogasbildung gesteigert (Abbildung 6) oder die Viskosität von Substratmischungen herabgesetzt (Abbildung 7).

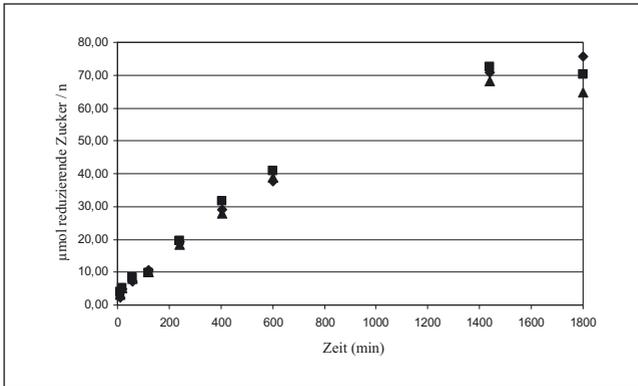


Abb. 5: Durch Enzyme bewirkte Netto-Freisetzung von reduzierenden Zuckern aus Maissilage (3 Parallelansätze). Die Zuckerfreisetzung in mit hitzeinaktivierten Enzymen durchgeführten Kontrollansätzen wurde von den gezeigten Werten subtrahiert.

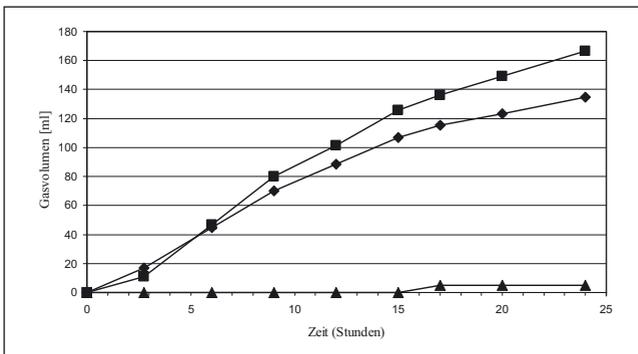


Abb. 6: Durch Enzyme bewirkte Beschleunigung der Anfangsgeschwindigkeit der Biogasbildung aus Maissilage (Quadrate = Gasbildung mit aktiven Enzyme; Karos = Gasbildung mit hitzeinaktivierten Enzymen; Dreiecke = Gasbildung aus Inokulum (Klärschlamm)).

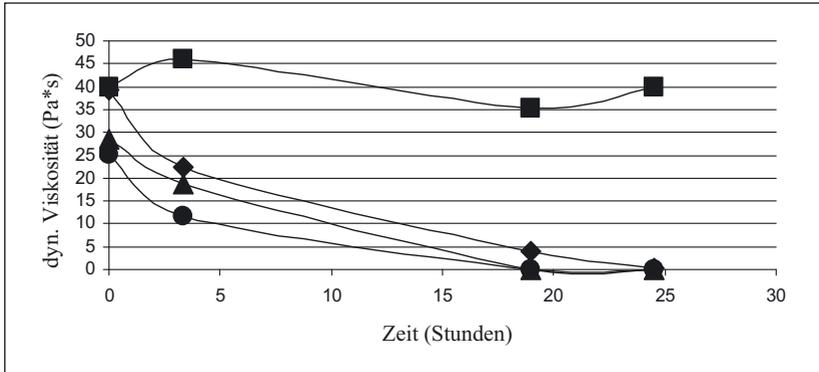


Abb. 7: Durch Enzyme bewirkte Abnahme der Viskosität von gemusteten Rüben (obere Kurve = ohne Enzyme; untere drei Kurven = steigende Enzymkonzentrationen).

Spurenelemente

Zum Zwecke der Energiegewinnung und des anabolen Stoffwechsels reduzieren methanogene Archaeobakterien CO_2 mit H_2 und bilden dabei CH_4 . Die einzelnen Stoffwechselschritte werden durch Enzyme katalysiert, in deren aktiven Zentren Spurenelemente (z. B. Ni, Se, Co in Hydrogenasen; Co, Zn in Methyltransferasen; Mo, W, V in Nitrogenasen; Ni, Fe, Co in CO-Dehydrogenasen; Mo, W in Formylmethanofuran-Dehydrogenasen) essentiell sind. Ein Mangel an diesen Elementen zeigt sich u.a. frühzeitig am Säurespektrum. Ein Anstieg an 2-Methyl-Propionsäure (=iso-Buttersäure) kann oft auf einen Überschuss an H_2 zurückzuführen sein, der bei einer Unterversorgung der Archaeobakterien mit Spurenelementen entstehen kann. Ein H_2 -Überschuss verzögert den endergonen Abbau der Propionsäure zu Essigsäure, CO_2 und H_2 . Die Propionsäurekonzentration im Fermenter steigt deshalb zunächst an. In einem Folgeschritt wird die Propionsäure am C-2 methyliert. Anlagen mit Spurenelementmangel haben in der Regel eine schlechte Substratausnutzung bei hohen Säure-, besonders iso-Säure-Konzentrationen und einer niedrigen Methankonzentration im Biogas.

Die Wirkung von Spurenelementen kann deshalb leicht überprüft werden. Liegt eine Unterversorgung der Bakterien mit Spurenelementen

vor, sinkt die Konzentration von Propionsäure und iso-Säuren nach Ausgleich des Mangels innerhalb weniger Tagen stark. Sowohl die Gasmenge als auch die Gasqualität nehmen so lange zu, bis sich ein neues Fließgleichgewicht in der Anlage etabliert hat. In einem Versuchsansatz mit 80 Biogasanlagen wurde die Wirkung von Spurenelementen erfolgreich untersucht (Abbildung 8).

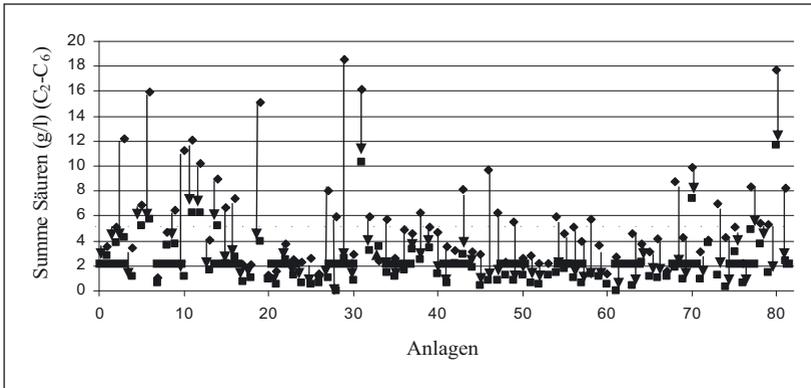


Abb. 8: Durch Spurenelemente bewirkte Abnahme der Säurekonzentration in 80 untersuchten Biogasanlagen (Karos = vor Spurenelementzugabe (durchschnittlich 5,77 g Säuren je Liter = gepunktete Linie); Quadrate = nach Spurenelementzugabe (durchschnittlich 2,5 g Säuren je Liter = gestrichelte Linie). Die Methankonzentration im Biogas stieg nach Zugabe der Spurenelemente um durchschnittlich 2 %.

Die Zugabe von Spurenelementen erhöht nicht nur die Prozessstabilität, in dem durch sie die Säurekonzentration gesenkt wird, sondern ermöglicht auch eine Erhöhung der Raumbelastung, ohne dass, über eine verstärkte Säurebildung, die Substratausnutzung sinkt (Abbildung 9).

Die Akkumulation von Säuren geht stets auch zu Lasten des Stromertrags. Steigt z. B. in einem 2000 m³ fassenden Fermenter die Säurekonzentration pro Tag um 0,1 g/l an, ergibt sich daraus ein Verlust von mindestens 55 €/Tag (gerechnet mit Essigsäure, 700 m³ Biogas/t, 50 % Methan, 280 kWh, 0,20 €/kWh).

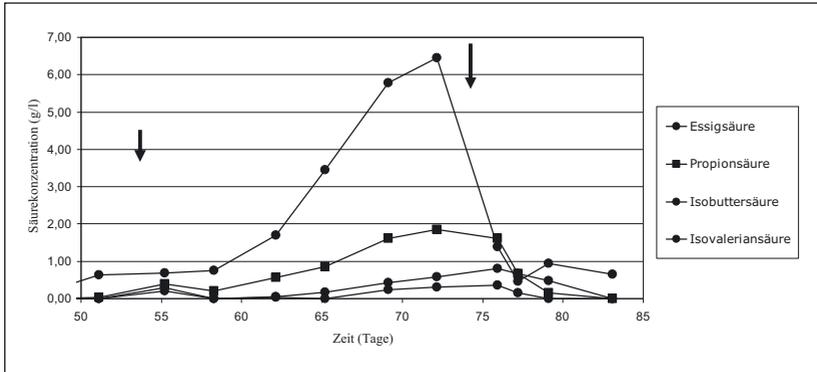


Abb. 9: Ein Anstieg der Konzentration an flüchtigen organischen Säuren, der nach einer Erhöhung der Raumbelastung an Tag 54 (erster Pfeil) von 3 auf 3,5 kg oTS/ ($m^3 \cdot Tag$) erfolgte, konnte durch Zugabe von Spurenelementen an Tag 75 (zweiter Pfeil) wieder rückgängig gemacht werden.

Fazit

In Biogasanlagen stellen sich Fließgleichgewichte zwischen dem Input an Substraten in die Fermenter, der Biogasbildung und dem Output in die Endlager ein. Die Schritte des Abbaus von Substraten über Hydrolyse, Acidogenese, Acetogenese und Methanogenese sind unterschiedlich schnell und können den Gesamtprozess limitieren (Abbildung 10).

Vor jedem Einsatz von Zusatzstoffen muss der biologische Prozess genau analysiert werden. Verweilzeiten, Raumbelastungen und Substrate müssen erfasst werden und Analysen (Gärsäurezusammensetzung (GC) und Makro- sowie Spurenelemente (ICP oder AAS) des Fermenterinhalt) durchgeführt werden. Viele Unternehmen führen diesen Service gratis und unverbindlich durch.

Anlagen mit einer schlechten Substratausnutzung, einem hohen Anteil an cellulosehaltigen Substraten, kurzen Verweilzeiten und/oder hohen Raumbelastungen bei niedrigen Säurekonzentrationen könnten vom Einsatz hydrolytischer Enzyme profitieren. Positiv wirkt sich die Verringerung der Viskosität durch Enzyme auf den Prozess aus. Schwimm- und Sinkschichten können aufgelöst und deren Neubildung verhindert sowie die Pumpfähigkeit des Fermenterinhalt verbessert werden.

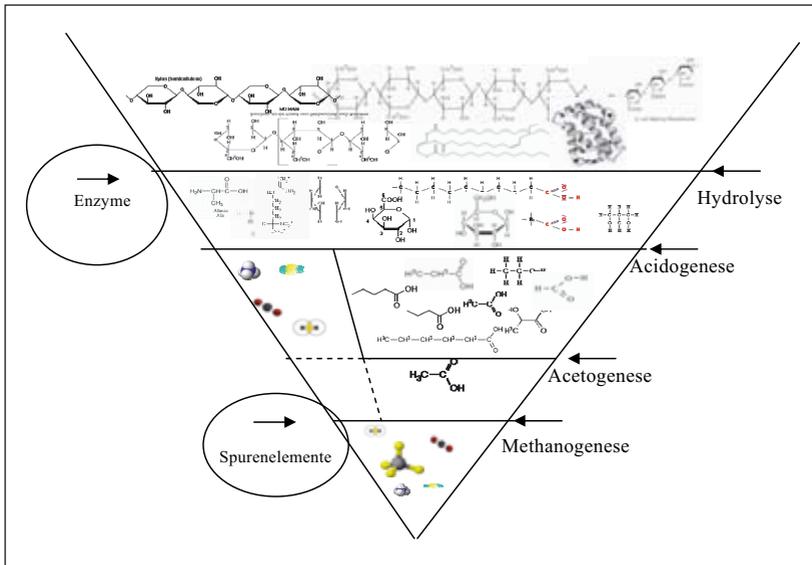


Abb. 10: Der Abbau von Pflanzenmaterialien erfolgt in der Biogasanlage in vier Schritten. Hydrolyse und Methanogenese können durch Enzyme und Spurenelemente im Bedarfsfall positiv beeinflusst werden.

Spurenelementmangel zeigt sich oft in einer schlechten Substratausnutzung bei hoher Säurekonzentration und dies bereits bei relativ moderaten Raumbelastungen unter $3 \text{ kg oTS}/(\text{m}^3 \cdot \text{Tag})$. Besonders die iso-Säuren sind erhöht und die Methankonzentration ist niedrig. Nach Zugabe geeigneter Spurenelemente sinkt die Konzentration der Säuren, bei einer vorübergehenden Steigerung der Gasmenge und Gasqualität. Anlagenbetreiber sollten sich hierfür vor dem Einsatz von Spurenelementen eine Garantie geben lassen.

Sowohl bei den Spurenelementen als auch bei den Enzymen sollte sich der Anlagenbetreiber vor schwarzen Schafen hüten. „Enzymprodukte“, in denen keine Aktivitäten, oder nur geringe Amylaseaktivitäten nachweisbar sind, oder „Enzymprodukte“ die angeblich unter anaeroben Bedingungen mit O_2 -bedürftigen Oxidasen Lignin spalten, werden angepriesen. Wildwestbedingungen herrschen auch bisweilen im Spurenelementsektor. Mit billigem Tiermineralfutter, das fast ausschließlich aus CaCO_3 besteht, oder auch mit Blattdünger wird hier der Fermenter traktiert. Fahrlässig

handeln selbsternannte „Berater“, die Anlagenbetreibern empfehlen, die in Reinform z. T. hoch toxischen Spurenelemente freihändig in den Fermenter zu geben. Hier scheint es nur eine Frage der Zeit bis die ersten ernsthaften Unfälle geschehen.

Referenzen

- FNR (2006) Handreichung Biogasgewinnung und -nutzung ISBN 3-00-014333-5
- KTBL (2005) Gasausbeute in landwirtschaftlichen Biogasanlagen. KTBL-Heft 50 ISBN 10:3-939371-17-3
- Hölker, U. (2008) Gerücheküche schließen. Biogas Journal 04/08 22-29
- Deppenmeier, U (2002) The unique biochemistry of methanogens. Prog Nucleic Acid Res Mol Biol 71:223-83

Anschrift des Autors:

*Dr. Udo Hölker
Bioreact GmbH
Mülheimer Str. 26, 53840 Troisdorf
E-Mail: hoelker@bioreact.de*

Prozessoptimierung – ein Zusammenspiel von Technik und Mikrobiologie

*Andreas Gronauer, Diana Andrade, Christoph Bauer, Mathias Effenberger, Hauke Hewwinkel, Michael Lebuhn, Carmen Marin-Perez
Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL)*

1 Einleitung

Die Entwicklung Biogasanlagen ausschließlich mit nachwachsenden Rohstoffen zu betreiben, geht auf die Novelle des EEG im Jahre 2004 zurück. Erfahrungen mit der kontinuierlichen Vergärung von ausschließlich nachwachsenden Rohstoffen ohne Wirtschaftsdünger als Basissubstrat werden in der Praxis erst seit wenigen Jahren gesammelt. Dabei hat sich gezeigt, dass deutlich höhere Anforderungen an die Anlagentechnik und die Prozessführung gestellt werden müssen, als die Kofermentation mit Gülle. Deshalb besteht die Notwendigkeit, die Bedingungen für eine Langzeitstabilität solcher Prozesse zu erkennen und Parameter zu deren messbaren Bewertung zu entwickeln. Darüber hinaus gilt es aber auch die Effizienz der Biogastechnologie zu optimieren. Dabei spielen sowohl die chemisch-physikalischen Eigenschaften der Einsatzstoffe als auch die Wechselbeziehungen mit der Fermentertechnik (z. B. Strömungsmechanik) und der Mikrobiologie eine entscheidende Rolle.

2 Ablauf des anaeroben Biogasprozesses

Für das Verständnis der Biogasbildung aus organischen Verbindungen wird seit längerem das Prozessmodell der Biogasbildung herangezogen. Neue Erkenntnisse lassen eine Differenzierung dieses Prozessmodells, insbesondere wenn nachwachsende Rohstoffe als Substrat eingesetzt werden, zu.

2.1 Das Prozessmodell der Biogasbildung

Die mikrobielle Umsetzung von organischem Material zu Biogas (Abbildung 1) setzt sich im Wesentlichen aus vier Schritten zusammen. Im ersten Schritt, der sogenannten **Hydrolyse** (chemisch: Spaltung von Molekülen unter Reaktion mit Wasser), zerlegen enzymatisch vor allem Bakterien komplexe Makromoleküle aus Kohlenhydraten, Fetten und Proteinen. Dabei entstehen vor allem kürzere Spaltprodukte wie Zucker, Aminosäuren und Fettsäuren. Man sollte beachten, dass die strenge chemische Definition der Hydrolyse sich nicht mit dem verfahrenstechnischen Begriff der Hydrolyse als Phase im Anlagenbetrieb deckt. Bei der biochemischen Umsetzung mit Wasser werden kaum Säuren und Gas gebildet, erst in der „Hydrolysephase“ von Biogasanlagen entsteht das sogenannte Hydrolysegas (H_2+CO_2) sowie der wesentlichste Teil der organischen Säuren und Alkohole. Die „Hydrolysephase“ (in der Praxis zumeist Hydrolysestufe genannt) von Biogasanlagen beinhaltet also auch den größten Teil der Acidogenese. In der **Acidogenese** (Versäuerungsphase) entstehen aus den Hydrolyseprodukten (vor allem aus den Zuckern, Fetten und Proteinen) Wasserstoff, Kohlendioxid, Alkohole und Fettsäuren. Beim Einsatz von veresterten Ölen/Fetten (z. B. Rapsöl) und proteinlastigen Substraten (z. B. Klee gras) ist zu beachten, dass aus Schwefelverbindungen H_2S (Schwefelwasserstoff) und aus Stickstoffverbindungen NH_3 (Ammoniak) entstehen, die für Mensch, Umwelt und den Prozess toxisch werden können. Ein verstärktes Auftreten von Propionsäure, Isobuttersäure, Isovaleriansäure, Capronsäure und Oenanthsäure ist ein Indikator für einen instabilen Prozess, in dem die folgenden Schritte (Acetogenese, Methanogenese) nicht effizient ablaufen. In der **Acetogenese** (Essigsäurebildung) werden die Produkte der Acidogenese weiter in kleinere Moleküle umgesetzt. Es entstehen vor allem Essigsäure (Acetat), Wasserstoff und Kohlendioxid. Acetogene bzw. syntrophe Bakterien bauen durch Hydrolyse (β -Oxidation der Fettsäuren) oder komplexere Reaktionen die Fettsäuren weiter ab.

Der Ablauf der einzelnen syntrophen Reaktionen erscheint zwar auf den ersten Blick einfach, tatsächlich handelt es sich zumindest teilweise (dies konnte z. B. für die Oxidation von Propionsäure gezeigt werden) um komplizierte Umsetzungen über mehrere Zwischenstufen. Diese aufzuklären ist auch Gegenstand aktueller Forschung. Im letzten Schritt, der Methanogenese (Methanbildung), werden vor allem Essigsäure, Wasserstoff und Kohlendioxid von methanogenen Archaeen in Kohlendioxid,

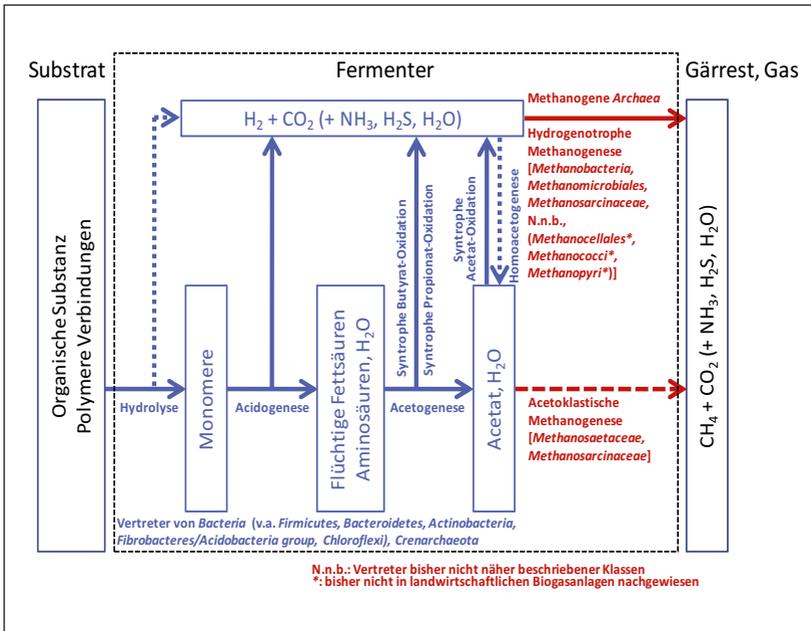


Abb. 1: Die unterschiedlichen Stadien der Biogasproduktion mit den wichtigsten Mikroorganismengruppen (nach Leubhn und Gronauer (2009), verändert)

Wasser und Methan umgewandelt. In landwirtschaftlichen Biogasanlagen geschieht dies entgegen der Lehrbuchmeinung bei höherer Raumbelastung vorwiegend über den hydrogenotrophen (Wasserstoff verwertenden) Reaktionsweg mit starker Beteiligung der syntrophen Acetat-Oxidation (Schnürer et al., 1999) und nur bei relativ geringer Raumbelastung nennenswert über den acetoclastischen (Essigsäure spaltenden) Weg (Bauer et al., 2008; Leubhn et al., 2008a). Ein direkter Transfer von Elektronen zu den Methanogenen über sog. Nanoleiter („Elektromethanogenese“) wird derzeit als möglicher, sehr effizienter Mechanismus der Methanbildung diskutiert (Gorby et al., 2006). Über die Beteiligung der CO₂- und Methylreduktionswege ist wenig bekannt, wahrscheinlich spielen sie hier aber eine untergeordnete Rolle.

2.2 Die Rolle der Mikrobiologie

Syntrophe Bakterien sind strikt anaerob, schwer kultivierbar und daher kaum erforscht. Sie können nur vergesellschaftet mit anderen Mikroorganismen wachsen, da sie auf deren Stoffwechselleistungen angewiesen sind. Sie leben an der Grenze thermodynamisch möglicher Energiegewinnung (Schink, 1997) und wachsen daher typischerweise nur langsam. Beispielsweise ist der energiezehrende Fettsäureabbau durch die syntrophen Fettsäure-Oxidierer ohne Hilfe der methanogenen Archaeen nicht möglich (vgl. Acetogenese, Methanogenese). Da methanogene Archaeen im Wesentlichen nur C1-Verbindungen, Wasserstoff und Acetat verwerten können, müssen die Produkte der vorhergehenden Prozesse mit mehr als 2 C-Atomen (z. B. Succinat, Lactat, Fettsäuren, Alkohole, aromatische Reste) für die Methanogenen durch die syntrophen Bakterien oxidiert und zerkleinert werden. Die Oxidation von Fettsäuren zu Essigsäure und C1-Verbindungen durch syntrophe Bakterien ist wegen des Mangels an geeigneteren Elektronenakzeptoren als H^+ in Biogasreaktoren praktisch nur über die Produktion von energiereichem Wasserstoff (u. U. Ameisensäure) möglich. Da Wasserstoff in Wasser kaum löslich ist, würde sich ohne dessen Weiterverwertung in unmittelbarer Nähe der Syntrophen schnell eine hohe H_2 -Konzentration ausbilden, die die Reaktion thermodynamisch unmög-

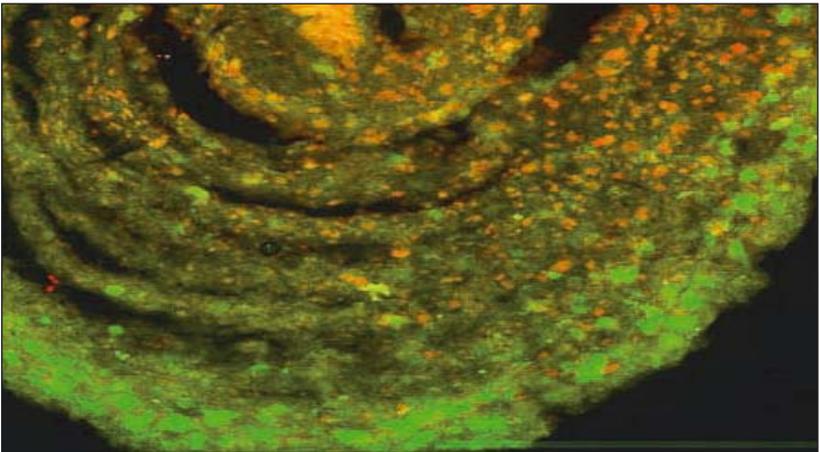


Abb. 2: Eng aneinander lebende Bakterien (grün) und Archaeen (orange) in einem Fermenterschlamm-Granulum (Sanz et al., 2009)

lich macht (Endprodukthemmung); bei einem Entweichen von H_2 aus dem System wäre die Energie für die Mikroorganismen verloren. Die Fettsäureoxidation wird aber möglich, wenn H_2 aus dem Gleichgewicht entzogen, also weiter umgesetzt wird. Diese Funktion erfüllen die hydrogenotrophen methanogenen Archaeen unter Energiegewinn. Deshalb wachsen syntrophe Bakterien und die Methanogenen typischerweise sehr eng assoziiert (Abbildung 2). Man spricht hier von „Inter-Species-Elektronentransfer“, da die Elektronen (z. B. in Form des Wasserstoffs; Schink, 1997) zwischen sehr unterschiedlichen Mikroorganismen übertragen werden. Syntrophe und Methanogene leben dabei nicht weiter als wenige Mikrometer (ca. eine Bakterienlänge) voneinander entfernt. Inwieweit der Elektronentransfer auch über Ameisensäure als Carrier oder ohne Carrier stattfindet ist noch umstritten.

In Biogasanlagen dominiert bei höherer Raumbelastung der hydrogenotrophe Weg der Methanbildung (Bauer et al., 2008; Krause et al., 2008; Leubhn und Gronauer, 2009). Eine Trennung dieser syntrophen Lebensgemeinschaft z. B. durch zu schnelles und häufiges Rühren kann wegen der erforderlichen Nähe der Syntrophen und Methanogenen schädlich für den Biogasprozess werden. Allerdings müssen auch neue Angriffsflächen für den anfänglichen Substratabbau durch die Bakterien geschaffen werden. Daher sollten Rührwerke in Biogasreaktoren langsam laufen und Geschwindigkeit und Rührintervall substratspezifisch optimiert werden.

Syntrophe Bakterien sind (ähnlich wie methanogene Archaeen) praktisch überall zu finden (ubiquitär). Sie sind typischerweise zur Bildung resistenter Überdauerungsformen (z. B. Sporen) fähig, können aber nur im anaeroben Milieu aktiv werden. Fettsäure-oxidierende Bakterien können aus sehr verschiedenen Verwandtschaften (Taxa) kommen. Als Beispiele seien Vertreter der Gattungen *Syntrophomonas*, *Syntrophobacter*, *Syntrophospora*, *Syntrophus*, *Propionibacter*, *Sporotomaculum*, *Pelotomaculum*, *Thermoanaerobium*, *Pelobacter* und *Smithella* genannt, aber auch in der Gattung *Clostridium* und bei den δ -Proteobacteria finden sich Syntrophe.

Die Zusammensetzung der methanogenen Biozönose kann sich abhängig von Fermenterbetrieb und -zustand stark ändern (Bauer et al., 2008; Leubhn et al., 2008a). Nur bei niedriger organischer Raumbelastung (lange Verweilzeit im Fermenter) wurden acetoclastische Methanogene (Vertreter der Familien *Methanosaetaceae* und *Methanosarcinaceae*) relativ häufig gefunden. Die relativ lange Verweilzeit des Substrats im Fermenter ermöglicht, dass die acetoclastischen Methanogenen trotz ihres relativ langsamen

Wachstums (geringerer Energiegewinn bei der Essigsäurespaltung) nicht ausgedünnt werden. Eine Ursache für die stärkere Präsenz der Methanosarcinen bei geringer Raumbelastung kann ihre hohe Affinität zum Substrat Acetat sein, die sie gegenüber den Methanosarcinen konkurrenzfähig macht (Jetten et al., 1992). Methanosarcinen nutzen dagegen ihren Vorteil bei höheren Acetat-Konzentrationen.

Bei relativ hoher organischer Raumbelastung (etwa ab 2,5 – 3 kg oTS $\text{m}^{-3} \cdot \text{d}^{-1}$) bzw. geringer Verweilzeit überwogen in unseren Untersuchungen hydrogenotrophe Methanogene (v. a. Vertreter der Ordnungen Methanomicrobiales und Methanobacteriales) dagegen deutlich (Bauer et al., 2008; Lebuhn et al., 2008a), bei noch höherer Belastung waren acetoclastische Methanogene nicht mehr nachzuweisen und vermutlich ausgedünnt. Diese Verteilung widerspricht der Lehrbuchmeinung, dass Methan zu 70 % über den acetoclastischen und nur zu 30 % über den hydrogenotrophen Weg entstünde. Methanogene Archaeen benötigen eine besondere Versorgung mit bestimmten Spurenelementen in bestimmten Konzentrationsbereichen zur Durchführung ihrer einzigartigen Reaktionen. Besteht hier ein Mangel, können die Methanogenen nicht wachsen bzw. aktiv sein. Die im Prozess zuvor gebildeten Säuren werden nicht abgebaut, und es kommt zur Versäuerung des Prozesses (Lebuhn et al., 2008b; „Säurestau“).

Seit etwas mehr als einem Jahrzehnt lassen sich v.a. mit PCR-basierten Verfahren „fingerprints“ anfertigen, Profile der Zusammensetzung der untersuchten Mikroorganismen-gesellschaft, die für verschiedene Proben verglichen werden können. Dabei existieren unterschiedliche Verfahren (z. B. SSCP, DGGE), mit denen die Produkte der PCR-Vermehrung eines ausgewählten Stück eines bestimmten Gens der Mikroorganismen in Abhängigkeit ihrer Zusammensetzung in einem Gel aufgetrennt, sichtbar gemacht und quantifiziert werden.

In verschiedenen Proben aus mesophil und thermophil betriebenen, ausschließlich mit Maissilage gefütterten Versuchsfermentern zeigten sich deutliche Veränderungen der Bandenmuster in Abhängigkeit der Betriebsweise und des Zustands der Populationen. Die Sequenzanalysen zeigen erwartungsgemäß für die mesophilen Fermenter eine höhere Diversität mit Dominanz von Vertretern der Ordnung Methanosarcinales, während in den thermophilen Reaktoren weniger verschiedene Arten von Methanogenen gefunden wurden und Vertreter der hydrogenotrophen Ordnung Methanobacteriales dominierten (Tabelle 1). Dabei handelte es sich fast ausschließlich um Vertreter der Gattung Methanothermobacter. Gelichzei-

tig traten unter mesophilen Bedingungen nach 5 Monaten Versuchsdauer Methanogene einer unbekanntten Klasse (unknown class) mit immerhin 9 % der Populationsmassen auf.

Tab. 1: Zusammensetzung der methanogenen Populationen in mesophil und thermophil mit Maissilage betriebenen Biogasreaktoren

	A2 (070814); thermophil (%)	A3 (0709814); thermophil (%)	B1 (080225); mesophil (%)	B1 (080717); mesophil (%)
ANME-1	0	0	0	0
Methanopyrales	0	0	0	0
Methanococcales	0	0	0	0
Unknown class	0	0	0	9
Methanobacteriales*	57	80	35	15
Methanomicrobiales	29	0	18	9
Methanosarcinales	14	20	47	67
(M.sarcinaceae)	(14)	(20)	(29)	(67)
(M.saetaceae)	(0)	(0)	(18)	(0)

* Enthalten 1 mcrA und 1 mrtA Gen; thermophile (55 °C) Fermenter; mesophile (38 °C) Fermenter

Es gibt also Schlüsselorganismen, die für bestimmte Prozesse spezifisch sind und einen „guten“ oder „schlechten“ Zustand des Fermenters in Abhängigkeit von der Betriebsweise anzeigen. Zukünftig gilt es durch diese Schlüsselorganismen, sog. Bioindikatoren und ihre Aktivität spezifisch quantitativ zu verfolgen, um insbesondere für die Praxis eine schnelle und verlässliche Analyse des Prozesszustands von Biogasanlagen zu erhalten.

2.3 Chemische Parameter und deren Bedeutung

2.3.1 Makronährstoffe

Kohlenstoff ist nach Wasser der Hauptbestandteil der Mikroorganismen. Als Kohlenstoffquelle dient im Wesentlichen das zugeführte Substrat. Stickstoff ist nach Kohlenstoff der am meisten benötigte Nährstoff. Er wird

insbesondere benötigt für die Proteinbiosynthese, also für die Bildung von Enzymen, die die Reaktionen im Stoffwechsel durchführen. Zu hohe Stickstoffgehalte im Substrat können allerdings zu einer Hemmung der mikrobiellen Aktivität im Fermenter führen. Schwefel ist Bestandteil verschiedener Aminosäuren und damit essentiell zur Bildung wichtiger Enzyme im Stoffwechsel. Auch andere Schwefelverbindungen spielen im Stoffwechselkreislauf eine entscheidende Rolle, z. B. FeS-Komplexe als Redoxpartner im Elektronentransport. Der Phosphatgehalt ist für die Bildung der Energieträger ATP (Adenosintriphosphat) und NADP (Nicotinamidadenindinukleotidphosphat) im Stoffwechsel der Mikroorganismen mitbestimmend. Phosphatmangel führt deshalb zur Erlahmung des Stoffwechsels. Natrium ist für (zumindest einige) Archaeen wichtig, da der Energieträger ATP bei diesen nicht nur über die Leistung von „Protonenpumpen“ sondern auch über „Na⁺-Pumpen“ erzeugt wird (Deppenmeier et al., 1999). Bei Unterversorgung mit Na⁺ kann also der Energiestoffwechsel der Methanogenen und damit die Methanogenese in der Biogasproduktion einbrechen. Unseren Daten zufolge kann dies im Bereich 50 mg Na⁺ · g TS⁻¹ der Fall sein.

Neben C, N, P, S und Na⁺ erfüllen auch Calcium, Magnesium und Eisen im Bereich der Makronährstoffe wichtige Funktionen im Stoffwechsel. Ca und Mg sind wichtige Strukturelemente z. B. für Enzyme, und Eisen erfüllt u.a. eine zentrale Funktion beim Elektronentransport.

Grundsätzlich ist nicht nur die Menge eines Nährstoffes sondern auch das optimale Verhältnis aller Nährstoffe zueinander bedeutsam, um optimale Prozessbedingungen zu erhalten. Dazu wurde ein C/N/P-Verhältniss in etwa zwischen 100:5:1 und 200:5:1 empfohlen (Effenberger et al., 2007).

2.3.2 Mikronährstoffe

Eine ausreichende Gegenwart und Verfügbarkeit mancher Spurenelemente ist für Mikroorganismen lebensnotwendig. Methanogene Archaeen benötigen die Elemente Kobalt (Co), Molybdän (Mo), Nickel (Ni) und Selen (Se). Ni, Co und Mo (alternativ auch Wolfram, W, bei den Methanococci) dienen als bzw. in Co-Faktoren für verschiedene, im Stoffwechsel essentielle Reaktionen. Beispielsweise ist Nickel als Zentralatom im Cofaktor F430 unabdingbar zum Funktionieren der Methyl-Coenzym M-Redukta-

se, die den letzten Schritt der Methanogenese ausführt, die Bildung von CH_4 . Molybdän ist entscheidender Bestandteil des Cofaktors Molybdopterin im zu Methan führenden Stoffwechsel. Im Elektronentransport ist Kobalt als zentraler Bestandteil von Corrinoiden und Cobamiden essentiell. Ni und Fe-S sind hier ebenfalls wichtig. Für die Bildung von ATP, dem wichtigsten Energieträger im Stoffwechsel, sind neben Na^+ auch Ni, Co und Se essentiell. Im Bereich der H_2 -Aufnahme spielen Ni, Se und Zn eine entscheidende Rolle und bei der Aufnahme von CO_2 Mo (W), Zn, Se und Fe. Unverzichtbar für die Acetatspaltung sind Ni, Fe-S, Co und Zn und für die Nutzung von Methylgruppen Co und Zn. Die Bedeutung anderer Elemente (z. B. Wolfram, Kupfer, Aluminium, Vanadium und Bor) für die Biogasproduktion ist noch unklar. Schwermetalle wie Kupfer, Silber, Blei, Quecksilber, Cadmium, Gold und Arsen sind typischerweise toxisch. Um eine „gesunde“ Konzentration von Spurenelementen einzustellen, ist nicht allein die Menge an Spurenelementen und Schwermetallen im Fermenter entscheidend, sondern auch deren Verfügbarkeit für die Mikroorganismen (Abbildung 3).

Spurenelemente und andere Schwermetalle gelangen durch das zugegebene Substrat, über Geräteabrieb sowie durch Prozesshilfsstoffe in gebundener, biologisch häufig nicht verfügbarer Form in den Biogasfermenter. Durch physikalische (z. B. Temperatur, Reibung, Zerkleinern), chemische (z. B. pH-Wert) und biologische (z. B. mikrobieller Abbau) Prozesse werden diese gelöst und mikrobiell verfügbar (1 in Abbildung 3). Während saure Bedingungen ihre Löslichkeit fördern, werden sie bei höherem pH-Wert in Gegenwart von freiem Phosphat, Sulfid, Sulfat und Carbonat zunehmend in schwer lösliche Verbindungen überführt und sind dann dem direkten Zugriff durch Mikroorganismen zunächst entzogen (2). Manche Mikroorganismen können jedoch über Ausschleusung von Komplexbildnern nicht verfügbare Spurenelemente „einfangen“ und für sich nutzbar machen (3). Nach dem Absterben von Mikroorganismen werden Spurenelemente in gebundener und gelöster Form wieder freigesetzt (4) und können im internen Kreislauf der Nährstoffe wieder verwendet werden. Der Austrag von Spurenelementen erfolgt mit dem Fermenterinhalt und der Biomasse ins Gärrestlager (5). Im Fall einer Rezirkulation des Gärrests stehen die mitgeführten Spurenelemente und Schwermetalle erneut für die Mikroorganismen im Fermenter zur Verfügung (6).

In Biogasanlagen können Spurenelement-Mangelsituationen insbesondere im Mono-NawaRo-Betrieb auftreten – selten wird auch bei Anlagen

mit Güllezusatz darüber berichtet. Eine typische Folge von Spurenelementmangel ist die Hemmung der Methanogenese und eine damit verbundene Versäuerung. In entsprechend nachgestellten Versuchen mit Mais-mono-Betrieb konnten nur hydrogenotrophe jedoch keine acetoclastischen Methanogene in den versäuerten Fermentern nachgewiesen werden (Lebuhn et al., 2008b). Obwohl die Raumbelastung vor der Versäuerung relativ gering war, konnten entgegen der Erwartung keine acetoclastischen Methanogenen gefunden werden. Offenbar reagieren hydrogenotrophe Methanogene weniger empfindlich auf einen Spurenelementmangel mit Versäuerung als acetoclastische. Abhilfe kann hier der Zusatz Spurenelementreicher Substrate schaffen oder ein Zusatz der Elemente. Dies ist in unterschiedlicher Anwendungsform möglich.

Nach dem derzeitigen Stand erscheint für einen stabilen Betrieb einer NawaRo-Anlage ein Gehalt von etwa $50 \mu\text{g Co} \cdot \text{L}^{-1}$ (ca. $750 \mu\text{g Co} \cdot \text{kg TS}^{-1}$) eine sinnvolle Größenordnung zu sein. Für Selen liegen die entsprechenden Konzentrationen etwa 5-fach niedriger (etwa $10 \mu\text{g Se} \cdot \text{L}^{-1}$ bzw. ca. $150 \mu\text{g Se} \cdot \text{kg TS}^{-1}$), für Mo etwa um den Faktor 10 und für Ni etwa um den Faktor 40 höher. Die Wichtigkeit von z. B. Bor, Vanadium Wolfram und Aluminium ist umstritten. Zink, Eisen und Kupfer sind zwar wichtig, sie kommen aber typischerweise in ausreichend hohen Konzentrationen in NawaRo-Fermentern vor - insbesondere bei Covergärung mit Wirtschaftsdüngern. Neuesten Analysen zufolge (Lebuhn 2009, FNR-IBMN-Statusseminar 2009) kann auch ein Natrium-Mangel Auslöser einer Fermenter-Versäuerung sein. Natrium ist essentiell für ein Funktionieren der Energieversorgung von Methanogenen (Na^+ -Pumpe). Bei Na^+ -Mangel können daher Methanogene keine Aktivität mehr entfalten.

Für andere Schwermetalle wie z. B. Cadmium, Arsen, Quecksilber, Silber und Blei sind bisher nur toxische Wirkungen bekannt geworden.

3 Erfahrungen aus Experimenten

Im Langzeitversuch in 6 32-L-Labor-Durchflussfermentern nachgestellt ergaben sich bei alleiniger Fütterung mit Maissilage die gleichen Phänomene. Etwa 200 Tage nach Beimpfung mit einem Standard-Inokulum und Mono-Mais-Betrieb versäuerten die Fermenter. Ein Wiederaufstart war nicht erfolgreich, die Fütterung musste schließlich eingestellt werden. Aufgrund der Vermutung, dass ein Mangel an Spurenelementen für die

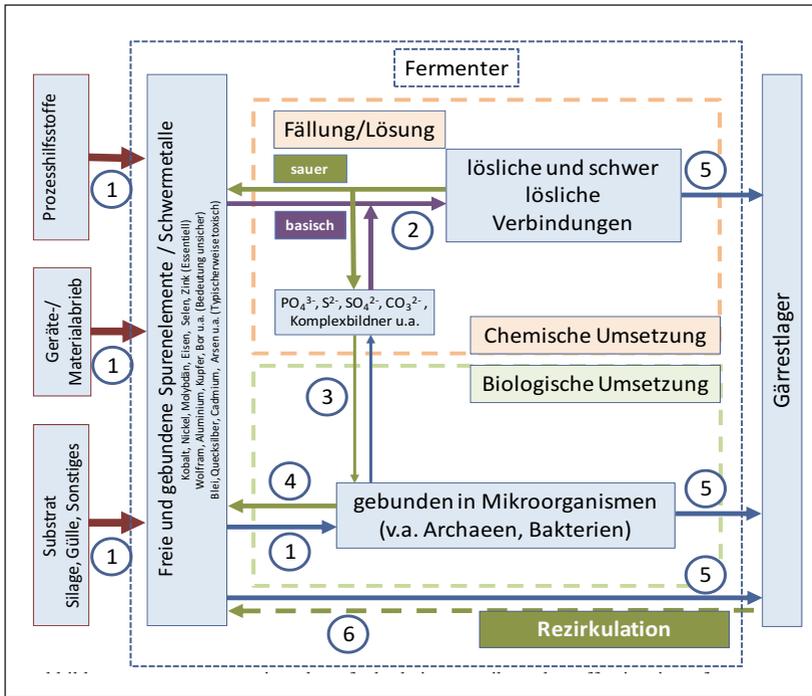


Abb. 3: Versorgung mit und Verfügbarkeit von Mikronährstoffen in Biogasfermentern

methanogenen Archaeen die Ursache des Prozesszusammenbruchs war, wurde ein Spurenelement-Cocktail (SpE) zusammengestellt und nach Abbau der überschüssigen Fettsäuren in unterschiedlicher Konzentration mit der gefütterten Maissilage zu 4 der Fermenter zugesetzt (Abbildung 4). Schon bald brach der Prozess bei den 2 Kontrollen (ohne SpE-Zusatz) wieder zusammen, während mit SpE-Supplementierung ein stabiler Hochleistungsbetrieb erreicht wurde (Abbildung 4).

Die komplette Kausalanalytik ist noch nicht abgeschlossen, die ersten Ergebnisse weisen aber deutlich auf einen Mangel an den „Verdächtigen“ Co, Ni, Mo und Se hin. Dass Co-Mangel die Hauptursache für den Ausfall der Methanogenese war, konnte inzwischen gezeigt werden.

Den ICP-OES- bzw. ICP-MS-Analysen der Fermenterenthalte zufolge waren unter etwa $20 \mu\text{g Co} \cdot \text{L}^{-1}$ (ca. $300 \mu\text{g Co} \cdot \text{kg TS}^{-1}$) Mangelerschei-

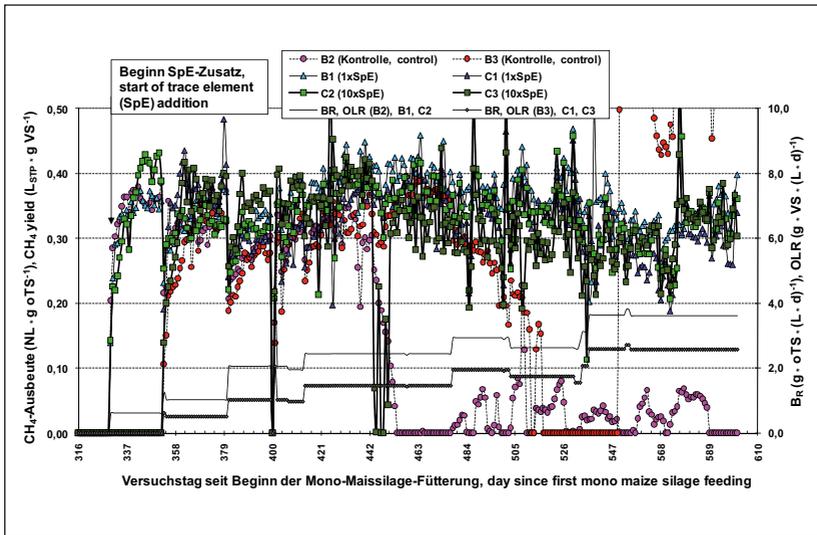


Abb. 4: Methanausbeute und organische Raumbelastung der 6 versäuert/ausgehungerten Mono-Mais-Fermenter B1 – C3 nach Spurenelement-(SpE)-Zusatz und Wiederanfahren

nungen deutlich sichtbar. Ein Gehalt von etwa $50 \mu\text{g Co} \cdot \text{L}^{-1}$ (ca. $750 \mu\text{g Co} \cdot \text{kg TS}^{-1}$) erscheint für einen stabilen Betrieb eine sinnvolle Größenordnung zu sein. Während für Selen die entsprechenden Konzentrationen etwa 5-fach niedriger lagen, also ein Gehalt von etwa $10 \mu\text{g Se} \cdot \text{L}^{-1}$ (ca. $150 \mu\text{g Se} \cdot \text{kg TS}^{-1}$) im Fermenter empfohlen wird, lagen die entsprechenden Konzentrationen für Mo etwa um den Faktor 10 und für Ni etwa um den Faktor 40 höher. Aus Abbildung 4 geht auch deutlich hervor, dass viel mehr (10-fache SpE-Dosierung) nicht viel mehr bringt. Die Methanausbeuten waren für beide SpE-Zusatzvarianten gleich. Wichtig ist es ausschließlich, optimale Konzentrationsbereiche einzustellen! Aus den Analysen der gefütterten Maissilage ergab sich auch, dass im Langzeitbetrieb Mangelerscheinungen auftreten mussten. Die Frachten der Spurenelemente reichten ohne einen Zusatz nicht für die Einstellung der erwünschten Konzentrationen aus. Die aufgetretene Versäuerung lässt sich so erklären: Durch die nach wie vor aktive Hydrolyse, Acido- und Acetogenese wurden zwar noch Fettsäuren gebildet, diese konnten aber wegen des Ausfalls der Methanogenese infolge des Spurenelementmangels nicht mehr abgebaut werden,

und es ergab sich ein „Säurestau“. Eine erneute Versäuerung nach dem Wiederaufahren konnte nur durch Reaktivierung der Methanogenese, die die Säuren abzieht, verhindert werden. Anderen Berichten zufolge reicht auch eine Cofermentation mit Wirtschaftsdüngern nicht in allen Fällen aus, die gewünschten Konzentrationen der Spurenelemente im Fermenter herzustellen. Zudem können sich die zu fütternden NawaRo in ihren Spurenelement- und Schwermetallgehalten je nach Art und Herkunft (Standortigenschaften) deutlich unterscheiden. Hieraus ergibt sich, dass regelmäßige Analysen der gefütterten Substrate (insbesondere bei Substrat- und Chargenwechseln), eine Bilanzierung der Spurenelementgehalte und etwa monatliche Analysen auf Spurenelemente wichtig für ein frühzeitiges Erkennen von Mangelzuständen sind. Dann kann entsprechend dem Zustand ein spezifisch zusammengestellter SpE-Zusatz definiert werden. Weiterhin erscheint es ratsam, in regelmäßigen Abständen den Fermenterstatus molekularbiologisch untersuchen zu lassen, um festzustellen, ob die gewünschte Zusammensetzung der Mikroorganismen und ihre Anzahl (insbesondere der methanogenen Archaeen) vorhanden ist, oder ob Veränderungen eingetreten sind und auf künftige Schwierigkeiten im Betrieb hinweisen. Wichtig für Betreiber von Biogasanlagen ist in diesem Zusammenhang zu bemerken, dass „viel mehr“ nicht viel mehr bringt. Eine Überdosierung kann im Gegenteil toxisch wirken, auch für die Umwelt schädlich sein und zu Konflikten z. B. mit der Düngemittelverordnung führen. Die Methanogenese benötigt bestimmte Spurenelemente in einem optimalen Konzentrationsbereich.

In Durchflussversuchen mit ausschließlicher Verwendung von Grassilage zeigt sich, dass bei mesophiler Betriebsweise ab einer Raumbelastung von 2,5 abnehmende spezifische Gaserträge zu erwarten sind. Bei thermophiler Betriebsweise tritt diese Phänomen bereits bei einer Raumbelastung von 1,5 auf. Dieser Effekt ist auch unabhängig von der Silagevorbehandlung (Schnittlängen, Milchsäure-/Essigsäurekonservierung). Diese Unterschiede zeigen sich bereits ansatzweise, wenn man das FOS/TAC-Verhältnis betrachtet. Auch hier weisen die ersten Spitzen unter thermophilen Bedingungen bei einer Raumbelastung von 1,5 auf Prozesshemmungen hin (Abbildung 5).

Als eine mögliche Ursache der Versäuerung des Prozesses insbesondere bei Einsatz eiweißreicher Substrate (z. B. Grassilage) wird die N-Konzentration im Fermenter diskutiert. Dabei kann der Gehalt an ammoniakalischen Stickstoff (vgl. Abbildung 6) nicht als Ursache angesehen werden.

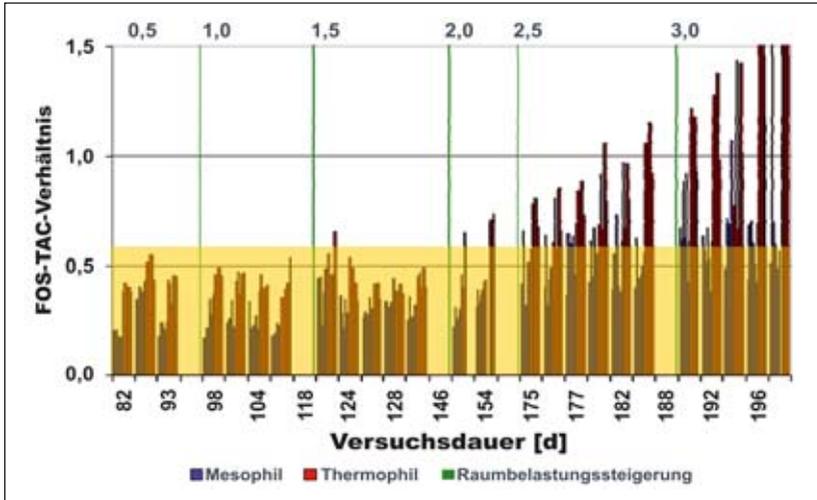


Abb. 5: Veränderung des FOS/TAC-Wertes im Verlauf einer steigenden Raumbelastung der Fermenter mit reiner Grassilage unter mesophilen und thermophilen Bedingungen

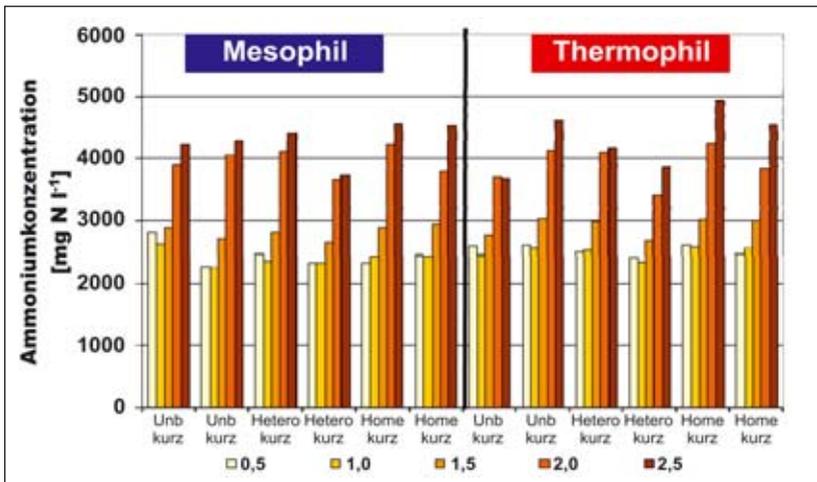


Abb. 6: Veränderung des Gehaltes an ammoniakalischen Stickstoff im Verlauf einer steigenden Raumbelastung der Fermenter mit reiner Grassilage unter mesophilen und thermophilen Bedingungen

Erst die Berechnung des reinen Ammoniakgehaltes (aus Ammoniumgehalt, pH-Wert und Fermentertemperatur abzuleiten) macht die Unterschiede deutlich. Die mesophilen Varianten erreichen bei einer Raumbelastung von 2,5 Ammoniakgehalte von rund 600 mg NH₃-N L⁻¹. Unter sonst gleichen Bedingungen erreichen die Ammoniakgehalte bei thermophiler Betriebsweise Konzentrationen von 1000 bis fast 1800 mg NH₃-N L⁻¹.

Die Zunahme des Ammoniumgehaltes über die Zeit, d.h. mit der RB, ist auf das relativ N-reiche Substrat zurückzuführen und fokussiert damit ein zentrales Problem in der Vergärung von Grassilage in der Praxis. Von einer prozesstoxischen Wirkung des Ammoniaks wird oft berichtet: Gallert und Winter (1997) belegen ab 560 mg NH₃-N L⁻¹ eine 50 %ige Hemmung in der Methanogenese, Angelidaki und Ahring (1994) weisen dies thermophil ab über 700 mg NH₃-N L⁻¹ nach. Dem stehen aber auch Berichte gegenüber, die bei sehr hohen Konzentrationen keine Beeinträchtigung der Biogasbildung beobachteten (Sung & Liu 2003). In einem weiteren Experiment wurde ebenfalls im kontinuierlichen Durchfluss die Raumbelastung des Fermenters mit ausschließlich Grassilage gesteigert und ein spurenelementdotiertes Alumosilikat zugesetzt, dass sowohl eine bessere Versor-

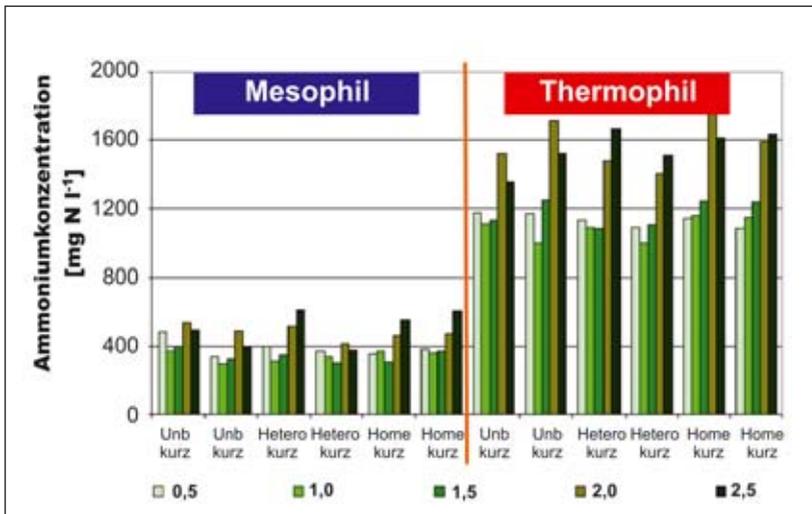


Abb. 7: Veränderung des Gehaltes an Ammoniak-Stickstoff im Verlauf einer steigenden Raumbelastung der Fermenter mit reiner Grassilage unter mesophilen und thermophilen Bedingungen

gung der Mikroorganismen mit Spurenelementen sicherstellen sollte, als auch durch das Silikat Ammonium sorbiert. Wie Abbildung 8 zeigt konnten höhere Raumbelastungen realisiert werden bei gleichzeitig stabilerer Biogasproduktion. Nach dem Absetzen des Zuschlagstoffs brach die Biogasproduktion binnen 40 Tage völlig ein.

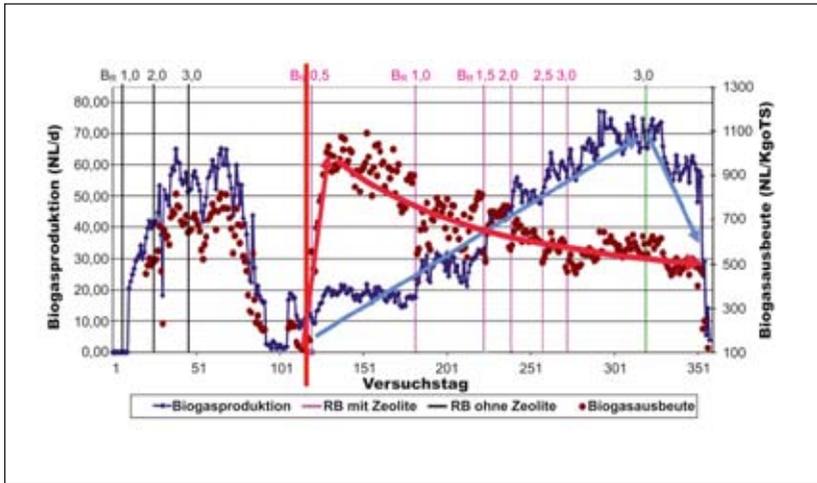


Abb. 8: Veränderung der Biogasproduktion und Biogasausbeute im Verlauf einer steigenden Raumbelastung mit reiner Grassilage und Einsatz eines Alumosilikates unter mesophilen Bedingungen

4 Erfahrungen aus der Praxis

Die Grafik zeigt den Leistungsverlauf eines BHKW auf einer Biogasanlage, die ausschließlich mit nachwachsenden Rohstoffen in Form von Maissilage, Grassilage und GPS beschickt wurde. Eine Steigerung der Gesamt-Raumbelastung von 1,25 auf 2,25 $\text{kg oTS} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$ innerhalb von drei Wochen zu Beginn des dargestellten Zeitraums führte hier nur zu einer kurzfristigen Leistungssteigerung (Abbildung 9).

Der Gärprozess destabilisierte sich daraufhin rasch. Dies wird erkennbar an der deutlichen Zunahme des FOS/TAC-Wertes sowie des Konzentrationsniveaus und der Zusammensetzung der flüchtigen Fettsäuren (Abbildung 10).

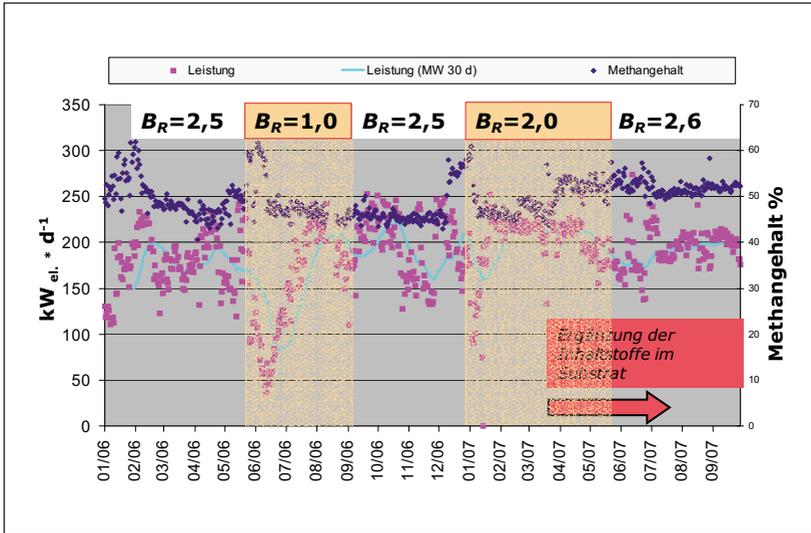


Abb. 9: Veränderung der abgegebenen elektrischen Leistung und des Methangehaltes im Verlauf variabler Raumbelastungen und Einfluss der Zugabe von Spurenelementen in einer Praxisbiogasanlage

Bei regelmäßiger Überwachung dieser Prozessindikatoren hätte dies frühzeitig erkannt werden können. Nach drastischer Rücknahme der Raumbelastung zeigten die Prozessindikatoren eine merkliche Erholung der Gärbiologie an. Als typische Reaktion auf die reduzierte Frischmasse-Zufuhr zeigte der Methangehalt im Biogas ein deutliches „Überschießen“ auf Werte größer 60 Vol.-%. Allerdings brach natürlich auch die Leistung ein, wodurch sich der Betreiber zu einer erneuten Steigerung der Belastung verleiten ließ. Zu diesem Zeitpunkt war Propionsäure noch in relativ hoher Konzentration vorhanden. Im Folgenden destabilisierte sich der Gärprozess weiter: die Konzentration an Propionsäure stieg bis auf ein Niveau von $6.000 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$ und es wurden bis zu ca. $1.200 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$ iso-Buttersäure gemessen. Hier lag offensichtlich eine massive Hemmung der syntrophischen Methanogenese vor. Nach erneuter Rücknahme bzw. vorübergehender Einstellung der Beschickung erholte sich der Prozess bis 01/07. Als Ursache für die sehr eingeschränkte Belastbarkeit der Gärbiologie wurde ein Mangel an Spurennährstoffen vermutet. Ab 04/07 wurde daher ein kommerzielles Spurenelementpräparat eingesetzt. Daraufhin stabilisierte

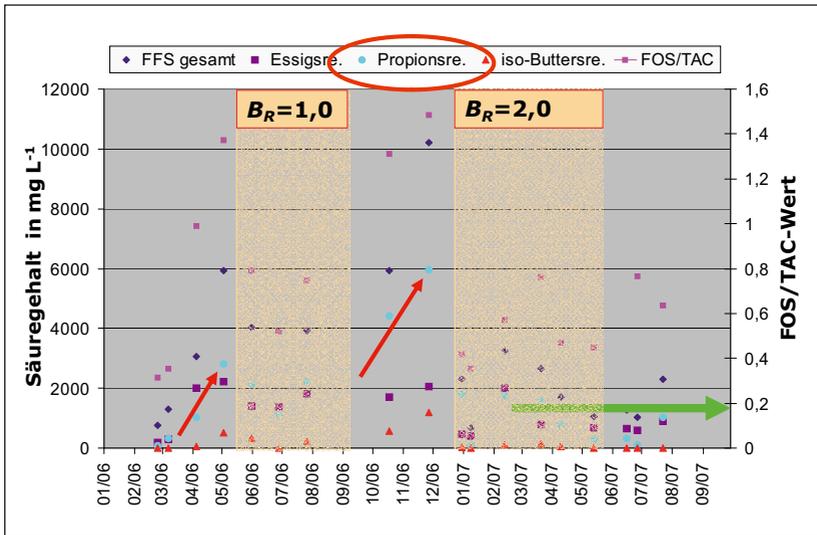


Abb. 10: Veränderung der Säurekonzentration und des FOS/TAC-Wertes im Verlauf variabler Raumbelastungen und Einfluss der Zugabe von Spurenelementen in einer Praxisbiogasanlage

sich der Prozess merklich: Die Propionsäure-konzentration ging auf Werte unter $1.000 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$ zurück, iso-Buttersäure war im Gärgemisch nicht mehr nachweisbar. Der Methangehalt im Biogas stieg erstmals unter Belastung auf Werte über 50 Vol.-%, die Leistungsabgabe verstetigte sich. Das Beispiel verdeutlicht die Notwendigkeit einer kontinuierlichen Prozessüberwachung anhand geeigneter Indikatoren und demonstriert die bekannte Problematik der möglichen Unterversorgung bei ausschließlicher Vergärung nachwachsender Rohstoffe.

5 Schlüsselindikatoren für den Prozessstatus

Um die Stabilität des Prozesses in einem Biogasfermenter zu bewerten, sollten die Gründe für eine Verschlechterung des Gärprozesses bekannt sein und die Parameter definiert werden, woran man diese erkennen kann. Aus biochemischer Sicht kommt im Falle der Prozessdestabilisierung das komplexe Zusammenspiel innerhalb der anaeroben Abbaukette aus dem

Tabelle 2: Auswahl der wichtigsten Prozessindikatoren zur Beurteilung der Stabilität des anaeroben „Biogasprozesses“

Parameter	Einheit	Fermenter	Nachgärer
TS	%	8 – 15	< 8
oTS	% TS	70 – 80	< 70
pH	[-]	7,0 – 7,5	< 7,5
NH ₄	mg/L	80 – 2000	< 4000
NH ₃ *	mg/L	400 – 1000	< 800
KS	mM	250 – 500	250 – 500
Essig	mg/L	< 2000	< 1000
Propion	mg/L	< 1000	< 500
iso-Butter	mg/L	< 500	< 300
Gesamt**	mg/L	< 4000	< 2000
FOS/TAC	[-]	< 0,8	< 0,3

* abhängig von der Konzentration von NH₄-N, Temp. und dem pH-Wert

** abhängig von Gesamtsäurekonzentration VFA, Temp. und dem pH-Wert

Gleichgewicht. Mögliche Ursachen sind z. B. starke Temperaturschwankungen, abrupter Substratwechsel oder die Zufuhr bzw. Bildung prozesshemmender Substanzen. Hemmstoffe entstehen auch als Zwischen- bzw. Nebenprodukte des anaeroben Abbauprozesses, z. B. Wasserstoff, flüchtige Fettsäuren (FFS), Ammoniak und Schwefelwasserstoff.

Erkennbar wird eine Destabilisierung der Gärbiologie an verschiedenen Parametern, die unterschiedlich schnell und deutlich ansprechen. Tabelle 2 listet wichtige Prozessindikatoren auf und gibt Sollwerte an.

Die angegebenen Werte sind als Richtschnur anzusehen. Für die anlagenspezifische Beurteilung der Prozessstabilität ist die zeitliche Veränderung der Prozessindikatoren wesentlich aussagekräftiger und gibt Hinweise auf eine beginnende Prozessinstabilität. Das Konzentrationsniveau und die Verteilung der FFS ist ein hervorragender, frühzeitig ansprechender Prozessindikator. Als weitere brauchbare Überwachungsgröße, die vom Anlagenbetreiber auch vor Ort bestimmt werden kann, hat sich der FOS/TAC-Wert etabliert. Ein Prozessindikator, der auch quasi-kontinuierlich mit einem automatischen Gasanalyse-System bestimmt werden kann, ist der Wasserstoffpartialdruck im Biogas. Ein steigender Trend zeigt

frühzeitig eine Versäuerung des Gärgemisches an. Der pH-Wert ist für die Interpretation anderer Parameter wie FFS- und Ammoniakkonzentration wichtig, für die Prozesskontrolle in Biogasanlagen jedoch weniger geeignet, da er bei Beeinträchtigung der Gärbiologie verzögert reagiert.

Für die fortlaufende Beobachtung und Auswertung der Prozessindikatoren ist eine geeignete Messtechnik, eine lückenlose Dokumentation des Anlagenbetriebes sowie gegebenenfalls die Inanspruchnahme von Laborleistungen unverzichtbar. Der finanzielle Mehraufwand hierfür macht sich bei Vermeidung nachhaltiger Einbrüche der Anlagenleistung rasch bezahlt.

Die in Tabelle 2 angegebenen Werte können für einen stabilen Anlagenbetrieb im Allgemeinen als Richtwert herangezogen werden. Für die individuelle Beurteilung der Prozessstabilität und die Behandlung von Störungen der Anlagenleistung ist aber der individuelle Verlauf der Überwachungsgrößen wesentlich aussagekräftiger als einzelne Messwerte.

Weiterführende Literatur

- Amon, T., V. Kryvoruchko, B. Amon, G. Moitzi, S. Buga, D. Fistarol, E. Hackl, D. Jeremic, W. Zollitisch, Pötsch (2003): Optimierung der Biogaserzeugung aus den Energiepflanzen Mais und Klee gras. Endbericht Juli 2003. Institut für Land-, Umwelt-, und Energietechnik, Universität für Bodenkultur Wien, Wien.
- Angelidaki, I., Ahring, B.K. (1994): Anaerobic thermophilic digestion of manure at different ammonia loads: effect of temperature. *Water Research* 28, 727-731.
- Effenberger M., Lebuhn M., Gronauer A. (2007): Fermentermanagement – Stabiler Prozess bei NawaRo-Anlagen. Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft, Institut für Landtechnik, Bauwesen und Umwelttechnik.
- Gallert, C., Winter, J. (1997): Mesophilic and thermophilic anaerobic digestion of source-sorted organic waste: effect of ammonia on glucose degradation and methane production. *Applied Microbiology and Biotechnology* 48, 405 – 410.
- Kaiser F., M. Diepolder, J. Eder, S. Hartmann, H. Prestele, R. Gerlach, G. Ziehfrend, Gronauer A. (2004): Biogaserträge verschiedener nachwachsender Rohstoffe. *Landtechnik* 4/2004.
- Kaiser F. (2007): Einfluss der stofflichen Zusammensetzung auf die Verdaulichkeit nachwachsender Rohstoffe beim anaeroben Abbau in Biogasreaktoren. Dissertation TU München.
- Sung S., Liu T. (2003): Ammonia inhibition on thermophilic anaerobic digestion. *Chemoshere* 53 (1), 43-52.

Anschrift der Autoren:

Dr. agr. Andreas Gronauer, Diana Andrade, Christoph Bauer, Dr.-Ing. Mathias Effenberger, Dr. agr.-biol. Hauke Heuwinkel, Dr. rer. nat. Michael Lebuhn, Carmen Marin-Perez

Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL)

Institut für Landtechnik und Tierhaltung (ILT)

Vöttinger Str. 36, 85354 Freising

E-Mail: andreas.gronauer@lfl.bayern.de

4.

Umwelt



Emissionen bei der Biogasproduktion – eine Analyse der Umweltrelevanz

*Joachim Clemens, Carsten Hafermann, Carsten Cuhls
gewitra GmbH*

Einleitung

Biogasanlagen dienen in Deutschland zur Herstellung von regenerativer Energie, i.d.R. Strom. In mehreren Vorhaben u.a. im Rahmen des FNR geförderten Vorhabens „Emissionsanalyse und Quantifizierung von Stoffflüssen durch Biogasanlagen im Hinblick auf die ökologische Bewertung der landwirtschaftlichen Biogasgewinnung und Inventarisierung der deutschen Landwirtschaft (Partner: Deutsches Biomasseforschungszentrum, Johann Heinrich von Thünen-Institut, gewitra) untersuchen wir die Treibhausgasemissionen aus Biogasanlagen. Dabei werden alle möglichen Entstehungsorte von der Lagerung des Substrates bis hin zur Ausbringung des Gärmaterials auf Emissionen hin untersucht. Explizites Ziel ist es, die Anlagen im Regelbetrieb zu erfassen. Mögliche Emissionsquellen sind: Substratlager, Dosierung in die Anlage, Stützbelüftung von Gasspeichern, Gasverwertung (z. B. BHKW), Gärrestlagerung, -ausbringung. Darüberhinaus kann Methan aus Leckagen emittiert werden, z. B. Folienabschlüsse, undichte Verschlüsse etc.

Letzendlich gilt es zu klären, wieviel CO₂-Äquivalente bei der Biogasgewinnung je kWh Strom emittiert werden und wie diese Emissionen reduziert werden können. Vergleichswert sind die Emissionen aus dem Strommix der Bundesrepublik Deutschland aus dem Jahr 2007 von 624 g CO₂/kWh (UBA 2009).

Prinzipiell zeigt sich, dass betriebs- und anlagenbedingte Treibhausgasemissionen auftreten können. Betriebsbedingt kann es z. B. bei einem Vollastbetrieb der Anlage zum Entweichen von Biogas kommen, wenn es nicht weiter behandelt wird. Anlagenbedingte Emissionen treten z. B. bei Tauchmotorrührwerken auf, wenn die Seildurchführungen in den Ferment-

ter nicht verschlossen sind.

Da die Untersuchungen noch andauern, sind die hier vorgestellten Werte, die sich im Moment nur auf CH_4 beziehen, als vorläufig zu betrachten.

Material und Methode

Für Methananalysen werden verschiedene Messsysteme verwendet: mehrere transportable FID (Flammenionisationsdetektoren mit/ohne Methankonverter; (VDI 3481 Blatt 4)), ein tragbarer Infrarotanalysator sowie ein Tunable Diode Laser System. Ammoniak wird über einen elektrochemischen Sensor sowie über Waschflaschen gemessen (VDI 3496 Blatt 1). Für Lachgas und zur Kontrolle der gemessenen Methankonzentrationen werden Proben manuell gezogen (VDI 2469 Blatt 1) und am Gaschromatographen im Labor bestimmt (GC-ECD/FID).

Generell wird jede Anlage zweimal (jeweils im Sommer und Winter) untersucht. Dabei erfolgt in einem ersten Schritt ein qualitatives Abscannen der Anlage, durch das mögliche Leckagen detektiert werden. Diese Leckagen werden – soweit möglich – im Anschluß mit einer angepaßten Windtunnelmethode abgedeckt, so daß dann Emissionsmassenströme ermittelt werden können. Hierfür werden die Windtunnel definiert belüftet und die Konzentration der zu messenden Gase im Abstrom bestimmt in Anlehnung an VDI 3790.

Die Emissionen an CH_4 werden je kWh dargestellt und im Anschluß analog den Vorgaben von IPCC auf CO_2 -Äquivalente und diese dann auf die elektrische Leistung der Biogasanlagen umgerechnet (g CO_2 -Äquivalente/kWh). Somit sind die Werte mit den vom UBA ermittelten CO_2 -Äquivalentemissionen aus dem deutschen Strommix direkt vergleichbar.

Wenn offene Gärrestlager vorhanden waren, wurden die Emissionen von freien Flächen und denen, die mit einer Schwimmschicht bedeckt waren, gesondert erfaßt. Anschließend erfolgte – abhängig von der Aufteilung freie Fläche/Schwimmschicht- eine Berechnung der Emission.

Zusätzlich wurden die Emissionen nach der DIN EN 1544:2008-04 (Fugitive und diffuse Emissionen von allgemeinem Interesse für Industriebereiche – Messung fugitiver Emissionen von Gasen und Dämpfen aus Lecks von Betriebseinrichtungen und Rohrleitungen) bestimmt, nach der auf die Emissionen durch Konzentrationsmessungen und Emissionsfak-

toren zurückgeschlossen werden. Die Emissionsberechnung einer Leckage erfolgt über folgende Gleichung:

$$\text{Emission (kg/h)} = A \times (\text{CH}_4\text{-Konzentration in ppm})^B$$

A, B: empirische Faktoren, die je nach zu untersuchendem Gas und Art der Verbindung/Ventil variieren.

Für unseren Vergleich benutzten wir die kleinsten in der DIN angegebenen Faktoren ($A=1,36 \times 10^{-5}$; $B=0,589$).

Ergebnisse

Die Ergebnisse werden nach dem möglichen Entstehungsort nach vorgestellt.

Silage

Die hier vorgestellten Analysen sind aus Wintermessungen 2008/2009. Es konnten nur sehr geringe CH_4 -Emissionen gemessen werden. Sie betragen 0 – 60 mg CH_4 -Äquivalente/kWh. Messtechnisch war hier die Herausforderung, belüftete Tunnels an einer senkrechten Wand zu betreiben.

Beschickung

Bei der Beschickung des Fermenters traten Emissionen zwischen 0 – 375 mg CH_4 /kWh auf. Wurden Feststoffe mit Material aus dem Nachgärer oder Fermenter angemischt, traten höhere Emissionen auf (15 – 1700 mg CH_4 /kWh).

Foliendächer

Bei belüfteten Foliendächern (Stützbelüftung) traten Emissionen zwischen 9 – 35 mg CH_4 /kWh auf. Darüber hinaus gab es einige Fermenter, an denen die Befestigung an der Betonwand mehrere Leckagen aufwies (bis zu 20 Leckagen an einem Fermenter). Soweit möglich wurden die Leckagen mittels Windtunnels gefaßt. Hier traten Emissionen zwischen 0 und 66 mg CH_4 /kWh auf.

Offene Gärrestlager

Auf den offenen Gärrestlagern waren die CH_4 -Emissionen hoch (730 – 3700 mg CH_4 /kWh) und erreichten ihr Maximum beim Aufrühren (6,4 g CH_4 /kWh).

Separator

An Separatoren, die intervallweise betrieben wurden, traten CH_4 -Emissionen in Höhe von 23 – 230 mg CH_4 /kWh auf. Das feste separierte Material lagerte unter dem Separator nur relativ kurze Zeit. Hier betrug die CH_4 -Emissionen 0 – 1 mg CH_4 /kWh.

Betondächer

Auf Betondächern wurden z. T. Emissionen an Serviceeinbauten festgestellt. Sie betrug zwischen 0 – 310 mg CH_4 /kWh. In einem Fall konnten die Emissionen von 610 mg CH_4 /kWh durch eine Wartung des Betreibers die Emissionen halbiert werden.

Eine grob fahrlässige Abdeckung eines Mannlochs bestand aus einer Furnierplatte, die nicht abgedichtet war. Hier traten 9,7 g CH_4 /kWh aus!

BHKW

Eine nicht zu unterschätzende Emissionsquelle stellt das BHKW dar. Die gemessenen Methankonzentrationen im Abgas erreichten Maximalwerte von bis zu 2500 ppm. Durch die hohen Volumenströme entstehen Emissionen zwischen 0,6 und 4,8 g CH_4 /kWh. Damit stellt das BHKW nach bisherigem Erkenntnisstand die größte Emissions-Einzelquelle dar.

Im weiteren Verlauf des Projektes werden außerdem Anlagen zur Biogasaufbereitung zur Einspeisung ins Gasnetz untersucht, hier liegen derzeit noch keine Ergebnisse vor..

Weitere Emissionsquellen

Weitere Emissionsquellen waren Sichtfenster (0 – 2 mg CH_4 /kWh), Förderschnecken (0 – 12 mg CH_4 /kWh) und Seildurchführungen zu den Rührwerken. Bei letzteren konnten keine Emissionen festgestellt werden, da diese nicht abgedeckt werden konnten, um eine angepasste Windtunnelmethode durchzuführen.

Gesamtemissionen

Die gesamten CH₄-Emissionen betragen 1,3 – 12 g CH₄/kWh oder 33 – 300 g CO₂-Äquivalente/kWh. Die meisten Anlagen wiesen Emissionen von unter 100 g CO₂ Äquivalenten/kWh auf – im Vergleich zu 624 g CO₂-Äquivalente im deutschen Strommix (UBA 2009). Allerdings sind bei diesen Emissionen noch nicht die Emissionen aus Überdrucksicherungen und auch keine N₂O Emissionen berücksichtigt. Erstere sind messtechnisch noch schwerer zu erfassen.

Vergleich eigene Messungen – DIN EN 1544:2008-04

Für die Messungen laut DIN EN 1544:2008-04 muss eine Konzentrationsmessung erfolgen. Dies konnte durch uns nur bis zu einer Konzentration von 44000 ppm analysiert werden, darüber war messtechnisch keine Konzentrationsmessung möglich (Explosionsgrenze). Eine Konzentration von 44000 ppm entspricht einer Emission von etwa 7,4 g CH₄/h bzw. für eine 500 kW Anlage entspricht dies 15 mg/kWh. Unsere Messungen ergaben Emissionen in der Höhe von 2 – 600 mg/kWh.

Schlußfolgerungen

Die vorläufigen Ergebnisse zeigen:

- Biogasanlagen sind Emittenten von Treibhausgasemissionen.
- Es können bei unsachgemäßem Betrieb sehr hohe Emissionen von bis zu 300 g CO₂-Äquivalente/kWh auftreten, was fast 50 % der CO₂-Emission des deutschen Strommixes entspricht. Diese Anlage könnte auch sehr geringere Emissionen aufweisen (66 g CO₂-Äquivalente/kWh), wenn es einen sachgemäßen Betrieb geben würde
- Gasdichte Gärrestlagerabdeckung reduziert die CH₄-Emissionen.
- Ablassen von Methan durch Überdrucksicherungen sollte vermieden werden. Das verschlechtert die Klimabilanz einer Biogasanlage.
- Durch regelmäßige Wartung bzw. Leckagekontrolle mit anschließender Wartung können die Emissionen auf Biogasanlagen reduziert werden.
- Die DIN EN 15446 kann nicht einfach übernommen werden.

Literatur

- DIN EN 1544:2008-04 (2008): Fugitive und diffuse Emissionen von allgemeinem Interesse für Industriebereiche – Messung fugitiver Emissionen von Gasen und Dämpfen aus Lecks von Betriebseinrichtungen und Rohrleitungen
- IPCC (2007): Climate Change 2007. Fourth Assessment Report (AR4) der WG1
- UBA (2009): <http://www.umweltbundesamt.de/energie/archiv/co2-strommix.pdf>

Anschrift der Autoren:

*Dr. Joachim Clemens, Carsten Hafermann, Dr. Carsten Cuhls
gewitra GmbH
Karlrobert-Kreiten-Str. 13, 53115 Bonn
E-Mail: clemens@gewitra.de*

Anbauverfahren für Energiepflanzen – Auswirkungen auf Boden und Umwelt

*Matthias Willms, Detlef Deumlich, Johannes Hufnagel
Leibniz-Zentrum für Agrarlandschaftsforschung e.V. (ZALF)*

*Frank Reinicke, Bernhard Wagner
Institut für Nachhaltige Landwirtschaft e.V. (INL)*

*Christine v. Buttlar
richtig: Ingenieurgemeinschaft für Landwirtschaft und Umwelt (IGLU)*

1 Einleitung

Bei der Bewertung der Folgewirkungen des Energiepflanzenanbaus auf Boden und Umwelt ist zwischen den Effekten zu unterscheiden, die von Änderungen in der Landnutzung allgemein bzw. von speziellen Verfahren des Anbaus von Energiepflanzen hervorgerufen werden. Nur die systemimmanenten Effekte des Energiepflanzenanbaus können durch die Verfahrensgestaltung des Selben beeinflusst oder gesteuert werden. Für den folgenden Artikel werden Daten aus dem Projekt „Entwicklung und Vergleich von optimierten Anbausystemen für die landwirtschaftliche Produktion von Energiepflanzen (EVA)“, verwendet. Das Projekt wird von der FNR gefördert, die Daten stammen aus den Jahren 2005 – 2008 (vergl. Strauß, 2009).

Um den Energiepflanzenanbau in seiner Wirkung auf den Boden und die Umwelt zu bewerten, sollen die Indikatoren Stickstoff- und Humushaushalt sowie Wassererosion untersucht werden. Für die folgenden Berechnungen wird vereinfachend von einer ausschließlichen Vergärung der angebauten Energiepflanzen ausgegangen, die theoretische Biogasausbeute wird auf Basis von FNR (2006) berechnet, der Gärrest wird gasdicht gelagert und im Rahmen der Fruchtfolge ausgebracht. Die Vergärung von Gülle aus der Tierhaltung wird vereinfachend nicht betrachtet.

2 Humusbilanz

Der Humusgehalt des Bodens ist ein wesentlicher Faktor für die Fruchtbarkeit am Standort. Er beeinflusst die Speicherung und Umsetzung der Nährstoffe, die Wasserhaltefähigkeit, trägt zur Bildung und Erhaltung einer günstigen Bodenstruktur bei und kann als CO₂-Senke oder -Quelle wirken.

Das Prinzip der Humusbilanzierung besteht darin, dem Humusbedarf von humuszehrenden Fruchtarten wie Silomais und Getreide, die Humuszufuhr gegenüber zu stellen (Abbildung 1). Eine ausgeglichene Humusbilanz bedeutet nicht dass der Humusgehalt des Bodens konstant bleibt, sondern, dass der Ertrag, abgeleitet aus Feldversuchen, sein Optimum erreicht.

Humussaldo	=	Humuszufuhr	–	Humusbedarf
		Reproduktionsleistung organischer Substanzen		anbauspezifisch
Abschätzung der Veränderungen der Humusvorräte im Boden		a) Menge und Qualität der organischen Primärsubstanzen: Stroh, Mist, Gülle, Gärrest, Kompost, Gründüngung b) Humusmehrende Früchte		anbauspezifischer Abbau organischer Substanz in Abhängigkeit von Fruchtart, Ernterückständen, Wurzelmasse, Rhizodeposition

Abb. 1: Schema zur Berechnung der Humusbilanz, nach Hülsbergen & Schmidt (2008), verändert

In diesem Artikel werden die Humusbilanzen nach der die VDLUFA-Methode (VDLUFA, 2004) und der dynamischen Humuseinheiten-Methode (HE-Methode) mit dem Programm REPRO berechnet (Leithold et al., 1997, Hülsbergen, 2003). Diese berücksichtigt im Vergleich zum obigen Schema und zur VDLUFA-Methode, zusätzlich Ackerzahl, Ertrag und Höhe der Stickstoffdüngung. Bei der HE-Methode wurde vereinfachend von einer Stickstoffdüngung in Höhe der N-Abfuhr, abzüglich der Frühjahrs-N_{min}-Werte (0 – 90 cm) und eines anrechenbaren Anteils der atmosphärischen Deposition ausgegangen. Eine Einschätzung der Humuswirkung von reinen Nawaro-Gärresten, d. h. der Anteil des organischen Kohlenstoffs im Gärrest, der in längerfristig im Humus verbleibt (Humusreproduktions-Faktor), ist aktuell noch in der wissenschaftlichen Diskussion (Dominik et al., 2009). Nach aktuellem Stand des Wissens reicht die Spanne von „wie unvergorene Gülle tierischer Herkunft“ (0,22) bis zu „besser als Stallmist“ (0,40) wie es Gutser & Ebertseder (2006) vorschlagen.

Dieser erweiterte Ansatz zur Bewertung des Gärrestes wird in Kombination mit der dynamischen HE-Methode eingesetzt.

2.1 Ergebnisse

Die Humuswirkung ausgewählter Energiepflanzen gliedert sich in (vergl. Tabelle 1):

- a) Pflanzen mit sehr hohem Bedarf an Humus-C wie Mais
- b) Pflanzen mit mittlerem Bedarf wie Getreide oder Sorghumarten
- c) Leichte Humusmehrer wie Zwischenfrüchte, dazu zählen: Grünschnittroggen, Weidelgras, Ölrettich, Senf
- d) Starke Humusmehrer wie Klee- oder Luzernegras.

Tab. 1: Anbaubedingte Änderung der Humusvorräte für ausgewählte Energiepflanzen nach der dynamischen HE-Methode und nach VDLUFA

Fruchtart	Anz. Prüfglieder	TM-Ertrag	anbauspezifische Änderung des Humus-C	VDLUFA
	n	Median t/ha	dyn. HE-Methode, Median kg/ha	
Getreide, HF	56	8,1	-595	-280 bis -400
Silomais, HF, ZF	37	17,6	-969	-560 bis -800
Sorghum (b. x s.), HF, ZF	19	12,3	-609	–
Sorghum (b. x b.), HF, ZF	12	9,0	-592	–
Grünschnittroggen WZF	24	4,8	87	120 bis 160
Einjähriges Weidelgras SZF	8	3,7	81	100 bis 150
Klee-, Luzerne-, Ackergras	15	10,9	829	600 bis 800
zum Vergleich: Getreide Korn	64	54,3	-542	-280 bis -400
Getreide Korn, Stroh verbleibt auf dem Acker	64	54,3	-107	179 oberer Wert, 59 unterer Wert

Fruchtfolgen aus den in Tabelle 1 dargestellten Früchten haben bei rein mineralischer Düngung einen negativen Humussaldo. Eine Ausnahme

bilden Fruchtfolgen mit mehrjährigem Klee-, Luzerne- oder Ackergras. Da für dieses Fruchtfolgeglied hohe Humusbilanz-Salden erzielt werden, können sie als Sanierungsfrüchte eingesetzt werden.

Zu fragen ist, in welchem Maß Gärreste zurückgeführt werden müssen, um ausgeglichene Humusbilanz-Salden zu erzielen. Abbildung 2 zeigt am Beispiel der Fruchtfolge Sudangras, Grünschnittroggen, Silomais, Triticale (GPS), Einjähriges Weidelgras und Winterweizen (Korn), die Salden der Humusbilanz in Abhängigkeit der Stickstoffversorgung durch den Gärrest (Erträge dazu siehe Strauß, 2009, Abbildung 1, Fruchtfolge 3). Dabei entspricht eine Stickstoffversorgung von 72 % einer vollständigen Rückführung der Gärreste auf ihre Anbaufläche (s. Stickstoffhaushalt). Der verbleibende Stickstoffbedarf kann bei Mais z. B. mit der mineralischen Unterfußdüngung ausgeglichen werden.

In der Variante „ohne Gärrest“ sind die Humussalden dieser Fruchtfolge auf allen Standorten „sehr niedrig“ und damit nicht nachhaltig (Abbildung 2). Wie tief diese Humusbilanz-Salden im Bereich der Saldengruppe A liegen, ist abhängig von Ackerzahl und TM-Ertrag. Die Varianten mit Gärrestdüngung zeigen, dass bei steigender Ackerzahl und in Folge dessen steigenden Erträgen und Gärrestmengen, mehr organische Substanz zur Humusreproduktion zur Verfügung steht. In der Variante „50 % Stickstoff aus Gärrest“ (N_t des Gärrestes), werden ab einer Ackerzahl von

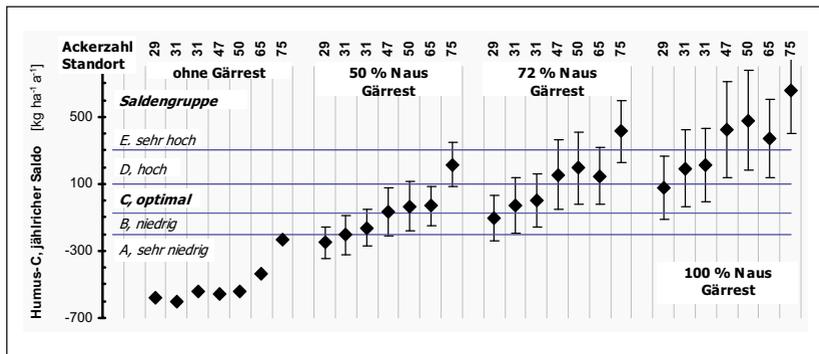


Abb. 2: Humussaldo einer an 7 Standorten einheitlich angebauten Fruchtfolge mit Energiepflanzen, „ohne Gärrest“ und „mit Gärrest“. A, B, C, D, E kennzeichnen die Gruppen der Humussalden, Fehlerbalken zeigen den unsicheren Bereich des Humussaldos bei Verwendung unterschiedlicher Humusreproduktions-Faktoren. Methode: Fruchtarten nach dyn. HE-Methode, Gärrest n. Gutser u. Ebertseder.

47 Humussalden der Gruppe B – E erzielt. In der Variante mit 72 % Stickstoff aus Gärrest (1:1 Rückführung auf die Anbaufläche) erreichen schon die Standorte ab einer Ackerzahl von 31 die Saldengruppen B – D. Zu berücksichtigen ist dabei der mit Fehlerbalken dargestellte Unsicherheitsbereich durch Verwendung unterschiedlicher Humusreproduktionsfaktoren. In der Variante 100 % Stickstoff aus Gärrest findet eine Konzentrierung der Gärreste statt, d. h. die Ausbringungsfläche ist kleiner als die Anbaufläche. Die Ergebnisse zeigen, dass im untersuchten Fall ab Ackerzahl 47, sehr hohe Humussalden erzielt werden, welche zu einem erhöhten Mineralisierungspotenzial im Boden führen, in dessen Folge die Nitrat- auswaschung steigen kann. Eine Konzentrierung der Gärreste kann weiter zu Überschüssen in der Stickstoffbilanz führen, welche ebenfalls das Nitrat- verlagerungsrisiko steigert.

Humusbilanzmethoden im Vergleich am Beispiel Silomais

Am Beispiel von Silomais wurden die unterschiedlichen Humusbilanzmethoden verglichen (Abbildung 3). Für die Wirkung der Fruchtart unter-

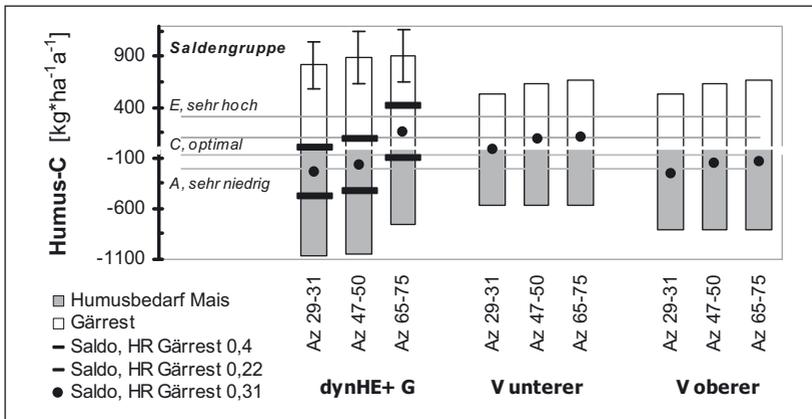


Abb. 3: Methodenvergleich Humusbilanz für Silomais, a) dyn. HE-Methode (REPRO) mit Bewertung der Gärreste n. Gutser u. Ebertseder (dynHE+G), b) VDLUFA-Methode mit „unterem“ (V unterer) und „oberem Wert“ (V oberer). TM-Erträge: Az 29-31: 16, Az 47-50 19, Az 65-75: 20 t/ha im Median. Fehlerbalken: Unsicherheitsbereich bei verschiedenen Humusreproduktions-Faktoren des Gärrestes. Mit Az – Ackerzahl, HR – Humusreproduktions-Faktoren, Mittel aus 30 Versuchsgliedern.

scheidet die VDLUFA Methode zwischen „unterem“ und „oberem“ Humusbedarf, ohne Vorgabe von Kriterien, wann welcher Wert anzuwenden ist. Die dynamische HE-Methode differenziert hier nach Ackerzahl und Ertrag. Eine Steigerung der Erträge führt bei beiden Methoden zu steigendem Gärrestaufkommen und einer steigenden Humusreproduktionsleistung je Hektar. Während nach VDLUFA feste Faktoren für die Humusreproduktion von Gärresten vorliegen, werden auch andere Werte argumentiert (s. o.). Abbildung 3 zeigt links die Spannweite der möglichen Humusreproduktion bei Verwendung unterschiedlicher Humusreproduktions-Faktoren des Gärrestes. Welche der Methoden die Humusauf- und -abbauvorgänge im Boden treffender beschreibt, ist derzeit noch in der Diskussion.

Fazit

Ohne die Düngung von Gärresten oder anderen organischen Düngern sind die Humussalden von Fruchtfolgen mit Energiepflanzen in der Regel in Gruppe A und damit nicht nachhaltig. Mit Ausbringung von Gärresten oder anderen organischen Düngern können ausgeglichene Humussalden erreicht werden. Für eine Absicherung der in den unterschiedlichen Modellen getroffenen Annahmen: zur Bewertung des Gärrestes, dem Humusbedarf von „neuen“ Energiepflanzen, wie z. B. Sorghumarten sowie zur Berücksichtigung veränderter Anbauzeiträume, z. B. Ganzpflanzengetreide, Zweikulturnutzungssystem, besteht allerdings noch Forschungsbedarf.

Sicher ist, dass auf Standorten mit leichteren Böden und geringeren Erträgen, die Humussalden, bedingt durch die Rückfuhr geringerer Gärrestmengen, niedriger sind. Eine Senkung der Salden kann zusätzlich durch den Export von Gärresten und Gärrestfraktionen oder Erhöhung der Methanausbeute erfolgen.

Zusätzlich zur Gärrestrückführung kann der Humussaldo auf Ackerflächen durch den Kohlenstoffimport mit Futtermitteln bei Vieh haltenden Betrieben, dem Vergären von Grünlandaufwuchs und von betriebsfremden Ko-Substraten, dem Ackerfutter- und Zwischenfruchtanbau so wie dem Wechsel von Energiepflanzen mit Druschfrüchten bei denen das Stroh auf dem Feld verbleibt, angehoben werden. Eine Erhöhung der Humusabfuhr durch eine verstärkte Gärrestrückfuhr (> 1:1) ist allerdings aufgrund der steigenden Gefahr der N-Verlagerung kritisch zu bewerten.

3 Stickstoffhaushalt

Das geltende Düngerecht gibt vor, dass die Düngung pflanzenbedarfs-gerecht und unter Berücksichtigung der Belange des Naturhaushalts durch-zuführen ist. Auch der Einsatz von Gärresten zur Düngung muss allen rechtlichen Vorgaben folgen. Insbesondere muss der Landwirt in die Lage versetzt werden, seine Nährstoffbilanzen zu erstellen, um die Stickstoff-Obergrenze einzuhalten.

Bei der Produktion von Biogas besteht die Möglichkeit, betriebliche Nährstoffkreisläufe stärker zu schließen, da die Nährstoffe des Erntegutes nach der Vergärung als organischer Dünger zur Verfügung stehen. Im Folgenden soll in einer isolierten Betrachtung der Anbauflächen für Biogas-substrate untersucht werden, welcher Anteil des Stickstoffs im Erntegut, mit Gärresten zurückgeführt wird. Abbildung 4 zeigt am Beispiel von Silomais den Zusammenhang von Stickstoffabfuhr mit dem Erntegut und der Stickstoff-Düngewirkung der Gärreste. Vom Erntegut sind zunächst die Silierverluste abzuziehen. Diese streuen zwischen 10 und 25 % der TM; unter Annahme guter fachlicher Praxis sind 15 % realistisch (Jeroch et al., 1993). Nach Abzug der Ausbringungsverluste mit 15 % vom Gesamt-Stickstoff (LLFG, 2008), werden 72 % des Stickstoffs im Erntegut Bodenwirk-sam. Die gasförmigen Ausbringungsverluste können zusätzlich durch

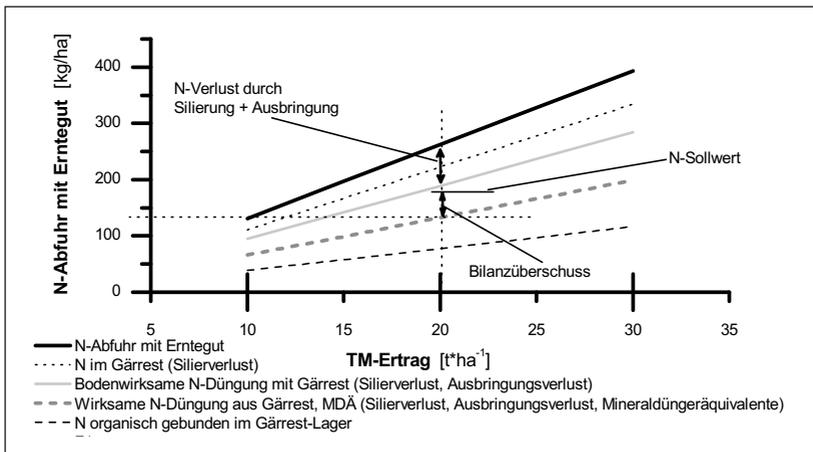


Abb. 4: Stickstoffmengen im Erntegut und im Gärrest in Abhängigkeit vom Silomaisertrag

Verlust mindernde Ausbringungsverfahren wie der Injektionsdüngung, auf 5 % gesenkt werden.

Der mit dem Gärrest ausgebrachte Stickstoff wird nicht in gleicher Weise wirksam wie Stickstoff aus Mineraldüngern. Untersuchungen zeigen, dass bei längerfristiger Anwendung mit einem Mineraldüngeräquivalent (MDÄ) von 60–85 % zu rechnen ist. Unter Praxisbedingungen ist ein MDÄ von 70 % realistisch. Unter diesen Annahmen sind rund 50 % des Stickstoffs im Erntegut als mineraldüngeräquivalent zu bewerten. Unter Berücksichtigung des N_{\min} -Wertes im Frühjahr, der Ertragserwartung, dem Sollwert zur Stickstoffdüngung und dem zur Verfügung stehendem Gärrest, kann die zusätzliche mineralische Düngung berechnet werden. Zu beachten ist, dass die bei der Düngeplanung derzeit nicht berücksichtigten gasförmigen Stickstoffverluste und der als „nicht mineraldüngeräquivalent“ bewertete Stickstoff auf jeden Fall ökologische Relevanz haben.

Fazit

Für eine effiziente Nutzung der Gärreste sind die Zeitspannen des Nährstoffbedarfs der verschiedenen Kulturarten, in denen Gärrest ausgebracht wird zu berücksichtigen. In diesem Zusammenhang sind die Forderungen der Düngeverordnung bezüglich einer Begrenzung der Ausbringung von Gärresten im Herbst (40 kg/ha NH_4 -N) unbedingt einzuhalten, um das Risiko der Nitratverlagerung zu minimieren. Ebenso muss der nach DüV geltende Grenzwert von 170 kg/ha Stickstoff für organische tierische Dünger eingehalten werden und sollte, um der gleichen Wirkweise Rechnung zutragen nicht nur auf tierische sondern auch auf pflanzliche Gärreste bezogen werden. Zur Gewährleistung einer bedarfsgerechten Düngung sind bei der Auslegung der Anlage ausreichende Lagerkapazitäten zu planen. Gesetzlich sind 6 Monate vorgeschrieben, je nach Anteil an Sommerkulturen in der Fruchtfolge, können jedoch bis zu 10 Monate Lagerkapazität notwendig sein.

Die Verwertung von Gärresten ist bei einer Vielzahl von Kulturen, d. h. auch bei Marktfrüchten als sehr gut einzuschätzen, so dass bei deren Anbau mineralische Dünger substituiert werden können. Insbesondere bei zusätzlichen Nährstoffimporten in den Betrieb, z. B. über Futtermittel, ist eine Verteilung der Gärreste auf Flächen die neben der Biogas-Substratproduktion zur Verfügung stehen (Marktfruchtflächen), dringend zu empfehlen, um die vorhandenen Verteilungsspielräume optimal ausnutzen zu können. Zu Konflikten kann es dann kommen, wenn schon durch hohe Güllemengen

aus der Tierhaltung die Einhaltung der GV Grenzen schwierig ist und durch den Biogasprozess weitere organische Substanz durch Nawarogärreste oder Gülleimport in die Region hinzukommen.

Neben einer Begrenzung der Gärrestmengen je Flächeneinheit führt auch der Export von Gärresten (Separierung/Pelletierung) zu einer Senkung der betrieblichen Stickstoffsalden und damit zu einer Verringerung des Nitrat-Auswaschungsrisikos. Mit dem Export von organischer Substanz können allerdings Zielkonflikte mit der Humusbilanz entstehen.

3.1 Nachernte und Herbst N_{min} -Werte

Der Nachernte- und der Herbst- N_{min} -Wert erlaubt eine Momentaufnahme des nach der Ernte bzw. vor Winter noch verfügbaren mineralischen Stickstoffs im Boden. Der Nachernte N_{min} gestattet Rückschlüsse darauf, ob Stickstoffdüngung und Stickstoffmineralisation mit der Aufnahme durch die Pflanze in Einklang gestanden haben. Der Herbst N_{min} erlaubt Aussagen zur Mineralisationsleistung des Bodens zwischen Ernte und Beginn des Winters sowie eine erste Abschätzung des Auswaschungsrisikos von Nitrat mit dem Sickerwasser.

Die in den Anbauversuchen 2006 – 2008 gemessenen N_{min} -Werte liegen im Mittelwert zwischen 20 und 60 kg/ha und sind damit als niedrig bis mittel einzustufen (Abbildung 5). Einzelne Werte, insbesondere bei Mais zeigen jedoch auch Werte von 90 kg/ha Stickstoff vor Winter.

Da die Versuche nur mineralisch gedüngt wurden, liegt kein erhöh-

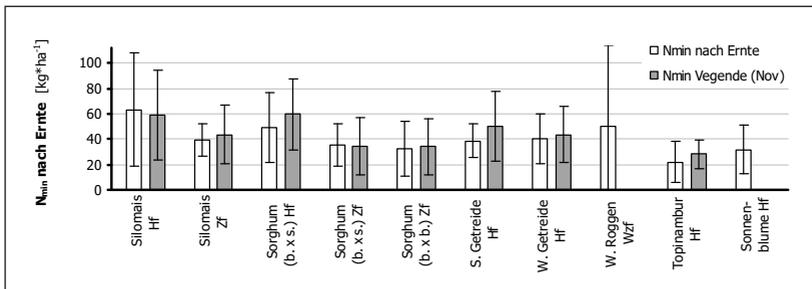


Abb. 5: N_{min} nach Ernte und zu Vegetationsende (November) in 0-90 cm Tiefe für ausgewählte Energiepflanzen. Fehlerbalken zeigen die Standardabweichung. Mit Hf – Hauptfrucht, Zf – Zweitfrucht Wzf – Winterzwischenfrucht.

tes Mineralisationspotenzial aus organischer Düngung vor. Sie zeigen daher gut die Wirkung der Fruchtart auf den N_{\min} -Wert, sind aber wegen der fehlenden organischen Düngung nur begrenzt mit Werten in der Praxis vergleichbar. Auffallend ist, dass Silomais und Sorghum in Zweitfruchtstellung (b. x s.) jeweils einen um 10–25 % geringeren N_{\min} -Wert nach Ernte haben. Die hohen N_{\min} -Werte nach Ernte bei Silomais sind in Fällen gemessen worden, in denen das Ertragsziel nicht erreicht wurde. Die hohen N_{\min} -Werte nach Ernte (im Mai) bei Winterroggen als Winterzwischenfrucht, haben keinen Einfluss auf die Nitratauswaschung, da die nachfolgende Kultur das Nitrat aufnimmt.

Die N_{\min} -Werte nach Ernte unterscheiden sich von denen zu Vegetationsende. Allerdings ist der Trend uneinheitlich und teilweise im Bereich der Messungenauigkeit. Steigt der N_{\min} -Wert in der Zeitspanne nach Ernte bis zu Vegetationsende, kommt als Ursache Mineralisation durch warme Witterung und Bodenbearbeitung in Frage. Sinkt der Wert, hat möglicherweise die Sickerwasserbildung und damit die Nitratverlagerung begonnen oder Stickstoff wurde durch die nachfolgende Kultur aufgenommen. Bezüglich der Maßnahmen zur Reduzierung von Nitratauswaschung beim Energiepflanzenanbau besteht für die Anwendung in Wasserschutzgebieten und bei der Umsetzung der europäischen Wasserrahmenrichtlinie noch Forschungsbedarf.

4 Wassererosion

Die standörtliche Gefährdung durch Wassererosion lässt sich über die allgemeine Bodenabtragsgleichung (DIN 19708) abschätzen:

$$A = R \cdot K \cdot S \cdot L \cdot C \cdot P$$

Mit A=langjährig zu erwartender mittlerer Bodenabtrag, R – Regen- und Oberflächenabflussfaktor, K – Bodenerodierbarkeitsfaktor L – Hanglängenfaktor, S – Hangneigungsfaktor, C – Management- und Bedeckungsfaktor, P – Faktor Erosionsschutzmaßnahmen.

Grundsätzlich gelten bei der Produktion von Energiepflanzen die gleichen Aussagen wie bei Anbausystemen für Nahrungs- und Futterpflanzen. Entscheidende Größe für eine Gefährdung durch Wassererosion ist die Hangneigung. Je größer die Hangneigung, desto höher ist die Bedeu-

tung einer bodenschonenden Gestaltung von Fruchtfolgen und Bodenbearbeitung. Die durch den Energiepflanzenanbau bedingten Unterschiede liegen im Wesentlichen in einer veränderten Kulturartenwahl, sowie einer Änderung von Anbauzeiten. Dies wird in der Allgemeinen Bodenabtragsgleichung durch eine Änderung des Management- und Bedeckungsfaktors (C-Faktor) berücksichtigt. Der C-Faktor beinhaltet die Erosivität der Niederschläge und die Wirkung von Bodenbearbeitung und angebauter Fruchtart. Die Erosivität der Niederschläge nimmt ab Mai stark zu und sinkt im September rasch wieder ab (vgl. Abbildung 6).

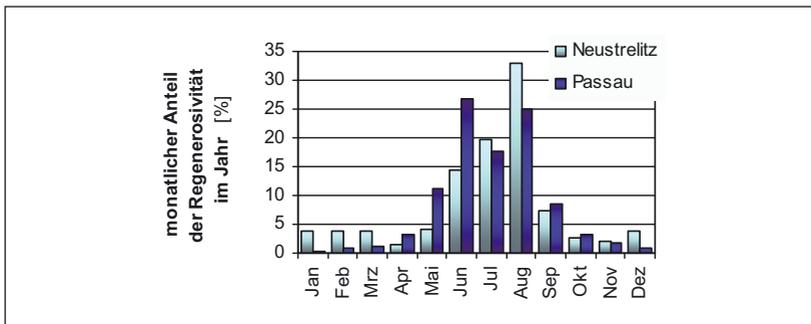


Abb. 6: Erosivität der Niederschläge für die Wetterstationen Neustrelitz (Mecklenburg-Vorpommern) und Passau (Bayern).

Besonders hoch ist die Erosionsgefährdung durch den Anbau in der Phase von der Saatbettbereitung bis zu einer Bodenbedeckung von 50 %. Kritisch kann dies insbesondere beim Anbau von C_4 -Pflanzen mit ihrer langsamen Jugendentwicklung sein, da in dieser Zeit die Erosivität der Niederschläge bereits zunimmt. Zur Veranschaulichung des C-Faktors wurde die Erosionsgefährdung exemplarisch für die Anbaufolge Winterweizen (Druschfrucht) – Silomais berechnet. Dabei wurde die Bodenbearbeitung variiert und der Anbau von Zwischenfrüchten untersucht.

Ergebnisse

Beim Silomaisanbau mit nicht wendender Bodenbearbeitung sinkt die Wassererosionsgefährdung gegenüber wendender Bodenbearbeitung um ein Mehrfaches (Abbildung 7). Wenn das Pflügen nach Weizen vom Herbst auf das Frühjahr verschoben wird, sinkt die Erosionsgefährdung über Winter erheblich (Säulen A – C).

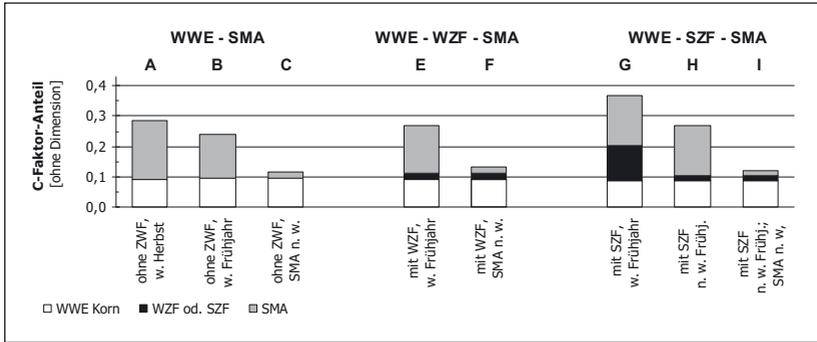


Abb. 7: Wasserosionsgefährdung für die Anbaufolge Winterweizen – Silomais mit unterschiedlicher Bodenbearbeitung und Zwischenfruchtanbau. Mit WWE – Winterweizen, ZWF – Zwischenfrucht, SMA – Silomais, w. – wendende Bodenbearbeitung, n. w. – nicht wendende Bodenbearbeitung. Standort Gülzow, Wetterstation Neustrelitz (Mecklenburg-Vorpommern).

Der Anbau einer Winterzwischenfrucht (Grünroggen) (Säule E u. F) ist anfangs erosionsrisikobelastet, da die Vorfrucht umgebrochen werden muss. Die Jugendentwicklung liegt aber in einer Zeit geringerer Niederschlagserosivität. Wird die Folgefrucht Mais mit nicht wendender Bodenbearbeitung etabliert, ist es möglich, die Erosionsgefährdung gegenüber der Anbaufolge ohne Winterzwischenfrucht erheblich zu senken (Säule F im Vergleich zu A u. B). Die Säulen E und F zeigen ein Zweikulturnutzungs-System mit früher Zweitfruchtstellung. Das bedeutet, dass die Erstfrucht Grünschnittrogen im Stadium des Grannenspitzens Anfang Mai geerntet wird, und die Aussaat des Mais bis Mitte Mai erfolgt. Im Zweikultur-Nutzungssystem mit später Zweitfruchtstellung (nicht dargestellt, Grünschnittroggenernte Ende Mai, Stadium Blüte, nachfolgend Mais ohne wendende Bodenbearbeitung) fällt die Maisentwicklung bis zu einer Bodenbedeckung von 50 % in die erosionsgefährdetere Zeit im Juni mit hoher Erosivität der Niederschläge. Daher ist das Zweikulturnutzungs-System mit später Zweitfruchtstellung ungünstiger als das Zweikulturnutzungs-System mit früher Zweitfruchtstellung zu bewerten (Säule F), aber immer noch besser als der Maisanbau mit wendender Bodenbearbeitung (Säule A u. B).

Die Etablierung einer Sommerzwischenfrucht, z. B. Ölrettich führt, bedingt durch die Bodenbearbeitung zu einem Zeitpunkt hoher Nieder-

schlagserosität, zu einer Erhöhung der Erosionsgefährdung die größer als beim Winterzwischenfruchtanbau ist. (Säule G). Aus Sicht des Schutzes vor Erosion ist davon abzuraten. Wird die Sommerzwischenfrucht mit nicht wendender Bodenbearbeitung etabliert (Säule H), ist die Erosionsgefährdung durch die Sommerzwischenfrucht ähnlich der der Winterzwischenfrucht. Die verbleibende hohe Erosionsgefährdung resultiert vom Maisanbau mit wendender Bodenbearbeitung her. Dieses Anbauverfahren kann aus Sicht des Wassererosionsschutzes optimiert werden, indem der Maisanbau ebenfalls nicht wendend erfolgt (Säule I). Die Varianten A, B, C und F sind in der Praxis etablierte Verfahren.

Fazit

Für die Gestaltung von Anbausystemen und Bodenbearbeitung (C-Faktor) aus Sicht des Erosionsschutzes sind Erosivität der Niederschläge, Zeitraum von der Saatbettbereitung bis zu einer Bodenbedeckung von 50 % und Bodenbearbeitungssystem die entscheidenden Größen. Dabei sind folgende Punkte festzuhalten:

- Generell sind Winterungen günstiger als Sommerungen zu bewerten, da im Winter eine schützende Pflanzendecke vorhanden ist. Bei C₄-Pflanzen ist die langsame Jugendentwicklung bis zu einer Bodenbedeckung von 50 % kritisch zu beurteilen, da diese in die Zeit mit erhöhter Erosivität der Niederschläge fällt. Anbau der C₄-Pflanzen mit engem Reihenabstand mindert die Erosionsgefahr. Ackerfutter im mehrjährigen Anbau bietet den größten Erosionsschutz und ist auf hängigen Flächen zu empfehlen.
- Nicht wendende Bodenbearbeitung, Mulchsaat und Direktsaat führen zu einer erheblichen Reduktion der Wassererosionsgefahr gegenüber wendender Bodenbearbeitung. Nicht wendende Bodenbearbeitung ist besonders bei der Etablierung von Sommerzwischenfrüchten und Zweitfrüchten notwendig. Die Kombination Winterzwischenfrucht mit nachfolgendem Mais- bzw. Sorghumanbau ist als sehr günstig zu bewerten, da die Zweitfrucht ohne wendende Bodenbearbeitung etabliert werden kann.
- Bei Sommerungen ist die Frühjahrsfurche günstiger als die Herbstfurche zu bewerten, da der Boden durch Stoppeln und Wurzelverbauung der Vorfrucht geschützt ist. Kriterien der Phytohygiene durch auf dem Boden verbleibende Stoppelreste, sind jedoch zu beachten.

- Der Zeitraum von der Saatbettbereitung bis zu einer 50%-igen Bodenbedeckung durch die Kultur ist sehr erosionsgefährdet. Untersaaten stellen in diesem Zusammenhang eine erosionsmindernde Maßnahme dar. Fällt die Aussaat in eine Zeit mit hoher Erosivität der Niederschläge wie z. B. in den August, hat dies einen wesentlichen Einfluss auf die Erosionsgefährdung. Werden die Kulturen mit nicht wendender Bodenbearbeitung etabliert, bleibt die Erosion aber im tolerierbaren Rahmen.

Literatur

- DIN 19708, 2005: Bodenbeschaffenheit – Ermittlung der Erosionsgefährdung von Böden durch Wasser mit Hilfe der ABAG; 25 S.; Berlin, Beuth.
- Dominik, P., Jäger, N., Sänger, A. und Flessa, H., 2009: Humusmehrer oder Humuszehrer – wie wirken NaWaRo-Gärreste auf den organischen Bodenkohlenstoff. Beitrag in diesem Tagungsband.
- FNR (Hrsg.), 2006: Handreichung Biogasgewinnung und -Nutzung, 3. Aufl., Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. (FNR), Gülzow, 232 S.
- Gutser, R., & Ebertseder, T., 2006: Die Nährstoffe in Wirtschafts- und Sekundärrohstoffdüngern – ein unterschätztes Potenzial im Stoffkreislauf landwirtschaftlicher Betriebe, S. 7 – 22. In: Bewertung von Wirtschafts- und Sekundärrohstoffdüngern in der Landwirtschaft – Nutzen und Risiken, KTBL-Vortragsveranstaltung vom 19. – 20. April 2006 in Osnabrück, KTBL-Schrift 444, 275 S.
- Hülsbergen & Schmidt, 2008: Humusbilanzen und C-Kreisläufe in Betriebssystemen mit Bioenergieerzeugung. In: Ökologische und Ökonomische Bewertung nachwachsender Energieträger, KTBL-Tagung vom 8. bis 9. September 2008, Aschaffenburg, KTBL-Schrift 468, 230 S.
- Hülsbergen, K.-J., 2003: Entwicklung und Anwendung eines Bilanzierungsmodells zur Bewertung der Nachhaltigkeit landwirtschaftlicher Systeme, Habil., Shaker, 257 S.
- Jeroch, H., Flachowsky, G., Weißbach, F. (Hrsg.), 1993: Futtermittelkunde, G. Fischer, Stuttgart, 510 S.
- Leithold, G., Hülsbergen, K.-J., Michel, D., Schönmeier, H., 1997: Humusbilanzierung – Methoden und Anwendung als Agrar-Umweltindikator. In: Deutsche Bundesstiftung Umwelt (Hrsg): Umweltverträgliche Pflanzenproduktion – Indikatoren, Bilanzierungsansätze und ihre Einbindung in Ökobilanzen. Zeller Verlag, Osnabrück, S. 43-55.
- LLFG (Landesanstalt für Landwirtschaft Forsten und Gartenbau, Sachsen-Anhalt) Hrsg., LVLf (Landesanstalt für Verbraucherschutz, Landwirtschaft und Flurneuordnung Brandenburg), Hrsg., LFBMV (Landwirtschaftliche Fachbehörde des Landes Mecklenburg-Vorpommern), Hrsg., 2008: Richtwerte für die Untersuchung und Beratung sowie zur fachlichen Umsetzung der Düngeverordnung (DüV).
- Strauß, C., 2009: Optimierter Energiepflanzenanbau für Biogasanlagen. Beitrag in diesem Tagungsband (Kap. 8).

- VDLUFA Standpunkt Humusbilanzierung 2004, Methode zur Beurteilung und Bemessung der Humusversorgung von Ackerland: Körschens, M. (Hrsg.), Rogasik, J. (Mitarb.), Schulz, E. (Mitarb.), 12 S., Bonn; www.vdlufa.de/vd_00.htm?2, Zugriff am: 28.10.2005.

Anschriften der Autoren:

*Dr. Matthias Willms, Dr. Detlef Deumlich, Johannes Hufnagel
Leibniz-Zentrum für Agrarlandschaftsforschung e.V. (ZALF)
Eberswalder Str. 84, 15374 Müncheberg
E-Mail: zalf@zalf.de*

*Frank Reinicke, Bernhard Wagner
Institut für Nachhaltige Landwirtschaft e.V. (INL)
Am Krähenberg 22, 06118 Halle*

*Dr. Christine v. Buttlar
Ingenieurgesellschaft für Landwirtschaft und Umwelt (IGLU)
Bühlstr. 10, 37073 Göttingen
E-Mail: kontakt@iglu-goettingen.de*

Wie ökologisch ist Biogas?

Sven Gärtner

ifeu – Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg GmbH

Hintergrund und Fragestellung

Die Biogasnutzung hat in den letzten Jahren erheblich an Bedeutung gewonnen – unter anderem unterstützt durch das Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG). Doch obwohl Produktion und Nutzung von Biogas in vielfacher Hinsicht ökologisch wie auch ökonomisch sehr vielversprechend sind, zeigt die Ökobilanz nicht immer Vorteile für Biogas und es kann teilweise zu Konflikten mit anderen Nachhaltigkeitszielen wie dem Naturschutz kommen. In diesem Artikel werden verschiedene Fragestellungen untersucht, die die ökologischen Auswirkungen der Produktion und Nutzung von Biogas betreffen. Dabei werden folgende Themen beleuchtet:

- als Hauptthema die ökologische Analyse der Produktion und Nutzung von **Biogas aus Gülle und Energiepflanzen (z. B. Silomais)** im BHKW, das konventionell produzierten Strom und Wärme aus Erdgas und Heizöl ersetzt

und als Teilziele:

- Analyse der Optimierungspotenziale der Produktion und Nutzung von Biogas hinsichtlich der **Anlagengröße**, des **Wärmenutzungsgrads** und der **Technologien** zur Strom- und Wärmeerzeugung
- Analyse der ökologischen Auswirkungen bei der Aufbereitung von Biogas zu **Biomethan** und Nutzung in verschiedenen Erdgasanwendungen sowie in Pkws, in BHKWs und GuD-Kraftwerken
- Vergleich der ökologischen Auswirkungen der Produktion und Nutzung von Biogas und Biomethan mit **anderen Bioenergieträgern** in stationärer und mobiler Nutzung

Allgemeine Vorgehensweise

Die Untersuchung der ökologischen Auswirkungen der Biogas- bzw. Biomethan-Produktion und -nutzung erfolgt in Anlehnung an die Ökobilanznorm (ISO 14040/44). Der gesamte Lebensweg der Produktion und Nutzung von Biogas bzw. Biomethan wird von der Biomassebereitstellung über die Biogaserzeugung und Entsorgung der Reststoffe bis hin zu den Schadstoffemissionen im Vergleich zu fossiler Wärme-, Strom- und Kraftstoffproduktion und -nutzung betrachtet, je nachdem zu welcher Energiegewinnung Biogas eingesetzt wird. Abbildung 1 zeigt beispielhaft einen vereinfachten schematischen Lebensweg für eine Biogaserzeugung aus Gülle bzw. Anbaubiomasse und die Nutzung in einem Blockheizkraftwerk (BHKW). Damit können Strom und Wärme aus fossilen Energieträgern ersetzt werden. Im Zuge der Sachbilanz werden bei einer Ökobilanz die Inputs und Outputs aus der Produktion und Nutzung eines Produkts erfasst. Alle Aufwendungen für Roh-, Hilfs- und Betriebsstoffe gehen dabei als Inputgrößen, alle Emissionen als Outputgrößen in die Bilanz ein. Nebenprodukte erhalten eine Gutschrift, wenn sie Äquivalenzprodukte ersetzen, die den gleichen Nutzen haben. Beispielsweise fällt bei der Biogasproduktion ein Gärrest an, der als Düngemittel auf die Felder zurückgebracht wird und so mineralische Düngemittel substituiert. Gleichermaßen wird beim Einsatz von Gülle in Biogasanlagen die direkte Ausbringung von unvergorener Gülle vermieden und daher gutgeschrieben. Nach Berücksichtigung aller In- und Outputs werden die Ergebnisse der Gesamt-

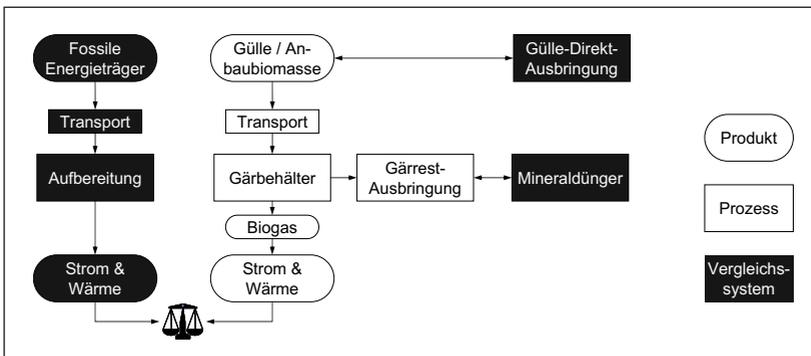


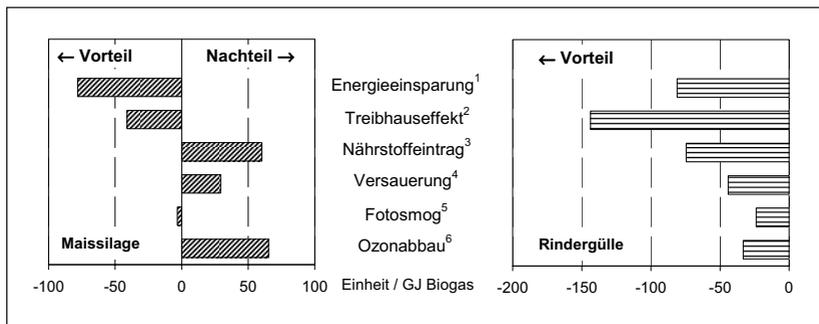
Abb. 1: Schema eines exemplarischen Lebenswegvergleichs von Biogas aus Gülle mit dem Vergleichssystem

bilanz in der Wirkungsabschätzung bewertet. Dabei werden verschiedene Umweltwirkungskategorien betrachtet. Unter anderem zählen dazu Ressourcenbeanspruchung, Treibhauseffekt, Versauerung, Nährstoffeintrag und Fotosmog. Eine Betrachtung der Umweltauswirkungen eines Produkts über den gesamten Lebensweg ermöglicht somit dessen ökologische Bewertung. Darüber hinaus erlaubt es die Identifizierung von Schwachstellen und Optimierungspotenzialen.

Ergebnisse

Biogas gegenüber konventioneller Strom- und Wärmeerzeugung

Wie bereits erwähnt, gibt es eine Fülle an Parametern, die bei der Biogasproduktion variiert werden können. Beispielhaft wird in Abbildung 2 ein Vergleich zwischen Biogas aus Maissilage und Biogas aus Rindergülle für den Standardfall (durchschnittliche Biogasanlage mit 500-kW_{el}-BHKW und offenem Gärrestlager) dargestellt. Wie die Abbildung zeigt, können sowohl mit Biogas aus Maissilage als auch mit Biogas aus Rindergülle im Standardfall fossile Ressourcen geschont und Treibhausgase reduziert werden.



¹ 10 MJ, ² kg CO₂-Äquiv., ³ g PO₄-Äquiv., ⁴ 10 g SO₂-Äquiv., ⁵ g Ethen-Äquiv., ⁶ 10 mg R11-Äquiv.

Abb. 2: Bilanzergbnisse für die Biogas-Lebenswegvergleiche aus Mais bzw. Rindergülle (Standard) für verschiedene Umweltwirkungen

Dabei weist Gülle wesentlich größere Vorteile als Maissilage auf, vor allem im Klimaschutz. Differenzierter müssen die anderen Umweltwirkungen betrachtet werden: Hier trägt Biogas aus Gülle zur Reduzierung

von Versauerung, Nährstoffeintrag und Ozonabbau bei, während Biogas aus Maissilage diese Umweltwirkungen noch verstärkt. Zum einen liegt dies an den beim Maisanbau durch die Düngemittel freigesetzten Ammoniak- und Lachgasemissionen. Zum anderen werden auch an der Anlage und bei der Gärrestaubsbringung Emissionen z. B. von Ammoniak frei. Nach noch nicht endgültig bestätigter Datenlage sind diese aber im Fall der Gülle geringer als die Ammoniakemissionen bei der Lagerung und Ausbringung von unbehandelter Gülle, mit deren typischem Entsorgungsweg die Güllevergärung verglichen werden muss. Bei der Beurteilung von Biogas ist also ausschlaggebend, welche Substrate zur Erzeugung verwendet werden. Eine objektive ökologische Bewertung von Biogas aus Anbaubiomasse ist somit nicht möglich. Haben Ressourcenschonung und Klimaschutz oberste Priorität, so kann aufgrund dieser subjektiven Werthaltung Biogas aus Anbaubiomasse gefördert werden, steht dagegen eine Reduzierung von Versauerung und Nährstoffeintrag im Vordergrund, so sollte auf eine Förderung von Biogas aus Anbaubiomasse verzichtet werden. Biogas aus Rindergülle ist dagegen – unter den genannten Randbedingungen – uneingeschränkt zu befürworten.

Biogas in verschiedenen Nutzungsoptionen

Neben dem eingesetzten Substrat und der Anlagenausgestaltung wie Vorlager- und Gärrestlagerabdeckungen, die die Ökobilanz grundsätzlich deutlich verbessern können, haben die möglichen Nutzungsvarianten einen

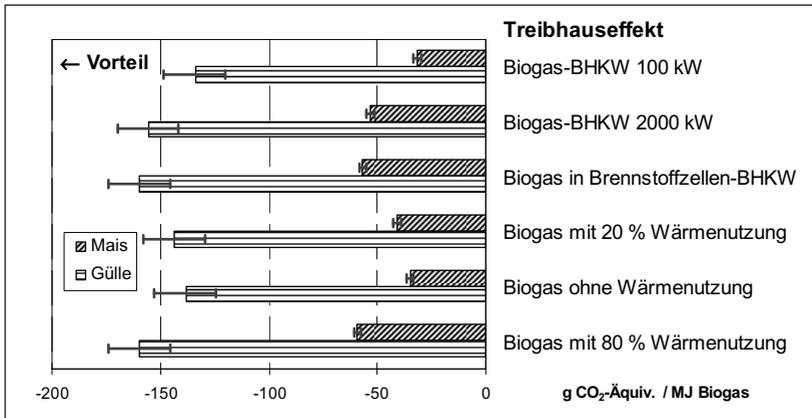


Abb. 3: Treibhausgasbilanzen für verschiedene Nutzungsoptionen von Biogas

Einfluss auf die ökologischen Auswirkungen. Hier werden die Nutzung von Biogas in BHKWs unterschiedlicher Größe und Technologie sowie verschiedene Wärmenutzungsgrade analysiert. Das Thema Biomethan wird im nächsten Abschnitt besprochen. Abbildung 3 stellt die Auswirkungen der verschiedenen Nutzungsvarianten von Biogas aus Rindergülle und Maissilage auf den Treibhauseffekt vor. Deutlich zu erkennen ist, wie die höhere Effizienz eines großen BHKWs oder eines hocheffizienten Brennstoffzellen-BHKWs höhere Treibhausgasersparungen zur Folge hat. Gleichermaßen ist ein höherer Wärmenutzungsgrad der Anlage von Vorteil. Andererseits ist die Nutzung von Biogas aus Gülle in kleinen BHKWs um ein Vielfaches günstiger als die Nutzung von Biogas aus Anbaubiomasse in großen, hocheffizienten Anlagen. Hier sind die vermiedenen Methanemissionen aus der Ausbringung unvergorener Gülle der entscheidende Faktor.

Aufbereitung von Biogas zu Biomethan

Die Aufbereitung von Biogas auf Erdgasqualität zu so genanntem Biomethan gewinnt zunehmend an Bedeutung. Eine solche Aufbereitung bietet eine Alternative, wenn an einer Biogasanlage keine vollständige Wärmenutzung möglich ist, da durch eine Einspeisung von Biomethan ins Erdgasnetz die regionale Beschränkung der Nutzung aufgehoben ist. Biomethan kann dann dort eingesetzt werden, wo ein effizienter Einsatz mit vollständiger Wärmenutzung möglich ist. In Abbildung 4 sind die Ergebnisse der Klimagasbilanzen für verschiedene Einsatzmöglichkeiten von Biomethan dargestellt: die direkte Erdgas-Substitution sowie die Biomethan-Nutzung als Kraftstoff, die Verwendung in BHKWs verschiedener Größen sowie in Gas-und-Dampf-Kombikraftwerken (GuD-KW). Für die Aufbereitung zu Biomethan ist der Stand der Technik bzw. die Einhaltung rechtlicher Vorgaben wie EEG, EEWärmeG etc. unterstellt.

- **Erdgassubstitution:** Die direkte Erdgassubstitution führt gegenüber der direkten Nutzung von Biogas im BHKW zu höheren Treibhausgasemissionen. Dies liegt daran, dass die Nutzung von Erdgas gegenüber anderen fossilen Energieträgern nur geringe Treibhausgase verursacht.
- **Biomethan in BHKWs oder GuD-KW:** Wird Biomethan in neu zu errichtenden hocheffizienten Gas-und-Dampf-Kombikraftwerken verwendet oder in neuen BHKWs eingesetzt und die Wärme zu 100 % genutzt, können fossile Ressourcen geschont und Treibhaus-

gase reduziert werden, wobei in der Regel gilt: je höher der elektrische Wirkungsgrad des BHKWs bzw. Kraftwerks, desto höher die Einsparung. Diese Ergebnisse fallen in der Regel dann günstiger aus als ein direkter Einsatz von Biogas in einem BHKW vor Ort mit 20 %iger Wärmenutzung, wenn letztere Anlage nicht nach dem Stand der Technik mit Gärrestlagerabdeckungen und Restgasnutzung ausgestattet ist.

- **Biomethan als Kraftstoff:** Die Nutzung von Biomethan als Kraftstoff und der damit verbundene Ersatz von Benzin spart zwar ebenfalls fossile Energie und Treibhausgase ein, allerdings ist der direkte Einsatz von Biogas oder der Einsatz von Biomethan in einem BHKW wesentlich effektiver. Bei der Versauerung und dem Nährstoffeintrag dagegen hat die Nutzung als Kraftstoff geringere Nachteile. Zwei Szenarien sind hier unterschieden: Wird Biomethan in monovalenten Fahrzeugen eingesetzt, so ergeben sich mehr Vorteile als bei einer bivalenten Nutzung. Würde durch Biomethan Erdgas ersetzt, entspricht das Ergebnis dem der Erdgassubstitution.

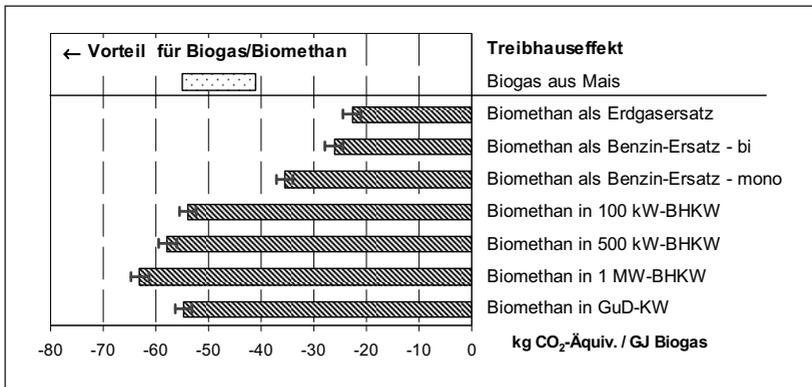


Abbildung 4: Ergebnisse der Treibhausgasbilanzen für verschiedene Nutzungsoptionen von Biogas (Bandbreite zwischen Standardfall und abgedecktem Gärrestlager mit Restgasnutzung) sowie Biomethan; bi = bivalente Motoren, mono = monovalente Motoren

Biogas und Biomethan im Vergleich zu anderen Bioenergieträgern

Im Vergleich zu anderen Bioenergieträgern schneiden Biogas und Biome- than mittelmäßig ab (s. Abbildung 5). Sie können als Brennstoff zwar

durchaus einen nennenswerten Beitrag zum Klimaschutz leisten, zeigen im Vergleich zu festen Bioenergieträgern tendenziell aber ungünstigere Ergebnisse. Auch mit Biomethan als Kraftstoff können Klimagase reduziert werden, allerdings in wesentlich geringerem Maße als in Kraft-Wärme-Kopplung.

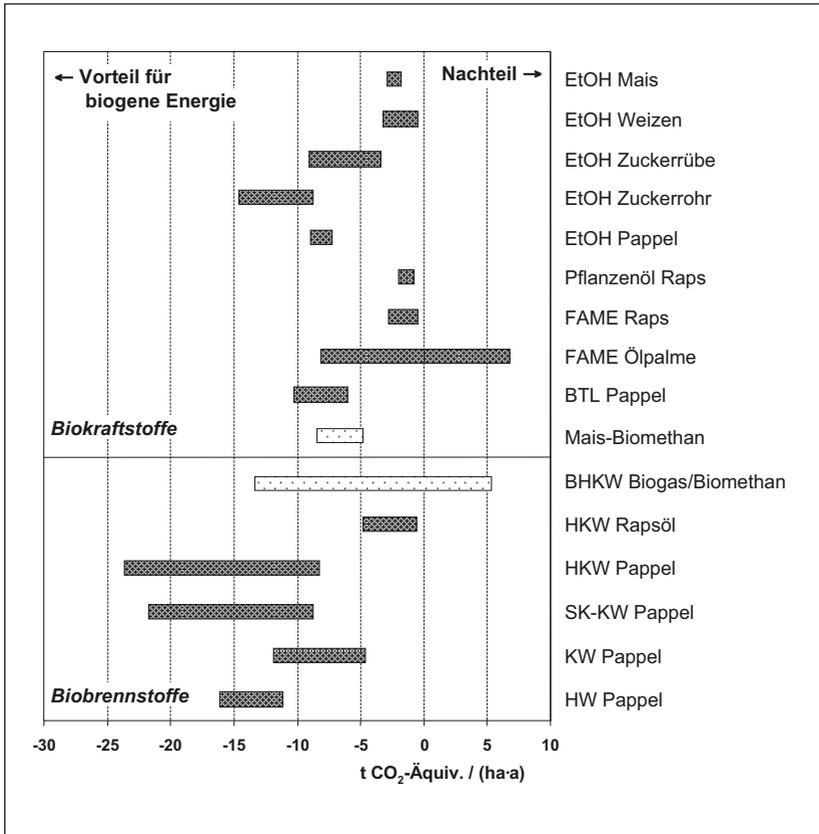


Abb. 5: Treibhausgasvergleich von ausgewählten Bioenergieträgern gegen über dem jeweiligen fossilen Äquivalenzprodukt. (EtOH=Bioethanol, FAME=Biodiesel, BtL=Biomass-to-Liquid, BHKW=Blockheizkraftwerk, HKW=Heizkraftwerk, HW=Heizwerk, KW=Kraftwerk, SK=Steinkohle)

Zusammenführung und Schlussfolgerungen

Zusammengefasst zeigt sich, dass es eine Vielzahl an Möglichkeiten gibt, Biogas ökologisch zu produzieren und zu nutzen. Allerdings stellt sich Biogas nicht grundsätzlich in allen Pfaden als ökologisch vorteilhaft dar. So können bei ungünstigen Konzepten sogar mehr Klimagase freigesetzt als eingespart werden.

Als besonders erschließungswürdig wurden tierische Exkrememente (**Gülle**) identifiziert, deren Potenzial bisher nur zu 15 % genutzt wird und deren Vergärung gegenüber ihrer bisherigen Verwendung ökologische Vorteile aufweist. Einer der wichtigsten Vorteile ist der Beitrag zum Klimaschutz, aber auch in den anderen Umweltwirkungen gibt es keine Nachteile. Auf der anderen Seite spart die Nutzung von **Anbaubiomasse** wie Maissilage als Biogassubstrat zwar in der Regel ebenfalls fossile Energien und Treibhausgase ein, führt aber aufgrund der Emissionen beim Anbau und der Gärrestaubsbringung zu einer Erhöhung von Versauerung, Nährstoffeintrag und Ozonabbau.

Nach der Wahl der Substrate zählen zu den wichtigsten Ansatzpunkten für ökologisch vorteilhafte Biogaspfade vor allem die **Anlagenausgestaltung und -größe** sowie die Biogasnutzungskonzepte. Hier haben die Anlagen mit höherer Gesamteffizienz (größere Anlagen, Brennstoffzellen-BHKWs, KWK-Konzepte mit hohem Wärmenutzungsgrad) Vorteile gegenüber den Anlagen mit geringerer Effizienz.

Die Aufbereitung von Biogas auf Erdgasqualität, zu **Biomethan**, macht aus Umweltschutzgründen nur dann Sinn, wenn die aus der Aufbereitung resultierenden Emissionen mindestens kompensiert werden. Dazu muss die vorangehende Biogaserzeugung dem Stand der Technik entsprechen (v. a. gasdichte Gärrestlager mit Restgasnutzung) und die Aufbereitung entsprechend den Vorgaben des EEG (2008) erfolgen (maximaler Stromverbrauch, Prozesswärme regenerativ, maximale Methanemissionen). Ferner sollten auch die Ammoniakemissionen bei der Gärrestaubsbringung gesenkt werden.

Biomethan ist vor allem dann günstig, wenn es in BHKWs eingesetzt wird und auch tatsächlich 100 % der Wärme genutzt werden. Bei einem Einsatz des Biomethans als Kraftstoff werden demgegenüber wesentlich geringere Treibhausgaseinsparungen erreicht. Lediglich hinsichtlich Versauerung und Nährstoffeintrag kann sich die Nutzung als Kraftstoff etwas günstiger darstellen. Wird Biomethan unter Berücksichtigung aller

Optimierungspotenziale produziert und genutzt, so bietet es ein durchaus beachtliches Potenzial.

Fraglich ist allerdings, ob es für Biomethananlagen oder auch **große Biogasanlagen** möglich ist, einen ausreichenden nachhaltigen Substratnachschub zu gewährleisten. Wirtschaftlich ist insbesondere eine Aufbereitung nur in größeren Anlagen lohnenswert. Da Gülle meist dezentral anfällt und sich zudem bei der Erschließung hohe Transportkosten ergeben, werden als Substrate für Anlagen mit Biogas-Aufbereitung heute vornehmlich Energiepflanzen eingesetzt. Trotz der Regularien der Cross Compliance kann deren nachhaltiger Anbau bislang nicht garantiert werden, und zwar vor allem aufgrund von direkten oder indirekten negativen Auswirkungen auf den Naturschutz – ein Charakteristikum aller Energiepflanzen. Beispielsweise sind in einigen Regionen mittlerweile keine ökologischen Ausgleichsflächen mehr zu bekommen und in einigen Fällen wurden sogar Flächen des Vertragsnaturschutzes zu Gunsten eines Energiepflanzenanbaus gekündigt. Dadurch ergibt sich mittlerweile in Deutschland ein Interessenskonflikt zwischen der Einsparung von fossiler Energie und Treibhausgasen einerseits und den diversen Naturschutzzielen andererseits. Zukünftig müssen daher Wege erschlossen werden, wie die Naturschutzziele bei gleichzeitiger Biogasproduktion vollständig umgesetzt werden können. Das ist machbar. Zu nennen wären hier beispielsweise die Reallokation der bisherigen Anbaubiomassestandorte, die Verhinderung von Grünlandumbruch für den Energiepflanzenanbau, Sondermaßnahmen bei Neubelegung von Ackerflächen für Anbaubiomasse wie die Ackerlandstreifenbegrünung, der Erhalt von naturschutzrelevanten Pufferzonen et cetera. Diese Aspekte sollten bei einer zukünftig verstärkten Förderung von Biomethan noch stärker als bisher bedacht und entsprechend berücksichtigt werden. Solange es bundesweit zu diesen Themen keine Regelungen gibt, sind Pfade wie die großtechnische Biogas- oder Biomethanproduktion eher abzulehnen. Eine Einsparung von Treibhausgasen, die als Argument für die Biogas-/Biomethannutzung bzw. generell für die Nutzung von Energiepflanzen angeführt wird, ist oftmals auch auf andere Art möglich, während der Erhalt der Natur als Lebensgrundlage für den Menschen nicht anderweitig als mit den genannten und weiteren Naturschutzmaßnahmen betrieben werden kann und Flächen dafür nötig sind, die anderenfalls dem Naturschutz verloren gehen.

Im **Vergleich zu anderen Bioenergieträgern** schneiden Biogas und Biomethan mittelmäßig ab. Sie können als Brennstoff zwar durchaus einen

nennenswerten Beitrag zum Klimaschutz leisten, zeigen im Vergleich zu festen Bioenergieträgern tendenziell aber ungünstigere Ergebnisse. Auch mit Biomethan als Kraftstoff können Klimagase reduziert werden, allerdings in wesentlich geringerem Maße als durch den Einsatz zur KWK-Nutzung. Wird Biogas ohne Einhaltung von Mindestanforderungen wie z. B. ein gasdicht abgedecktes Gärrestlager produziert, so können die Auswirkungen sogar kontraproduktiv zum angestrebten Klimaschutzziel sein.

Um die ökologischen Auswirkungen unserer Gesellschaft wie z. B. die Klimaerwärmung zu verringern, gibt es vielfältige Möglichkeiten wie die Optimierung unserer Stadt- und Raumplanung, die Änderung des Verbraucherverhaltens z. B. im Verkehrssektor, die Gebäudedämmung, die Forcierung der Kraft-Wärme-Kopplung und andere Maßnahmen zur Energieeffizienz. Auch Biogas kann dazu beitragen, nämlich durch die verstärkte Erschließung von Gülle und anderen organischen Materialien wie Grünschnitt oder organischen Abfällen. Dazu müssten aber in bestimmten Bereichen erst noch entsprechende politische Weichenstellungen vorgenommen werden. Bis es so weit ist, bleibt aber zumindest im Einzelfall, z. B. auf der kommunalen Ebene, eine weitere Biogasproduktion und -nutzung aus Energiepflanzen nur dann einzugehen, wenn deren Konzept eine vollständige Berücksichtigung des Naturschutzes garantieren.

Literatur

- IFEU 2008: Gärtner S., Münch J., Reinhardt G., Vogt R.: Materialband E – Ökobilanzen. Im Rahmen des BMU-Forschungsvorhabens „Optimierungen für einen nachhaltigen Ausbau der Biogaserzeugung und -nutzung in Deutschland“, Heidelberg, Berlin, Darmstadt, Leipzig 2008
- ISO 14040/44: DIN EN ISO 14040 & 14044. Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag, Berlin, 2006

Anschrift des Autors:

*Sven Gärtner
ifeu – Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg GmbH
Wilckensstr. 3, 69120 Heidelberg
E-Mail: sven.gaertner@ifeu.de*

5.

Rechtliche Rahmenbedingungen

Biogasanlagen – Analyse von Bau und Betrieb aus genehmigungsrechtlicher Sicht

Hans-Walter Schneichel
Struktur- und Genehmigungsdirektion Nord

Nach wie vor suchen Landwirte neue und möglichst zukunftssichere Einkommensquellen. Schlagworte wie „vom Landwirt zum Energiewirt“ machen gerne die Runde. Wenn in einem solchen Rahmen auch noch bislang brachliegende Ressourcen mobilisiert und eingebunden werden können, weckt dies ein besonderes Interesse.

Dieser Artikel soll Interessierten einen Überblick über genehmigungsrechtliche Fragen im Zusammenhang mit der Errichtung und dem Betrieb einer Biogasanlage geben. Es können nicht alle Detailfragen angesprochen werden, diese bleiben einer Beratung durch Fachverbände und zuständigen Behörden vorbehalten.

Die Errichtung und der Betrieb einer Biogasanlage bedürfen der Genehmigung. Art und Umfang einer erforderlichen Genehmigung hängen von der Größe der Anlage (Durchsatzmenge), den geplanten Einsatzstoffen und der technischen Ausführung ab.

Baurechtliche Genehmigung

In jedem Fall ist eine baurechtliche Genehmigung erforderlich, da die für die geplante Biogasanlage zu errichtenden Baukörper aufgrund ihrer Volumina die nach dem jeweiligen Landesbaurecht zulässigen Freiräume überschreiten werden. In einem baurechtlichen Genehmigungsverfahren wird die Zulässigkeit der Errichtung an dem beantragten Standort geprüft.

Bauplanungsrecht

Für die Wahl eines geeigneten Standortes sind bauplanungsrechtliche Gesichtspunkte zu beachten. Grundlagen für die baurechtlichen Entscheidungen finden sich entweder im Flächennutzungsplan oder, wenn für den Standort vorhanden, in einem Bebauungsplan. Die Planungshoheit für beide Pläne liegt bei den Kommunen.

In den meisten Fällen kommt der sogenannte Außenbereich in Betracht. Hier sind nur privilegierte Vorhaben zulässig, um eine Zersiedelung der Landschaft zu verhindern. Zu den privilegierten Vorhaben im Außenbereich zählt ein Betrieb der Landwirtschaft. Bis vor einigen Jahren konnten Biogasanlagen nur im Rahmen eines landwirtschaftlichen Betriebes als Nebenanlage mit sogenannter „dienender Funktion“ errichtet werden. Mit dem Gesetz zur Anpassung des Baugesetzbuchs an EU-Richtlinien (Europarechtsanpassungsgesetz Bau – EAG-Bau) vom 24.06.2004 (BGBl. I S. 1359) wurde ein eigenständiger Privilegierungstatbestand für Biogasanlagen in das Gesetz aufgenommen. Hiernach können Anlagen zur energetischen Nutzung von Biomasse im Außenbereich errichtet werden, wenn sie in einem räumlich-funktionalem Zusammenhang mit einem landwirtschaftlichen Betrieb stehen, eine gewisse Größe, ausgedrückt als Leistung eines angeschlossenen BHKW's (hier: 500 kW_{el}), nicht überschreiten und die Biomasse überwiegend (> 50 %) aus dem Betrieb oder aus nahe gelegenen landwirtschaftlichen Betrieben stammt. Je Hofstelle oder Betriebsstandort ist nur eine Anlage zulässig. Für die Frage der Rohstoffbeschaffung aus nahe gelegenen Betrieben hat inzwischen das Bundesverwaltungsgericht eine Auslegung getroffen. Hiernach muss die Biomasse auf Flächen in einem Umkreis von max. 15 bis 20 km um die Anlage erzeugt werden, unabhängig vom Sitz des kooperierenden Betriebes. Soweit in einem Genehmigungsverfahren auf diesen Privilegierungstatbestand Bezug genommen wird, ist die Belegenheit der Flächen nachzuweisen.

Öffentliche Belange

Eine Baugenehmigung kann erteilt werden, wenn öffentliche Belange dem Vorhaben nicht entgegenstehen. Beispielhaft können genannt werden: Wasserschutzgebiete, Naturschutzgebiete, sonstige konkrete Planungen öffentlicher Einrichtungen, u. ä.

Erschließung

Eine ausreichende Erschließung muss gesichert sein (z. B.: Verkehr, Ver- und Entsorgung mit Wasser, Strom u. ä.)

Gesichtspunkte des Immissionsschutzes

Es werden mögliche Auswirkungen auf die Umgebung geprüft.

Anhand von 5 ausgewählter Modellanlagen werden die grundsätzlich erforderlichen Genehmigungen dargestellt. Prüfungen des Einzelfalles können ergänzende Vorgaben ergeben.

Modell		I	II	III	IV c	V
Beschreibung		75 kW; 30 % Gülle; 70 % NawaRo	350 kW; 30 % Gülle; 70 % NawaRo	500 kW; Gülle + Neben- produkte	500 kW; Bonusfreie Abfälle	(1000 kW) Gasein- speisung
elektrische Leistung	kW	75	350	500	500	
Substrate						
Rindergülle	t FM/a	750	3000	3500	4000	
Schweinegülle	t FM/a			3500		
Maissilage	t FM/a	1250	5750			14000
Getreidekörner	t FM/a		200			500
Grassilage	t FM/a	200				
Getreide GPS	t FM/a					2500
Glycerin	t FM/a			1000		
Rapskuchen	t FM/a			1000		
Getreide- ausputz	t FM/a			620		
Speisereste	t FM/a				8000	
Fettabscheider- fett	t FM/a				4600	
Bioabfall	t FM/a				5500	
Rezirkulat aus Separation	t FM/a					5000

Fachrechtliche Genehmigungen

Zulassung nach Artikel 15 EG-VO 1774/2002

Werden in einer Biogasanlage tierische Nebenprodukte, die nicht zum menschlichen Verzehr bestimmt sind, behandelt, so ist eine Zulassung nach der EG-Verordnung Nr. 1774/2002¹ erforderlich. Im Wesentlichen geht es hier um den Einsatz von Gülle und Festmist. In der EG-Verordnung werden beide Arten von Wirtschaftsdünger als „Gülle“ bezeichnet. Ausgenommen sind die Exkremente von „Heimtieren“. Für die Zulassung ist die Veterinärverwaltung zuständig.

Umweltverträglichkeitsprüfung

Durch das Gesetz über die Umweltverträglichkeitsprüfung² sind bei einer Reihe von Vorhaben im Interesse einer wirksamen Umweltvorsorge mögliche Auswirkungen auf die Umwelt frühzeitig und umfassend zu ermitteln, zu beschreiben und zu bewerten. Hierbei geht es um unmittelbare und mittelbare Auswirkungen eines Vorhabens auf

- Menschen, Tiere und Pflanzen,
- Boden, Wasser, Luft, Klima und Landwirtschaft,
- Kulturgüter und sonstige Sachgüter sowie
- Die Wechselwirkung zwischen den vorgenannten Schutzgütern.

Genehmigungen nach dem Bundes-Immissionsschutzgesetz³

Anlagen, die bestimmte Kenngrößen überschreiten, bedürfen einer immissionsschutzrechtlichen Genehmigung. Hier ist zwischen einem vereinfachten Genehmigungsverfahren und einem Verfahren mit Öffentlichkeitsbeteiligung zu unterscheiden. In der Vierten Verordnung zur Durchführung

¹ Verordnung (EG) Nr. 1774/2002 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 03. Oktober 2002 mit Hygienevorschriften für nicht für den menschlichen Verzehr bestimmte tierische Nebenprodukte (ABl. L 273 vom 10.10.2002, S. 1), zuletzt geändert durch Verordnung (EG) Nr. 777/2008 der Kommission vom 04. August 2008 (ABl. L 207 vom 05.08.08, S. 9)

² Gesetz über die Umweltverträglichkeitsprüfung (UIVPG) in der Fassung der Bekanntmachung vom 25.06.2005 (BGBl. I 1757, 2797), zuletzt geändert durch Gesetz vom 11.08.2009 (BGBl. I S. 2723)

³ Gesetz zum Schutz vor schädlichen Umwelteinwirkungen durch Luftverunreinigungen, Geräusche, Erschütterungen und ähnliche Vorgänge (Bundes-Immissionsschutzgesetz – BImSchG) in der Fassung der Bekanntmachung vom 26.09.2002 (BGBl. I S. 3830), zuletzt geändert durch Gesetz vom 11.08.2009 (BGBl. I S. 2723)

des Bundes-Immissionsschutzgesetzes⁴ sind die genehmigungsbedürftigen Anlagen aufgeführt.

Anlagen, die Abfälle behandeln, auf die die Vorschriften des Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz⁵ Anwendung finden, bedürfen ab einer Durchsatzmenge von > 10 t/d einer immissionsschutzrechtlichen Genehmigung. Gleiches gilt, wenn ein Blockheizkraftwerk (BHKW) mit einer Leistung von 1 MW_{el} oder mehr installiert wird.

Gegen immissionsschutzrechtliche Genehmigungen werden des Öfteren Vorbehalte geäußert. So seien die Antragsunterlagen umfangreicher und es würden höhere Kosten für die Genehmigung anfallen. Dies ist im Grundsatz auch zutreffend. Es gibt auch gewichtige Gründe, die für ein solches Verfahren sprechen. So besteht zum Beispiel ein Anspruch auf die Genehmigung, wenn die Anforderungen erfüllt sind; d. h. von der Anlage werden keine schädlichen Umwelteinwirkungen und sonstige Gefahren, erhebliche Nachteile und erhebliche Belästigungen für die Allgemeinheit und die Nachbarschaft hervorgerufen.

Desweiteren sieht das Gesetz eine Konzentrationswirkung vor. Dies bedeutet, dass mit der immissionsschutzrechtlichen Genehmigung andere Genehmigungen (bis auf wenige Ausnahmen) mit erteilt werden. Die Genehmigungsbehörde prüft und bewertet welche Fachbehörden im Genehmigungsverfahren zu beteiligen sind. Sie holt auch die Entscheidungen der Fachbehörden ein und führt durch das Genehmigungsverfahren.

Darüberhinaus ist auf die sogenannte „Drittsschutzwirkung“ hinzuweisen. Ein Beschwerdeführer muss sich mit der Genehmigungsbehörde auseinandersetzen und nicht mit dem Anlagenbetreiber. Die Behörde wird dann prüfen, ob der Betrieb unter Beachtung der Genehmigung und der Nebenbestimmungen ausgeführt wird. Ist dies der Fall muss ein Beschwerdeführer darlegen, dass der Grundsatz zum Beispiel des Nachbarschutzes nicht ausreichend geregelt ist und deshalb durch nachträgliche Anordnung ergänzt werden muss.

⁴ Vierte Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (Verordnung über genehmigungsbedürftige Anlagen – 4. BImSchV) in der Fassung der Bekanntmachung vom 14.03.1997 (BGBl. I S. 504), zuletzt geändert durch Gesetz vom 11.08.2009 (BGBl. I S. 2723)

⁵ Gesetz zur Förderung der Kreislaufwirtschaft und Sicherung der umweltverträglichen Beseitigung von Abfällen (Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz – KrW-/AbfG) vom 24.09.1994 (BGBl. I S. 2705), zuletzt geändert durch Gesetz vom 11.08.2009 (BGBl. I S. 2723)

Zusammenfassung und Bewertung der Modellanlagen

Die Errichtung der Modellanlage I ist grundsätzlich nach Baurecht genehmigungsfähig. D.h. es genügt ein Bauantrag bei der zuständigen Stelle einzureichen. Da tierische Nebenprodukte in Form von Gülle eingesetzt werden sollen, ist für den Betrieb dieser Anlagen zusätzlich eine Zulassung nach der EG-Verordnung Nr. 1774/2002 erforderlich.

Die Modellanlage II basiert auf den gleichen Inputstoffen, sie ist nur größer ausgelegt. Die Erzeugung von Biogas wird meistens mit einer Verbrennungsmotoranlage (Blockheizkraftwerk (BHKW)) zur Erzeugung von Strom gekoppelt. Verbrennungsmotoranlagen mit einer Feuerungswärmeleistung ab 1 Megawatt bedürfen einer immissionsschutzrechtlichen Genehmigung nach Ziffer 1.4 b) der 4. BImSchV. Entsprechendes gilt für eine Gasturbinenanlage zur Erzeugung von Strom. In vielen Fällen werden beide Anlagen (Biogasanlage + BHKW) als eine Einheit betrachtet und in einem Verfahren genehmigt.

Bei der Modellanlage III kommen zusätzlich Abfälle, für die Vorschriften des Abfallrechtes Anwendung finden, zum Einsatz. Da insgesamt die Durchsatzleistung (=Summe aller Stoffe, die in den Fermenter eingebracht werden) größer als 10 t/d beträgt, handelt es sich um eine immissionsschutzrechtlich genehmigungspflichtige Anlage nach der Ziffer 8.6 der 4. BImSchV. Die Durchsatzleistung liegt unterhalb einer Grenze von 50 t/d, so dass eine Genehmigung im vereinfachten Verfahren, also ohne Öffentlichkeitsbeteiligung, möglich ist.

Die Modellanlage IV c basiert auf anderen Inputstoffen als die Modellanlage III, die jedoch aus rechtlicher Sicht für die Genehmigung als vergleichbar einzuordnen sind. Neben tierischen Nebenprodukten, die nicht zum menschlichen Verzehr bestimmt sind, werden Bioabfälle eingesetzt. Da die Durchsatzleistung mehr als 50 t/d beträgt, ist ein Genehmigungsverfahren mit Öffentlichkeitsbeteiligung vorgeschrieben. Antrags- und Planunterlagen sind hierfür öffentlich auszulegen. Einwendungen, die form- und fristgerecht eingegangen sind, sind mit den Einwendungsführern zu erörtern.

Die Modellanlage V ist für ein Genehmigungsverfahren wie folgt zu bewerten. Die Liste der Inputstoffe lässt zunächst nicht erkennen, ob Stoffe eingesetzt werden sollen, auf die Vorschriften der Abfallrechtes Anwendung finden oder nicht. Nicht ausgeschlossen werden kann es für die angegebenen Getreidekörner; hier kommt es auf die Ausführung der

Antrags- und Betriebsbeschreibung an. Kommen Abfälle zum Einsatz handelt es sich um eine genehmigungspflichtige Anlage gemäß Ziffer 8.6 der 4. BImSchV. Anderenfalls kann eine immissionsschutzrechtliche Genehmigung über das BHKW begründet werden.

Modell		I	II	III	IV c	V
Beschreibung		75 kW; 30 % Gülle; 70 % NawaRo	350 kW; 30 % Gülle; 70 % NawaRo	500 kW; Gülle + Neben- produkte	500 kW; Bonusfreie Abfälle	(1000 kW) Gasein- speisung
Substrate						
Rindergülle	t FM/a	750	3000	3500	4000	
Schweinegülle	t FM/a			3500		
Maissilage	t FM/a	1250	5750			14000
Getreidekörner	t FM/a		200			500
Grassilage	t FM/a	200				
Getreide GPS	t FM/a					2500
Glycerin	t FM/a			1000		
Rapskuchen	t FM/a			1000		
Getreide- ausputz	t FM/a			620		
Speisereste	t FM/a				8000	
Fettabscheider- fett	t FM/a				4600	
Bioabfall	t FM/a				5500	
Genehmigung		Baurecht, Zulassung EG 1774/2002	Baurecht, Zulassung EG 1774/02, BImSchG für BHKW	Baurecht, Zulassung 1774/02, BImSchG (BHKW + Bioabfall)	Baurecht, Zulassung 1774/02, BImSchG (BHKW + Bioabfall)	Baurecht

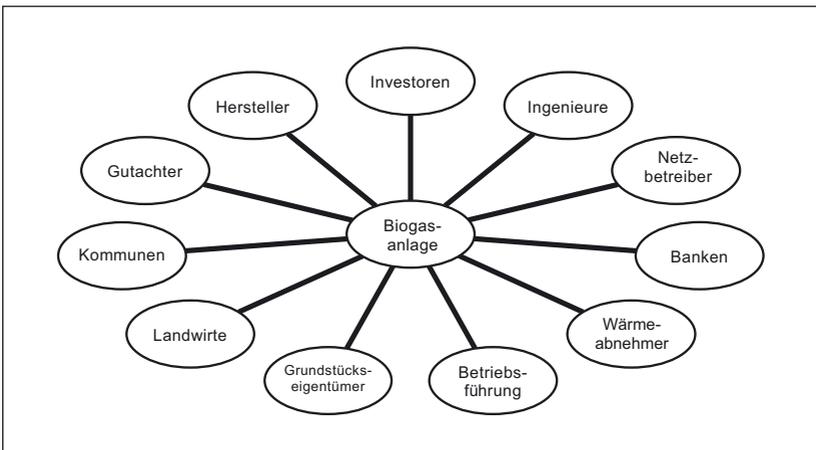
Anschrift des Autors:

*Hans-Walter Schneichel
Struktur- und Genehmigungsdirektion Nord
Stresemannstr. 3 – 5, 56068 Koblenz
E-Mail: hans-walter.schneichel@sgdnord.rlp.de*

Biogasanlagen – Analyse von Bau und Betrieb aus vertragsrechtlicher Sicht

Florian Valentin
Kanzlei Schnutenhaus & Kollegen

Sehr geehrte Damen und Herren,
beim Bau und Betrieb von Biogasanlagen schließt der Projektentwickler, der Errichter bzw. der Betreiber der Biogasanlage eine ganze Reihe von Verträgen ab. Er schließt Kaufverträge mit dem Hersteller der Biogasanlage, Finanzierungsverträge mit Banken und Investoren, Dienst- und Werkverträge mit Beratern und Ingenieuren, Netzanschlussverträge mit dem Stromnetzbetreiber, Wärmelieferverträge mit Wärmeabnehmer, Substratlieferverträge mit Landwirten, usw.



Ich möchte im Folgenden nach einleitenden Hinweisen zu Grundlagen der Vertragsgestaltung auf einige wesentliche Verträge rund um Biogasanlagen eingehen.

Grundlagen der Vertragsgestaltung

Bei nicht wenigen Verträgen stellt sich zu einem späteren Zeitpunkt heraus, dass diese nicht unter Berücksichtigung der erforderlichen Achtsamkeit abgeschlossen wurden. So werden vielfach gesetzliche Rechten und Pflichten nicht berücksichtigt oder Verträge vorschnell und ungeprüft unterzeichnet. Ferner werden Gestaltungsmöglichkeiten oft nicht ausgeschöpft, Verantwortungsbereiche nicht eindeutig definiert und wesentliche Regelungen weggelassen. Missverständliche oder unpräzise Formulierungen führen später ebenso oft zu Auslegungsdifferenzen wie unzureichende Anpassungsregelungen. Insbesondere bei langfristigen Lieferverträgen ist die Berücksichtigung der Entwicklung preisbildender Umstände durch entsprechende Preisanpassungsklauseln von grundlegender Bedeutung.

Flexible, individuell entworfene Bestimmungen können den besonderen Verhältnissen zwischen den Vertragspartnern Rechnung tragen. Sie sind nicht angepassten Musterverträgen, die für eine Vielzahl von Vertragsverhältnissen entworfenen werden, im Regelfall deutlich überlegen und führen nicht nur dazu, dass der wirtschaftliche Erfolg einer Vertragsbeziehung, sondern auch die Belastbarkeit des Vertragsverhältnisses verbessert wird. Musterverträge werden ohne Berücksichtigung der besonderen Interessen der Vertragspartner im Einzelfall erstellt und geben das zwischen den Parteien Gewollte oft nur sehr verzerrt wieder. Derselbe Vertrag kann bei einer Biogasanlage die Interessen der Vertragspartner optimal abbilden, bei einer anderen jedoch vollständig daran vorbeigehen. Soweit zur Vertragsgestaltung Vertragsformulare herangezogen werden, sollten diese unbedingt hinreichend an den Einzelfall angepasst werden.

Die wesentlichen Schritte zur Vertragsgestaltung

Vor einem Vertragsschluss ist zunächst die Interessenslage der beiden Vertragspartner zu analysieren. Wirtschaftliche und rechtliche Interessen sind dabei genauso zu berücksichtigen wie z. B. Interessen, die sich aus einer besonderen persönlichen Situation eines Vertragspartners ergeben.

Auf der Grundlage des Ergebnisses dieser Analyse ist in einem zweiten Schritt zu klären, welche Verträge überhaupt abzuschließen sind. In vielen Fällen gibt es unterschiedliche Gestaltungsmöglichkeiten für die vertraglichen Beziehungen zwischen den Partnern.

Anschließend sind die gesetzlichen Vorgaben zu identifizieren. Sie geben den Rahmen und Gestaltungsspielraum für die individuellen vertraglichen Bestimmungen zwischen den Vertragspartnern vor. Das Recht der allgemeinen Geschäftsbedingungen oder gesetzliche Verbote sind hier zu beachten. Viele Vereinbarungen rund um den Betrieb von Biogasanlagen werden durch das Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG) beeinflusst. Insbesondere müssen die Verträge sicherstellen, dass die Voraussetzungen der einzelnen Vergütungsbestandteile und Boni eingehalten werden und deren Nachweise erbracht werden können.

Haben die Vertragspartner im Wege von Verhandlungen ermittelt, welche Vereinbarungen zwischen ihnen inhaltlich getroffen werden sollen, so werden die Regelungen ausformuliert. Hierbei gilt der Grundsatz: „So viel wie nötig, so wenig wie möglich.“ Rein klarstellende Regelungen können die Vertragsanwendung erleichtern, sollten jedoch als solche gekennzeichnet werden.

Die sachkundige Prüfung und abschließende Gegenprüfung vertraglicher Regelungen vermeidet, dass zu einem späteren Zeitpunkt Vertragslücken oder missverständliche Formulierungen das Vertragsverhältnis belasten.

Einige Hinweise zu Rohbiogasliefverträgen

Ich möchte nun beispielhaft auf einige wichtige Verträge im Zusammenhang mit Biogasanlagen eingehen.

Ein zentraler Vertrag ist in vielen Fällen der Rohbiogasliefvertrag. Neben der Rohbiogasnutzung zur Verstromung des Rohbiogases in einem nahegelegenen BHKW kommt insbesondere die Nutzung von Rohbiogas zur Aufbereitung auf Erdgasqualität und Einspeisung in das Erdgasnetz in Betracht. In beiden Fällen stellt der langfristig abgeschlossene Rohbiogasliefvertrag einen entscheidenden Faktor für den wirtschaftlichen Erfolg des Biogasanlagenbetriebs dar.

Rohbiogasliefverträge werden individuell auf die bestimmte Interessenlage der beiden Vertragspartner zugeschnitten. Wichtig ist dabei zunächst, dass der Zweck der Rohbiogasliefung im Vertrag genannt wird. Eine präzise Bestimmung der Liefer- und Abnahmemengen sowie der Rechtsfolgen bei Minderlieferung oder -abnahme sowie bei Schlechtlieferung führt zur Vermeidung späterer Diskussionen über die Pflichten der

Vertragspartner. Durch einen Lieferplan, die Vereinbarung von Lieferkorridoren oder bestimmte Mitteilungsmodelle kann eine flexible Gestaltung gewählt werden.

Regelungen zum Übergabepunkt, zu den Modalitäten der Messung und Abrechnung, zur Festlegung der Rohbiogasqualität und den Einsatzstoffen und zu den Nachweispflichten des Lieferanten dürfen in einem Liefervertrag nicht fehlen. Erhebliche Gestaltungsspielräume bestehen bei den Preis- und Preisanpassungsbestimmungen. Mit Fixbestandteilen und Anpassungsfaktoren an bestimmte Preisindices wird munter jongliert. Ein Standardvorgehen gibt es insoweit nicht. Bei der Ausgestaltung der Haftungsregelungen sind mögliche Schadensfälle durchzuspielen und Verantwortlichkeiten zu bestimmen.

Statt starren Alles-oder-Nichts-Regelungen können z. B. bei einer Abweichung des Methangehaltes vom Optimalwert oder geringen Schadstoffwerten, die zwar nicht erwünscht sind, aber gleichzeitig die Nutzung des Rohbiogases nicht vereiteln, stufenweise Preisabschläge vereinbart werden. Eine besondere Herausforderung ist derzeit die Einbeziehung der Möglichkeit des Einsatzes von rein pflanzlichen Nebenprodukten nach der Positivliste des EEG 2009 in NawaRo-Gas-Lieferverträge.

Wärmelieferverträge

Mit der Änderung der Anforderungen des EEG an die Wärmenutzung im Hinblick auf den KWK-Bonus hat das Wärmenutzungskonzept von Biogasanlagen erheblich an Bedeutung gewonnen. Nur bei einem relevanten – und ökologisch sinnvollen – Wärmeabsatz sind Biogasanlagen wirtschaftlich tragfähig. Dementsprechend wichtig ist die Gestaltung der Wärmelieferverträge, sofern die Wärme nicht selbst genutzt werden kann.

Wiederum ist der Zweck der Lieferung für die Vertragsgestaltung entscheidend. Es bestehen gravierende Unterschiede zwischen einer Wärmelieferung z. B. zur Versorgung eines Wohnhauses und z. B. zur Versorgung einer Biogasaufbereitungsanlage. Eine präzise Bestimmung der Wärmemengen bzw. der Liefer- und Abnahmepflichten sowie der Rechtsfolgen bei Pflichtverletzungen schafft für beide Vertragspartner Klarheit. Hierbei ist aus Lieferantensicht zu berücksichtigen, dass der Wärmeabsatz nicht nur im Hinblick auf die Wärmeerlöse sondern insbesondere für den KWK-Bonus maßgeblich ist. Die Art der Wärmenutzung

sollte daher unbedingt vertraglich fixiert werden. Die Eigenschaften des Wärmeträgers, Vor- und Rücklauftemperatur, Übergabepunkt sowie die Abgrenzung der Verantwortlichkeit für die Wärmeleitungen und das Eigentum an diesen sind wiederum so präzise wie möglich zu definieren, um späteren Diskussionen vorzubeugen.

Bei den Preis- und Preisanpassungsbestimmungen besteht auch bei Wärmelieferverträgen ein nicht unerheblicher Gestaltungsspielraum. Im jedem Einzelfall ist zu prüfen, ob und in welchem Umfang die Regelungen der AVBFernwärmeV zu berücksichtigen sind.

Biomasselieferverträge

Eine langfristige Substratversorgung ist für den Anlagenbetrieb von herausragender Bedeutung. Auch bei Substratlieferverträgen gilt, dass diese aufgrund der großen wirtschaftlichen Bedeutung und der Komplexität der spezifischen Biogasanlage mit besonderer Sorgfalt individuell ausgestaltet werden sollten. Der ungeprüfte Rückgriff auf kursierende Musterverträge oder Verträge des Nachbarn schafft oft mehr Probleme als Freude und Rechtssicherheit.

Regelungen über Anbau- und Lieferpflichten, die Konkretisierung der zu liefernden Biomasse, Bestimmungen zur Gärrestrücknahme und zur Qualitätssicherung, zur Silierung, Verwiegung und den Rechtsfolgen bei Leistungsstörungen sind wiederum präzise zu formulieren.

Flexible Lösungen bieten sich bei Mengen, Anbauflächen, Preisen und Preisanpassungsbestimmungen an. Das Interesse des Substratlieferanten an einer garantierten Vergütung und das Interesse des Biogasanlagenbetreibers an Flexibilität im Hinblick auf Fruchtwahl, Anbauflächen und Liefermengen sind gegeneinander auszutarieren. Wie bei allen langfristigen Lieferverträgen gilt auch hier, dass letztendlich nur eine ausgewogene Vertragsgestaltung zu einer langfristig zufriedenstellenden Vertragserfüllung durch beide Parteien führen kann.

Die Gärrestrücknahme sollte als eigener Abschnitt in den Substratlieferverträgen geregelt werden. Die Berechnung der zurückzunehmenden Menge (Bestimmung des Fugatfaktors) und die Frage der Aufwertung des Gärsubstrates durch die Beimischung von Stoffen stellen insoweit die meist diskutierten Punkte dar.

Durch individuelle Regelungen kann z. B. auch vereinbart werden, dass

im Fall einer Unwirtschaftlichkeit des Anbaus einer bestimmten Frucht ein Anpassungsrecht des Lieferanten besteht. Dieses kann mit einem Sonderkündigungsrecht des Abnehmers im Hinblick auf diese Frucht kombiniert werden, wenn der Abnehmer die Preisanpassung nicht gewähren kann, ohne seinerseits in Schwierigkeiten zu kommen.

Verträge bei Gaseinspeiseprojekten

Von erheblichem Umfang in unserer täglichen Beratungspraxis sind Gaseinspeiseprojekte. Allein bis 2020 sollen die Einspeisekapazitäten in Deutschland auf 6 Milliarden m³ anwachsen. Das sieht zumindest die Bundesregierung in der Gasnetzzugangsverordnung vor.

Die Schnittstellen werden bei den Gaseinspeiseprojekten unterschiedlich gewählt. Während einige Landwirte selbst die Substrat- und Biogaserzeugung, -aufbereitung und -einspeisung übernehmen, wird vielfach Rohbiogas an einen Projektpartner geliefert, der die Aufbereitung, Einspeisung und Vermarktung des Biomethans durchführt. In beiden Gestaltungen stellen die Verträge zwischen den Beteiligten die rechtlichen Standpfeiler und wirtschaftlichen Faktoren der Projekte dar.

Bedeutsam sind bei der Biomethaneinspeisung in der Regel neben dem Einspeisevertrag, dem Ausspeisevertrag sowie den Netzanschlussverträgen und Anschlussnutzungsverträgen des Einspeisers und des Ausspeisers mit dem Netzbetreiber insbesondere der Biomethanliefervertrag zwischen dem Biogaseinspeiser bzw. Biomethanlieferanten und dem Ausspeiser und Nutzer des Biomethans, vielfach einer oder mehrere BHKW-Betreiber.

Gasnetzanschlussverträge

Kontrovers gestalten sich derzeit die Verhandlungen von Gasnetzanschlussverträgen zwischen Biogaseinspeisern und Gasnetzbetreibern. Zwar sind die Regelungen zum Ablauf des Gasnetzanschlusses und zur Qualität des einzuspeisenden Biomethans in den §§ 41b) ff. der Gasnetzzugangsverordnung dem Grunde nach festgelegt. Die Umsetzung dieser jungen Regelungen gestaltet sich vielfach jedoch schwierig.

Zum Gasnetzanschluss gehören nach der Gasnetzzugangsverordnung

zunächst die Verbindungsleitung, die die Biogasaufbereitungsanlage mit dem bestehenden Gasversorgungsnetz verbindet, ferner die Verknüpfung mit dem Anschlusspunkt des bestehenden Gasversorgungsnetzes, die Gasdruck-Regel-Messanlage sowie die Einrichtungen zur Druckerhöhung und die eichfähige Messung des einzuspeisenden Biogases. Gleichwohl ergeben sich auch aus einer scheinbar so präzisen Definition Streitpunkte, wenn teure Bestandteile einer Gaseinspeisestation mehreren Zwecken dienen oder z. B. redundante Einrichtungen zwischen den Vertragspartnern umstritten sind. Durch Bestimmungen in den Netzanschlussverträgen versuchen Netzbetreiber zudem bestimmte Kosten oder Kostenrisiken auf den Einspeiser abzuwälzen.

Abweichend von den Regelungen des EEG zum Stromnetzanschluss werden die Kosten für den Gasnetzanschluss grundsätzlich zwischen dem Anschlussnehmer und dem Netzbetreiber hälftig geteilt. Auch aus diesem Grund ist von besonderer Bedeutung, welche Anlagenteile unter die Definition des Netzanschlusses fallen und welche letztendlich der Gasnetzbetreiber oder der Einspeiser alleine zu tragen haben.

Im Hinblick auf die Gasqualität, die von den Gasnetzbetreibern gefordert wird, ergeben sich aus der Verweisung der Gasnetzzugangsverordnung auf die DVGW-Arbeitsblätter 260 und 262 erhebliche Unschärfen. So ist noch immer nicht geklärt, ob der Einspeiser stets dazu verpflichtet ist, die Qualität des Gases im Netz zu erreichen, bzw. zumindest dem Netzbetreiber zu ermöglichen, mittels der Zumischung von LPG diese Werte zu erreichen. Auch bestehen Differenzen im Hinblick auf den Trocknungsgehalt des Gases und bestimmte Fremdstoffe im Biogas, wie z. B. Silizium, Pilze oder Sporen.

Vielfach gehen die Anforderungen der Netzbetreiber über die Vorgaben der Gasnetzzugangsverordnung zur Gasqualität hinaus. Die Vertragsverhandlungen mit den Gasnetzbetreibern können sich mitunter schwierig gestalten. Aus einer gesicherten Verhandlungsposition heraus sind diese oft kaum zu Zugeständnissen oder Änderungen der von ihnen vorgegebenen Vertragsformulare bereit. Auch insoweit gibt es indessen erhebliche Unterschiede. Die Verhandlungen sollten künftig leichter werden, sobald alle Beteiligten größere Erfahrungen mit Biogaseinspeiseverträgen vorweisen können.

Biomethanlieferverträge

Ebenso wie bei Rohbiogaslieferverträgen sind bei Biomethanlieferverträgen präzise Bestimmungen des Übergabepunktes, der Liefermengen, der Qualität und Einsatzstoffe (NawaRo-Gas oder Nicht-NawaRo-Gas, pflanzliche Nebenprodukte, etc.) bedeutsam.

Der Biomethanliefervertrag muss nicht der Nutzung des Gases in einem BHKW dienen. Es kommen auch die Vertriebswege der Kraftstoffbeimischung oder der anteiligen Lieferung an Gaskunden in Betracht. Im Hinblick auf die Bestimmung der Preise ist auch für den Lieferanten von Bedeutung, in welcher Weise der Abnehmer das Biomethan nutzen wird.

Bei den Preisanpassungsklauseln zeichnet sich auch hier derzeit keine grundlegende Richtung ab. Die Koppelung an einen Biomethanmarktpreis scheitert daran, dass ein solcher derzeit nicht existiert und wohl auch auf absehbare Zeit noch nicht existieren wird. Dementsprechend entwickeln die Vertragspartner jeweils individuelle Lösungen.

Der Nachweis der Eigenschaften des Biomethans gegenüber dem Stromnetzbetreiber spielt in Biomethanlieferverträgen eine besondere Rolle. Neben dem Einsatzstofftagebuch und den nach dem EEG erforderlichen Umweltgutachten sowie der Nachweis über die Voraussetzungen des Technologiebonus in Bezug auf die Gasaufbereitungsanlage können z. B. die Nutzung eines Biomethanregisters oder bestimmter Zertifikate eine Rolle spielen.

Sehr geehrte Damen und Herren, verwenden Sie ausreichend Zeit auf die Gestaltung der erforderlichen Verträge. Dies wird Ihnen zukünftig Geld und Ärger sparen! Ich danke Ihnen für Ihre Aufmerksamkeit.

Literatur

- Dr. Florian Valentin, Chancen und Risiken bei der Gestaltung von Rohbiogaslieferverträgen, Erneuerbare Energien 6/2009, S. 82 – 84
- Hartwig von Bredow und Dominik Müller, LL.M., Wärmelieferung – Grundlagen der Vertragsgestaltung, BIOGAS Journal, Sonderheft Grüne Wärme, 01/09, S. 28 – 30
- Hartwig von Bredow, Vertragliche Grundlagen der Wärmelieferung, BIOGAS Journal, 2/08, S. 84
- Hartwig von Bredow, Wärme-Contracting mit Biogas: Rechtsrahmen eines Zukunftsmodells, Contracting und Recht (CuR), 2/2008, S. 45 – 53
- Dr. Florian Valentin, Der Anschluss auf Netzanschluss und Erweiterung der Netzkapazität nach dem EEG 2009, Energiewirtschaftliche Tagesfragen (et) 8/2009, S. 68 – 72

- Dr. Florian Valentin und Aline Krüger, Neue Impulse für den Bau von Wärmenetzen, Energiewirtschaftliche Tagesfragen (et) 6/2009, S. 63 – 68
- Dr. Helmut Loibl, Dr. Martin Maslaton, Hartwig von Bredow (Hrsg.), Biogasanlagen im EEG 2009, Erich Schmidt Verlag, Berlin, 2009.

Anschrift des Autors:

*Dr. Florian Valentin
Kanzlei Schnutenhaus & Kollegen
Rechtsanwälte
Reinhardtstr. 29 B, 10117 Berlin
E-Mail: info@schnutenhaus-kollegen.de*

Biogasanlagen – Analyse von Bau und Betrieb aus vergütungsrechtlicher Sicht

Helmut Loibl

Kanzlei Paluka Sobola & Partner

Die vergütungsrechtlichen Auswirkungen des EEG 2009 sollen nachfolgend anhand einzelner Modellanlagen untersucht werden. Hierbei wird für jede einzelne Modellanlage eine Vergütungsberechnung durchgeführt, im Anschluss hieran wird eine Durchschnittsvergütung für die betreffenden Anlagen im Kalenderjahr ermittelt, damit die einzelnen Modellanlagen miteinander verglichen werden können. Außer Betracht bleibt hierbei jeweils der KWK-Bonus, da dieser jeweils von der konkreten Art der Wärmenutzung abhängt. Ebenso wird der Luftreinhaltungsbonus nicht berücksichtigt, da dieser vom BHKW abhängt und unabhängig von den Inputstoffen beansprucht werden kann.

(Hinweis: Grundsätzliche Ausführungen zu den Vergütungsregelungen des EEG 2009 für Biogasanlagen finden sich im KTBL-Tagungsband „Die Landwirtschaft als Energieerzeuger“ (KTBL-Tagung vom 04./05.05.2009 in Osnabrück) auf Seite 254 ff. Der nachfolgende Beitrag baut auf den dortigen grundsätzlichen Erwägungen auf)

Modellanlagen

Untersucht werden im Einzelnen Modellanlagen mit unterschiedlicher Leistung und unterschiedlichen Einsatzstoffen. Insbesondere werden kleinere und größere NawaRo-Gülle-Biogasanlagen verglichen mit Kofermentationsanlagen, Anlagen, die pflanzliche Nebenprodukte einsetzen, Gaseinspeiseanlagen und schließlich Anlagen mit Satelliten-BHKWs. Hierbei wird jeweils von der tatsächlichen Leistung und nicht von der installierten Leistung ausgegangen. Die tatsächliche Leistung einer Biogas-

anlage errechnet sich, in dem man die tatsächlich eingespeisten Kilowattstunden eines Kalenderjahres durch die Gesamtstunden eines Jahres (8.760 Stunden) teilt.

a) 75 kW-Gülle-NawaRo-Anlage

Eine 75 kW-Anlage mit Inbetriebnahmejahr 2009 bleibt durchgängig in der „günstigsten“ Vergütungsschwelle und erhält somit 11,67 Cent pro kWh Grundvergütung, 4 Cent Güllebonus und 7 Cent NawaRo-Bonus. Die Vergütung beträgt damit insgesamt 148.941,90 € netto zzgl. Umsatzsteuer (exklusiv KWK-Bonus). Dies errechnet sich im Einzelnen wie folgt:

■ 75 kW x 8.760 Jahresstunden x 11,67 Cent:	76.671,90 €
■ Güllebonus: 75 kW x 8.760 Jahresstunden x 4 Cent:	26.280,00 €
■ NawaRo-Bonus: 75 kW x 8.760 Jahresstunden x 7 Cent:	45.990,00 €
■ Gesamt:	148.941,90 €

Damit erhält im Ergebnis eine Gülle-NawaRo-Biogasanlage mit einer tatsächlichen Anlagenleistung von 75 kW im Durchschnitt 22,67 Cent pro eingespeister kWh.

b) 350 kW-Gülle-NawaRo-Anlage

Die im Jahr 2009 in Betrieb genommene Gülle-NawaRo-Anlage mit 350 kW tatsächlicher Leistung erhält nur bis zur ersten Vergütungsschwelle von 150 kW 11,67 Cent pro kWh an Grundvergütung, für die Leistung zwischen 150 kW und 500 kW beträgt die Grundvergütung lediglich 9,18 Cent pro kWh. Der Güllebonus sinkt ab 150 kW von 4 Cent auf 1 Cent ab. Demgegenüber bleibt der NawaRo-Bonus bis 500 kW bei 7 Cent pro kWh, so dass dieser vollumfänglich bis zur Gesamtleistung von 350 kW beansprucht werden kann.

■ 150 kW x 8.760 Jahresstunden x 11,67 Cent:	153.343,80 €
■ 200 kW x 8760 Jahresstunden x 9,18 Cent:	160.833,60 €
■ Güllebonus: 150 kW x 8760 Jahresstunden x 4 Cent:	52.560,00 €
■ Güllebonus: 200 kW x 8760 Jahresstunden x 1 Cent:	17.520,00 €
■ NawaRo-Bonus: 350 kW x 8760 Jahresstunden x 7 Cent:	214.620,00 €
■ Gesamt:	598.877,40 €

Insgesamt erhält die Anlage 598.877,40 € netto. Im Durchschnitt ergibt dies pro eingespeister kWh einen Betrag in Höhe von 19,53 Cent (ohne KWK-Bonus).

c) 500 kW-Gülle-Anlage für pflanzliche Nebenprodukte

Bei einer Biogasanlage, die im Jahr 2009 in Betrieb genommen wird und die ihre tatsächliche Leistung von 500 kW aus 30 Masseprozent Gülle und ansonsten ausschließlich aus rein pflanzlichen Nebenprodukten im Sinne der Nebenproduktliste der Anlage 2 zum EEG 2009 gewinnt, ist folgende Besonderheit zu berücksichtigen: Biogasanlagen, die entsprechenden rein pflanzlichen Nebenprodukte im Sinne der Nebenproduktliste einsetzen, erhalten grundsätzlich die gesamte EEG-Vergütung, bezüglich des NawaRo-Bonus wird jedoch der jeweilige Standardbiogasertrag für die eingesetzten Nebenprodukte, der in der Nebenproduktliste festgesetzt ist, abgezogen. Hier zeigt sich das Problem, dass der Güllebonus keine eigenständige Zusatzvergütung ist, sondern Teil des NawaRo-Bonus: Nach Ziffer VI. 2 b) der Anlage 2 zum EEG „erhöht“ sich im Falle des Gülleinsatzes der NawaRo-Bonus um 4 bzw. 1 Cent pro kWh. Das bedeutet allerdings im Ergebnis, dass für den Anteil, zum dem rein pflanzliche Nebenprodukte eingesetzt werden, nicht nur kein NawaRo-Bonus, sondern eben auch kein Güllebonus beansprucht werden kann.

Gleichwohl entfällt im vorliegenden Fall der NawaRo- und Güllebonus nicht komplett, da im Ergebnis ja 30 Masseprozent Gülle eingebracht werden. Für diesen Anteil fällt der NawaRo-Bonus an, insoweit also auch der Güllebonus. Praktisch bedeutet ein Gülleinsatz von 30 % allerdings im Regelfall lediglich einen Gasertrag von unter 10 %, so dass – je nach eingesetzten Einsatzstoffen – der Güllebonus, sowie der NawaRo-Bonus lediglich zu einem sehr untergeordneten Anteil gewährt werden wird. Geht man in einem Berechnungsbeispiel davon aus, dass beides letztlich nur für 50 kW der Fall ist, errechnet sich folgende Vergütung für diese Anlage:

■ Grundvergütung für 500 kW:	434.802,60 €
■ NawaRo-Bonus (50 kW):	30.660,00 €
■ Güllebonus:	17.520,00 €
■ Gesamt:	482.982,60 €

Damit erhält im Ergebnis die 500 kW-Gülleanlage für pflanzliche Nebenprodukte durchschnittlich einen Vergütungssatz von etwa 11,02 Cent pro kWh.

d) 500 kW-Gülle-NawaRo-Anlage

Im Vergleich zur vorgenannten Fallgestaltung wird hier für die vollen 500 kW 7 Cent NawaRo-Bonus, sowie der komplette Güllebonus in Ansatz gebracht, so dass die Gesamtvergütung auf 824.622,60 € netto ansteigt.

■ 150 kW x 8760 Jahresstunden x 11,67 Cent:	153.343,80 €
■ 350 kW x 8760 Jahresstunden x 9,18 Cent:	281.458,80 €
■ Güllebonus: 150 kW x 8760 Jahresstunden x 4 Cent:	52.560,00 €
■ Güllebonus: 350 kW x 8760 Jahresstunden x 1 Cent:	30.660,00 €
■ NawaRo-Bonus: 500 kW x 8760 Jahresstunden x 7 Cent:	306.600,00 €
■ Gesamt:	824.622,60 €

Im Durchschnitt erhält die Anlage damit 18,82 Cent pro eingespeister kWh.

e) 500-Kofermentationsanlage

Diese Anlage erhält im Ergebnis lediglich die Grundvergütung in Höhe von 434.802,60 € netto. Dies ergibt einen durchschnittlichen Vergütungssatz in Höhe von 9,9 Cent pro eingespeister kWh.

f) 1000 kW-NawaRo-Anlage mit Gaseinspeisung

Sofern eine Biogaserzeugungsanlage, die im Jahr 2009 in Betrieb genommen wird, das Biogas auf Erdgasqualität aufbereitet und entsprechend den Vorgaben des EEG in das allgemeine Gasnetz einspeist und an anderer Stelle dieses Gas mit einer tatsächlichen Leistung von 1 MW verstromt wird, wird hierfür vollumfänglich die Grundvergütung fällig. Hierbei ist zu beachten, dass ab einer Leistung von 500 kW der Vergütungssatz auf lediglich 8,25 Cent pro kWh absinkt. Der Güllebonus entfällt aufgrund der ausdrücklichen gesetzlichen Regelung in Nummer VI. 2 b der Anlage 2 zum EEG im Falle der Gaseinspeisung. Der NawaRo-Bonus sinkt ab 500 kW auf nur 4 Cent pro kWh ab. Hinzu kommt jedoch der Technologiebonus in Höhe von 2 Cent pro kWh für die Aufbereitung auf Erdgasqualität und Einspeisung in das allgemeine Gasnetz.

■ 150 kW x 8760 Jahresstunden x 11,67 Cent:	153.343,80 €
■ 350 kW x 8760 Jahresstunden x 9,18 Cent:	281.458,80 €
■ 500 kW x 8760 Jahresstunden x 8,25 Cent:	361.350,00 €
■ Güllebonus:	0,00 €
■ NawaRo-Bonus:	
500 kW x 8760 Jahresstunden x 7 Cent:	306.600,00 €
■ NawaRo-Bonus:	
500 kW x 8760 Jahresstunden x 4 Cent:	175.200,00 €
■ Technologiebonus:	
1000 kW x 8760 Jahresstunden x 2 Cent:	175.200,00 €
■ Gesamt:	1.453.152,60 €

Damit rechnet sich eine Gesamtvergütung für diese Anlage in Höhe von 1.463.152,60 € netto. Im Durchschnitt ergibt dies einen Vergütungssatz in Höhe von 16,58 Cent pro kWh.

g) 2 x 500 kW-NawaRo-Anlage mit Gaseinspeisung

Sofern im vorgenannten Fall die Gasentnahme aus dem allgemeinen Gasnetz nicht an einer Stelle erfolgt, sondern an zwei weit entfernt voneinander gelegenen Stellen (im Hinblick auf die Anlagenzusammenfassung für die Vergütungsberechnung nach § 19 EEG) und eine Verstromung von 2 mal 500 kW erfolgt, würden beide Anlagen zusammen eine Nettovergütung in Höhe von 1.658.005,20 € erhalten.

jeweils:

■ 150 kW x 8760 Jahresstunden x 11,67 Cent:	153.343,80 €
■ 350 kW x 8760 Jahresstunden x 9,18 Cent:	281.458,80 €
■ NawaRo-Bonus:	
500 kW x 8760 Jahresstunden x 7 Cent:	306.600,00 €
■ Technologiebonus:	
500 kW x 8760 Jahresstunden x 2 Cent:	87.600,00 €
■ Gesamt: 2 x 829.002,60 €:	1.658.005,20 €

Im Durchschnitt wären diese 18,92 Cent pro kWh.

h) Satelliten-BHKW

Betrachtet man die vorgenannte 350 kW-Gülle-NawaRo-Biogasanlage und ändert diese dergestalt ab, dass bei der Biogasanlage selbst 200 kW tatsächliche Stromeinspeisung erfolgen und weitere 150 kW über ein weit entfernt liegendes Satelliten-BHKW installiert werden, würde sich – unterstellt, das Satelliten-BHKW wird als eigenständige Anlage anerkannt – folgende Vergütung errechnen:

Die 200 kW-Anlage erhält Grundvergütung, Güllebonus und NawaRo-Bonus, hierfür fällt ein Betrag in Höhe von 373.132,20 € netto an. Das Satelliten-BHKW erhält – sofern es als eigenständige Anlage im Sinne des EEG anerkannt wird – ebenfalls Grundvergütung, Güllebonus und NawaRo-Bonus. Zu beachten ist, dass – sofern der Satellit eine eigenständige Anlage darstellt – der Güllebonus wieder mit 4 Cent pro kWh zu Buche schlägt. Der Satellit erhält demnach eine Nettovergütung in Höhe von 297.883,80 €. Insgesamt erhalten die beiden Anlagen zusammen damit 671.016,00 €, im Durchschnitt ergibt dies 21,88 Cent pro eingespeister kWh.

■ Hauptanlage:		
150 kW x 8760 Jahresstunden x 11,67 Cent:		153.343,80 €
50 kW x 8760 Jahresstunden x 9,18 Cent:		40.208,40 €
■ Satellit:		
150 kW x 8760 Jahresstunden x 11,67 Cent:		153.343,80 €
■ Güllebonus Hauptanlage:		
150 kW x 8760 Jahresstunden x 4 Cent:		52.560,00 €
50 kW x 8760 Jahresstunden x 1 Cent:		4.380,00 €
■ Güllebonus Satellit:		
150 kW x 8760 Jahresstunden x 4 Cent:		52.560,00 €
■ NawaRo-Bonus Hauptanlage:		
200 kW x 8760 Jahresstunden x 7 Cent:		122.640,00 €
■ NawaRo-Bonus Satellit:		
150 kW x 8760 Jahresstunden x 7 Cent:		91.980,00 €
■ Summe Hauptanlage:		373.132,20 €
■ Summe Satellit:		297.883,80 €
■ Gesamt:		671.016,00 €

Voraussetzung hierfür ist jedoch, dass das Satelliten-BHKW als eigenständige Biogasanlage anerkannt wird. Hierfür wird zum einen ein gewisser räumlicher Abstand notwendig sein, im Regelfall dürften hier 500 m ausreichend sein. Sofern zusätzlich ein sinnvolles Wärmekonzept vorliegt, d. h., die Versetzung eines Satelliten-BHKWs über eine Gasleitung erfolgt in sinnvoller Weise direkt zu einem Wärmeabnehmer und ist ökonomisch wie ökologisch sinnvoller als die Verlegung einer Fernwärmeleitung, wird nach aktuellem Sachstand das Satelliten-BHKW in der Regel von den Netzbetreibern als eigenständig anerkannt. Erforderlich ist hierfür grundsätzlich jedoch die Vorlage eines entsprechenden Rechtsgutachtens. Insoweit ist darauf hinzuweisen, dass derzeit insbesondere umstritten ist, ob ein Satelliten-BHKW den Güllebonus beanspruchen kann. Insoweit läuft derzeit ein entsprechendes Verfahren vor der EEG-Clearingstelle.

Zusammenfassung

Zusammenfassend ist festzuhalten, dass allein im Hinblick auf den durchschnittlichen Vergütungssatz die 75 kW-Gülle-NawaRo-Anlage mit 22,67 Cent pro kWh am besten abschneidet. An „Platz 2“ ist die 200 kW-

NawaRo-Gülle-Anlage mit 150 kW Satelliten-Aggregat, zusammen kann hier eine Durchschnittsvergütung von 21,88 Cent pro kWh erzielt werden. Die 350 kW-Gülle-NawaRo-Anlage landet mit 19,53 Cent pro kWh auf Platz 3. Die gaseinspeisende NawaRo-Anlage mit zwei mal 500 kW Verstromungseinheiten erhalten im Durchschnitt 18,92 Cent pro kWh, während die 500 kW-Gülle-NawaRo-Anlage 18,82 Cent pro kWh erzielen kann. Die 1 MW-NawaRo-Anlage mit Gaseinspeisung erhält hingegen nur 18,58 Cent pro kWh. Eine 500 kW-Gülle-Anlage, die im Übrigen ausschließlich pflanzliche Nebenprodukte einsetzt, liegt bei nur ca. 11,02 Cent pro kWh Durchschnittsvergütung. Die 500 kW-Kofermentationsanlage erhält durchschnittlich lediglich 9,90 Cent pro kWh.

Zu betonen ist hierbei, dass vorliegend nur die Einnahmenseite dargestellt ist. Zu beachten sind bei einer wirtschaftlichen Betrachtung darüber hinaus selbstverständlich insbesondere die Investitionskosten, die laufenden Kosten und – dies wird häufig unterschätzt – der tatsächlich notwendige Arbeitseinsatz, der im Regelfall pro eingespeister kWh weniger wird, je mehr tatsächliche Leistung produziert wird.

Anschrift des Autors:

*Dr. Helmut Loibl
Kanzlei Paluka Sobola & Partner
Rechtsanwälte
Neupfarrplatz 10, 93047 Regensburg
E-Mail: loibl@paluka.de*

6.

Aufbereitung und Nutzung von Gärresten

Verfahren und Kosten der Gärrestaufbereitung

Sebastian Wulf, Helmut Döhler

Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V. (KTBL)

Die Anzahl und Größe von Biogasanlagen nimmt in der Bundesrepublik Deutschland stark zu. Hinzu kommt eine Intensivierung der Tierhaltung, die auch in Regionen mit bereits hoher Viehdichte stattfindet. Dies führt zu einem regional hohen Anfall an Wirtschaftsdüngern, so dass Gärrückstände häufig vor Ort nicht mehr sinnvoll als Dünger genutzt werden können. Diese Dünger bergen nicht nur ein hohes Nährstoffpotential, sondern können auch natürliche Stoffkreisläufe überlasten, wenn sie nicht sachgemäß verwendet werden. Um dieses Nährstoffpotential effektiv zu nutzen, kann es notwendig und nützlich sein, die Nährstoffe aufzukonzentrieren, um ein transportwürdiges Düngemittel zu erhalten, welches in Regionen ohne Nährstoffüberschüsse eingesetzt werden kann.

Im Folgenden wird der aktuelle Stand der Technologien und Verfahren zur Nährstoffabtrennung aus Gärrückständen beschrieben. Der Grad der möglichen Nährstoffkonzentration sowie die Kosten und die Funktionalität der Verfahren werden erfasst und die Verfahren bewertet. Durch einen Vergleich der Verfahren mit aktuellen Kosten der Gärrestverwertung wird die Praxistauglichkeit der Verfahren betrachtet.

Aufbereitungstechniken

Die einfachste Art der Verwertung von Gärresten ist deren Ausbringung zur Düngung landwirtschaftlicher Flächen ohne vorangegangene Aufbereitung. In immer mehr Regionen ist eine solche Verwertung betriebsnah nicht oder nur in eingeschränktem Maße möglich. Hohe Pachtpreise für geeignete Flächen oder weite Transportstrecken und somit hohe Transportkosten können eine wirtschaftlich sinnvolle Verwertung erschweren. Zur

Erhöhung der Transportwürdigkeit der Gärreste werden verschiedene Verfahren verwendet bzw. entwickelt, die auf physikalischen, chemischen oder biologischen Prozessen beruhen können (Abbildung 1). Je nach dem Grad der Aufbereitung unterscheidet man diese Verfahren in:

- **Teilaufbereitung:** Feststoffe werden abgetrennt und eine nährstoff-reduzierte Flüssigphase erzeugt, die innerbetrieblich verwertet wird.
- **Vollaufbereitung:** Feststoffe werden abgetrennt und ein nährstoff-reiches Konzentrat hergestellt. Die Flüssigphase wird bis auf Einleiterqualität gereinigt.

Die Vollaufbereitung von Gärresten ist prinzipiell mit allen Methoden der Abwasseraufbereitung möglich, obwohl diese Verfahren auf geringere C-Frachten ausgelegt sind. Durch den C-Abbau während der Vergärung ist die Aufbereitung von Gärresten im Vergleich zur Aufbereitung von Gülle jedoch weniger problematisch.

Da eine effektive Kreislaufführung von Nährstoffen Ziel der Gärrest-aufbereitung sein sollte, werden hier keine Verfahren betrachtet, die zu einer Elimination oder irreversiblen Festlegung von Nährstoffe führen.

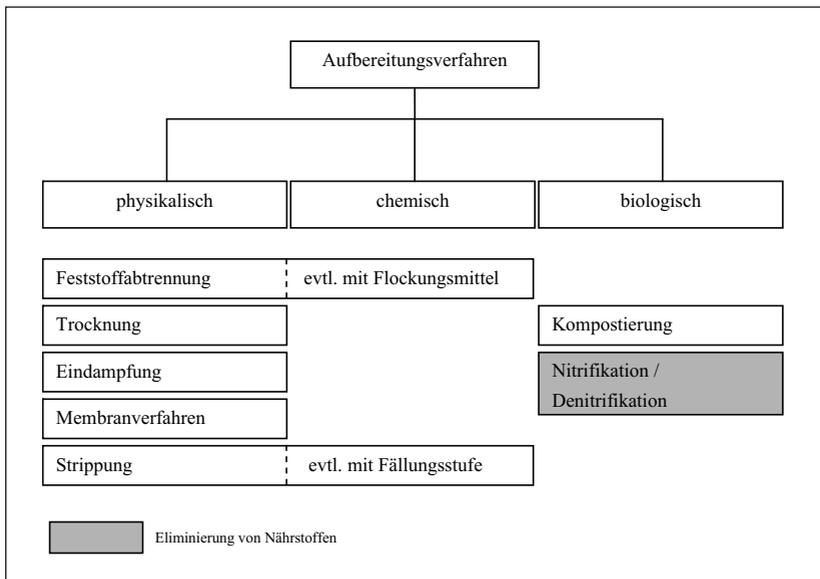


Abb. 1: Einteilung der Aufbereitungsverfahren nach prinzipiellen Verfahrensabläufen

Gärrestverwertung ohne Aufbereitung (Lagerung des unbehandelten Gärrests und Ausbringung)

Im Sinne einer Kreislaufführung von Nährstoffen ist die Ausbringung von Gärresten auf den Anbauflächen der zur Vergärung eingesetzten nachwachsenden Rohstoffe wünschenswert. Im Regelfall liegen diese Flächen in unmittelbarer Nähe der Biogasanlage, so dass die entstehenden Transportwege gering sind und sowohl Transport als auch Ausbringung mit demselben Fahrzeug ohne Umladen (einphasig) kostengünstig durchgeführt werden können. Bei Transportentfernungen ab etwa 5 km werden Transport und Ausbringung mit getrennter Mechanisierung durchgeführt. Allgemein gilt, dass mit steigender Transportentfernung die Kosten beider Verfahren deutlich ansteigen, da die Nährstoffgehalte der Gärreste bezogen auf deren Transportmasse verhältnismäßig gering sind. Die Ziele einer Gärrestaufbereitung sind daher die Reduktion des inerten Wasseranteils und die gezielte Aufkonzentration von Nährstofffraktionen.

Feststoffabtrennung

Die Feststofftrennung ist das grundlegende Verfahren der Gärrestaufbereitung. Vorteile der Feststoffabtrennung sind die Reduzierung des Lager Volumens für flüssige Gärreste und die Verminderung von Sink- und Schwimmschicken bei der Lagerung. Vor allem aber kommt es zu einer Auftrennung der Nährstoffe, da der lösliche, mineralische Stickstoff vor allem in der Flüssigphase verbleibt, während organisch gebundener Stickstoff und Phosphor zum Großteil mit der Festphase abgeschieden werden. Die separierte, TS-armen Flüssigphase kann ausgebracht oder weiter aufbereitet werden, während die separierten Feststoffe kompostiert oder getrocknet werden können. Abhängig vom erforderlichen Trenngrad werden vor allem Pressschneckenseparatoren, Siebtrommel- oder Siebbandpressen und Dekanter eingesetzt.

Zur Verbesserung der Abscheideleistung in der Separation werden z. T. Flockungsmittel eingesetzt. Hierbei sind düngemittelrechtliche Fragen zu berücksichtigen.

Trocknung der Festphase

Eine unmittelbare Ausbringung der abgetrennten Festphase ist möglich. Da es hierbei jedoch zur Immobilisierung von Stickstoff, Geruchsentwicklung oder der Verbreitung von Unkrautsamen kommen kann, werden die abgetrennten Feststoffe in der Regel weiterführenden Behandlungen unterzogen. Hier wird meist eine Trocknung der Gärreste vorgenommen. Einige, schon in anderen Bereichen etablierte Verfahren können hierfür angewendet werden. Dies sind z. B. Trommel-, Band- oder Schubwendetrockner. In den meisten Trocknersystemen wird die Wärme durch heiße Luft übertragen, die das Trockengut über- oder durchströmt. Hierfür bietet sich bei Biogasanlagen die Nutzung von Abwärme an, falls diese nicht anderweitig genutzt werden kann.

Das in der Festphase enthaltene Ammonium geht bei der Trocknung zum großen Teil als Ammoniak in die Trocknerabluft über. Aus diesem Grund kann zur Verhinderung von Ammoniakemissionen eine Abluftbehandlung notwendig sein. Ebenso kann es zur Emission von Geruchsstoffen kommen, die nach Möglichkeit in einer gekoppelten Abluftreinigung aus dem Abluftstrom entfernt werden sollten.

Trockensubstanzgehalte von mindestens 80 % in der Festphase sind durch die Trocknung erreichbar. Hierdurch wird sie lager- und transportfähig.

Weitergehende Behandlung der Flüssigphase

Die geringeren TS-Gehalte der separierten Flüssigphase erleichtern die Lagerung und Ausbringung im Vergleich zum unbehandelten Gärrest. Häufig ist jedoch eine weitere Volumenreduzierung bzw. Nährstoffanreicherung in der Flüssigphase erwünscht, welche durch die folgenden Verfahren erreicht werden kann.

Membrantechnik

Die Membrantechnik besteht aus einer Kombination von Filtrationsverfahren mit abnehmender Porengröße, gefolgt von einer Umkehrosmose aus der ein einleitfähiges Permeat und ein stark mit Nährstoffen angereichertes Konzentrat entsteht. Das Konzentrat ist reich an Ammonium und Kalium, während der Phosphor vor allem in der Ultrafiltration zurückge-

halten wird und im Retentat vorliegt. Das Permeat der Umkehrosmose ist weitgehend nährstofffrei und erreicht Einleiterqualität. Bei den Berechnungen wurde davon ausgegangen, dass die beiden nährstoffreichen Flüssigphasen gemeinsam in einer Mischung ausgebracht werden.

Um ein frühzeitiges Verstopfen der Membranen zu verhindern sollte der TS-Gehalt in der Flüssigphase einen Wert von 3 % nicht überschreiten. Dies erfordert in den meisten Fällen eine Fest-Flüssig-Trennung mit einem Dekanter.

Eindampfung

Die Eindampfung von Gärresten ist für Biogasanlagen interessant, die über einen hohen Überschuss an Wärme verfügen, da etwa $300 \text{ kWh}_{\text{th}}/\text{m}^3$ verdampftes Wasser benötigt werden. Für Anlagen, die mit einem größeren Anteil Gülle betrieben werden, und somit im Verhältnis zur erzeugten Energie ein großes Gärrestvolumen haben, ist dieses Verfahren nur mit Einschränkungen anwendbar. Für die hier berechnete Modellanlage kann, bei einem Massenanteil von 50 % Gülle im Substratinput, nur 70 % der benötigten Wärme durch die Biogasanlage bereit gestellt werden. Bisherige Betriebserfahrungen für Gärrest-Eindampfungsanlagen sind nur in geringem Maße vorhanden.

Durch eine Eindampfung können im Vergleich zum Zulauf im Konzentrat bis zu 4fach höhere Feststoffkonzentrationen erreicht werden, der Lagerungs- und Transportaufwand reduziert sich entsprechend. Allerdings ist eine direkte Einleitung des gereinigten Kondensats in den Vorfluter nicht möglich, da die gesetzlichen Grenzwerte nicht eingehalten werden können.

Strippung

Die Strippung bezeichnet ein Verfahren, bei dem Inhaltsstoffe aus Flüssigkeiten entfernt werden, indem Gase (Luft, Wasserdampf, Rauchgas etc.) durch die Flüssigkeit geleitet und die Inhaltsstoffe in die Gasphase überführt werden. Ammonium wird hierbei in Ammoniak überführt. Dieser Prozess kann durch Temperatur- und pH-Wert-Erhöhungen unterstützt werden. Dies wird z. B. bei der Dampfstrippung genutzt, da mit zunehmender Temperatur der erforderliche Gasvolumenstrom abnimmt. In einem nachgeschalteten Desorptionsschritt wird das in der Gasphase befindliche Ammoniak in ein verwertbares bzw. entsorgungsfähiges Produkt überführt. Die Desorption von NH_3 aus dem Gasstrom kann über Kondensation, Wäsche mit Säuren, oder durch Reaktion mit einer wässri-

gen Lösung aus Gips erfolgen. Die Endprodukte der Desorption sind in der Regel Ammoniumsulfat bzw. Ammoniakwasser.

Wie bei der Verdampfung ist das Erreichen der gesetzlichen Grenzwerte zur Einleitung des gereinigten Wassers nach derzeitigem Stand nicht gewährleistet.

Kosten und Wirtschaftlichkeit

Annahmen

Die verschiedenen Verfahren werden anhand einer Modellbiogasanlage verglichen, welche die folgenden Parameter aufweist:

Tab. 1: Trockensubstanz (TS) und Nährstoffgehalte des zu Grunde gelegten Gärrestes

Input	Output: 30.000 m ³ Gärreste				
	TS	N _{ges}	NH ₄ -N	P ₂ O ₅	K ₂ O
	%	g/kg			
50 % Rindergülle (8 % TS)	7,75 %	5,6	3,6	2,1	6,17
50 % Maissilage (32 % TS)					

Es wird ein BHKW vorausgesetzt, mit einer elektrischen Leistung von 500 kW und einer thermischen Leistung von 570 kW (Stromkennzahl 0,87). Die Kosten für elektrischen Strom zum Betrieb der Aufbereitungsverfahren werden mit 15 ct/kWh, die Kosten für Wärme mit 3 ct/kWh angesetzt.

Der Vergleich der Kosten erfolgt zunächst für einen Betrieb mit einer für die Ausbringung verfügbaren hofnahen Fläche von 420 ha und einer mittleren Hof-Feld-Entfernung von 3,7 km. Darüber hinaus anfallende Gärreste müssen im Mittel 20 km transportiert werden. Für die Ausbringung werden Vollkosten nach KTBL-Daten für ein 2-phases Verfahren mit einer Transporteinheit (110 kW Schlepper und 21 m³ Gülletransportwagen) und einer Ausbringeinheit (110 kW Schlepper und 10 m³ Pump-tankwagen) angesetzt.

Die Daten zum Investitionsbedarf für die Anlagentechnik stammen aus der KTBL-Anlagendatenbank, aus der Literatur und von Herstellerangaben. Da viele der Verfahren erst als Pilot- und Demonstrationsanlagen reali-

siert sind, bestehen noch große Unsicherheiten bezüglich der tatsächlichen Investitionen und Betriebskosten. Die Verfahrenskosten umfassen auch die bauseitigen Kosten für Hallen und Lagerung, sowie die Kosten zur Ausbringung der Aufbereitungsprodukte. Diese wurden aus KTBL-Daten berechnet.

Ergebnisse

Als Referenz für die ökonomische Bewertung der Aufbereitungsverfahren dient die Ausbringung unbehandelter Gärreste. Die hierfür berücksichtigten Kosten umfassen auch die Gärrestlagerung.

Die spezifischen Kosten der untersuchten Verfahren liegen zwischen 1,90 €/m³ für die Gärrestausbringung ohne Aufbereitung und 7,90 €/m³ für die Vollaufbereitung mit dem Membranverfahren (Tabelle 2). Das auszubringende Volumen reduziert sich nur bei den Vollaufbereitungsverfahren deutlich. Daher kommt es hier zu einer Verminderung der Kosten für Ausbringung und Transport. Wird nur der Gärrest separiert und die Festphase weiter aufbereitet, so kommt es zu keiner signifikanten Volumenreduzierung. Da im Vergleich zur Ausbringung ohne Aufbereitung in diesem Fall zwei getrennte Transport- und Ausbringsysteme für Fest- und Flüssigphase genutzt werden müssen, steigen die Kosten im Vergleich zur Referenz.

Deutlich sind die Unterschiede in den Energiekosten der Verfahren. Während die Separierung einen vergleichsweise geringen Strombedarf aufweist, ist im Membranverfahren die elektrische Energie eine der größten Kostenfaktoren. Entsprechend sensibel reagiert die Kostenberechnung hier auf den Strompreis. Nimmt man diesen mit 10 ct/kWh statt 15 ct/kWh an, sinken die spezifischen Kosten des Verfahrens um fast einen Euro. Bei Trocknung, Eindampfung und Strippung haben hingegen die zu Grunde gelegten Wärmekosten den größten Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit der Verfahren. Nimmt man für die Wärme Opportunitätskosten von 3 ct/kWh an, so unterscheiden sich die Gesamtkosten dieser Verfahren nicht deutlich vom Membranverfahren, das keine Wärme benötigt. Wird jedoch angenommen, dass die Abwärme der Biogasanlage nicht anderweitig genutzt werden kann und somit keine Wärmekosten zu berücksichtigen sind, sind die Zusatzkosten dieser Verfahren gegenüber der alleinigen Separierung sehr gering. Im Falle der Bandtrocknung treten keine Mehrkos-

ten auf. Für die Eindampfung steht bei den hier getroffenen Annahmen nur 70 % der benötigten Wärme als Abwärme der Biogasanlage zu Verfügung. Die zusätzlich benötigte Wärme wird mit Kosten von 3 ct/kWh in den Berechnungen berücksichtigt.

Tab. 2: Vergleich der spezifischen Kosten [€/m³] für die Verfahren der Gärrestaufbereitung

	ohne Aufbereitung	Separierung	Band-trockner	Membran	Ein-dampfung	Strippung
Fixe Kosten	1,50	1,99	2,84	4,93	2,83	4,63
Energiekosten el.	0,36	0,45	1,76	2,73	1,59	1,37
Energiekosten th.			2,57		4,50	1,84
Betriebsstoffe				0,95	1,47	0,66
Personal		0,05	0,20	0,50	0,50	0,50
Ausbringung und Transport	4,43	4,77	4,53	3,16	2,82	2,21
Summe Kosten	6,29	7,27	11,91	12,27	13,71	11,21
Nährstoffe	4,40	4,40	4,26	4,40	4,40	4,38
KWK-Bonus			2,25		2,82 ¹	1,61
Summe Einnahmen	4,40	4,40	6,51	4,40	7,22	5,99
Gesamt	1,89	2,86	5,40	7,87	6,49	5,22
Differenz zu „ohne Aufbereitung“		0,97	3,51	5,98	4,60	3,33
ohne Wärmekosten		0,97	0,94	5,98	1,38 ²	1,49

¹ maximaler KWK-Bonus für verfügbare Wärme nach Abzug von 30 % Eigenwärmebedarf der Biogasanlage

² Wärme, die über die verfügbare Abwärme der Biogasanlage hinausgehen, werden weiterhin mit Kosten von 0,03 €/kWh berücksichtigt

Verwertung der aufbereiteten Gärreste

Die **Feststoffe** aus der Separierung sind ihren Eigenschaften nach mit Frischkompost vergleichbar und können wie dieser als Dünger und zur Erhöhung der Gehalte an organischer Substanz in Böden eingesetzt werden. Die Bundesgütegemeinschaft Kompost hat Qualitätskriterien für

festen Gärreste entwickelt und vergibt ein Gütesiegel. Allerdings wird Frischkompost vor allem in der Landwirtschaft eingesetzt, da es bei dessen Lagerung und Ausbringung zu Geruchsentwicklung kommen kann. Ein marktfähiges Produkt entsteht erst durch die Stabilisierung der Gärreste z. B. durch Kompostierung. Diese ist jedoch meist nicht wirtschaftlich zu betreiben. Eine Alternative hierzu ist die Trocknung der Feststoffe wie oben beschrieben. Hierbei entsteht ein lager- und transportfähiges Produkt, das zu gezielter Applikation von P und K (vgl. Tabelle 3) auf Flächen mit hoher Stickstoffbelastung genutzt werden kann.

Auch eine Verbrennung der getrockneten Feststoffe ist möglich. Allerdings sind Gärreste als Regelbrennstoff nach BImSchV ausgeschlossen, sobald Gülle oder Kot mit vergoren wird. In diesem Fall wäre eine Sondergenehmigung mit umfangreichen Auflagen notwendig. Für Gärreste rein pflanzlichen Ursprungs ist der Regelungsbedarf unklar. Hierbei ist jedoch zu berücksichtigen, dass der KWK-Bonus für die Wärmenutzung in der Gärrestaufbereitung nur zum Zweck der Düngemittelherstellung gewährt wird.

Die **Flüssigphase aus der Separation** wird in einigen Biogasanlagen z. T. als Rezirkulat verwendet. Der verringerte TS-Gehalt ermöglicht darüber hinaus eine exaktere Ausbringung mit geringeren NH_3 -Verlusten. Durch die geringeren P-Gehalte im Vergleich zu unbehandelten Gärresten, lassen sich in Regionen mit intensiver Tierhaltung größere Mengen betriebsnah verwerten, da dort die Ausbringung in der Regel durch die P-Gehalte der Böden limitiert ist. Probleme von regionalen Stickstoffüberschüssen lassen sich meist nur durch eine weitere Aufbereitung der Flüssigphase lösen, da durch alleinige Separation keine Verringerung der Transportvolumina erreicht wird.

Für die **nährstoffhaltigen Aufbereitungsprodukte** der Flüssigphase ist eine Vermarktung häufig nur eingeschränkt möglich. Die Nährstoffkonzentrationen liegen zwar über denen von Gärresten (Tabelle 3), was ihre Transportwürdigkeit erhöht, jedoch meist deutlich unter denen von mineralischen Düngemitteln. Dies kann in manchen Fällen die Verwertung erschweren, da keine geeignete Ausbringtechnik vorhanden ist. Eine Ausbringung mit Schleppschlauchverteilern, wie sie zur Ausbringung von Gülle und Gärresten verwendet wird, benötigt genügend hohe Ausbringungsmengen, um eine gleichmäßige Verteilung der Nährstoffe auf der Fläche zu ermöglichen. Mineralische Flüssigdünger, wie z. B. Ammoniumharnstoff-Lösung mit einem N-Gehalt von 28 % werden häufig mit Pflanzen-

schutzspritzen ausgebracht, die jedoch meist über begrenzte Ausbringkapazitäten verfügen. Ausbringmengen, die deutlich über 1 m³/ha liegen sind mit Standardtechnik schwer zu verwirklichen.

Die Ammoniumsulfatlösung (ASL) aus der Strippung kommt den Anforderungen an ein verwertbares Aufbereitungsprodukt am Nächsten. Sie hat einen N-Gehalt von 8 % und wird bereits als Produkt der Abluftreinigung und Nebenprodukt der Chemischen Industrie in größeren Mengen in der Landwirtschaft als Düngemittel vermarktet.

Für die **nährstoffabgereicherten, bzw. nährstofffreien Aufbereitungsprodukte der Flüssigphase** wurden in den wirtschaftlichen Berechnungen keine Verwertungskosten oder -erlöse angenommen. Erlöse sind hier

Tab. 3: Nährstoffgehalte der Fraktionen, modellhaft berechnet für die Aufbereitungsverfahren.

		Massenanteil [%]	N _{org} [kg/t]	NH ₄ -N [kg/t]	P ₂ O ₅ [kg/t]	K ₂ O [kg/t]
Ausbringung	Flüssig		2,0	3,6	2,1	6,2
Separierung	Fest	12	4,9	2,6	5,5	4,8
	Flüssig	88	1,6	3,7	1,6	6,4
Bandtrockner	Fest	5	13,3	0,7	14,9	12,9
	Flüssig	88	1,6	3,7	1,6	6,4
	Abluft	8	–	–	–	–
Membran	Fest	19	4,9	4,4	6,8	4,5
	Flüssig	37	2,8	7,4	2,1	14,4
	Abwasser (gereinigt)	44	Grenzwerte zur Direkteinleitung in Vorfluter erreicht			
Verdampfung	Fest	19	4,9	4,4	6,8	4,5
	Flüssig	31	3,4	8,9	2,5	17,3
	Prozesswasser	50	nicht geeignet zur Einleitung in Vorfluter			
Strippung	Fest	27	6,8	3,5	7,5	21,7
	Flüssig (ASL)	3	0,0	80,6	0,0	0,0
	Prozesswasser	70	nicht geeignet zur Einleitung in Vorfluter			

möglich, wenn Abnehmer gefunden werden, die Prozesswasser benötigen. Am ehesten erscheint dies für die Membrantechnik möglich, bei der ein vorfluterfähiges Permeat aus der Umkehrosmose anfällt. Für alle nahezu nährstofffreien Produkte wäre eine Verregnung oder Nutzung zur Bewässerung möglich, für Produkte mit Direktenleitererlaubnis auch die Einleitung in ein Gewässer. Sind diese Möglichkeiten nicht gegeben, ist ein Anschluss an eine Kläranlage mit entsprechenden hydraulischen und biologischen Kapazitäten notwendig. Hierdurch entstehen zusätzliche Kosten, die berücksichtigt werden müssen.

Vergleich der Aufbereitungsverfahren

Die hier dargestellten Aufbereitungsverfahren für Gärreste unterscheiden sich stark in Ihrer bisherigen Verbreitung und den technischen Risiken (Tabelle 4). Die Verfahren der Gärrestseparierung entsprechen dem Stand der Technik und werden bereits häufig angewendet. Bei einer Teilaufbereitung kommt es allerdings in der Regel zu keiner Reduzierung der auszubringenden Mengen und der Aufwand für die Ausbringung der Gärreste erhöht sich.

Tab. 4: Vergleichende Bewertung von Verfahren der Gärrestaufbereitung
(++ = sehr gut, + = gut, o = mittel, - = schlecht)

	Sepa- rierung	Trocknung	Membran- technik	Ein- dampfung	Strippung
Funktionssicherheit	++	+/o	+	o	o
Stand der Umsetzung	++	+	+	o	o
Kosten	+	+/o	o/-	o	+/o
Verwertbarkeit der Produkte					
Festphase	o	+/o	o	o	o
Flüssig (nährstoffreich)	o	o	+	+	++
Flüssig (nährstoffarm)			+	o	o

Die Verfahren zur Trocknung der Festphase sind bereits in anderen Anwendungsbereichen etabliert und werden für die Gärresttrocknung angepasst. Hierbei sind nur geringe technische Probleme zu erwarten.

Allerdings ist die Trocknung der Gärreste nur wirtschaftlich interessant, wenn der Gärrest nach der Trocknung gewinnbringenden Verwertungspfadern zugeführt wird oder keine andere Nutzungsmöglichkeit für die Abwärme der Biogasanlage besteht.

Die Verfahren zur Behandlung der Flüssigphase entsprechen noch nicht dem Stand der Technik und es wird ein hoher Entwicklungsbedarf gesehen. Am weitesten fortgeschritten ist die Technik in den Membranverfahren. Hier gibt es mehrere Anbieter auf dem Markt und Referenzanlagen, die sich in einem weitgehend störungsarmen Betrieb befinden. Trotzdem besteht auch hier noch Entwicklungspotential, um durch Veränderungen im Verfahren Energieaufwand und Verschleiß zu reduzieren. Hier sind z. B. bereits Verbesserungen der Feststoffabtrennung in der Entwicklung, welche die Standzeit von Membranen erhöhen und den Energieaufwand reduzieren sollen.

Verfahren zur Eindampfung und Stripping sind im großtechnischen Dauerbetrieb noch nicht so weit fortgeschritten. Aus diesem Grund sind die ökonomische Abschätzung und die zu erwartende Qualität der Produkte noch mit größeren Unsicherheiten behaftet und die technischen Risiken vergleichsweise hoch.

Anschrift der Autoren:

*Dr. Sebastian Wulf, Helmut Döhler
Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V. (KTBL)
Bartningstr. 49, 64289 Darmstadt
E-Mail: s.wulf@ktbl.de*

Wie wirken NaWaRo-Gärreste auf den organischen Bodenkohlenstoff?

Peter Dominik
Umweltbundesamt

Nadine Jäger
Universität Göttingen

Anja Säger
Universität Kassel

Heinz Flessa
Johann Heinrich von Thünen-Institut (vTI)

Einleitung

Die organische Substanz von Böden (OBS) erfüllt vielfältige Funktionen in Böden und speichert erhebliche Mengen an Kohlenstoff. So sind in deutschen Ackerböden schätzungsweise 1 Gt Kohlenstoff gespeichert, allein der durch landwirtschaftliche Anbausysteme kurzfristig (innerhalb von 20 Jahren) veränderbare Kohlenstoffgehalt auf Äckern (ohne organische Böden) umfasst schätzungsweise 100 Mt Kohlenstoff. Würde diese Menge Humus durch Mineralisierung als CO₂ freigesetzt, entspräche das gut einem Drittel der jährlichen THG-Emissionen Deutschlands. Allein aus diesem Grund wäre eine Abnahme der Humusgehalte auf den landwirtschaftlich genutzten Böden nicht wünschenswert.

Als Substrat für Biogasanlagen wird in Deutschland zunehmend Silomais angebaut, der wie Zuckerrüben oder Kartoffeln als Humuszehrer gilt, da die späte Bodenbedeckung die Mineralisierung fördert und nach der Ernte geringe Mengen an Pflanzenresten auf der Fläche verbleiben. Je nach Fruchtfolge kann dadurch eine Lücke in der Humusbilanz entstehen, die aber gemäß gängiger Humusbilanzierungsmethoden geschlossen

werden kann, wenn die Gärrückstände der Biogasanlage auf die Fläche des NaWaRo-Anbaus zurück gebracht werden. Diese Humusbilanzierungsmethoden nehmen bisher an, dass die Humuswirksamkeit von Gärresten aus nachwachsenden Rohstoffen denjenigen von Gärresten aus der Zeit vor 2004, als nahezu ausschließlich Gülle vergoren wurde, entsprechen. Im vorliegenden Beitrag werden erstmals Versuchsergebnisse zur Stabilität der organischen Substanz in solchen neuartigen Gärresten präsentiert. Diese Ergebnisse legen nahe, dass die Humuswirksamkeit dieser Gärreste mit den Werten in den gängigen Humusbilanzierungsmethoden deutlich überschätzt wird.

Umwandlungsprozesse und Stabilisierungsmechanismen für organische Substanz in Böden

In natürlichen Ökosystemen entsteht die organische Substanz von Böden (OBS, auch Humus genannt) nahezu vollständig aus abgestorbenen Pflanzenteilen, die sich zu wechselnden Anteilen aus Lignin, (Hemi-)Zellulose, Zucker, Stärke, Proteinen, Fetten und Wachsen zusammensetzen. Deren Zersetzung durch Bodenorganismen beginnt sobald sie auf den Boden gelangen. Leicht verwertbare Substanzen wie Zucker und Proteine werden zuerst metabolisiert, gefolgt von Pektinen, Hemizellulosen und Zellulose. Lignin wird dagegen nur langsam und nur in Gegenwart von Sauerstoff abgebaut. Über die Abbauraten von Lipiden und Cutin ist wenig bekannt, aber vermutlich werden sie im Gegensatz zum Suberin der Rinde ebenfalls recht schnell umgesetzt (Scheffer und Schachtschabel, 2002). Mikroorganismen produzieren beim Abbau der Pflanzenreste selbst Polysaccharide (Mucilgel), welche die Pflanzenreste und Minerale fest miteinander verkleben können (Makro-Aggregation). Im Laufe der Abbauprozesse nehmen chemisch definierte Makromoleküle zugunsten nicht mehr exakt definierbarer Huminstoffe ab. Huminstoffe sind reich an funktionellen Gruppen wie Carboxyl-, Carbonyl-, Hydroxyl- und Aminogruppen und können darüber an Bodenminerale gebunden werden. Im Gegensatz zu o. g. Mucigel binden Huminstoffe hauptsächlich an Partikel der Tonfraktion (Ton-Humus-Komplexe) und deshalb ist – obwohl die Bindungskräfte schwächer sind – diese Bindung durch mechanische Kräfte kaum zu lösen (Stabilisierung von Mikroaggregaten). Im Laufe der geschilderten Prozesse steigt die Stabilität der OBS stark an.

Die organische Substanz von Böden trägt wesentlich zur Erfüllung wichtiger Bodenfunktionen bei. Allerdings unterstützen nicht alle Fraktionen der OBS jede Funktion in gleichem Ausmaß (Tabelle 1).

Tab. 1: Bedeutung von OBS-Fraktionen für Bodenfunktionen

Bodenfunktion/Parameter	Korrelation m. OBS-Gehalt	Bedeutung einzelner Fraktionen der OBS		
		frische	stabilisierte	gelöste
Lebensgrundlage für Bodenorganismen	+	++	(+)	+/0
Nährstoffspeicherung (N>S>P)	+	++	++	
Freisetzung von Nährstoffen	+	++	+	
Sorption von Kationen (inkl. Schwermetalle)	+	(+)	++	
Sorption von Organika	+	+	++	
Verlagerung von Schadstoffen	+/0	-	--	++
mikrobieller Abbau von Organika	+/0	++	-	
Aggregatstabilität	+/0	++	(+)	
Erodibilität	-	++	(+)	
Wasserspeicherung	+	++	++	
C-Sequestrierung	++	(+)	++	0

Im Boden wirken also verschiedene Mechanismen, die den Abbau der OBS verlangsamen und damit zu ihrer Stabilisierung beitragen (mit Beispielen):

1) Physikalische Stabilisierung:

- Okkludierung von jüngerer (partikulärer) OS in Makroaggregaten (Freisetzung durch Bodenbearbeitung)
- Sorption von Huminstoffen an Mineralen der Ton- (und Schluff-) Fraktion

2) Rekalzitranz (schwer zersetzbare Verbindungen):

- Im Verlauf der Humifizierung reichern sich aliphatische und aromatische Komponenten an.
- Z. B.: OBS in ehemaligen Heide- oder Hochmoorstandorten

3) Sauerstoffmangel:

- in Grünlandböden häufig höhere Wassersättigung
- auch in Ackerböden herrscht im Inneren von Aggregaten schon bei mäßigen Wassergehalten geringe Sauerstoffsättigung.

In Ap-Horizonten von Ackerböden werden Aggregate regelmäßig durch Bodenbearbeitung zerstört, die Mineraloberflächen sind in der Regel mit OBS belegt und anaerobe Bedingungen sind unerwünscht. Daher kann dort der Humusgehalt nur wesentlich gesteigert werden, wenn rekalzitranzente organische Substanz zugeführt wird.

Bestimmung der Humusersatzleistung von organischen Reststoffen

In Abbildung 1 ist schematisch dargestellt, wie sich der Humusgehalt eines Ackerbodens – nach vorher konstanter Bewirtschaftung – verändert, wenn durch dauerhaft veränderte Fruchtfolge oder organische Düngung die Zufuhr an Kohlenstoff ab dem 6. Jahr deutlich gesteigert wird. Vorher waren die Raten von Zufuhr an organischer Substanz und deren Abbau im Gleichgewicht und daher auch der Humusvorrat, nach der Veränderung braucht es Jahrzehnte bis die Abbaurate die Zufuhrrate erreicht hat. So lange steigt der Humusvorrat jährlich um die Differenz beider Raten an.

Zwei organische Dünger, deren Kohlenstoff unterschiedliche Stabilität (Rekalzitranz) aufweist, würden, auch wenn die gleiche Menge Kohlenstoff ausgebracht wird, zu unterschiedlichen Humusgehalten führen. Die Humusersatzleistung von Reststoffen lässt sich daher am genauesten durch Feldversuche ermitteln, die allerdings mehrere Jahrzehnte dauern. Es werden auch Labormethoden herangezogen, z. B. Pyrolyse-Gaschromatografie(-Massenspektrometrie), Infrarot- oder Kernspinresonanz-Spektrometrie oder Thermogravimetrie. Allerdings erlaubt diese Methoden bisher keine quantitative Vorhersage der Humusgehalte.

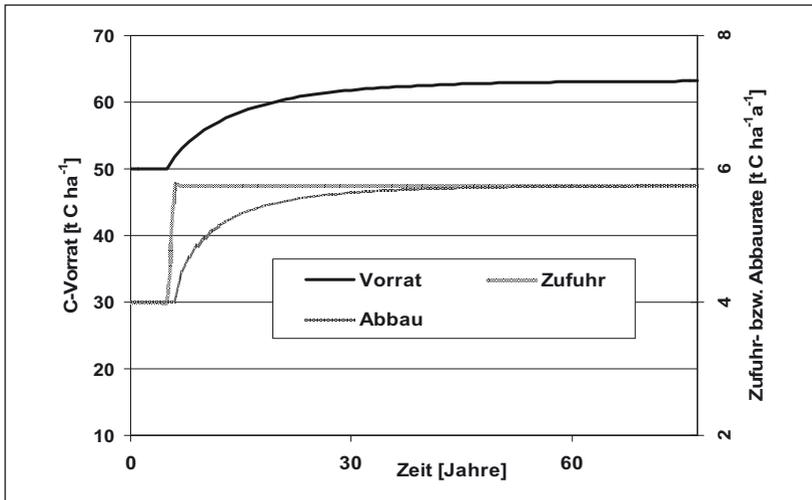


Abb. 1: Schematischer Verlauf der C-Gehaltsänderung nach dauerhafter Änderung des Anbausystems im 6. Jahr.

In Humusmodelle und Bilanzierungsmethoden sind aber außer Feldversuchen auch Laborversuche zur Mineralisierung organischer Materialien in Böden eingegangen. Dabei wird das organische Material in praxisnahem Mengenverhältnis mit Boden vermischt, unter günstigen Temperatur- und Feuchtebedingungen bebrütet und regelmäßig oder kontinuierlich die CO_2 -Freisetzung ermittelt. Da auch die Mineralisierung der bodenbürtigen OBS zu einer CO_2 -Freisetzung führt, muss eine Kontrolle untersucht werden, der kein organisches Material zugemischt wurde. Auch diese Kontrolle sollte durchmischt werden, weil durch die damit verbundene Zerstörung von Aggregaten die Mineralisierung der OBS angeregt wird.

Solche Untersuchungen mit verschiedenen organischen Reststoffen und Böden hat insbesondere Klimanek (1982, 1990a und 1990b) durchgeführt und sind beispielhaft in Abbildung 2 dargestellt. Die Abbauraten nehmen mit der Zeit immer weiter ab, so dass kein vollständiger Abbau erreicht wird. Es zeigt sich, dass deutliche Unterschiede zwischen verschiedenen Böden vorliegen. Auf Sandböden werden die organischen Materialien in der Regel schneller abgebaut als auf Lehmböden.

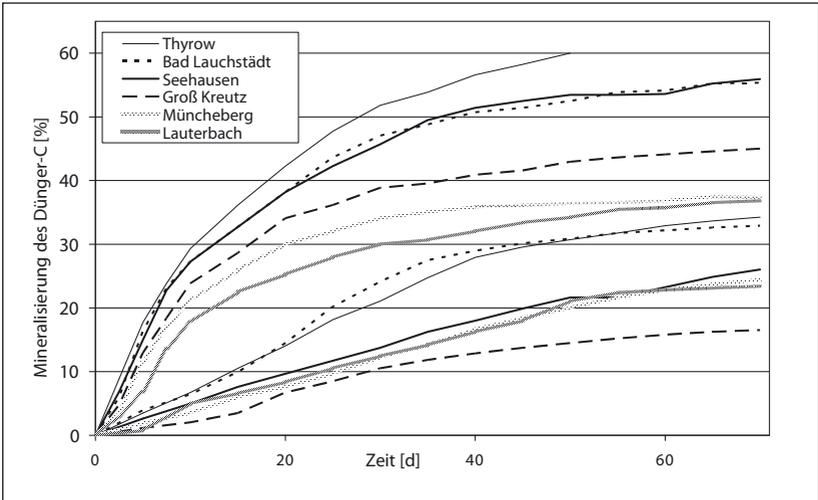


Abb. 2: Kumulativer Abbau von Stallmist (jeweils die obere Kurve) und Güllefeststoff (jeweils die untere Kurve) in Ap-Bodenmaterial von 6 Langzeitversuchen, bei 60 % MWK und 25 °C bebrütet (nach Klimanek, 1982).

Humusersatzleistung nach VDLUFA-Methode

Im VDLUFA-Standpunkt (Körschens et al., 2004) ist die Humuswirksamkeit organischer Dünger – wie in Tabelle 2 beispielhaft dargestellt – angegeben. Es wird je Tonne Frischmasse Dünger die Humus-Reproduktion (Menge an Humus-C in kg, die längerfristig, also mindestens länger als 10 Jahre im Boden verbleibt) angegeben. Die Ableitung dieser Werte erfolgte auf der Basis von Experten-Wissen und ist nicht so dokumentiert, dass Außenstehende sie im Detail nachvollziehen können. Wohl aber können wir die Stabilität von Gärresten mit gut untersuchten Düngern wie Stallmist vergleichen und eine am Stallmist ausgerichtete Einordnung vornehmen.

Tab. 2: Richtwerte für die Humusreproduktionsleistung organischer Materialien, Auszug aus Tabelle 3 des VDLUFA-Standpunkt Humusbilanzierung (Körschens et al., 2004).

Material		TM %	Humus-Reproduktion kg Humus-C (t Substrat-FM) ⁻¹
Stallmist	frisch	20	28
		30	40
	verrottet	25	40
		35	56
Gärrückstände	flüssig	4	6
		7	9
		10	12

Um die in Tabelle 2 angegebenen Werte für Gärreste und Stallmist direkt vergleichbar zu machen, rechnen wir sie um in Reproduktionsfaktoren (RF).

Der Reproduktionsfaktor (RF) ist der Anteil des organischen Kohlenstoffs im Dünger, der längerfristig im Humus verbleibt.

Wenn z. B. vom C_{org} eines Düngers 35 % längerfristig im Humus verbleiben, beträgt der RF 0,35 oder 35 %. Für die Umrechnung benötigt man den Gehalt an C_{org} in der Trockenmasse. Für Stallmiste sind solche Werte (Median 42,4 %) von Sauerlandt und Berwecke (1952), für Gärreste (Median von 28,3 %¹) von Göhler und Emmerling (2007) veröffentlicht. In beiden Fällen handelt es sich um eine Werte-Verteilung, so dass sich für die RF beider Dünger aus einem Wert in der VDLUFA-Methode jeweils

¹ Die Gütegemeinschaft Kompost gibt hingegen einen mittleren C_{org}-Gehalt von 43 % in TM für Gärreste an. Dieser Parameter wird allerdings nicht gemessen, sondern es wird angenommen, dass der Glühverlust (Ø=73,6 %) der organischen Substanz entspricht und diese einen C-Gehalt von 58 % wie Bodenumus hat, was nicht zutreffen muss. So hat Maissilage 47 % C an oTM (Amon et al., 2007). Mit 43 % C_{org} in TM ergäbe sich aus den Daten der VDLUFA-Methode ein Reproduktionsfaktor für Gärreste, der vergleichbar wäre mit jenen von Stallmist in Abbildung 3. Das Modell REPRO geht für Gärreste von 31,5 % C_{org} in TM aus. In REPRO wird Gärresten ein ähnlicher Reproduktionsfaktor wie Stallmisten zugeordnet (nicht dargestellt).

eine Verteilung ergibt (Abbildung 3), obwohl RF für Dünger gleicher Reife eine Konstante sein sollten. Man erkennt in Abbildung 3, dass die RF von Stallmist zwischen 30 und 45 % liegen, die von Gärresten bei 35 – 60 %. Das bedeutet, dass der VDLUFA-Standpunkt dem Kohlenstoff in Gärresten eine höhere Stabilität, also eine schlechtere Abbaubarkeit als dem Kohlenstoff in Stallmist zuschreibt.

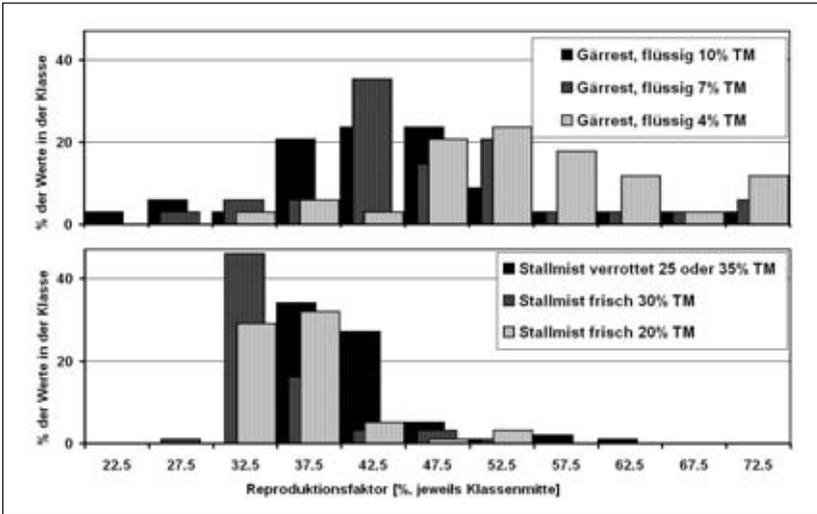


Abb. 3: Vergleich der Reproduktionsfaktoren von Gärresten und Stallmisten aus VDLUFA-Humusbilanzierung (Umgerechnet mit Daten aus Göhler und Emmerling, 2007 bzw. Sauerland und Berwecke, 1952)

Offensichtlich war die Versuchsdauer bei Klimanek (1982) nicht ganz ausreichend, um den RF von Stallmist direkt abzulesen, denn in Abbildung 2 waren am Ende des Versuchs noch 40 – 63 % des Stallmist-C übrig, also mehr als der RF von Stallmist in Abbildung 3 von 30 – 45 % C.

Die Werte für Gärreste wurden aus Studien über die Stabilität von Gärresten aus Biogasanlagen, die nur Gülle, aber noch keine NaWaRo vergärten, abgeleitet, in denen sich zeigt, dass die Gärreste eine etwas höhere Abbau-Stabilität im Boden aufwiesen als die Gülle aus denen sie entstanden waren (Asmus und Linke, 1987; Reinhold et al., 1991). Bisher waren keine Studien zu Gärresten aus der Vergärung von NaWaRo bekannt.

Vergleich der Mineralisierung von Stallmist und Gärresten aus Mais-Mono-Vergärung: Laborversuche

Jäger et al. (submitted) sowie Sänger et al. (submitted) haben Laborversuche zur N_2O -Bildung von mit Gärresten (aus Mais-Monovergärung) gedüngten Böden angestellt und haben beide als Vergleich eine mit Stallmist gedüngte Variante und eine Kontrolle ohne Düngung untersucht. In allen Varianten wurden auch die CO_2 -Freisetzungen ermittelt, so dass diese Versuche geeignet sind, die Abbaubarkeit der organischen Substanz in beiden Düngern zu vergleichen. Abbildung 4 zeigt, dass bei Jäger et al. der Kohlenstoff eines Gärrestes aus Mais-Monovergärung über den gesamten Versuchszeitraum mit ca. 3-facher höherer Rate mineralisiert wurde als ein 2 Monate gelagerter Rinder-Stallmist.

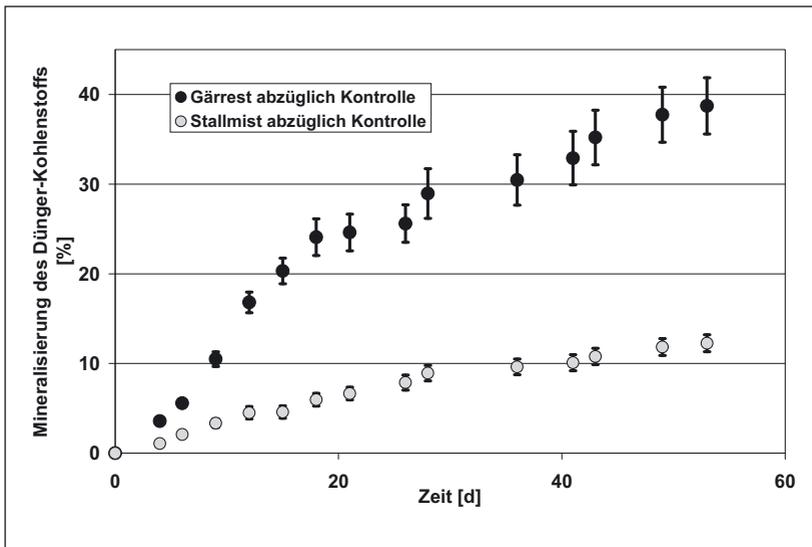


Abb. 4: Kumulativer Abbau eines Gärrestes aus Mais-Monovergärung und eines Stallmistes im Ap eines lehmigen Sandes (langjährig mit Stallmist gedüngt) bei 20 °C und 60 % wassergefülltem Porenraum. In eine 2 cm mächtige Bodenschicht wurde Dünger entsprechend 60 kg N/ha eingearbeitet. Spannweiten stellen Standardabweichungen mit Fehlerfortpflanzung dar. (Verändert nach Jäger et al., 2009)

Abbildung 5 zeigt die entsprechenden Daten aus Sänger et al. (submitted). Dort wird der Kohlenstoff des Gärrestes über die gesamte Versuchsdauer mit etwa doppelt so hoher Rate mineralisiert wie der Kohlenstoff des Stallmistes.

Im Gegensatz zu den Daten im VDLUFA-Standpunkt zeigen die Abbildungen 4 und 5, dass – zumindest unter den Bedingungen dieser beiden Versuche – Gärreste aus Biogasanlagen, die ausschließlich Mais-Silage vergären, eine wesentlich geringere Abbaustabilitat haben als Stallmiste. Obgleich bei Sänger et al. (submitted) die Versuchsdauer 140 Tage betrug, wurde nur ein Abbau des Stallmist-Kohlenstoffs von 30 % erreicht, da die Bebrütungstemperatur mit 13,5 C relativ gering war. Bei Jäger et al. (submitted) wurden sogar nur ein Abbau des Stallmist-Kohlenstoffs von 12 % erreicht.

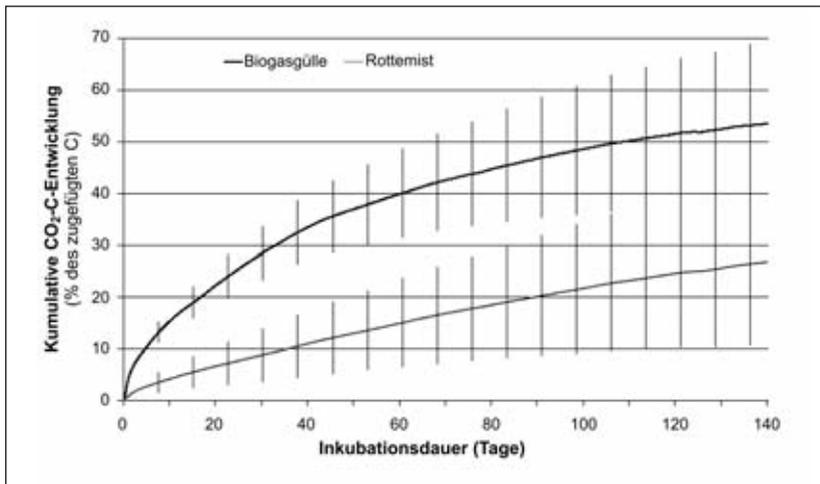


Abb. 5: Kumulativer Mineralisierung (nach Abzug der Kontrolle) eines Gärrestes aus Mais-Monovergärung und eines 5 Monate gelagerten Stallmistes im Ap eines schluffigen Lehms bei 13,5 C und täglicher Beregnung von 3 mm. Gestochene Bodensäulen 30 cm hoch, 15 cm . Dünger entsprechend 100 kg N/ha 6 cm tief eingearbeitet. (Nach Sänger et al. (submitted))

Auch bei diesen beiden Versuchen kann daher der RF für die Humusbilanzierung nicht direkt abgelesen werden, da am Ende des Versuches noch weit mehr als 30 – 45 % des Stallmist-Kohlenstoffs (=RF in Abbil-

dung 3) übrig bleibt. Dennoch erscheint uns eine Aussage über das Verhältnis der RF von Stallmist und NaWaRo-Gärrest aus folgendem Grund zulässig. In Abbildung 2 ist zu erkennen, dass sich in keinem Boden die Abbaukurven von Güllefeststoff und Stallmist überschneiden sondern auch zum Ende der Versuche weiter auseinander laufen. Also würde man auch bei längerer Bebrütung in den Abbildungen 4 und 5 für die Gärreste deutlich niedrigere RF als für die Stallmiste erhalten.

Dies steht im Widerspruch zu aktuellen Humusbilanzierungsmethoden (s. o.), die Gärresten ähnliche oder sogar höhere RF zuweisen wie Stallmisten.

Hinzu kommt, dass sowohl Jäger et al. (submitted) als auch Sänger et al. (submitted) die ungedüngte Kontroll-Behandlung nicht durchmischt haben. Eine solche mechanische Bearbeitung hätte aber auch in der Kontroll-Variante die Mineralisierungstätigkeit gefördert. In den Abbildungen 4 und 5 wurde von jeder Variante die Kontroll-Variante subtrahiert. Würde die Kontroll-Variante noch höhere Werte ergeben, wären die relativen Unterschiede zwischen Stallmist und Gärrest noch ausgeprägter und die Abbaugrade geringer.

Die Arbeit von Klimanek (1982) dargestellt in Abbildung 2 zeigt, dass der Mineralisierungsverlauf der gleichen Dünger in unterschiedlichen Böden recht verschieden sein kann. Auch zwischen unterschiedlichen Gärresten und Stallmisten können Unterschiede erwartet werden. Wir gehen daher nicht davon aus, dass die beiden hier vorgestellten Versuche die gesamte Spannbreite repräsentieren, sondern dass dringend weitere Labor- und Feldversuche nötig sind, um typische Angaben über die Humuswirksamkeit von Gärresten aus NaWaRos machen zu können.

Schlussfolgerungen

- Es sind dringend weitere Laborversuche aber auch Feldversuche zur Humuswirkung von Gärresten aus NaWaRo sowie Covergärung von Gülle und NaWaRo erforderlich. Ein Feldversuch wurde von der Uni Göttingen 2007 angelegt (Ahl et al., 2007). Die Laufzeit der Laborversuche muss ausreichend sein, um RF ablesen zu können. Auch die Kontroll-Behandlung soll „bearbeitet“ werden.
- Wenn sich die hier vorgestellten Ergebnisse auch für andere Konstellationen bewahrheiten, dann müssten für die Humusbilanzierung

in der VDLUFA-Methode und in REPRO gesonderte Werte der Humusreproduktion für Gärreste aus NaWaRo, bzw. für Gärreste aus Cofermentation angegeben werden. Diese lägen dann deutlich niedriger als die bisherigen für Gärreste aus Gülle.

- Mit entsprechend korrigierten Werten würden die Humusbilanzen vieler Biogas-Fruchtfolgen negative Bilanzen aufweisen – z. B. bei Willms (2009) – und es müssten Maßnahmen gegen Humusabbau ergriffen werden.
- Niedrige RF solcher Gärreste bedeuten andererseits eine kurzfristige Förderung der mikrobiellen Aktivität der Böden.

Literatur

- Ahl, C., Lange, M. und Henke, S. (2007): Auswirkungen des Energiepflanzenanbaus zur Biogaszeugung auf die Humuswirtschaft. Mitteilungen der Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft 110: 665 – 666.
- Amon, T. et al. (2007): Optimierung der Methanausbeute aus Zuckerrüben, Silomais, Körnermais, Sonnenblumen, Ackerfutter, Getreide, Wirtschaftsdünger und Rohglyzerin unter den Standortbedingungen der Steiermark. Forschungsprojekt Nr. 1421 BMLFUW, GZ LE.1.3.2/0050-II/1/2005 FA13B-80.26-1/04-G2 Endbericht.
- Asmus, F. und Linke, B. (1987): Zur pflanzenbaulichen Verwertung von Gülle-Faulschlamm aus der Biogasgewinnung. Feldwirtschaft 28:354 – 355.
- Göhler, H. und Emmerling, C. (2007): Landwirtschaftliche Verwertung von Gärrückständen aus NaWaRo-Biogasanlagen, Endbericht, Förder-Kennzeichen 22011201, gefördert durch die Fachagentur für Nachwachsende Rohstoffe (FNR).
- Jäger, N., Duffner, A., Ludwig, B. und Flessa, H. (submitted): N₂O emission from a sandy soil with long-term application of mineral fertilizer and farmyard manure. Eingereicht bei Soil Biology and Biochemistry.
- Klimanek, E-M. (1982): Mineralisierung unterschiedlicher organischer Substanzen in Abhängigkeit von der Bodenart. Arch. Acker- u. Pflanzenbau u. Bodenkunde. 26: 523 – 532.
- Klimanek, E-M. (1990a): Umsetzungsverhalten von Ernterückständen. Arch. Acker- u. Pflanzenbau u. Bodenkunde. 34: 559 – 567.
- Klimanek, E-M. (1990b): Umsetzungsverhalten der Wurzeln landwirtschaftlich genutzter Pflanzenarten. Arch. Acker- u. Pflanzenbau u. Bodenkunde. 34: 569 – 577.
- Körschens, M. (Hrsg.) (2004): Humusbilanzierung - VDLUFA Standpunkt, Bonn.
- Reinhold, G., Klimanek, E-M., und Breitschuh, G. (1991): Zum Einfluss der Biogaszeugung auf Veränderungen in der Kohlenstoffdynamik von Gülle. Arch. Acker- u. Pflanzenbau u. Bodenkunde. 35:129 – 137.
- Sauerlandt, W. und Berwecke, H. (1952): Untersuchungen über den Nährstoff und Kohlenstoffgehalt des Stallmistes. Z. Pflanzenernährung, Düngung und Bodenkunde. 56: 204 – 226.
- Sängner A., Geisseler D. und Ludwig B. (submitted): Effects of rainfall pattern on carbon

and nitrogen dynamics in soil amended with biogas slurry and composted cattle manure. Eingereicht bei Journal of Plant Nutrition and Soil Science.

- Scheffer, F. und Schachtschabel, P. (2002): Lehrbuch der Bodenkunde. 15. Auflage, Spektrum Akademischer Verlag.
- Willms, M., Hufnagel, J., Reinicke, F und Wagner, B. (2009): Anbauverfahren für Energiepflanzen – Auswirkungen auf Boden und Umwelt. Beitrag in diesem Tagungsband (Kap. 4).

Anschrift des korrespondierenden Autors:

Dr. rer. nat. Peter Dominik

Umweltbundesamt

FG II 2.7: Bodenzustand, Bodenmonitoring

Wörlitzer Platz 1, 08644 Dessau

E-Mail: peter.dominik@uba.de

Düngewirkung von Gärresten

Helmut Döhler, Sven Grebe, Uwe Häußermann
Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V. (KTBL)

1 Einleitung

Die Verwertung von Gärresten hat sowohl ökonomisch als auch ökologisch hohe Bedeutung: Durch die Preissteigerungen der mineralischen Düngemittel in den letzten Jahren wurde die Wirtschaftlichkeitsschwelle für den Transport und die Ausbringung von Gärresten und Wirtschaftsdüngern erreicht, so dass Gärreste wegen ihres Nährstoffwertes in der Regel ein transportwürdiges Gut darstellen. Darüber hinaus sind Düngungsstrategien mit Gärresten und Wirtschaftsdüngern hinsichtlich ihrer Energiebilanz günstiger zu beurteilen als Strategien, die ausschließlich auf Mineraldüngung basieren. Weiterhin lassen sich durch die Verwertung der Gärreste Klimagasemissionen einsparen (Döhler 2008; Döhler 2010, in Vorbereitung).

Bereits in den 1980er Jahren wurde die pflanzenbauliche Wirkung von Gärresten in Gefäß- und Freilandversuchen untersucht. Zu dieser Zeit wurde fast ausschließlich Rindergülle als Substrat eingesetzt. Die Effekte der anaeroben Vergärung von Gülle auf die pflanzenbauliche Wirkung sind seit langem bekannt (Döhler et al. 1999, KTBL 1999):

- Minderung von Geruchsemissionen durch Abbau flüchtiger organischer Verbindungen
- Weitgehender Abbau kurzketziger organischer Säuren und demzufolge Minimierung des Risikos für Blattverätzungen
- Verbesserung der rheologischen (Fließ-)Eigenschaften und demzufolge Verminderung von Blattverschmutzungen an Futterpflanzen und geringerer Aufwand bei der Homogenisierung
- Verbesserung der kurzfristigen Stickstoffwirkung durch die Erhöhung des Gehaltes an schnellwirksamem Stickstoff sowie durch Einengung des C/N-Verhältnisses
- Abtötung oder Inaktivierung von Unkrautsamen und Krankheitskeimen (tierpathogene und phytopathogene)

Aufgrund der Vergütungs-Regelungen des EEG setzen nur noch wenige Anlagenbetreiber ausschließlich Wirtschaftsdünger ein. Daher stellt sich die Frage, ob die „neuen Gärreste“ aus NawaRo-Biogasanlagen signifikant andere Eigenschaften aufweisen als „alte Gärreste“.

Im Folgenden werden die wichtigsten Eigenschaften „neuer Gärreste“ dargestellt und daraus die wichtigsten Grundsätze für einen pflanzenbaulichen und ökologisch sinnvollen Einsatz, sowie dem Forschungsbedarf abgeleitet.

2 Wertgebende und Wertmindernde Inhaltsstoffe

Die Eigenschaften von Gärresten bzw. deren Inhaltsstoffe werden wesentlich durch die zur anaeroben Vergärung eingesetzten Stoffe und den Gärprozess selbst bestimmt.

Nährstoffe

Werden überwiegend Energiepflanzen zur Erzeugung von Biogas eingesetzt, laufen mit ähnlichen Substraten bzw. Futtermitteln vergleichbare biologische Prozesse wie im Verdauungstrakt der Nutztiere ab. Daher müssen zwangsläufig Gärreste entstehen, die in ihren Eigenschaften mit denen der flüssigen Wirtschaftsdünger vergleichbar sind. Dass dies tatsächlich der Fall ist, zeigen die Untersuchungen des LTZ Augustenberg. Das LTZ untersuchte die Gärreste aus Praxisbetrieben in Baden-Württemberg auf Nährstoffmenge und -qualität, wertgebenden Bestandteilen und Düngewirkung. In der Tabelle 1 sind die Kennwerte der Gärreste (LTZ, 2008) dargestellt. Untersucht wurden Gärreste, die aus der Vergärung von Rindergülle und Energiepflanzen, Schweinegülle und Energiepflanzen, überwiegend Energiepflanzen sowie Abfällen (z. T. in Mischung mit Energiepflanzen) stammen. Zur besseren Einordnung der Ergebnisse wurde eine Stichprobe unbehandelter Gülleproben analysiert.

Tab. 1: Kennwerte und wertgebende Eigenschaften von Gärresten und Wirtschaftsdüngern im Vergleich (LTZ, 2008, verändert).

Parameter	Einheit	Rohgülle	Gärreste			
		Überwiegend Rindergülle	Rindergülle und NawaRo	Schweinegülle und NawaRo	NawaRo	Abfall (und NawaRo)
Trockenmasse	% FM ¹	9,1	7,3	5,6	7,0	6,1
Säuregrad	pH	7,3	8,3	8,3	8,3	8,3
Verhältnis Kohlenstoff/Stickstoff	C/N	10,8	6,8	5,1	6,4	5,2
Basisch wirk-same Stoffe	BWS (kg CaO/t FM)	2,9	–	–	3,7	3,5
	Bezeichnung	kg/t FM				
Stickstoff	N _{gesamt}	4,1	4,6	4,6	4,7	4,8
Ammonium-N	NH ₄ -N	1,8	2,6	3,1	2,7	2,9
Phosphor	P ₂ O ₅	1,9	2,5	3,5	1,8	1,8
Kalium	K ₂ O	4,1	5,3	4,2	5,0	3,9
Magnesium	MgO	1,02	0,91	0,82	0,84	0,7
Kalzium	CaO	2,3	2,2	1,6	2,1	2,1
Schwefel	S	0,41	0,35	0,29	0,33	0,32
Organische Substanz	o. S.	74,3	53,3	41,4	51,0	42,0

¹ Frischmasse

Die wichtigsten Erkenntnisse aus den Untersuchungen sind:

- Die Trockenmassegehalte von Gärresten (im Mittel 7 % der FM) sind um ca. 2 % niedriger als die von Rindergülle.
- Die Gehalte an Gesamt-Stickstoff sind in Gärresten mit Schweinegülle und Bioabfällen niedriger als in Gärresten aus pflanzlicher Biomasse und Rindergülle.
- Das C/N-Verhältnis liegt in Gärresten bei etwa 5 bis 6 und damit deutlich unter dem von Rohgülle (C/N:10)

- Der Abbau organischer Substanz bewirkt eine Überführung von organisch in anorganisch gebundenen Stickstoff und demzufolge einen höheren Anteil der Ammoniumfraktion (ca. 60 bis 70) am Gesamt-N in Gärresten.
- Gärreste mit Beimischung von Schweinegülle- und Bioabfallgärreste weisen tendenziell höhere Phosphorgehalte auf, höhere Gehalte an Ammoniumstickstoff, dagegen geringere TM-, und Kaliumgehalte sowie geringere Gehalte an organischer Substanz
- Hinsichtlich der Nährstoffe Magnesium, Kalzium und Schwefel sind keine eindeutigen Unterschiede festzustellen

Schadstoffe

Anhaltswerte für die Schwermetallgehalte in Gärresten im Vergleich zu Wirtschaftsdüngern sind in der Tabelle 2 zusammengestellt. Im Biogasprozess werden die absoluten Schwermetallmengen nicht verändert, durch den Bezug auf die TM und den Abbau organischer Substanz erhöhen sich die Gehalte an Schwermetallen nach der Vergärung. Die Schwermetallgrenzwerte der BioAbfV werden für die Elemente Pb, Cd, Cr, Ni und Hg

Tab. 2: Schwermetallgehalte von Gärresten und Wirtschaftsdüngern im Vergleich (KTBL, 2005; LTZ, 2008).

	Gärreste LTZ et al.2008	Ausschöpfung d. Deklarati- onswerte DüMV	Ausschöpfung d. Grenzwerte nach DüMV	Ausschöpfung d. Grenzwerte nach BioAbfV	Rindergülle KTBL 2005	Schweinegülle KTBL 2005
	mg/kg TM	%	%	%	mg/kg TM	mg/kg TM
Pb	2,9	2,9	1,9	< 5	3,2	4,8
Cd	0,26	26	17,3	17	0,3	0,5
Cr	9,0	3	- ¹⁾	9	5,3	6,9
Ni	7,5	18,8	9,4	15	6,1	8,1
Cu	69	14 ³⁾ (35)	- ²⁾	70	37	184
Zn	316	31 ³⁾ (158)	- ²⁾	80	161	647
Hg	0,03	6	3,0	< 5	–	–

¹⁾ nur Grenzwert für Cr(VI)

TM = Trockenmasse

²⁾ DüMV enthält keinen Grenzwert

³⁾ Deklarationswert für Wirtschaftsdünger

nur zu maximal 17 % ausgeschöpft. Die für Cu und Zn zu 70 und 80 %. Insgesamt sind die Gehalte an Schwermetallen auf ähnlichem Niveau wie die in Rindergülle. Schweinegülle weisen für Pb, Cd, Cu und Zn deutlich höhere Konzentrationen auf. Cu und Zn sind zwar den Schwermetallen zugehörig, sie sind aber auch essentielle Mikronährstoffe für die Tier- und Pflanzenernährung sowie für die mikrobiologischen Prozesse in der Biogasanlage. Sie werden sowohl in der Tierernährung als auch in NawaRo-Biogas-Anlagen zugesetzt. Daher wurden für die Elemente Cu und Zn in der Düngemittel-Verordnung keine Grenzwerte definiert. Bei den gegebenen Konzentrationen sind durch die Gärrestverwertung keine Belastungen des Bodens und der Gewässer zu erwarten.

Aus den jüngsten Untersuchungen der Gärresteigenschaften und dem „historischen Wissen“ kann abgeleitet werden, dass hinsichtlich der wichtigsten Eigenschaften eine Unterscheidung zwischen „neuen“ und „alten“ Gärresten nicht gemacht werden muss.

3 Verfügbarkeit und Wirkung von Stickstoff

3.1 Wirkung des mineralischen Stickstoffs und Ammoniakverluste

Es ist bekannt, dass der Ammonium-Stickstoff von organischen Düngemitteln dann dieselbe N-Wirkung wie mineralische Düngemittel (einschließlich der Gärreste) aufweisen, wenn die Ammoniakverluste auf ein Minimum reduziert werden können (Döhler, 1989).

In der Tabelle 3 sind Ammoniakverluste nach der Ausbringung von Wirtschaftsdüngern bei unterschiedlichen Temperaturverhältnissen zusammengefasst. Es wird deutlich, dass mit ansteigender Temperatur auch die Ammoniakverluste ansteigen. Besonders hohe Verluste sind zu erwarten, wenn Gärreste auf Pflanzen, Pflanzenrückstände bei hohen Temperaturen ausgebracht werden. Die niedrigsten Verluste sind zu erwarten, wenn dünnflüssige Gärreste, die schnell in den Boden sickern können, bei niedrigen Temperaturen ausgebracht werden. Alleine durch die Wahl des besten Ausbringtermins ist somit bereits eine signifikante Reduzierung der Ammoniakverluste möglich.

Die höheren pH-Werte von Gärresten im Vergleich zu Rohgülle wirken sich nur unwesentlich auf die Ammoniakverluste aus, da kurz nach der Ausbringung von Rohgülle die pH-Werte ebenfalls Werte von 8 bis 8,5 erreichen. Die Ammoniak-Emissionen unterscheiden sich daher nicht signifikant (Döhler, et al. 2001).

Tab. 3: Kumulative Ammoniakverluste nach Ausbringung von Wirtschaftsdüngern mit Breitverteiler ohne Einarbeitung bei unterschiedlichen Temperaturen innerhalb 48 Stunden (Döhler et al. 2002, verändert)

Wirtschaftsdünger	Ammoniakverluste in % des appl. Ammonium-N ¹⁾			
	5°C	10°C	15°C	25 °C, auf Stroh
Rindergülle, dickflüssige Gärreste ²⁾	30	40	50	90
Schweinegülle, dünnflüssige Gärreste ²⁾	10	20	25	70
Jauche			20	
Tiefstall- und Stapelmist			90	
Geflügeltrockenkot			90	

¹⁾ Emission vom verbliebenen NH₄-N nach der Lagerung

²⁾ Gärreste eingeschätzt wie Rinder- bzw. Schweinegülle, da keine Praxisuntersuchungen verfügbar.

3.2 Technik zur Minderung von Ammoniakverlusten

Für die Ausbringung von Gärresten auf landwirtschaftliche Flächen zum Zweck der Düngung werden die Techniken eingesetzt, die auch bei der Verwertung von flüssigen Wirtschaftsdüngern Verwendung finden. Die Ausbringung erfolgt mit Flüssigmisttankwagen, meist mit emissionsmindernder Verteiltechnik, die auch die Düngung wachsender Pflanzenbestände zu Zeiten höchsten Nährstoffbedarfs ermöglichen.

Ziel der Gärrestausrückführung muss es sein, die darin enthaltenen Nährstoffe mit ähnlicher Präzision wie bei der Düngung mit mineralischen Düngemitteln zu applizieren, um ein Maximum an Nährstoffen an die Pflanzenwurzel zu bringen und ein Minimum an Nährstoffverlusten zuzulassen. Für eine verlustarme und zielgenaue Verteilung der Gärreste kommen die folgenden Verteiltechniken zur Anwendung:

Schleppschlauchverteiler besitzen eine Arbeitsbreite von 6 bis 24 m, neuerdings werden auch solche mit 36 m Arbeitsbreite angeboten. Die Ablaufschläuche sind in der Regel in einem Abstand von 20 bis 40 cm zueinander angeordnet. Der Gärrest wird auf der Bodenoberfläche in etwa 5 bis 10 cm breiten Streifen abgelegt. Allgemein gilt, dass die Emissionsminderung umso höher ist, je höher der gedüngte Pflanzenbestand ist. In hohen Beständen konnten Emissionsminderungseffekte von über 70 % nachgewiesen werden.

Schleppschuhverteiler besitzen eine Arbeitsbreite von 3 bis 12, manchmal 18 m, die einzelnen Ablaufschläuche haben in der Regel einen Abstand von 20 bis 30 cm zueinander. Am Ende des Ablaufes befinden sich spezielle Verteileinrichtungen, die üblicherweise in Form einer schuhähnlichen Verstärkung bzw. Schleifkufe ausgeführt sind und an deren Ende der Gärrest abgelegt wird. Der Verteiler wird während des Ausbringvorganges durch den Pflanzenbestand (soweit vorhanden) geschleppt. Die Gärrestablage erfolgt in den obersten Bodenbereich (0 bis 3 cm), so dass Verschmutzungen des Pflanzenbestandes weitgehend vermieden werden.

Typische **Schlitzverteiler** besitzen eine Arbeitsbreite von 6 bis 9 m wobei die einzelnen Ablaufschläuche in der Regel in einem Abstand von 20 bis 30 cm zueinander angeordnet sind. Die Applikation erfolgt mithilfe einer schuhähnlichen Verstärkung, der eine Schneidscheibe (bzw. ein Stahlmesser) vorweg geführt wird und die den Boden aufschneidet und an deren Ende der Gärrest in den Schlitz abgelegt wird.

Die sogenannten **Güllegrubber** besitzen eine Arbeitsbreite von 3 bis 6 m, wobei die einzelnen Ablaufschläuche in der Regel in einem Abstand von 20 bis 40 cm zueinander angeordnet sind. Der Boden wird mit einem Grubberzinken bearbeitet und in dessen unmittelbarer Verlängerung der Gärrest während der Bearbeitung in den Erdstrom abgelegt. Daneben gibt es auch Scheibeneggen, bei denen der Boden mit Hohl-scheiben bearbeitet und der Dünger in gleicher Weise in den Erdstrom abgelegt wird.

Die Tabelle 4 fasst die Techniken zur Ausbringung von flüssigen Wirtschaftsdüngern und Gärresten zusammen. Festzuhalten bleibt, dass für die Ausbringung vielfältige Techniken zur Verfügung stehen, die entsprechend der Kulturart, der Entwicklungsstufe, und der Standortbedingungen eingesetzt werden können. Die technischen und standörtlichen Limitierungen bei der Ausbringung führen dazu, dass immer ein Teil des Ammoniums als Ammoniak in die Atmosphäre entweicht.

Tab. 4: Minderung der Ammoniakverluste nach der Ausbringung von flüssigen Gärresten¹ (Döhler et al. 2002, verändert)

Minderungs- techniken/ maßnahmen	Einsatzgebiete	Emissions- minderung [%] Gärrest		Beschränkungen
		dick- flüssig	dünn- flüssig	
Schlepp- schlauch- verfahren	Ackerland: unbewachsen	8	30	Hangneigung nicht zu stark, Größe und Form der Fläche, dickflüssiger Gärrest, Abstand der Fahrgassen, Bestandshöhe
	Bewuchs > 30 cm	30	50	
	Grünland: Bewuchs bis 10 cm	10	30	
	Bewuchs bis > 30 cm	30	50	
Schleppschuh- verfahren	Ackerland	30	60	wie oben, nicht auf sehr steinigen Böden
	Grünland	40	60	
Schlitz- verfahren	Grünland	60	80	wie oben, nicht auf steinigen, zu trockenen und verdichteten Böden, hoher Zugkraft- aufwand
Gülle-Grubber- verfahren	Ackerland	> 80	> 80	wie oben, nicht auf sehr steinigen Böden, sehr hoher Zugkraftbedarf, nur bedingt auf bewachsenen Ackerland (ggf. Reihenkulturen) einsetzbar
Unverzgl. Einarbeitung (innerh. 1 h)	Ackerland	90	90	mit leichtem Gerät (Egge) nach Primärbodenbearbei- tung, mit Grubber/Pflug nach Ernte

¹ Bisher liegen wenige Untersuchungen zur Emissionsminderung von Gärresten vor; die Aussagen wurden von Untersuchungen mit Rinder- und Schweinegülle abgeleitet.

3.3 Wirkung des organisch gebundenen Stickstoffs und Mineraldüngeräquivalente

Zur Abschätzung des verfügbaren Stickstoffes aus dem applizierten Gärrest im Anwendungsjahr kann mit Mineraldünger-Äquivalenten (MDÄ) gerechnet werden. Das MDÄ wird im Anwendungsjahr hauptsächlich von

der Verfügbarkeit des Ammonium-Stickstoffs bestimmt. In den Folgejahren werden nur noch geringe N-Mengen aus dem Gärrest nachgeliefert. Werden Ammoniakverluste weitgehend vermieden, beträgt das „kurzfristige MDÄ“ 50 – 70 %. Bei einer längerfristigen Gärrestanwendung (nach 10 – 15 Jahren) kann ein MDÄ von 60 – 80 % zugrunde gelegt werden (Döhler, 1996; Döhler et al, 1999; Gutser, 2006).

Die langfristige N-Wirkung von Gärresten ist eher gering, denn in den Folgejahren der Düngung werden nur noch geringe N-Mengen aus dem Gärrest nachgeliefert. Diese Nachlieferung beträgt nur noch ca. 3 % des organisch gebunden Stickstoffs pro Jahr. Somit erfolgt bei regelmäßiger Anwendung von Gärresten eine Anreicherung von organisch gebundenem N im Boden. Ein neues „N-Gleichgewicht“ stellt sich im Boden dann erst nach ca. 100 Jahren ein (Döhler, 1996).

Insgesamt kann davon ausgegangen werden, dass die Wirksamkeit des Stickstoffs der Gärreste wesentlich von Ausbringungsart und -zeitpunkt, der Witterung, der Bodenart und anzubauender Fruchtart bestimmt wird. Damit sind Gärreste in die Gruppe von organischen Düngemitteln einzuordnen, die vergleichsweise hohe Anteile pflanzenverfügbaren Stickstoffs im Anwendungsjahr aufweisen (Tabelle 5). Dieses Potenzial kann aber nur mit stringenten Strategien zur Vermeidung von Ammoniakverlusten genutzt werden.

Tab. 5: Stickstoffcharakteristik und N-Verfügbarkeit einiger organischer Dünger

N-Fraktion			Organische Dünger
im Anbaujahr verfügbar		langfristig verfügbar	
löslich NH ₄	org. gebunden leicht abbaubar	organisch gebunden schwer abbaubar	
65	5	30	Schweinegülle
50	5	45	Rindergülle
65	5	30	Gärreste
90	20	10	Jauche
10	30	40	Stallmist
10	10	80	Biokompost
5	30	65	Schlempe
0	60	40	Hormmehl

3.4 Nährstoffbilanz

Tabelle 6 zeigt beispielhaft die Nährstoffbilanz für Stickstoff und Phosphor einer Gärrestdüngung. Der Gärrest wird mit Schleppläuschen gefolgt von einer sofortigen Einarbeitung (Ammoniakverluste 10 %) ausgebracht. Die Mineralisierungsrate des organisch gebundenen Stickstoffs wurde mit 5 % im Anwendungsjahr veranschlagt. Bei einer Applikationsrate von 30 m³ Gärrest zum Fruchtfolgeglied Mais wird eine Gesamtstickstoffmenge von 143 kg dem Boden bzw. der Pflanze zugeführt. Von diesem Stickstoffpool

Tab. 6: Nährstoffbilanz am Beispiel Mais bei einer Gärrestmenge von 30 m³/ha · a (Applikation vor der Aussaat mit sofortiger Einarbeitung) (Faustzahlen Biogas, KTBL 2009)

Ertragserswartung [500 dt/ha]	N	P ₂ O ₅
	kg/ha	
Nährstoffabfuhr der Haupternteerzeugnisse	235	98
Nährstoffe in der nicht erntbaren Restpflanze	40	
Nährstoffbedarf Brutto	275	98
Vorhandene Nährstoffvorräte		
Kulturspezifischer Korrekturfaktor (- N _{min} Vorrat Frühjahr, + Rest N _{min} im Herbst, + Denitrifikation, - Nährstoffnachlieferung aus den Ernteresten)	28	15
Düngerbedarf	187	83
Ausgebrachte Nährstoffmenge durch Gärrest	143	56
– davon NH ₄ -N (65 %)	93	
– davon org.-geb. N	50	
Abzüglich NH ₃ -Verluste (10 %)	9	
abzüglich des im Anwendungsjahr nicht wirksamen org.-geb. N (95 %)	48	
zuzügl. „C/N-Effekt“ vergorenes Substrat	4	
bei erstmaliger Gärrestanwendung theoretisch pflanzenverfügbarer N	90	
Nach 5 jähriger Anwendung insgesamt verfügbar gewordener N	98	
– In % des ausgebrachten Gesamt-N	68	
Verbleibender Nährstoffbedarf bzw. -überschuss	89	28
Düngerbedarf durch Gärrest zu ...% gedeckt	52	67

sind im Anwendungsjahr bei erstmaliger Anwendung 90 kg pflanzenverfügbar. Bei 5-jähriger Gärrestanwendung können 98 kg Stickstoff angerechnet werden. Daraus ergibt sich eine Stickstoffverfügbarkeit (langfristiges MDÄ) von 68 %, bezogen auf den insgesamt ausgebrachten Stickstoff.

4 Günstige Einsatztermine für Gärreste

Bei der Wahl eines günstigen Ausbringtermins entsteht ein Zielkonflikt zwischen maximaler Emissionsminderungen und den pflanzenbaulichen Erfordernissen. Die weitreichendsten Emissionsminderungen sind mit der direkten Einarbeitung erreichbar. Diese ist auf unbewachsenem Ackerland im Sommer und Herbst durchführbar. Bei der Düngung von Reihenkulturen ist im Zuge der Ausbringung eine sofortige oberflächliche Einarbeitung mit Rollhacken oder Häufelscharen möglich. Die Ausbringmenge zu diesem Termin wird jedoch durch die Regelung der DüV (maximale Ausbringmenge von 40 kg anrechenbarem N) begrenzt.

Der Gärresteinsatz im Sommer und Herbst vor dem Anbau von Hackfrüchten ist aus pflanzenbaulichen Gründen überwiegend auf die

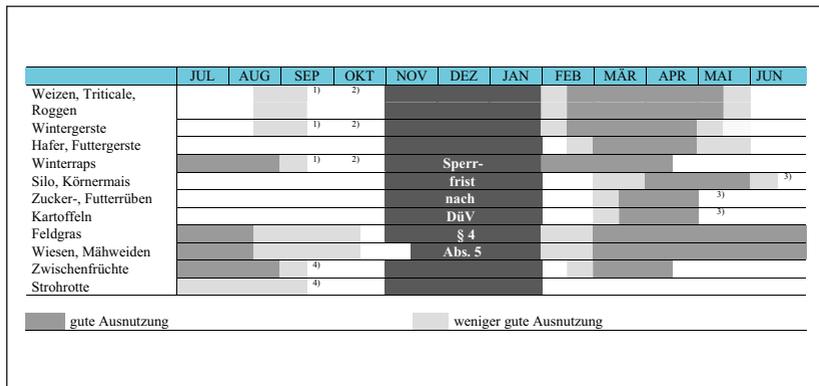


Abb. 1: Ausbringzeiträume für Gärreste (Quelle: KTBL (2008), Betriebsplanung Landwirtschaft 2000/2009, 752 S)

1) nur wenn N-Bedarf vorhanden, sofortige Einarbeitung.

2) maximal 40 kg Ammonium-N oder 80 kg Gesamtstickstoff/ha.

3) im März mit Nitrifikationshemmer, sofortige Einarbeitung.

4) maximal 40 kg Ammonium-N oder 80 kg Gesamtstickstoff/ha, sofortige Einarbeitung

Düngung von Zwischenfrüchten vor der Hackfrucht begrenzt. Der Nährstoffbedarf der Hackfrucht wird dann hauptsächlich aus dem Bodenvorrat gedeckt. Zwischenfrüchte spielen aber in vielen Regionen nur eine unbedeutende Rolle. Die Ausbringung zu Hackfrüchten, insbesondere Mais, erfolgt daher vor allem im Frühjahr.

Wird der Gärrest hingegen zu ungünstigen Zeitpunkten, z. B. im Herbst auf unbewachsenem Boden ausgebracht, besteht eine größere Nährstoffauswaschungsgefahr. Diese Gefahr kann zuverlässig minimiert werden, wenn die Ausbringung, an den Stickstoffbedarf der Fruchtart angepasst wird (Döhler 1996; AID/KTBL 2005).

Fazit

Anhand der Eigenschaften der Substrate lassen sich die wichtigsten Eigenschaften von Gärresten und die Grundsätze für deren Einsatz als Dünger ableiten.

Das Wissen für eine pflanzenbaulich sinnvolle und Gewässer schonende Düngung mit Gärresten ist seit langem vorhanden, dabei kann weitestgehend auf die Kenntnisse und Erfahrungen mit den flüssigen Wirtschaftsdüngern und den Ergebnissen von Versuchen aus Biogasprojekten der 1980er und 90er Jahre zurückgegriffen werden. Auch die Frage der Ammoniakemissionen ist mit „historischen Versuchen“ hinreichend geklärt (weniger die wiederholte Erfassung der Emissionen ist entscheidend als vielmehr die Tatsache, dass wirkungsvolle Maßnahmen ergriffen werden müssen um das Stickstoffpotenzial zu erhalten).

Die Forschung zur Gärrestdüngung sollte keinesfalls weiter im einjährigen Versuch betrieben werden. Zielführender wäre die koordinierte Bearbeitung von wenigen langjährigen Versuchen in mindestens 4 Agrarregionen Deutschlands. In diesen Versuchen sollte der Verbleib des C und N (Klimagasemissionen; Lachgas, Humusbildung) angemessen Berücksichtigung finden.

Literatur

- Döhler et al. (2002): Anpassung der deutschen Methodik zur rechnerischen Emissionsermittlung an internationale Richtlinien sowie Erfassung und Prognose der Ammoniakemissionen der deutschen Landwirtschaft und Szenarien zu deren Minderung bis zum Jahre 2010, Berlin
- Döhler, H. (2008): Energiebilanzen und Energieeffizienz von organischer und mineralischer Düngung im Ackerbau. In Energieeffiziente Landwirtschaft, KTBL Tagung in Fulda.
- Döhler, H. (1996): Landbauliche Verwertung stickstoffreicher Abfallstoffe, Komposte und Wirtschaftsdünger. In Wasser und Boden, 48 Jahrgang. 11/1996
- Döhler, H. K. Schießl, M. Schwab (1999): BMBF – Förderschwerpunkt, Umweltverträgliche Gülleaufbereitung und -verwertung. KTBL Arbeitspapier 272. KTBL Darmstadt.
- Döhler H; Menzi H, Schwab M (2001) : Emissionen bei der Ausbringung von Fest- und Flüssigmist und Minderungsmaßnahmen. KTBL / UBA - Symposium, Kloster Banz.
- Gutser, R. (2008): „Optimaler Einsatz moderner Stickstoffdünger zur Sicherung von Ertrag und Umweltqualität“, Vortrag vom 02.02.2006 zur Fachtagung Düngung in Böden (TU München)
- KTBL (2005): Schwermetalle und Tierarzneimittel in Wirtschaftsdüngern. KTBL-Schrift 435, 79 S.
- LTZ (2008): Inhaltsstoffe in Gärprodukten und Möglichkeiten zu ihrer geordneten pflanzenbaulichen Verwertung. Projektbericht, Landwirtschaftliches Technologiezentrum Augustenberg (LTZ).

Anschrift der Autoren:

*Helmut Döhler, Sven Grebe, Uwe Häußermann
Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V. (KTBL)
Bartningstr. 49, 64289 Darmstadt
E-Mail: h.doehler@ktbl.de*

7.

Biogasaufbereitung und -einspeisung

Biogaseinspeisung in das Erdgasnetz: neueste Marktentwicklungen im Bereich Gasaufbereitung und Netzeinspeisung

*Wolfgang Urban
Fraunhofer-Institut UMSICHT*

Die Aufbereitung und Einspeisung von Biogas in das Erdgasnetz ist derzeit das Thema der Biogasbranche: An mehr als 20 Biogasanlagen in Deutschland wird bereits aufbereitetes Biomethan in das Gasnetz eingespeist und zahlreiche weitere Anlagen werden in den nächsten Jahren folgen. Des Weiteren hat der Gesetzgeber 2008 zahlreiche Gesetzesnovellen – beispielsweise die Gasnetzzugangsverordnung (GasNZV) und die Novellierung des Erneuerbare-Energien-Gesetzes (EEG) – auf den Weg gebracht und damit die Voraussetzungen für weitere Projekte dieser Art deutlich verbessert.

Die Vorteile einer Einspeisung von Biogas in das Erdgasnetz liegen auf der Hand: zum einen ist eine räumliche und zeitliche Entkopplung zwischen Angebot und Nachfrage und damit eine sehr effiziente Biogasnutzung möglich und zum anderen können völlig neue Nutzungsoptionen, wie beispielsweise als Kraftstoff an Tankstellen oder als Beimischprodukt bei Endverbrauchern, erschlossen werden.

Allerdings ist dieser Nutzungspfad NICHT der Königsweg sondern lediglich eine mögliche Option, da hohe Aufbereitungskosten große Biogasanlagen erzwingen und der Anschluss an das Gasnetz nicht überall möglich ist. Eine dezentrale Verstromung von Biogas in KWK-Anlagen ist insbesondere dann attraktiver, wenn lokal eine Wärmenutzung oder /und die Verwendung von Wirtschaftsdünger möglich sind. Jedes Projekt ist also im Kontext seiner Umgebung zu entwickeln.

In der Konsequenz bedeutet dies, dass Biogasanlagen entweder bevorzugt in der Nähe von Wärmesenken (zumeist kommunale Versorgungskonzepte) oder in der Nähe von Erdgasnetzen (Biogaseinspeisung) errichtet werden sollten, um eine möglichst effiziente Nutzung des erzeugten

Biogases in KWK-Anlagen zu ermöglichen. Die nachfolgenden Ausführungen geben eine kurze Übersicht über Technologien und Kosten zur Biogasaufbereitung auf Erdgasqualität und basieren auf Studien von Fraunhofer UMSICHT [1, 2].

Biogasaufbereitung

Die Biogasaufbereitung auf DVGW-konforme Erdgasqualität umfasst die folgenden Arbeitsschritte: Biogasentschwefelung, Gastrocknung und als wichtigsten Schritt die CO₂-Abtrennung. Die Entschwefelung des Biogases sollte – wenn sie nicht parallel zur CO₂-Abtrennung erfolgen kann – aus wirtschaftlichen Gründen zweistufig erfolgen. Geeignete Grobent-
schwefelungsverfahren sind bei geringen H₂S-Belastungen im Rohgas (bei Vergärung von Energiepflanzen) die Sulfidfällung und bei hohen H₂S-Gehalten bzw. hohen Rohgasvolumenströmen Biowäscher mit externer Waschwasserregenerierung. Ein Lufteintrag in das Rohbiogas sollte eher vermieden werden, da Stickstoff die weiteren Aufbereitungskosten spürbar erhöht. Die Feinent-
schwefelung erfolgt adsorptiv mit seriell geschalteten Aktivkohlebehältern.

Auf dem Markt sind viele ausgereifte Aufbereitungsverfahren zur CO₂-Abtrennung verfügbar. Die Druckwasserwäsche (DWW) und die Druckwechseladsorption (PSA) verfügen über die meisten Referenzen in Europa. Beide Verfahren sind technisch ausgereift und Stand der Technik. Daneben werden einige weitere Waschverfahren, wie z. B. chemische Wäschen angeboten. Folgende Tabelle 1 gibt einen Überblick über die wichtigsten Verfahren und ausgewählte Hersteller.

In Tabelle 2 werden die wichtigsten CO₂-Abtrennverfahren anhand ausgewählter technischer Parameter miteinander verglichen. Der Verfahrensvergleich zeigt, dass Aminwäschen die höchste Produktgasqualität, den geringsten Methanschlupf und den geringsten spezifischen Strombedarf aufweisen. Im Vergleich zu PSA-Verfahren und Druckwasserwäschen benötigen Aminwäschen allerdings auch Prozesswärme auf einem hohen Temperaturniveau; z. B. das DEA-Verfahren von MT-Biomethan etwa 0,5 kWh/m³ Rohbiogas mit einer Vorlauf-temperatur von 160 °C (Herstell-
erangabe). Der Vorteil des deutlich geringeren Stromverbrauchs bleibt demzufolge nur erhalten, wenn preiswert regenerative Wärme zur Verfügung gestellt werden kann.

Tab. 1: Überblick über einige CO₂-Abtrennverfahren und Hersteller

Verfahren	Firmen	Auszug Referenzen
Druckwechseladsorption	CarboTech Engineering (D) Cirmac (NL) Xebec (CAN) Verdesis (CH)* ETW Energietechnik (D)*	D, S, A, CH: mehr als 20 Anlagen NL: Nuenen Mehrere in USA, CAN, CH
Druckwasserwäsche	Flotech (S, NZ) Malmberg (S) YIT (S), RosRoca (E, D)*	mehrere Anlagen in S, E, JP, D S: mehr als 20 Anlagen, D: 5 S: 5 Anlagen
Genosorb [®] -Wäsche	HAASE Energietechnik (D)	Jameln, Hannover, Rathenow
Aminwäsche	DGE (D) MT-Biomethan (D)* Cirmac (NL)	Lanken, CH: Zürich Rockstedt, Hardegens Göteborg, Boras
Membrantrennverfahren	Cirmac (NL) Air Liquide (F) TU Wien (A), Axiom* (A)	NL: Beverwijk Bruck a. d. Leitha (A)

* Lizenznehmer

Sowohl bei der Druckwasserwäsche als auch bei der Druckwechseladsorption ist das Rohbiogas vorher auf etwa 4 – 7 bar zu verdichten; das Rohbiogas ist darüber hinaus vor Eintritt in eine PSA-Anlage auch noch zu entschwefeln und zu trocknen.

Bei Aminwäschen ist im Vergleich zur PSA oder Druckwasserwäsche keine vorherige Verdichtung des Rohgases notwendig, da die Absorption drucklos abläuft. Bei einer nachfolgenden Einspeisung in das Gasnetz ist nur noch das aufbereitete Biomethan (ohne das Ballastgas CO₂) zu verdichten. Dieser wirtschaftliche Vorteil hebt sich allerdings mit steigendem Netzdruck wieder auf. Des Weiteren nivellieren sich die Kostenunterschiede zwischen den Verfahren mit zunehmender Anlagengröße.

Das Genosorb[®]-Verfahren erlaubt als einziges Verfahren eine gleichzeitige Biogasentschwefelung (H₂S-Limit 100 ppmv), eine CO₂-Abtrennung und eine Gastrocknung auf Taupunkte bis -20 °C.

Die Druckwasserwäsche kann bevorzugt an Standorten ohne Wärmebereitstellung eingesetzt werden. Das Waschmittel Wasser ist preiswert, überall verfügbar und leicht handhabbar. Druckwasserwäschen ermöglichen eine gleichzeitige Entschwefelung und CO₂-Abtrennung und sind

Tab. 2: Verfahrensvergleich anhand ausgewählter technischer Parameter

Kriterien	PSA	DWW	Genosorb®	MEA	DEA
Vorreinigung ^a	Ja	Nein	Nein	Ja	Ja
Arbeitsdruck [bar]	4 – 7	4 – 7	4 – 7	drucklos	drucklos
Methanverlust ^b	< 2 % / 6 – 10 ^b	< 1% / < 2 % ^b	< 1 % ^b	< 0,1 %	< 0,1%
Methananteil Produktgas ^c	> 96 %	> 97 %	> 97 %	> 99 %	> 99 %
Stromverbrauch ^d [kWh/Nm ³]	0,25	< 0,25	0,23 – 0,30	< 0,15	< 0,15
Wärmebedarf [°C]	Nein	Nein	70 – 80 ^e	160	160
Regelbarkeit in % der Nennlast	+/- 10 – 15 %	50 – 100 %	50 – 100 %	50 – 100 %	50 – 100 %
Referenzen ^f	> 20	> 20	3	3	2

^a Die Angaben beziehen sich auf Rohbiogas mit H₂S-Belastungen kleiner 500 mg/m³. Bei hohen H₂S-Gehalten, wie sie beispielsweise bei Gülle-Biogasanlagen anzutreffen sind, empfiehlt sich auch bei physikalischen Wäschen eine vorgelagerte Grobentschwefelung.

^b Der Methanverlust ist abhängig von den Betriebsbedingungen. Die hier angegebenen Werte sind entweder Garantieangaben des Herstellers oder Betreiberangaben: PSA-Anlagen der Fa. CarboTech < 2 %, PSA-Anlagen der Fa. QuestAir zwischen 6 – 10 %, Druckwasserwäsche Fa. Malmberg < 1 %, Fa. Flotech < 2 %, Genosorb-Verfahren HAASE Energietechnik < 1 %

^c Die Produktgasqualität ist prinzipiell variabel einstellbar; allerdings auf Kosten der Wirtschaftlichkeit oder des Methanverlustes. Die hier angegebenen Werte sind entweder Garantieangaben des Herstellers oder Betreiberangaben. Basis: luftfreies Biogas

^d Basis: Angaben in kWh/Nm³ Rohbiogas, Verdichtung des Produktgases auf 7 barü

^e Nach Angaben der Fa. HAASE Energietechnik ist eine interne Wärmebereitstellung mittels Wärmepumpe möglich.

^f Teilweise sind die angeführten Referenzanlagen Prototypen. Die Angaben in der Tabelle erheben keinen Anspruch auf Vollständigkeit.

sehr flexibel im Betrieb. Aufgrund relativ weniger beweglicher Anlagenteile (im Wesentlichen Verdichter und Pumpen) kann von einer hohen Anlagenverfügbarkeit ausgegangen werden. Die Anlage kann im laufenden Betrieb gewartet werden.

Sowohl die Druckwasserwäsche als auch das PSA-Verfahren können nennenswert Abwärme als Niedertemperaturwärme für externe Anlagen (z. B. Fermenter) zur Verfügung stellen. Die Druckwechseladsorption ist prädestiniert für die Aufbereitung von Biogasen mit nennenswerten Luftanteilen; die chemischen Wäschen sind bevorzugt einsetzbar, wenn Prozesswärme am Standort preiswert verfügbar ist.

Verfahrensentwicklungen

Führende Aufbereitungstechnikanbieter, wie z. B. die Fa. Carbotech gehen zunehmend dazu über komplette Systemlösungen – bestehend aus Entschwefelung, Aufbereitung, Abgasbehandlung, Trocknung, Gaseinspeisestation, Wärmerückgewinnungssystem für die Fermenterbeheizung etc. – anzubieten. Da es sich bei den führenden Aufbereitungsverfahren Druckwechseladsorption (Fa. Carbotech) und Druckwasserwäsche (Fa. Malmberg) um ausgereifte Technologien handelt, sind nennenswerte Kostenreduktionen kaum zu erwarten. Der Trend geht vielmehr dazu, die Verfahren immer weiter zu optimieren, in hoher Industriequalität und teilweise redundant zu bauen, noch stärker zu automatisieren und letzte Energieeffizienzpotenziale in der Anlagentechnik zu heben.

Das Ziel ist dabei vor allem, den Strombedarf und die THG-Emissionen (Abgas) zu senken, Synergieeffekte zwischen Biogasanlage, Aufbereitung und Einspeisung zur Hebung von Effizienzpotenzialen zu erschließen und die Anlagenverfügbarkeit wesentlich zu erhöhen. Alle führenden Anbieter bieten Abgasnachbehandlungssysteme zur Methaneliminierung im Abgas an; Wärmerückgewinnungssysteme für die Fermenterbeheizung werden ebenfalls zunehmend mit angeboten. Hervorhebenswert ist, dass bei PSA-Systemen entgegen den Entwicklungen in den vergangenen Jahren zu immer komplexeren Systemen (6 Adsorber), nun eine Trendwende zu sehr einfachen Zweiadsorbersystemen diskutiert wird. Der wesentlichste Vorteil wären sicherlich die deutlich geringeren Investitionskosten, der daraus resultierende hohe Methangasstrom im Abgas könnte für die Wärmeerzeugung genutzt werden. Angestoßen wird diese Diskussion sicherlich auch durch konkurrierende PSA-Anbieter aus dem Ausland, die auf den deutschen Markt drängen und investioptimierte PSA-Systeme anbieten.

Wirtschaftlichkeit

Schlagzeilen machen vor allem die großen Einspeiseprojekte mit einer Gasleistung von mehr als 1.000 Nm³/h Biomethan. Gasversorger und institutionelle Anlage- bzw. Projektentwicklungsgesellschaften dominieren die aktuellen Entwicklungen und investieren in starkem Maße in die Entwicklung solcher Projekte. Als Gründe können angeführt werden, dass gerade

die Entwicklung von Biogasprojekten mit Einspeisung hohe Anforderungen an die Planung stellen, nur begrenzt auf praktische Erfahrungen zurückgegriffen werden kann, viele komplexe Schnittstellen (z. B. Gasbilanzierung, Netzanschluss, rechtliche Aspekte) mit vielen Beteiligten zu beherrschen sind und solche Projekte einen enormen Kapital- bzw. Eigenkapitalbedarf benötigen. Projektvolumina von 10 Mio. sind eher die Regel als die Ausnahme.

Die hohen Aufwendungen zur Aufbereitung und Einspeisung des erzeugten Biomethans erzwingen sehr effiziente und spezifisch günstige Anlagengrößen. Biogaseinspeiseanlagen mit Gasleistungen über $500 \text{ Nm}^3/\text{h}$ Rohgas (ca. 1 MW_{el}) markieren hier die Schwelle zur Wirtschaftlichkeit. Entscheidend für den Erfolg von Einspeiseprojekten sind vor allem die Anlagengröße (je größer, desto spezifisch günstiger die Produktionskosten), die Substratpreise (Wirtschaftsdüngeranteil, Nawaropreise) und die Erlöse bei der Verwendung des eingespeisten Biomethans (z. B. EEG-Erlöse sowie hohe Wärmegutschriften erforderlich).

Vor allem die Substratbeschaffung erfordert eine langfristig orientierte und partnerschaftliche Zusammenarbeit unter aller Beteiligten und eine gute Standortplanung und -entwicklung. Bei einer KWK-Nutzung des Biomethans decken die EEG-Vergütungen in der Regel nur die Kosten entlang der gesamten Wertschöpfungskette; die eigentlichen Gewinne werden vorwiegend über die Wärmeerlöse generiert.

Bei der Biogasaufbereitung auf Erdgasqualität stellt die CO_2 -Abtrennung den aufwändigsten Verfahrensschritt dar. Die Übersicht über die spezifischen Aufbereitungskosten für die jeweiligen CO_2 -Abtrennverfahren in Abbildung 1 enthält neben den Kosten für die CO_2 -Abtrennung, Gastrocknung, die gegebenenfalls notwendige Feinentschwefelung und die Abgasnachbehandlung (Methanoxidation).

Der höchste Anteil an den Betriebskosten entfällt bei PSA-Anlagen und Druckwasserwäschen auf den Stromverbrauch, der bedingt durch die Biogasverdichtung verhältnismäßig hoch ausfällt. Ein hoher Anteil der elektrischen Antriebsleistung kann als Abwärme an den Kompressoren zurück gewonnen werden und für die Fermenterbeheizung genutzt werden.

Bei allen Verfahren ist eine starke Kostendegression mit steigender Anlagengröße zu beobachten. Des Weiteren nivellieren sich mit zunehmender Anlagengröße die Unterschiede zwischen den Verfahren, so dass bei der Technologieauswahl andere Merkmale wie Anlagenverfügbarkeit,

Produktgasqualität oder Referenzen gleichfalls wichtige Kriterien darstellen.

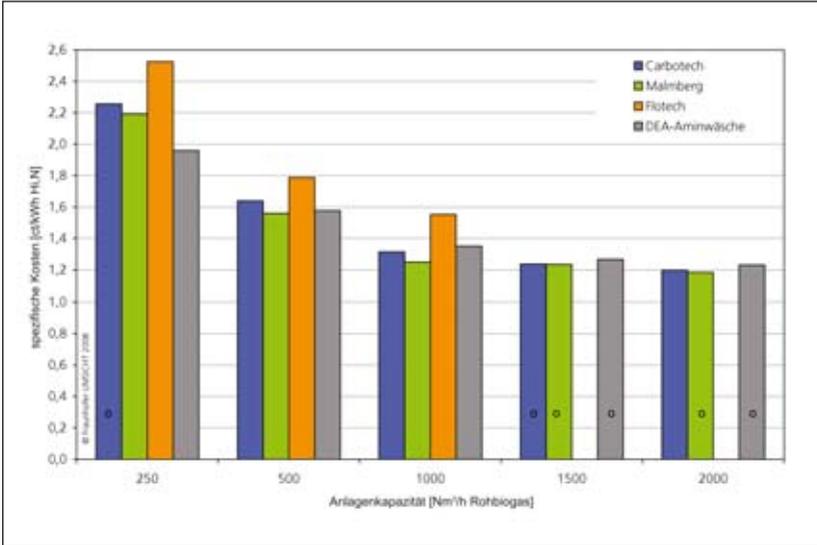


Abb. 1: Gegenüberstellung der spezifischen CO₂-Abtrennungskosten unterschiedlicher Anbieter in ct/kWh (H₂, Bezug Produktgas, Methanverluste berücksichtigt), ° Kostenschätzung der Autoren

Die Netzanschlusskosten sind z. B. wesentlich davon abhängig, welche Erdgasqualität mit welchem Netzdruck örtlich verteilt wird. Von der Gasqualität ist der Aufwand für die Brennwertkonditionierung (Luft und oder Flüssiggas, siehe hierzu auch ^[3]) und vom Netzdruck der Verdichtungsaufwand, der quadratisch mit dem zu erreichenden Druckverhältnis steigt, abhängig. Darüber hinaus sei darauf verwiesen, dass Biogasanlagen nur selten direkt neben Erdgasleitungen mit ausreichender physikalischer Aufnahmekapazität platziert werden können und oftmals noch Stichleitungen von der Biogasanlage zur nächsten Erdgasleitung zu ziehen sind. Je nach Bebauungsgrad können die Kosten hierfür stark variieren.

Eine Sensitivitätsanalyse der spezifischen Netzanschlusskosten in Abbildung 2 zeigt mögliche Schwankungsbereiche, wobei zu beachten ist, dass hier die Perspektive des Netzanschlussnehmers (des Einspeisers) eingenommen wird und keinerlei Betriebskosten, etwa für die Nachverdichtung

des Biomethans auf Netzdruck oder Konditionierungskosten (z. B. Flüssig-gaszugabe), enthalten sind. Diese sind nunmehr durch den Netzbetreiber zu tragen. Die Investitionskosten für die Einspeisestation und den physikalischen Netzanschluss teilen sich Netzbetreiber und Einspeiser laut novellierter Gasnetzzugangsverordnung (GasNZV) hälftig [4]. Grundsätzlich ist davon beachten, dass die Investitionskosten für die Einspeisestation nur wenig abhängig vom Gasdurchsatz sind; Einspeisestationen bei kleinen Gasdurchsätzen also überproportional teuer sind.

Die in Abbildung 2 aufgezeigten Schwankungsbereiche werden unter Experten als wahrscheinlich anzunehmende Einspeisefälle diskutiert. Dabei wird unterstellt, dass die physikalische Aufnahmekapazität des Erdgasnetzes mit steigender Druckstufe zwar zunimmt, gleichzeitig jedoch auch die Verfügbarkeit von Hochdruckleitungen in der Fläche mit steigender Druckstufe stark abnimmt. Die spezifischen Netzanschlusskosten können insbesondere bei kleinen Anlagen noch in einem sehr viel stärkeren Maße variieren als in Abbildung 2 dargestellt.

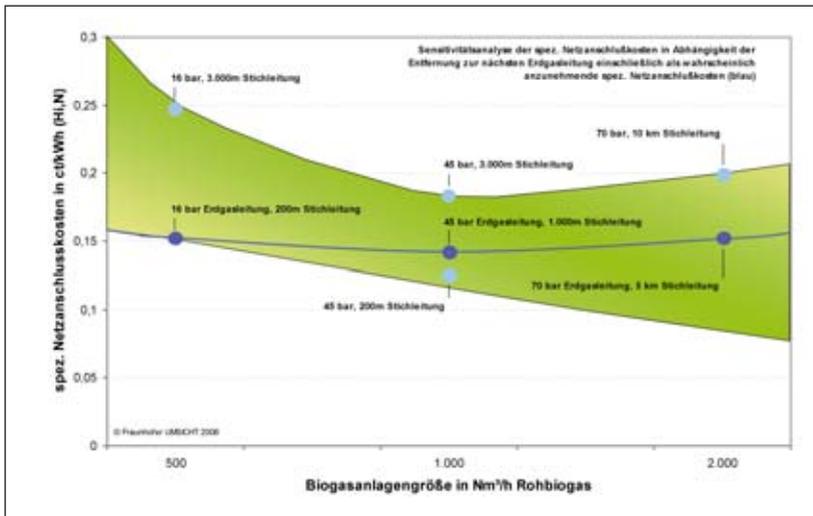


Abb. 2: Sensitivitätsanalyse der spezifischen Netzanschlusskosten

Die Verwendung des eingespeisten Biomethans in wärmegeführten Erdgas-KWK-Anlagen stellt bislang den einzig etablierten Verwertungspfad – neben der Verwendung als Beimischprodukt im Haushalts- oder

Kraftstoffbereich – dar, weshalb hier in einer Gesamtkostenbetrachtung in Abbildung 3 den Kosten für die Biomethanherzeugung, Einspeisung, Durchleitung und Verwendung in einem wärmegeführten Gasmotor-BHKW mögliche EEG-Erlöse (EEG 2009) und Wärmegutschriften gegenübergestellt werden.

Dabei wird sofort ersichtlich, wie stark die Kosten mit zunehmender Anlagengröße sinken und nahezu unabhängig von der Aufbereitungstechnologie sind. Die EEG-Erlöse sinken aufgrund des degressiv verlaufenden Technologie-Bonus mit steigender Anlagengröße (Schwellenwerte 350 bzw. 700 Nm³/h Biomethan). Die Sensitivitätsanalyse der erzielbaren Wärmeerlöse zeigt, dass der Technologie-Bonus durchaus überkompensiert werden kann und auch bei Projekten mit Einspeisung die Wärmenutzung entscheidend zum wirtschaftlichen Erfolg des Projekts beiträgt. Unter Berücksichtigung der derzeitigen EEG-Vergütungsstrukturen stellt eine Biogasanlagengröße von ca. 1.400 Nm³/h Rohbiogas bzw. 699 Nm³/h Biomethan das wirtschaftliche Optimum dar.

Von Bedeutung sind für die Rentabilität des Projektes die Energieverbrauchs-kosten der Anlage sowie die Anlagenverfügbarkeit. Ausfälle von

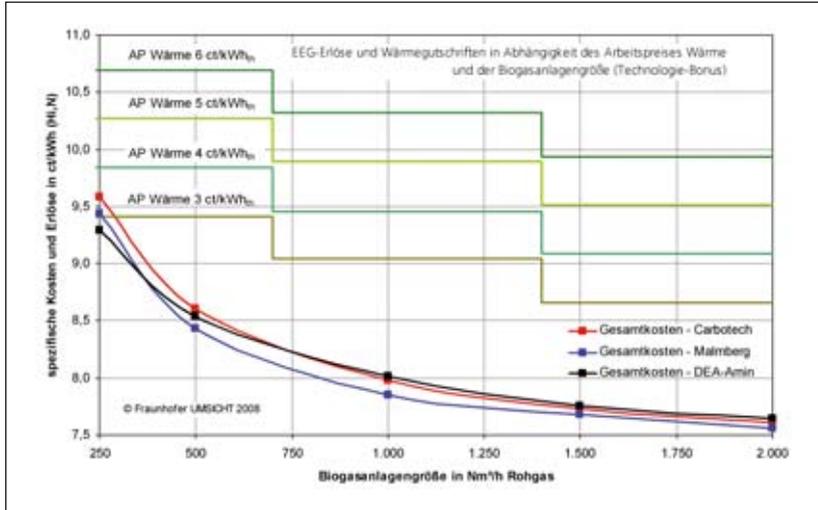


Abb. 3: Gegenüberstellung Gesamtkosten und erzielbare Erlöse (EEG und Wärmeverkauf) in ct/kWh_{HiV} Erdgas-BHKW, 90 % Wärmenutzung (NawaRo-BGA, Malmberg-DWW, Inbetriebnahme 2009)

Teilen der Biogaseinspeiseanlage können enorme Verluste bescheren (10 Tage Stillstand können Verluste von bis zu 150.000 € nach sich ziehen), weshalb mittlerweile alle wesentlichen Bauteile wie z. B. Verdichter oder Pumpen redundant ausgelegt werden. Die Energieverbrauchs-kosten – z. B. bei der Biogasaufbereitung – beeinflussen die Rentabilität des gesamten Projektes deutlich stärker als erhöhte Investkosten. Nur ein Beispiel: wenn durch investive Mehraufwendungen der spezifische Strombedarf der Aufbereitungsanlage um 0,01 kWh/Nm³ Rohgas gesenkt werden kann, erhöht sich der Gesamterlös auf 144.000 € bezogen auf die Lebenszeit der Anlage (Basis: Durchsatz 1.000 Nm³/h Rohgas, 8.000 Bh/a, Strombezug 0,12 ct/kWh).

Auswirkungen auf die Erdgasversorgung

Die Novellierung der GasNZV im Frühjahr 2008 brachte für den „Einspeiser“ deutliche Vereinfachungen bzw. Erleichterungen mit sich und regelte die Verantwortlichkeiten zwischen Einspeiser und Netzbetreiber neu. Da der Gesetzgeber auf eine ausführliche Ausformulierung der Verordnungsnovellen verzichtet hat, sind in den jetzt folgenden Projekten bzw. zwischen den beteiligten Verbänden die Umsetzungsdetails noch auszuhandeln. Insbesondere die Formulierungen hinsichtlich des Netzanschlusses und der Gasbilanzierung verunsichern sowohl Akteure als auch Verbände und sorgen dafür, dass viele Verträge Vorbehaltsklauseln enthalten. Spannend bleibt, inwieweit es den Beteiligten gelingt, den vom Gesetzgeber ermöglichten Gestaltungsfreiraum im positiven Sinne zu nutzen.

Die Konflikte zwischen Netzanschlussnehmer („Einspeiser“) und Netzbetreiber basieren im Wesentlichen auf unklaren Verantwortungsbereichen bzw. Schnittstellendefinitionen (GasNZV) und in formalen Fragen (Rechte u. Pflichten der Parteien; Geltungsbereiche, Planung u. Durchführung Netzanschlussprüfung). Darüber hinaus führen diametral verschiedene Interessenslagen zwischen Netzanschlussnehmer und Netzbetreiber, auch untereinander, zu vielen Konflikten, die zumeist in der Frage münden wer welche Kosten zu tragen hat. Die Bundesnetzagentur (BNetzA) ist als Ordnungsgeber derzeit mit ihren Versuchen, die Konflikte zu minimieren vor kaum lösbare Probleme gestellt, da nur wenig Praxiserfahrungen verfügbar sind, sich die Konfliktlinien quer durch die Branche (zwischen Netzbetreibern oder Einspeisern untereinander) ziehen

und viele Fragen privatrechtlicher Natur sind und durch die Marktteilnehmer oder Branchenverbände selbst zu lösen sind.

Fest steht auch, dass die Netzbetreiber enormen Herausforderungen bei der Integration des Biomethans in die Erdgasversorgung gegenüberstehen. Dies betrifft neben den Kosten für den Netzanschluss der Einspeiseanlagen, vor allem die Kosten für die Brenngaskonditionierung, die vermiedenen Netzentgelte (GasNZV) und den Netzbau (Rückverdichtung, Umbau Gasübergabestationen) selbst.

Bislang ist bei einer Einspeisung von Biomethan eine Brennwertanpassung mit LPG zur Einhaltung des Eichrechts (DVGW G685) üblich. Die enormen Kosten verdeutlichen, dass dringend alternative technische Lösungen zur Brenngaskonditionierung gefunden werden müssen. Aussichtsreich erscheinen hierfür rechnergestützte Brennwertnachverfolgungssysteme und eingeschränkt – nur in Orts- und wenigen Regionalverteilnetzen denkbar – die Schaffung von Brennwertbezirken; also die Entkopplung einzelner Netzbereiche und die Absenkung des Brennwertes in diesem Netzbereich. Allerdings ist zwischen den Vor- und Nachteilen bzw. den Einsatzgrenzen der jeweiligen Verfahren sorgfältig abzuwägen. Brennwertnachverfolgungssysteme sind beispielsweise in stark vermaschten Netzbereichen oder in Segmenten mit fluktuierenden Flussrichtungen bis hin zu stehenden Gasvolumina kaum einsetzbar. Mit der Schaffung von Brennwertbezirken (Netzentkopplung) müssen mitunter Freiheitsgrade bei der Netzführung (Speicherfähigkeit, Netzatmung, Redundanzen bei Versorgung) aufgegeben werden.

Fazit

Die zunehmende Anzahl von Biogasprojekten (Stand Oktober 2009: 21 in Deutschland) mit Einspeisung zeigt, dass wesentliche Hürden beseitigt wurden, solche Projekte bei guter Vorbereitung und Planung rentabel sind und die nötigen Technologien zur Verfügung stehen.

Erheblichen Entwicklungsbedarf besteht hauptsächlich auf legislativer Ebene; hier ist besonders auf den Netzanschluss, die Bilanzierung des Biomethans aber auch auf die höchst unterschiedliche Genehmigungspraxis zu verweisen.

Literatur

- [1] Urban, W. et.al.: Technologien und Kosten der Biogasaufbereitung und Einspeisung in das Erdgasnetz. Ergebnisse der Markterhebung 2007-2008. Verfügbar unter: www.biogaseinspeisung.de
- [2] Ramesohl, S.; Hofmann, F.; Urban, W.; Burmeister, F.: Analyse und Bewertung der Nutzungsmöglichkeiten von Biomasse. Studie im Auftrag von BGW und DVGW. 2006. Verfügbar unter: www.biogaseinspeisung.de
- [3] Burmeister, F.: Studie zur Einspeisung von aufbereitetem Biogas in eine L-Gasleitung. Studie im Auftrag der RWE WVE Netzservice GmbH, Oktober 2006
- [4] Verordnung zur Änderung der Gasnetzzugangsverordnung, der Gasnetzentgeltverordnung, der Anreizregulierungsverordnung und der Stromnetzentgeltverordnung (GasNZVuaÄndV) V. v. 08.04.2008 BGBl. I S. 693; Geltung ab 12.04.2008

Anschrift des Autors:

*Wolfgang Urban
Fraunhofer-Institut für Umwelt-, Sicherheits- und Energietechnik (UMSICHT)
Osterfelder Str. 3, 46047 Oberhausen
E-Mail: Wolfgang.urban@umsicht.fraunhofer.de*

Praxiserfahrungen bei der Substituierung von Erdgas durch Biomethan in Deutschland

Michael Beil
Fraunhofer-Institut IWES

BIOGASMAX

■ Projektedaten:

- EU-Forschungsprojekt
- 30 Partner aus 8 Nationen
- Gesamtbudget: 17 Mio. €
- Laufzeit: 01.01.2006 – 30.09.2010

■ Tätigkeiten IWES:

- Monitoring und Evaluierung aller Biogasproduktionsanlagen
- Monitoring und Evaluierung aller Biogasaufbereitungsanlagen
- Anwendung innovativer Technologien zur Biogasproduktion
- Wissenstransfer u.a. im Bereich Biomethanproduktion

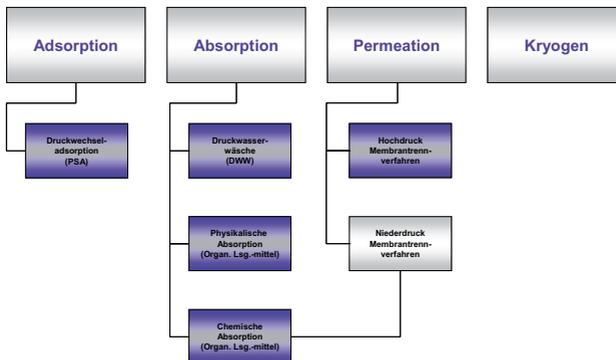
Welche Biogase werden für die Biomethanproduktion eingesetzt?

- Biogas aus landwirtschaftlichen Substraten
 - Primär in Deutschland und Österreich
- Biogas aus der Abfallvergärung
 - Deutschland: Beispiel WERLTE
 - Europa: Deutlich weiter verbreitet – oftmals als Co-Vergärung
- Klärgas
 - Deutschland: Nur eine Anlage in BOTTROP
 - Europa: Sehr verbreitet in Schweden
- Deponiegas
 - Deutschland: Keine Referenz (siehe Vortrag Herr Klaas)
 - Europa: Wenige Referenzen (Bsp. Niederlande)

© Fraunhofer IWES



Biogasaufbereitung

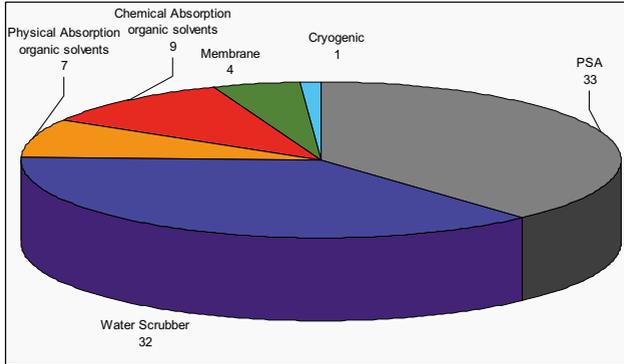


[SET]

© Fraunhofer IWES

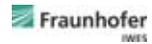


Biogasaufbereitung in Europa: Anzahl aktuell realisierter Anlagen

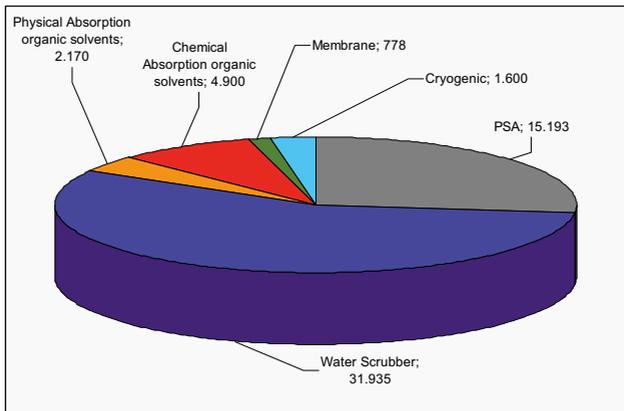


[IWES, 2009]

© Fraunhofer IWES



Biogasaufbereitung in Europa: Rohgaskapazitäten aktuell realisierter Anlagen [Nm³/h]

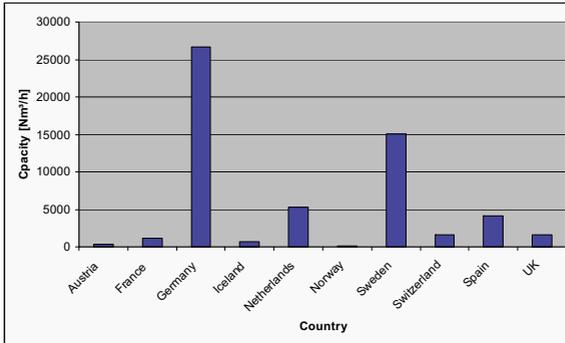


[IWES, 2009]

© Fraunhofer IWES



Biogasaufbereitung in Europa - Länderübersicht: Rohgaskapazitäten aktuell realisierter Anlagen [Nm³/h]

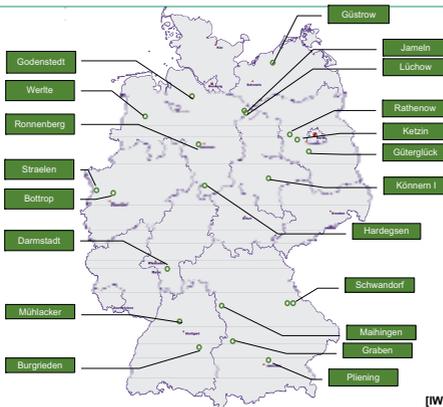


[IWES, 2009]

© Fraunhofer IWES



Stand der Biogasaufbereitung in Deutschland (Anlagen in Betrieb 08/2009)



[IWES, 2009]

© Fraunhofer IWES



Betriebserfahrungen

- **Materialqualität**
 - Bei der Wahl der Materialien für Kolonnen, Rohrleitungen, etc. sollten die korrosiven Eigenschaften des Rohgas- und u.U. des Abgasstroms bedacht werden – insbesondere dann, wenn keine Feinentschwefelung des Rohgases stattfindet.

- **Isolierungen**
 - Findet im Prozess eine Kühlung des Absorptionsmediums statt, sollten Kolonnen und Rohrleitungen isoliert werden, um Kondensatbildung an den Außenwandungen zu vermeiden.

© Fraunhofer IWES



Betriebserfahrungen

- **Beladungskapazitäten A-Kohle**
 - Insbesondere bei Klärgasen und Biogasen aus der Abfallvergärung kann die Zusammensetzung des Biogases stark variieren. Befinden sich z.B. organische Bestandteile im Rohgas, die neben Schwefelwasserstoff durch die Aktivkohle Co-absorbiert werden, kann dies zu deutlich geringeren Standzeiten des Filters führen. Redundante Auslegungen von Aktivkohlefiltern verringern hierbei die Wahrscheinlichkeit von Stillstandzeiten der Aufbereitungsanlage durch unvorhergesehenen Aktivkohleaustausch.

© Fraunhofer IWES



Biomethanverteilung

- Einspeisung in ein (vorhandenes) Erdgasnetz
 - Meisten Projekte in D: 16 bar
 - Wenige höhere Druckstufe (Pliening, Güstrow)
- Einspeisung in eine Biomethanleitung
- Straßentransport

© Fraunhofer IWES

Fraunhofer
IWES

Biomethantransport: Straße



[SET]

© Fraunhofer IWES

Fraunhofer
IWES

Biomethannutzungspfade

- Deutschland
 - KWK nach EEG
 - EG-Substitut für Wärmemarkt (Beimischprodukte für Haushalte und Industrie)
 - Kraftstoff (meist Beimischprodukte)
 - Andere

- International
 - Kraftstoff

© Fraunhofer IWES

Fraunhofer
IWES

Besonderheiten beim Betrieb von Biomethantankstellen ohne Erdgasnetz



[SET]

- Wird Biomethan als Kraftstoff vermarktet, ohne an ein Erdgasnetz angeschlossen zu sein, sollte neben dem Hochdrucklager ein Backup-Lager zu Verfügung stehen
- In Schweden wird dies oftmals durch ein LNG-Lager (verflüssigtes Erdgas) sichergestellt

© Fraunhofer IWES

Fraunhofer
IWES

Biomethanhochdrucklager



[ISET]

© Fraunhofer IWES

Fraunhofer
IWES

Biomethannutzung in Bern



[Bernmobil]

© Fraunhofer IWES

Fraunhofer
IWES

Biomethannutzung in Stockholm



[ISET]

© Fraunhofer IWES

Fraunhofer
IWES

Anschrift des Autors:

Michael Beil

Fraunhofer-Institut für Windenergie und Energiesystemtechnik (IWES)

Abteilung Bioenergie Systemtechnik

Rodenbacher Chaussee 6, 63457 Hanau

E-Mail: mbeil@iset.uni-kassel.de

Biogasanlagen – der Netzzugang aus technischer Sicht

Uwe Klaas, Andreas Schrader

Deutsche Vereinigung des Gas- und Wasserfaches e.V. (DVGW)

Inhalt des Vortrages ist das DVGW-Regelwerk für Biogasanlagen, deren erzeugtes Gas nach Aufbereitung in das Erdgasnetz eingespeist wird und die somit als Energieerzeugungsanlagen in den Geltungsbereich des Energiewirtschaftsgesetzes (EnWG) fallen.

Unter gastechnischem Aspekt gilt für diese Anlagen die Konformitätsvermutung in § 49, Abs 2 dieses Gesetzes hinsichtlich der Anwendbarkeit des DVGW-Regelwerkes. Insbesondere verdienen folgende technische Regeln des DVGW in diesem Bereich Beachtung:

1. G 260 (A) Gasbeschaffenheit
2. G 262 (A) Nutzung von Gasen aus regenerativen Quellen in der öffentlichen Gasversorgung
3. G 685 (A) Gasabrechnung
4. VP 265-1(P) Anlagen für die Aufbereitung und Einspeisung von Biogas in Erdgasnetze
 - Teil 1: Fermentativ erzeugte Gase; Planung, Fertigung, Errichtung, Prüfung und Inbetriebnahme

Die ersten dieser anerkannten Regeln der Technik sind per Änderungsverordnung u. A. in die Gasnetzzugangsverordnung (GasNZV) eingeflossen, während die Prüfgrundlage VP 265-1 zum Zeitpunkt von deren Inkrafttreten gerade erst veröffentlicht wurde.

Nicht im Näheren eingegangen wird in diesem Vortrag auf die DVGW-Regeln betreffend Gastransport, Gasverteilung, Odorierung, Gasmess- und Regeltechnik und Gasinstallationen sowohl im häuslichen als auch im gewerblich-industriellen Bereich: für das Erdgas-Biomethan-Gemisch als Ergebnis der Biogaseinspeisung gelten die gleichen Anforderungen wie für Erdgas allein, da ja auch die gleichen Verbrauchseinrichtungen mit den

Gasen zurecht kommen müssen.

Eine „anerkannte Regel der Technik“ ist dabei definiert als eine technische Festlegung, die von einer Mehrheit repräsentativer Fachleute als Wiedergabe des Standes der Technik angesehen wird. Damit sind gemeint u. A. DVGW-Arbeitsblätter, aber auch Normen des DIN und einiger anderer Organisationen wie z. B. des VDE im Bereich der Elektrotechnik.

Grundlegendste der genannten technischen Regeln ist das DVGW-Arbeitsblatt G 260 „Gasbeschaffenheit“. Es spezifiziert die wichtigsten Kennwerte der Gase in den Netzen der allgemeinen Gasversorgung in Deutschland und dient der Gewährleistung des sicheren Gasnetzbetriebs und der Funktionsfähigkeit der Gasverbrauchseinrichtungen. Diese Anforderungen gelten grundsätzlich für alle Gasverbrauchseinrichtungen. Das bedeutet, dass jedes Gasgerät entsprechend einer bestehenden Gasbeschaffenheit im Netz auf seine sichere Funktion mit diesem Gas geprüft worden ist, bevor es z. B. mit dem für seine Vermarktung notwendigen CE-Zeichen versehen wird.

Eine Ausnahme davon bilden lediglich die erdgasbetriebenen Fahrzeuge, für die seit Ende Januar 2009 mit dem Inkrafttreten der novellierten 10. Verordnung zum Bundesimmissionsschutzgesetz (10. BImSchV) die in manchen Punkten im Vergleich zu DVGW-G 260 strengeren Anforderungen der DIN 51624 vom Februar 2008 gelten. Da jedoch die Erdgastankstellen allesamt per Netz mit Gasen entsprechend DVGW G 260 versorgt werden, muss die Einhaltung der DIN 51624 ggf. durch technische Maßnahmen innerhalb der Tankstelle gewährleistet werden und ist somit für eine Biogaseinspeisung eigentlich irrelevant. Sie gilt jedoch auch für Tankstellen, die ausschließlich mit Biogas versorgt werden.

In der GasNZV wird Bezug genommen auf den Stand 2007 der DVGW-Arbeitsblätter G 260, G 262 und G 685. Es sollte immer die neueste Ausgabe des jeweiligen Arbeitsblattes zur Anwendung kommen, auch wenn sich die GasNZV jeweils auf den Stand von 2007 bezieht. Das Arbeitsblatt G 260 ist inzwischen überarbeitet worden und im Mai 2008 neu erschienen. Die hauptsächliche Änderung gegenüber der Vorauskgabe aus dem Jahr 2000 ist die weitere Absenkung des zulässigen Gesamtschwefelgehalts. Dieser beträgt nun für das unodorierte Gas absolut 30 mg/m^3 , also nicht mehr im Jahresmittel. Des Weiteren ist der zuvor enthaltene zulässige „Kurzzeitwert“ von 150 mg/m^3 vollständig entfallen.

Das Arbeitsblatt G 260 verweist für einige Gase auf die Möglichkeit, diese dem Erdgas zuzusetzen oder das Erdgas durch diese Gase zu erset-

zen, vorausgesetzt, dass das resultierende Gemisch oder neue Gas die Grenzen für Erdgas H oder Erdgas L, die das Arbeitsblatt spezifiziert, einhält. Dieses ist für die Funktion der Gasverbraucheinrichtungen erforderlich. Ist ein solches Gas mit dem Erdgas vollständig kompatibel, so dass es dieses auch vollständig ersetzen könnte, spricht man von einem Austauschgas. Weicht es hingegen in seinen Eigenschaften vom Grundgas (Erdgas) ab, spricht man von einem Zusatzgas. Die Zumischung von Zusatzgasen ist begrenzt durch die vom Arbeitsblatt gesetzten Grenzen. Eine Zumischung von Biogas in Austauschgasbeschaffenheit ist demzufolge immer möglich, und es kommt in absatzschwachen Zeiten im Sommer bereits jetzt vor, dass kleinere Netze vollständig durch eine einspeisende Biogasanlage versorgt werden. Bei Aufbereitung des Biogases lediglich auf Zusatzgasbeschaffenheit besteht die Gefahr, dass bei Auftreten von weiteren Einspeisern deren Gas abgelehnt werden muss, weil das dann resultierende Gemisch nicht mehr in den Grenzen des Arbeitsblattes G 260 liegt und somit ein sicherer Betrieb der Gasverbrauchseinrichtungen nicht länger gewährleistet ist. Damit wäre dann ein Diskriminierungsfall gegeben.

Das DVGW-Arbeitsblatt G 262 „Nutzung von Gasen aus regenerativen Quellen in der öffentlichen Gasversorgung“ ist bereits im November 2004 erschienen und enthält einige wenige Grenzwerte für Gasbestandteile, die vor Allem in regenerativ erzeugten Gasen, weniger jedoch im Erdgas vorkommen. Deshalb enthält das Arbeitsblatt G 260 diese Grenzwerte für Kohlenstoffdioxid und Wasserstoff nicht. Andere Gasbegleitstoffe, die weder im Arbeitsblatt G 260 noch im Arbeitsblatt G 262 aufgeführt sind, dürfen derzeit nicht mit in die Erdgasnetze eingespeist werden. Ziel des Arbeitsblattes war seinerzeit, die Gasnetze insgesamt für Biogase zu öffnen und die durchaus vorhandenen Befürchtungen und Ängste vieler Netzbetreiber hinsichtlich der Auswirkungen einer Biogaseinspeisung zu begrenzen.

Nachdem auf der Basis dieser Regel erste Einspeisungen ermöglicht wurden, die sich insgesamt technisch bewährt haben, wird das Arbeitsblatt G 262 derzeit überarbeitet mit der Zielsetzung, die Gasnetze auch für einige andere Begleitstoffe regenerativ erzeugter Gase zu öffnen, ohne dass negative Auswirkungen auf die Gasnetze oder die angeschlossenen Gasverbrauchseinrichtungen auftreten. Für einige Stoffe wird man dabei sinnvolle Grenzwerte schaffen, die derzeit noch in der Diskussion sind. Beispielsweise sind Siloxane, die vor Allem in kommunalen Klärgasen vorkommen,

solch ein zu begrenzender Begleitstoff, da sie sich in höherer Konzentration schädlich für Gasmotoren auswirken können.

Das Arbeitsblatt G 685 „Gasabrechnung“ ist im November 2008 neu erschienen. Zwar ist auch für dieses in der GasNZV der Stand von 2007 angezogen, jedoch gilt für dieses Arbeitsblatt die aktuelle Fassung, da diesem Arbeitsblatt die aktuellen eichrechtlichen Vorschriften zugrunde liegen. Es dient der Abrechnung thermischer Energie und Leistung und enthält Verfahren zur Ermittlung von Daten für die Abrechnung von Gasen. Für seine Einhaltung ist, auch nach GasNZV § 41 f, Abs. 2, jeweils der Netzbetreiber zuständig. Da es für vermaschte Netze die Zusatzanforderung enthält, dass der Abrechnungsbrennwert innerhalb einer Abrechnungsperiode nur um $\pm 2\%$ vom mittleren Brennwert abweichen darf und die Zumischraten von Biogasen in das Netz in Abhängigkeit vom Gasabsatz aus diesem Netz über das Jahr erheblich schwanken können, ergibt sich daraus für viele Netzbetreiber die recht kostenintensive Konsequenz, das Biogas durch Zumischung höherer Kohlenwasserstoffe aufzukurburieren, also dessen Brennwert zu erhöhen. Das liegt daran, dass fermentativ erzeugtes Biogas praktisch nur einen Kohlenwasserstoff enthält, Methan. Viele Erdgase enthalten jedoch, je nach Provenienz, einen mehr oder weniger hohen Anteil höherer Kohlenwasserstoffe wie Ethan, Propan, Butan und einige weitere, und haben deshalb einen Brennwert, den auch noch so gut aufbereitetes Biogas nicht erreichen kann.

Derzeit das jüngste technische Regelwerksdokument des DVGW für die Einspeisung von Biogasen ist die Prüfgrundlage VP 265-1 „Anlagen für die Aufbereitung und Einspeisung von Biogas in Erdgasnetze – Teil 1: Fermentativ erzeugte Gase; Planung, Fertigung, Errichtung, Prüfung und Inbetriebnahme“ vom April 2008. Es enthält technische Anforderungen an die Sicherheit von Biogasanlagen und Netzanschlüsse und gilt im Wesentlichen für folgende Anlagenteile:

- Biogasaufbereitungsanlage (BGAA);
- Biogaskonditionierungsanlage (BGKA);
- Biogaseinspeiseanlage (BGEA).

Die Befolgung der Anforderungen dieser Prüfgrundlage, die vermutlich 2010 in ein Arbeitsblatt münden wird, ist eine Voraussetzung für eine technisch sichere Biogaseinspeisung. Ein Sachverständigenwesen auf Grundlage der VP 265-1 befindet sich derzeit im Aufbau.

Die Prüfgrundlage ist von anerkannten Fachleuten der Anlagentechnik im deutschen Gasfach unter Mitwirkung von Fachleuten der Biogas-

anlagenhersteller, des Fachverbands Biogas e.V. und der gewerblichen Berufsgenossenschaften erstellt worden.

Sie geht ein auf die Überwachung möglicher giftiger (H_2S) oder auch wassergefährdender (chemische Gaswaschverfahren) Stoffe, die Auswahl geeigneter Werkstoffe, die gefahrlose Ableitung von in den Rohbiogasen vorhandenen Begleitstoffen. Ebenso werden die Gasverdichtung, Messung und Odorierung beschrieben.

Eine technische Besonderheit von Biogasanlagen ist die Möglichkeit der Gasrückströmung von Anlagenteilen mit einem höheren Betriebsdruck in Anlagenteile, die mit einem niedrigeren Druck betrieben werden. Prozessbedingt kann diese innerhalb einer Biogasanlage durchaus gewollt sein. Sie muss jedoch entsprechend kontrolliert erfolgen, wobei die einzelnen Anlagenteile gegen Überschreitung ihres maximal zulässigen Betriebsdruckes abzusichern sind. Eine Rückströmung z. B. aus dem Netz, in das eingespeist wird, ist jedoch durch rückflussverhindernde Bauteile auszuschließen.

Einen eigenen Abschnitt in der Prüfgrundlage nimmt die Absicherung gegen unsichere Betriebszustände ein, um Gefährdungen, die von der Anlage selbst oder deren Bauteilen sowie vor- und nachgeschalteten Anlagen ausgehen, auszuschließen. Dazu gehört die z. B. das Procedere bei Betriebsstörungen, Ausfall von Fremdenergien, die Vermeidung unzulässiger Drücke oder auch das Eindringen von Außenluft, also die Vermeidung explosionsfähiger Atmosphären in Teilen der Anlage.

Auch die Gaskühlung ist ein Thema, insbesondere, weil viele Gasleitungen im Bereich der Gasverteilung, aber auch im Bereich der Biogasanlage selbst sowie die Stichleitung zur Netzeinspeisung häufig aus Kunststoffen sind, die Temperaturen dauerhaft über $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ nicht widerstehen würden. Prozessausgangstemperaturen von z. B. $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ bei manchen Aufbereitungsverfahren würden ohne Gaskühlung also sowohl zum sicherheitstechnischen als auch zum Abrechnungsproblem.

Weitere Themen sind der Schutz von Anlagenteilen und Rohrleitungen gegen Witterungseinwirkungen einschließlich UV-Bestrahlung, Anfahren durch Fahrzeuge und elektrische Aufladung, die Anforderungen an den Explosionsschutz – einschließlich einer Beispielsammlung zur Ex-Zonen-Einteilung, die sichere Leitungsverlegung auch von Abblase-, Entspannungs- oder Abgasleitungen, die Anforderungen an die Gasbeschaffenheitsmessung (eichfähige Messgeräte) sowie allgemeine Anforderungen an Bau und Ausrüstung der Anlagen. Schließlich wird die Durchführung

von Prüfungen der Anlagen beim Hersteller sowie am Aufstellungsort durch befähigte Personen und Sachverständige beschrieben.

Neben der bereits erwähnten Überarbeitung des DVGW-Arbeitsblattes G 262 und dem Aufbau eines Sachverständigenwesens auf Grundlage der VP 265-1 befassen sich verschiedene Gremien mit folgenden, biogasrelevanten Themen und Regelwerken:

- Entwicklung eines TSM (Technisches Sicherheits-Managementsystem) auch für Betreiber von Biogasanlagen (Grundlage: Entwurf DVGW-Arbeitsblatt G 1030).
- Erarbeitung einer technischen Regel für Verdichter in Biogaseinspeieranlagen (Diese sind in der Regel kleiner dimensioniert als sonst in der Gasversorgung üblich).
- Erarbeitung einer technischen Regel für Rohbiogasleitungen.
- Erarbeitung technischer Grundlagen und Regeln für die thermische Gaserzeugung aus Biomasse.

Für den Betreiber eines Gasnetzes, in das Einspeisungen erfolgen sollen, sind vor der Einspeisung neben den genannten technischen Regeln noch folgende Punkte abzuklären:

- Die Gaseinspeisung muss kontinuierlich möglich sein. Einschränkungen der Biogaseinspeisung z. B. durch saisonal bedingten, minimalen Gasabsatz sind aufgrund der meist nur geringen Speicherkapazität der Biogasanlagen kaum möglich.
- Natürlich muss, insbesondere bei der Verdichtung, das Druckniveau des Netzes berücksichtigt werden.
- Die lokale Netzstruktur muss berücksichtigt werden. Entstehen aufgrund der Einspeisung neue Misch- und Pendelzonen? Wenn ja, wie wirken sich diese aus?
- Es muss für eine ausreichende Durchmischung des Erdgases mit dem eingespeisten Gas gesorgt werden. Die Bildung von Gaspfropfen insbesondere in Pendelzonen kann sich bei sensiblen Gasverbrauchseinrichtungen sehr negativ auswirken.
- Insgesamt ist den Anforderungen sensibler Gasabnehmer, die Gas nach einer vertraglichen Spezifikation beziehen, die über die Anforderungen von DVGW-G 260 hinausgeht, besondere Beachtung zu gewähren.
- Falls die Zumischung von Propan oder Propan/Luft-Gemisch notwendig ist, müssen die möglichen daraus resultierenden Probleme (Kondensation, Absenkung der Methanzahl unter 70, messtech-

nische Berücksichtigung des Propananteils) vor Inbetriebnahme abgeklärt werden. Im Fall besonders hochkaloriger Grundgase kann die Zumischung insbesondere von Biogasen mit niedrigerem Methananteil aus technischen Gründen unmöglich sein!

- In den nächsten 10 – 15 Jahren wird der Großteil der Netze mit Erdgas L aufgrund des Niedergangs der L-Gasproduktion auf Erdgas H umgestellt werden. Dieses sollte bei Einspeisung von Biogas in Erdgas-L-Netze von vornherein bedacht werden.

Trotz der genannten Anforderungen und Einschränkungen: eine technisch sichere Einspeisung von Biogasen in Erdgasnetze ist fast überall möglich und, zumindest ab einer bestimmten Anlagengröße, langfristig auch wirtschaftlich. Energetisch sinnvoll ist sie allemal, da an den meisten Standorten von Biogaserzeugungsanlagen zwar auch eine Einspeisung von Strom möglich ist, die bei der Stromerzeugung entstehende Wärme jedoch aufgrund der Entfernung zu möglichen Wärmekunden nur schwer zu vermarkten ist. Diese Entfernung lässt sich mittels des in weiten Teilen bereits vorhandenen Erdgasnetzes überbrücken und die Abnahmestruktur für Biogas diversifizieren.

Anschrift der Autoren:

*Uwe Klaas, Andreas Schrader
Deutsche Vereinigung des Gas- und Wasserfaches e.V. (DVGW)
Josef-Wirmer-Str. 1 – 3, 53123 Bonn
E-Mail: klaas@dvgw.de*



**Rohstoffbereitstellung
und -effizienz**

Optimierter Energiepflanzenanbau für Biogasanlagen

Christoph Strauß

Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft (TLL)

Einleitung

Der Anbau von Energiepflanzen basiert auf den gleichen Grundlagen, die aus der Nahrungs- und Futtermittelproduktion seit langem bekannt sind. Dazu zählt unter anderem eine der Pflanzenart angepasste Standortwahl, Bodenbearbeitung und Bestandesführung, sowie die Einhaltung von Fruchtfolgen.

Vor dem Hintergrund der in den vergangenen Jahren deutlich vorangeschrittenen und weiter zu erwartenden Ausweitung der Energiepflanzenproduktion, ist es wichtig nachhaltige Produktionssysteme zu entwickeln, die parallel zur Nahrungsmittel- und Futterproduktion Biomasse zur energetischen Nutzung bereitstellen und alle Potenziale naturverträglicher Produktion ausnutzen.

Aktuell macht Mais den größten Anteil der in Biogasanlagen verwendeten pflanzlichen Substrate aus. Bei der Betrachtung der Anforderungen an Substrateigenschaften, wird jedoch deutlich dass aktuell und unter den Bedingungen Mitteleuropas eine Vielfalt von Fruchtarten zur Verfügung steht, die für eine energetische Nutzung in Frage kommen.

Vor diesem Hintergrund wurden im Rahmen des, von der FNR geförderten, Verbundprojektes „EVA“ seit 2005 Anbausysteme getestet, die pflanzenbaulich, ökonomisch und ökologisch fundierte sowie praxisrelevante Aussagen zur optimalen Bereitstellung von Energiepflanzen für die Produktion von Biogas liefern sollen. Im Zentrum des Verbunds steht ein Fruchtfolgeversuch mit deutschlandweit fünf Fruchtfolgen, die in sieben Bundesländern einheitlich angebaut werden. Darüber hinaus werden Fragestellungen zu alternativen Anbausystemen wie dem Zweikulturen-Nutzungssystem oder dem Mischfruchtanbau, zur Nutzung von mehrjäh-

rigem Ackerfutter, zur optimalen Intensität des Faktoreinsatzes (Beregung, Bodenbearbeitung, Düngung und Pflanzenschutz) sowie zu Substrat-eigenschaften und Biogasausbeute bearbeitet. Abgerundet werden die Fragestellungen durch eine ökologische und ökonomische Begleitfor-schung. Durch die vernetzte Bereitstellung von Daten ist die Betrachtung der gesamten Prozesskette von der Aussaat bis zur Biogaserzeugung gewährleistet. Mit einer zweiten Projektphase (2009 – 2012) wird darauf abgezielt, Ergebnisse zu vertiefen und durch neue Aspekte zu ergänzen, wie beispielsweise die Düngung mit Gärresten.

Fruchtfolgesysteme und Fruchtarten

Abbildung 1 zeigt, wenn auch nicht standortdifferenziert, die kumulierten Ertragsresultate der verschiedenen Fruchtfolgen der beiden um ein Jahr zeitversetzten Versuchsanlagen. Deutlich wird die unterschiedliche Produktivität der Fruchtfolgen.

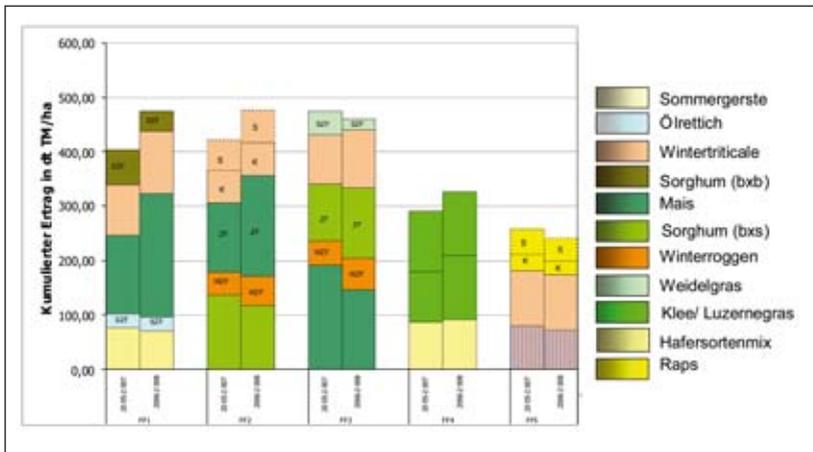


Abb. 1: Kumulierte Trockenmasseerträge der deutschlandweit einheitlich geprüften Fruchtfolgen der beiden zeitversetzten Versuchsanlagen (2005 – 2007 und 2006 – 2008) im Mittel der Versuchsstandorte.

Am besten schneiden die Fruchtfolgen mit einer Kombination von C₃- und C₄-Pflanzengliedern ab. Dabei wird ersichtlich, dass auch im Rahmen

der Fruchtfolgesysteme Mais die Fruchtart ist, die über die Bandbreite der unterschiedlichen Standorte betrachtet die höchsten Biomasseerträge liefern kann. Betrachtet man allerdings die Erträge der einzelnen Standorte in den unterschiedlichen Jahren, so wird deutlich, dass die Fruchtart Mais mit Ertragsrisiken in den Trockenjahren verbunden ist. Insbesondere auf den trocken-sandigen Diluvialstandorten Ostdeutschlands, wie beispielsweise Güterfelde, zeigten die Maiserträge 2006 einen Einbruch auf deutlich unter 100 dt TM/ha. In diesem Zusammenhang zeigt sich, dass Sorghumarten (*sorghum bicolor* x *bicolor* bzw. *sorghum sudanense* x *bicolor*) ein vergleichbares Ertragsniveau erreichen können. So wurden sowohl in Dornburg 2005¹ als auch in Güterfelde² 2006 höhere Erträge mit Sudangrasybriden erzielt (175,53 vs. 163,49 dt TM/ha bzw. 99,46 vs. 88,24 dt TM/ha). Aus weiterführenden Versuchen, beispielsweise im Rahmen des Sorghumprojektes (Zander & Röhricht, 2009) ist bekannt, dass die Schwankungsbreite innerhalb der Sorghumarten hoch ist, wobei einige Sorten deutlich höhere Erträge erzielen können. Es ist jedoch zu erwähnen, dass eine Vielzahl von Sorghumkreuzungen (einige Sorten *sorghum bicolor* x *sudanense* ausgenommen) nicht die erforderlichen Trockenmassegehalte zur Ernte im Herbst erreichen. Ein weiterer Punkt sind die gegenüber Mais um etwa 10 % geringeren, auf dem erhöhten Lignin- bzw. Rohfasergehalt beruhenden, Gasausbeuten (vgl. auch Herrmann et. al, 2009 in diesem Band).

Die Auswirkungen beider Aspekte auf die Wirtschaftlichkeit des Anbaus wird aus Abbildung 3 deutlich. Beispielhaft sind Ergebnisse dargestellt, in denen Mais und Sorghum (b x s) ein vergleichbares Ertragsmenge erzielen konnten.³ Geringeren Gaserträgen und demzufolge auch Leistungen stehen trotz Einsparungen bei Saatgutkosten insgesamt aufgrund der deutlich höheren zu transportierenden Frischmasse höhere Kosten gegenüber. Absicherung höherer Erträge, besserer Verdaulichkeiten im Fermenter und bessere Abreife sollten daher weitere Züchtungsziele sein.

¹ Standort: AZ 65, 596 mm; E-Weizen-Region

² Standort: AZ 29, 574 mm; Roggen-Kartoffel-Region

³ Annahmen für die ökonomische Bewertung: Leistungsseitig: 28,1 €/t32% Maissilage bzw. 0,31 €/m³ Methan bzw., Kosten für Ernte und für Gärrestaubsbringung nach KTBL (2008a) und KTBL (2008b); Feld- Schlag- Entfernung 5 km, Schlaggröße 10 ha; Kostendegression bei zunehmender Erntemenge/ha (12 €/t FM bei 20 t FM/ha bis 6 €/t FM bei 70 t FM/ha) und Gärrestmenge/ha (4,80 € bzw. 4,20 €/t bei 10 bzw. 30 t/ha). Zur Methodik vgl. Toews (2009a) bzw. Toews (2009b) in diesem Band.

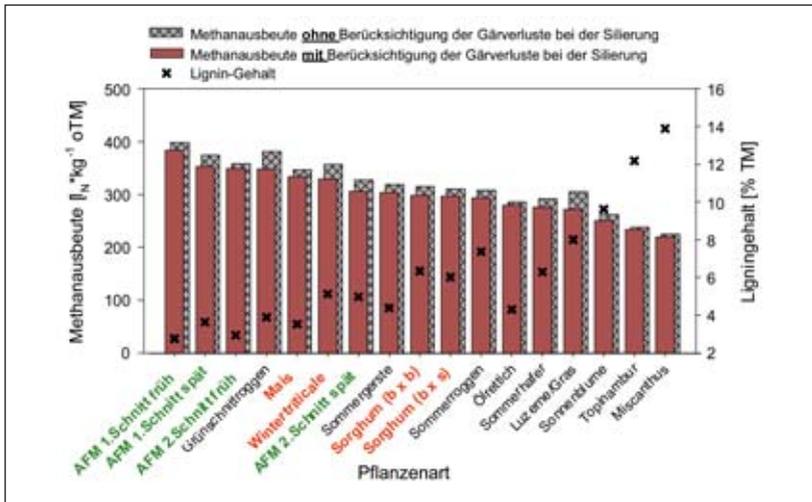


Abb. 2: Methanausbeuten unterschiedlicher Kulturarten. Ermittelt in Batch-Tests nach VDI 4630. (Quelle: Herrmann, Heiermann, Idler, Scholz, 2009).

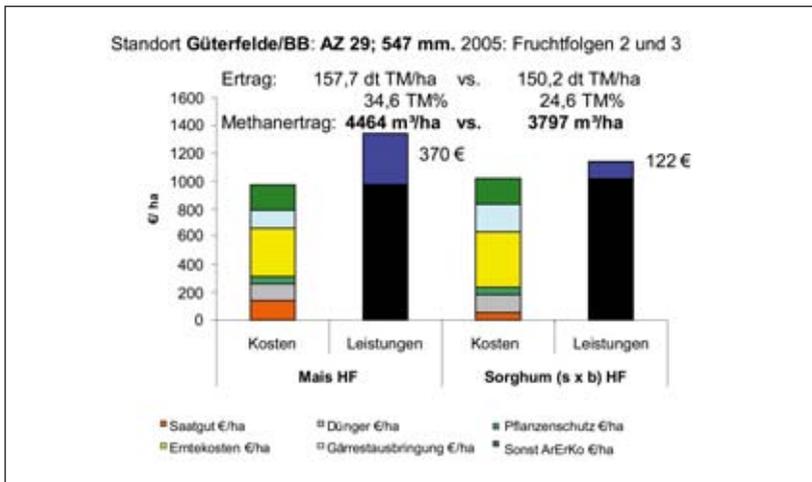


Abb. 3: Gegenüberstellung von Gewinnbeiträgen der Versuchsvarianten Mais und Sorghum (bicolor x sudanense) am Standort Güterfelde 2005. (Quelle: Verändert nach Toews und Kuhlmann, 2009)

Ganzpflanzengetreide ist aufgrund der hohen Gasausbeute als gut verwertbares Substrat einzuschätzen. Ein maximaler Ertrag zur Teigreife kann allerdings in vielen Fällen das Überschreiten einer guten Silierfähigkeit bedeuten. Die Ausrichtung des Erntedatums sollte daher am Trockenmassegehalt erfolgen. Aus ökonomischer Sicht zeigt die Gegenüberstellung zu Mais, dass bei vergleichbaren Leistungen Kosten insgesamt deutlich geringer sind. Daraus lässt sich schlussfolgern, dass der Anbau von Getreide-GPS auch bei im Vergleich zu Mais geringeren Erträgen interessant ist. Als Hauptfrucht bieten Getreidearten zusätzlich den Vorteil einer sicheren Abreife.

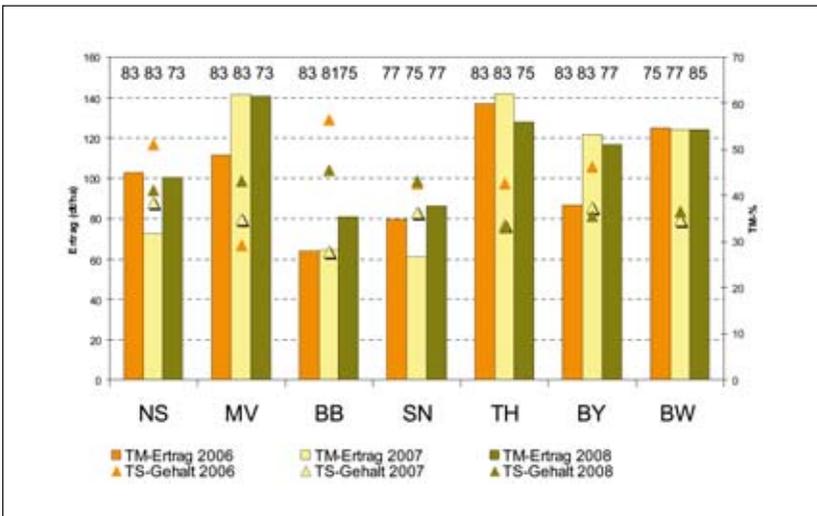


Abb. 4: Erträge und Trockenmassegehalte von Wintertriticale an den Standorten des EVA-Fruchtfolgeversuches 2006 – 2008.

Dabei sind die Möglichkeiten einer Einbindung von Wintergetreide in Fruchtfolgen vielfältig. So lassen sie sich auch als Zwischenfrucht oder als Erstfrucht (geerntet Anfang Juni zur Milchreife) im Rahmen des so genannten Zweikultur-Nutzungssystems nutzen. Ziel des Systems ist es, nach der Ernte dieser Winterung Anfang Juni und anschließender flacher Bodenbearbeitung eine Sommerung (z. B. Mais, Sorghum, Sonnenblumen oder Gemenge) anzubauen, so dass die Summe beider Erträge insgesamt zu einer Ertragssteigerung führen kann. Dreijährige Ergebnisse des Versuchs

zur Zweikultur-Nutzung zeigen, dass sich in Abhängigkeit vom Standort und Jahr beispielsweise für die Kombination Roggen-Mais gegenüber Mais in Hauptfruchtstellung eine Ertragssteigerung von bis zu 80 dt TM realisieren lässt. Über die verschiedenen Standorte und die drei Versuchsjahre gemittelt liegen die Ertragssteigerungen allerdings mit etwa 36 dt TM (ohne Zwischenfrucht) deutlich geringer. Gleichzeitig ergibt sich das Problem der mangelnden Abreife der Zweitkulturen. Unter den im Rahmen der ökonomischen Begleitforschung getroffenen Annahmen steht den Ertragssteigerungen, die mit diesem System möglich werden eine deutliche Kostensteigerung gegenüber, welche die höheren Leistungen nicht kompensieren können.

Zukünftig wird es erforderlich sein die Vorteilswirkungen des Systems, beispielsweise die Entzerrung von Arbeitsspitzen oder die Gewährleistung einer ganzjährigen Bodenbedeckung weiter zu diskutieren. Sicher ist aber, dass für einen Erfolg des Systems Sommerungen, welche bereits in kurzer Zeit bei ausreichender Massebildung eine gute Abreife erzielen von Seiten der Züchtung zur Verfügung stehen müssen.

Für die Einbindung in Anbausysteme kommen auch mehrjährige Ackergras- bzw. Leguminosengrasmischungen in Betracht, vorausgesetzt die Biogasanlage ist auf eine Verwertung derartiger Substratmischungen ausgelegt. In einem Satellitenversuch wurden verschiedene Mischungen getestet. Einheitlich über alle Standorte kam die Mischung „A3“, d. h. eine Mischung aus Welschem, Deutschem und Bastardweidelgras zum Einsatz. Diese und andere weidelgrasbetonte Mischungen lieferten vor allem auf den niedersächsischen Standorten hohe Erträge.

Anhand einer Gegenüberstellung zweier Schnittregimes konnte festgestellt werden, dass durch eine geringere Anzahl von Schnitten die Trockenmasseerträge höher ausfallen. Zwar sinkt im Mittel die spezifische Methan- ausbeute des Substrats, insgesamt betrachtet ist der Methanhektarertrag jedoch höher. Abbildung 4 zeigt exemplarisch die vergleichende Betrachtung der Ertragsentwicklung der angebauten Mischungen bei reduzierter Schnitthäufigkeit (3 – 4 Schnitte) an den einzelnen Standorten.

In einigen Regionen können mit Ackergräsern Erträge erzielt werden, die in einer Größenordnung mit Mais liegen. Obwohl im Fruchtfolgeversuch insgesamt geringere Erträge mit der „Ackergrasfruchtfolge“ erzielt wurden, zeigen sich auch hier an einzelnen Standorten gute Erträge. Auf dem im Vorwaldgebiet des Bayerischen Waldes auf 460 m ü. NN gelegene Standort Ascha konnte mit einem Klee-grasgemenge, welches als Unter-

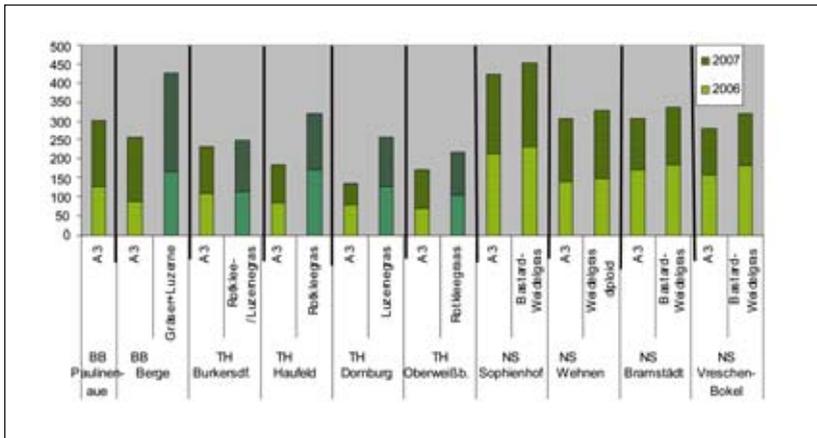


Abb. 5: Erträge der Ackerfuttermischungen mit reduzierter Schmitthäufigkeit 2006 und 2007 an Standorten in Brandenburg, Niedersachsen und Thüringen; dargestellt ist die Vergleichsmischung A3 und die jeweils ertragsstärkste Mischung. (Quelle: Benke, Rieckmann, 2008)

saat in Sommergerste angelegt wurde im Ansaatjahr und erstem Hauptnutzungsjahr 2006 ein kumulierter Ertrag von 167,4 dt TM/ha geerntet werden. Damit liegt der Ertrag unter den in diesem überdurchschnittlich warmen Jahr sehr erfolgreichen Energiemaissorten (S 280) (vgl. Abbildung 1), erreicht aber Erträge einer standortangepassten Silomaisorte (S 220).

Bei deutlich höheren Erntekosten der insgesamt vier Schnitte (1x im Ansaatjahr, 3 Schnitte im Hauptnutzungsjahr) sind auch in diesem Fall die Deckungsbeiträge des Maisanbaus bei gleichem Ertrag höher. Dennoch zeigt sich, dass sich auch mit dem Anbau von Ackerfuttermischungen positive Gewinnbeiträge erwirtschaften lassen. In einer umfassenderen Betrachtung ist dieses Ergebnis sicher auch ein Hinweis darauf, Biogas als wirtschaftliche Nutzungsalternative für Dauergrünlandflächen zu betrachten.

Über die vorgenommene ökonomische Gegenüberstellung hinausgehend, ist allerdings auch die humusmehrende Eigenschaft der Ackergras-mischungen hervorzuheben. Sowohl in der dynamischen Humuseinheitenmethode (vgl. Hülsbergen) als auch der VDLUFA-Methode wird Mais als stark humuszehrend charakterisiert. Aus der von Willms et al. (2009)

vorgenommenen Humusbilanzierung für die verschiedenen Standorte lassen sich daher eine Reihe von wesentlichen Schlussfolgerungen für die Fruchtfolgegestaltung ableiten: Ohne Rücklieferung von Humus-C über Gärsubstrate führen Fruchtfolgen mit hohen Anteilen als Ganzpflanzen genutzter Fruchtfolgeglieder zu einem Humusabbau im Boden, auch Zwischenfrüchte können nur zu einem kleinen Teil zu einem Ausgleich führen. Nach der dynamischen Humuseinheitenmethode ist dieser Abbau auf den leichten Diluvialstandorten Ostdeutschlands besonders stark ausgeprägt.

Tab. 1: Anbaubedingte Änderung der Humusvorräte für ausgewählte Energiepflanzen. Daten: Teilprojekt 1, 1. Anlage, Ernte 2005 – 2008. (Quelle: Willms et al., 2009)

Fruchtart	Anz. Prüfglieder n	TM-Ertrag Median t ha ⁻¹	anbauspezifische Änderung des Humus-C	
			dyn. HE-Methode, Median kg • ha ⁻¹	VDLUFA kg • ha ⁻¹
Getreide, Hf	56	8,1	-595	-280 bis -400
Silomais, Hf, Zf	37	17,6	-969	-560 bis -800
Sudangras, alle	19	12,3	-609	–
Futterhirse, alle	12	9,0	-592	–
Grünschnittroggen Wzf	24	4,8	87	120 bis 160
Einfähriges Weidelgras, Szf	8	3,7	81	100 bis 150
Klee- und Luzerngras, Ackergras	15	10,9	829	600 bis 800

Es kommt daher der Rücklieferung von humusbildenden Substanzen über Gärreste eine besondere Bedeutung zu. Dabei ist die Frage danach, in welchem Umfang die im Gärrest verbleibende organische Substanz zu einer Bildung von Humus im Boden führen kann, noch Gegenstand wissenschaftlicher Diskussionen. Wie bei Dominik (2009, in diesem Band) und Willms et al. (2009) dargestellt, könnten die Reproduktionswerte auch unter denen der bislang im VDLUFA-Standpunkt verwendeten Quotienten liegen.

Sollte dies der Fall sein, so wird es insbesondere auf Standorten mit hohem Humusbedarf und geringen Humusquellen aus dem Marktfrucht-

anbau für eine Erhaltung der Bodenfunktionen und Ertragsleistung erforderlich sein, zusätzlich zu Fruchtfolgen mit C₃- und C₄-Pflanzengliedern, wie beispielsweise Fruchtfolge 3 (vgl. Abbildung 1) humusmehrende Fruchtarten in betriebliche Fruchtfolgesysteme einzubauen. Für detaillierte Aussagen zur Bedeutung von Gärsubstraten für die Nährstoff- und Humuskreisläufe bleiben Ergebnisse zu umfassenden Düngeversuchen sowie Grundlagenforschungen abzuwarten.

Fazit

Mais bleibt auf den meisten Standorten die ertragreichste Massekultur, die auch im Rahmen der Fruchtfolgegestaltung eine zentrale Rolle einnehmen wird. Dennoch zeigt sich, dass für die Gestaltung vielfältiger Fruchtfolgen Ergänzungen möglich sind:

- Sorghum kann unter Bedingungen trocken-warmer Standorte teilweise höhere Erträge als Mais liefern. Da Methangasausbeuten deutlich unter denen von Mais liegen und viele Sorten erforderliche Trockenmassegehalte nicht erreichen, sind weitere Züchtungsbemühungen erforderlich.
- Ganzpflanzengetreide zeigt insbesondere auf den ostdeutschen Lössstandorten und den besseren Diluvialstandorten hohe Erträge. Diese gehen einher mit geringen Produktionskosten, einer hohen Ertragssicherheit und guten Einpassungsmöglichkeiten in Getreide-Raps-Fruchtfolgen.
- Die Kombination von Winterungen und Sommerungen, wie beispielsweise im Rahmen des so genannten Zweikultur-Nutzungssystems kann auf einer Vielzahl von Standorten zu einer Steigerung der Flächenleistungen führen. Die Bewertung des Systemversuchs zeigt allerdings, dass höhere Erträge in vielen Fällen allerdings nicht die zusätzlichen Kosten decken können. Nicht zuletzt war die mangelnde Abreife der Zweitkulturen ein Problem. In Zukunft ist daher auch im Rahmen dieses Systems verstärkt auf Sorten zu setzen, die in einer nur geringen Wuchsdauer eine vernünftige Abreife zeigen. So könnte ein Teil der wirtschaftlichen Defizite des Systems deutlich verbessert werden.
- Mit Blick auf gesamte Fruchtfolgen ist neben der Betrachtung von Nährstoff- auch die Betrachtung von Humusbilanzen entscheidend.

Einerseits können betriebliche Nährstoffkreisläufe geschlossen werden, sowie Humusmehrende (Ackerfutter) und humuszehrende Kulturarten (Mais) für eine nachhaltige Bewirtschaftung der organischen Bodensubstanz kombiniert werden. Auf der anderen Seite ist bei hohen Flächenerträgen zu prüfen, wie betriebliche Düngeregime in Kombination mit Marktfrucht- und Futterbau zu gestalten sind, um zu hohe Nährstoff- und Humussalden zu vermeiden. Für detaillierte Aussagen zur Bedeutung von Gärsubstraten für die Nährstoff- und Humuskreisläufe bleiben Ergebnisse zu umfassenden Düngeversuchen sowie Grundlagenforschungen abzuwarten.

Quellen

- Benke, M.; Rieckmann, C. (2008): Mehrjährige Ackerfuttermischungen. In: Vetter, A. et al. Standortangepasste Anbausysteme für Energiepflanzen. Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe (Ed.) Gülzow.
- Heiermann, M.; Idler, C., Herrmann, C., Scholz, V. (2009): Abschlussbericht des Teilprojekt 4 (FKZ: 22002605). Ermittlung des Einflusses der Pflanzenart und der Silierung auf Substratqualität und Biogasausbeute in Labor und Praxis. ATB Potsdam.
- Stülpnagel, R.; Buttlar, C. von; Heuser, F. (2008): Teilprojekt 6 (FKZ 220022805). Systemversuch zum Zweikulturnutzungssystem auf sechs Standorten im Bundesgebiet. Schlussbericht. Universität Kassel/ Witzenhausen.
- Toews, T.; Kuhlmann, F. (2009). Ökonomische Bewertung des Anbaus und der Nutzung von Energiepflanzen. Teilprojekt 3 (FKZ 22002505). Endbericht. Justus-Liebig-Universität Gießen.
- Willms, M.; Glemnitz, M.; Hufnagel, J. (2009). Schlussbericht zu Teilprojekt II: Ökologische Folgewirkungen des Energiepflanzenanbaus. Abschlussbericht. FKZ 22002405. Müncheberg.
- Zander, D.; Röhrich, C. (2009): Sorghumhirsen als Biogassubstrat. Anbauempfehlungen und Ertragspotenziale. Im Internet verfügbar unter: http://www.smul.sachsen.de/landwirtschaft/download/20090610_Vortrag_Feldtag_Trossin_Zander.pdf

Die Abschlussberichte des Verbundvorhabens „EVA“ werden voraussichtlich ab Ende Oktober 2009 auf der Internetseite www.tll.de/vbp verfügbar sein.

Anschrift des Autors:

*Christoph Strauß
Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft (TLL)
Abteilung Pflanzenproduktion und Agrarökologie
Apoldaer Str. 4, 07778 Dornburg
E-Mail: christoph.strauss@tll.thueringen.de*

Desintegrationsverfahren – Aufwand und Nutzen für die Biogaserzeugung

*Björn Schwarz, Eberhard Friedrich, Hannelore Friedrich,
Karin Jobst, Marc Lincke
Fraunhofer-Institut IKTS*

Einleitung

In über 90 % der landwirtschaftlichen Biogasanlagen Deutschlands wird Maissilage als Inputstoff eingesetzt (Weiland, 2009). Aufgrund der Preisentwicklung und der Konkurrenz zur Nahrungsmittelproduktion ist außerdem der Einsatz alternativer Rohstoffe für die Biogaserzeugung wie beispielsweise Stroh verstärkt in der Diskussion.

Generell weisen die eingesetzten Substrate einen hohen Anteil an Lignozellulose auf. Dieser Stoffverbund ist eine Kombination aus Zellulose- und Hemizellulosefasern, welche durch Lignin verklebt und umschlossen sind. Den größten Anteil stellen dabei Zellulosen und Hemizellulosen dar, welche aus sehr langen Ketten von verschiedenen 5- und 6-fach Zuckern bestehen. Ein anaerober Abbau dieser gut zu verwertenden Zuckerbausteine wird jedoch maßgeblich von der Erreichbarkeit und dabei neben der reaktiven Oberfläche von der Ausbildung der Ligninschicht beeinflusst. Letztere stellt eine natürliche Barriere für den mikrobiellen Abbau aufgrund ihrer phenolischen Struktureinheiten dar.

Für die mikrobielle Umsetzung der organischen Makromoleküle ist eine Hydrolyse, die Aufspaltung in Monomere durch Wasseranlagerung, die zwingende Voraussetzung. Die Geschwindigkeit der Hydrolyse ist dabei abhängig von der Substratart (chemische Bindungsform), der Größe der reaktiven Oberfläche und den Milieubedingungen.

Unter Desintegration wird definitionsgemäß die Zerkleinerung bzw. Auflösung von bestehenden Strukturen durch die Einwirkung äußerer Kräfte verstanden. Durch die gezielte Anwendung von Desintegrationsmethoden, kann die Geschwindigkeit der Hydrolyse deutlich erhöht

werden. Außerdem werden je nach Beanspruchungsart und -energie maßgebliche Eigenschaften der Gärsubstrate beeinflusst (z. B. Partikelgrößenverteilung und -formverteilung, Partikelstruktur, Schüttdichte u. a. m.). Neben diesen Eigenschaftsänderungen können Desintegrationsverfahren aber auch das Handling der Substrate für den Prozess der Biogaserzeugung deutlich verbessern (Transportverhalten durch Viskositätsänderungen der Suspension, Aufschwimmverhalten).

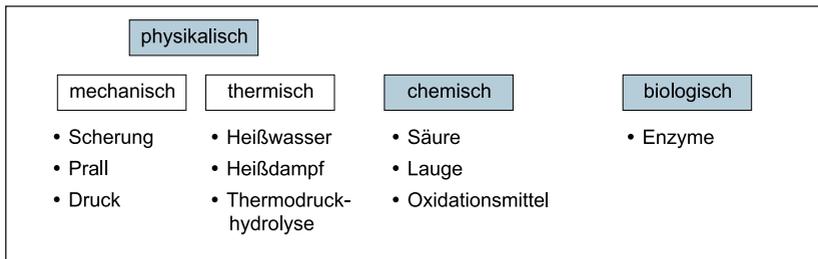


Abb. 1: Schematischer Überblick möglicher Desintegrationsverfahren

Nachfolgend werden zur mechanischen und biologischen Desintegration eigene Ergebnisse präsentiert, die im Rahmen eines vom Freistaat Sachsen und der Europäischen Union geförderten Verbundvorhabens (Autorenkollektiv 2007) aktuell ermittelt wurden und in einem weiteren laufenden Verbundprojekt (Verbundvorhaben 2008 – 2010) erarbeitet werden. Detaillierte Untersuchungen werden in diesem Vorhaben zur Anwendung und Wirkung von Enzymen von der TU Dresden, Institut für Lebensmittel- und Bioverfahrenstechnik durchgeführt und in diesem Beitrag zur Diskussion gebracht. Die Erkenntnisse werden durch Feststellungen aus der umfangreichen Fachliteratur ergänzt. Die Ausführungen zur thermischen und chemischen Desintegration beschränken sich ausschließlich auf Angaben aus der Literatur.

Mechanische Desintegrationsverfahren

Zur Bewertung der mechanischen Vorbehandlung von pflanzlichen Substraten wurden umfangreiche Untersuchungen unter Einsatz unterschiedlicher Zerkleinerungsanlagen hauptsächlich mit Maissilagen, aber auch mit verschiedenen Stroharten und anderen Substraten pflanzlicher

Herkunft vorgenommen. Von den genutzten Zerkleinerungstechniken (Mahlen, Schneiden, Extrudieren) zeigten Extruder für feuchte bzw. silierte Substrate (Trockenrückstand TR=20 – 50 %) eindeutige Vorteile bezüglich Zerkleinerungseffekt und Betriebsverhalten. Auch beim Einsatz von Weizenstroh (TR=90%) konnte mit Hilfe von Extrudern eine signifikante Veränderung der Partikelgrößenverteilung, wie in Abbildung 2 dargestellt, erreicht werden. Eine derartige Veränderung der Partikelgrößenverteilung ermöglicht aufgrund der Erhöhung der spezifischen Oberfläche einen besseren Angriff von Mikroorganismen und Enzymen. Aufgrund der praktischen Vorteile bezüglich der Betriebsstabilität von Extrudern, werden im Folgenden ausschließlich Ergebnisse von dieser Zerkleinerungstechnologie vorgestellt.

Zur Kennzeichnung des Zerkleinerungsfortschrittes von NawaRo's wurde eine Methode zur Erfassung und Kennzeichnung der Partikelgrößenverteilung dieser heterogenen Partikelstrukturen und -formen (vielfältige Faserstrukturen) erarbeitet. In Verbindung mit der Kennzeichnung der Substrate als Ausgangs-, Zwischen- und Endprodukt reicht der zu messende Partikelgrößenbereich vom Zentimeter- bis in den Nanometerbereich. Partikelmeßmethoden mit einem derartig breiten dynamischen Messbereich sind derzeit nicht bekannt, so dass nur die Kombination der Messergebnisse aus verschiedenen Partikelmessgeräten möglich ist. Bei dieser Kombination von Messresultaten sind die einheitliche Dispersitätsgrößen sowie die gleiche Mengenartbewertung zu beachten. Während die Mengenarten konvertierbar sind, muss bei der Dispersitätsbewertung eine einheitliche Dispersitätsgröße dem Messverfahren zugrunde liegen. Die quantitative Bildanalyse eignet sich besonders für die Kennzeichnung von Partikelgröße und Partikelform, so dass auch diese Methode im Bereich der NawaRo-Partikelkennzeichnung favorisiert wird. Wird das Messergebnis der quantitativen Bildanalyse (Partikelgrößenbereich $x > 1\text{mm}$) mit dem Messergebnis beispielsweise der Laserbeugungsspektroskopie kombiniert, ist neben dem analysierten Mengenanteil ebenso eine Dispersitätsgrößenanpassung vorzunehmen.

Die klassenmäßige Darstellung der nach (Autorenkollektiv 3, 2009) ermittelten Summenverteilungen $Q_3(x)$ zeigt Abbildung 2 für unterschiedliche Substrate.

Zur Bewertung des Einflusses auf den Biogasertag wurden zahlreiche Fermentationstests im 1 Litermaßstab in 3- bis 5-fach Ausführung nach der Maßgabe der VDI-Richtlinie 4630 in den IKTS eigenen Labors durchge-

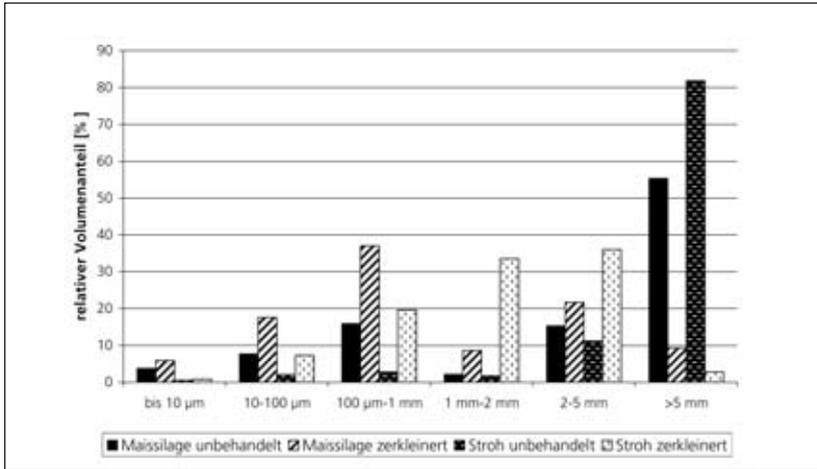


Abb. 2: Mengenanteile definierter Größenklassen für Maissilage und Weizenstroh

führt. In Abbildung 3 sind repräsentative Verläufe für die Biogasentwicklung von Maissilagen und Weizenstroh mit und ohne Vorbehandlung durch Extruder dargestellt.

Für die Zerkleinerung von Maissilage kann festgehalten werden, dass im Batchversuch unter optimalen Fermentationsbedingungen neben einer Beschleunigung des Abbaus Mehrgaserträge von maximal 5 % erreichbar sind. Die Ursache hierfür wird in der Silierung vermutet, bei der die Strukturen der Maispflanze soweit angegriffen werden, dass der größte Anteil verwertbarer Substrate für die anaeroben Mikroorganismen erreichbar ist. Ein zweiter Aspekt könnte der vergleichsweise niedrige Ligningehalt der Maissilage sein, welcher den Abbau auch ohne weitergehende Maßnahmen erleichtert. Jedoch kann für den großtechnischen Einsatz der mechanischen Desintegration eine zusätzliche Verbesserung der Gesamtwirtschaftlichkeit erwartet werden, da sich Rühr- und Pumpfähigkeit der Substrate deutlich verbessern. Daraus resultierende Effekte wie geringere notwendige Rührenergie, Vermeidung von Schwimmschichten und besserer Gasaustrag lassen sich jedoch nur an großtechnischen Praxisanlagen quantifizieren.

Der Energiebedarf bei der Zerkleinerung von silierten Rohstoffen mit Hilfe der genutzten Extrudertechnik beträgt zwischen 6 und 14 kWh/t Silage (Lehmann, 2008).

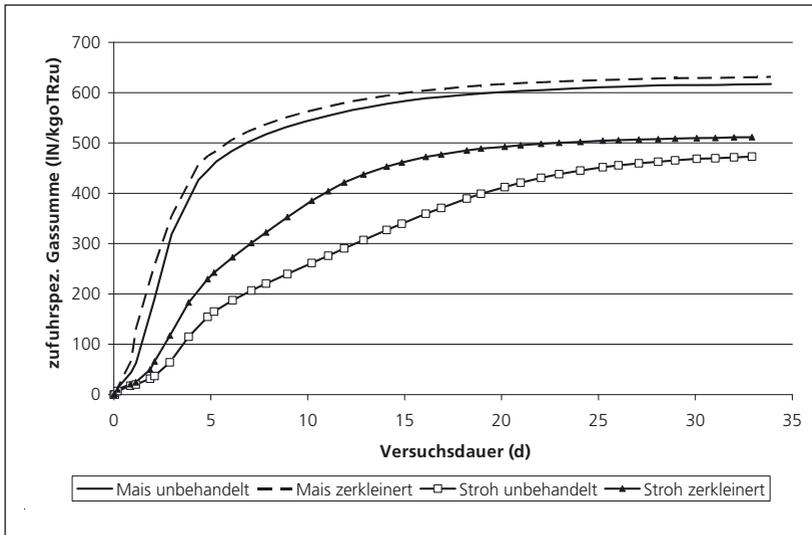


Abb. 3: Gaspotenzial für Maissilage und Weizenstroh

Durch die Zerkleinerung von Stroh kann im kontinuierlichen Betrieb eine Ertragssteigerung von 10 – 20 % unter Einbeziehung der Beschleunigung erreicht werden. Der höhere Ligninanteil sowie der Aufbruch der äußeren Wachsschicht durch die mechanische Vorbehandlung führen beim Stroh offenbar zur Freilegung von Substraten, welche in einem normalen Fermentationsprozess nicht erreicht würden. Auch für Stroh gilt, dass großtechnisch weitere Verbesserungen für den Gesamtprozess durch besseres Substrathandling erwartet werden, was aber im Labormaßstab nicht nachweisbar ist.

Der Energiebedarf für die großtechnische Zerkleinerung von Stroh mit Hilfe der genutzten Extrudertechnik erhöht sich nach eigenen Untersuchungen bezogen auf den Energiegehalt des Inputmaterials gegenüber Silagen um den Faktor 3.

Leistungultraschall

Leistungs- und Hochleistungultraschall im Frequenzbereich 20 bis 24 kHz findet zur Behandlung von Biomasse mit unterschiedlichem Erfolg Anwendung. Traditionell wird Ultraschall zum Dispergieren von Suspensionen und zur Entgasung von flüssigen Medien verwendet. Die elektrische

Energie wird über einen piezokeramischen Wandler und ein Schwingersystem (Sonotrode) in Form von hochenergetischen Schallwellen in das zu behandelnde Medium eingetragen. Die im flüssigen Medium erzeugten Kavitationsblasen, welche bei ihrem Zerfall (Implosion) räumlich begrenzte, aber hochintensive Scherkräfte induzieren, bewirken die Auflösung von Biomassestrukturen bzw. die Ablösung von kleinsten Gasblasen, die sich an Feststoffoberflächen befinden (Entgasung). Dieses Verfahren wird seit längerer Zeit im Bereich der Abwasserbehandlung zum Aufschluss von Überschussschlämmen (= aufkonzentrierte Mikroorganismen der biologischen Abwasserreinigung) genutzt, um beispielsweise den aeroben und anaeroben Abbau der Klärschlämme zu intensivieren.

Die Übertragung dieser Technologie auf den Bereich der landwirtschaftlichen Biogaserzeugung wurde innerhalb eines FNR-Projektes im Labormaßstab untersucht (Friedrich, 2006). Geringe sekundäre Effekte (Biogasteigerung) wurden lediglich bei unwirtschaftlichen Energieeinträgen erzielt. Behandelt wurde dabei der Gärrest des Hauptfermenters, der in den Nachfermenter überführt wurde. Eine Steigerung des Gesamtgasertrages an Biogas von maximal 4 % wurde nachgewiesen. Als Ursache für die geringe Wirkung des Ultraschalls wird in erster Linie die hohe Energie – Dämpfung (Impedanz) durch grobe Partikel des Gärsubstrates und die damit verbundene unzureichende Freisetzung von Zellinhaltsstoffen (CSBgelöst) sowie eine zu geringe Mobilisierung hydrolytischer Enzyme gesehen. Die großtechnische Anwendung von Ultraschall zur Behandlung von Gärresten und Fermenterinhalt wird nach gegenwärtigem Kenntnisstand nicht als wirtschaftlich angesehen. Untersuchungen an Gärresten, die im Vorfeld einer intensiven Zerkleinerung ausgesetzt waren, wurden bisher nicht durchgeführt. Derartige Untersuchungen sind nur bei optimaler Ausbreitung des Kavitationsfeldes im System energetisch interessant. Diese Untersuchungen sind Gegenstand weiterer Forschungsarbeiten (Autorenkollektiv 2, 2009).

Eine alternative und vielversprechende Einsatzstelle für Leistungsultraschall im Bereich der Biogaserzeugung könnte die Desintegration von Prozesswasser der Gärrestentwässerung sein. Auf diesem gegenwärtig untersuchten Anwendungsgebiet konnten bisher im Labormaßstab gut reproduzierbare Effekte von Ausgasung und Substrataufschluss beobachtet werden. Ob sich die positiven Ansätze für diese grobstoffarmen Biomassesuspensionen (Partikelgröße < 1 mm), welche dem ursprünglichem Einsatzgebiet des Leistungsultraschalls im Überschussschlammbereich

ähneln, auch im Pilotmaßstab bestätigen, wird gegenwärtig untersucht (Autorenkollektiv 2, 2009).

Thermische Desintegrationsverfahren

Mit zunehmender Temperatur findet eine Beschleunigung des Stoffumsatzes statt. Jedoch konnte nach (Dohmann, 2001) für den Bereich unterhalb 120 °C kein signifikanter Aufschluss von Lignozellulose beobachtet werden. Laut (Hendriks et al., 2009) gehen ab etwa 150 °C zunächst Hemizellulose gefolgt von Lignin (ab 160 °C) in Lösung. Bei weiterer Temperaturerhöhung beschleunigt sich dieser Effekt wobei ab 220 °C verstärkt mit der Bildung von Hemmstoffen wie beispielsweise Phenolen, heterozyklischen Verbindungen und Furfuralen zu rechnen ist. Ab 250 °C beginnen pyrolytische Prozesse wie Vergasung und Verschwelung, deren Reaktionsprodukte kaum anaerob abbaubar sind.

Den zahlreichen Forschungsarbeiten auf diesem Gebiet mit einem Temperaturoptimum von ca. 175 °C (Müller et al, 2003; Faulstich et al, 2007) und ohne Angaben zur Wirtschaftlichkeit stehen nur wenige großtechnische Anwendungen gegenüber. Während ein Hersteller für Inline-Thermodruckhydrolyseanlagen (200 °C) laut eigener Aussage aus Wirtschaftlichkeitsgründen Abstand vom Einsatz im Biogassektor nimmt, wird beispielsweise im Energiepark Bürstadt eine thermisch induzierte Hydrolysestufe (200 °C) genutzt. Eine betriebswirtschaftliche Bewertung dieser Desintegrationsstufe konnte innerhalb der Recherche nicht erfolgen.

Aufgrund der Vorteile des weitgehenden Substrataufschlusses, dem Verzicht auf Chemikalien sowie der sinnvollen Nutzung von Abwärme stellt die thermische Desintegration ein potenziell attraktives Verfahren dar. Für die Erreichung der Wirtschaftlichkeit sollte allerdings der appa-

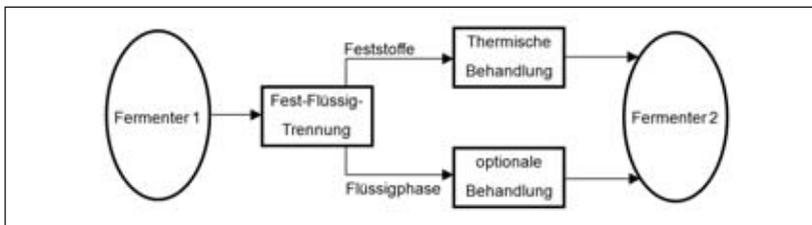


Abb. 4: Verfahrenskonzept thermische Desintegration (Schwarz et al, 2007)

tive Aufwand weitestgehend minimiert werden. Abbildung 4 zeigt ein Verfahrenskonzept des IKTS, welches durch Entwässerung des Gärrest 1 die thermische Behandlung nur auf die schwer abbaubare Fraktion (im Fermenter 1 nicht abgebaute Feststoffe) anwendet. Das Hauptvolumen mit aktiven Mikroorganismen gelangt direkt oder optional beispielsweise mit Ultraschall behandelt in den Nachfermenter.

Chemische Desintegrationsverfahren

Das Wirkprinzip chemischer Desintegrationsverfahren besteht in der Auflösung von Lignin und Hemizellulose durch den Einsatz von Säuren, Laugen oder Oxidationsmitteln. Die dabei verwendeten Chemikalien stellen erhebliche Anforderungen an Technik und Arbeitssicherheit, weshalb der großtechnische Einsatz zum Substrataufschluss bisher nur in industriellen Anlagen zur Herstellung von Grundchemikalien (weiße Biotechnologie) oder Bioethanol angewendet wird.

Diverse Forschungsarbeiten und auch eigene Untersuchungen zeigen die prinzipiell sehr hohe Wirksamkeit von Chemikalien für eine Verbesserung der Biogasausbeute von Lignozellulose. Jedoch kann aufgrund von Korrosions- und Entsorgungsproblemen sowie der Tatsache, dass zum Teil größere Mengen nicht methanisierbarer und hemmend wirkende Stoffe gebildet werden, eine Anwendung in landwirtschaftlichen Biogasanlagen nach jetzigem Kenntnisstand nicht empfohlen werden.

Biologische Desintegrationsverfahren

Um Bindungskräfte zwischen Molekülen lösen zu können, ist entweder die notwendige Aktivierungsenergie mit Hilfe von Chemikalien oder hohen Temperaturen aufzubringen oder die Aktivierungsenergie zu erniedrigen. Letzteres kann durch den gezielten Einsatz von Enzymen geschehen. Diese Biokatalysatoren verbinden sich reversibel sowie substrat- und reaktionsspezifisch mit dem Substrat und setzen dabei die nötige Aktivierungsenergie herab. Chemische Reaktionen können dann auch bei moderaten Milieubedingungen mit deutlich erhöhter Geschwindigkeit ablaufen. Der Einsatz kommerzieller Enzympräparate hat den Vorteil des sehr geringen apparativen und energetischen Aufwandes.

Ausgewählte Enzympräparate verschiedener Anbieter für den Biogassektor wurden durch die TU Dresden (Institut für Lebensmittel- und Bioverfahrenstechnik) auf ihre Primäreffekte hinsichtlich einer Zuckerfreisetzung getestet. Dabei konnte die prinzipielle Wirksamkeit der getesteten Präparate nachgewiesen werden. Positiv wirkte sich dabei ein zunehmender Zerkleinerungsgrad der eingesetzten Substrate aus. Jedoch zeigte sich auch eine abnehmende Wirksamkeit bei schwer abbaubaren Substraten. So sank die Zuckerfreisetzung aus zerkleinertem Stroh gegenüber Maissilage und aus der Grobfraction von Gärresten konnten keine signifikanten Mengen an Zucker mehr freigesetzt werden. Letzteres zeigt, dass die getesteten Enzympräparate wahrscheinlich nicht in der Lage sind, einen weitergehenden Abbau als native Enzyme im Fermentationsprozess zu realisieren, sondern lediglich eine Beschleunigung erreichbar ist.

Analog der Bewertung mechanischer Desintegrationsverfahren wurden Batchversuche zur Ermittlung des Enzymeinflusses auf die Gasbildung im IKTS durchgeführt. Abbildung 5 zeigt repräsentativ die erreichten Ergebnisse für die getesteten Enzympräparate, wobei neben einer sehr geringen Beschleunigung während der ersten 3 Tage nur geringe Steigerungsraten des Gaspotenzials von maximal 3 % erreicht wurden.

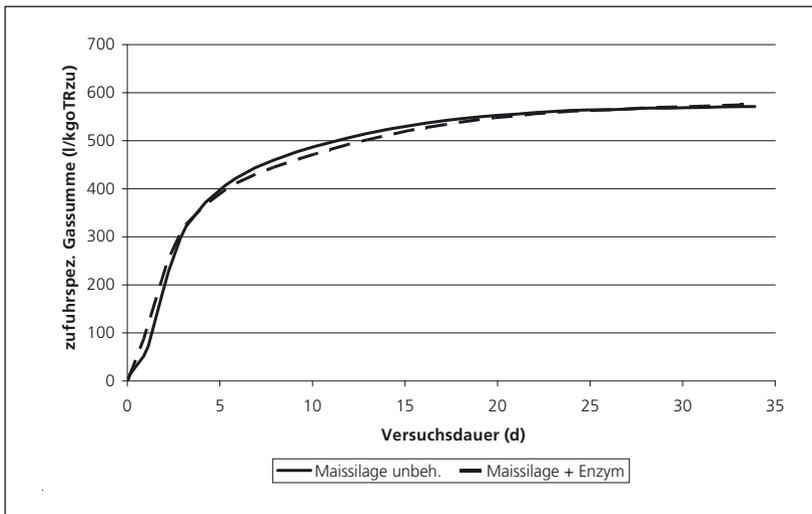


Abb. 5: Biogaspotenzial in Abhängigkeit vom Enzymeinsatz

Zusammenfassung

Desintegrationsverfahren können in Zukunft einen wichtigen Beitrag zur Verbesserung der Wirtschaftlichkeit von Biogasanlagen leisten. Eigene Untersuchungen zeigen, dass eine mechanische Zerkleinerung besonders von Stroh eine deutliche Verbesserung des anaeroben Abbaus bedingt. Für die technische Zerkleinerung von nachwachsenden Rohstoffen zeigte sich besonders die getestete Extrudertechnologie als effektiv und betriebsstabil. Die Anwendung von Leistungultraschall im Biogassektor wird gegenwärtig als noch nicht praxisreif eingeschätzt. Weiterhin konnte gezeigt werden, dass getestete Enzympräparate nach gegenwärtigem Kenntnisstand im Vergärungsprozess nur sehr geringe Effekte hervorrufen. Thermischen Desintegrationsverfahren wird aufgrund verschiedener Vorteile ein signifikantes Zukunftspotenzial bei Nachweis der Wirtschaftlichkeit zugeordnet, während der Einsatz von Chemikalien wegen der Umweltbelastung und der aufgeführten Nachteile kritisch bewertet wird.

Zukünftige Forschungsaktivitäten sollten sich auf eine Substratangepasste Effektivierung und energetische Optimierung vorhandener Zerkleinerungstechnologien, auf die Untersuchung alternativer Einsatzbedingungen für Leistungultraschall, auf den Nachweis von zusätzlichen Effekten der mechanischen oder enzymatischen Desintegration auf großtechnischen Biogasanlagen (quantitative Erfassung der Änderung von Viskosität, notwendige Rührenergie und Schwimmschichtbildung), auf die Ermittlung der optimalen Einsatzstelle von Enzympräparaten (pH-Optimum), auf den Nachweis der Enzymaktivität unter realen Milieubedingungen, auf die Minimierung des Aufwandes zur thermischen Desintegration sowie auf die Optimierung biologischer Hydrolysestufen zur Ausnutzung der Desintegrationspotenziale der anlageneigenen Biozönose (Beachtung von spezifischer Oberfläche, Milieubedingungen sowie Produkthemmung) konzentrieren.

Literatur

- Autorenkollektiv 1: Abschlussbericht: Nutzung von nachwachsenden Rohstoffen mit integrierter Abwasser- und Klärschlammverwertung zur regenerativen Energieerzeugung über BHKW und Brennstoffzelle. Erhöhung der Effizienz der Biogasgewinnung und -verwertung. Projektförderung Freistaat Sachsen mit Mitteln der EU (EFRE) 07/2006 – 11/2007

- Autorenkollektiv 2: Zwischenbericht: Erhöhung der Wirtschaftlichkeit und Zuverlässigkeit der nachhaltigen Energieversorgung aus Biomasse – Entwicklung der Biogas-erzeugung als Zukunftstechnologie Projektförderung Freistaat Sachsen mit Mitteln der EU (EFRE) 03/2008 – 03/2010
- Autorenkollektiv 3: Standardarbeitsanweisung: Granulometrische Kennzeichnung von NawaRo`s und biogenen Substraten Fraunhofer IKTS Dresden, Labor Umweltschutzverfahrenstechnik 2007 – 2009
- Dohmann, M.: Untersuchungen zum verbesserten biologischen Aufschluß lignocellulosehaltiger Substanzen in Siedlungsabfällen, Projektkennblatt der Deutschen Bundesstiftung Umwelt, 2001
- Faulstich, M.; Dimaczek, G.: Nutzung feuchter, nachwachsender Biomassen durch Thermodruckhydrolyse (THD) und anschließende biologische Weiterbehandlung, FNR-Projekt 2007
- Friedrich, H.: Intensivierung der Vergärung nachwachsender Rohstoffe durch mehrstufige Desintegration des anaeroben Fermenterinhaltens – Laboruntersuchungen, FNR-Projekt, 2006
- Hendriks, A.T.W.M.; Zeeman, G.: Pretreatments to enhance the digestibility of lignocellulosic biomass – review Bioresource Technology 100 (2009) 10 – 18
- Lehmann, T.: Firmenschrift Lehmann Maschinenbau GmbH, Pöhl 2008
- Müller, J. et al: Thermische, chemische und biologische Desintegrationsverfahren, 3. Arbeitsbericht der ATV/DVWK Arbeitsgruppe AK – 1.6 „Klärschlamm-desintegration“, 2003
- Schwarz, B.; Faßauer, B.; Friedrich, E.; Friedrich, H.; Michaelis, A.: Verfahren zur Konversion von Biomasse zu Biogas in anaeroben Fermentern, Patentanmeldung 30.07.2007, Offenlegung 05.02.2009, DE 10 2007 037 202 A1
- Weiland, P.: Ergebnisse aus dem aktuellen Biogasmessprogramm II, Vortrag FNR/KTBL Kongress, 15./16. September 2009 in Weimar

Anschrift der Autoren:

*Björn Schwarz, Dr. Eberhard Friedrich, Dr. Hannelore Friedrich,
Dr. Karin Jobst, Marc Lincke
Fraunhofer-Institut für Keramische Technologien und Systeme (IKTS)
Winterbergstr. 28, 01277 Dresden
E-Mail: Bjoern.schwarz@ikts.fraunhofer.de
Eberhard.friedrich@ikts.fraunhofer.de*

Biogassubstrate – welche „Exoten“ haben Potenzial für die Zukunft

Armin Vetter

Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft (TLL)

Für die Erzeugung von Biogas kommen zahlreiche Fruchtarten in Betracht. Ausschlaggebend für die Auswahl sind neben der Beherrschung des Produktionsverfahrens die Biogasausbeute, bezogen auf die organische Trockenmasse und die Kosten der Bereitstellung. Des Weiteren sind Fragen der Fruchtfolge, die Beeinflussung der Biodiversität, aber auch technologische Parameter, wie die Transportwürdigkeit, die Siliereignung und das Verhalten im Fermenter zu beachten. Mais hat sich großräumig in den letzten Jahrzehnten gegenüber mehrjährigem Ackerfutter, Ganzpflanzengetreide oder Zwischenfrüchten als Grundfutter für die Wiederkäuer auf den meisten Standorten durchgesetzt. Dies ist vor allem auf den enormen züchterischen Fortschritt, vor allem in Bezug auf die Anpassung an das mitteleuropäische Klima sowie auf die Erhöhung der Energiekonzentration, zurückzuführen.

Mais wird aus den aufgeführten Gründen, bei entsprechender Anpassung an die Anforderungen der Vergärung, das bevorzugte Substrat bleiben. Dies gilt umso mehr, da der Mais mit ca. 200 l/kg TM einen sehr guten Evapotranspirationskoeffizienten hat, d. h. als C₄-Pflanze die knapper werdende Ressource Wasser besser in den Ertrag umsetzt als C₃-Pflanzen. Trotz dieser Vorteile gilt es, Ergänzungen bzw. Alternativen zum Maisanbau zu finden, vor allem vor dem Hintergrund der Erhöhung der Sicherheit der Versorgung von Biogasanlagen mit Substraten, d. h. Minimierung von Ertragsausfällen durch ungünstige Witterung während der Vegetationszeit bzw. durch Krankheiten oder Schädlinge, z. B. den Maiswurzelbohrer. Aber auch Aspekte der Fruchtfolgegestaltung, inklusive der Beeinflussung der Biodiversität, gilt es stärker zu berücksichtigen. Ebenfalls kann der Anbau mit zu verschiedenen Zeitpunkten zu bestellenden und zu erntenden Kulturen Arbeitsspitzen brechen, die Technik und den Siloraum

besser auslasten und die Gärreste besser als Dünger verwerten lassen.

Wird der Anbauumfang einzelner Fruchtarten in Deutschland bzw. der Einsatz von nachwachsenden Rohstoffen als Substrat in Biogasanlagen für die Definition des Begriffs „Exoten“ zu Grunde gelegt, so sind außer Mais und mehrschnittigem Ackerfutter alle sonstigen potenziell einsetzbaren nachwachsenden Rohstoffpflanzen als „Exoten“ zu bezeichnen. Allerdings sollte dabei in bekannte Kulturen, für die nur das Anbauverfahren an die Erfordernisse der Biogaserzeugung angepasst werden muss bzw. über die Züchtung ertragreichere Sorten bereitzustellen sind und echte Exoten, d. h. unter unseren Standortbedingungen neu in Kultur zu nehmende Fruchtarten, unterschieden werden. Zur ersten Gruppe gehören zweifelsfrei Ganzpflanzengetreide, auch als Arten- und Sortenmischung angebaut, Rüben, Sonnenblumenganzpflanze sowie die bekannten Winter- und Sommerzwischenfrüchte. Bei der zweiten Gruppe der „Exoten“ gilt es wiederum zwischen Fruchtarten zu differenzieren, für die aus Versuchen schon Ergebnisse vorliegen, sodass erste Anbauempfehlungen erstellt werden können. Zu dieser Gruppe gehören Sorghumarten, Durchwachsene Silphie, Miscanthus, Panicumarten und Topinambur (Abbildung 1).

Absolute Exoten für den Anbau sind die Polygonumarten, z. B. Sachalinknötterich, Japanischer Knötterich und Weyrichknötterich sowie Sida hermaphrodita und Rumex OK2. Die Sorghumarten haben Potenzial auf

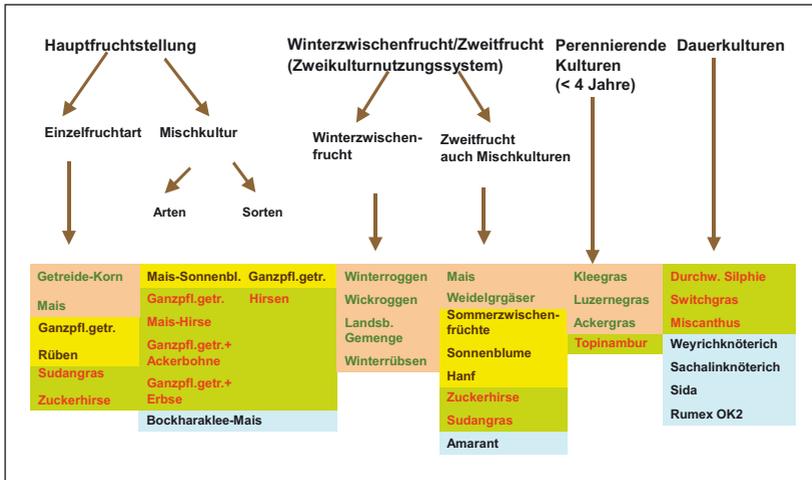


Abb. 1: Stellung von Energiepflanzen zur Biogasproduktion im Anbausystem

Standorten mit unzureichender Wasserversorgung, d. h. geringen Niederschlägen während der Vegetationszeit sowie einem niedrigen Bodenwasserspeichervermögen. Auf besseren Standorten ist die Konkurrenz der gegenwärtig zur Verfügung stehenden Sorghumsorten zum Mais nicht gegeben (Abbildung 2).

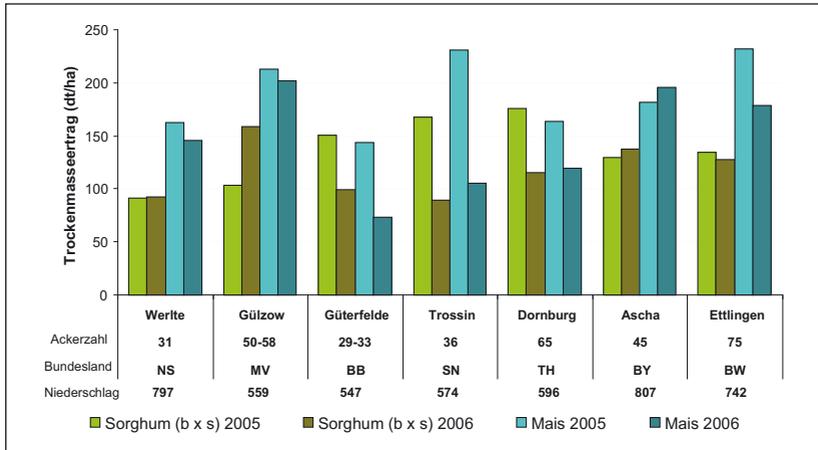


Abb. 2: Erträge von Sudangras und Mais in Abhängigkeit vom Standort

Der größte Nachteil besteht gegenwärtig in einer erst begonnenen intensiven züchterischen Bearbeitung und damit Bereitstellung von standortangepassten Sorten und in einer nicht vorhandenen, nach Anbaugebieten abgestimmten Sortenprüfung, sodass für die meisten Standorte nur eine unzureichende Aussage zur Sortenwahl getroffen werden kann. Eine ähnliche Aussage gilt für Ganzpflanzengetreide. Zur Zeit werden aus den Landessortenversuchen, d. h. Korndrusch mit zusätzlicher Strohwaägung und der Bewertung der Standfestigkeit Empfehlungen zur Arten- und Sortenwahl erarbeitet. Zur Erhöhung der Biodiversität und der Ertragsicherheit bei gleichzeitiger Reduzierung des Fungizideinsatzes bieten sich Sortenmischungen bei Wintergetreidearten an. Ebenfalls in den Anbau wieder aufzunehmen sind die klassischen Winterzwischenfrüchte wie Grünschnittroggen, Wickroggen, Landsberger Gemenge sowie die Weidelgräser. Die Erträge belaufen sich auf 3 bis 5 t oTM/ha. Sie stellen auf ausreichend mit Wasser versorgten Standorten eine Ergänzung zum Hauptfruchtanbau dar. Demgegenüber lieferten die Sommerzwischenfrüchte in den

bisher im Rahmen des EVA-Projektes ausgewerteten Versuchen in der Regel keine wirtschaftlich vertretbaren Erträge. Als Strategie für Biogasanlagen wäre denkbar, Arten für den Anbau auszuwählen, die sich sowohl zur Humusanreicherung als auch für die Biogasproduktion eignen. In absehbar guten Maisjahren werden sie zur Humusmehrung eingepflügt, bei absehbar schlechten Maiserträgen, wenn auch mit sehr hohen Kosten, zur Sicherung der Versorgung der BGA geerntet.

Bei den bisher kurz skizzierten Kulturen handelt es sich um Fruchtarten für die die Anbauverfahren prinzipiell vorliegen und für die es nur noch Anpassungen und Verfeinerungen im Produktionsverfahren bedarf. Demgegenüber stellt sich die Situation bei den Exoten etwas anders dar. Hierbei ist wiederum zwischen „Exoten“ mit geringen Erfahrungswerten, wie Topinambur, Durchwachsene Silphie und Miscanthus einerseits und total neuen Pflanzenarten, zu denen keinerlei Erfahrungen vorliegen, wie Rumex, Polygonum oder Sida zu unterscheiden. Topinambur könnte als mehrjährige Energiepflanze etabliert werden. Die winterharten Knollen sind analog zu Kartoffeln zu legen. Im Frühjahr kann die Unkrautbekämpfung mechanisch erfolgen. Die Erträge an Kraut im ersten Standjahr sind beträchtlich (Abbildung 3).

Sie nehmen aber in den folgenden Nutzungsjahren ab. Entgegenwirken kann diesem Trend ein mechanisches Ausdünnen der Bestände im Frühjahr bei ca. 10 bis 30 cm Wuchshöhe. Bei der Sortenwahl sind krautbetonte Sorten wie „Topianka“ oder „Waldspindel“ zu bevorzugen. Der Bestand sollte nach drei bis fünf Jahren gerodet werden. Die verbleibenden Knollen, die in der Nachfrucht austreiben, sind mit Herbiziden bekämpfbar. Gegenwärtig ist als wesentlicher Nachteil von Topinambur der hohe Lignin- und Rohaschegehalt anzusehen, die zu geringen Methanausbeuten führen (Abbildung 4).

Die gleiche Aussage trifft auf die Großgräser Panicum, Andropogon und Miscanthus zu. Bevor keine besseren Aufschlussverfahren für Cellulose und Lignin existieren, ist von einer Verwertung dieser Fruchtarten im Fermenter abzusehen.

Höhere Methanerträge im Bereich des Maises sind bei der Durchwachsenen Silphie zu verzeichnen. Diese, nach gegenwärtigem Kenntnisstand mindestens 10 Jahre nutzbare neue Kulturpflanze, die aus dem südlichen Nordamerika stammt, kann auf wärmeren Standorten an den Mais heranreichen. Für den Standort Dornburg in Thüringen sind in Abbildung 5 die Erträge im Vergleich zu Mais dargestellt.

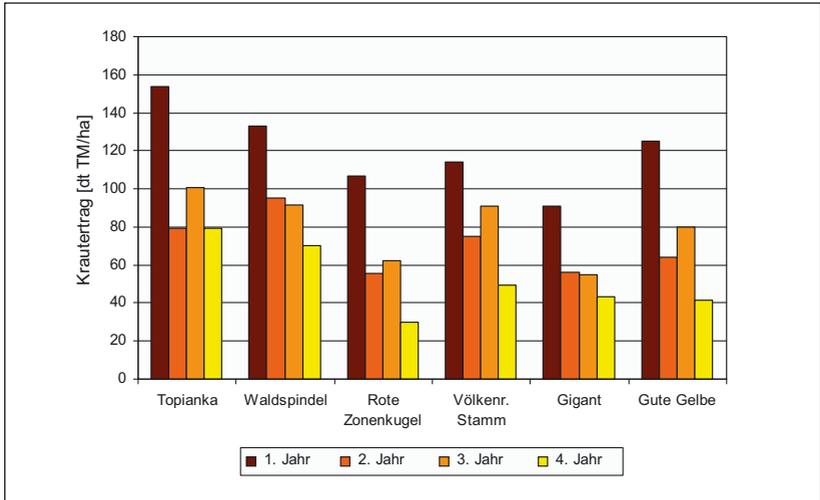


Abb. 3: Trockenmasseertrag (dt/ha) von Topinamburkraut bei mehrjährigem Anbau ohne Ausdünnung

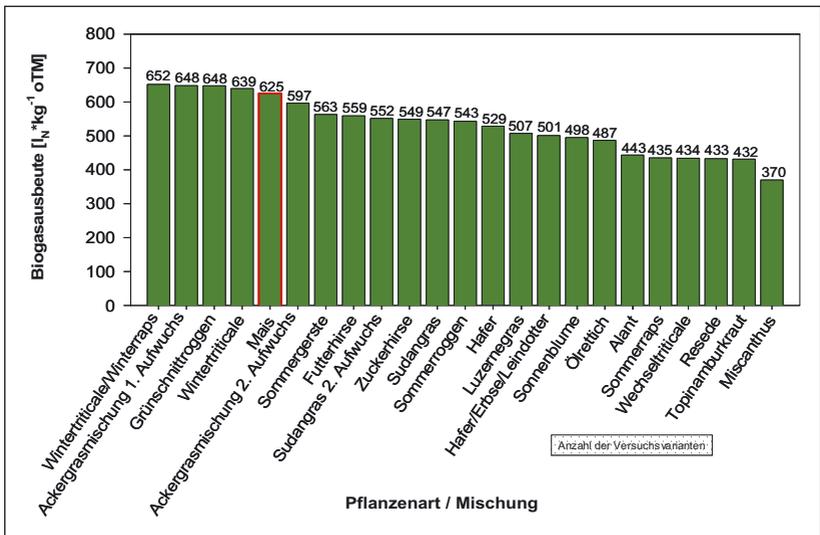


Abb. 4: Biogasausbeuten untersuchter Pflanzenarten und Mischungen (Mittelwerte)

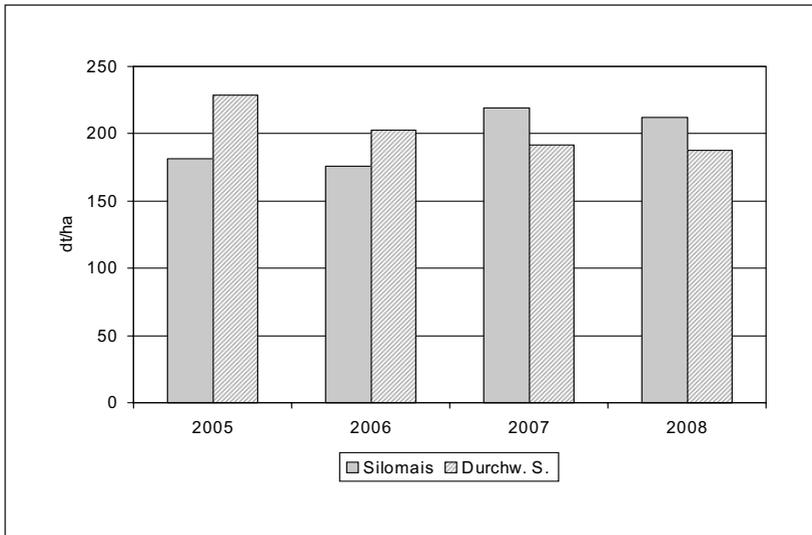


Abb. 5: Trockenmasseerträge von Durchwachsener Silphie zum optimalen Erntezeitpunkt im Vergleich zu Silomais (Dornburg)

Für die aufgeführten Arten liegen aus Versuchen und kleineren Praxisflächen Erfahrungen zum Produktionsregime vor. Für die im Folgenden kurz dargestellten Arten sind diese Erfahrungen in Deutschland nicht vorhanden. Ob eine der Fruchtarten in den nächsten Jahren Einzug in die landwirtschaftliche Praxis halten wird, hängt von vielen Faktoren ab, z. B. der Ertragshöhe und -sicherheit, der Beherrschung des Produktionsverfahrens, der Bereitstellung von zertifiziertem Saat- oder Pflanzgut sowie der Siliereignung und den zu erzielenden Biogas- und Methanerträgen. Des Weiteren sind Aspekte des Natur- und Umweltschutzes zu berücksichtigen. Die folgende Beschreibung des Entwicklungsstandes der Arten darf daher nur als erste Wertung begriffen werden, die es in Versuchen weiter zu untersetzen gilt.

Die zur Familie der Malvengewächse gehörende „Sida“ (Sida hermaphrodita) ist im südlichen Nordamerika und angrenzenden Gebieten von Mittelamerika beheimatet. Die krautige Pflanze erreicht eine Wuchshöhe von bis zu 2,50 bis 3 m.

Es handelt sich um eine ausdauernde Pflanze, die bis zu 20 Jahre genutzt werden kann. Eine erste Kultivierung erfolgte u. a. in der ehema-

ligen UdSSR zur Grünfütternutzung. Die Aussagen zu den Standortansprüchen widersprechen sich, sie reichen von keinen besonderen Standortansprüchen, inkl. Brache, bis zu hohen Ansprüchen an die Wasserversorgung, sodass sandige Standorte mit Mindererträgen reagieren sollen. Sie soll auch harte Winter überstehen. Diese Aussage bezieht sich auf einen Anbau von ca. 200 ha in Polen. Die Bestandesetablierung erfolgt im Pflanzverfahren. Im ersten Jahr wächst die Pflanze sehr langsam, sodass eine mehrmalige Unkrautbekämpfung notwendig ist. Im zweiten Jahr schließen dann die Bestände und es kann bis zu zweimal mit dem Häcksler geerntet werden. Es ist auch eine einmalige Ernte im Frühherbst möglich. Rumpler (2009) von der Landesanstalt in Sachsen-Anhalt gibt mögliche Höchsterträge von 40 bis 60 t TM/ha an, wobei auf dem guten Löß-Standort in Bernburg im ersten Erntejahr knapp 12 t TM/ha realisiert wurden. Der Trockenmassegehalt betrug 39 %, sodass eine in der Literatur beschriebene Silierung gegeben erscheint.

Bei Rumex OK2 handelt es sich um eine in der Ukraine durchgeführte Kreuzung zwischen *Rumex patencia* und *R. tianschanicus*. Auch wird die Pflanze im russischen Sprachraum als „Savnat“ bezeichnet, eine Wortkombination von Ampfer und Spinat, was oft zu der fälschlichen Annahme führt, dass es sich um eine Kreuzung dieser beiden Arten handelt. Die Kreuzung ist hinsichtlich des Standortes anspruchslos, weist aber einen hohen Wasserbedarf auf, den sie zum großen Teil aus dem Wintervorrat des Bodens decken kann. Die Pflanzen sind absolut winterfest und sollen eine Nutzungsdauer von 15 bis 20 Jahren aufweisen. Für eine Grünfütternutzung ist ein Reihenabstand von 40 cm zu empfehlen. Im ersten Jahr wächst Rumex OK2 langsam, sodass eine mehrmalige Unkrautbekämpfung erforderlich ist. Zur Nutzung als Kosubstrat empfiehlt sich eine zweimalige Ernte, wobei der erste Schnitt bereits im zeitigen Frühjahr analog Grünschnitttrogen erfolgen kann. Der zweite Schnitt ist dann in Abhängigkeit von den Vegetationsbedingungen Ende Juni bis Mitte Juli möglich. Allerdings ist auf den für die Silierung notwendigen Trockenmassegehalt zu achten. In Testversuchen wurde dieser mit dem ersten Schnitt Ende Juni erreicht. Als Erträge werden 9 bis 16 t TM/ha angegeben. Die Gaserträge sollen knapp unter denen von Mais liegen.

Bei Rumpler (2009) konnte allerdings Rumex OK2 mit Erträgen von knapp 9 t TM/ha bei einem Trockenmassegehalt von 14 % nicht überzeugen. Es gilt somit weitere Versuchsergebnisse vor einer breiten Praxiseinführung abzuwarten.

In der ehemaligen UdSSR wurden in den 70er Jahren viele Versuche unternommen, Wildpflanzen als neue Futterpflanzen zu eruiieren und zu kultivieren. In diesem Zusammenhang ist auch *Polygonum sachalinense* zu nennen.

P. sachalinense wird in Deutschland zur Gewinnung von Pflanzenextrakten aus den Blättern zur biologischen Bekämpfung von Pilzkrankheiten, z. B. Mehltau an Gurken, in begrenztem Umfang angebaut, sodass gewisse Erfahrungen zum Anbau vorliegen. Die Pflanze wird bis zu 4 m hoch. Sie kann als Biomassepflanze bei einer Bestandesdichte von 40.000 Pfl./ha Erträge bis zu 25 t TM/ha erreichen. Allerdings ist Sachalinknöterich aufgrund der großen Blattmasse (Blattflächenindex 18 bis 21) sehr anfällig gegenüber Hagelschlag bzw. Starkniederschlägen. Bei derartigen Wetterunbilden wurde des öfteren ein Abknicken der Bestände in 1 bis 1,5 m Wuchshöhe beobachtet. Für den Anbau besonders kritisch zu werten ist, dass es sich um eine ausläuferbildende invasive Art handelt, die fast nicht einzudämmen ist. Eng verwandt mit *P. sachalinense* ist *P. japonicum*. Er ist äußerlich kaum von erstgenannter Art zu unterscheiden und kreuzt sich auch mit dieser. *Polygonum jap.* wird ebenfalls als invasiv eingestuft.

„IGNISCUM“ wird als eine neue Züchtung aus Sachalinknöterich, die auf langjähriger Züchtungsarbeit beruhen soll, angeboten. Für den Einsatz in Biogasanlagen wäre eine zwei- bis dreimalige Ernte angebracht. Es liegen allerdings noch keine Erfahrungen zur Silierung vor.

Von Martin und Linke (1983) wurde der Anbau von *Polygonum weyrichii* in einer umfassenden Literaturstudie ausgewertet. Es handelt sich ebenfalls um eine ausdauernde Pflanze. Sie unterscheidet sich durch die großen Blätter und auffälligen Blüten deutlich von den zuvor beschriebenen *Polygonum*arten und kreuzt sich auch nicht mit diesen. Die Bestandesetablierung erfolgt über Pflanzung oder durch Aussaat in 1,5 bis 2 cm Tiefe, wobei zu beachten ist, dass das Saatgut eine schlechte Fließfähigkeit aufweist. Im ersten Jahr wird nur eine Wuchshöhe von ca. 50 cm erreicht, sodass unkrautunterdrückende Maßnahmen angebracht sind. Ab dem zweiten, z. T. auch erst ab dem dritten Vegetationsjahr erfolgt dann ein erheblicher Massezuwachs im Mai bis Juni, anschließend nimmt der Ertragszuwachs extrem ab, sodass sich zwei Schnitte pro Jahr anbieten. Der erste Schnitt sollte Mitte bis Ende Juni stattfinden. Um die Bestände nicht zu schwächen sollte im mehrjährigen Abstand eine Einschnittnutzung erfolgen. Die Angaben zu den Erträgen sind differenziert, als Trend

zeigt sich ein Ertrag leicht unter dem von Mais. Insgesamt dürfte *P. weyrichii* geringere Erträge als die vorgenannten Knötericharten aufweisen. Von Vorteil wäre allerdings seine klare morphologische Unterscheidbarkeit von der wuchernden Art *P. sachalinense*.

Insgesamt ist festzustellen, dass sowohl zum Produktionsregime als auch zur Silierung und Verwertung keine bzw. geringe praktische Erfahrungen mit den Knötericharten vorliegen, sodass der Anbau mit Risiken behaftet ist.

Der bisherige Kenntnisstand zu neuen Kulturpflanzen, inklusive „Exoten“ lässt sich wie folgt in drei Kategorien zusammenfassen:

A) Für Biogas zu empfehlen:

- Ganzpflanzengetreide auch als Sortenmischung (Artenmischung?)
- Klassische Winterzwischenfrüchte (Landsberger Gemenge, Wickrogen, etc.)
- Sorghumarten mit geringeren Erträgen und Biogasausbeuten, aber auf leichten Standorten Beitrag zur Ertragsstabilisierung

B) Empfehlungen mit noch nicht ausgereiften Verfahren:

- Mischfruchtanbau
 - z. B. Mais-Sonnenblume, etc., vor allem gut für Biodiversität
 - Ganzpflanzengetreide mit Wintererbse oder Winterackerbohne (Stickstofflieferant vor allem für Ökobetriebe)

C) Pflanzen unter Beobachtung:

- Topinambur mit geringen Kosten, aber zu geringen Biogasausbeuten (Ligninanteil)
- *Miscanthus*, *Panicum*arten, *Andropogon*: nicht für Biogas geeignet, aber abgetrocknet zur thermischen Verwertung
- *P. japonicum* und *P. sachalinense* (*Igniscum*) haben hohes Ertragspotenzial, aber Gefahr der unkontrollierten Ausbreitung. Vom BfN als invasive Pflanzen eingestuft (Problemneophyten)
- Für *Rumex* OK2 und *Sida* ist weiterer Forschungsbedarf notwendig, zur Zeit keine Praxiseinführung
- Hanf und Amarant haben zum derzeitigen Kenntnisstand zu geringes Ertragspotenzial
- Durchwachsene *Silphie*, hohes Potenzial, mit Praxiseinführung wurde begonnen

Literatur

- Martin, B. und Linke, G.: Bedeutung und Anbau von Weyrichknöterich (*Polygonum weyrichii* F. Schmidt (als Futterpflanze, *Wiss. Z. Uni Halle XXXII'83 M, H. 1, S. 89–97*
- Rumpfer, J.: Neue Kulturen für die Bioenergie, 6. Mitteldeutscher Bioenergietag, 24. April 2009, Vortrag in der Leipziger Messe im Rahmen der "agra 2009"

Anschrift des Autors:

*Dr. agr. habil. Armin Vetter
Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft (TLL)
Naumburger Str. 98, 07743 Jena
E-Mail: a.vetter@dornburg.tll.de*

Die Hydrolysephase bei der Vergärung nachwachsender Rohstoffe – Führt sie zu Effizienzsteigerung?

*Hans Oechsner, Andreas Lemmer, Daniel Preißler, Simon Zielonka
Universität Hohenheim*

Kurzfassung

In landwirtschaftlichen Biogasanlagen werden heute in der Regel nachwachsende Rohstoffe als Gärsubstrat bevorzugt. Da diese Substrate speziell für die Biogasvergärung angebaut werden und daher Produktionskosten verursachen, sollte der Energieinhalt dieser Substrate möglichst vollständig in Biogas umgesetzt werden. Hierzu muss der Biogasprozess mit möglichst hoher Effizienz betrieben werden. Bei einer einphasigen Prozessführung besteht bei hoher Raumbelastung die Gefahr, dass die Prozessbiologie im Fermenter aus dem Gleichgewicht gerät, d. h. dass die Säurebildung während der primären und sekundären Gärung schneller abläuft als der Säureabbau während der Methanbildung. Untersuchungen haben zudem gezeigt, dass die Ausnutzung der zugeführten Substrate bei hoher Raumbelastung und kurzen Verweilzeiten abnimmt ^[11].

In der landwirtschaftlichen Praxis wird derzeit verstärkt über den Sinn zweiphasiger Systeme diskutiert. Bei dieser zweiphasigen Prozessführung wird versucht, die primäre und sekundäre Gärung in separaten Fermentern räumlich getrennt von der Methanbildung ablaufen zu lassen. Diese räumliche Trennung der Säurebildung von der Methanbildung wird häufig als „vorgeschaltete Hydrolyse“ bezeichnet, obwohl der Begriff der Hydrolyse eigentlich nur den einleitenden Schritt der primären Gärung beschreibt. Durch eine Absenkung des pH-Wertes im „Hydrolysefermenter“ wird versucht, bessere Bedingungen für die am Prozess beteiligten Mikroorganismen zu erzielen. In der „Hydrolyse“ sollen Mikroorganismen und deren Enzyme die organische Substanz in leicht abbaubare Carbonsäuren und Alkohole überführen, damit diese gezielt dem nachfol-

genden Methanisierungsprozess als Nahrung zugeführt werden können. Die Trennung der Prozessphasen soll den Abbauprozess insgesamt beschleunigen.

Die Hydrolyse kann bei völlig verschiedenen Bedingungen (aerob/ anaerob, pH-Wert, Temperaturniveau) betrieben werden. Dies erfordert eine sichere Steuerung des Betriebes und der Prozessparameter, was vielfach in der Praxis nur schwer eingehalten werden kann. Bei einer schlecht gesteuerten Hydrolyse kann unbeabsichtigt Methan entstehen, das bei Abgabe an die Atmosphäre Energieverluste hervorruft und negative Umweltauswirkungen hat. Auch Wasserstoff kann unter bestimmten Bedingungen bei der Hydrolyse gebildet werden ^[9] und erhebliche Sicherheitsrisiken bedingen. Dies konnte durch eigene Untersuchungen im Labor gezeigt werden. Der Forschungsbedarf im Bereich der zweiphasigen Vergärung von nachwachsenden Rohstoffen ist noch erheblich. Durch systematische Laboruntersuchungen sollte der Kenntnisstand erweitert werden, um die Planungssicherheit in diesem Bereich zu verbessern.

Klassische einphasige Prozessführung

Heute werden im landwirtschaftlichen Bereich überwiegend Biogasanlagen als Flüssigfermenter bei mesophiler Betriebstemperatur zwischen 37 und 45 °C betrieben. Meistens bestehen diese Fermenter aus ein- oder zweistufigen Kaskaden von Rührkesselfermentern, in denen der anaerobe Stoffumsatz mehr oder weniger willkürlich abläuft. Die meisten dieser Biogasanlagen werden mit einem Gemisch aus tierischen Exkrementen und nachwachsenden Rohstoffen gefüttert. Die durchschnittliche Raumbelastung dieser Fermentersysteme liegt meistens unter 4 kg oTS/m³ Fermentervolumen · Tag. Wenn nur der erste Fermenter mit nachwachsenden Rohstoffen gefüttert wird, kann zur Prozessstabilisierung ein Teil des Substrates aus dem Nachgärfermenter zurück in den Hauptfermenter gepumpt werden, damit auf diese Weise auch der Nachgärfermenter mit nährstoffreichem Substrat versorgt wird. Zur Verbesserung der Effizienz einer Biogasanlage muss die Raumbelastung im gesamten System gesteigert und die Verweilzeit im Fermenter verkürzt werden. Damit kann schließlich erreicht werden, dass mit einem begrenzt verfügbaren Fermentervolumen mehr Substrat verarbeitet und mehr Biogas erzeugt wird. Dieses Vorgehen kann sich allerdings ungünstig auf die substratspezifi-

sche Methanausbeute auswirken. In Untersuchungen zum Restgaspotenzial an insgesamt 30 Biogasanlagen konnte gezeigt werden, dass die Verweilzeit im Fermentersystem einen entscheidenden Einfluss auf das Restgaspotenzial des ausgefaulten Substrates hat, das die Fermenterkaskade verlässt [12, 17]. Bei einstufigen Anlagen mit Verweilzeiten unter 80 Tagen muss mit einem Restgaspotenzial von durchschnittlich 10 % gerechnet werden. In Einzelfällen, besonders bei ungünstiger Substratführung, können dem Fermentersystem sogar mehr als 15 % des Methanpotenzials über das ausgefaulte Substrat verloren gehen. Bei diesen außergewöhnlichen Anlagen wurden meist extrem kurze Verweilzeiten zwischen 30 und 50 Tage beobachtet, häufig in Kombination mit einer hohen Raumbelastung. Mit Schaffung einer Nachgärstufe werden die niedrigen Abbauraten der ersten Stufe kompensiert und negative Effekte durch Kurzschlussströme verringert. Allerdings sind diese Nachgärfermenter in Hinsicht auf die Abbauleistung nicht allzu effizient, da meist bis zu 90 % des in den Kaskaden gebildeten Biogases in den Hauptfermentern entsteht. Es ist bei der Vergärung von nachwachsenden Rohstoffen speziell bei hydraulischen Verweilzeiten unter 80 Tagen sinnvoll, die Gärrestlager gasdicht abzudecken, um das dort entstehende Biogas zu gewinnen. Dies ist aus wirtschaftlicher, als auch aus Sicht der Emissionsminderung von fundamentaler Bedeutung.

Aufspaltung des Biogasprozesses in Hydrolysephase und Methanisierung

Die am Biogasprozess beteiligten Mikroorganismengruppen haben unterschiedliche Ansprüche an die Milieubedingungen im Fermenter. Dies gilt besonders in Hinsicht auf den pH-Wert (siehe Abbildung 1 und Tabelle 1). Während die Mikroorganismen der Methanbildungsphase nur bei einem pH-Wert oberhalb von pH 6,8 in der Lage sind Methan zu produzieren, sind die Bedürfnisse der an der Hydrolyse beteiligten Mikroorganismen nicht ganz so eng. Sie können auch bei neutralem pH-Wert den Stoffabbau einleiten, wenngleich sie ihr Stoffwechsele optimum bei einem pH-Wert zwischen 4,5 und 6,7 finden. Der pH-Wert im Biogasfermenter wird durch die Konzentration an Metaboliten wie den Carbonsäuren (Essigsäure, Propionsäure) und die Wirkung des Puffersystems im Fermenter bestimmt. Daher sind die Messung der Konzentration an Carbonsäuren und die

Bestimmung des FOS/TAC-Wertes als Maß für das Puffersystem wichtige Hilfsgrößen.

Um den Biogasprozess im Optimum und bei höchstmöglicher Raumbelastung betreiben zu können, müssen diese Kenngrößen regelmäßig bestimmt werden. Wenn das System in die Nähe der Belastungsgrenze gefahren wird, besteht eine relativ große Gefahr, dass der biologische Prozess „umkippt“, wenn sich die Futterzusammensetzung nur geringfügig ändert. D. h., dass die Säurebildung der primären und sekundären Gärung schneller abläuft, als der Substratabbau. In diesem biologisch instabilen Zustand wird der Stoffwechsel der methanogenen Mikroorganismen gehemmt. Die Prozesskontrolle bei Praxisbiogasanlagen erfolgt über Probenahme mit anschließender Analyse des Gärsubstrates im Labor.

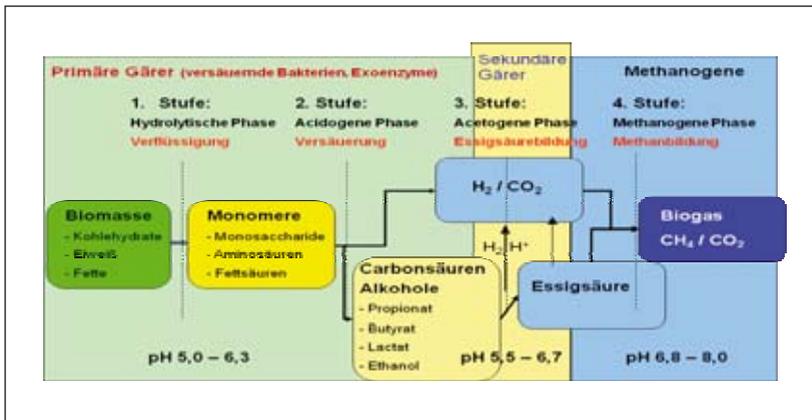


Abb. 1: Prozessphasen, Zwischenprodukte und optimale pH-Werte bei der Biogasproduktion ^[10]

Tab. 1: Milieuanforderungen der am Biogasprozess beteiligten Mikroorganismen ^[13]

	Hydrolyse und Acidogenese	Acetogenese und Methanogenese
Optimaler pH-Wert	4,5 bis 7	6,8 bis 8,2 ^[3]
Generationszeit	20 min bis 1,5 Tage	5 bis 15 Tage ^[5]
Optimale Temperatur	55 bis 65 °C	37 bis 55 °C ^[16]
Sauerstofftoleranz	Obligat oder fakultativ	Streng obligat ^[4]

Aufgrund der unterschiedlichen Milieuanprüche der am Biogasprozess beteiligten Mikroorganismen (pH-Wert, Temperatur, Sauerstofftoleranz), sowie unterschiedlicher Generationszeiten wird in der Forschung, zum Teil auch in der Praxis versucht, auch bei Einsatz von nachwachsenden Rohstoffen den Prozess räumlich in zwei Phasen zu unterteilen um die jeweils optimalen Bedingungen für die Mikroorganismen einzustellen. Durch diese Schaffung eines spezifischen Milieus in einer ersten, als Hydrolyse- oder Versäuerungsphase (Bildung niedermolekularer Säuren) und einer zweiten als Methanisierungsphase (hydrogenotrophe bzw. acetoklastische Methanogenese) betriebenen, anaeroben Behandlungsstufe werden in getrennten Reaktoren die Voraussetzungen für die Ausbildung spezialisierter, hochaktiver Biozönosen geschaffen^[1; 8]. Gleichzeitig sollen gegenseitige Beeinträchtigungen der Mikroorganismen vermieden werden. Aufgrund unterschiedlicher Generations- und Reaktionszeiten der Mikroorganismen, kann die erste Umsetzungsstufe bei kurzer Verweilzeit (1 – 10 Tage) und hoher Raumbelastung betrieben werden. Meist wird hier aufgrund der Abbaubeschleunigung ein thermophiles Temperaturniveau gewählt. Es besteht außerdem die Möglichkeit, die erste Umsetzungsstufe unter aeroben oder anaeroben Bedingungen zu betreiben. Die anschließende zweite Phase nutzt die in der ersten gebildeten Säuren zur Methanbildung. Die geringere Generationszeit und Abbaugeschwindigkeit in der Methanisierungsphase wird durch eine im Vergleich zur Hydrolysephase längere Verweilzeit (je nach Verfahren und Substrat zwischen 15 und 30 Tage) ausgeglichen.

Während die getrennte Hydrolyse bei der Behandlung von Industrieabwässern, Klärschlamm oder Abfall häufiger eingesetzt wird (dort oft Versäuerungsstufe genannt)^[1], ist deren Einsatz bei der Biogaserzeugung aus nachwachsenden Rohstoffen bisher kaum erforscht^[6]. In der landwirtschaftlichen Praxis wird teils ohne ausreichende Kenntnis mit der Hydrolyse experimentiert. Es liegen nur wenige Ergebnisse aus systematischen Untersuchungen vor.

Bei der Diskussion über den Effekt der zweiphasigen Vergärung wird in der Regel eine Reihe von Thesen aufgeführt, die für die Trennung des Prozesses sprechen:

- Erhöhung der Energieausbeute aus nachwachsenden Rohstoffen (Methanertrag)
- Höherer Methananteil im Biogas
- Aufschluss schwer abbaubarer Stoffe wie Zellulose

- Verfahrenstechnische Effekte:
 - Deutlich reduzierte Fermentervolumina
 - Höhere Raumbelastung im Fermenter möglich
 - Kürzere hydraulische Verweilzeit
 - Gleichmäßiger Betrieb (keine Schwankungen der Substratzusammensetzung für Fermenter)
 - Keine Schwimmschichten (Faserabbau)
 - Extrem störungsfreier Betrieb
- Kosteneinsparung, Gewinnsteigerung

Systematik der Hydrolyse

Unter Hydrolyse versteht man die Spaltung eines oder mehrerer chemischer Verbindungen durch die Reaktion mit Wasser (griech. Hydor=Wasser und Lysis=Lösung, Auflösung). Beim Biogasprozess werden Biomoleküle wie z. B. Eiweiße, Kohlenhydrate oder Fette im Stoffwechsel durch Enzyme (in der Regel Exoenzyme) in ihre Bausteine (Monomere wie Aminosäuren, Monosaccharide, Fettsäuren) zerlegt. Nur diese niedermolekularen Substanzen können schließlich von den Mikroorganismen über spezifische Transportsysteme aufgenommen und weiter abgebaut werden. Der Hydrolysevorgang ist unerlässlich für den weiteren Stoffumsatz im Biogasprozess. Er läuft aber in der Regel parallel zu weiteren Abbauvorgängen im Fermenter ab. Man unterscheidet einfach zu hydrolysierende Substrate (Stärke und Eiweiß), die durch abiotische Hydrolyse und Exoenzyme vergleichsweise schnell gespalten werden und komplexe Substanzen (Lignozellulose), die die Geschwindigkeit der Hydrolyse und damit die Biogasbildungsrate bestimmen ^[7].

Grundsätzlich kann man beim Biogasprozess die nachfolgend aufgeführten Hydrolyseverfahren unterscheiden:

- Thermodruckhydrolyse (Aufschluss bei hoher Temperatur unter Druck – „thermo-mechanischer“ Molekülaufschluss)
- Perkolat-Hydrolyse (Feststoffstapel mit Perkolation)
- Vollstrom-Hydrolyse (Hydrolyse im Flüssigkeitstank)
- An-/Abwesenheit von Sauerstoff

- Bei der **Thermodruckhydrolyse**, erfolgt ein thermomechanischer Molekülaufschluss durch erhöhte Temperatur und erhöhten Druck ^[15]. Auf die weitere Erläuterung dieser Form des Aufschlusses soll hier verzichtet werden.

Weiterhin kann man die derzeit getesteten Verfahren mit vorgeschalteter Hydrolyse in zwei Gruppen unterteilen: die „Perkolat-Hydrolyse“ und die „Vollstrom-Hydrolyse“.

- Bei der **Vollstrom-Hydrolyse** wird einem in der Biogaspraxis üblichen vlldurchmischten CSTR-Reaktor (Completely Stirred Tank Reactor) ein Hydrolysefermenter vorgeschaltet, der ebenfalls als klassischer Nassvergärungsfermenter ausgeführt ist. Das zu vergärende Substrat wird ausschließlich diesem Hydrolysefermenter zugegeben. Bedingt durch eine kurze Verweilzeit und eine hohe Raumbelastung sinkt in diesem vorgeschalteten Hydrolysefermenter der pH-Wert ab, so dass kein Methan gebildet werden kann. Nach einer Verweilzeit von 1 – 10 Tagen wird eine Teilmenge des vorversäuerten Materials dem CSTR-Reaktor zugeführt, wo die Methanbildung abläuft.
- Bei der **Perkolat-Hydrolyse** erfolgt die Konversion der organischen Masse in organische Säuren, Alkohole und lösliche Zuckerverbindungen ebenfalls in einem Hydrolyse-Fermenter. Im Gegensatz zum Vollstrom-Verfahren werden diese löslichen organischen Verbindungen durch eine Perkolatation des Substratstapels ausgewaschen. Nur dieses mit der organischen Fracht beladene Perkolat wird dem Methanreaktor zugeführt; nicht abbaubare Strukturstoffe verbleiben zunächst im Hydrolyse-Fermenter und werden später einer gesonderten Verwertung zugeführt. Als Methanreaktoren kommen bei diesen Systemen häufig Festbett-Reaktoren zum Einsatz, um eine ausreichend große Bakterienpopulation zu gewährleisten. Die Hydrolyse-Fermenter des Perkolat-Verfahrens werden derzeit ausschließlich diskontinuierlich beschickt und sind mit einem quasi-kontinuierlich beschickten Methanreaktor verbunden.
- Sowohl die Perkolat- als auch die Vollstromhydrolyse lässt sich noch nach der An- oder Abwesenheit von Sauerstoff unterteilen. So wird beispielsweise die „**aerobe Hydrolyse**“ als mögliches Vorbehandlungsverfahren in der Literatur genannt ^[9, 14]. Bei dieser Vorbehandlung wird gezielt atmosphärische Luft in den Hydrolysebehälter eingeblasen, um aeroben Stoffabbau und damit Substrataufschluss

anzuregen. Es ist hierbei mit einem Anstieg des pH-Wertes zu rechnen. Der aerobe Abbau sollte wie bei der „Flüssigkompostierung“ (aerob thermophile Stabilisierung) zu einer Selbsterwärmung des Substrates führen, was durch den Abbau organischer Substanz bedingt wird. Diese organische Masse steht danach nicht mehr für die Methanbildung zur Verfügung (=Energieverlust). Bei dieser Art des Stoffabbaus entsteht Kohlendioxid, das zusammen mit Ammoniak den Hydrolysebehälter verlässt. Geruchemissionen sind hierbei nicht zu vermeiden. Bei Rückführung ausgefaulten Gärrestes zur Verdünnung des Frischsubstrates kann nicht ausgeschlossen werden, dass sich bereits in der Hydrolysephase Methan in geringen Konzentrationen bildet. Aus diesem Grund sollte bei dieser Art der Hydrolyse ein Biofilter nachgeschaltet werden, um die dabei entstehenden Gase und Gerüche abzubauen.

Die Hydrolyse kann außerdem im **anaeroben Milieu** ablaufen. Dazu werden vollständig geschlossene Behälter verwendet, deren Betriebszustände (pH-Wert, Temperatur) gezielt gesteuert werden. In der Praxis wird zum Teil mit Behältern experimentiert, die partiell offen sind. In Abhängigkeit von eingestellter Temperatur und gewähltem pH-Wert bilden sich Gase wie Kohlendioxid, Methan, Ammoniak, Schwefelwasserstoff und Wasserstoff in unterschiedlicher Zusammensetzung. Außerdem können Gerüche den Hydrolysebehälter verlassen. Auch derart betriebene Hydrolysebehälter müssen gasdicht abgedeckt werden, damit das entstehende Hydrolysegas einer Verwendung zugeführt werden kann. Ein Luftzutritt in den Fermenter ist aus sicherheitstechnischen Gründen unbedingt zu vermeiden.

Untersuchungen zum Hydrolyseprozess an der Universität Hohenheim

An der Landesanstalt für Agrartechnik und Bioenergie wurden sowohl die Vollstrom als auch die Perkolat-Hydrolyse in mehreren Forschungsvorhaben untersucht. Hierbei wurde zum Teil auch mit dem Zusatz von Enzymen gearbeitet ^[2].

Im Rahmen eines Verbundforschungsprojektes wurde an der Universität Hohenheim eine Laboranlage zur anaeroben Perkolat-Hydrolyse

aufgebaut ^[18]. Die Hydrolysephase war als perkolierter Feststofffermenter ausgeführt. Der Biomassestapel wurde mit Flüssigkeit berieselt, diese Flüssigkeit wäscht lösliche Bestandteile aus dem Gutstapel aus (siehe Abbildung 2, Schema). Diese Hydrolysefermenter wurden bei einer Temperatur von 55 °C und einem pH-Wert von 5 im Batch-Betrieb gefahren. Innerhalb von 4 Tagen stieg in der Hydrolyseflüssigkeit die CSB Konzentration von 30.000 mg O₂/l auf 50.000 mg O₂/l an, was das Auswaschen organischer Substanz aus dem Feststoffstapel belegt. Nach 4 Tagen Batch-Betrieb wurde damit begonnen, täglich ca. 40 % der Flüssigkeit aus der Hydrolysephase zu entnehmen und diese dem Festbett-Methanreaktor zuzuführen. Dieselbe Flüssigkeitsmenge wurde aus dem Methanreaktor in den Hydrolysefermenter gepumpt. Die Untersuchungen zeigen, dass die im Perkolat gelösten organischen Substanzen im Festbettreaktor schnell abgebaut werden. Durch den Austausch von Substrat zwischen den Fermentern stieg der pH-Wert in der Hydrolysephase an. Ab einem pH-Wert von etwa 6,5 setzte auch im Hydrolysefermenter die Methanbildung ein. Nach etwa 25 Tagen war die Methanbildung im gesamten System abgeschlossen. Der Prozess lief stabil und ohne Störungen. Es wurden hohe Abbaugrade bei Wiesengras von durchschnittlich 79 % erzielt. Die Biogasqualität in der Methanisierungsstufe war mit einem Methangehalt von 69 %

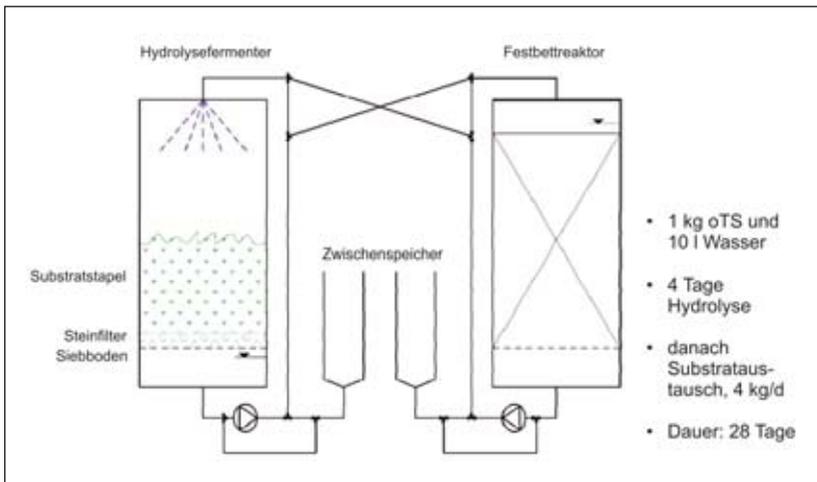


Abb. 2: Zweiphasig betriebenes Biogassystem mit einer Batch-Hydrolysephase und einem Festbettreaktor – Schema ^[18]

sehr gut. Im Mittel der Versuche entstanden 63 % des im System gebildeten Methans in der Methanisierungsphase, der Rest in der Hydrolysephase, vor allem nach Beginn des Perkolataustausches ^[18]. Dies belegt, dass bei dieser Betriebsweise das in der Hydrolysephase gebildete Gas nicht ungenutzt abgeleitet werden darf.

In einer weiteren Versuchsreihe wurden die Hydrolysebehälter (Abbildung 3) bei unterschiedlichen Temperaturen betrieben. 25 °C, 38 °C und 55 °C ^[19]. Es zeigte sich mit steigender Temperatur ein beschleunigter Umsetzungsprozess in der Hydrolyse, der sich allerdings auf den gesamten Prozess beschleunigend auswirkte. Während in der psychrophilen Variante bei Einsatz von Grassilage nur ein spezifischer Methanertrag von 0,243 m³/kg oTS erzielt wurde, lag dieser bei einer mesophilen Betriebsweise bei 0,334 m³/kg oTS und bei der thermophilen Betriebsweise bei 0,387 m³/kg oTS. Entsprechend verhielten sich die Abbaugrade mit 38 %, 66 % und 76 %.

In weiteren Untersuchungen wurde eine kontinuierliche Vollstrom-Hydrolyse betrachtet ^[13]. In 400 l fassenden, liegenden Durchflussfermentern wurde Maissilage bei einer Temperatur von 55 °C bei einer Raumbelastung von 4 kg oTS/m³ · Tag und einer Verweilzeit von 10 Tagen hydro-

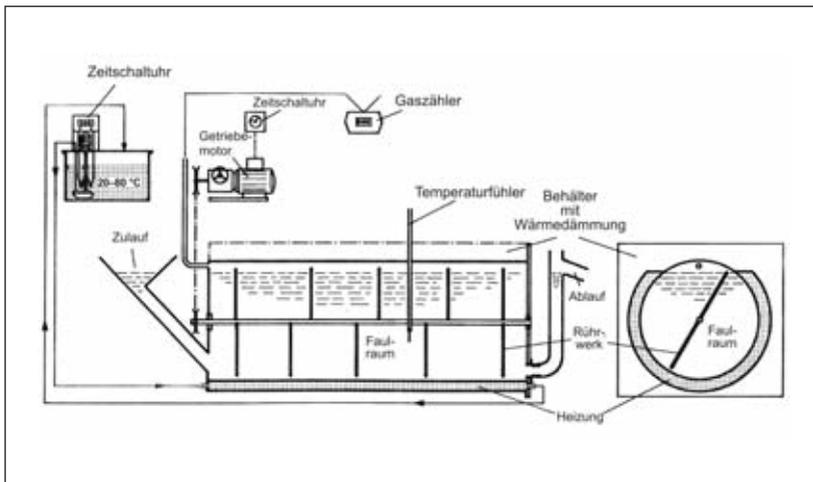


Abb. 3: Hydrolysebehälter (400 l) im thermophilen Durchflussbetrieb, bei 55 °C, einer hydraulischen Verweilzeit von 10 Tagen, einer Raumbelastung von 4 kg oTS/m³ · d und bei einem pH-Wert von 5,5 betrieben

lysiert. Durch Zugabe von Calciumoxid wurde ein pH-Wert von 5,5 eingestellt. Bei optimal ablaufender Hydrolyse zeigte sich eine starke Anreicherung von Carbonsäuren im Substrat (s. Tabelle 2), die völlig von den aus einphasigen Fermentersystemen bekannten Zusammensetzungen abwich. Dabei konnte ein sehr hoher Anteil an Essigsäure, n-Buttersäure und Capronsäure gemessen werden. Etwa 34 % der organischen Ausgangssubstanz wurde in Gärsäuren überführt.

Tab. 2: Fettsäuregehalte einer kontinuierlich betriebenen Hydrolysephase bei der Monovergärung von Maisilage bei thermophiler Temperatur ^[13]

Säuremuster	ppm
Essigsäure	7637
Propionsäure	686
Iso-Buttersäure	22
n-Buttersäure	3297
Iso-Valeriansäure	103
n-Valeriansäure	113
Capronsäure	1678
Essigsäureäquivalent	11450

Bei der Hydrolyse entstand Hydrolysegas, das zu 48,2 % aus Kohlendioxid bestand. Methan war in diesem Gas nicht messbar. Außerdem waren 47,7 % Wasserstoff enthalten. Schwefelwasserstoff wurde in diesem Hydrolysegas nicht gemessen. Bezogen auf den Input an Substrat wurde eine spezifische Hydrolysegasmenge von 0,110 m³/kg oTS gebildet.

Das Hydrolysat wurde im Anschluss separiert und in eine feste und eine flüssige Fraktion getrennt. Aus den beiden Fraktionen wurde das Methanbildungspotenzial mithilfe des Hohenheimer Biogasertragstestes (HBT) bestimmt. Das unbehandelte Substrat aus der Kontrollvariante wurde mit der zur Hydrolyse analogen Wassermenge vermischt, um die bereits im Rohsubstrat enthaltenen löslichen Bestandteile in gelöste Form zu überführen. Nach Separation wurden auch hier die feste und flüssige Fraktion dem HBT-Gärtest zugeführt. In den Summenkurven der Methanbildung zeigt sich (Abbildung 4), dass die organische Substanz aus der flüssigen Fraktion der Hydrolysevariante schnell zu Methan umgesetzt wird. Außerdem lag bei den hydrolysierten Varianten ein mit 61,3 %

deutlich höherer Methangehalt im Biogas vor als bei den unbehandelten Varianten mit 52,4 %. Die entsprechend ausgelaugte feste Fraktion wird dagegen nur langsam abgebaut. Bei der ausgewaschenen Variante ohne Hydrolyse liegt der Methanertrag der festen Fraktion noch sehr hoch. Ohne Hydrolyse liegt die organische Substanz in schlechter abbaubarer Form vor.

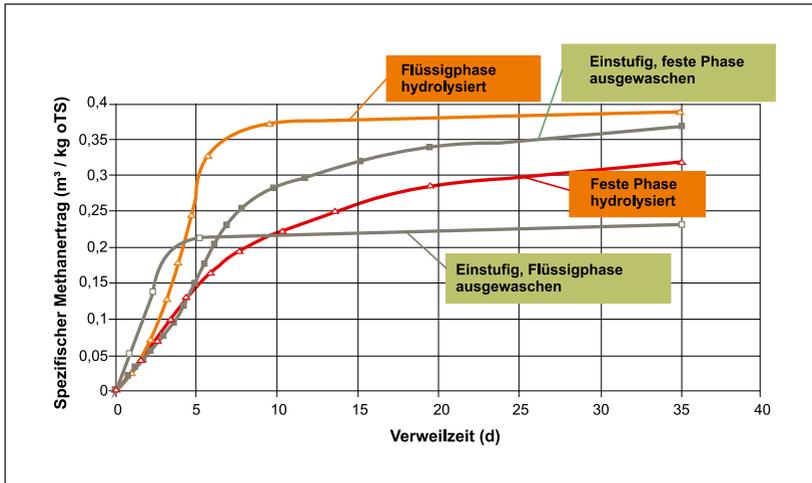


Abb. 4: Methanertrag der festen und flüssigen Fraktion hydrolysierter und nicht hydrolysierter Maissilage^[13]

Gegenüber dem einphasig vergorenen Substrat konnte das zweiphasige System mit Blick auf die Abbaugeschwindigkeit punkten. Beim Vergleich der spezifischen Methanerträge von zweiphasiger und einphasiger Betriebsweise zeigt sich allerdings, dass durch die Vorschaltung einer Hydrolysephase ein niedrigerer Methanertrag erzielt wird. Bei der einphasigen Vergärung wurde ein spezifischer Methanertrag von 0,371 m³ Methan/kg oTS erzielt, bei der zweiphasigen dagegen nur 0,332 m³ Methan/kg oTS. Bei den zweiphasigen Varianten wurde ein Minderertrag an Methan zwischen 8,4 und 12,2 % gemessen. Bei Trennung der Prozessphasen kann der in der Hydrolysephase entstehende Wasserstoff nicht in der nachfolgenden Methanisierung für die acetoklastische Methanisierung genutzt werden. Damit verursacht der Wasserstoffgehalt des Hydrolysegases rechnerisch einen um 8,5 % niedrigeren Methanertrag,

wodurch sich der Minderertrag dieser Variante an Methan erklären lässt. Dieses Ergebnis zeigt, dass durch die Vorschaltung einer Hydrolysephase ein schnellerer Substratabbau in der zweiten Prozessphase erreicht werden kann. Es belegt aber auch, dass das entstehende Hydrolysegas gesammelt und z. B. als direkte Wasserstoffquelle genutzt oder der Methanisierungsphase als Wasserstofflieferant für die acetoklastische Methanbildung zugeleitet werden muss, um ein Energiedefizit der zweiphasigen Variante zu vermeiden. Ein unkontrolliertes Entweichen von wasserstoffhaltigem Hydrolysegas würde zudem ein unkalkulierbares Sicherheitsrisiko (Explosionsgefahr) für den Anlagenbetrieb bedeuten.

Schlussfolgerung

Die hier vorgestellten Untersuchungen konnten belegen, dass durch den Einsatz der Hydrolyse ein Aufschluss des Substrates erfolgt. Organische Substanz wird zu Fettsäuren überführt, was eine gleichmäßige und besser kontrollierbare Versorgung der Mikroorganismen in der Methanisierungsphase erlaubt, als bei Zugabe von nicht aufbereiteter Biomasse im einphasigen Prozess. Nach vorgeschalteter Hydrolysephase wurde ohne Eintrag des Hydrolysegases in die Methanisierungsphase jeweils eine bessere Gasqualität in der Methanisierungsphase mit Methangehalten über 60 % beobachtet. Der verbesserte Substrataufschluss geht allerdings auf Kosten des spezifischen Methanertrages des zugeführten Substrates.

Dennoch stecken in der zweiphasigen Betriebsweise Potenziale für die Zukunft. So kann möglicherweise mithilfe von Enzymen ein gezielter Aufschluss schwer abbaubaren Materials vorgenommen werden. Es besteht im Bereich der Hydrolyse, speziell bei der Vergärung von nachwachsenden Rohstoffen noch erheblicher Forschungsbedarf, da z. B. die Trennung des Biogasprozesses auch sehr unterschiedlich auf verschiedene Substrate reagiert ^[1, 19]. Diese Forschung muss allerdings unter kontrollierten Bedingungen im Labor erfolgen und nicht an landwirtschaftlichen Biogasbetrieben. Unkontrolliert aus Hydrolysefermentern entweichendes Methan- oder Wasserstoffgas kann ein erhebliches Gefahrenpotenzial darstellen und einen negativen Einfluss auf die Ökobilanz des Biogasverfahrens haben. Derzeit kann der Einsatz einer separaten Hydrolysephase für die Vergärung von nachwachsenden Rohstoffen nicht bzw. nur in speziellen Einzelfällen empfohlen werden.

Literatur

- [1] BISCHOFBERGER, W., N. DICHTL, K.-H. ROSENWINKEL, C.F. SEYFRIED und B. BÖHNKE: Anaerobtechnik – 2. vollständig überarbeitete Auflage, Springer Verlag Berlin Heidelberg, ISBN: 3-540-06850-3
- [2] BRULÉ, M, H. OECHSNER, L. FISCHER, A. LEMMER und T. JUNGBLUTH: Zusatz von faserspaltenden Enzymen zur Steigerung der Biogasausbeute von Energiepflanzen. Internationale Konferenz „Fortschritt beim Biogas“, Universität Hohenheim, 19. – 21. September 2007, Tagungsband S. 273 – 278
- [3] CASSINI, A.S.;, I. C. TESSARO. and L. D. F. : Simulation of a primary anaerobic acidogenic reactor of an isolated soy protein wastewater treatment system. In: V Congreso Interamericano de Ingeniería Química, 2006, Buenos Aires. V Congreso Interamericano de Ingeniería Química - Proceedings, 2006.
- [4] CHYI, Y.,T. and; DAGUE R. R.: Effects of particulate size in anaerobic acidogenesis using cellulose as a sole carbon source, Water environment research, 1994, vol. 66, no5, pp. 670 – 678 (23 ref.)
- [5] DEMIRER, G.N., and S. CHEN: Effect of retention time and organic loading rate on anaerobic acidification and biogasification of dairy manure, J Chem Technol Biotechnol 79 (2005), pp.1381 – 1387
- [6] HEUWINKEL, H, M. LEBUHN, M. EFFENBERGER, A. GRONAUER, D. PREISLER, H. OECHSNER, A. LEMMER, H.F. JACOBI, R JUNGE und E HARTUNG: Optimierung des mikrobiellen Umsatzes in landwirtschaftlichen Biogasanlagen. VDLUFA Schriftenreihe 64, 2008
- [7] KABASCI, S.: Einführung in das Thema Hydrolyse. 1. Merseburger Biomassegespräch: Wirtschaftliche Optimierung für Biogasanlagen – Separate Hydrolyse, FnBB, IBBK-Fachgespräch am 11. Februar 2009 in Merseburg
- [8] KLOCKE, M.: Mikrobielle Biodiversität in Biogasreaktoren bei der Vergärung von nachwachsenden Rohstoffen. In Biogas in der Landwirtschaft – Stand und Perspektiven. FNR/KTBL-Kongress am 15. Und 16. September 2009 in Weimar
- [9] KRUPP, M: “Fermentative mesophile Wasserstoffherzeugung” im Tagungsband des Seminars: “Stand der Energiegewinnung aus Abwässern und Abfällen” am 16. Nov. 2007, SiWaWi e.V. Essen
- [10] LEMMER, A. und H. OECHSNER: Optimale Versorgung der Biogasanlagen mit Makro- und Mikronährstoffen. Workshop „Strategien zur optimalen Fütterung von Biogasanlagen“ bei der 17. Jahrestagung des Fachverbandes Biogas e.V., 15. – 17. Januar 2008, Nürnberg, Tagungsband
- [11] LINKE B. und P. MÄHNERT: Einfluss der Faulraumbelastung auf die Gasausbeute von Gülle und nachwachsenden Rohstoffen. Biogastagung, Landwirtschaftskammer Nordrhein-Westfalen, Haus Düsse, 15. April 2005
- [12] OECHSNER, H., D. HELFFRICH und H. SCHMIDT: Bestimmung des Restgaspotenzials im Substratauslauf landwirtschaftlicher Biogasanlagen. -Tagung „Emissionen der Tierhaltung – Sektion Biogas“ vom 5. – 7. Dezember 2006, Bildungszentrum Kloster Banz, Tagungsband
- [13] PREISLER, D., A. SHAH, S. ZIELONKA, A. LEMMER, H. OECHSNER und T. JUNGBLUTH: Untersuchungen zur Hydrolyse von Maissilage. Agrartechnik, 63. Jg., H. 1/2008, S. 30 – 31

- [14] RABE, P.: Untersuchungen zur Hydrolyse bei Biogasanlagen. Fachtagung Biogas 2008, Potsdam, 23. Oktober 2008. ETI, Brandenburgische Energie Technologie Initiative
- [15] SCHUMACHER, B.: Untersuchungen zur Aufbereitung und Umwandlung von Energiepflanzen in Biogas und Ethanol, Dissertation Universität Hohenheim, 2008,
- [16] VEEKEN, A.; KALYUZHNYI, S.; SCHARFF, H.; HAMELERS, B.: Effect of pH and VFA on Hydrolysis of Organic Solid Waste
- [17] VOGTHERR, J. und H. OECHSNER: Endlager gasdicht verschließen. Biogas-Journal, Heft 1/08, 2008, S. 40 – 43
- [18] ZIELONKA, S.; A. LEMMER, H. OECHSNER und T. JUNGBLUTH: Research into the development of a two stage process with bioleaching for digesting grass silage. In: AgEng 2008 Book of Abstracts/ Conference Proceedings CD, 23. – 25. Juni, Hersonisos Griechenland
- [19] ZIELONKA, S. und A. LEMMER: Vergärung von Grassilage in einer zweiphasigen Prozessführung. BCN-Abschlussymposium „Wieviel Biogas steckt in Pflanzen“ am 7. Mai 2009, IHK Potsdam
- [20] ZOBES Biogasanlage in Plauen/Vogtland: Geflügelkot und Abfallvergärung mit vorgeschalteter aerober Hydrolysephase. Bau durch: Chemie- und Tankanlagenbau-Kombinat Fürstenwalde im Jahr 1987 Eigene Betriebsbesichtigung, 1990

Anschrift der Autoren:

*Dr. sc. agr. Hans Oechsner, Dr. agr. Andreas Lemmer,
Daniel Preißler, Simon Zielonka
Universität Hohenheim
Landesanstalt für Agrartechnik und Bioenergie
Garbenstr. 9, 70599 Stuttgart
E-Mail: oechsner@uni-hohenheim.de*

Qualitätssilage für die Biogasproduktion

*Christiane Herrmann, Monika Heiermann, Christine Idler
Leibniz Institut für Agrartechnik Potsdam-Bornim e.V. (ATB)*

Einleitung

Bei der Bereitstellung pflanzlicher Substrate für die Biogasproduktion nimmt die qualitätsgerechte Konservierung und Lagerung des Erntegutes eine zentrale Rolle ein. Hohe Biomasserträge können nur dann genutzt werden, wenn es gelingt, die im Erntegut enthaltene Energie bis zur Biogasanlage möglichst vollständig zu bewahren. Im Energiepflanzenbau für die Biogasproduktion wird überwiegend die Gesamtpflanze der Nutzung zugeführt. Als übliches Verfahren der Konservierung von Häckselgut aus Ganzpflanzen hat sich dabei die Silierung etabliert. Die Eignung einer Pflanzenart bzw. eines Erntegutes für die Biogasproduktion wird im Wesentlichen vom spezifischen Methanbildungspotenzial bestimmt, das wiederum auf der Menge, Zusammensetzung und Verfügbarkeit organischer Bestandteile im Pflanzenmaterial basiert (Abbildung 1). Umsetzungsvorgänge bei der Silierung haben einen Einfluss auf die organischen Bestandteile und beeinflussen damit auch das Methanbildungspotenzial.

Während der Silierung findet ein Stoffumbau statt, d. h. es werden mit Hilfe von Milchsäurebakterien unter Luftabschluss pflanzeneigene Kohlenhydrate in konservierende Säuren umgesetzt. Die gebildeten organischen Säuren stehen dem Prozess der Methanbildung zur Verfügung und können z. T. direkt von den methanogenen Archaeen verwertet werden. Produkte der Silierung sind jedoch auch Gase, wie Kohlendioxid, Wasserstoff, Stickoxide und Ammoniak, welche aus dem Silo diffundieren und für den Prozess der Methanisierung nicht zur Verfügung stehen (Stoffabbau). Diese Gärverluste können durch fachgerechte Silierung gemindert, jedoch nicht vermieden werden und verringern das Methanbildungspotenzial des geernteten Gutes. Weiterhin können während der Silierung erhebliche Verluste, z. B. durch Sickersaftbildung, Fehlgärungen, aeroben Verderb oder Umsetzungsvorgänge nach Siloöffnung (Nacherwärmung) auftreten.

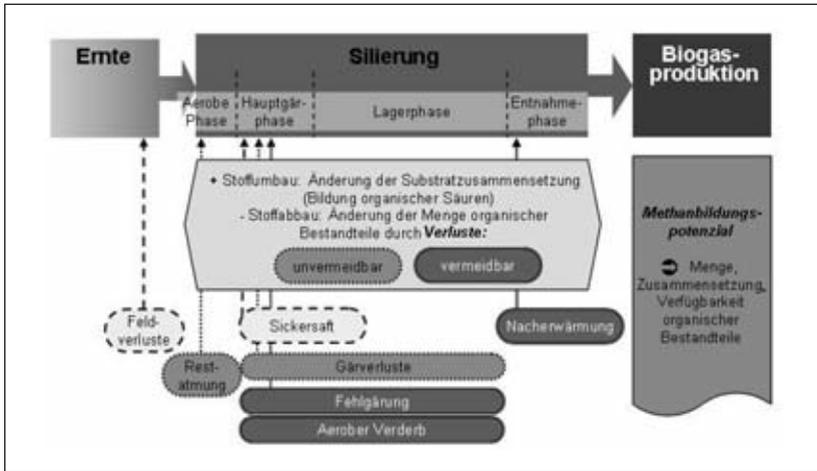


Abb. 1: Konservierung von Biogaspflanzen

Diese Verluste führen ebenfalls zu einer Minderung der potenziellen Methanmenge pro Masseneinheit des geernteten Pflanzenaufwuchses und sollten bestmöglich vermieden werden.

Es ist davon auszugehen, dass Silagequalität und -stabilität einen maßgeblichen Einfluss auf den Biogasertrag haben. Allerdings wurden die Größenordnungen dieser Effekte bislang noch nicht systematisch untersucht und quantifiziert. Im Rahmen des von der FNR geförderten Verbundprojektes „EVA“ werden umfangreiche Untersuchungen zur Wirkung der Silagequalität sowie verschiedener Silierparameter auf die Methanbildung im Labor- und Praxismaßstab durchgeführt (Heiermann et al. 2009). Im folgenden Beitrag werden die Auswirkungen der Silierung auf die Methanausbeute unter Berücksichtigung der Silierverluste beschrieben. Oberstes Ziel ist, Qualitätskriterien für Biogassilagen zu identifizieren bzw. zu etablieren sowie Handlungsempfehlungen zur Vermeidung von Qualitätsminderungen zu geben.

Material und Methoden

Die im Folgenden dargestellten Ergebnisse wurden durch Untersuchungen an ausgewähltem Pflanzenmaterial ermittelt, welches aus den Frucht-

folgen des Verbundvorhabens „EVA“ (Standorte Brandenburg, Sachsen, Thüringen, Baden-Württemberg und Niedersachsen) stammt. In die Auswertung wurden Proben aus den Anbaujahren 2005 bis 2007 einbezogen (Herrmann et al. 2009). Die Untersuchungen bzgl. Buttersäuregärung und aeroben Verderb wurden in Praxisversuchen in Brandenburg durchgeführt.

Die Silierversuche erfolgten zum Teil im Labor- und zum Teil im Praxismaßstab. Im Labormaßstab wurden Ganzpflanzensilagen in 1,5 Liter WECK-Gläser mit Hilfe einer Vorrichtung zur manuellen Verdichtung des Pflanzenmaterials erstellt. Die Silagen wurden über einen Zeitraum von 90 Tagen bei 25 °C unter anaeroben Bedingungen gelagert.

Um die Methanbildung aus den verschiedenen Proben bewerten zu können, wurden Batch-Gärtests nach VDI-Richtlinie 4630 (VDI 2006) durchgeführt. Dazu wurden 50 g des zu untersuchenden Materials zu 1,5 Litern Impfmateriale (Gärrest aus vorherigen Batch-Versuchen mit Biogaspflanzen) gegeben und unter mesophilen Bedingungen über einen festgelegten Zeitraum von 30 Tagen inkubiert. Das entstehende Biogas wurde in kalibrierten Nassgasometern aufgefangen und täglich analysiert. Für die Darstellung der Methanausbeute wurden die summierten Methanmengen, die in dem 30tägigen Versuchszeitraum aus den Silagen gebildet wurden, auf zwei unterschiedliche Parameter bezogen: Die Methanausbeute ohne Berücksichtigung der durch die Silierung entstandenen Gärverluste entspricht der üblicherweise ermittelten Methanausbeute und bezieht sich auf ein Kilogramm organischer Trockenmasse (oTM) der Silage. Die Menge an oTM eines Erntegutes nimmt jedoch bei der Silierung durch entstehende Verluste ab. Wird die gebildete Methanmenge auf ein Kilogramm der vor der Silierung vorhandenen oTM bezogen ($= \text{oTM}_{\text{orig.}}$), so erhält man entsprechend niedrigere Methanausbeuten, die die Verluste bei der Silierung berücksichtigen („Methanausbeute mit Berücksichtigung der Gärverluste bei der Silierung“). Die Differenz der beiden Methanausbeuten einer Probe weist auf die Minderung der Methanausbeute des Erntegutes durch Verluste bei der Silierung hin. Aufgrund der gewählten Versuchsdurchführung sind in den dargestellten Werten der Laborsilagen Gärverluste berücksichtigt, jedoch keine Verluste durch Sickersaftbildung oder Nacherwärmung. Alle TM-Gehalte wurden in Abhängigkeit vom pH-Wert um flüchtige organische Bestandteile nach Weissbach & Kuhla (1995) korrigiert.

Zielgröße Methanausbeute

Das Methanbildungspotenzial einer Pflanzenart ist in erster Linie von der chemischen Zusammensetzung des Pflanzenmaterials zur Ernte abhängig. Dabei wird allgemein aus Kohlenhydraten und Proteinen die niedrigste und aus Fetten die höchste Biogasausbeute erzielt. Ligninanteile und Lignin-Cellulose-Komplexe gelten im Biomethanisierungsprozess als sehr schwer oder nicht abbaubar und mindern daher die Gasausbeute.

Die mittleren Methanausbeuten der durch Batch-Gärtests (VDI 4630) untersuchten Pflanzensilagen aus den EVA-Fruchtfolgen sind in Abbildung 2 dargestellt. Neben Mais zeichneten sich eine Reihe weiterer Pflanzenarten, wie Grünschnittroggen, Ackerfuttermischungen und Wintertriticale durch hohe Methanbildungspotenziale aus. Allgemein war ein guter Zusammenhang zwischen der mittleren Methanausbeute der Silagen und dem mittleren Gehalt an Lignin ($R^2=0,78$) bzw. der Summe aus Lignin und Cellulose ($R^2=0,60$) gegeben. Die geringste Methanbildung je Einheit oTM wurde bei den Silagen der mehrjährigen Pflanzenarten Topinambur und Miscanthus erzielt. Ursache hierfür waren hohe Ligningehalte von ca. 12 bzw. 14 % TM im Erntegut dieser Pflanzenarten (Abbildung 2).

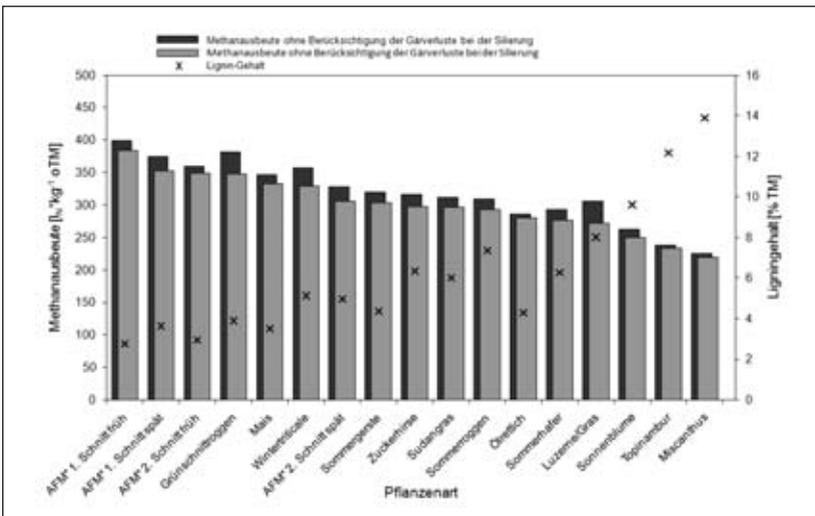


Abb. 2: Methanausbeuten und Ligningehalte untersuchter Silagen ohne und mit Berücksichtigung von Silierverlusten

Verluste, die während der Silierung in verschiedener Form auftreten, wie z. B. Gär- und Randverluste, Verluste durch Sickersaftbildung, durch aeroben Verderb oder Umsetzungsvorgänge nach Siloöffnung, führen grundsätzlich zu einer Minderung der pro Masseneinheit des geernteten Gutes erzeugten Methanmenge. Bei den analysierten Pflanzenarten aus den EVA-Fruchtfolgen wurden nur die Gärverluste bei der Silierung in Laborversuchen ermittelt. Die Gärverluste führten zu einer Minderung der Methanausbeute um 5 bis 34 Normliter je kg oTM des Erntegutes. Die höchsten Gärverluste wurden bei Pflanzenarten mit niedrigem TM-Gehalt zur Ernte, wie Luzerne/Gras und Grünschnittroggen, gemessen. Diese Ergebnisse belegen, dass der Konservierungserfolg einen wesentlichen Einfluss auf die tatsächlich erzielte Methanausbeute hat.

Gärqualität

Bei der Betrachtung der Zusammenhänge von Silierung und Methanausbeute ist insbesondere der Einfluss der Gärqualität auf die Methanbildung von Interesse. Die aus der Futtermittelkunde stammende und übliche Bewertung der Gärqualität einer Silage beruht auf einer Benotung des Konservierungserfolges durch Milchsäuregärung (DLG-Schlüssel 2006). Sie richtet sich neben der Forderung nach einem möglichst geringen Stoffabbau auch an Anforderungen der Tierernährung und Hygiene aus. Gärsäuren und Abbauprodukte, die eine Minderung der Futteraufnahme bei den Tieren bewirken, werden als negativ bezüglich der Gärqualität eingestuft. Für die Mikroorganismen, die an der Biogasproduktion beteiligt sind, sind jedoch gerade diese Abbauprodukte teilweise sehr gut verwertbar. Vor allem die Essigsäure kann im Biomethanisierungsprozess direkt genutzt und zu Methan umgebaut werden. Die Entwicklung eines dem DLG-Schlüssel vergleichbaren Bewertungssystems, speziell für die Produktionsrichtung Biogas, steht allerdings noch aus.

Beispielhaft sind die Zusammenhänge zwischen dem Milchsäuregehalt bzw. Essigsäuregehalt und Gärverlusten bei der Silierung sowie den Methanausbeuten der Silagen für Grünschnittroggen (Abbildung 3) dargestellt. Bei höheren Milchsäuregehalten in den Silagen wurden tendenziell geringere Gärverluste gemessen, während mit zunehmendem Essigsäuregehalt höhere Gärverluste auftraten. Die Essigsäure ist ein Gärprodukt, das vorwiegend durch Aktivität heterofermentativer Milchsäurebakterien,

Enterobakterien und Hefen gebildet wird. Laut McDonald et al. (1991) sind diese Fermentationswege mit höheren TM- und Energieverlusten verbunden als die Bildung von Milchsäure durch homofermentative Milchsäurebakterien (Tabelle 1).

Tab. 1: Charakterisierung unterschiedlicher Fermentationswege bei der Silierung

	Homofermentative Milchsäuregärung	Heterofermentative Milchsäuregärung
Gärsubstrate	Glucose, Fructose, u. a.	Glucose, Fructose, u. a.
Gärprodukte	Milchsäure	Milchsäure, Essigsäure , Ethanol, Mannitol, Propandiol, Butandiol, u. a.
Vor-/Nachteile	+ schnelle pH Wert-Absenkung + geringe Gärverluste - aerob instabil bei hohen Restzuckergehalten	+ Essigsäure als direkt nutzbares Ausgangssubstrat für Methanbakterien + verbesserte aerobe Stabilität - höhere Gärverluste

Höhere Essigsäuregehalte wirkten sich tendenziell positiv auf die Methanausbeute aus, wenn Gärverluste bei der Silierung nicht berücksichtigt wurden (Abbildung 3). Diese Ergebnisse bestätigen die gute Verwertbarkeit der Essigsäure für die Methanbildung. Die höheren Gärverluste mit steigendem Essigsäuregehalt werden durch höhere Methanausbeuten kompensiert. Mit steigendem Essigsäuregehalt wurde daher weder eine steigende noch eine fallende Tendenz der Methanausbeute mit Berücksichtigung der Gärverluste ermittelt. Da Essigsäure zusätzlich unterdrückend auf Hefen wirkt und damit die aerobe Stabilität verbessern kann, ist die Bildung höherer Essigsäuregehalte in Silagen für die Biogasproduktion durchaus positiv zu bewerten.

Dagegen ist Buttersäure generell unerwünscht und der Anteil sollte in gut konservierten Silagen nicht vorhanden sein, d. h. unter 0,3 % in der TM liegen. Höhere Buttersäuregehalte weisen auf Fehlgärungen hin, die vor allem dann auftreten, wenn das Erntegut verschmutzt ist, zu geringe Zuckergehalte und geringe TM-Gehalte aufweist. Eine Säuerung bei der Silierung kann dann nicht mehr im ausreichenden Maß stattfinden. Es kommt zur Anreicherung von Buttersäure in der Silage sowie zum Abbau von Proteinen und infolgedessen zu einer Ansammlung von unerwünschten Abbauprodukten wie z. B. Amininen und Ammoniak. Dabei kann die

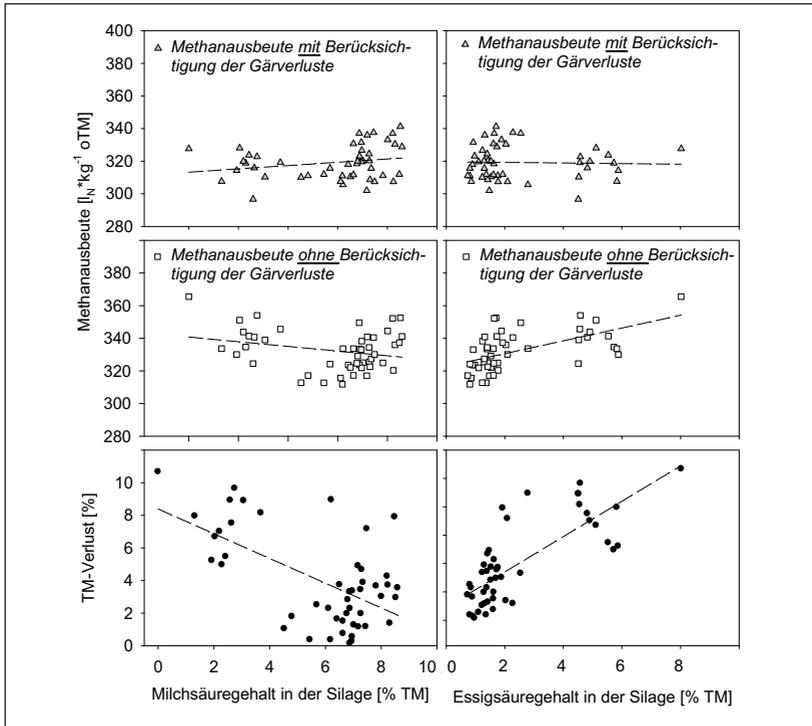


Abb. 3: Zusammenhang zwischen Milch- bzw. Essigsäuregehalte der Silagen und den Gärverlusten bzw. Methanausbeuten der Silagen ohne und mit Berücksichtigung der Siliervverluste am Beispiel von Grünschnittroggen (n=48)

Buttersäuregärung zu hohen Energie- und TM-Verlusten und bis zu einem völligen Verderb der Silage führen.

Die Wirkung hoher Buttersäuregehalte auf die Methanbildung zeigte sich beispielhaft bei der Beprobung eines Praxissilos mit Sudangrassilage (Abbildung 4a). Dabei wurden Buttersäuregehalte in der Silage bis zu 4,7 % TM bei gleichzeitig niedrigen Milchsäuregehalten von 1,2 – 1,8 % TM (Abbildung 4b) und pH-Werten > 4,5 gemessen. Mit steigenden Buttersäure- und Ammoniakgehalten (Abbildung 4c) der Silageproben im Randbereich des Silos nahmen die TM-Gehalte ab und die Asche- sowie die ADF-Gehalte zu (Abbildung 4d, e). Bezogen auf die Frischmasse der Silagen (ohne Beachtung der Siliervverluste) wurden im Batch-Gärtest um 17 – 33 %

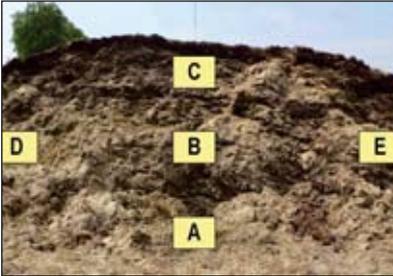


Abb. 4a: Probenahmestellen im Praxissilo

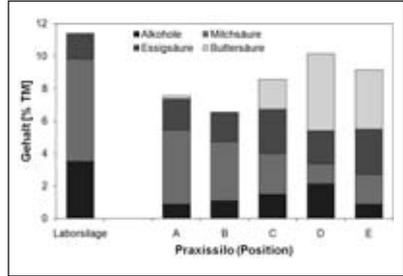


Abb. 4b: Gär säuremuster von silier-tem Sudangras mit deutlichen Fehlgärungen – Vergleich Labor- und Praxis-silagen

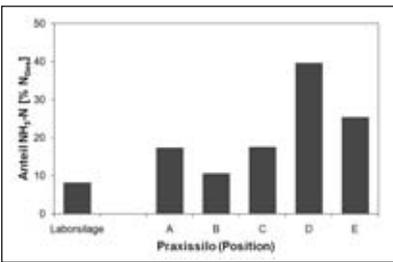


Abb. 4c: Ammoniakgehalte von silier-tem Sudangras mit deutlichen Fehlgärungen – Vergleich Labor- und Praxis-silagen

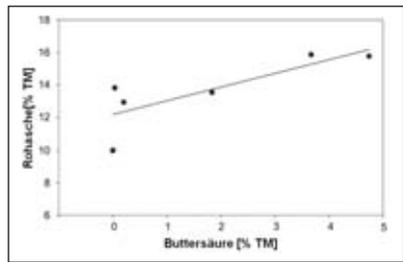


Abb. 4d: Rohaschegehalte von silier-tem Sudangras in Abhängigkeit des Buttersäuregehaltes

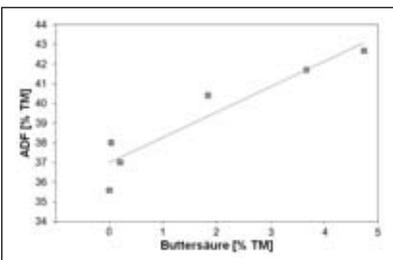


Abb. 4e: ADF-Gehalte (Lignin und Cellulose) von siliertem Sudangras in Abhängigkeit des Buttersäuregehaltes

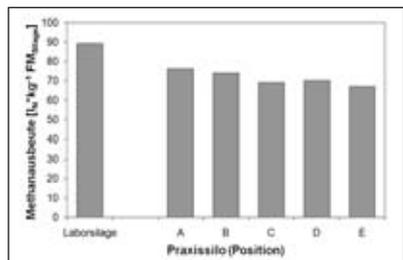


Abb. 4f: Methanausbeuten von silier-tem Sudangras – Vergleich Labor- und Praxissilagen

geringere Methanausbeuten ermittelt als von Silagen des gleichen Erntegutes, die unter optimierten Bedingungen im Labor konserviert wurden (Abbildung 4f). Insgesamt lag die je Hektar erzielte Methanmenge der Praxissilage mit Beachtung der deutlich höheren Silierverluste um 31 % unter dem Methanhektarertrag der Laborsilagen mit sehr guter Gärqualität.

Aerober Verderb

Silagen, die der Luft ausgesetzt sind, erleiden Qualitätsminderungen. Dies kann sowohl während der Lagerung der Silage im Silo bei ungenügendem Luftabschluss geschehen als auch in dem Zeitraum der Silageentnahme. Vor allem infolge zu großer Anschnittflächen, eines zu geringen Vorschubes und bei hohen Restzuckergehalten besteht die Gefahr der Nacherwärmung der Silage.

In einem Praxisversuch wurde eine Maissilage mit deutlichen Zeichen von aerobem Verderb, Wärmeentwicklung mit z. T. sichtbarer Schimmelbildung, untersucht. Messungen ergaben erhöhte Temperaturen an der Anschnittfläche des Silos, die 50 °C im Randbereich erreichten (Tabelle 2). Diese stärker erwärmten Silageproben des Randbereiches wiesen um bis zu 9 % geringere Methanausbeuten auf als die Silageproben aus dem Silokern. Im Vergleich zu einer unter Laborbedingungen konservierten Silage des gleichen Ausgangsmaterials ohne aeroben Verderb wurde eine um 16 % geringere Methanmenge je Hektar erzielt.

Tab. 2: Hohe Temperaturen an der Anschnittfläche einer Maissilage sind mit geringeren Methanausbeuten verbunden

Position im Silo	Anzahl der Proben	mittlere Temperatur an der Anschnittfläche [°C]	Spanne der Methanausbeuten [l _N /kg oTM]
A (Mitte unten)	9	29	352 – 356
B (Mitte)	9	37	335 – 348
C (Mitte oben)	9	43	338 – 343
D (links)	9	50	322 – 336
E (rechts)	9	44	333 – 336

Fazit

Eine sorgfältige Silierung von Biogaspflanzen zahlt sich durch eine bessere Ausnutzung des Erntegutes und damit durch höhere Methanhektarerträge aus. Silierverluste führen zu einer Minderung der je Hektar Anbaufläche erzeugten Methanmenge in der Biogasanlage. Die Vermeidung von Verlusten ist daher ein wesentlicher Faktor für die wirtschaftlich erfolgreiche Produktion von Biogas aus aufwendig erzeugten energiereichen Pflanzen. Insbesondere die Minderung der Silagequalität durch Buttersäuregärung und aeroben Verderb wirkt sich negativ auf die Methanausbeute aus. Mit höheren Essigsäuregehalten in den Silagen waren hingegen in den vorliegenden Untersuchungen bei Beachtung der Gärverluste keine positiven oder negativen Wirkungen auf die Methanausbeuten verbunden.

Beispiele aus der Praxis verdeutlichen, dass oft noch große Reserven bei der Erhaltung der Qualität des Pflanzenmaterials von der Ernte bis zum Einsatz im Fermenter vorhanden sind. Verluste bei der Silierung sind größtenteils unsichtbar und folglich schwer einzuschätzen. Sie können jedoch durch die Wahl geeigneter Pflanzenarten und Erntetermine, durch siliertechnische Maßnahmen (Anwelken, kurze Häcksellängen, Siliermittelzusatz) sowie durch die Einhaltung der Maßnahmen der „guten fachlichen Praxis“ minimiert werden. Wichtigstes Ziel bei der Konservierung von Biogaspflanzen sollte die Erzeugung qualitätsgerechter, stabiler Silagen sein.

Danksagung

Unseren EVA-Verbundpartnern Brandenburgisches Landesamt für Verbraucherschutz, Landwirtschaft und Flurneuordnung (LVLF), Landwirtschaftliches Technologiezentrum Augustenberg (LTZ), Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft (TLL), Landwirtschaftskammer Niedersachsen (LWK) und Sächsische Landesanstalt für Landwirtschaft (SLL) danken wir recht herzlich für die Bereitstellung der Pflanzenproben und die kooperative Zusammenarbeit. Die Arbeiten werden mit Mitteln des Bundesministeriums für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz (FKZ 2200-2305/-2405/-2505/-2605/-2705/-2805) gefördert.

Literatur

- DLG-Ausschuss für Futtermittelkonservierung (2006). Grobfuttermittelbewertung. Teil B: DLG-Schlüssel zur Beurteilung der Gärqualität von Grünfuttersilagen auf der Basis der chemischen Untersuchung. DLG e.V. (Hrsg.): DLG-Information 2/2006, 5 S.
- Heiermann M, Idler C, Herrmann C, Scholz V (2009). Abschlussbericht des Teilprojekt 4 (FKZ: 22002605) „Ermittlung des Einflusses der Pflanzenart und der Silierung auf Substratqualität und Biogasausbeute in Labor und in der Praxis“ im Rahmen des Verbundvorhabens „Entwicklung und Vergleich von optimierten Anbausystemen für die landwirtschaftliche Produktion von Energiepflanzen unter verschiedenen Standortbedingungen Deutschlands“, 83 S., unveröffentlicht.
- Herrmann C, Heiermann M, Idler C, Scholz V (2009) Einfluss der Silierung auf die Biogasbildung – Aktuelle Forschungsergebnisse. 18. Jahrestagung Fachverband Biogas e.V. „Biogas: dezentral erzeugen, regional profitieren, international gewinnen“, 03. – 5.02.2009, Hannover, S. 27 – 35.
- Herrmann C, Heiermann M, Idler C, Scholz V (2007): Parameters influencing substrate quality and biogas yield. In: Maniatis, K. et al. (eds.): Proceedings, 15th European Biomass Conference & Exhibition “From Research to Market Deployment”, 7 – 11 May 2007, Berlin, Germany, 809-819.
- McDonald P., Henderson A.R., Heron S.J.E. (1991). The Biochemistry of Silage. 2nd Edition. Chalcombe Publications, Marlow, England, 341 S.
- VDI Fachausschuss Regenerative Energien (2006). Vergärung organischer Stoffe. Substratcharakterisierung, Probenahme, Stoffdatenerhebung, Gärversuche. Verein Deutscher Ingenieure (Hrsg.): VDI-Richtlinie 4630, Beuth Verlag Berlin, 92 S.
- Weissbach F., Kuhla S. (1995). Substance losses in determining the dry matter content of silage and green fodder: arising errors and possibilities of correction. Übersicht Tierernährung 23, S. 189 – 214.

Anschrift der Autoren:

*Christiane Herrmann, Dr. rer. nat. Monika Heiermann,
Dr. rer. nat. Christine Idler
Leibniz Institut für Agrartechnik Potsdam-Bornim e.V. (ATB)
Max-Eyth-Allee 100, 14469 Potsdam
E-Mail: cherrmann@atb-potsdam.de*

Möglichkeiten zur Optimierung von Rohstoffmischungen an Beispielen

Thomas Amon
Universität für Bodenkultur Wien



Ausgangssituation



- Die Rohstoffquellen sind vielfältig (Wirtschaftsdünger, agrarische Nebenprodukte, Nebenprodukte aus Lebensmittel- und Biotreibstoffindustrie, Reststoffe von Kommunen, Energiepflanzen, ...)
- Die Substrate besitzen sehr heterogene Gäreigenschaften → Nährstoffe, Hemmstoffe, physikalische & technologische Eigenschaften, ... → komplexe Wirkungen in Mischungen (Synergien, Hemmungen, Wechselwirkungen)
- Die Rohstoffkosten betragen bis 40 % der Gesamtkosten der Biogaserzeugung
- Der Einsatz von Rohstoffmischungen in Biogasanlagen ist die Regel
- Zukünftig werden vermehrt agrarischen Reststoffe und Nebenprodukte der Lebensmittel- und Biotreibstoffindustrie eingesetzt werden



Universität für Bodenkultur Wien

Ziele

- Betriebsindividuelle Optimierung (stofflich, energetisch und wirtschaftlich) der vorhandenen Rohstoffe
- Bestimmung der Rohstoffqualität (Makro-Mikronährstoffe, Lignozellulose-Komplex)
- Kopplung der Erzeugung von Stoffen, Lebensmitteln und Energie aus Biomasse → Integration der Erzeugung
- Höchstmögliche Flächenproduktivität → Pflanzenzüchtung → Technologie der Ernte und Aufbereitung
- Abbau der Konkurrenz um Land und Lebensmittel durch hohe Flächenerträge nachhaltiger, integrierter Fruchtfolgesysteme mit Reststoffnutzung

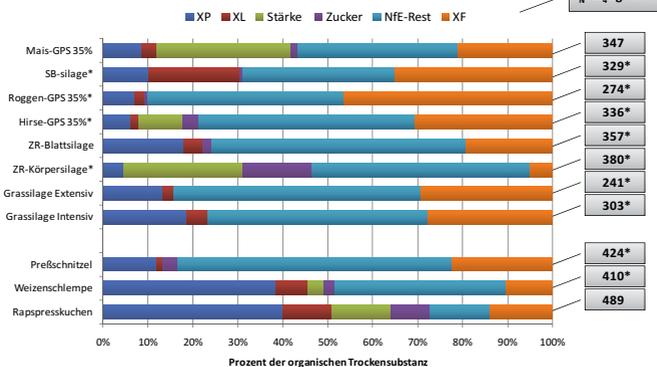
03.11.2009

Department für Nachhaltige Agrarsysteme | Institut für Landtechnik | Ao.Univ.Prof. Dr. Thomas Amon



Universität für Bodenkultur Wien

Inhaltsstoffliche Zusammensetzung und spez. Methanausbeute verschiedener Substrate



Quellen: Jeroch et al. (1999); * eigene Untersuchungen; KTBL (2005);

Abkürzungen: XP ... Rohprotein, XL ... Rohfett, NfE ... N-freie Extraktstoffe, XF ... Rohfaser; SB ... Sonnenblume, ZR ... Zuckerrübe

03.11.2009

Department für Nachhaltige Agrarsysteme | Institut für Landtechnik | Ao.Univ.Prof. Dr. Thomas Amon




Inhaltsstoffe, Biomasse- und Gasertrag, sowie optimaler Erntetermin am Beispiel von Mais



Universität für Bodenkultur Wien



34 - Vierknotenstadium
51 - Rispenschieben
73 - frühe Milchreife
85 - Teilreife
89 - Vollreife

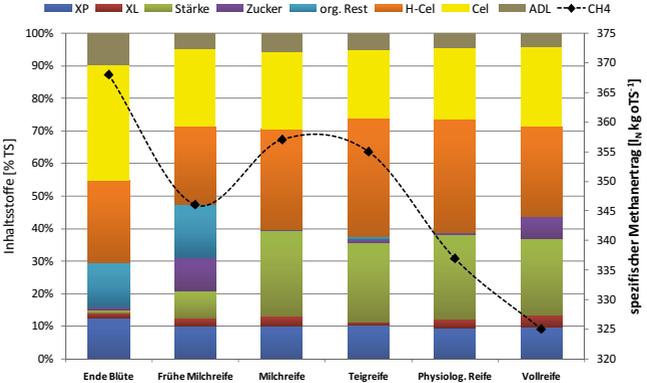
03.11.2009
Department für Nachhaltige Agrarsysteme | Institut für Landtechnik | Ao.Univ.Prof. Dr. Thomas Amon



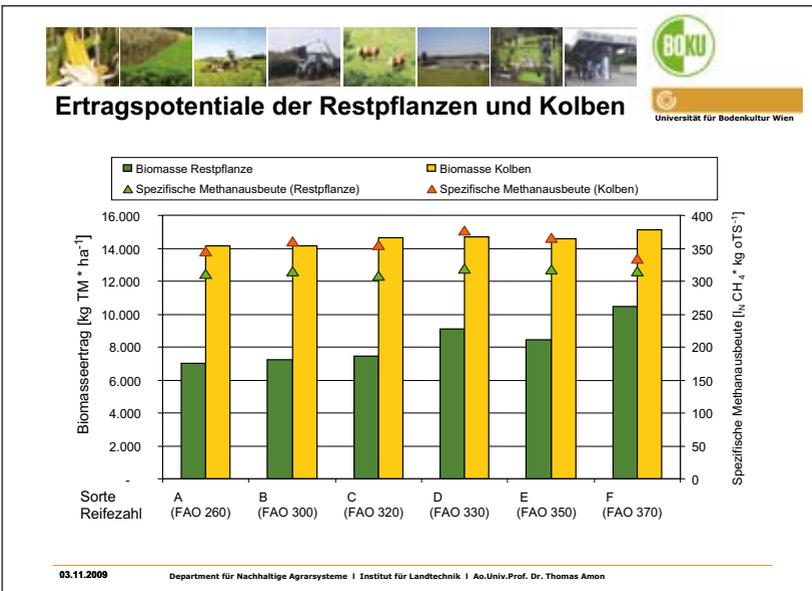
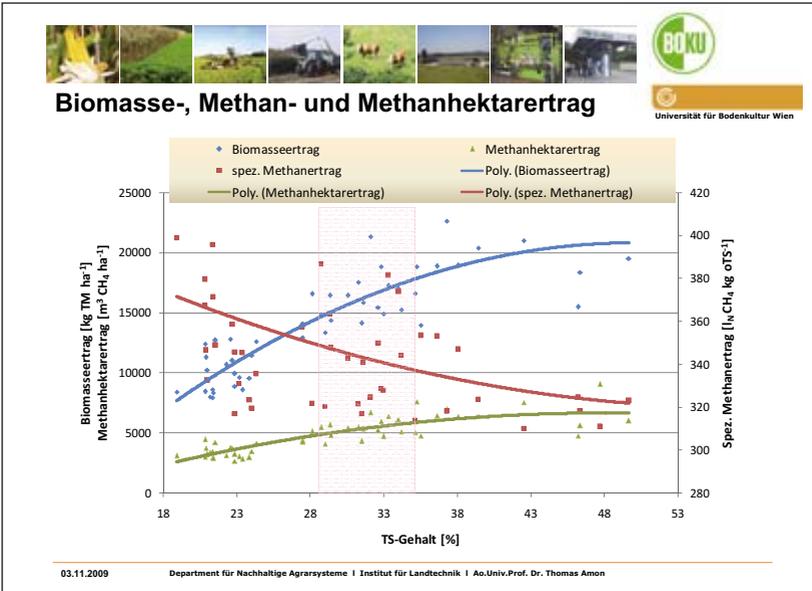

Inhaltsstoffliche Zusammensetzung und spez. Methanausbeute bei Mais

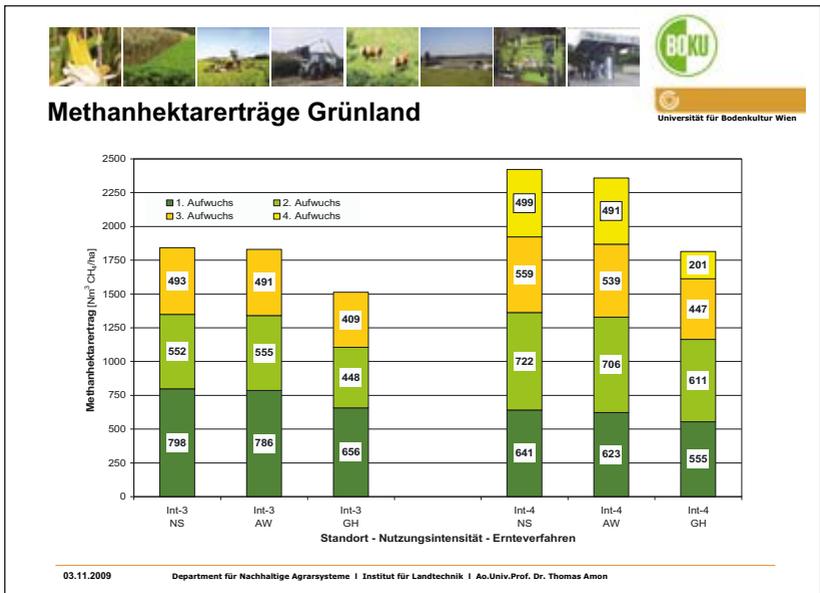
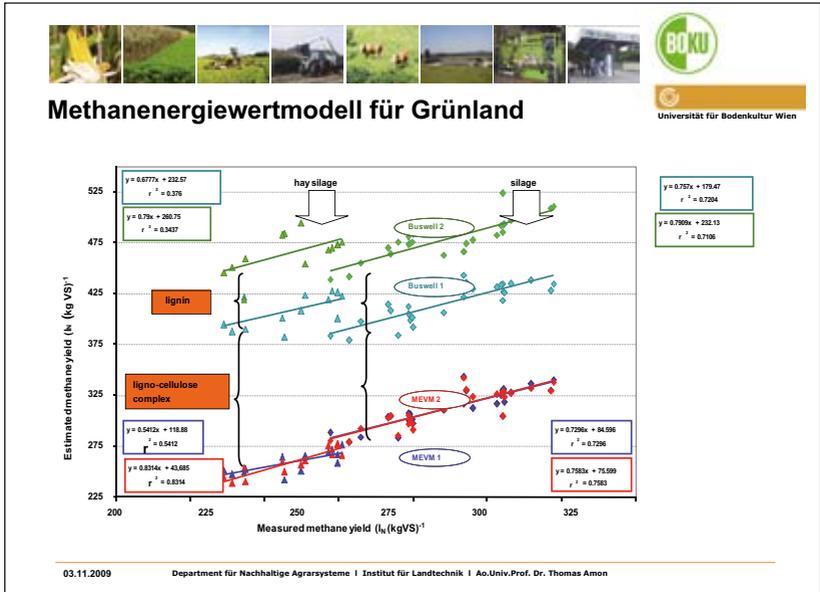


Universität für Bodenkultur Wien



03.11.2009
Department für Nachhaltige Agrarsysteme | Institut für Landtechnik | Ao.Univ.Prof. Dr. Thomas Amon







Universität für Bodenkultur Wien

Gasausbeuten von Gärrohstoffmischungen

Content of used mixtures (% of FM).

Block	Mix	Raw materials						
		Sun flower silage	grass silage	Rye silage	Maize silage	CCM	Pig manure	Sugar beet silage
---	M1 ¹	0	0	0	31	15	54	0
Block 1 (energy rich)	M2	20	0	0	30	10	20	20
	M3	15	0	0	25	20	10	30
	M4	30	0	0	20	0	20	30
	M5	20	0	0	40	0	30	10
Block 2 (protein rich)	M6	5	30	10	10	5	40	0
	M7	5	40	20	0	0	35	0
	M8	5	30	30	5	0	20	10
	M9	0	40	20	5	0	30	5
Block 3 (balanced)	M10	20	10	10	20	0	20	20
	M11	30	5	5	10	10	20	20
	M12	35	7,5	7,5	35	5	0	10
	M13	15	0	10	45	0	15	15

¹Der Mischung M1 wurde 4% Rohglyzerin zugelegt.

03.11.2009

Department für Nachhaltige Agrarsysteme | Institut für Landtechnik | Ao.Univ.Prof. Dr. Thomas Amon



Universität für Bodenkultur Wien

Gasausbeuten und Co-fermentationseffekte bei Gärrohstoffmischungen

Block	Mix	Spec. Methane yield		Additional methane yield	
		Measured (l ₀ /kg VS)	Expected (l ₀ /kg VS)	Absolut (l ₀ /kg VS)	Relative (% of expected)
---	M1	383	258	+125 ^a	+49
Block 1 (energy rich)	M2	367	287	+79 ^{ab}	+28
	M3	349	295	+54 ^{abc}	+18
	M4	302	274	+28 ^{bc}	+10
	M5	347	281	+66 ^{abc}	+23
Block 2 (protein rich)	M6	371	267	+104 ^{ab}	+39
	M7	363	267	+96 ^{ab}	+36
	M8	395	283	+111 ^{ab}	+39
	M9	386	271	+115 ^a	+42
Block 3 (balanced)	M10	369	281	+89 ^{ab}	+32
	M11	378	279	+99 ^{ab}	+36
	M12	303	311	-7 ^c	-2
	M13	427	298	+129 ^a	+43

^{a,b} Signifikant differences ($P < 0.05$; Scheffé-Prozedur).

03.11.2009

Department für Nachhaltige Agrarsysteme | Institut für Landtechnik | Ao.Univ.Prof. Dr. Thomas Amon



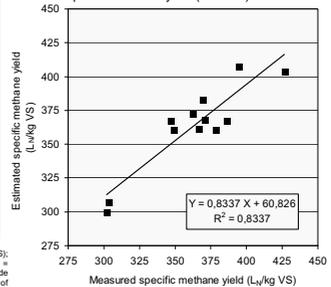
Methanenergiewertmodell (MEWM) zur Optimierung von Gärrohstoffmischungen aus nachhaltigen Fruchtfolgesystemen

Regression equations to estimate the specific methane yield of the energy crop mixtures (n = 48)

Model	Regression equation	adj. R ²	R ²	Significance
1	CH ₄ = -1410,48 VS ^{***} - 1876,97 XL ^{***} - 451,46 XF ^{***} + 837,16 C ^{***} + 8309,46 GE ^{***} + 139,38 CN ^{***} - 69293 ^{***}	0,5418	0,6003	***
2	CH ₄ = 7399,91 XP ^{***} + 2405,65 ADL ^{***} - 193,76 Cell ^{***} + 1721,50 GE ^{***} - 442,94 Sug ^{***} + 3076,48 CN ^{***} - 197204 ^{***}	0,5416	0,6001	***
3	CH ₄ = 2811,98 DM ^{***} + 4400,48 XA ^{***} - 3872,16 XP ^{***} + 3532,00 XF ^{***} + 1983,89 H-Cell ^{***} + 1476,69 Zluc ^{***} - 192070 ^{***}	0,5412	0,5998	***
4	CH ₄ = 3911,18 XP ^{***} + 4515,25 XL ^{***} + 4864,12 ADL ^{***} + 1665,29 Cell ^{***} + 3840,62 H-Cell ^{***} + 938,88 Sla ^{***} + 1955,44 Sug ^{***} - 213356	0,5307	0,6006	***
5	CH ₄ = -7,19 XP - 23,22 XL ^{**} + 1,96 XF + 527,80 ^{***}	0,2385	0,2871	**
6	CH ₄ = 13,15 H-Cell ^{***} + 172,82 ^{***}	0,2498	0,2658	***
7	CH ₄ = -2,01 VS + 533,12 ^{***}	0,0230	0,0438	n.s.
8	CH ₄ = 1,92 XF + 327,07 ^{***}	0,0044	0,0256	n.s.

ADL = lignin (% DM); C = carbon (% DM); Cell = cellulose (% DM); CH₄ = specific methane yield (L/kg VS); CN = CN quotient; DM = dry matter (% DM); FM = fresh matter; GE = gross energy (MJ/kg DM); H-Cell = hemicellulose (% DM); Sla = starch (% DM); Sug = sugar (% DM); VS = volatile solids (% DM); XF = crude fiber (% DM); XL = crude lipids (% DM); XP = crude protein (% DM); adj. R² = adjusted coefficient of determination; R² = coefficient of determination
Level of significance for the models and the regression coefficients: * < 0,05; ** < 0,01; *** < 0,001; n.s. = not significant

Relationship between measured and estimated specific methane yield (Model 4)



03.11.2009

Department für Nachhaltige Agrarsysteme | Institut für Landtechnik | Ao.Univ.Prof. Dr. Thomas Amon



Beispiel einer integrierten Fruchtfolge

Lebensmittel/Futtermittel

Rohstoff für Energieproduktion



Luzerne (Futtermittel)

-



-

Sorghumhirse (Biogas)



Gerste (Lebensmittel)

Stroh (Biogas)



Mais (Lebensmittel)

Stroh (Biogas)



Sonnenblume (Nahrung, Öl)

Stroh und Zwischenfrucht



Weizen (Lebensmittel)

Weizen (Ethanol)
Stroh (Biogas)

03.11.2009

Department für Nachhaltige Agrarsysteme | Institut für Landtechnik | Ao.Univ.Prof. Dr. Thomas Amon



Universität für Bodenkultur Wien

Beispiel einer integrierten Fruchtfolge

	Mischung 1	Mischung 2	Mischung 3
Schlempe	X	X	X
Mais GPS	X	X	X
Gersten GPS	-	X	X
Sonnenblumen GPS	-	X	X
Luzerne GPS	-	-	X
Sorghum GPS	-	X	-

03.11.2009

Department für Nachhaltige Agrarsysteme | Institut für Landtechnik | Ao.Univ.Prof. Dr. Thomas Amon



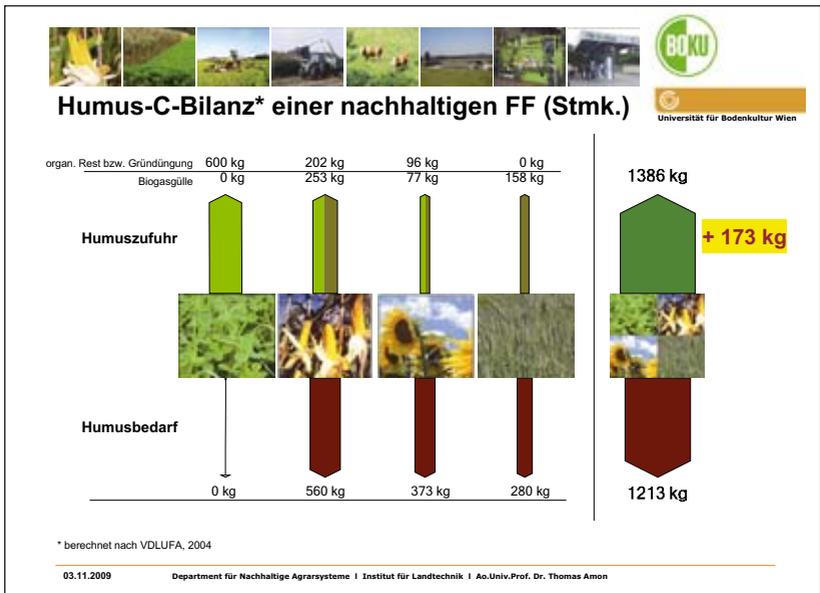
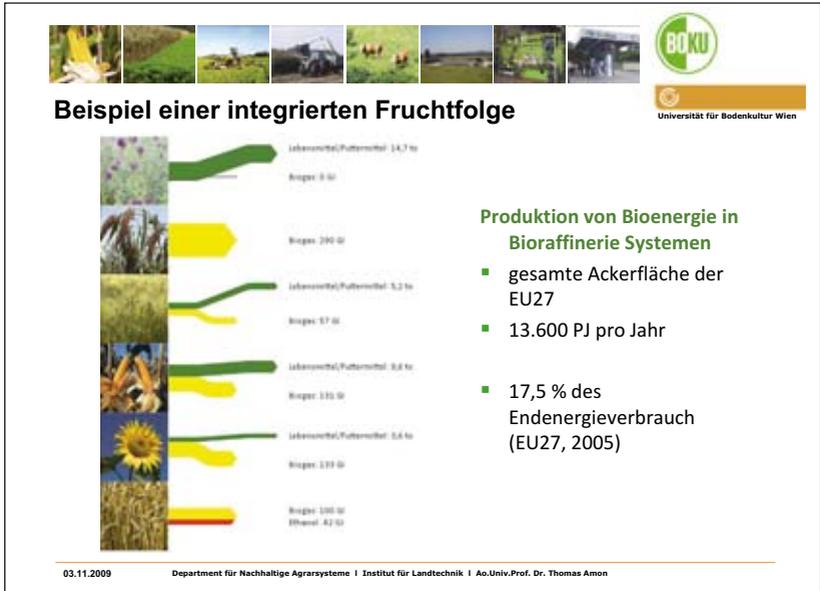
Universität für Bodenkultur Wien

Beispiel einer integrierten Fruchtfolge

	TS	XA	XP	XL	XF	XX	Methanertrag	
	% FM	% TS	L _N kg ⁻¹ oTS	SD				
Weizenschlempe	5.0	5.0	29.6	12.8	7.4	45.2	419	-
Maissilage	27.7	5.1	10.0	2.5	25.8	56.6	345	7.0
Gersten - GPS	22.6	8.1	8.5	2.4	35.8	45.2	375	8.1
Sonnenblumen - GPS	24.7	9.5	10.6	11.5	27.0	41.9	345	3.4
Luzemesilage	27.1	7.9	14.7	3.5	31.4	42.5	357	5.3
Sorghum GPS	19.4	7.2	9.4	2.6	34.1	46.7	362	9.7
Weizenstroh (nativ)	92.4	6.9	2.00	0.90	46.6	43.6	276	20.5
Stroh (stem exploded)	15.7	4.7	2.40	1.70	46.4	44.8	361	6.3
Mischung 1	-	-	-	-	-	-	353	17.3
Mischung 2	-	-	-	-	-	-	375	6.7
Mischung 3	-	-	-	-	-	-	387	5.1

03.11.2009

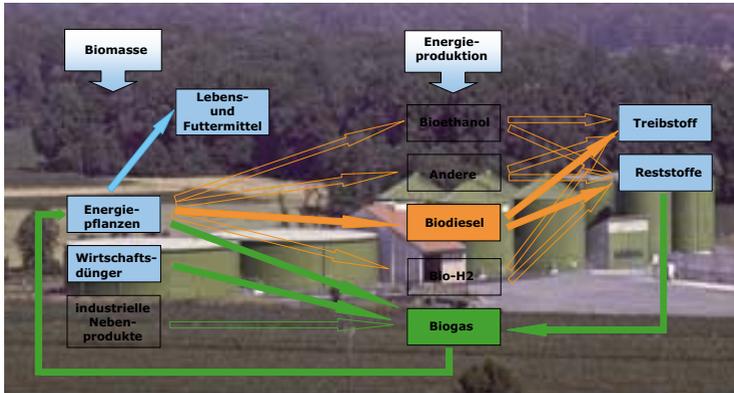
Department für Nachhaltige Agrarsysteme | Institut für Landtechnik | Ao.Univ.Prof. Dr. Thomas Amon





Universität für Bodenkultur Wien

Beispiel Bi Raffinerie (Mureck)



03.11.2009 Department für Nachhaltige Agrarsysteme | Institut für Landtechnik | Ao.Univ.Prof. Dr. Thomas Amon



Universität für Bodenkultur Wien

Stoffliche und wirtschaftliche Optimierung

Beschreibung	Supplement (% FM)	Basismischung	
		Schweinegülle (% FM)	Maissilage (% FM)
Basismischung	--	40	60
Mischung 1 Maisschlempe	10	36	54
	30	28	42
	50	20	30
	70	12	18
Mischung 2 Rapspresskuchen	10	36	54
	30	28	42
	50	20	30
	70	12	18
Mischung 3 Rohglycerin	10	36	54
	30	28	42
	50	20	30
	70	12	18
Mischung 4 Rückstände Stärkeproduktion aus Mais	10	36	54
	30	28	42
	50	20	30
	70	12	18
Mischung 5 Rückstände Stärkeproduktion aus Kartoffel	10	36	54
	30	28	42
	50	20	30
	70	12	18

03.11.2009 Department für Nachhaltige Agrarsysteme | Institut für Landtechnik | Ao.Univ.Prof. Dr. Thomas Amon



Stoffliche und wirtschaftliche Optimierung

Universität für Bodenkultur Wien

Methanenergiewertmodelle für die Bioraffinerie Seeg (n=50)

Model	Equation		Model	Equation	
MEWM 1	$CH_4 = 264,30 (\pm 48,04)$	r^2	MEWM 4	$CH_4 = 878,58 (\pm 88,70)$	r^2
	$- 0,93 (\pm 0,18) \text{XA}$	0,8580		$- 30,04 (\pm 5,41) \text{XF/BE}$	0,8708
	$+ 0,76 (\pm 0,27) \text{XP}$	Signif. <0,0001		$- 9,88 (\pm 1,56) \text{XP/BE}$	Signif. <0,0001
	$- 2,09 (\pm 0,58) \text{XL}$			$- 28,88 (\pm 5,17) \text{XP/ADL}$	
	$+ 0,88 (\pm 0,27) \text{XF}$			$- 87,65 (\pm 21,08) \text{XL/ADL}$	
$+ 0,40 (\pm 0,07) \text{Gly+Meth}$		$- 0,32 (\pm 0,08) \text{Gly+Meth}$			

03.11.2009

Department für Nachhaltige Agrarsysteme | Institut für Landtechnik | Ao.Univ.Prof. Dr. Thomas Amon



Substratkosten

Universität für Bodenkultur Wien

Mischung	Glycerin / Basismischung [% FM]			
	30% / 70%	22% / 78%	5% / 95%	53% / 47%
Kosten Glycerin [€ per t FM]		75	100	60
Methanertrag [Nm ³ oTS ⁻¹]	456	454	414	452
Input [t]	2,9	3,4	5,4	2,1
Kosten Mischung [€ per Nm ³ CH ₄]	0,207	0,206	0,234	0,175

03.11.2009

Department für Nachhaltige Agrarsysteme | Institut für Landtechnik | Ao.Univ.Prof. Dr. Thomas Amon



Universität für Bodenkultur Wien

Rohstoffoptimierung Biogasanlage Mureck

	1 Messperiode (Mai-Jun 2006) [t FM Tag ⁻¹]	2 Messperiode (Jan-Mai 2008) [t FM Tag ⁻¹]	3 Messperiode (Mai-Jun 2009) [t FM Tag ⁻¹]
Schweinegülle	40.34 SD 5.08 n=32	40.34 SD 7.7 n=153	44.15 SD 2.91 n=61
Maissilage	6.31 SD 1.42 n=32	4.27 SD 2.62 n=153	3.08 SD 2.73 n=61
CCM	17.28 SD 2.90 n=32	1.22 SD 0.86 n=153	0.42 SD 0.85 n=61
Rapspresskuchen	0.75 SD 0.55 n=32	0.05 SD 0.18 n=153	0.04 SD 0.16 n=61
Glycerin	0	9.4 SD 0.42 n=153	10.6 SD 0.45 n=61
Total	64.68 SD 7.32 n=32	55.28 SD 6.12 n=153	58.54 SD 1.72 n=61

03.11.2009

Department für Nachhaltige Agrarsysteme | Institut für Landtechnik | Ao.Univ.Prof. Dr. Thomas Amon



Universität für Bodenkultur Wien

Rohstoffoptimierung Biogasanlage Mureck

	1 Messperiode (Mai-Juni 2006)	3 Messperiode (Mai-Juni 2009)	Rel. (%)
Spez. Methanertrag [m ³ _N /kg oTS]	0.39 SD 0.02 n=32	0.51 SD 0.04 n=61	+ 31
Verweilzeit [Tag]	61.88 SD 7.35 n=32	68.39 SD 1.94 n=61	+ 11
Raumbelastung [kg oTS/m ³ Fermentervolumen und Tag]	3.77 SD 0.51 n=32	2.98 SD 0.22 n=61	- 21
Abbaugrad oTS im Hauptfermenter [%]	89.27 SD 2.2 n=32	87.03 SD 2.04 n=61	- 2.5
Σ t oTS Tag⁻¹	15.03 SD 2.02 n=32	11.92 SD 0.86 n=61	- 21
Substratkosten [€ Tag⁻¹]	3,366	688	- 80

03.11.2009

Department für Nachhaltige Agrarsysteme | Institut für Landtechnik | Ao.Univ.Prof. Dr. Thomas Amon




EU-Agro-Biogas Online Rohstoff Datenbank

Universität für Bodenkultur Wien



03.11.2009 Department für Nachhaltige Agrarsysteme | Institut für Landtechnik | Ao.Univ.Prof. Dr. Thomas Amon




EU-Agro-Biogas Online Rohstoff Datenbank

Universität für Bodenkultur Wien

Parameter	Datenbasis					
	Energiepflanzen	Wirtschaftsdünger	Landw. Reststoffe	Sonst. Abfälle	Rohstoffmischungen	Insgesamt
Biogasenertrag	434	111	52	12	58	667
Methanenertrag	484	113	65	30	75	767
Substratanalysen	5,563	1,084	464	373	807	9,291
Summe	7,481	1,308	581	415	940	10,725

03.11.2009 Department für Nachhaltige Agrarsysteme | Institut für Landtechnik | Ao.Univ.Prof. Dr. Thomas Amon



Universität für Bodenkultur Wien

Schlussfolgerungen

- Die energetische und ökonomische Optimierung komplexer Gärrohstoffmischungen kann auf Basis des Methanenergiewertmodelles (MEWM) durchgeführt werden
- Die Regressionsmodelle wurden in der Praxis validiert
- Durch energetische und stoffliche Optimierung kann eine Reduzierung der Rohstoffkosten bis 60 % erreicht werden
- Basisdaten für die Optimierung sind in der EU Online Feedstock Database enthalten (< 10.000 Analysen)
- „Antibiotika –Rückstände“ in den Wirtschaftsdüngern reduzieren bereits ab geringster Konzentrationen (40 mg kg oTS⁻¹) die Gasausbeute
- Klassische Futtermittelanalysen können den „Lignozellulosekomplex“ nicht ausreichend beschreiben

03.11.2009

Department für Nachhaltige Agrarsysteme | Institut für Landtechnik | Ao.Univ.Prof. Dr. Thomas Amon

Anschrift des Autors:

*Ao. Univ. Prof. Dr. Thomas Amon
Universität für Bodenkultur Wien
Department für Nachhaltige Agrarsysteme
Peter-Jordan-Str. 82, A-1190 Wien
E-Mail: thomas.amon@boku.ac.at*

9.

Technischer Fortschritt

Zündstrahl-BHKW – Stand der Technik und Perspektiven am Beispiel der effektiven Abgasnachverstromung

Wolfram Dreier, Kai Liesendahl
Schnell Zündstrahlmotoren AG & Co. KG

Einleitung

Abgasnachverstromung ist seit Jahren ein Thema wenn es um Effektivität und Wirkungsgradsteigerungen im Bereich von Blockheizkraftwerken (BHKW) geht. Eine Herausforderung war es, die besonderen Anforderungen und Chancen der Abgasnachverstromung speziell im Einsatzgebiet von Biogas zu entwickeln und praxistauglich umzusetzen. Die Zündstrahltechnik bietet für die intensive Abgasnachverstromung sehr gute Ausgangsparameter und hat sich bereits beim Turbocompound im langjährigen Praxiseinsatz bewährt.

Abgasnachverstromung wird häufig mit den Verfahren des Dampfprozesses bzw. des Dampfschraubenmotors, dem Sterlingmotor oder der Organic Ranking Cycle Technik (ORC) in Verbindung gebracht.

Alle Techniken haben gemeinsam, dass sie die im Abgasstrom in Form von Wärme vorhandene Energie in mechanische Energie umwandeln und somit zur Wirkungsgradsteigerung des Gesamtsystems beitragen.

Der ORC Prozess als beispielhaft dargestelltes Verfahren des Betriebs von Dampfturbinen arbeitet nicht mit Wasserdampf sondern mit organischen Medien, wie Kohlenwasserstoffen oder Silikonen. Das so genannte Fluid wird mittels einer Speisepumpe auf einen Betriebsdruck von rund 20 bar gebracht, über die Abgastemperatur im Vorwärmer auf Siedetemperatur erhitzt und im Verdampfer vollständig verdampft. Der so genannte Sattedampf wird auf eine Turbomaschine geführt, in welcher er expandiert und einen Generator zur Stromerzeugung antreibt. Da die meisten ORC-Fluide retrograd sind, führt die Expansion zu einer Überhitzung des Fluids. Die entsprechende Wärmeleistung muss vor der Kondensation

abgeführt werden, mittels eines Regenerators wird sie zur Vorwärmung des Fluids vor der Verdampfung genutzt oder in KWK-Anlagen ausgekoppelt. Nach der Kondensation des Fluids schließt sich der Kreislauf mit dem Eintritt in die Speisepumpe

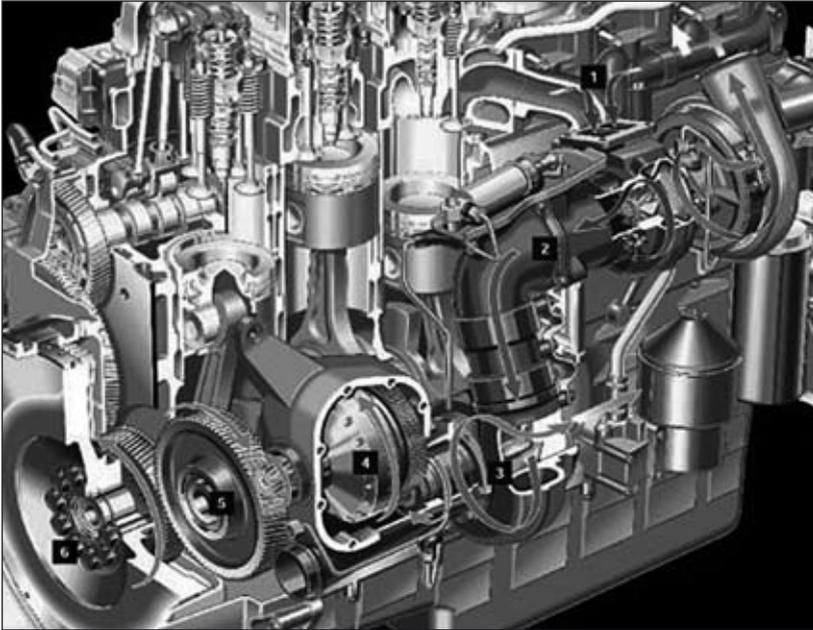
Als Nachteile des Verfahrens sind die nach wie vor niedrigen Wirkungsgrade (8 % – 15 %) und die für kleinere Anlagen unverhältnismäßig hohen Investitionskosten zu werten, weshalb sich die Technologie im Bereich von Biogasanlagen bis heute noch nicht durchgesetzt hat.

Als Stand der Technik kann heute ebenso das Verfahren des mechanischen Turbocompounding angesehen werden. Allein vom Unternehmen Schnell sind aktuell über 250 Schnell Zündstrahl-Aggregate mit einem mechanischen Turbocompounder auf dem Markt. Dieses mechanische Turbocompounding stellt auch die Basis für die aktuelle Weiterentwicklung, den Abgasturbogenerator dar. Auf das Funktionsprinzip der Verfahren wird im Weiteren eingegangen.

Die Innovation: Abgasturbogenerator

Der mechanische Turbocompound ist ursprünglich im LKW Bereich beheimatet und stellt die Grundlage des Abgasturbogenerators dar. In LKW-Einsatz sorgt der Turbocompound für zusätzliche Drehmomente bei gleichem Verbrauch auf die Kurbelwelle. Des Weiteren laufen die LKW Motoren dank der Turbocompound Technologie ruhiger, weil durch den gleich bleibenden Druck auf die Kurbelwelle mechanische Schwingungen unterdrückt werden. Im Folgenden wird der im Funktionsbild dargestellte Prozess und Aufbau der SCANIA Turbocompound-Technologie erläutert:

1. Eintritt der Abgase aus dem Krümmer bei einer Temperatur von ca. 700 °C
2. Mit den Abgasen wird der konventionelle Turbolader angetrieben, um Leistung und Drehmoment im Verbrennungsprozess zu steigern. Die Abgase werden nicht in die Atmosphäre freigesetzt, sondern der Turbocompound-Turbine zugeführt.
3. Die Abgase haben beim Erreichen der Turbocompound-Turbine immer noch eine sehr hohe Temperatur (ca. 600 °C). Mit dieser Energie wird die zweite Turbine 55.000 Umdrehungen/min beschleunigt. Danach ist die Temperatur der Abgase auf unter 500 °C

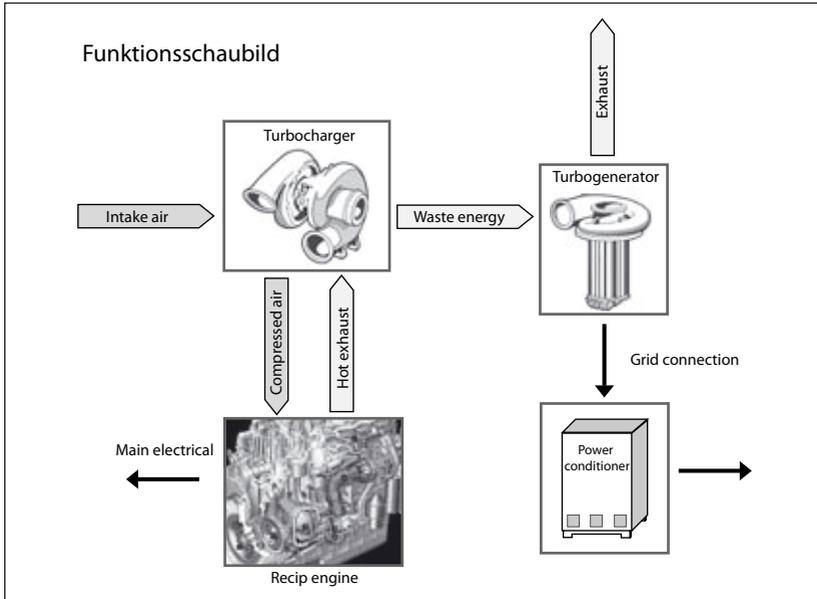


Quelle: www.scania.de

gesunken, und sie entweichen über die konventionelle Abgasanlage und den Schalldämpfer.

4. Die Drehzahl der Turbine wird in verschiedenen Stufen durch mechanische Getriebe und eine Hydraulikkupplung untersetzt. Die Hydraulikkupplung gleicht die Variationen zwischen der Schwungradzahl und der Turbocompound-Turbine aus.
5. Bei Erreichen der Kurbelwelle liegt die Drehzahl bei ca. 1.900 Umdrehungen/min.
6. Das Drehmoment des Schwungrads wird erhöht. Das Schwungrad dreht sich stabiler und gleichmäßiger.

Aus dieser eben dargestellten Technologie von SCANIA, und den damit gemachten Erfahrungen mit verschiedenen Prototypen wurde in einer Kooperation der Unternehmen Burkhardt und Schnell der so genannte Abgasturbogenerator entwickelt. Als Basis des Systems dient die Hardware der englischen Firmengruppe Bowman Power.



Die Funktion des Turbogenerators ist physikalisch ähnlich der des mechanischen Turbocompounds. Der Turbolader ist gezielt auf diese spezielle Anwendung im Stationärbetrieb abgestimmt. Die Turbine des Turboladers mit Druckaufladung ist so konzipiert, dass die Kompressorarbeit verrichtet wird und zusätzliche Druckenergie der Abgasturbine zur Verfügung steht.

Das Abgas hat vor der Abgasturbine eine Temperatur von ca. 520 °C und einen Druck von ca. 0,68 bar. Diese Energie in Form von Druck und Temperatur wird in der Abgasturbine auf ca. 430 °C und 0,03 bar entspannt. Der Energieinhalt dieser isentropen Entspannung beträgt ca. 33 kW und wird nahezu verlustfrei (keine Kupplungs-Übertragungsverluste) in elektrische Energie umgewandelt. Die Umwandlung erfolgt bei der Bowmanturbine über einen direkt an das Turbinenrad gekoppelten schnellaufenden Generator, der in seiner Drehzahl von 35.000 – 55.000 Umdrehungen variabel ist, und auf unterschiedliche Gasqualitäten reagieren kann. Der erzeugte Gleichstrom mit einer Frequenz von ca. 800 Hz (drehzahlabhängig) und einer Spannung von 650 V wird in einem Inverter auf Netzfrequenz 50 Hz und Netzspannung 400 V umgewandelt.

Der schnelllaufende Generator wird durch ein separates Ölsystem gekühlt und geschmiert. Alle elementaren Daten wie Turbinengeschwindigkeit, Drücke, Temperaturen, Schwingungen der Lager, sowie Leistung des Turbogenerators können über ein Überwachungssystem erfasst und kontrolliert werden. Alle Werte werden über ein Bus-System an die BHKW Steuerung übertragen und können somit auch Fernüberwacht werden.

Erfahrungen und Ausblick

Die praktischen Erfahrungen beim mehrfachen Langzeit-Einsatz in Biogas bzw. Pflanzenölmotoren zeigten einen dauerhaften Wirkungsgrad von über 46 % (gem. DIN EN 3046) des Gesamtsystems. Durch variabel austauschbare Leitschaufeln im Turbolader und der Abgasturbine wurden zahlreiche Kombinationen getestet und so das jeweilige Systems optimal abgestimmt.

Zur weiteren Senkung der Herstellungskosten werden die Vorbereitungen auf eine serielle Fertigung getroffen. Die positiven Ergebnisse und die Aussicht auf eine Förderung des erzeugten Stromes durch den Technologiebonus im EEG 2009 lassen einen erheblichen Nachfrageschub erwarten.

Bei Schnell findet der Abgasturbogenerator seinen Einsatz bislang in einem 6-Zylinder-Zündstrahlaggregat mit 230 kW elektrischer Leistung. Der Abgasturbogenerator liefert in diesem Falle weitere 28 kW elektrisch dazu.

Die nächsten Schritte werden sein, die Abgasturbine mit verschiedenen Treibstoffen zu betreiben und an weiteren Motortypen und Klassen der Firma Schnell Zündstrahlmotoren zu integrieren.

Schnell Zündstrahlmotoren AG & Co. KG

Das Unternehmen Schnell wurde 1992 als Biogasanlagen-Komplettanbieter gegründet. Seit 2001 konzentriert sich das Unternehmen auf die Kernkompetenz: Entwicklung, Montage und Service von Zündstrahl-Blockheizkraftwerken für Bio-, Deponie- und Klärgasanlagen. Zwischenzeitlich wurden über 2.300 Zündstrahl-BHKW produziert. Die Firmengruppe Schnell beschäftigt 180 Mitarbeiter an den Standorten Amtzell (Baden-Württemberg), Stöckse (Niedersachsen) und in der Service-Niederlassung

in Bruntal (Tschechische Republik). www.schnellmotor.de.

Anschrift der Autoren:

*Wolfram Dreier, Kai Liesendahl
Schnell Zündstrahlmotoren AG & Co. KG
Hugo-Schrott-Str. 6, 88279 Amtzell
E-Mail: w.dreier@schnellmotor.de*

Gas-Otto Motor – Stand der Technik und Perspektiven

Thomas Elsenbruch
GE Jenbacher GmbH & Co OHG

Jenbacher Gasmotoren von GE

Führender Hersteller von stationären Gasmotoren zur Energieversorgung

9.000+ gelieferte Motoren / 11.000+ MW weltweit
Leistungsbereich von 0,25 MW bis 4 MW

Flexibel in der Gasanwendung
Erdgas bzw. verschiedenste erneuerbare oder alternative Gase (Deponiegas, Biogas, Grubengas)

Anlagenkonfigurationen
Gen-Sets, Kraft-Wärme-Kopplung (KWK),
Kraft-Wärme-Kälte-Kopplung (KWKK),
Containerlösungen, CO₂-Düngung

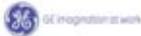
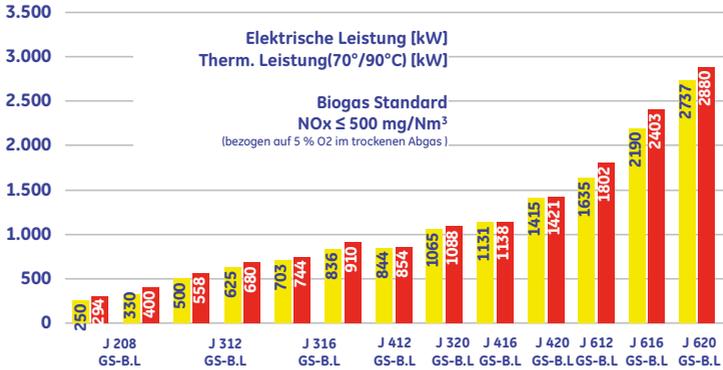
Vorteile für die Umwelt
Niedrige Emissionen
ecomagination Lösungen

„Lifetime Services“⁺
Weites Spektrum an Service Angeboten
2.000+ Anlagen mit Service Verträgen



GE Energy Jenbacher gas engines
Thomas Elsenbruch DIF/HJ, 20.-22.10.08

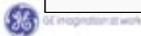
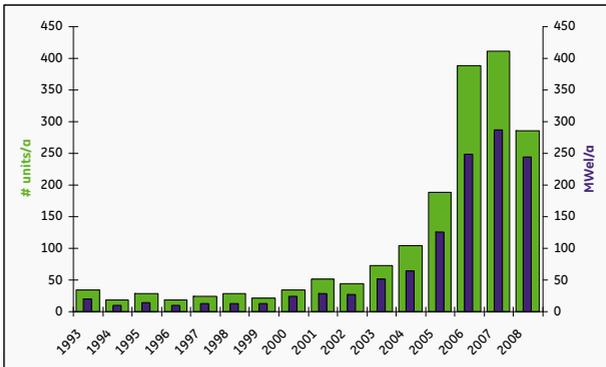
Produkt Programm 2009: Bio-, Klär- und Deponiegas



GE Jenbacher / Thomas Elsenbruch
20-22.10.08

Die Kraft des EEG:

- Klärgas: Mehr als 380 installierte Motoren (225 MW)
- Biogas: Über 1400 installierte Motoren (985 MW)



GE Jenbacher / Thomas Elsenbruch
20-22.10.08

Voraussetzung für die Nutzung von Gasen in Gasmotoren

Gaseigenschaften

Heizwert

Methanzahl

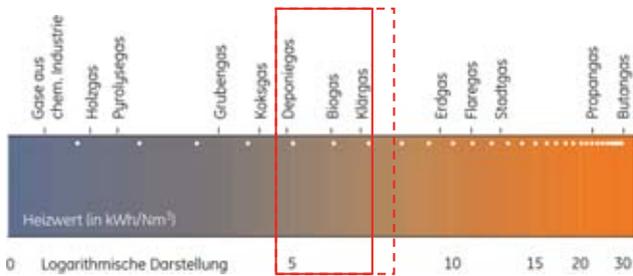
laminare Flammgeschwindigkeit

Zündgrenzen

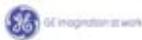


Heizwert

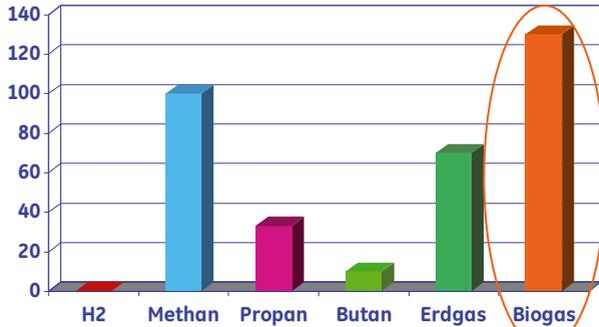
Logarithmische Darstellung



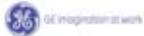
Biogas ist hinsichtlich des Heizwertes sehr gut geeignet zur motorischen Nutzung.



Methanzahl

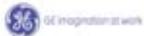
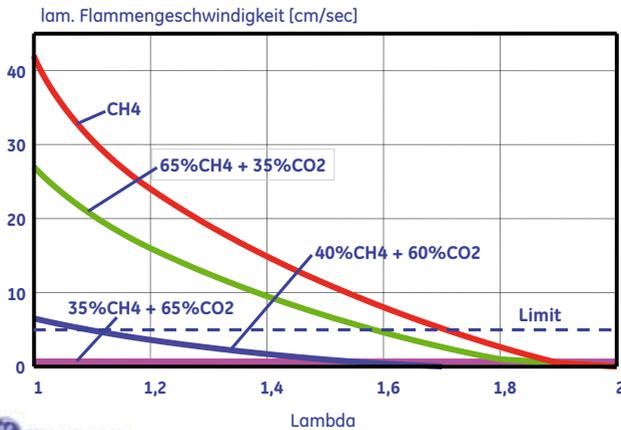


Biogas zeichnet sich durch seine sehr hohe Klopfestigkeit aus.



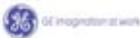
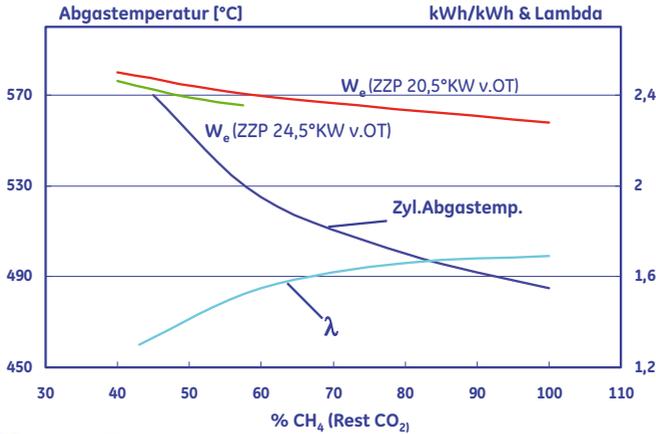
GE Jenbacher / Thomas Eisenbruch
20-22.10.08

Laminare Flammgeschwindigkeit



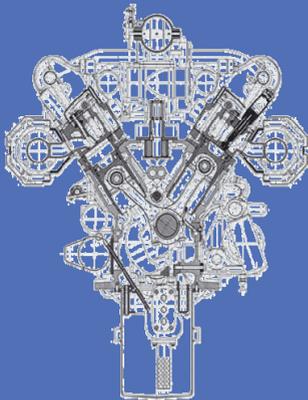
GE Jenbacher / Thomas Eisenbruch
20-22.10.08

Einfluss CO₂ auf Wirkungsgrad



GE Jenbacher / Thomas Eßenbruch
20.-22.10.08

Entwicklungsziel optimaler Biogasmotor



Ziel:
Wirkungsgradoptimaler
Biogasmotor mit
250 kW und 500 kW

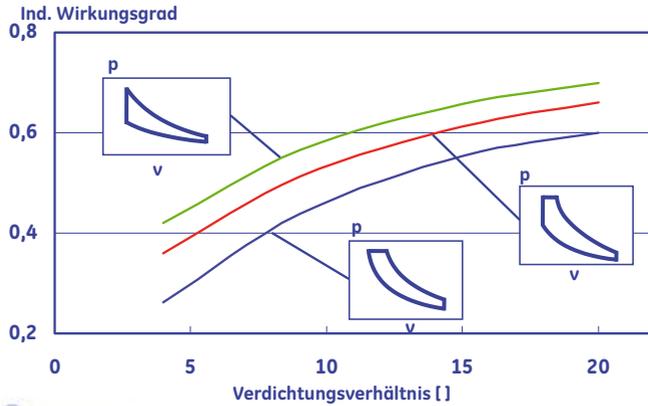
Basismotoren
J208 und J312
Optimierte spezifische Leistung

Randbedingungen:

- Biogas
- Abgasemissionen
- **Thermodynamisches Optimum**



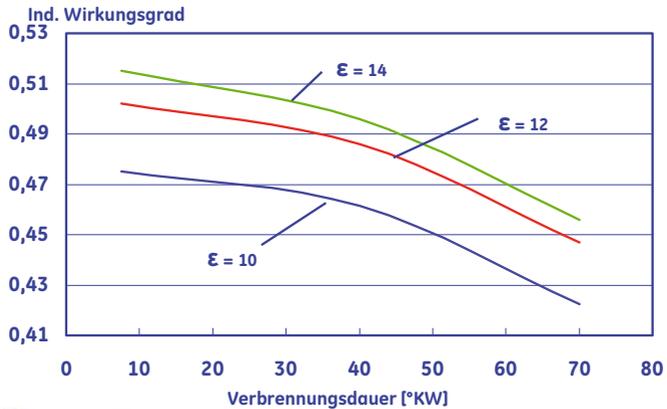
Wirkungsgradvergleich Ideale Vergleichsprozesse



GE InnoGen@work

GE Jenbacher / Thomas Elsenbruch
20-22.10.08

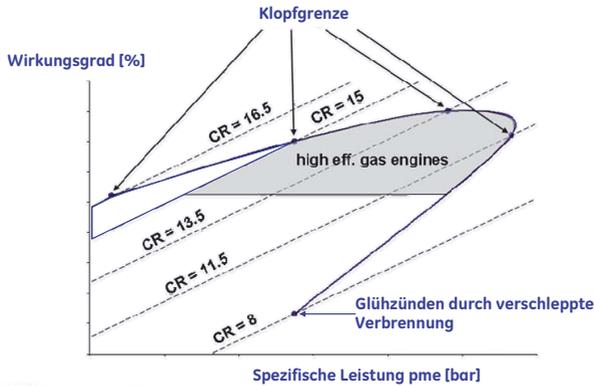
Innerer Wirkungsgrad Verbrennungsdauer



GE InnoGen@work

GE Jenbacher / Thomas Elsenbruch
20-22.10.08

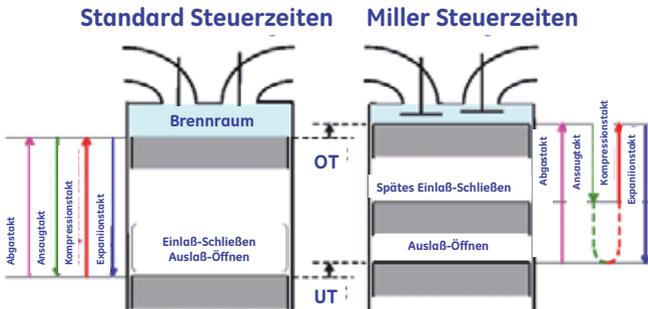
Wirkungsgradvergleich untersch. Konzepte



CR = Compression Ratio = Verdichtungsverhältnis

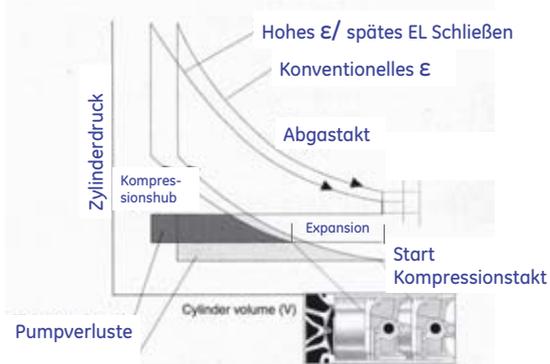
GE Jenbacher / Thomas Eßenbruch
20-22.10.08

Millersteuerzeiten



GE Jenbacher / Thomas Eßenbruch
20-22.10.08

Millersteuerzeiten



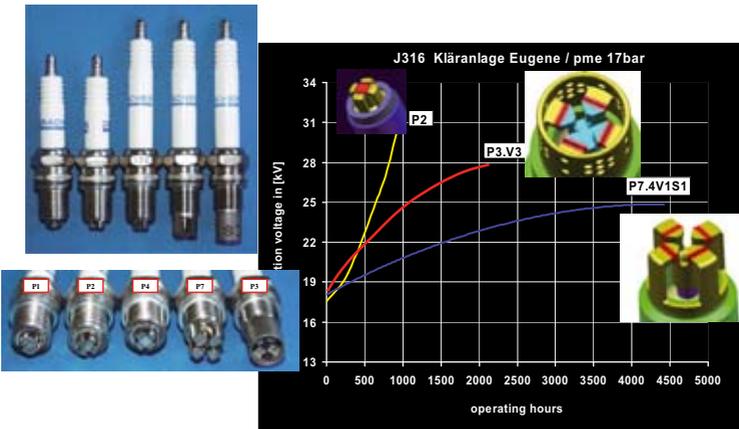
- "Kühlerer" Start der Verbrennung
- Verringerung der Pumpverluste
- Nutzung der Turboladereffizienz für die Zylinderfüllung



GE Inagination@work

GE Jenbacher / Thomas Elsenbruch
20-22.10.08
AutoTechnology, Special Toyota Prius; ISSN No: 1616-8216

GEJ Zündkerzen/Zündungsentwicklung



GE Inagination@work

GE Jenbacher / Thomas Elsenbruch
20-22.10.08

Verbrennungsoptimierung Baureihe 2/3/4

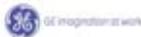
Optimierte Verbrennung

Beschleunigte Verbrennung

Schadraumoptimierung

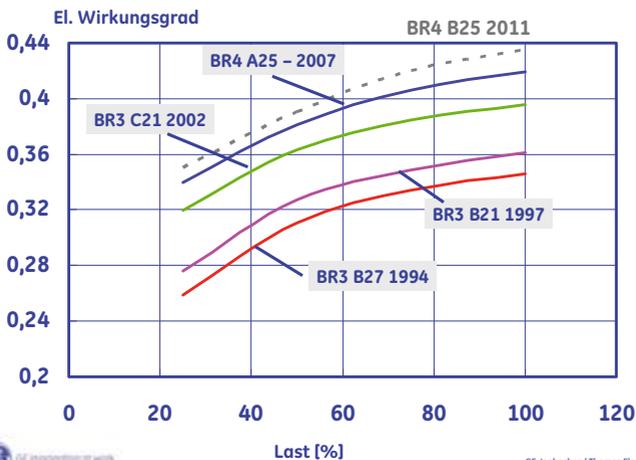
- 30% weniger HC
- 30% weniger CO

erhöhte Verdichtung in Verbindung mit Millersteuerzeiten



GE Jenbacher / Thomas Eßenbruch
20-22.10.08

Wirkungsgradsteigerung Biogas



GE Jenbacher / Thomas Eßenbruch
20-22.10.08

Maßnahmen zur optimalen Wärmenutzung

verschiedene Nutzungsformen

ORC als Alternative



Dampfproduktion mit Gasmotoren

Foto: Anlage Biogas Kogel – 1 x JMC 420 GS-8.LC



JMS 312 GS-B.L

Elektr. Leistung: 526 kW

Therm. Leistung

Warmw. 65/85°C: 325 kW

**Sattdampf, 8 bar: 345 kg/h
(= 231 kW)**

NT-Gemischw.: 19 kW

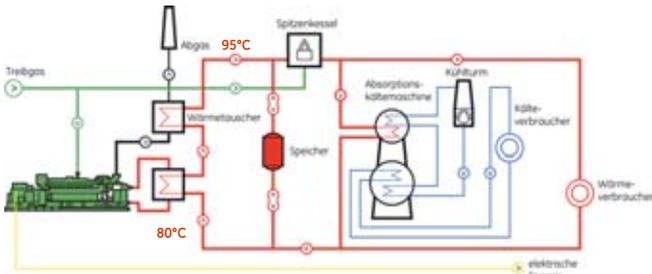
Therm. Wirk.grad: 42,7%

**Speisewasser muss
aufbereitet sein!**



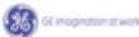
GE Jenbacher / Thomas Eisenbruch
20-22.10.08

Kraft-Wärme-Kälte-Kopplung mit BHKWs



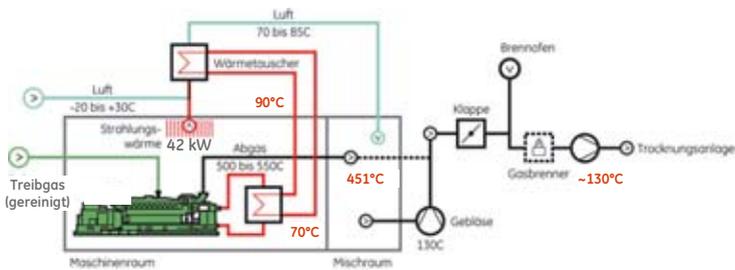
JMS 312 GS-B.L

Elektr. Leistung: 526 kW
Nutzbare Wärme: 550 kW
NT-Gemischwärme: 40 kW
Kälteproduktion: ~385 kW
Therm. Wirkungsgrad: 42,2%



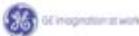
GE Jenbacher / Thomas Eßenbruch
20-22.10.08

Trocknung mit BHKW – JMS 312 GS-B.L



JMS 312 GS-B.L

Elektr. Leistung: 526 kW
Nutzbare Wärme: 653 kW
NT-Gemischwärme: 24 kW
Therm. Wirkungsgrad: 50,2%



GE Jenbacher / Thomas Eßenbruch
20-22.10.08

Wärmequellen an Gasmotoren



Zwei Wärmequellen unterschiedlicher Temperatur ermöglichen Vielzahl an unterschiedlichen ORC Lösungen



GE Ingridatoratwork

GE Jenbacher / Thomas Eisenbruch
20-22.10.08

Vergleich der ORC Konzepte

ORC System & Anbindung

- Erheblicher Einfluss auf Kosten und Leistung
- Achtung bei Vergleich: Brutto/Netto Leistung, Umgebungsbedingungen

Status

- Verschiedene Konzepte in Erprobung
- Vielzahl kleiner Start-up Firmen
- Bislang kein etabliertes ORC System für Motoranwendungen erhältlich

	Abgas	Dual	Einkreislauf	GE CORa
Leistung (netto)	○	+	-	++
Spezifische Kosten	○	--	+	++
Amortisationszeit	○	--	+	++

○ Vergleichskonzept / + besser / - schlechter

Neuartiges GE CORa Konzept ermöglicht effiziente Nutzung von Hoch- und Niedertemperaturabwärme



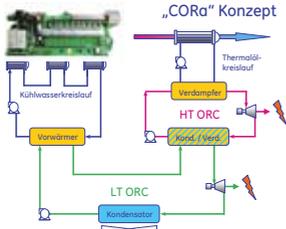
GE Ingridatoratwork

GE Jenbacher / Thomas Eisenbruch
20-22.10.08

GE Jenbacher ORC System (GE CORa)

Nutzung beider Wärmequellen

- Cascading ORC (CORa) mit zwei ORCs und optimierten Fluiden
- Wärme wird von hoher T (HT) zu niedriger T (LT) kaskadiert



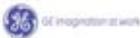
Hohe Leistungen bei niedrigen Kosten

Vorteile

- Höhere Leistungen
- Kosteneffizient

Nachteile

- Komplexeres System
- Integrierte Motorkühlung



GE Jenbacher / Thomas Eßenbruch
20.-22.10.08

GE CORa Spezifikationen

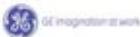
GE Jenbacher
Gasmotor



CORa
Container

	CORa M	CORa L
Motorleistung	1-1,5 MW (320/420)	3 MW (620)
Brennstoff	Bio-, Deponie-, Erdgas	Erdgas
CORE Leistung	110 - 140 kW	300 - 370 kW
Zunahme des Wirkungsgrads	> 4% Punkte	> 5% Punkte
Ziel für Amortisation	< 4 Jahre	< 4 Jahre

„Kombikraftwerk“ für Verbrennungsmotoren



GE Jenbacher / Thomas Eßenbruch
20.-22.10.08

Maßnahmen zur Reduktion von Emissionen bei Gasmotoren

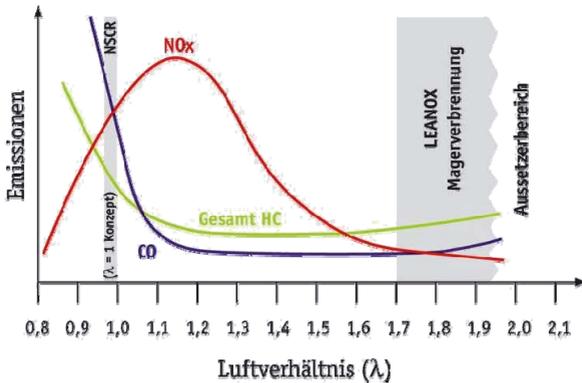
Abgaszusammensetzung/Grenzwerte

- => **NO_x Reduktion**
 - => Innermotorische Maßnahmen
 - => Abgasnachbehandlung

- => **Formaldehyd/CO/HC-Reduktion**
 - => Innermotorische Maßnahmen
 - => Abgasnachbehandlung



Emissionsverlauf über Luft/Kraftst.-Verhältnis



GE Jenbacher / Thomas Eisenbruch
20-22.10.08

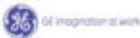
NOx-Reduktion bei Gasmotoren Zielwert: NOx < 500 mg/Nm3 (TA-Luft Grenzw.)

Innermotorische Maßnahmen

- Magermotorkonzept

Abgasnachbehandlung

- $\lambda = 1$ Konzept + Dreiwegekatalysator
- Magermotorkonzept + SCR-Katalysator



GE Jenbacher / Thomas Eßenbruch
20.-22.10.08

NOx-Reduktion bei Gasmotoren Zielwert: NOx < 500 mg/Nm3 (TA-Luft Grenzwert)

Innermotorische Maßnahmen

Magermotorkonzept

- ↳ für alle Gase möglich
- ↳ hoher Wirkungsgrad
- ↳ hohe spez. Leistung

Stand der Technik

Emissionen

Erdgas; Propan

NOx < 250 mg/Nm³

kein Katalysator

erforderlich

(Rohemissionen)

Biogase

NOx < 500 mg/Nm³

Abgasnachbehandlung

$\lambda=1 + 3$ Wege Kat

- ↳ für Erdgas, (Propan)
- ↳ niedriger Wirkungsgrad
- ↳ niedrige spez. Leistung
- ↳ niedrige Emissionen

Stand der Technik

Emissionen

Erdgas

NOx < 50 mg/Nm³

Hohe Umsetzrate des 3-

Wegekats erforderlich

(> 95%)

MM + SCR-Kat

- ↳ für Erdgas, (Propan)
- ↳ hoher Wirkungsgrad
- ↳ hohe spez. Leistung
- ↳ niedrige Emissionen

Stand der Technik

Emissionen

Erdgas

NOx < 50 mg/Nm³

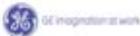
Umsetzrate des SCR-

Katalysators > 80%

↳ für Biogase kritisch

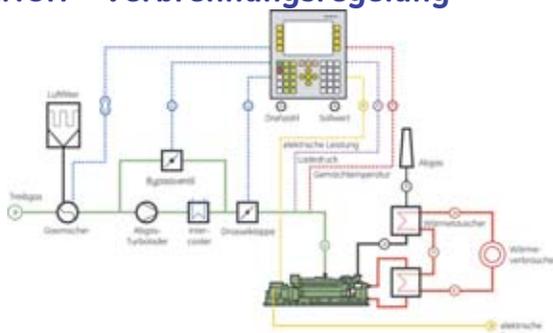
↳ für Biogase kritisch

Nur bedingt Stand der Technik



GE Jenbacher / Thomas Eßenbruch
20.-22.10.08

LEANOX®- Verbrennungsregelung



- Sensoren in unkritischen Messbereichen (Druck, Temperatur, Ablagerungen...)
- Zuverlässige und dauerhafte Einhaltung von Abgasemissionsvorschriften bei wechselnden Betriebsbedingungen (Treibgaszusammensetzung...)
- Kontrollierte Verbrennung und folglich Kontrolle über die mechanische Beanspruchung verschiedener Bauteile (Ventile, Zylinderköpfe, Zündkerzen..)



GE Inagination@work

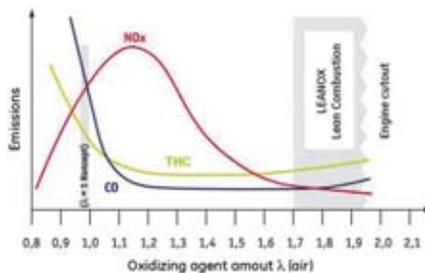
GE Jenbacher / Thomas Elsenbruch
20-22.10.08

Möglichkeiten zur Emissionsminderung

Formaldehyd

Primär - Motorseitig

- ~~Schadraumoptimierung → laufendes Forschungsvorhaben~~
- ~~Betrieb mit kleinem Luftverhältnis → Erhöhte NOx Emissionen~~
- Kleines Verdichtungsverhältnis ϵ → Wirkungsgrad fällt extrem ab
- Brennraumreinigung



GE Inagination@work

GE Jenbacher / Thomas Elsenbruch
20-22.10.08

Möglichkeiten zur Emissionsminderung

Formaldehyd

Oxidationskatalysatoren

- GE Know-how durch Langzeituntersuchungen
- Nachrüstung in vorhandene Kat-Kammer möglich
- Halbwertszeit von CH_2O -Kat < 4000Bh
- Reduzierung der Raumgeschwindigkeit verlängert Lebensdauer



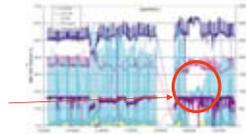
„ CH_2O “- OxiCat

Rahmenbedingungen

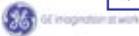
- Treibgas in erdgasähnlicher Qualität erforderlich (<5ppm H_2S -Gehalt)
- Empfindlich auf "Katalysatorgifte"
- Erhöhte Korrosionsgefahr
- Wichtig: Prozess-Sicherheit

Prozessfehler bei Entschwefelung

- Unterbrechung der O_2 -Zufuhr
- S-Gehalt : ~1000ppm
- ~8 Tage erhöhte Schwefellasten



=> Einsatz bei Biogas nur bei Vollentschwefelung empfohlen



GE Jenbacher / Thomas Eßenbruch
20-22.10.08

Möglichkeiten zur Emissionsminderung

Formaldehyd

Thermische Nachverbrennung



Technische Vorteile

- Unempfindlich gegen Verunreinigungen im Treibgas
- Minimale Wartungskosten
- Lebensdauer: 120k Betriebsstunden
- Unempfindlich gegen Ablagerungen
- Gleichbleibende Emissionswerte → Lebensdauer
- Keine zusätzliche Treibgasreinigung notwendig
- Zusätzlicher Wärmeertrag (ca. 20-30°C)
- Nur geringe Energiezufuhr notwendig

Anlagenbautechnische Vorteile

- Einfache Nachrüstung in bestehende Anlagen
- Wartungsschema auf Jenbacher Motoren abgestimmt

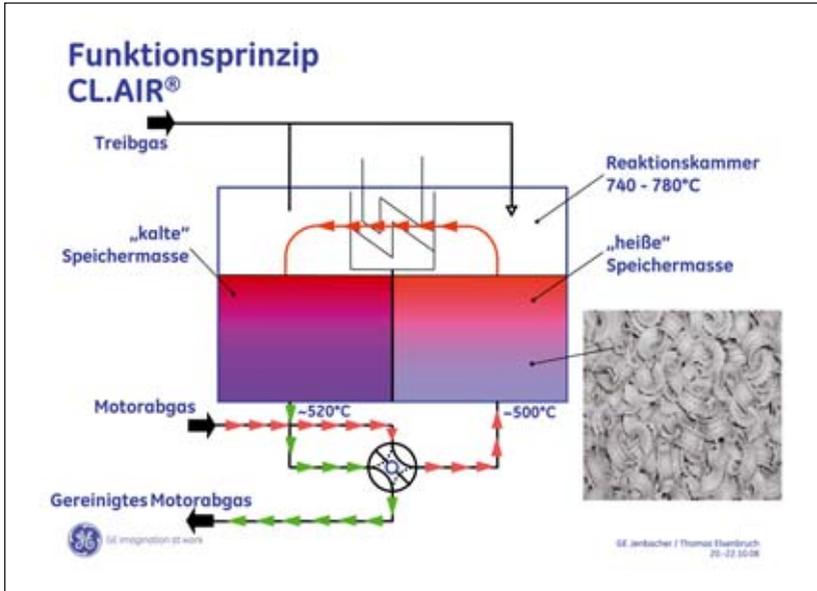
Investition in die Zukunft

„THC-Diskussion“

- Reduzierung unverbrannter HC
- gilt als Einflußfaktor für „Treibhaus-Effekt“



GE Jenbacher / Thomas Eßenbruch
20-22.10.08



CL.AIR –Pilotanlage– BGA Kloh II

Kenndaten der Anlage

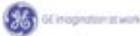
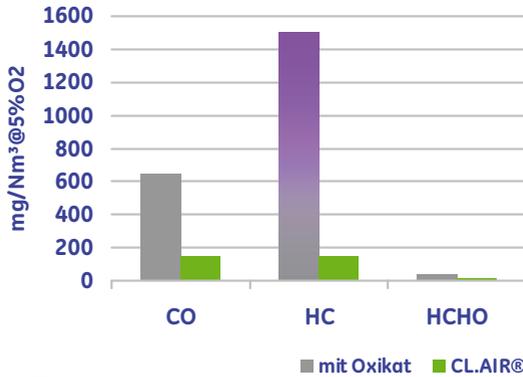
- Biogas BHKW
- J312 C225 (526kW_e)
- Betriebsstunden des Motors: 15.000h
- Leistungsverbrauch: 0.21kWh
- Formaldehyd: 2mg/Nm³
- Wärmeertrag: 239kW

Bisherige Erfahrungswerte

Abgasstoffe	Motor typisch	CL.AIR Garantiewerte	CL.AIR Erfahrungswerte
CO	< 1000	< 200	< 150
THC	~ 1500	< 200	< 125
HCHO	60	< 40	< 12
NOx (Leanox)	< 500	< 500	< 500

Alle Werte in mg/Nm³ @ 5%O₂-im trockenen Abgas

Mögliche Emissionswerte mit CL.AIR® (thermische Nachverbrennung)



GE Jenbacher / Thomas Elsenbruch
20-22.10.08

Anschrift des Autors:

Thomas Elsenbruch
GE Jenbacher GmbH & Co OHG
Achenseestr. 1–3, A-6200 Jenbach
E-Mail: thomas.elsenbruch@ge.com

Biogasverstromung in der Brennstoffzelle

Peter Landgraf
 MTU Onsite Energy GmbH

STARKE MARKEN UND UNTERNEHMEN

Tagnum
HOME OF POWER BRANDS

Engines	Onsite Energy	Components
Marken		
		
Produkte		
 <p>Dieselmotoren und komplette Antriebssysteme</p>	 <p>Gasbetriebene Energiesysteme Dieselbetriebene Energiesysteme Brennstoffzellen</p>	 <p>Einspritzsysteme Gelenkwellensysteme</p>

Folie 2 / MTU Onsite Energy



UNSER UNTERNEHMEN

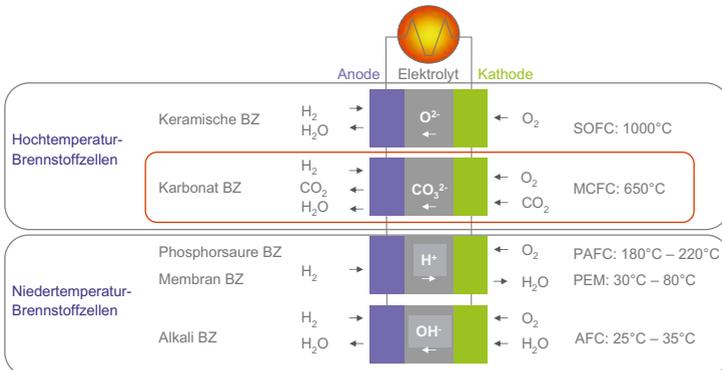


- Seit 1990 Firmensitz in Ottobrunn bei München
- Ca. 100 Mitarbeiter
- Entwicklung, Produktion und Vertrieb von stationären Brennstoffzellenanlagen zur dezentralen Energieversorgung
- KWK (Cogeneration) und KWKK (Trigeneration)
- Leistungsklasse: ab 250 kW

Folie 3 / MTU Onsite Energy



ARTEN VON BRENNSTOFFZELLEN



Folie 4 / MTU Onsite Energy



ZUKUNFTSTECHNOLOGIE – SCHON HEUTE: DIE VORTEILE DES HOTMODULES

Effizienz

- Elektrischer Wirkungsgrad 47 % (+/-2 %)
- Thermischer Wirkungsgrad bis zu 40 %
- Teillastunabhängigkeit
- KWK und KWKK

Qualität

- Premium-Strom
- 400°C Nutzwärme
- Schadstofffrei
- Geräuscharm
- Keine Vibrationen
- Keine beweglichen Teile

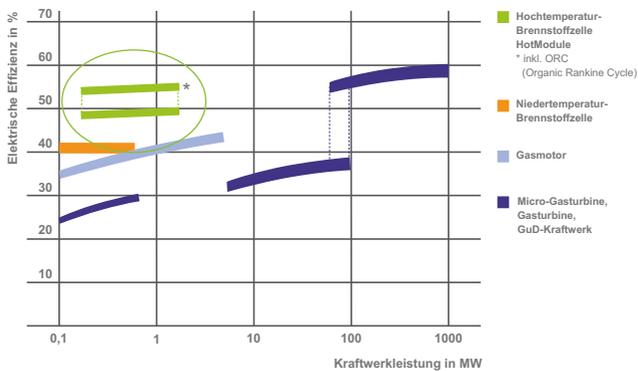
Sicherheit

- Energie vor Ort
- Vielfalt einsetzbarer Brennstoffe
- Netzunabhängigkeit
- Hohe Verfügbarkeit
- Grundlastversorgung mit erneuerbarer Energie

Folie 5 / MTU Onsite Energy



ÜBERLEGENE EFFIZIENZ



Folie 6 / MTU Onsite Energy



GEM. TA LUFT: LEDIGLICH ABLUFT KEINE RELEVANTEN ABGASVORSCHRIFTEN



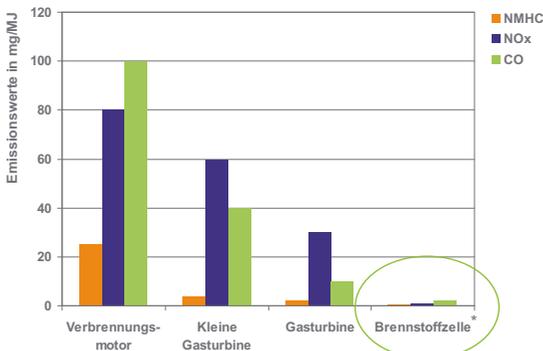
	HotModule	TA Luft
SO ₂	< 0,5 mg/m ₃	350 mg/m ³
NO _x	< 3 mg/m ₃	500 mg/m ₃
CO	< 9 ppm	150 ppm
Feinstaub	< 1 mg/m ₃	n/a
Formaldehyd	0 ppm	60 ppm
NMHC	< 5 ppm	50 ppm
NH ₃	< 2 ppm	30 ppm
CO ₂	ca. 150-200 g/kWh*	n/a

*HotModule KWK Anwendung

Folie 7 / MTU Onsite Energy



EMISSIONSWERTE IM VERGLEICH: SCHADSTOFFFREIE ABLUFT

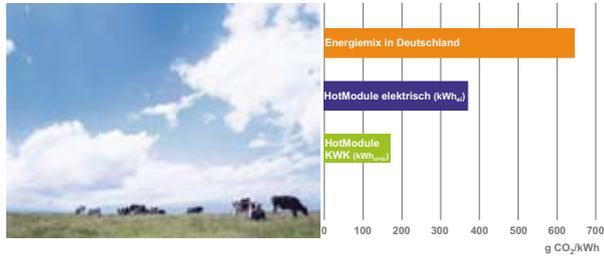


* Nach TA Luft als Abluft klassifiziert, d.h. keine relevanten Abgasvorschriften für den HotModule-Systembetrieb.

Folie 8 / MTU Onsite Energy



VORBILDLICHE CO₂-BILANZ



Folie 9 / MTU Onsite Energy



ANWENDUNGSBEREICHE UND ZIELKUNDEN

Brennstoffe	Anwendungsbereiche	Zielkunden
Erdgas	Stromerzeugung	„Umweltzonen“
Biogas	Kraft-Wärme-Kopplung	Hotels und Bürogebäude
Klärgas	Kraft-Wärme-Kälte-Kopplung	Krankenhäuser
Methanol		Telekommunikation
		Rechenzentren
		Lebensmittelindustrie
		Energiedienstleister
		Biogas-/Kläranlagen
		Industrielle Key Accounts

Folie 10 / MTU Onsite Energy



TECHNOLOGIEFÜHRER IN EUROPA



Folie 11 / MTU Onsite Energy



REFERENZANLAGEN

T-Systems Rechenzentrum

- München
- KWKK
- Brennstoff: Biomethan
- Betriebsstunden: 13.010



Kläranlage

- Moosburg
- KWK
- Brennstoff: Klärgas aus kommunalen Abwässern
- Betriebsstunden: 13.950



Krankenhaus

- Bad Berka
- KWKK
- Brennstoff: Erdgas
- Betriebsstunden: 43.490



Folie 12 / MTU Onsite Energy



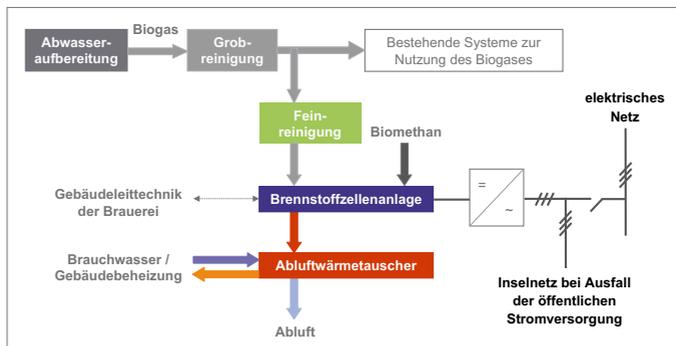
ERDINGER WEISSBRÄU



Folie 13 / MTU Onsite Energy



INTEGRATION DER BRENNSTOFFZELLE IN DEN BRAUEREIBETRIEB



Folie 14 / MTU Onsite Energy



INNENSTÄDTE DER ZUKUNFT: LOW EMISSION ZONES



Wärmeerzeugung in Innenstädten wird zukünftig nur bei gleichzeitiger Stromerzeugung möglich sein – alles andere wäre eine Verschwendung wertvoller Brennstoffe. In "Clean Areas" (Umweltzonen) lässt sich dies nur durch Brennstoffzellen auf höchstem – absolut umweltverträglich – realisieren.



Gute Nachbarschaft:

- Reine Luft
- Gesundheitsschutz
- Lärmvermeidung
- Immobilienwert
- Aktiver Umweltschutz

Folie 15 / MTU Onsite Energy



Anschrift des Autors:

*Peter Landgraf
MTU Onsite Energy GmbH
Christa-McAuliffe-Str. 1, 85521 Ottobrunn
E-Mail: peter.landgraf@mtu-online.com*

Mikrogasturbine – Stand der Technik

*Tobias Panne, Axel Widenhorn
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR)*

Der weltweit steigende Energiebedarf und die altersbedingte Erneuerung von Kraftwerken erfordern die Entwicklung neuer und die Optimierung vorhandener Kraftwerkskonzepte. Im dezentralen Bereich bietet sich die sogenannte Kraft-Wärme-Kopplung an. Bei der gekoppelten Strom- und Wärmebereitstellung wird der eingesetzte Brennstoff effizient umgesetzt, was den Anlagenwirkungsgrad und somit auch die Wirtschaftlichkeit und Umweltverträglichkeit erhöht. Gefördert werden diese Kraftwerkssysteme durch nationale und internationale Klimaschutzverordnungen. So sieht z. B. das integrierte Energie- und Klimaprogramm der Bundesregierung (IKEP) eine Verdopplung der Energiebereitstellung mittels Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) bis 2020 vor ^[1]. Weiterhin soll bis 2020 der Anteil der erneuerbaren Energien bei der Stromproduktion auf 30 % und bei der Wärmeerzeugung auf 14 % erhöht werden. Gegenwärtig werden zur dezentralen Strom- und Wärmeerzeugung überwiegend Blockheizkraftwerke auf der Basis von Kolbenmaschinen eingesetzt. Im Gegensatz zu den USA ist die Nutzung des Gasturbinenprozesses für die dezentrale Energiebereitstellung in Europa und Deutschland noch die Ausnahme. Jedoch verfügen Mikrogasturbinen mittel- und langfristig über das Potential neben den Kolbenmaschinen eine entscheidende Rolle bei der KWK einzunehmen.

1 Aufbau und Funktionsweise einer Mikrogasturbine

Generell werden alle schnell laufenden Gasturbinen bis zu einer elektrischen Leistung von ca. 300 kW_{el} unter dem Oberbegriff Mikrogasturbine zusammengefasst. Der prinzipielle Aufbau einer Mikrogasturbine ist in Abbildung 1 schematisch dargestellt. Umgebungsluft wird von einem

Radialverdichter angesaugt und komprimiert. Anschließend wird die verdichtete Luft zur Steigerung des elektrischen Wirkungsgrads in einen Rekuperator geleitet. Der Rekuperator wärmt die Prozessluft mittels des heißen Turbinenabgases vor, bevor diese der Brennkammer zugeführt wird. Dort wird der Brennstoff zugegeben und das Brennstoff/Luft-Gemisch verbrannt. Danach wird das heiße Abgas der Brennkammer in einer Radialturbine entspannt und im Rekuperator weiter abgekühlt. Die im Abgas verbleibende Restwärme kann anschließend zur KWK eingesetzt werden.

Die Bauteile der Turbomaschine, Radialverdichter und -turbine, basieren auf der Turboladertechnologie, die durch ihren Einsatz in der Automobilindustrie einen hohen Entwicklungsstand erreicht hat. Sie sind in der Regel zusammen mit einem Permanentmagnetgenerator auf einer Welle montiert. Je nach Anlagentyp beträgt die Drehzahl der Welle zwischen 40.000 – 160.000 U/min. Der Generator, der zum Start der Mikrogasturbine als Motor eingesetzt wird, erzeugt einen hochfrequenten Wechselstrom, der dann mittels einer Leistungselektronik in die gewünschte Netzfrequenz und -spannung konvertiert wird. Somit wird keine mechanische Synchronisationseinheit benötigt. Da im Vergleich zur Kolbenmaschine bei Mikrogasturbinen nur rotierende Bauteile eingesetzt werden, zeichnet sich diese durch einen robusten Aufbau und eine sehr hoher Laufruhe aus. Die Schallemission in einem Meter Abstand beträgt etwa 65 dB.

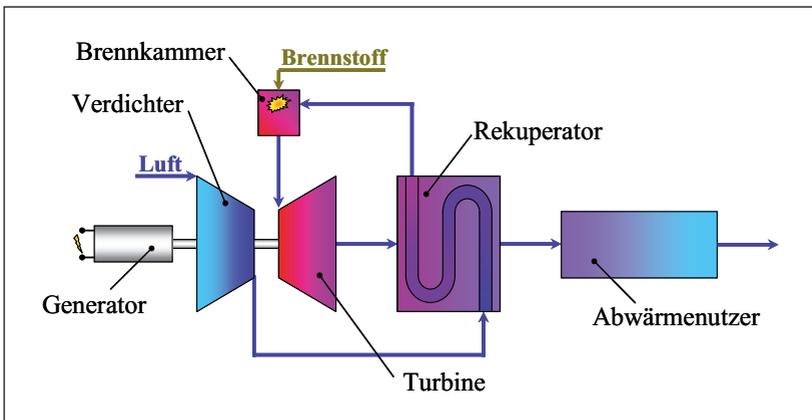


Abb. 1: Schaltbild Mikrogasturbine

2 Technisch-wirtschaftliche Faktoren im Vergleich zur Kolbenmaschine

2.1 Brennstoffe und Emissionen

Der kontinuierliche Ablauf der Verbrennung ist ein Vorteil des Gasturbinenprozesses. Bei einem Kolbenmotor steht für die Aufbereitung und Verbrennung des Brennstoffs nur ein sehr geringes Zeitfenster zur Verfügung. Das führt zu erhöhten Anforderungen an den Brennstoff, wie beispielsweise eine hohe Klopfestigkeit oder eine hohe Methanzahl. Darüber hinaus ist der mit einer Kolbenmaschine erreichbare elektrische Wirkungsgrad von der Abstimmung des Motors auf den Brennstoff abhängig. Somit wirken sich Schwankungen in der Zusammensetzung des Brennstoffs oft negativ auf die Anlageneffizienz aus. Mikrogasturbinen lassen sich hingegen mit einer deutlich weiteren Bandbreite an flüssigen und gasförmigen Brennstoffen betreiben. Daher sind sie auch besser für den Betrieb mit schwankenden Brennstoffzusammensetzungen geeignet. Darüber hinaus können durch die kontinuierliche Verbrennung, die gesetzlich vorgeschriebenen Emissionsrichtlinien auch ohne eine aufwändige und kostenintensive Abgasnachbehandlung eingehalten werden. Die NO_x und CO-Emissionen liegen bei einer Mikrogasturbine im Auslegungspunkt unter 15 ppm und die UHC-Werte unterhalb 10 ppm. Diese Angaben beziehen sich auf 15 %_{vol} Rest-O₂ im Abgas.

2.2 Abwärmennutzung (KWK)

Ebenfalls Vorteile bietet die Mikrogasturbine bei der Nutzung der anfallenden Abwärme, da diese auf einem höheren Temperaturniveau bei einem kontinuierlichen Massenstrom anfällt. Somit ist die Mikrogasturbine grundsätzlich besser für die Erzeugung von Warmwasser und industrieller Prozesswärme und -kälte geeignet. Hierzu wird die Abwärme dem Gasturbinenkreislauf nach dem Rekuperatoraustritt bei einer Temperatur von ca. 270 °C entnommen. Eine weitere Option ist die Entnahme der Abwärme direkt nach dem Turbinenaustritt (650 °C). Jedoch sinkt durch das Umgehen des Rekuperators der elektrische Wirkungsgrad erheblich. Darüber hinaus ist es denkbar, mehrere Abwärmennutzer in Reihe zu schal-

ten und somit die Gesamteffizienz weiter zu steigern. Weiterhin eignet sich das Abgas, welches einen Restsauerstoffgehalt von etwa 18 %_{vol} hat, beispielsweise zum Heizen und zur CO₂-Düngung von Gewächshäusern. Denkbar ist auch, den kontinuierlichen Abgasmassenstrom für technische Trocknungsprozesse oder für die Verstromung in einem so genannten Organic Rankine Cycle (ORC) einzusetzen.

2.3 Elektrischer Wirkungsgrad und Gesamteffizienz

Ein Nachteil von Mikrogasturbinen ist zurzeit noch der elektrische Wirkungsgrad. Im Erdgasbetrieb liegt dieser im Auslegungspunkt zwischen 28–33 % und ist somit um etwa 10 %-Punkte geringer als beim Kolbenmotor. Mittelfristig ist jedoch eine Steigerung des elektrischen Wirkungsgrads von Mikrogasturbinen auf 35 % zu erwarten. Im Teillastbereich weisen Mikrogasturbinen, aufgrund ihrer Bauweise und der Regelungsstrategie, nur einen geringeren Wirkungsgradverlust auf. Die Gesamteffizienz von Mikrogasturbinen, welche abhängig vom eingesetzten Abwärmenutzer im Bereich zwischen 75 % und 90 % liegt, ist vergleichbar mit dem Kolbenmotor.

2.4 Wartungskosten

Generell verfügen Mikrogasturbinen aufgrund ihres einfachen Aufbaus über eine sehr hohe Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit. Die Lebenswartung einer Mikrogasturbine beträgt je nach Anlagentyp zwischen 60.000–80.000 Betriebsstunden. Eine Generalüberholung der Maschinen ist alle 30.000–40.000 Betriebsstunden notwendig. Die Kosten hierfür sind abhängig vom Hersteller und betragen beispielsweise für die Capstone C30 ca. 12.500 €. Die planmäßigen Wartungsintervalle sind mit 6.000 bis 8.000 Stunden etwa viermal länger als bei Kolbenmotoren. Die Wartungskosten betragen bei Mikrogasturbinen ca. 0,3–0,4 ct/kWh und bei Kolbenmotoren in etwa 0,7–1,0 ct/kWh. In einigen Modellen werden Luftlager eingesetzt, so dass hier keine zusätzlichen Betriebs- und Schmiermittel benötigt werden. Der Einfluss von Minorkomponenten, wie beispielsweise Alkalien, Ammoniak und Schwefelwasserstoff, auf die Standzeiten der Komponenten ist in Bolhår-Nordenkampf et al. beschrieben ^[3].

2.5 Investitionskosten

Die spezifischen Investitionskosten für eine Mikrogasturbine liegen, abhängig von der Leistungsklasse und Hersteller, zwischen 1.200 – 1700 €/kW. Es ist zu erwarten, dass mit steigender Stückzahl die Investitionskosten weiter sinken werden. Im Vergleich dazu liegen die spezifischen Kosten für einen Gas- bzw. Zündstrahlmotor bei etwa 1.500 €/kW. Die Amortisationszeit beträgt, unter der Voraussetzung einer gleichen Jahreslaufzeit, bei beiden KWK-Systemen etwa 3½ Jahren [2]. Neben der Mikrogasturbine oder dem Kolbenmotor sind zusätzlich die Kosten für den Bau eines Gebäudes, für die Versorgungsinfrastruktur, für das Abgassystem sowie die Planungs- und Inbetriebnahmekosten zu berücksichtigen. Aufgrund der höheren Leistungsdichte und Laufruhe sowie der geringeren Schallemissionen sind diese Kosten bei der Mikrogasturbine etwas geringer.

3 Einsatzgebiete für Mikrogasturbinen

Im privaten Sektor sind Mikrogasturbinen zur gekoppelten Strom- und Wärmeversorgung von Ein- und Mehrfamilienhäuser sowie größeren Wohnblöcken geeignet. Im Vergleich zu den Kolbenmotoren zeichnet sich die Mikrogasturbine in diesem Anwendungsgebiet durch ihre geringen Lärmemissionen, die größere Leistungsdichte, die längeren Wartungsintervalle sowie die geringeren spezifischen Betriebs- und Instandhaltungskosten aus. Im öffentlichen Bereich eignen sich Mikrogasturbinen dort, wo neben dem Strombedarf auch Wärme benötigt wird. Hierzu zählen beispielsweise Hallenbädern und Krankenhäuser aber auch Schulen, Kindergärten oder Verwaltungsgebäude. Im industriellen Umfeld können Mikrogasturbinen beispielsweise für die Erzeugung von Prozessdampf oder -kälte sowie zur dezentralen Speisung von Fernwärmenetzen eingesetzt werden. Weitere Anwendungsgebiete sind alle industriellen Prozesse, die einen hohen Wärmebedarf haben, wie zum Beispiel Wäschereien, Brauereien oder Trocknungsanlagen.

Eine besondere Stellung unter den Einsatzgebieten nimmt die Verstromung von Schwachgasen ein. Aufgrund der hohen Anforderungen an die Brennstoffqualität lassen sich Brenngase mit geringem Heizwert, wie zum Beispiel Deponie-, Gruben- oder Klärgase, in Kolbenmotoren nicht oder nur eingeschränkt und mit Wirkungsgradein-

bußen umsetzen. Die Nutzung von Schwachgasen in Mikrogasturbinen ist in der Regel unproblematisch. Aufgrund der geringen Heizwerte müssen jedoch größere Brenngasvolumenströme in der Brennkammer umgesetzt werden um eine gleiche Energieleistung zu erhalten. Das erhöht im Vergleich zu Erdgas den Energiebedarf bei der Brennstoffkompression, was durch die steigende Leistungsdichte der Mikrogasturbine zum Teil wieder kompensiert wird.

4 Marktübersicht

Auf dem europäischen Markt sind derzeit fünf Mikrogasturbinen von drei unterschiedlichen Herstellern kommerziell verfügbar. Sie unterscheiden sich sowohl in ihrer elektrischen Leistung, als auch in ihrem Wirkungsgradpotential. Zu den in Tabelle 1 aufgeführten Modellen wird vom Hersteller standardmäßig ein Wasserwärmetauscher zur KWK angeboten. Die angegebenen Leistungs- und Wirkungsgraddaten beziehen sich auf den Betrieb mit Erdgas aus dem Erdgasnetz. Weitere Brennstoffe neben Erdgas sind laut Hersteller:

- Capstone: Faul- und Biogas, Diesel, Biodiesel, Öl, Kerosin
- Turbec: Faul-, Bio- und Grubengas, Propan, Diesel

Die in Tabelle 1 angegebenen Daten beziehen sich auf den Auslegungspunkt (Volllast) und ISO-Bedingungen. Ferner beziehen sich die thermische Leistung und die Gesamteffizienz auf die Nutzung des vom Hersteller angebotenen Wasserwärmetauschers.

Tab. 1: Marktübersicht Mikrogasturbinen

Hersteller	Modell	P_{el}	P_{th}	η_{el}	η_{sys}
Capstone	C30	30 kW	68 kW	28 %	83 %
	C65	65 kW	120 kW	29 %	85 %
	C200	200 kW	290 kW	33 %	81 %
Turbec	T100	100 kW	167 kW	30 %	78 %
Elliot	EPS-80R	80 kW	135 kW	28 %	75 %

5 Zusammenfassung

Mikrogasturbinen stellen bei der kombinierten Strom- und Wärmeerzeugung sowohl technisch als auch wirtschaftlich eine Alternative zu den Kolbenmotoren dar. Die hohe Brennstoff-Flexibilität, die niedrigen Schadstoffemissionen, die längeren Wartungsintervalle und die geringeren spezifischen Wartungskosten sprechen für den Einsatz von Mikrogasturbinen. Je nach Anwendungsgebiet besteht die Möglichkeit, Abwärme auf unterschiedlichen Temperaturniveaus zu nutzen. Weiterhin zeichnet sich die Technologie durch die einfache Bauweise, die größere Leistungsdichte sowie die niedrigen Lärmemissionen aus. Nachteilig sind derzeit noch der geringere elektrische Wirkungsgrad der Mikrogasturbine und die benötigte Kompression des Brennstoffs. Der erreichbare Marktanteil von Mikrogasturbinen in der KWK-Anwendung hängt vor allem von der weiteren technologischen Entwicklung sowie dem Kostenreduktionspotential ab. Bei der Planung von KWK-Anlagen sollte die Mikrogasturbine als Alternative zum Kolbenmotor auf jeden Fall berücksichtigt werden.

Literatur

- [1] Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi), Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU), (2007), „Bericht zur Umsetzung der in der Kabinettsklausur am 23./24.08.2007 in Meseberg beschlossenen Eckpunkte für ein Integriertes Energie- und Klimaprogramm“.
- [2] Bayerisches Landesamt für Umwelt, (2007), „Klimaschutz durch effiziente Energienutzung – Einsatzmöglichkeiten der Mikrogasturbine in Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen“.
- [3] Markus Bolhär-Nordenkamp et al., (2003), „Hersteller und Marktbetrachtung der thermo-chemischen Umwandlung von Biomasse“, Arbeitsbericht der Projektgemeinschaft Biomassevergasung.

Anschrift der Autoren:

*Tobias Panne, Axel Widenhorn
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR)
Institut für Verbrennungstechnik
Pfaffenwaldring 38-40, 70569 Stuttgart
E-Mail: tobias.panne@dlr.de*

Möglichkeiten zur Senkung des Energiebedarfs von Biogasanlagen

Andreas Lehner, Mathias Effenberger
Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL)

Zusammenfassung

Auf Biogasanlagen wird Energie in Form von Strom und Wärme benötigt. Mit teilweise über 50 % der Betriebskosten nehmen die Kosten für Prozessenergie auf landwirtschaftlichen Biogasanlagen einen nicht zu vernachlässigenden Anteil an den Gesamtkosten ein. Große Unterschiede im Stromverbrauch und damit auch erhebliche Einsparpotentiale konnten im Bereich der Rührtechnik ausgemacht werden. Hier können durch die Wahl geeigneter Rührsysteme große Einsparungen erreicht werden. Der Verbrauch des Feststoffeintrags weist im Vergleich von Praxisanlagen deutliche Unterschiede auf, der Anteil am Gesamtstromverbrauch ist jedoch vergleichsweise gering. Maßnahmen zur Senkung des Bedarfs an Heizwärme sind nur für den Fall ökonomisch vertretbar, wenn für die eingesparte Wärme Möglichkeiten einer sinnvollen Verwertung bestehen.

Stichwörter: Biogasanlage; Stromverbrauch; Wärmeverbrauch; Betriebskosten

Einführung

Zur Sicherung des ökonomischen Erfolgs ergeben sich für den Betreiber einer Biogasanlage grundsätzlich zwei Möglichkeiten: die Leistungen, d.h. die Erlöse aus dem Verkauf von Strom und Wärme zu steigern bzw. die Kosten zu senken. Wird die Anlage bei hoher elektrischer Auslastung gefahren und sind die Möglichkeiten für den Wärmeabsatz stark eingeschränkt, muss das Hauptaugenmerk des Betreibers auf die Senkung der Kosten gelegt werden.

Die Kosten teilen sich im Wesentlichen in Festkosten, Betriebskosten und Kosten für Substrate auf. Die Substratkosten, die den größten Teil der Kosten einnehmen, werden hauptsächlich von der jeweiligen Marktsituation bestimmt. Die Festkosten – im Wesentlichen Zinsen für Fremdkapital und Abschreibungen – sind ebenfalls kaum beeinflussbar. Den dritten großen Kostenblock stellen die Kosten für den Anlagenbetrieb, die im Mittel ca. 20 % der Gesamtkosten betragen (Röhling et al., 2009). Die Kosten für die Prozessenergie haben hieran einen Anteil von teilweise über 50 %.

Neben Energie in Form von Strom wird auf Biogasanlagen für die Fermenterbeheizung zusätzlich Wärmeenergie benötigt. In diesem Beitrag wird der Energieverbrauch von Biogasanlagen näher betrachtet und aufgezeigt, in welchen Bereichen Einsparungspotentiale liegen.

Methodik

Als Datengrundlage dienen die Ergebnisse aus Dauermessungen auf zehn landwirtschaftlichen Biogasanlagen in Bayern („Bayerische Pilot-Biogasanlagen“). Die elektrische Nennleistung der auf den Anlagen installierten Blockheizkraftwerke (BHKW) liegt bei 250 bis 526 kW_{el} (vgl. Abbildung 1). Für die auf den verfügbaren Gärraum bezogene installierte elektrische Leistung ergibt sich eine große Bandbreite zwischen ca. 0,11 und 0,30 kW pro m³ Gärraum (Nutzvolumen).

Um die für eine vergleichende Bewertung erforderlichen Informationen auf den Praxisanlagen zu erfassen, wurde auf die langfristige automatisierte Aufzeichnung von Messwerten sowie auf tägliche manuelle Aufzeichnungen der Betreiber im Betriebstagebuch zurückgegriffen. Auf diese Weise konnte eine hohe Datendichte realisiert werden. So wurde etwa der Strombedarf einzelner Anlagen-Komponenten bzw. der Heizwärmebedarf der Gärbehälter über einen Zeitraum von bis zu zwei Jahren erfasst. Die Bilanzierung der elektrischen Energieströme erforderte nach einer individuellen Analyse der Stromlaufpläne der einzelnen Biogasanlagen. Der Schwerpunkt der Stromverbrauchsmessungen wurde dabei auf die Rührtechnik und den Substrateintrag gelegt. In diesen Bereichen haben Betreiber die Wahl zwischen sehr unterschiedlichen technischen Lösungen. Im Gegensatz dazu kommt im Bereich des BHKW meist standardisierte Technik zum Einsatz, sodass die Möglichkeiten zur Energieeinsparung sehr beschränkt sind. Eine getrennte Messung des Stromverbrauchs

Tab. 1: Technische Daten der untersuchten Praxis-Biogasanlagen

Anlagen ID	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
Jahr der Inbetriebnahme	2005	2005	2004	2004	2005	2002	2005	2004	2005	2001
Anzahl Prozessstufen	2	2	3	2	2	2	2	3	2	3
Gesamt-Gärraum*	3.015	2.605	3.676	2.290	2.487	3.740	1.540	1.778	1.095	3.413
Gesamt-Lagervolumen für Gärrest	1.146	1.294	4.029	800	2.300	4.988	3.289	739	1.791	2.688
BHKW: Motortyp	G-O ¹	G-O	G-O	G-O	G-O	G-O	ZS ²	ZS	G-O	G-O
BHKW: Anzahl Motoren	1	1	2	2	1	1	2	1	1	2
BHKW: Elektrische Nennleistung	329	333	380	420	347	526	280	250	324	380
Spezifische elektrische Nennleistung	0,109	0,128	0,171	0,180	0,140	0,141	0,182	0,141	0,296	0,111
BHKW: Thermische Nennleistung	447	232	400	472	432	566	300	262	250	400
Spezifische thermische Nennleistung	0,148	0,089	0,109	0,206	0,174	0,151	0,192	0,147	0,228	0,117

¹ Gas-Otto-Motor

² Zündstrahlmotor

* Summe der Nutzvolumina aller aktiv beheizten Prozessstufen (ohne Gärrestlager)

n. V.: nicht verfügbar

der einzelnen BHKW-Komponenten erfolgte nur in Einzelfällen.

Die Wärmebilanz konnte nicht auf allen Anlagen ermittelt werden, da die erforderlichen Wärmemengenzähler nicht oder nicht rechtzeitig eingebaut wurden. Um den Vergleich verschiedener Anlagenkonzepte zu ermöglichen, wurde als Bezugsgröße eine Tonne eingesetztes Substrat verwendet.

Ergebnisse

Eintragstechnik

Im verfahrenstechnischen Ablauf der Biogasproduktion stellt die Eintragstechnik den ersten Stromverbraucher dar. Dabei werden in der Praxis verschiedene Systeme eingesetzt. In den Messungen konnten in diesem Bereich deutliche Unterschiede ermittelt werden (vgl. Tabelle 2). Die Verbrauchswerte schwankten zwischen 0,3 kWh je Tonne Frischmasse im Fall der Anlage G bis hin zu über 4 kWh*t⁻¹ für Anlage B. Diese erheblichen Unterschiede werden in erster Linie durch die verwendete Technik bedingt. Bei Anlage G besteht der Substrateintrag lediglich aus einem trichterförmigen Behälter mit Stopfschnecken. Eine Durchmischung der Einsatzstoffe im Vorratsbehälter findet hier nicht statt. Dahingegen erfordert bei anderen Systemen die zusätzliche Mischung der Einsatzstoffe eine stärkere Motorisierung der Eintragstechnik. Bei Anlage B wurde schwerpunktmäßig faseriges Material eingesetzt. Dies erforderte lange Laufzeiten. Hinzu kommt, dass das Substrat vor dem Eintrag ca. 8 m vertikal gefördert werden muss. Dieser Umstand trägt zusätzlich zum hohen Verbrauch bei dieser Anlage bei. Abbildung 1 stellt den spezifischen Stromverbrauch der Eintragungssysteme sowie die jeweils installierte Leistung der Aggregate dar. Es zeigte sich, dass im Vergleich zu den bereits erwähnten Systemen die Gruppe der Vertikalmischer mit einem Verbrauch zwischen 1,5 und 2,5 kWh je Tonne Frischmasse ein mittleres Verbrauchsniveau aufwies. Hier beeinflusste ebenfalls die Förderhöhe den Verbrauch.

Tab. 2: Kennzahlen des Energieverbrauchs der untersuchten Biogasanlagen

Anlage	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
Auswertzeitraum	639	672	365	865	793	823	609	200	640	609
Tag										
Stromverbrauch										
Substrateintrag										
Verbrauch Feststoffeinbringung	7,3	7,6	3,8	2,6	4,9	5,8	1,3	4,2	0,9	n. v.
Spez. Verbrauch (ohne Gülle)	2,4	4,3	1,5	0,7	1,9	1,8	0,3	2,2	0,6	n. v.
Rührwerke 1. Gärstufe	57,8	18,2	5,4	n. v.	5,8	30,9	33,6	13,7	30,9	n. v.
	18,2	10,3	1,8	n. v.	2,2	9,7	5,3	7,2	13,7	n. v.
Rührwerke: Ø Betriebszeit	10,1	24,0	3,5	16,1	24,0	24,0	8,6		n.v.	7,6
BHKW und Sonstiges	30,9	n.v.	88,2	56,1	n. v.	50,9	50,3	56,8	52,2	n. v.
Wärmeverbrauch										
Anteil Fermenterbeheizung	10,3	4,2	n. v.	25,6	13,9	12,6	20,1	n. v.	21,4	n. v.
Substrat spez. Wärmebedarf	41,7	11,6	n. v.	110,4	78,5	54,9	64,9	n. v.	62,2	n. v.
spez. Wärmebedarf	30,8	8,7	n. v.	89,9	56,1	39,1	77,0	n. v.	62,4	n. v.
Externer Wärmeabsatz	2,5	2,0	33,3	28,2	43,3	50,7	15,4	n. v.	47,1	21,1
Energieverbrauch gesamt										
Stromverbrauch gesamt	9,1	17,4	8,4	5,8	8,3	7,3	4,4	14,2	11,1	6,2
	31,6	56,4	32,9	25,1	37,6	31,5	15,5	52,2	44,3	19,2
Energieverbrauch (Strom+Wärme)	73,3	68,0	n. v.	135,4	116,1	86,4	80,3	n. v.	106,6	n. v.

n. v.: nicht verfügbar

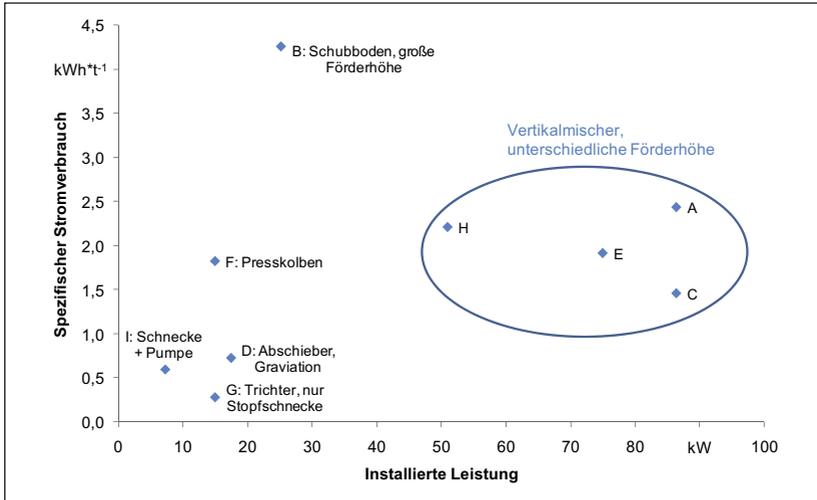


Abb. 1: Installierte Leistung und spezifische Stromverbräuche der eingesetzten Eintragstechniken

Stromverbrauch Rührtechnik

Auf den untersuchten Anlagen wurden zur Durchmischung der Gärbehälter unterschiedliche Rührsysteme eingesetzt. Im Folgenden werden die Verbräuche der Rührwerke der ersten Gärstufen näher betrachtet. Der Stromverbrauch der Rührtechnik wies eine große Bandbreite auf. Mit Werten zwischen $1,8 \text{ kWh} \cdot \text{t FM}^{-1}$ bei Anlage C und $18,2 \text{ kWh} \cdot \text{t FM}^{-1}$ bei Anlage A unterschieden sich die Verbräuche um bis zu Faktor 10. Die erheblichen Unterschiede waren hauptsächlich in der Wahl der Rührtechnik begründet. Abbildung 2 stellt die installierte Antriebsleistung sowie die mittlere Leistungsaufnahme der Rührwerke einiger Anlagen bezogen auf 100 m^3 Gärraum dar. Befinden sich die Werte für eine Anlage auf annähernd gleichem Niveau (z. B. Anlage E), so weist dies auf eine vergleichsweise hohe Auslastung des Rührwerks hin. Wie aber das Beispiel der Anlage E zeigt, befinden sich die Werte mit etwa $0,5 \text{ kW} \cdot 100 \text{ m}^3$ im Vergleich zu den anderen Anlagen auf niedrigem Niveau. Haspelrührwerke – obgleich permanent betrieben – stellten sich bei den Erhebungen als vergleichsweise energiesparend heraus.

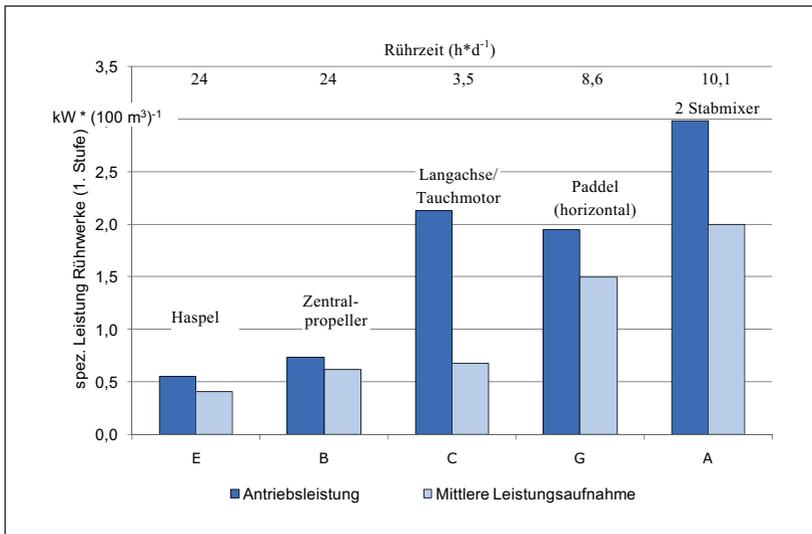


Abb. 2: Spezifische Antriebsleistung und mittlere Leistungsaufnahme von Rührwerken der 1. Gärstufe

Betrachtet man die durchschnittlichen Rührzeiten der weiteren Anlagen, so wies Anlage C mit 3,5 Betriebsstunden pro Tag den niedrigsten Wert auf. Hier wurde eine Kombination von Langachsrührwerk und Tauchmotorrührwerk eingesetzt, die in diesem Fall eine Reduktion der Rührzeit bei gleichbleibend guter Durchmischung erlaubte. Die höchste Leistungsaufnahme wurde auf Anlage A gemessen. Die ausschließliche Verwendung schnell laufender Stabmixer stellte sich als energetisch unvorteilhaft heraus. Konsequenterweise bergen die korrekte Auswahl und der optimierte Betrieb der Rührwerke ein erhebliches Potential zur Senkung des Strombedarfs von Biogasanlagen. Sind die Rührwerke unzureichend dimensioniert, so kann dies bis zu einem gewissen Grad nur durch verlängerte Laufzeiten kompensiert werden, was den Stromverbrauch in die Höhe treibt.

Stromverbrauchsanteil gesamt

Summiert man den Strombedarf sämtlicher Verbraucher der Biogasanlage, lässt sich der Gesamtstrombedarf als Anteil an der Stromproduktion darstellen. Für die untersuchten Anlagen schwankten hier die Werte zwischen 4,4 % (Anlage G) und 17,4 % (Anlage B) (Effenberger et al., 2009; Solarenergieförderverein Bayern e. V., 2006). Bezogen auf die jeweils zum Einsatz kommende Substratmenge entsprach dies 15,5 bis 56,4 kWh*t FM⁻¹ (vgl. Abbildung 2).

Wärmebedarf

Neben elektrischer Energie wird auf Biogasanlagen thermische Energie zur Beheizung der Gärbehälter benötigt. Kann der Wärmeverbrauch reduziert werden, steht grundsätzlich ein höherer Anteil der nutzbaren Wärme für den externen Absatz zur Verfügung. Dies bedeutet, dass die Einsparung von Heizwärme für den Betreiber nur dort betriebswirtschaftlich sinnvoll ist, wo es möglich ist, die produzierte Wärme größtenteils abzusetzen. Derzeit stellt sich der Wärmeabsatz landwirtschaftlicher Biogasanlagen jedoch in vielen Fällen schwierig dar. Bei den untersuchten Anlagen konnten 2 bis knapp über 50 % der nutzbaren Wärme abgesetzt werden.

Für den Heizwärmebedarf der Anlagen wurden große Unterschiede ermittelt. Der Wärmebedarf bezogen auf die gesamte nutzbare Wärme betrug zwischen gut 4 % (Anlage B) und über 25 % im Fall von Anlage D. Bezogen auf eine Tonne Frischmasse schwankte der Bedarf zwischen ca. 11 und 110 kWh (vgl. Tabelle 2). Ein Grund für den günstigen Wert bei Anlage B kann in der Fermentergeometrie gesehen werden, da hier das Verhältnis von Oberfläche zu Gärvolumen am geringsten ist. Dementsprechend kann hier mit vergleichsweise geringer Wärmeabstrahlung des Gärbehälters gerechnet werden. Dagegen trug zum hohen Heizwärmebedarf bei Anlage D wahrscheinlich der Umstand bei, dass hier die Behälter in das Grundwasser eintauchen.

Fazit

Die Energiekosten nehmen einen nicht zu vernachlässigenden Anteil an den Gesamtkosten in der landwirtschaftlichen Biogasproduktion ein. Auf den Praxisanlagen wurden die größten Einsparpotentiale bei der Wahl eines geeigneten Rührsystems sowie ggf. bei der Reduzierung der Rührzeiten identifiziert. Einsparungen bei der Heizwärme sind nur dann ökonomisch vorteilhaft, wenn die eingesparte Wärme sinnvoll verwertet werden kann.

Generell ist festzuhalten, dass Maßnahmen zur Energieeinsparung nur dann nachweisbar ergriffen werden können, wenn sich der Betreiber über den tatsächlichen Energieverbrauch im Klaren ist. Dementsprechend ist es dringend ratsam, die Energieverbräuche der Anlagenkomponenten – zumindest der größten Verbraucher – messtechnisch zu erfassen.

Literatur

- Effenberger, M., A. Lehner, A. Gronauer: Energetische Effizienz landwirtschaftlicher Biogasanlagen. 18. Jahrestagung des Fachverband Biogas e.V.: „Biogas: dezentral erzeugen, regional profitieren, international gewinnen“, 03. – 05. Februar 2009, Hannover: 113 – 120
- Röhling I., A. Schilcher und M. Strobl: Ökonomische Kennzahlen der bayerischen Biogas-Pilotbetriebe, Tagungsband des Biogas-Forum Bayern, 2. März 2009, Neumarkt in der Oberpfalz: 35 – 44
- Solarenergieförderverein Bayern e.V. (Hrsg.): Der Eigenstromverbrauch von Biogasanlagen und Potenziale zu dessen Reduzierung. München, November 2006, URL: www.sev-bayern.de

Anschrift der Autoren:

*Andreas Lehner, Dr.-Ing. Mathias Effenberger
Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL)
Institut für Landtechnik und Tierhaltung
Vöttinger Str. 36, 85354 Freising
E-Mail: andreas.lehner@LfL.bayern.de*

EEG-konforme Abwärmenutzung landwirtschaftlicher Biogasanlagen

*Wolfgang Schulz
Bremer Energie Institut*

Ausgangssituation

Im Rahmen des Monitoring des Erneuerbare-Energien-Gesetzes ist erkannt worden, dass die Wärmenutzung im Rahmen der seit 2004 in Deutschland errichteten großen Biogasprojekte überwiegend stiefmütterlich behandelt wurde. Die Anlagen wurden meist an abgelegenen Standorten errichtet, die wenig Anknüpfungspunkte für eine externe Wärmenutzung bieten. Entsprechend wurde mit der erneuten Novellierung des EEG ein Anreiz dafür geschaffen, sich zukünftig verstärkt um eine sinnvolle Wärmenutzung zu kümmern. Der KWK-Bonus wurde von 2 auf 3 Ct/kWh_{el} angehoben. Außerdem sind Standards definiert worden, die die anrechenbare Wärmenutzung zu erfüllen hat, um die vielfach zu verzeichnenden Pseudonutzungen einzudämmen.

Es wurde bislang zu wenig beachtet, dass sich die Wirtschaftlichkeit vieler Biogasanlagen durch eine externe Wärmenutzung verbessern ließe. Auch der ökologische Vorteil des Ersatzes fossiler Brennstoffe durch eine hochgradige Nutzung der ohnehin erzeugten Wärme ist nicht zu vernachlässigen. So ist es wichtig, zur Kenntnis zu nehmen, dass das neue EEG sogar die Nachrüstung einer externen Wärmenutzung unterstützt.

Vorgaben des EEG zur Qualität der anrechenbaren Wärmenutzung

Die Mindeststandards der Wärmenutzung sind in der Anlage 3 des EEG definiert. So sind Obergrenzen des Wärmeeintrages bei der Beheizung von Wohnhäusern und Tierställen festgelegt worden. Für die Anerkennung

einer Wärmenutzung ist folgende Forderung besonders wichtig: Es soll sich um einen Wärmeeinsatz handeln, der üblicherweise mit fossilen Energien abgedeckt wird und der mit einem Investitionsaufwand von mindestens 100 €/kW verbunden ist. Die Prozesswärme für die Aufbereitung von Gärresten zum Zweck der Düngemittelherstellung ist ausdrücklich mit dem KWK-Bonus kompatibel. Eine Negativliste der Anlage 3 sagt aus, dass Gebäude, die nicht von den Wärmeschutzvorschriften der EnEV betroffen sind, nicht als geeignete Wärmeverbraucher anerkannt werden. Auch die Wärmenutzung aus Biomasseanlagen, die zusätzlich fossile Brennstoffe einsetzen (z. B. für die Eigenbedarfsdeckung), stellt ein Ausschlusskriterium dar. Wie bereits in der ab 2004 geltenden Fassung des EEG, soll der Wärmeerzeugungsanteil, der der Eigenbedarfsdeckung dient, nicht als Beitrag zum KWK-Bonus gewertet werden.

Wärmenutzungskonzepte

Für neue Anlagen sollte sich der Biogasanlagenstandort zukünftig mehr an bestehende oder einzurichtende Wärmeabsatzmöglichkeiten orientieren. Vor allem Wärmegroßverbraucher oder Anknüpfungspunkte für vorhandene oder neue Wärmenetze stellen gut geeignete Fälle dar, wobei durchaus auch eine gewisse Distanz mittels Rohgasleitung überbrückt werden kann. Falls der externe Wärmenutzer sich nicht direkt neben der Biogasanlage befindet, würde i. d. R. ein kleines BHKW zur Eigenbedarfsdeckung und ein weiteres BHKW-Aggregat am Haupteinsatzort der erzeugten Wärme errichtet werden. Sobald ein gutes Wärmenutzungskonzept gefunden ist, wird es zudem wichtig, für einen optimalen Wärmehaushalt der gesamten Anlage zu sorgen. Dabei geht es darum, Anknüpfungspunkte für Wärmekaskaden auszunutzen, Auskühlung von Input- oder Outputströmen zu vermeiden und möglicherweise auch eine Wärmeharveste vorzusehen.

Aber bei dem überwiegenden Anlagenbestand muss mit dem abgelegenen Standort und der damit verbundenen Erschwernis für die Wärmenutzung Vorlieb genommen werden. Die Anordnung auf der Hofstelle war das wichtigere Kriterium bei der Planung des Standortes. Die Frage, ob es hierfür wirtschaftlich sinnvolle Wärmenutzungsoptionen gebe, ist daher von besonderer Bedeutung. Vor diesem Hintergrund hat das Bremer Energie Institut gemeinsam mit dem Institut für Umweltverfahrenstech-

nik der Universität Bremen mit finanzieller Unterstützung durch die Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe (FNR) eine umfassende Untersuchung angefertigt, in der viele Nutzungsoptionen einer Überprüfung unterzogen worden sind. Das Ergebnis kann als Handbuch in Verbindung mit einem umfassenden Materialienband von der Internetseite der FNR herunter geladen werden (Schulz et al., 2007).

Das Handbuch enthält jeweils Hinweise zur

- erforderlichen Technik,
 - Wirtschaftlichkeit,
 - Energiebilanz,
 - Kompatibilität mit dem landwirtschaftlichen Umfeld und
 - zum evtl. noch bestehende Entwicklungsbedarf
- in Abhängigkeit von
- der zur Verfügung stehenden Wärmeleistung und
 - der erforderlichen Wärmequalität.

Die Prämissen der betrachteten Wärmenutzungsoptionen sind:

- Sie sollen nicht nur saisonal/kurzzeitig Wärmebedarf aufweisen.
 - Sie sollen mit den Gegebenheiten eines landwirtschaftlichen Betriebes hinsichtlich
 - Infrastruktur
 - Personalbedarf, erforderliche Qualifikation
 - Saisonale Arbeitsabläufe
 - Image
- kompatibel sein.

- Sie dürfen mit keinem allzu hohen Investitionsvolumen verbunden sein, falls nur der Landwirt als Investor in Frage kommt.
- Die Qualität der Wärmenutzung sollte einen teilweise im EEG klar definierten Mindeststandard erfüllen.
- Sie dürfen aus baurechtlicher Sicht keine großen Schwierigkeiten aufwerfen.
- Sie sind oft von geeigneten Kooperationspartnern in der Region abhängig.

Die interessantesten Wärmenutzungen, die diese Ansprüche in etlichen Fällen erfüllen könnten, sind in der folgenden Tabelle zusammen gefasst.

Tab. 1: Geeignete Wärmenutzungsoptionen für abgelegene Biogasanlagenstandorte

Wärmenutzungsoption	besonders interessante Konzepte/Nutzungen
1. Trocknungsanlagen	<ul style="list-style-type: none"> - für viele Trockengüter einsetzbare Trockner (Bandtrockner, Schubwende-trockner, Satz-trockner*) - Holzpellets aus Grünschnitt** - Trocknung von jährlich mehrfach geernteten Kräutern
2. Gewächshausheizungen	<ul style="list-style-type: none"> - Gemüse und Zierpflanzen mit hohen Temperaturansprüchen
3. Aquakulturen	<ul style="list-style-type: none"> - Direktvermarktung von Fischen, die hohe Preise erzielen (aber ein erhebliches Know how erfordern)
4. Kälteerzeugung	<ul style="list-style-type: none"> - Kühllager für Temperaturen um 9 °C
5. ORC-Anlage als Kombiprozess zum Motor-BHKW	<ul style="list-style-type: none"> - generell gut machbar (aber bislang noch Pilotanlagenstadium)
6. Thermische Gärrestaufbereitung	<ul style="list-style-type: none"> - Thermische Aufkonzentrierung (eher nur für Gebiete, die Nährstoffüberschüsse aufweisen)
7. Wärmebereitstellung für Wäschereien	<ul style="list-style-type: none"> - generell gute Auslastung möglich
8. Frucht- und Gemüsesaftherstellung	<ul style="list-style-type: none"> - Streckung der Verarbeitungsperiode erforderlich
9. Milchveredelung	<ul style="list-style-type: none"> - Hofmolkereien mit hoher Verarbeitungskapazität

* Bei Satz-trocknern kann die Effizienz der Wärmenutzung ein Problem darstellen

** Landschaftspflegeholz etc.

Bei den Trocknungskonzepten führt die Streckung der Trocknungsperioden durch Verarbeitung vieler Trockengüter am ehesten zu einem tragfähigen Konzept. Bei dem Anschluss von Gewächshäusern geht es um sehr große Gewächshausflächen, weil die hohe Wärmeausnutzung nur gegeben ist, wenn die Wärme aus der Biogasanlage nur die Grundlast abdeckt.

Organic Rankine Cycle-Anlagen, bei denen aus der Abwärme eine zusätzliche Stromerzeugung bewirkt wird, könnten eine universell einsetzbare Option darstellen, insbesondere wenn es zu einem Angebot an kostengünstigeren Serienprodukten kommen würde. Hier ist aber zu beachten, dass laut EEG (Anlage 3 IV) für den Wärme-Input der ORC-Anlage kein KWK-Bonus vorgesehen ist. Dagegen ist für den Erzeugungsanteil der ORC-Anlage laut Anlage 1 II 1.e) ein Technologiebonus möglich, falls eine (geringe) zusätzliche Wärmenutzung erfolgt oder der Kombiprozess aus Motor und ORC einen Wirkungsgrad von mindestens 45 % erreicht. Die Grundvergütung sowie der NaWaRo-Bonus fallen zusätzlich auch für den ORC-Erzeugungsanteil an. Richtig interessant wird die Vergütungssituation der ORC-Anlage, falls ihr eine externe Wärmenutzung nachgeschaltet wird. Dann würde auch dieser Stromerzeugungsanteil in entsprechendem Maße mit einem KWK-Bonus bedacht werden. Die hier aufgeführten Grundsätze gelten auch für die spätere Nachschaltung einer ORC-Anlage an eine Bestandsanlage. Es ist grundsätzlich anzumerken, dass aufgrund der Konzeption des EEG, das ja die Forderungen des Anlagenbetreibers gegenüber denen des jeweiligen Stromverteilers regelt, keine absolute Rechtssicherheit der genannten Grundsätze besteht und dass es stets sinnvoll ist, die zu erwartenden Stromerlöse bereits im Vorfeld der Projekte mit dem Netzbetreiber abzuklären.

Für die Frucht- und Gemüsesaftherstellung ist es wichtig, sowohl kurzfristig zu verarbeitende als auch länger haltbare Rohprodukte, z. B. Gemüse, zu verarbeiten. Ansonsten können auch Kombinationen der aufgelisteten Wärmenutzungsoptionen zu der erwünschten hohen Auslastung des Wärmeangebots führen.

Folgende Wärmenutzungsoptionen haben sich aus unterschiedlichen Gründen als ungeeignet erwiesen:

1. Mobiler Kältetransport
2. Bioethanolherstellung
3. Wirkstoffextraktion aus Pflanzen
4. Herstellung bzw. Regeneration von Adsorbentien
5. Fertiggerichtherstellung
6. Wärmeeinsatz in Röstereien

In den meisten Fällen mangelt es an der Wirtschaftlichkeit, so dass ein weiterer Energiepreisanstieg die Zahl der interessanten Optionen zunehmen lassen würde. Bei der Fertiggerichtherstellung sind in erster Linie die

hohen Hygieneanforderungen als maßgebliche Restriktion zu betrachten. Die Bioethanolerzeugung könnte in diesem relativ kleinen Maßstab interessant werden, wenn sich der hohe Personalbedarf durch eine Automatisierung der Anlage vermindern ließe. Nur dann kann die landwirtschaftliche Brennerei gegenüber den großen Bioethanolfabriken, die die aktuelle Erzeugung prägen, rentabel sein.

Rangfolge der insgesamt bestehenden Nutzungsoptionen

Falls sich an einem Standort grundsätzlich alle Wärmenutzungsoptionen oder erweiterte energetische Nutzungen einrichten lassen, dann sollte im Allgemeinen folgende Rangfolge gelten:

1. Standortwahl in Abhängigkeit von der Wärmenutzung (Wärmegroßverbraucher oder Wärmenetz)
2. Fortleitung von schwach aufbereitetem Biogas zu einem großen Wärmeverbraucher
3. Wärmenutzungsmöglichkeiten am Standort der Biogasanlage schaffen
4. Aufbereitung zu Biomethan zwecks Einspeisung ins Gasnetz + virtueller Einsatz im externen BHKW
5. oder zwecks Nutzung als Treibstoff

Bei der Fortleitung von Rohgas lassen sich im ländlichen Raum oft sehr große Entfernungen zu akzeptablen Kosten überbrücken. Die Aufbereitung von Biogas zu Biomethan ermöglicht zwar zusätzliche Boni, ist jedoch erst bei Anlagenkapazitäten ab etwa $1,5 \text{ MW}_{el}$ interessant und stellt hohe Ansprüche an den Erdgasstrang, der als Einspeisepunkt dienen soll. Die Treibstoffnutzung kann aufgrund der fehlenden EEG-Vergütung nur interessant sein, wenn das Biogas sehr kostengünstig erzeugt wurde (z. B. Klärgas oder Deponiegas).

Die genannte Rangfolge kann sich durch einige Umstände des Einzelprojekts verändern. Dies wird in der folgenden Tabelle veranschaulicht. Die darin enthaltenen Pfeile deuten ein Absteigen oder Aufsteigen in der Rangfolge aufgrund der genannten Umstände hin.

Tab. 2: Rangfolge der grundsätzlichen Energienutzungskonzepte bei großen Biogasanlagen

Rang	Option	Einflüsse, die die Rangfolge verändern können
1	Standort optimiert	Erheblicher erf. Gülletransport, Geruchsproblematik ↓
2	Biogasfortleitung	Große Entfernung, schwierige Leitungsverlegung ↓
3	Dezentrale Energiedienstleistung	Zusätzliche Investitionen, beengte Platzverhältnisse, erf. Betreuung ↓
4	Biomethaneinspeisung	Hohe Erzeugungsleistung, geringe Entfernung zur Transportleitung ↑
5	Treibstoffherzeugung	Niedrige Gaserzeugungskosten (z. B. Klärgas) ↑

Literatur

- Schulz, W.; Heitmann, S.; Hartmann, D.; Jahn, K.; Manske, S.; Ehlers, B.; Peters Erjawetz, S.; Havran, T.; Risse, S.; Schnober, M.; Rübiger, N.; Schlüter, M.: Untersuchung zur Verwertung von Wärmeüberschüssen bei Biogasanlagen, Mai 2007, download unter www.fnr.de

Anschrift des Autors:

Wolfgang Schulz
 Bremer Energie Institut
 College Ring 2 (Research V), 28759 Bremen
 E-Mail: schulz@bremer-energie-institut.de

10.

**Kurzbeschreibungen
der Posterbeiträge**

Economic modeling of optimal sites for biogas plants

SFB 299-Transfer Unit 'Integrated Evaluation of Energy Crop Production' Poster 2

A. Plata, F. Kuhlmann
University Giessen

Abstract

Energy production from biomass can replace substantial amounts of fossil fuels. Biogas plants convert biomass to electricity and heat or bio-methane which is injected into natural gas pipelines. A plant's optimal location is of great importance, since fermentation materials are transport cost intensive. Increasing distance from field to plant negatively affects the profitability and the overall energy balance. Moreover, the outputs are bound to specific transport media, e. g. power lines or natural gas pipelines. Therefore, locating optimal sites for biogas plants is a complex task involving economic as well as environmental constraints and factors.

To solve this task, it is necessary to know where energy crops can be competitively grown. The competitiveness of energy crops will be calculated with the spatial explicit land use prognosis model "ProLand". Environmental factors like precipitation, temperature and soil on the one hand and economic factors like cultivation methods, fertilization, government aids and prices on the other, deliver crop yield and ground rent as outputs. Under the assumption that the farmers aim is to maximize profit, those crops producing the highest land rent are selected. This includes energy crops and therefore areas with high energy crop potential can be identified.

The next step is to locate optimal sites for biogas plants. This spatial problem can be solved by using geographic information systems (GIS). In GIS multiple data layers are manipulated in order to derive new information from the existing data. This so called multi-criteria analysis will be applied to locate optimal sites for biogas plants.

Altogether the model can serve as a decision support tool for governments, plant operators as well as land use planners. It may contribute to determine optimal sites for energy production from biomass. An optimal location raises the plant's overall efficiency, helps to save energy, and improves economic benefit.

Anschrift der Autoren:

*A. Plata, F. Kuhlmann
University Giessen
Institute of Agricultural and Food Systems Management
Senckenbergstr. 3, 35390 Gießen
E-Mail: adam.plata@agrar.uni-giessen.de*

Greenhouse Gas Emissions and Mitigation costs in two European Biogas Plants

Helmut Döhler, Anke Niebaum, Ursula Roth
Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V. (KTBL)

Thomas Amon
University of Natural Resources and Applied Life Sciences

Paolo Balsari
University of Torino

George Friedl
Technical University of Munich

Abstract

Within the framework of the EU STREP project EU-AGRO-BIOGAS the effect of various measures to improve the performance of biogas plants was assessed in terms of greenhouse gas emissions, the related mitigation costs as well as energy input. GHG emissions and energy input/output-relations before and after implementation of the respective measure on existing biogas plants were compared among one another in a first step and later on set in relationship to the energy needed and GHG emitted when producing the corresponding amount of electric energy (and heat) from fossil resources.

The calculation model follows the general approach of life cycle assessment according to the ISO 14040 series using life cycle inventory data by ecoinvent (Swiss Centre for Life Cycle Inventories). The complete anaerobic treatment and biogas conversion process is taken into account, from the construction of the plant itself to feedstock production/provision and plant operation and finally to the application of the fermentation residues.

Results presented here refer to two biogas plants in Austria (Steiermark) and northern Italy (Piemonte) with a connected power of approx. 1 MW each. Main feedstocks are energy crops and livestock manures. In the Austrian plant by-products from biodiesel production are used as well: initially only rapeseed cake in a small proportion, in the demonstration phase a large proportion of the energy crops was substituted by addition of glycerol. While in the Austrian biogas plant more than 60 % of the produced heat is fed into a long-distance heating grid, the Italian plant uses only about 22 % of the heat produced in an associated cheese factory.

Substitution of energy crops as main feedstock by glycerol in the Austrian biogas plant resulted in a reduction of GHG emissions by 53%. Compared to the production of electricity and heat from fossil resources biogas production with glycerol could save 85 % of GHG emissions. GHG mitigation cost were calculated to be 72 € per ton CO₂eq reduced.

Residual methane emitted during the storage of fermentation residues accounted for approx. 27 % of the total GHG emissions in the Italian demonstration plant. The newly installed foil cover not only significantly reduced GHG emissions, but also increased the plant's efficiency (the residual methane corresponding to about 3.6 % of the total methane production).

Keywords: Biogas, life cycle assessment, energy balance, greenhouse gas emissions, greenhouse gas mitigation costs, sustainability.

Anschriften der Autoren:

*Helmut Döhler, Dr. Anke Niebaum, Ursula Roth
Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V. (KTBL)
Bartningstr. 49, 64289 Darmstadt, Germany
E-Mail: h.doehler@ktbl.de*

*Ao. Univ. Prof. Dr. Thomas Amon
University of Natural Resources and Applied Life Sciences
Department of Sustainable Agricultural Systems
Peter-Jordan-Str. 82, A-1190 Vienna, Austria
E-Mail: thomas.amon@boku.ac.at*

Paolo Balsari

University of Torino

Department of Agriculture, Forestry, Environmental Engineering and Land Based Economics

Via Leonardo da Vinci 44, 10095 Grugliasco (TO), Italy

E-Mail: paolo.balsari@unito.it

George Friedl

Technical University of Munich

Institute of Agricultural Economics and Farm Management

Alte Akademie 14, 85354 Freising-Weihenstephan

E-Mail: georg-friedl@mytum.de

Vergärung von Zuckerrüben in Biogasanlagen – Lohnt sich das?

Stefan Hartmann, Helmut Döhler

Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V. (KTBL)

Ausgangslage und Ziel

Der bevorstehende Wegfall der Zuckermarktordnung wird eine Abnahme der Zuckerrübenanbauflächen verursachen, wenn nicht geeignete Nutzungsalternativen gefunden werden. Die Nutzung als Biogassubstrat könnte eine Alternative darstellen. Die Zuckerrübe erreicht mit ihrem Trockenmasseertrag und einem hohen spezifischen Gasertrag ähnlich hohe oder sogar höhere Methanhektarerträge als der Silomais. Zudem würde sie zur Auflockerung der Fruchtfolgen beitragen und auch wegen der späten Erntezeit Arbeitsspitzen brechen helfen. Nachteil der Nutzung ist der bei der Ernte nicht zu vermeidende Erdanhang sowie ein geringer TS-Gehalt, der die Silierung in herkömmlichen Flachsilos nur möglich macht, wenn die Rübe mit Mais co-siliert wird. Daher wird derzeit an der Entwicklung und Erprobung von alternativen Aufbereitungs- und Konservierungsmethoden gearbeitet.

Modellhafte Kalkulationen sollen die sensitiven Kostengrößen sowie die Datensicherheit aufzeigen und eine Einschätzung der Wettbewerbsfähigkeit der Energierübe für die Nutzung in Biogasanlagen ermöglichen.

Methodik

Die aktuell verfügbaren Daten zum Einsatz von Zuckerrüben wurden ausgewertet und auf dieser Grundlage ein Berechnungsmodell erstellt. Betrachtet werden Rübenwäsche, Zerkleinerungstechnik, Flüssig- und Schlauchsilierung sowie an die Konservierungsmethode angepasste Einbringtechnik.

Ergebnisse

Unter optimalen Voraussetzungen kann die Zuckerrübe eine ökonomische Alternative zur Nutzung von Silomais als Gärsubstrat darstellen. Die Flüssigsilierung ist dann rentabel, wenn die Biomasse kostengünstig bereitgestellt wird und die Investitionskosten für den Lagerraum niedrig gehalten werden können. Die Automatisierbarkeit der Einbringung in die Biogasanlage ist ein wesentlicher Vorteil dieses Systems. Entscheidend ist, ob für die Praxis eine zur bestehenden Rübenlogistik passende Verfahrenskette zur Aufbereitung und Einlagerung bereitgestellt werden kann. Die Schlauchsilierung verursacht höhere Kosten. Hier fehlt es vor allem noch an der geeigneten, schlagkräftigen Technik zur Entnahme und Einbringung in die Biogasanlage.

Anschrift der Autoren:

*Stefan Hartmann, Helmut Döhler
Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V. (KTBL)
Bartningstr. 49, 64289 Darmstadt
E-Mail: s.hartmann@ktbl.de*

Strategien zur optimierten Einfahrphase batchbetriebener Feststoffvergärungsprozesse

*Eckhard Kraft, Stefan Sebök
Bauhaus Universität Weimar*

Um dem stetig steigenden Energiebedarf einer wachsenden Bevölkerung nachzukommen, wird in erhöhtem Maße auf den Einsatz von erneuerbaren Energiequellen zurückgegriffen. Dabei gilt neben der Nassvergärung insbesondere der Trockenfermentation ein zunehmendes Interesse, da diese in der Lage ist, stapelbare, nicht pumpfähige Substrate mit einem Trockenstoffgehalt von über 15 % zu verarbeiten. Hierin liegt ihre Einsatzfähigkeit bei der Energiegewinnung aus nachwachsenden Rohstoffen (NAWARO) begründet. Trotz der hohen Energieausbeute der Trockenfermentation weist diese bezüglich des Anfahrbetriebes deutliche Defizite im Vergleich zur Nassvergärung auf, sodass hierin Forschungsbedarf besteht.

Ursache für diese Situation ist unter anderem das Fehlen von Handlungsanweisungen für die initiale Phase des Vergärungsprozesses, die ein effizientes und ökonomisch vertretbares Einfahren ermöglichen könnten. Die heutigen in der Landwirtschaft genutzten Ansätze zum Anfahren der Fermenter basieren größtenteils auf ungenügenden Informationen sowie heuristischen und demzufolge nur bedingt validierten Methoden und Strategien. Daraus folgt, dass ausschließlich die Erfahrungen über das Gelingen oder Scheitern des Gesamtprozesses entscheidet. Ein derartiger Zustand bedingt verständlicherweise eine nur schleppende Etablierung der Trockenfermentationstechnologie.

Innerhalb des Projektes soll es somit die übergeordnete Motivation sein, die Entwicklung allgemeingültiger Handlungsanweisungen für die Inbetriebnahme einer batchbetriebenen Trockenfermentationsanlage mit wechselnden Substraten voranzutreiben. Zu diesem Zweck wird eine Charakterisierung der Impfmateriale durchgeführt, gefolgt von der Selektion des Materials, welches hohe Leistungsfähigkeit mit größtmöglicher

Resilienz verbindet. Aufbauend auf diesen Daten soll das in einer Trockenfermentation verwendete Verhältnis von Substrat und Impfmateriale optimiert werden. Zusätzlich wird die Perkolation als Methode zur Reduzierung des Impfmaterialebedarfs untersucht. Damit zielt das Projekt auf eine höhere ökonomische Rentabilität und eine verbesserte Positionierung der Trockenvergärung gegenüber der Nassvergärung ab.

Zum gegenwärtigen Zeitpunkt findet die Charakterisierung und qualitative Bewertung der potentiellen Substrate und Impfmateriale statt, die in drei verschiedenen Testphasen verläuft. In der ersten Phase findet die Untersuchung von 4 Impfmateriale statt, deren Auswahl unter den Gesichtspunkten eines möglichst breiten Spektrums verschiedenster Eigenschaften und gleichzeitig eines hohen Grads an Verfügbarkeit getroffen wurde. Der Fokus liegt hierbei auf der Beurteilung der Leistungsfähigkeit bezüglich des Abbaus eines Substrates.

Tägliche Messungen der Gasmenge sowie eine stete Analyse der Zusammensetzung des entstehenden Biogases erfolgen über einen Versuchszeitraum von 30 Tagen. Die bisherigen Untersuchungen zeigen, dass Gärrest A in Bezug auf Abbauleistung und Stabilität das geeignetste Material darstellt. Hingegen ist bei einer Bewertung der Impfmateriale unter dem Fokus der Aktivität der methanogenen Phase der Rinderfestmist führend. Die hohe Varianz der Untersuchungsergebnisse lässt bisher lediglich eine unscharfe Aussage über das leistungsstärkste und gleichzeitig adaptivste Impfmateriale zu.

Mit finanzieller Unterstützung des BMELV über die Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. (FNR).

Anschrift der Autoren:

*Prof. Dr.-Ing. Eckhard Kraft, Stefan Seböck
Bauhaus Universität Weimar
Coudraystr. 7, 99423 Weimar
E-Mail: stefan.seboek@uni-weimar.de*

Übertragung eines Regelalgorithmus zur Prozessstabilität auf großtechnische Anlagen

Eckhard Kraft, Laura Weitze, Thomas Haupt
Bauhaus Universität Weimar

Die Subventionierung der Erzeugung von Energie aus erneuerbaren Ressourcen hat seit Mitte der 90iger Jahre zu stetig steigenden Anlagenzahlen auf dem Sektor der Methanherzeugung aus organischen Reststoffen geführt. Die vor allem im landwirtschaftlichen Bereich entstanden Biogasanlagen sind durch einfache Bauweise und minimalen technischen Aufwand gekennzeichnet.

Der großtechnische Fermentationsprozess unterliegt betriebsbedingt unvermeidlichen Störungen, die zu einer Abweichung vom optimalen, stationären Prozesszustand führen. Die Folge sind reduzierte Stoffwechselraten, die einen wirtschaftlichen Verlust bedeuten. Im schlimmsten Fall tritt eine irreversible Störung vieler Stoffwechselaktivitäten auf.

Der Betrieb auf vielen Anlagen ist durch einen Mangel an geeigneter Messtechnik, Methoden zur Prozessüberwachung und Regelung gekennzeichnet. Die Folge ist die ineffiziente Auslastung der vorhandenen Kapazitäten. Für eine anwendbare Prozessbewertung und Regelung fehlte es bisher an einer eindeutigen Zuordnung von relevanten Störungen der zugehörigen Prozessbeschreibung und den für die Bewertung notwendigen Messgrößen.

Zielsetzung dieses Projektes ist die praktische Anwendung eines an der BUW entwickelten Regelalgorithmus. Die im Labor bereits erfolgreich getestete Regelung soll unter den Bedingungen zweier großtechnischer Anlagen evaluiert werden. Die Entwicklung einer praxistauglichen Regelung für Vergärungsanlagen am Beispiel des Parallelbetriebes von Technikums- und Praxisanlage im Nassvergärungsverfahren wird angestrebt. Der Regelungsbereich wird im Technikumsmaßstab durch diverse Variationen erweitert. Störungen im Bereich der Kohlenstoffbelas-

tung, der Durchflussrate sowie wechselnder Substrate werden untersucht. Das Ergebnis der Reglernutzung stellt eine stabile und gesteigerte Auslastung vorhandener Kapazitäten und damit einen direkten monetären Gewinn für den Anlagenbetreiber dar.

Zum gegenwärtigen Zeitpunkt werden Prozessstörungen infolge einer Kohlenstoffhöhung initiiert. Hierbei wird in Stoß- und Stufenbelastung unterschieden. Die ermittelten Parameter ermöglichen die genaue Identifizierung der Prozessantwort, welche als Grundlage für die Regelung dient. Bauhaus Universität Weimar Juniorprofessur Biotechnologie in der Abfallwirtschaft.

Mit finanzieller Unterstützung des BMELV über die Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR).

Anschrift der Autoren:

*Prof. Dr.-Ing. Eckhard Kraft, Laura Weitze, Thomas Haupt
Bauhaus Universität Weimar
Coudraystr. 7, 99423 Weimar
E-Mail: laura.weitze@uni-weimar.de*

Effizienzerhöhung von Biogasanlagen durch den Einsatz von hydrolytischen Enzymen

Matthias Gerhardt, Robert van den Heuvel
DSM Biopract GmbH

Die größten Reserven beim Betrieb einer Biogasanlage bestehen in der effektiveren Nutzung des energetischen Potenzials der Einsatzstoffe und der Gewährleistung eines biologisch stabilen und beschleunigten Prozesses. Der Einsatz geeigneter Betriebshilfsmittel (Enzyme, Spurennährstoffe) bildet dafür eine wesentliche Grundlage.

Im Zentrum des Beitrages steht der Einsatz eines Enzympräparates zur Beschleunigung des Abbaus von Nicht-Stärke-Polysacchariden (NSP).

Nachwachsende Rohstoffe wie Maissilage, Grassilage, GPS u. a. Silagen bestehen etwa zur Hälfte aus NSP. In der Biogasanlage müssen diese Faserstoffe zu niedermolekularen Intermediaten aufgespaltet werden, um für die weiteren Schritte des Gärprozesses verfügbar zu sein. Diese Spaltung ist aufgrund der molekularen Struktur der Faserstoffe besonders langsam und limitiert die Substratumsetzung zu Methan. Darüber hinaus sind NSP

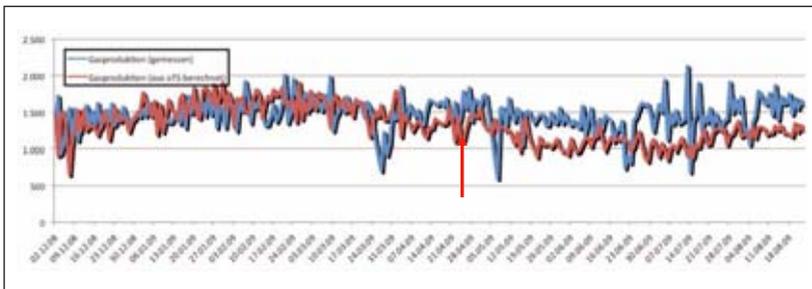


Abb. 1: 30 %ige Leistungssteigerung am Beispiel der Gasausbeute einer 150 kW-Biogasanlage (Rindergülle, Maissilage, Rasenschnitt. Pfeil: Start 100 ppm Enzymzugabe)

maßgeblich für die Viskosität des Fermenterinhalt verantwortlich, erschweren die mechanische Homogenisierung und begrenzen die möglichen TS-Gehalte im Fermenter.

Mit dem Zusatz von NSP-spaltenden Enzymen ist es möglich, diese negativen Einflüsse zu reduzieren. So lassen sich die Gaserträge steigern und die Viskositäten im Fermenter verringern. Die Gesamtproduktivität wird erhöht, der Eigenstrombedarf gesenkt und zugleich die Prozessstabilität verbessert. Weiter verringert sich durch den beschleunigten Abbau der Substrate im Fermenter das Restgaspotenzial des Gärrückstandes, so dass die Methanemission im Endlager reduziert wird.

Der Einsatz von hydrolytischen Enzymen in der Biogasanlage ist ohne zusätzliche Investitionen sofort möglich. Diese Aussagen werden durch Ergebnisse aus Laboruntersuchungen und der Praxis belegt und mit einer Kostenbetrachtung abgerundet (siehe Abbildung 1 und 2).

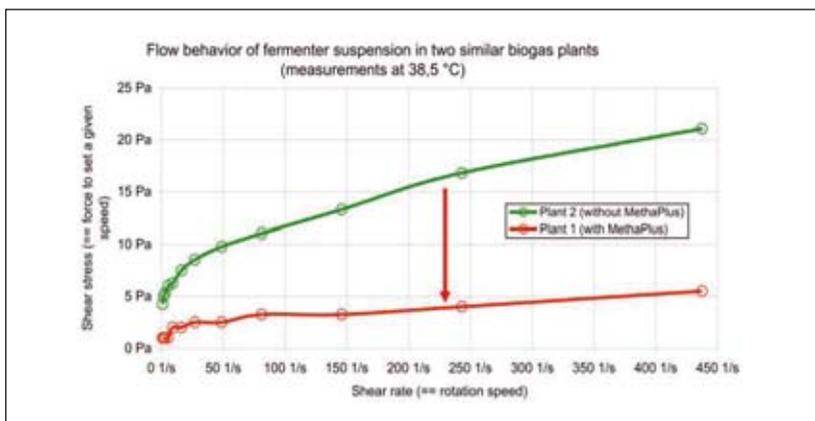


Abb. 2: Viskositätsdifferenzen am Beispiel zweier 500 kW Biogasanlagen (je 34 % Rindermist oTS, mechanischer Voraufschluss)

Anschrift der Autoren:

*Dr.-Ing. Matthias Gerhardt, Robert van den Heuvel
 DSM Biopract GmbH
 Magnusstr. 11, 12489 Berlin
 E-Mail: info@biopract.de*

Grünroggen als Substrat für die Biogasproduktion

*Ewald Sticksel, Alois Aigner, Georg Salzeder, Joachim Eder
Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL)*

Mit „Grünroggen“ oder „Grünschnittroggen“ werden Roggensorten bezeichnet, die sich besonders für den Winterzwischenfruchtanbau eignen. Der sprunghafte Anstieg der Vermehrungsflächen auf gut 1.700 ha in 2009 belegt die Anbaubedeutung des Grünroggens. Die ertragreiche und -stabile Winterzwischenfrucht ist wegen der frühen Erntereife zu Anfang Mai eine günstige Vorfrucht für den Mais oder andere Zweitfrüchte in Biogasfruchtfolgen.

Nach der Winterruhe benötigt Grünroggen lediglich 50 bis 65 Tage zum Erreichen der Erntereife (BBCH 55). Unter bayerischen Anbaubedingungen findet die Ernte in der ersten Maiwoche statt. Zu diesem Termin erreicht Grünroggen in Versuchen der Bayerischen Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL) einen mittleren Trockenmasseertrag von 76 dt ha⁻¹ (Tabelle 1). Zeitgleich liegen herkömmliche Sorten in der Entwicklung um rund fünf Tage zurück, was einem Ertragsnachteil von etwa 10 dt ha⁻¹ Trockenmasse entspricht. Wenn also eine frühe Ernte vorgesehen ist, sind trotz des hohen Saatgutpreises Grünroggensorten eindeutig im Vorteil. Die Trockensubstanzgehalte liegen in diesem Entwicklungsstadium bei rund 17 %, so dass unbedingt angelwalkt werden muss. Die Methanausbeute von Grünroggen erreicht die gleiche Größenordnung wie Mais oder Getreide-GPS (rd. 360 Nl CH₄ (kg oTM)⁻¹).

Durch die Vornutzung verzögert sich die Aussaat des nachfolgenden Mais. Unter bayerischen Anbaubedingungen sind mindesten zwei Wochen Verzug anzusetzen. Der Einfluss der Saatzeitverschiebung auf den Maisertrag ist in Tabelle 1 dargestellt. Mais ohne Vornutzung erreichte im Mittel 249 dt ha⁻¹, nach Grünroggen wurden noch 201 dt ha⁻¹ geerntet. Wegen der Saatzeitverschiebung müssen Maissorten mit niedriger Reifezahl und entsprechend geringerem Ertragspotential angebaut werden. Aber

auch der Wasserverbrauch der Grünroggenvorfrucht erweist sich auf Standorten mit geringem Wasserspeichervermögen und/oder wenig Niederschlägen in der Vegetationszeit des Mais als nachteilig. So wurden die stärksten Ertragseinbußen auf dem Standort Ansbach gemessen, wo regelmäßig auftretende Sommertrockenheit den Ertrag begrenzt.

Tab. 1: Trockenmasseerträge ($dt\ ha^{-1}$)¹ von Grünroggen (Ernte im BBCH 55) und Silomais mit bzw. Silomais ohne Grünroggenvorfrucht

	Ackerzahl	Grünroggen- ertrag	Silomaisertrag	
			ohne	mit (relativ)
			Grünroggenvorfrucht	
Freising (2007 – 08)	58	79	283	253 (89)
Straubing (2008)	72	70	286	235 (82)
Ansbach (2007 – 08)	33	72	221	146 (66)
Erding (2004 – 06) ²	80	83	204	169 (83)
Mittel		76	249	201 (80)

¹ die dargestellten Erträge wurden im Parzellenversuch ermittelt

² Daten: Barbara Eder, Dissertation 2009

Der Anbau von Grünroggen bringt positive Effekte (Schutz vor Nährstoffauswaschung und Erosion, pflanzenbaulich sinnvolle Gärrestausbringung), so dass auf günstigen Standorten die Kombination Grünroggen plus Mais den Mehraufwand gegenüber alleinigem Maisanbau durchaus rechtfertigen kann.

Anschrift der Autoren

*Dr. Ewald Sticksel, Alois Aigner, Georg Salzeder, Dr. Joachim Eder
Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL)
Institut für Pflanzenbau und Pflanzenzüchtung
Am Gereuth 4, 85354 Freising
E-Mail: Ewald.sticksel@lfl.bayern.de*

Veränderte Energiebilanzen bei reduziertem Produktionsmitteleinsatz im Energiepflanzenanbau

*Kathrin Deiglmayr, Franz Heimler, Maendy Fritz
Technologie- und Förderzentrum (TFZ)*

*Matthias Willms
Leibniz-Zentrum für Agrarlandschaftsforschung (ZALF) e.V.*

Bei der Produktion von Biogassubstraten liegt die optimale Produktionsintensität aufgrund der veränderten Nutzungsziele möglicherweise niedriger als im Nahrungs- oder Futtermittelbereich. In einem Satellitenversuch des Verbundvorhabens „Standortangepasste Anbausysteme für Energiepflanzen“ sollte deswegen geprüft werden, inwieweit sich durch extensive Anbauverfahren die Nettoenergie-Erträge erhöhen. Dazu wurde in drei ausgewählten Fruchtfolgen die Produktionsintensität variiert. Im Vergleich zur standortüblichen optimalen Produktionsintensität wurde in Minimierungsvariante 1 die Stickstoffdüngung um 30 kg ha^{-1} je Kultur reduziert. In Minimierungsvariante 2 wurde zusätzlich zur Stickstoffreduktion auf Pflanzenschutzmaßnahmen verzichtet.

Um die Auswirkungen des reduzierten Produktionsmitteleinsatzes auf die Energiebilanz zu untersuchen, wurde der Energie-Output der betrachteten Produktionssysteme als Ertrag der elektrischen Nutzenergie aus der Biogasproduktion bei einem elektrischen Wirkungsgrad von 30 % berechnet. Den Minimierungsvarianten wurde der geringere Energieaufwand gutgeschrieben.

Durch die Reduktion der Stickstoffgabe um 30 kg ha^{-1} ergab sich eine Einsparung im Energie-Input von 1236 MJ ha^{-1} für Düngemittelproduktion und -transport. Insbesondere bei den Ganzpflanzengetreiden, die auf die reduzierte Stickstoffdüngung meist mit deutlichen Ertragseinbußen reagierten, wurden jedoch entsprechend niedrigere Energie-Erträge erzielt. Damit lagen die Nettoenergie-Erträge in der Standardvariante im Allge-

meinen höher als in den Minimierungsvarianten. Bei Energiemais und Körnermais wurden im Gegensatz zu Silomais keine Ertragseinbußen in der Minimierungsvariante 1 beobachtet, so dass hier bei geeigneter Sortenwahl eine verringerte Düngeintensität die Energiebilanz verbessern kann.

Der Verzicht auf Pflanzenschutz führte abhängig vom Herbizidaufwand zu Energie-Einsparungen von 113 bis 1246 MJ ha⁻¹. Bei Mais wurden jedoch bei fehlender Unkrautkontrolle im Allgemeinen sehr deutliche Mindererträge beobachtet, so dass sich die Energiebilanz im Vergleich zur optimal geführten Variante gravierend verschlechterte. Hier ist ein Pflanzenschutzmittel-Einsatz aus energetischer Sicht äußerst effektiv, da mit geringem Energieaufwand ein hoher Mehrertrag gesichert werden kann. Im Gegensatz dazu zeigte Ganzpflanzengetreide nur sehr geringe Ertragseinbußen beim Verzicht auf Pflanzenschutz. Damit konnten im Mittel die geringeren Energie-Erträge durch die Einsparungen im Energie-Input ausgeglichen werden.

Anschriften der Autoren:

*Kathrin Deiglmayr, Franz Heimler, Dr. Maendy Fritz
Technologie- und Förderzentrum (TFZ) im Kompetenzzentrum
für Nachwachsende Rohstoffe
Schulgasse 18, 94315 Straubing
E-Mail: kathrin.deiglmayr@tfz.bayern.de*

*Dr. Matthias Willms
Leibniz-Zentrum für Agrarlandschaftsforschung (ZALF) e.V.
Eberswalderstr. 84, 15374 Müncheberg
E-Mail: willms@zalf.de*

Integrated evaluation of biogas production at the landscape scale

SFB 299-Transfer Unit 'Integrated Evaluation of Energy Crop Production' Poster 1

M. Bach, H.-G. Frede, S. Julich

University Giessen, Institute of Resources Management

S. Gäth, B. Hundt

University Giessen, Institute of Waste Management and Environmental Research

O. Ginzler, A. Otte, R. Waldhardt

University Giessen, Institute of Landscape Ecology and Landscape Planning

F. Kuhlmann, A. Plata

University Giessen, Institute of Agribusiness Management

Abstract

The main aims of the project are (a) to economically evaluate potential sites for biogas plants in the agricultural landscape of Southern Hesse (Germany)(ref. abstract Plata & Kuhlmann), (b) to evaluate potential effects of construction and operation of biogas plants on landscape multifunctionality, considering economic and ecological consequences of energy crop production in the study region.

The study region covers an area of 1780 square kilometres, comprising various biogeographical units and thus high variance in e. g., climate, soil and land use. Based on the spatially explicit model network ITE²M (Integrated Tool for Economic and Ecological Modelling) that was successfully developed in the SFB 299 'Land use Options for Peripheral Regions' between 1997 and 2008 and has been adapted to the challenges of the ongoing SFB 299-Transfer Unit (2007 – 2010), multiple aspects of landscape multifunctionality have been considered. Research outcomes will allow

for science based decisions on the optimal location of biogas plants in the study region and profound ex-ante evaluation of trade-offs between economy and environment.

In a series of four posters, the members of the Joint Research Project SFB 299-Transfer Unit 'Integrated Evaluation of Energy Crop production' at Giessen University present the challenges, project region, methodology, and first results of applied interdisciplinary research on the implementation of biogas plants, and both economic and ecological effects resulting from energy crop production. The spatial focus of the project that has been funded by the German Research Foundation (DFG) and cofunded by HEAG Südthessische Energie AG (HSE) is on the local to the landscape scale.

- [¹] Frede, H. G., Bach M.; Fohrer N.; Breuer L. (2002): Interdisciplinary modeling and the significance of soil functions. *J. Plant Nutr. Soil Sci.* 165(4), 460 – 467.
[²] Frede, H. G., Bach, M. (2002): Multifunctionality of land use as part of the SFB 299. *Berichte Landwirtschaft* 80, 3, 325 – 326.

Anschriften der Autoren:

*M. Bach, H.-G. Frede, S. Julich
University Giessen
Institute of Resources Management
Heinrich-Buff-Ring 26, 35392 Gießen, Germany
E-Mail: martin.bach@umwelt.uni-giessen.de*

*S. Gäth, B. Hundt
University Giessen
Institute of Waste Management and Environmental Research
Heinrich-Buff-Ring 26, 35392 Gießen, Germany
E-Mail: baerbel.hundt@umwelt.uni-giessen.de
O. Ginzler, A. Otte, R. Waldhardt
University Giessen
Institute of Landscape Ecology and Landscape Planning
Heinrich-Buff-Ring 26, 35392 Gießen, Germany*

E-Mail: oliver.ginzler@umwelt.uni-giessen.de

F. Kuhlmann, A. Plata

University Giessen

Institute of Agribusiness Management

Senckenbergstr. 3, 35390 Gießen, Germany

E-Mail: adam.plata@agrار.uni-giessen.de

Modelling multiscale effects of energy crop production on phytodiversity

SFB 299-Transfer Unit 'Integrated Evaluation of Energy Crop Production' Poster 3

O. Ginzler, A. Otte, R. Waldhardt
University Giessen

Abstract

In the frame of the ongoing SFB 299-Transfer Unit 'Integrated Evaluation of Energy Crop production' and based on the modelling approach ProF^[1,2], potential effects of energy crop production on phytodiversity are modelled at the patch to the landscape scale. Within the study region 'Southern Hesse', our spatially explicit modelling refers to surroundings of 'optimal sites' for 500 kW biogas plants (cf. abstract Plata & Kuhlmann). Circular areas of 10 km radius around a proposed biogas plant are taken into account. In these 314 km² areas, changes in phytodiversity might result from changes in cropping systems (e. g., increase of maize production) in the context of the operation of biogas plants.

Today's landscape structure of each circular area is analysed in a GIS, focussing on the spatial pattern of arable cropping systems. Patch data on the relative occurrence frequency of the plant species developing in a certain cropping system are derived from field surveys. The GIS data and the data on species frequencies are considered to estimate today's species' occurrence probabilities and total species richness of the arable land at the landscape scale, represented by increasingly larger sub-areas of the analysed 314 km² areas. In an analogous way, estimations on landscape phytodiversity refer to scenarios of future landscape structure that reflect the quality and amount of biomass needed for the operation of the proposed biogas plants. Effects of energy crop production on phytodiversity are quantified by comparison of results with respect to today's and simulated landscape structure.

- [1] Sheridan P., Waldhardt R., 2006. Spatially explicit approaches in integrated land use and phytodiversity modelling at multiple scales. *Alterra Rep.* 1338: 68 – 72.
- [2] Otte A., Reger B., Simmering D., Waldhardt R., 2008. Prognose der Veränderungen von Phytodiversität in Agrarlandschaften. *Ber. Reinh.-Tüxen-Ges.* 20: 67 – 89.

Anschrift der Autoren:

*O. Ginzler, A. Otte, R. Waldhardt
University Gießen
Institute of Landscape Ecology and Landscape Planning
Heinrich-Buff-Ring 26, 35392 Gießen, Germany
E-Mail oliver.ginzler@umwelt.uni-giessen.de*

Energy balances and greenhouse gas saving potential of energy crop production

SFB 299-Transfer Unit 'Integrated Evaluation of Energy Crop Production' Poster 4

*B. Hundt, St. Gäth
University Gießen*

Abstract

Aim of the current study is to determine the energy balances and the greenhouse gas saving potentials of various energy crop production systems in the project region of Southern Hesse. Energy balances will be calculated for several land use scenarios preliminarily developed by the model ProLand. Comparison of the different cropping systems and conversion pathways shall reveal the most suitable system regarding net energy gains and greenhouse gas savings under the given local characteristics like yield potentials and distances to conversion plants.

The energy consumption of the following input parameters will be considered in the balances: fuel demand for field operations and yield transports, fertilizer demand and application of pesticides. By means of KTBL data base two equations per cropping system are developed to determine the fuel demand as a function of field size, distance to the conversion plant, yield potential and soil tillage resistance. Fertilizer demand is calculated on the basis of nutrient withdrawal by crop harvest. The amount of pesticides application is derived from typical application schemes for the situation at Southern Hesse. The required data is provided in a relational data base linked to the model ProLand. The Model ProLand provides the input parameters like yield potentials, field sizes, soil tillage resistances and distances between fields and conversion plants; the latter are calculated by means of ArcGIS Network Analyst.

Anschrift der Autoren:

B. Hundt, St. Gäth

University Gießen

Institute of Waste Management and Environmental Research

Heinrich-Buff-Ring 26, 35392 Gießen, Germany

E-Mail: baerbel.hundt@umwelt.uni-giessen.de

Nachhaltige Nutzung von Bioenergie im Spannungsfeld von Klimaschutz, Landschaft und Gesellschaft

Jens Ibendorf

Georg-August-Universität Göttingen

Vor dem Hintergrund der Klimaveränderungen, der Begrenztheit der fossilen Energieressourcen und der Abhängigkeiten von wenigen Energielieferanten, der Probleme in der Landwirtschaft sowie infrastruktureller Veränderungen in Dörfern allgemein müssen neue, sozial akzeptierte, ökologisch und ökonomisch zuträgliche Energiekonzepte erarbeitet werden, die auch künftigen Generationen faire Lebenschancen garantieren.

Die Abkehr von fossilen Energieträgern zu regenerativen Energien ist dabei ein wichtiger Bestandteil zukunftsfähiger Konzepte. Hohe Erwartungen werden hierbei vor allem an die energetische Nutzung von Biomasse geknüpft, da Biomasse sowohl in Strom, Wärme, Kälte und Kraftstoffe transformiert werden kann. Im Rahmen des Projektes „Nachhaltige Nutzung von Energie aus Biomasse im Spannungsfeld von Klimaschutz, Landschaft und Gesellschaft“ wird der Ausbau der Bioenergie aus dem Blickwinkel der Nachhaltigkeit betrachtet. Dabei sollen die vertieften theoretischen Grundlagen einer nachhaltigen Nutzung von Energie aus Biomasse in der Praxis implementiert werden.

Einzelne Biomassenutzungskonzepte sollen in Bezug auf ihre Wirkung auf eine nachhaltige Entwicklung miteinander verglichen und übertragbare Konzepte und Leitlinien zur optimalen Biomasseerzeugung und -nutzung entwickelt werden. Weiterhin sollen die Umsetzungschancen nachhaltiger Biomassenutzung auf betrieblicher und regionaler Ebene verbessert werden, indem integrative Anbaukonzepte im Dialog mit allen Akteuren die Akzeptanz und Umsetzungschancen verbessern sollen. Unterschiedliche Arten der Vertragsgestaltung zwischen Bioenergieproduzenten und landwirtschaftlichen Lieferanten werden mit ihren Vor- und Nachteilen erforscht.

Begleitend finden Erhebungen zur Akzeptanz, zu Erfolgsfaktoren und zu Hemmnissen unterschiedlicher Biomassenutzungskonzepte bei der Bevölkerung und den Landwirten statt. Es werden die Bedingungen und Auswirkungen der Energiepflanzengewinnung auf kontaminierten Standorten sowie die Schadstoffemissionen bei der Wärmegewinnung aus Stroh und Holz erforscht, um auch deren Potenziale für bioenergetische Konzepte einzuschätzen. Zusätzlich wird an der Modellierung und Optimierung des Produktions- und Distributionssystems für Bioenergie-dörfer gearbeitet.

Darüber hinaus werden im Forschungsvorhaben Empfehlungen zu Möglichkeiten der Umsetzung dieser Leitlinien in die landwirtschaftliche Praxis erarbeitet. Das wichtigste Merkmal der vorgeschlagenen Aktionsforschung besteht darin, dass neben der Prüfung theoretischer Annahmen gleichzeitig verändernd in soziale Zusammenhänge eingegriffen wird. Konkret sollen mit Hilfe dieses Forschungsdesigns in ca. drei Landkreisen Niedersachsens weitere Bioenergieprojekte unterstützt oder angestoßen werden, indem Akteure vor Ort in Planungswerkstätten oder Workshops an den Konzeptionen beteiligt werden.

Anschrift des Autors:

*Jens Ibendorf
Georg-August-Universität Göttingen
Goldschmidtstr. 1, 37077 Göttingen
E-Mail: jibendorf@gwdg.de*

Auswirkungen der Biogasproduktion auf Agrarstruktur und Gewässerschutz am Beispiel Niedersachsens

Andrea Rothe

Johann Heinrich von Thünen-Institut (vTI)

Neben positiven Aspekten der Energieerzeugung aus Biomasse treten auch deren negative ökonomische und ökologische Begleiterscheinungen verstärkt in den Vordergrund. So werden die Klimateffizienz einzelner Bioenergielinien, die energiepflanzeninterne Konkurrenz um Förderungen und Märkte und die zunehmenden Flächennutzungskonkurrenzen (Nahrungs-, Futtermittel- und Energiepflanzenproduktion, Natur- und Umweltschutz) diskutiert. Im Fokus dieses Forschungsvorhabens^[1] sollen agrarstrukturelle Aspekte und gewässerschutzrelevante Auswirkungen der expandierenden Biogasproduktion am Beispiel Niedersachsens stehen. Dabei sollen die Standorte von Biogasanlagen identifiziert und deren Einfluss auf die Flächennutzung und Gewässer in den verschiedenen Regionen Niedersachsens analysiert werden.

Für die agrarstrukturelle Analyse der Biogasproduktion und deren gewässerwirksamen Folgen sind Daten erforderlich, welche möglichst detaillierte und standortspezifische Informationen liefern, da der Einfluss einer Biogasanlage angesichts der geringen Transportwürdigkeit der Substrate räumlich begrenzt ist. Hinsichtlich der Datenbasis sind daher zunächst Kenntnisse zu den Standorten, Art der Anlage (NawaRo, Abfall...), Jahr der Inbetriebnahme, installierter elektrische Leistung und Substrateinsatz notwendig. Diese wurden für den Stand Ende 2007 vom Ministerium für Landwirtschaft Niedersachsens und dem Deutschen Biomasseforschungszentrum zur Verfügung gestellt. Mit Hilfe der Standortinformationen werden anschließend die Anlagen in einem Geoinformationssystem (GIS) verortet. Das GIS liefert darüber hinaus naturräumliche Informationen über Boden- und Klimaverhältnisse und die Flächennutzungskategorien. Durch die Verschneidung mit Angaben über Schutzge-

biete können außerdem mögliche Konfliktpotenziale abgeleitet werden. Des Weiteren sollen Untersuchungen der Flächennutzung und -nutzungsänderungen auf Basis von Daten des Integrierten Verwaltungs- und Kontrollsystems (InVeKoS) durchgeführt werden. Es liegen InVeKos-Daten für die Jahre 2005 und 2007 vor, welche nach landwirtschaftlichen Produktionsverfahren differenzierte, räumlich explizite Informationen enthalten. Darüber hinaus können hierdurch Aussagen zu den durchschnittlichen Transportentfernungen und -kosten für die Bereitstellung von Gärsubstraten abgeleitet werden.

- [1] Projekt 1: WAgriCo 2 „Water Resources Management in Cooperation with Agriculture“, Finanzierung: MU Niedersachsen
Projekt 2: „Modellgestützte Folgenabschätzungen für den Anbau nachwachsender Rohstoffe in Deutschland“. Finanzierung: Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe (FNR)

Anschrift des Autors:

*Andrea Rothe
Johann Heinrich von Thünen-Institut (vTI)
Institut für Ländliche Räume
Bundesallee 50, 38116 Braunschweig
E-Mail: andrea.rothe@vti.bund.de*

Konservierung von Zuckerrüben im Folienschlauch zur Biogasproduktion

*A. Wagner, U. Weber, G. Weber, M. Scholtissek
BAG Budissa Agroservice GmbH*

*H. Auerbach
ADDCON EUROPE GmbH*

*F. Weissbach
Freischaffender Firmenberater*

Zuckerrüben werden zunehmend als Substrat für die Biogasproduktion diskutiert. Vorteilhaft ist ihr hoher TS-Ertrag je ha und die hohe Gasausbeute je kg TS. Nachteilig ist ihre begrenzte Lagerfähigkeit. Ziel dieser Studie war es, die Möglichkeiten zur Konservierung von Zuckerrüben durch Silierung im Folienschlauch zu untersuchen.

Dazu wurden erste Versuche zur Lagerung unzerkleinerter Zuckerrüben unter Luftabschluss im Folienschlauch unternommen. Als Ergänzung wurde ein Versuch in Plastikfässern von 215 Litern Fassungsvermögen durchgeführt. Die Versuche haben gezeigt, dass eine Silierung von Zuckerrüben auch im unzerkleinerten Zustand möglich ist. Das Zellgewebe der Rüben stirbt unter Sauerstoffentzug ab, es gibt den Zellinhalt frei und unterliegt einem Gärprozess, wie es von zerkleinerten Rüben her bekannt ist. Der Gärprozess geht erwartungsgemäß von der Peripherie der Rübenkörper aus. Die Gärungsintensität nimmt zum Kern der Rübenkörper hin ab und unterscheidet sich prinzipiell nicht von dem in zerkleinerten Rüben. Die unzerkleinerten Rüben geben jedoch erheblich weniger Sickersaft ab als zerkleinerte. Dadurch wird das Risiko für hohe Nährstoffverluste über unkontrollierten Saftablauf wesentlich eingeschränkt und eine Lagerung im Folienschlauch ermöglicht. Das Eindringen von Luftsauerstoff in die Zwischenräume zwischen den unzerkleinerten Rüben bewirkt ein größeres Risiko für Verluste durch aeroben Verderb während der Entlee-

rung des Schlauches. Weitere Untersuchungen müssen klären, auf welche Weise dieses Risiko unter Kontrolle gehalten werden kann.

Anschriften der Autoren:

*A. Wagner, U. Weber, G. Weber, M. Scholtissek
BAG Budissa Agroservice GmbH
Birnenallee 10, 02694 Malschwitz
E-Mail: andrea.wagner@ag-bag.de*

*H. Auerbach
ADDCON EUROPE GmbH
Areal E, Säurestr. 1, 06749 Bitterfeld-Wolfen
E-Mail: auerbach@addcon.net*

*F. Weissbach
Freischaffender Firmenberater für Futtermittelkonservierung
Elmenhorst*

Monofermentation von Maissilagen aus Standorten unterschiedlicher Bodenbeschaffenheit

*Gerd-Rainer Vollmer
BTN Biotechnologie Nordhausen GmbH*

*Andreas Krieg, Garnet Wachsmann
Krieg & Fischer Ingenieure GmbH*

Verbundforschungsvorhaben der BTN Biotechnologie Nordhausen (Prof. Dr. G.R. Vollmer/ FKZ 22002908) und der Krieg & Fischer Ingenieure GmbH (Dipl.-Ing. Agr. Andreas Krieg, Dipl. Geogr. Garnet Wachsmann/ FKZ 22014308) Gefördert durch die Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe (FNR) Zeitraum: 2008 – 2011

Ziel des Forschungsvorhabens ist, die Ursachen des in der Praxis beobachteten Rückganges der Biogasproduktion bei der Monofermentation von Maissilagen festzustellen, mit Ansatz am Beginn der technologischen Kette, der Mikronährstoffversorgung der Pflanze in Abhängigkeit der chemischen und biologischen Verfügbarkeit.

Vorhaben: Im Rahmen des Vorhabens werden Maissilagen von 4 unterschiedlichen Standorten im Langzeitversuch geprüft, sowie auf den exemplarischen Standorten (Schleswig-Holstein, Nordrhein-Westfalen, Brandenburg und Bayern) die Gesamtgehalte und die pflanzenverfügbaren Spurennährstoffgehalte des Bodens während der Vegetationsperiode bestimmt. Die auf der Basis von der Geländeansprache getroffenen Aussagen, werden durch Laboranalysen zur Kontrolle abgesichert. Bisher fehlen Untersuchungen, um eine gezielte Düngeberatung beim Anbau von Energiepflanzen, vor dem Hintergrund der Diskussion über den Mikronährstoffmangel beim Biogasprozess, aussprechen zu können.

Bei Monovergärungsanlagen werden sämtliche Makro- und Mikronährstoffe im Gärsubstrat ausschließlich über die Pflanze zur Verfügung gestellt.

In Abhängigkeit vom Standort mit seinen unterschiedlichen Mikronährstoffgehalten, sowie deren Bioverfügbarkeit und den jeweiligen klimatisch unterschiedlichen Voraussetzungen, wird der Spurenelementgehalt der Silage variieren und dieser spiegelt sich letztendlich auch im Gärprozess wieder. Die Versorgung der Energiepflanzen (Mais) mit Mikronährstoffen beeinflusst, so die berechnete Annahme, maßgeblich die notwendige Stabilität der Gärung. Die eingesetzten Maissilagen stammen von praktischen Betriebsbedingungen von 4 Biogasanlagen. Die Langzeituntersuchungen werden im Labormaßstab durch geführt. Für die Laborversuche werden Fermenter mit 8 Liter Nutzvolumen eingesetzt, die temperaturgeregelt sind und mittels Rührer durchmischt werden.

Publizierte Richtwerte über den Spurenelementbedarf im Fermenter entstammen meist aus Versuchen mit Abwässern. Die TS-Gehalte von Abwasservergärungsanlagen (< 3 %) liegen jedoch deutlich unter denen der Monofermentationsanlagen (Doppelt- bis Vierfache TS-Konzentrationen). Daher müssen die Richtwerte für den Spurenelementbedarf einer Revision unterzogen werden. Die Gewinnung neuer wissenschaftlicher Erkenntnisse zur Prozessinhibierung mit Mais als nachwachsenden Rohstoff ist wissenschaftliches Neuland auf dem Gebiet der Biogasgewinnung, auch durch den präventiven Ansatz.

Die BTN-Biotechnologie besitzt langzeitige Laborerfahrungen bei Versuchen der kontinuierlichen Vergärung und stellt die nötige Infrastruktur für die Langzeituntersuchungen. Krieg & Fischer Ingenieure GmbH bringen Erfahrungen aus der Planung und dem Betrieb von über 30 Monofermentationsanlagen mit.

Anschriften der Autoren:

*Prof. Dr. Gerd-Rainer Vollmer
BTN Biotechnologie Nordhausen GmbH
Kommunikationsweg 11, 99734 Nordhausen
E-Mail: btn-gmbh@t-online.de*

*Andreas Krieg, Garnet Wachsmann
Krieg & Fischer Ingenieure GmbH
Bertha-von-Suttner-Strasse 9, 37085 Göttingen
E-Mail: fischer@kriegfischer.de*

Biogaserzeugung aus Silomais – CO₂-Bilanz für den gesamten Prozess

*B. Eder, C. Papst, B. Darnhofer, J. Eder
Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL)*

*H. Schmid, K.J. Hülsbergen
Wissenschaftszentrum Weihenstephan der TU München*

Silomais ist die den Anbau dominierende Pflanzenart für die Biogaserzeugung aus NaWaRos. In der vorliegenden Modellstudie soll für dieses Produktionsverfahren eine CO₂-Bilanz von der Aussaat bis zur Stromeinspeisung erstellt werden. Als Basis diene ein zweijähriger Feldversuch mit Genotypen unterschiedlicher Reife, zwei Düngerarten und drei Düngerstufen an zwei Standorten in Bayern. Es wurden Mineraldünger und Gärreste eingesetzt. Es ist wichtig, bei der Betrachtung der CO₂-Emissionen nicht nur die energiebedingten Emissionen zu berücksichtigen, da auch der Humusabbau unter Mais das Ergebnis deutlich beeinflusst.

Mit Hilfe des Modells REPRO wurde beispielhaft eine Bilanzierung des Silomaisanbaus durchgeführt. Zur Abschätzung der weiterführenden Prozesskette bis zur Biogaserzeugung und Stromeinspeisung dienten Literaturwerte. Die CO₂-Bilanzierung erfolgte mit den Inputgrößen Energieeinsatz, Gasemissionen, C-Sequestrierung und Substitution.

Die Düngerart hatte in diesem Versuch keinen Einfluss auf die Ertragshöhe (Tabelle 1). Die hohen Erträge (auch der Nullvariante) sind auf die gute N-Versorgung des Bodens aus den Vorjahren und auf das hohe N-Nachlieferungsvermögen zurück zu führen. Die Nutzung von Silomais zur Stromerzeugung aus Biogas führte zur Reduktion klimarelevanter Emissionen von etwa 8500 kg CO_{2äq} ha⁻¹ unter der Annahme der Substitution einer entsprechenden Strommenge aus dem deutschen Strommix. Die C-Freisetzung des Bodens beeinflusste mit nahezu 70 % der gesamten CO_{2äq}-Emissionen die Bilanz sehr stark. Der Anbau von Zwischenfrüchten und weitgestellte Fruchtfolgen sind daher auch beim Biogas-Maisan-

bau unabdingbar für eine klimafreundliche und nachhaltige Energieproduktion.

Tab. 1: Energie- und CO₂-Bilanzierung von Silomais zur Stromerzeugung aus Biogas in Abhängigkeit von der Düngerart

		Nullp.	mD	oD	Mittel
Ernteertrag	dt TM ha ⁻¹	213	240	241	236
Energiebindung der Biomasse	GJ ha ⁻¹	390	440	444	435
Stromertrag	kWh _{el} ha ⁻¹	23328	26308	26407	25928
CO ₂ -Emissionen Maisanbau	kg CO _{2äq} ha ⁻¹	5179	6105	4501	5285
1. CO ₂ -Emissionen Energieeinsatz	kg CO _{2äq} ha ⁻¹	573	835	621	706
2. N ₂ O-Emissionen	kg CO _{2äq} ha ⁻¹	286	948	879	824
3. C-Freisetzung Boden	kg CO _{2äq} ha ⁻¹	4321	4321	3001	3755
CO ₂ -Emissionen für Bau u. Betrieb der Anlage	kg CO _{2äq} ha ⁻¹	2286	2578	2588	2541
CO ₂ -Emissionen Substitution	kg CO _{2äq} ha ⁻¹	-14626	-16495	-16557	-16257
CO ₂ -Bilanz-Saldo	kg CO _{2äq} ha ⁻¹	-7161	-7813	-9468	-8431

Nullp.: Nullparzelle mit 30 kg N ha⁻¹ zur Saat

mD: mineralische Düngung

oD: organische Düngung mit Gärrest

Anschriften der Autoren:

*B. Eder, C. Papst, B. Darnhofer, J. Eder
 Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL)
 Institut für Pflanzenbau und Pflanzenzüchtung
 Am Gereuth 4, 85354 Freising
 E-Mail: pflanzenbau@lfl.bayern.de*

*H. Schmid, K. J. Hülsbergen
Wissenschaftszentrum Weihenstephan der TU München,
Lehrstuhl für Ökologischen Landbau und Pflanzenbausysteme
Alte Akademie 12, 85354 Freising
E-Mail: sekretariat.oekolandbau@wzw.tum.de*

Erprobung von Energiefruchtfolgen für D-Südstandorte zur Biogasproduktion

*Ch. Röhricht, S. Freydank, J. Grunewald, S. Schröder
Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft & Geologie (LfULG)*

Im Rahmen des Forschungsverbundprojektes „Entwicklung und Vergleich von optimierten Anbausystemen für die landwirtschaftliche Produktion von Energiepflanzen unter den verschiedenen Standortbedingungen Deutschlands (EVA)“ untersuchte das Sächsische Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie im Zeitraum von 2005 bis 2008 geeignete Energiefruchtfolgen zur Biogasproduktion auf einem D-Südstandort in der Dübener Heide (Kartoffel-Roggen-Region). Es wurde das Ziel verfolgt, Empfehlungen für standortangepasste Anbausysteme zu entwickeln, die eine hohe Ertrags- bzw. Energieausbeute sichern. In die Fruchtfolgen wurden sowohl traditionelle Kulturarten des Futterpflanzenanbaus (Mais, Getreideganzpflanzen) als auch neue Arten, wie Sorghumhirsen, aufgenommen. Ebenso wurden mit Kartoffel, Luzerne-Klee gras, Hanf und Sonnenblume weitere Fruchtfolgeglieder erprobt. Da langfristige Erfolge nur mit ökologisch nachhaltigen Fruchtfolgesystemen erreicht werden können, wurden außerdem Nährstoff- und Humusbilanzierungen durchgeführt.

Anschrift der Autoren:

*Dr. habil. Ch. Röhricht, Dr. S. Freydank, J. Grunewald, S. Schröder
Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft & Geologie (LfULG)
Gustav-Kühn-Str. 8, 04159 Leipzig
E-Mail: christian.roehricht@smul.sachsen.de*

Energiepflanzenanbau zur Biogasgewinnung auf ostdeutschen Diluvialstandorten

G. Ebel, G. Barthelmes

Landesamt für Verbraucherschutz, Landwirtschaft und Flurneuordnung

Aus den vierjährigen Fruchtfolgeversuchen am Standort Güterfelde des innerhalb vom BMELV über die FNR deutschlandweit geförderten Verbundprojektes: „Entwicklung und Vergleich von optimierten Anbausystemen für die landwirtschaftliche Produktion von Energiepflanzen unter den verschiedenen Standortbedingungen Deutschlands“ werden die Ergebnisse und Empfehlungen folgend zusammengefasst.

Im bundesweiten Vergleich ist auf den zur Vorsommertrockenheit neigenden ostdeutschen Diluvialstandorten mit einem geringeren Ertragsniveau zu rechnen. Das ist bei der Flächenplanung für den Energiepflanzenanbau zur Biogasgewinnung zu berücksichtigen. Im Versuchszeitraum 2005 bis 2008 führten stark abweichende Jahreswitterungen mit Extremereignissen zu erheblichen Ertragsschwankungen bei den mehrjährig geprüften Fruchtarten. Im Jahr 2007 wurden durch das warme Frühjahr und die günstige Niederschlagsverteilung ab Mai hohe Ganzpflanzenerträge für Mais als Hauptfrucht ($190 \text{ dt TM ha}^{-1}$) und für Sudangras in Zweitfruchtstellung (bis $150 \text{ dt TM ha}^{-1}$) erzielt. Diese Erträge liegen somit deutlich über denen der Vorjahre bzw. 2008. 2008 wurde mit bis zu $110 \text{ dt TM ha}^{-1}$ Winterroggen der höchste Getreideganzpflanzenertrag (160 % zu 2007) im Beprobungszeitraum ermittelt. Witterungsbedingt konnten im Jahr 2007 die optimalen Trockenmassegehalte zur Ernte eher eingehalten werden als in den durch Trockenheit geprägten Jahren 2006 und 2008. Besonders für Jahre mit anhaltender Trockenheit zur Blüte und Fruchtentwicklung ist der in anderen Regionen Deutschlands ermittelte Zusammenhang zwischen Entwicklungsstadien und TM-Gehaltsverlauf für Standorte mit leichten Böden in Ostdeutschland (Ackerzahlen <35) zu präzisieren. Die Gesamterträge der neun geprüften Fruchtfolgen variierten nach Abschluss der ersten Rotation (2005 bis 2008) zwischen 270 und $425 \text{ dt TM ha}^{-1}$. Die 2.

Versuchsanlage erbrachte im Zeitraum 2006 bis 2008 Erträge von 155 bis 355 dt TM ha⁻¹.

Fruchtfolgen mit Mais, Sorghumgräsern und Getreide für die Ganzpflanzennutzung (besonders Roggen) sowie standortangepasste Ackerfuttermischungen sind in Kombination mit dem Marktfruchtanbau unter den Bedingungen ostdeutscher Diluvialstandorte empfehlenswert. Entscheidend für die Einbeziehung mehrschnittigen Ackerfutters als Gärsubstrat, wie z. B. Luzernegras auf grundwasserfernen Sandstandorten ab AZ 30, wird die Abwägung der Vor- und Nachteile aus der zurzeit noch ausstehenden ökonomischen und ökologischen Bewertung sein. Zur Ganzpflanzenverwertung als Gärsubstrat sind die Pflanzenarten Topinambur, Sonnenblumen, Winterraps sowie die Zwischenfrüchte Senf und Ölrettich auf Grund der geringen TM-Erträge und -gehalte nicht oder nur bedingt geeignet.

Anschrift der Autoren:

G. Ebel, G. Barthelmes

*Landesamt für Verbraucherschutz, Landwirtschaft und Flurneuordnung –
Brandenburg*

Abt. Ackerland und Grünland

Berliner Straße, 14532 Güterfelde

Saatzeitorientierung und Praxiserhebung zum Sorghumanbau – erste Ergebnisse 2008

M. Märtin, G. Barthelmes

Landesamt für Verbraucherschutz, Landwirtschaft und Flurneuordnung

Für das Mehrländer-Verbundprojekt „Anbautechnik Sorghumhirsen – Ein Beitrag zur Diversifizierung des Energiepflanzenpektrums“ werden in einem 3jährigen Versuchszeitraum verschiedene Themenbereiche zum Sorghumanbau untersucht. Durch den Verbund (LfLUG¹ als Koordinator sowie TLL², LVLF³, TFZ⁴ und weiteren Kooperationspartnern) werden die thematische Bearbeitung und die Bereitstellung möglichst vieler Versuchsstandorte abgesichert. Gesamtziel des Vorhabens ist es, den Anbau von Sorghumhirsen zur Biogasgewinnung auf trockenen, leichten bis mittleren Böden unter anbautechnischen und ökologischen Gesichtspunkten zu optimieren. Dazu wurden im Jahr 2008 erste Feldversuche angelegt. Die Vorhabensdurchführung (Laufzeit 2008 – 2011) wird durch das Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz (BMELV) über die Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. (FNR) gefördert.

Im Folgenden werden die Ergebnisse 2008 zu den Arbeitsschwerpunkten Saatzeitorientierung und Praxiserhebung zum Sorghumanbau dargestellt. Beide Schwerpunkte werden durch den Verbundpartner Landesamt für Verbraucherschutz, Landwirtschaft und Flurneuordnung des Landes Brandenburg federführend bearbeitet.

Im Schwerpunkt Saatzeitorientierung werden Früh-, Normal- und Spätsaaten mit Futterhirse und Sudangras im Vergleich zu Mais untersucht, um Aussagen zu Fruchtfolgestellungen (Haupt-, Zweit, Zwischenfrucht)

¹ *Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie*

² *Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft*

³ *Landesamt für Verbraucherschutz, Landwirtschaft und Flurneuordnung des Landes Brandenburg*

⁴ *Technologie- und Förderzentrum Nachwachsende Rohstoffe in Straubing*

abzuleiten. Dazu wurden im Jahr 2008 auf dem Diluvialstandort Güterfelde (LVLF, Brandenburg, AZ 35) und dem Löss-Standort Kirchengel (TLL, Thüringen, AZ 70) Versuche mit mehreren Saatterminen zu den Arten Mais, Sudangras und Futterhirse mit jeweils einer Sorte pro Art angelegt (Mais: NK Magitop; Sudangras: Lussi; Futterhirse: Goliath). Allgemein wird für Sorghum ein optimaler Saattermin ab Mitte Mai bzw. bei Bodentemperaturen von 14 – 16 °C empfohlen. Um eine gute Silierfähigkeit zu erreichen, sind die TS-Gehalte bei Sorghumhirsen von mind. 26 – 28 % und bei Mais von 28 – 33 % einzuhalten.

Die Ergebnisse des ersten Versuchsjahres 2008 lassen sich wie folgt zusammenfassen:

Ein vorgezogener Saattermin analog zur Maisausaat war für Hirsen zwar möglich, ist dennoch als risikoreich anzusehen (Kälte- und Frostempfindlichkeit, Ansprüche an Keim- und Jugendentwicklungstemperatur, starke Unkrautkonkurrenz durch verzögertes Wachstum). Auf dem leichten Boden eignete sich das Sudangras wie auch die Futterhirse für den Hauptfrucht- als auch Zweitfruchtanbau (z. B. nach Grünschnittroggen – Aussaat Mitte/Ende Mai). Auf dem Löss-Standort erreichte die Futterhirse den angestrebten TS-Gehalt mit Aussaat Ende Mai nicht mehr. Spätere Saattermine (z. B. nach Ganzpflanzengetreide – Aussaat bis Ende Juni) erfordern schnell abreifende Sorten, sind standort- bzw. witterungsabhängig und können riskant für das Erreichen des notwendigen TS-Gehaltes sein. Je nach Stellung in der Fruchtfolge ist die Arten-/Sortenwahl ein wichtiges Kriterium, dabei sollten der Ertrag (dt TM/ha) und die Abreife in einem günstigen Verhältnis zueinander stehen.

Die Praxiserhebung hat das Ziel, den aktuellen Stand, Probleme, Vor- und Nachteile, betriebliche Erfahrungen und die Akzeptanz von Sorghum im Energiepflanzenanbau in der Praxis zu erfassen. Die Umfrage erfolgte über einen vom LVLF erstellten Fragebogen und wurde von den Projektpartnern in den jeweiligen Bundesländern verteilt. Die Auswertung der Antworten ließ auf ein reges Interesse am Sorghumanbau bei den Landwirten schließen, denn der Anteil von Sorghum mit 67 % an den Gesamtnennungen konnte als hoch eingestuft werden. Allerdings findet vorrangig ein „Probearbeit“ auf kleineren Flächen statt. Zu einem großen Anteil wurden Sorghumhirsen auf Flächen von 1 bis 50 ha angebaut, dem gegenüber standen 100 bis 500 ha große Maisschläge. Den Umfragen konnte auch entnommen werden, dass aufgrund der geringen oder fehlenden Anbau-erfahrung noch erheblicher Informations- und Beratungsbedarf besteht.

Anschrift der Autoren:

M. Martin, G. Barthelmes

*Landesamt für Verbraucherschutz, Landwirtschaft und Flurneuordnung –
Brandenburg*

Abt. Ackerland und Grünland

Berliner Straße, 14532 Güterfelde

E-Mail: manuela.maertin@lolf.brandenburg.de

Durchwachsene Silphie (*Silphium perfoliatum* L.) – eine alternatives Koferment

Michael Conrad, Andrea Biertümpfel, Armin Vetter
Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft

Die Durchwachsene Silphie ist ein im Osten Nordamerikas beheimateter perennierender Korbblütler, dessen Nutzungsdauer bei zweischnittiger Beerntung bis zu 15 Jahre beträgt.

Eine Etablierung der Bestände ist sowohl durch Pflanzung vorkultivierter Jungpflanzen als auch durch Direktsaat möglich, wobei eine Bestandesdichte von ca. 40.000 Pflanzen/ha anzustreben ist. Im Anlagejahr bildet die Pflanze lediglich eine grundständige Blattrosette und ihr komplettes Wurzelsystem aus. Die erste Ernte erfolgt im 2. Anbaujahr bei einem Trockensubstanzgehalt der Ganzpflanze von 28 bis 30 %. Erreicht wird dieses Entwicklungsstadium Anfang bis Ende September, in Abhängigkeit von der Anbauregion. Die Pflanzen befinden sich dann im Stadium Blühende bzw. dem Beginn der Samenreife. Geerntet wird mit einem praxisüblichen Maishäcksler mit reihenunabhängigem Schneidwerk.

Hinsichtlich des Bodens sind die Pflanzen relativ anspruchslos, wachsen aber am besten auf humosen Böden mit guter Wasserführung. Insgesamt ist der Wasserbedarf der Pflanze relativ gering. Für den Anbau nicht geeignet sind staunasse Standorte.

Vor der Saat bzw. Pflanzung sollte eine Herbstfurche, eine feuchtigkeitsbewahrende Saatbettbereitung bzw. die Herstellung eines feinkrümeligen Pflanzbettes im Frühjahr erfolgen.

Bei der Auswahl der Vorfrucht ist auf unkrautunterdrückende Eigenschaften zu achten, da die Pflanzen im ersten Anbaujahr relativ langsam wachsen und zum gegenwärtigen Zeitpunkt noch keine zugelassenen Herbizide für diese Kultur existieren.

Die Düngung erfolgt zur Pflanzung bzw. zur Aussaat und jeweils zu Beginn eines jeden Vegetationsjahres. Je nach Ertragerwartung beträgt der N-Sollwert 150 bis 200 kg N/ha. Die Düngung anderer Makronährstoffe

erfolgt nach Entzug. Besonders zu beachten ist vor allem der hohe Magnesiumbedarf der Pflanze.

Die Silierung des Erntegutes ist problemlos. Da die Durchwachsene Silphie einen hohen Futterwert besitzt, ist die Silage sowohl als Viehfutter als auch als Koferment in Biogasanlagen geeignet. Gegenwärtig wird die letztgenannte Verwertungsrichtung favorisiert. Der Einsatz der Silage in einer Praxisbiogasanlage und auch durchgeführte Batchtests haben gezeigt, dass die Methanausbeuten vergleichbar mit Maissilage sind.

Einen weiteren positiven Aspekt der Nutzung bietet die Pflanze durch ihre lange Blühdauer von Anfang Juli bis zum ersten Frost als Bienenweide.

Als Nachfrucht ist Getreide geeignet, um einen eventuellen Durchwuchs der Silphie nach dem Umbruch der Bestände bekämpfen zu können.

Um die Pflanze erfolgreich in der landwirtschaftlichen Praxis, vorwiegend zum Einsatz als Koferment in landwirtschaftlichen Biogasanlagen, zu etablieren, ist es erforderlich, das Anbauverfahren, die Unkrautbekämpfung und die Verarbeitung weiter zu optimieren. Hierzu erfolgen gegenwärtig im Rahmen eines von der Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. geförderten Projektes Versuche zur Direktsaat, zur Aussaat unter Deckfrucht sowie Herkunftsprüfungen und Herbizidversuche an verschiedenen Standorten Deutschlands. Versuche zur Optimierung der Erstverarbeitung/Silierung bilden einen weiteren Schwerpunkt des Projektes.

Anschrift der Autoren:

*Michael Conrad, Andrea Biertümpfel, Dr. Armin Vetter
Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft
Apoldaer Str. 4, 07778 Dornburg
E-Mail: michael.conrad@tll.thueringen.de*

Sudangras und Mais in Haupt- und Zweitfruchtstellung – Ergebnisse Thüringer Anbauversuche

Andrea Biertümpfel, Michael Conrad, Armin Vetter
Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft

In der Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft kam von 2005 bis 2007 an drei unterschiedlichen Standorten ein Versuch zur Haupt- und Zweitfruchtnutzung von Sudangras und Mais zur Anlage. Eine Standortcharakterisierung beinhaltet Tabelle 1.

Tab. 1: Charakterisierung der Versuchsstandorte

Standort	Bodenform/-art	Ackerzahl	Höhenlage (m)	Temperatur (°C)	Niederschlag (mm)
Dornburg	Löss-Parabraunerde/Lehm	46 – 80	260	8,8	596
Heißberg	Bergton-Staugley/Lehm-Ton	43	380	7,1	760
Kirchengel	Löss-Rendzina	60 – 65	305	7,8	568

Im Versuch erfolgte der Anbau beider Kulturen nach den Winterzwischenfrüchten Futterroggen und Landsberger Gemenge sowie in Hauptfruchtstellung ohne Winterzwischenfrucht.

Im Ergebnis der Versuche war festzustellen, dass der Mais im Mittel der Standorte und Jahre das Sudangras sowohl in Hauptfruchtstellung als auch nach den beiden Winterzwischenfrüchten in ertraglicher Hinsicht übertraf (Abbildung 1).

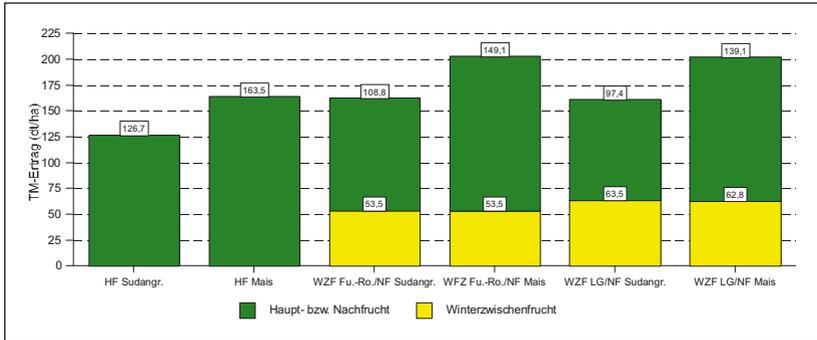


Abb. 1: TM-Ertrag von Sudangras in Haupt- und Zweitfruchtstellung im Vergleich zu Mais, Mittel der drei Standorte und Jahre 2005 bis 2007

Dies setzte sich auch in den theoretischen Methanerträgen fort. Allerdings erschweren die großen jahresbedingten Schwankungen zwischen und innerhalb der Standorte grundlegende Aussagen.

Aufgrund des breiteren Sortenspektrums und der intensiveren züchterischen Aktivitäten wurde der Versuch ab 2008 mit Zuckerhirse anstelle von Sudangras fortgesetzt.

Anschrift der Autoren:

*Andrea Biertümpfel, Michael Conrad, Dr. Armin Vetter
 Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft
 Apoldaer Str. 4, 07778 Dornburg
 E-Mail: a.biertuempfel@tll.thueringen.de*

Biogasanlagen und Maisanbau in Brandenburg, Entwicklung von 2005 – 2009

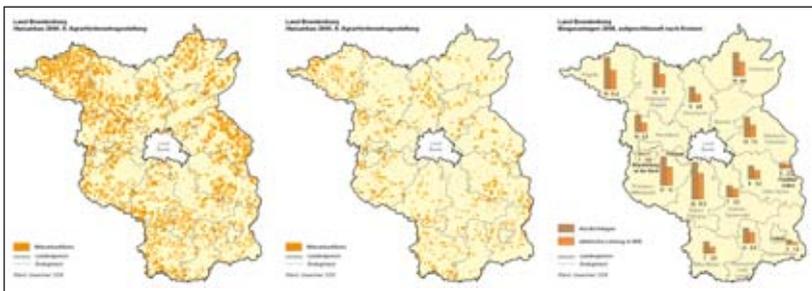
Siegfried Grimmert, Hermann Harders, Rudolf Vögel
Landesumweltamt Brandenburg

Jörg Peil
BR Schorfheide-Chorin

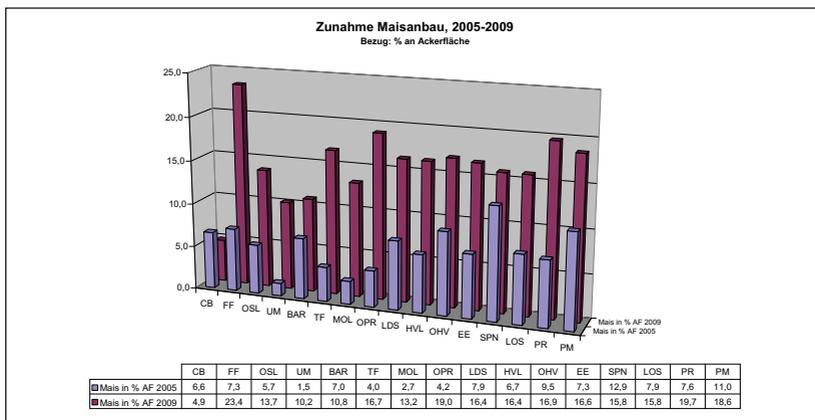
Die Anzahl der errichteten Biogasanlagen und die installierte Leistungskapazität konnte in Brandenburg im Zeitraum vom 2005 – 2009 auf das sechsfache gesteigert werden. Unter Auswertung von Landkreisdaten sind regionale Schwerpunkte vor allem in den mit günstigeren Bodenverhältnissen ausgestatteten Gebieten des Landes zu erkennen.

Im gleichen Zeitraum ist ebenfalls eine regional und lokal differenzierte, teilweise sehr starke Zunahme des Maisanbaus festzustellen. Maissilage stellt vor allem für Anlagen ohne Tierproduktionshintergrund das Hauptsubstrat dar. Es ist anzunehmen, dass der zusätzliche Maisanteil an der Ackerflächennutzung überwiegend zur Biogasproduktion Verwendung findet.

Neben sehr hohen lokalen betriebsbezogenen Konzentrationen des Maisanbaus haben die prozentualen Flächenanteile von Kulturmais in einzelnen Landkreisen inzwischen Werte erreicht die Probleme bei Einhal-



tung von Fruchtfolgen sowie möglicherweise auch zu Vorgaben der Gemeinsamen Agrarpolitik, cross compliance verursachen können. Der im Biogasleitfaden des Landesministeriums, MLUV enthaltene Ansatz, dass langfristig 10 – 20 % der landwirtschaftlichen Nutzfläche zur Produktion von Energiepflanzen genutzt werden können, wird bereits jetzt allein durch den Maisanbau ausgeschöpft.



Literatur

- Eigene Auswertungen, LUA-Anlagenkataster, INVEKOS-Datenbestände

Anschrift der Autoren:

*Siegfried Grimmert, Hermann Harders, Rudolf Vögel
Landesumweltamt Brandenburg
Ref. T2 (Klimaschutz, Umweltfolgen, -toxikologie)
Seeburger Chaussee 2, 14476 Potsdam
E-Mail: siegfried.grimmert@lua.brandenburg.de*

*Jörg Peil
BR Schorfheide-Chorin
Hoher Steinweg 5 – 8, 16278 Angermünde
E-Mail: joerg-dieter.peil@lua.brandenburg.de*

Signifikante Weiterentwicklung der Biogas-Motorentchnik bzw. deutliche Erhöhung des Wirkungsgrades

2G Energietechnik GmbH, Heek

Highterm Research GmbH, Hettenhausen

Hendrik Hilbring Maschinenbau GmbH & Co. KG, Ahaus

Fachhochschule Münster, FB Maschinenbau, Steinfurt

ABBmaxx UG, Bocholt

FVT – Forschungsgesellschaft für Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik mbH (FVT) der TU Graz

Adapt Engineering, Nordhausen

Entwicklungsprojekt im Rahmen des Förderprogramms „Zentrales Innovationsprogramm Mittelstand“ des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie (BMWi) – Fördermodul Kooperationsprojekte

Kurzfassung der Projektbeschreibung:

Ein neues Gesamtkonzept soll den Wirkungsgrad von dem hier entwickelten Gasmotor der Leistungsklasse 200 kW im Betrieb sowohl mit konventionellem Biogas mit Anteilen von CO₂ als auch mit Holzgas aus allothermer Druckvergasung mit hohem H₂-Gehalten nach ersten Abschätzungen um bis zu 2,5 % auf über 42 % steigern. Dazu sollen die folgenden Neuentwicklungen durchgeführt werden:

1. Teile des Gasmotors, z. B. Brennraumgestaltung, Gasführung, optimierte Gasführung und -strömungsverhältnisse, Turbolader und dessen Parameter und Arbeitspunktsteuerung, Gemischkühlung,

Zündparameter, usw.

2. Neuentwicklung des Gasmischers, funktional integriert in die neu entwickelte Fuzzy-Motorsteuerung, mit schneller Reaktion auf die konkrete Gaszusammensetzungen und Energiedichte mit optimierter Durchmischung.
3. Neuentwicklung des Heatpipe-Reaktorkonzepts und seiner Betriebspunkte auf diesen speziellen Anwendungsfall zur Optimierung des Gesamtwirkungsgrads.
4. Neuentwickelte Regelung zur Erfassung der Gaszusammensetzung, der Optimierung der Betriebsparameter des Motors und der schnellen Steuerung des Gasmischers durch Fuzzy-Technologien.

Laufzeit:

bis 28.02.2011

Bisherige Ergebnisse:

In ersten Vorversuchen haben wir bei der Entwicklung der wirkungsgrad-optimierten BHKW-Anlage (MAN, 190 kW) die Druckverhältnisse im Motor und dessen vor- und nach geschalteten Komponenten dahingehend beeinflusst, so dass alle Serienteile im optimalen Kennfeldbereich arbeiten. Hierzu haben wir die Geometrie der Gemischansaugstrecke als auch die des Abgasweges auf einen angepassten Druckverlust optimiert. Außerdem haben wir die Brennraumgeometrie angepasst. Hier haben wir eine möglichst hohe Verwirbelung im Zylinder herbeigeführt. Der hohe Turbulenzgrad im Zylinder gewährleistet eine gute, vollständige Verbrennung des zugeführten Gas- Luftgemischs. Eine Senkung der Abgastemperatur um mehr als 50K bestätigt die höhere Umsetzung der zugeführten Energie in mechanische Energie. Insgesamt wird eine Wirkungsgradsteigerung um bis zu 2,5 % erwartet.

Die Rolle des Stroms aus Biogas in zukünftigen Energieversorgungsstrukturen

Fraunhofer-Institut IWES

Fachverband Biogas e.V.

Deutsches Biomasse Forschungszentrum gGmbH (DBFZ)

Projektziele

Art und Umfang möglicher Systemdienstleistungen in Stromverteilnetzen, die durch Biogasanlagen erbracht werden können, werden ermittelt. Mit den Ergebnissen wird es ermöglicht, Entscheidungen über die Platzierung von Biogasanlagen in zukünftigen Energieversorgungsstrukturen zu treffen, um eine sichere, effiziente und kostengünstige Versorgung mit hohem Anteil erneuerbarer Energie zu realisieren. Durch die Ermittlung des Systemdienstleistungswerts können die Kosten für EE besser bestimmt werden.

Projektbeschreibung

Gegenstand des Projekts ist die Einbindung von Biogasanlagen in Energieversorgungsstrukturen. Neben der Einspeisung elektrischer Energie werden in der Untersuchung Systemdienstleistungen in Stromverteilnetzen betrachtet, die durch Biogasanlagen erbracht werden können. Dazu zählen u. a. Frequenzhaltung und Engpassmanagement.

Aktuell wird Strom aus Biogasanlagen kontinuierlich produziert und in das Stromnetz eingespeist. Es erfolgt keine Rückkopplung mit dem Bedarf des Netzbetreibers. Durch eine intelligente Steuerung der Stromerzeugung aus Biogas, z. B. mittels Lastprognosen, kann durch Biogasanlagen elektrische Energie in Bedarfszeiten angeboten werden, während bei Netzvollauslastungen keine Einspeisung erfolgt. Diese Anpassung von Angebot und Nachfrage hilft die Netzkosten und damit die Stromkosten

für den Verbraucher zu senken.

Als regelbarer Energieerzeuger können Biogasanlagen für weitere Systemdienstleistungen in Energienetzen genutzt werden. Hierbei ergänzen sich die dezentralen Standorte der Biogasanlagen in ländlichen Regionen mit dem Bedarf an Systemdienstleistung in der Peripherie großer Stromnetze. Durch den Einsatz von Biogasanlagen als Systemdienstleister in Stromnetzen kann der Ausbau der Erneuerbaren Energien mit einer gleichzeitigen Verbesserung der Netzstabilität vorangetrieben werden.

Gefördert durch:

Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU)

Anschriften der Autoren:

*Fraunhofer-Institut IWES
Königstor 59, 34119 Kassel
E-Mail: mbox@iset.uni-kassel.de*

*Fachverband Biogas e.V.
Angerbrunnenstraße 12, 85356 Freising
E-Mail: info@biogas.org*

*DeutschesBiomasseForschungsZentrum gGmbH (DBFZ)
Torgauer Str. 116, 04347 Leipzig
E-Mail: info@dbfz.de*

EMSE – Energie Management System Eichhof

*Uwe Hoffstede
Fraunhofer-Institut IWES*

Abstract

Die Bereitstellung von Regel- und Ausgleichsenergie und weitere Systemdienstleistungen sind Optionen, Biogasanlagen künftig unter Marktbedingungen betreiben zu können. Das hessische Landwirtschaftszentrum "Eichhof" mit Wohneinheiten, Büros, Ställen, Werkstätten und eigenen Energieerzeugern (PV, Biogasanlage) ähnelt hinsichtlich des elektrischen Lastprofils einem Dorf. Es ist daher ein idealer Standort, für ein Demonstrationsprojekt zum regenerativen Energiemanagement. Das Ziel dieses Vorhabens ist die Ertüchtigung von Biogasanlagen zu flexiblen Kraftwerken. Nach der Analyse der lokalen Infrastruktur, der Aufnahme und Analyse von Lastgängen konfiguriert und installiert ISET die Hard- und Software für das Energiemanagementsystem, welches sowohl die Verbraucher als auch die elektrischen Energieerzeuger steuert. Insbesondere wird die mit Biogas betriebene Mikrogasturbine zur Kappung kostenintensiver Spitzenlasten herangezogen werden. Das EMSE berücksichtigt ebenfalls die externen Anforderungen des lokalen Versorgungsnetzes. Erwartete Ergebnisse sind nicht nur Einsparungen bei den Kosten für elektrische Energie sondern auch Entlastung des Versorgungsnetzes sowie der Nachweis, dass Biogasanlagen weit mehr als elektrische Grundlast befriedigen können.

Stichworte: Biogas, BHKW, Energiemarkt

1 Projektziele

Ziel des Projektes ist es, am Landwirtschaftszentrum Eichhof ein Energiemanagementsystem (EMS) aufzubauen, mit dem die zur Bereitstellung von Systemdienstleistungen mit Biogasanlagen erforderlichen Technologien demonstriert werden können. Dieses Vorhaben wird von den hessischen Ministerien für Umwelt, ländlichen Raum und Verbraucherschutz sowie Wirtschaft, Verkehr und Landesentwicklung finanziert. Das Energiemanagementsystem soll unterschiedliche Systemdienstleistungen wie z. B. Spitzenlastkappung, Bereitstellung von Primär- und Sekundärregelleistung, Blindleistungskompensation, Notstromfunktion usw. leisten können und zudem die Möglichkeit eröffnen, die notwendigen Randbedingungen zu klären, um daraus umsetzbare Geschäftsmodelle zu entwickeln.

2 Projektdurchführung



Abb. 1: Landwirtschaftszentrum „Eichhof“, Landesbetrieb Landwirtschaft Hessen, Bad Hersfeld

Das Demonstrationsvorhaben beinhaltet die Analyse der vorhandenen Infrastruktur, Erfassung der elektrischen Verbraucher, die Bestimmung der Bilanzkreise sowie die Festlegung der Meßpunkte. Als Kommunikationsnetz zur Übertragung aller Mess- und Regelgrößen wird das bauseitig zur Verfügung gestellte Intranet genutzt.

Auf diese Weise werden vollständige Transparenz und Kontrolle für das Personal des LWZ, Zugriffsmöglichkeiten von außen für die Projektpartner und Einblicke für die interessierte Öffentlichkeit erlaubt.

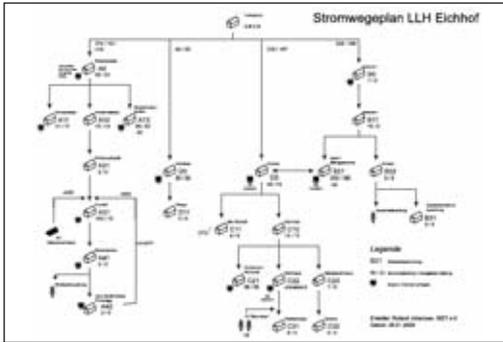


Abb. 2: Elektrische Versorgungsstränge und Messpunkte zur Erfassung des Energieverbrauches

Inzwischen wurden die einzelnen Verbräuche an elektrischer Energie im Sekundentakt aufgezeichnet und in einer Datenbank ausgewertet. Die mehrmonatige Meßphase diente dazu, eine komfortable Datengrundlage für die Gestaltung des Energiemanagementsystems zu schaffen.

Die detaillierten Messungen mit hoher zeitlicher Auflösung ergeben ein genaues Bild des Stromverbrauchs am Eichhof. Es ist daraus erkennbar, wann welche Lasten anliegen, wie hoch sie sind, welche Gleichzeitigkeiten vorliegen, ob Lastverschiebungen möglich sind und welche Lasten durch interne Einspeisung aufgefangen werden können.

Das EMS wird mindestens 15 Monate betrieben werden. Diese Phase ist ein permanenter Prozess der Optimierung des Systems.

In der ersten Betriebsphase des Projektes wird das Managementsystem ausschließlich die Verbraucher und Erzeuger auf dem Landwirtschaftszentrum Eichhof berücksichtigen.

Im nächsten Arbeitsschritt wird die Mikrogasturbine als internes Instru-

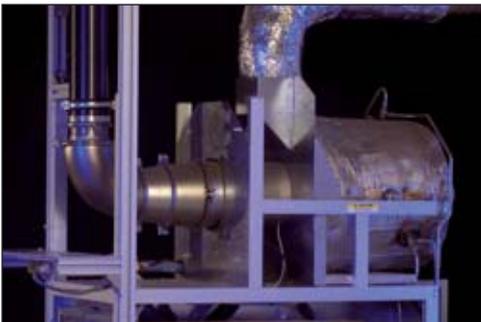


Abb. 3: Mikrogasturbine, 30 kW_{el}



Abb. 4: Zündstrahldieselmotor,
30 kW_{el}

ment zur Kappung von Spitzenlasten in einem geeigneten internen Bilanzkreis herangezogen werden. Abschließend werden in Spitzlastzeiten vorher mit dem LWZ vereinbarte Verbraucher abgeschaltet.

Um dezentrale Stromerzeuger und autonom geregelte Teilnetze optimal in die Energieversorgungsstrukturen einzubinden, müssen diese mit den übergeordneten Versorgungsstrukturen kommunizieren. Hierfür werden dem System von außen Lastprofile und Tarifinformationen vorgegeben.

Das EMS muss unter Berücksichtigung dieser Informationen neu eingestellt werden. Mit diesen Daten kann das EMS feststellen, zu welcher Zeit welche Fahrweise die günstigste für das Gesamtnetz des Eichhofes ist.

3 Status des Projektes

Derzeit werden die Steuereinheiten für die Verbraucher und Energieerzeuger konfiguriert aufgebaut, nachdem die gemessenen Lastgänge des Eichhofes eingehend analysiert worden sind. Das Projekt wird 2011 abgeschlossen werden.

Anschrift des Autors:

*Uwe Hoffstede
Fraunhofer-Institut IWES
Bereich Energetische Biomassenutzung
Rodenbacher Chaussee 6, 63457 Hanau
E-Mail: uhoffstede@iset.uni-kassel.de*

Der Rostocker Aktivitätstest – Entwicklung eines Verfahrens zur praxisnahen vergleichenden Quantifizierung der biologischen Aktivität von NawaRo-Biogasfermentern

Nils Engler, Michael Nelles
Universität Rostock

Thomas Fritz
IS Forschungsgesellschaft mbH

1 Grundlagen

Die apparative Basis für das Testverfahren bildet das Gas Production System der Firma ANKOM. Das Verfahren beruht auf der Messung des Druckanstiegs in einem konstanten Volumen bei konstanter Temperatur.

Unter den gegebenen Randbedingungen ist der gemessene Druckanstieg direkt proportional zur Stoffmengen Zunahme in der Gasphase. Im betrachteten Druckbereich (bis ca. 150 kPa Absolutdruck) kann das Gas mit ausreichender Genauigkeit als ideales Gas angenommen werden. Die Volumenänderung (als Normvolumen!) folgt dann direkt aus der Druckänderung.

2 Versuchsbeschreibung

Der Aktivitätstest soll eine vergleichende Quantifizierung der Abbaukinetik eines standardisierten Substrats ermöglichen. Dazu werden Fermenterproben von NawaRo-Biogasanlagen einer standardisierten Testroutine unterzogen und die Abbaukinetik eines ebenfalls standardisierten, reproduzierbaren Substrats in hoher zeitlicher Auflösung gemessen. Zusätzlich

kann im Parallelversuch der Einfluss z. B. von Fermentationshilfsstoffen oder potenziellen Inhibitoren auf die Abbaukinetik untersucht werden. Mit der derzeit vorhandenen Ausstattung können Nullversuch, Kontrolle und bis zu 6 Varianten von Zusatzstoffen jeweils in Dreifachwiederholung untersucht werden.

3 Ergebnisse

Für die Ergebnisdarstellung wird das kumulierte Gasvolumen in $l(N)/kg_{oTS}$ auf das theoretisch maximale Gasbildungspotenzial des Standardsubstrats nach Buswell bezogen und als Zeitkurve dargestellt. Im Laufe der bisherigen Bearbeitung hat sich das t_{50} -Kriterium, also die Zeit, die benötigt wird, 50 % des theoretischen Buswell-Ertrags zu bilden, als gut handhabbare Größe zum Vergleich verschiedener Fermenterproben herausgestellt.

Im Posterbeitrag werden das Testsystem und das Verfahren sowie erste Ergebnisse bei der Untersuchung der Wirkung von Spurelementzusätzen vorgestellt werden.

Anschriften der Autoren:

*Nils Engler, Prof. Dr. Michael Nelles
Universität Rostock
Agrar- und Umweltwissenschaftliche Fakultät,
Lehrstuhl für Abfall- und Stoffstromwirtschaft
Justus-v. Liebig Weg 6, 18059 Rostock
E-Mail: n.engler@uni-rostock.de*

*Thomas Fritz
IS Forschungsgesellschaft mbH
An der Mühlenau 4, 25421 Pinneberg*



Herausgeber

Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. (FNR)
Hofplatz 1 • 18276 Gülzow
Tel. : 0 38 43 / 69 30 - 0
Fax : 0 38 43 / 69 30 - 1 02
E-Mail: info@fnr.de
Internet: www.fnr.de

Gefördert durch das Bundesministerium für
Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz

Gedruckt auf Papier aus Durchforstungsholz
mit Farben auf Leinölbasis

FNR-Bestellnummer: 400
ISBN: 978-3-942147-00-2



9 783942 147002