

Biogas in der Landwirtschaft – Stand und Perspektiven

FNR/KTBL-Kongress
vom 20. bis 21. September 2011
in Göttingen



KTBL-Schrift 488

Biogas in der Landwirtschaft – Stand und Perspektiven

FNR/KTBL-Kongress
vom 20. bis 21. September 2011
in Göttingen

Herausgeber

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

Konzeption

Helmut Döhler, Mark Paterson
Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V. (KTBL)
Bartningstraße 49 | 64289 Darmstadt

Projektbetreuung

Susanne Döhler, Mark Paterson
Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V. (KTBL)
Bartningstraße 49 | 64289 Darmstadt

Ideeller Partner



Wissenschaftlicher Partner

GEORG-AUGUST-UNIVERSITÄT
GÖTTINGEN



© 2011

Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V. (KTBL)
Bartningstraße 49 | 64289 Darmstadt
Telefon +49 (0) 6151 7001-0 | Fax +49 (0) 6151 7001-123
E-Mail: ktbl@ktbl.de | <http://www.ktbl.de>

Alle Rechte vorbehalten. Die Verwendung von Texten und Bildern, auch auszugsweise, ist ohne Zustimmung des KTBL urheberrechtswidrig und strafbar. Das gilt insbesondere für Vervielfältigung, Übersetzung, Mikroverfilmung sowie die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Herausgegeben mit Förderung des Bundesministeriums für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages.

Lektorat

Susanne Döhler, Monika Pikart-Müller | KTBL

Redaktion

Mark Paterson | KTBL

Titelfoto

© www.landpixel.eu

Vertrieb

KTBL | Darmstadt

Druck

Druckerei Lokay | Reinheim

ISBN 978-3-941583-56-6

Printed in Germany

Vorwort

Regenerative Energien sind ein wichtiger Baustein für den Aufbau eines zukunftsfähigen Energiesystems und gewinnen national wie international zunehmend an Bedeutung. Sie müssen und können in den nächsten Jahrzehnten immer größere Anteile des Energiebedarfs decken. Es geht darum, anthropogene Emissionen zu mindern, vorhandene Ressourcen zu erschließen und die verfügbare Technik zu verbessern.

Innerhalb der erneuerbaren Energien leistet Biogas einen entscheidenden Beitrag, denn es ist eine vielseitige und bedarfsgerecht einsetzbare Energiequelle. Der Erfolg der Biogasnutzung wird nicht allein an dem fortlaufenden Anlagenzuwachs gemessen, sondern an der effizienten und nachhaltigen Produktion von Strom, Wärme und Kraftstoff. Biogasanlagen sind wirtschaftlich und ökologisch, wenn sie prozessoptimiert, Ressourcen schonend und umweltverträglich betrieben werden.

Vor diesem Hintergrund wurde der Fachkongress „Biogas in der Landwirtschaft – Stand und Perspektiven“ veranstaltet. Der Kongress wird zum zweiten Mal gemeinsam von der Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR) und dem Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V. (KTBL) ausgerichtet – der erste fand 2009 statt.

Der vorliegende Tagungsband bündelt die Fachbeiträge der Referenten sowie die schriftlichen Kurzfassungen der ausgestellten wissenschaftlichen Poster und bietet Ihnen einen umfassenden Überblick über die Chancen und Problemfelder der Biogastechnik in der Landwirtschaft.

Wir möchten allen Referenten, Moderatoren und Poster-Autoren für die engagierte Mitarbeit herzlich danken. Unser Dank richtet sich auch an die Kolleginnen und Kollegen, die den zweiten Biogaskongress geplant und durchgeführt haben.

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



DR. HEINRICH DE BAEY-ERNSTEN
Hauptgeschäftsführer

Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V.



DR.-ING. ANDREAS SCHÜTTE
Geschäftsführer

Inhalt

Vorträge

Perspektiven der Biogasnutzung als Teil der deutschen Energieversorgung STEFAN RAUH.....	13
Die Entwicklung von Biogas in Europa MARC FLEURECK	23
Biologie der methanogenen Archaea und ihre Bedeutung für die mikrobielle Prozessführung in Biogasanlagen HELMUT KÖNIG, ROBBIN STANTSCHKEFF, KERSTIN SEYFARTH, STEFAN DRÖGE	33
Wirksamkeit und Wirkungsweise von Enzymen im Biogasprozess MONIKA HEIERMANN, TERESA SUÁREZ QUIÑONES, MATTHIAS PLÖCHL, JÖRN BUDDÉ, ROBERT KAUSMANN, KATRIN PÄZOLD	46
Spurenelemente in NawaRo-Biogasanlagen zum Ausgleich substratbedingter Mangelercheinungen und zur Stabilisierung des Gärprozesses HANS OECHSNER, ANDREAS LEMMER, DANIEL PREISSLER	48
EEG – aktuelle Entwicklungen für den Biogasbereich ULRICH KEYMER.....	62
Nutzung der KWK-Wärme in der Praxis – Erfahrungen aus Sicht des Umweltgutachters MICHAEL HUB.....	86
Neuerungen bei den rechtlichen Aspekten der Biogasproduktion und -nutzung HARTWIG VON BREDOW.....	96
Schäden und Mängel an Biogasanlagen WALDEMAR GRUBER, ARNE DAHLHOFF	102
Lernen aus Havarien, Schäden und deren Ursachen und Abhilfen im Anlagenbetrieb von Biogasanlagen – Berichte aus der Praxis WOLFGANG HORST STACHOWITZ	112
Ursachen und Vermeidung von Behälterschäden durch Biokorrosion JAN KUEVER.....	120

Anaerober Abbau cellulosehaltiger Substrate – Bionische Implementierung des Vormagensystems des Wiederkäuers DIRK WEICHGREBE, PAUL STOPP, KARL-HEINZ ROSENWINKEL, GERHARD BREVES, MICHAEL STRECKER	128
Vergärung nachwachsender Rohstoffe im Aufstromverfahren JAN MUMME, BERND LINKE, PATRICE RAMM.....	138
Zweiphasige Druckfermentation – Neue Verfahren der Biogasproduktion zur Einspeisung in Erdgasnetze ANDREAS LEMMER, SIMON ZIELONKA, YULING CHEN, ANNA-MARIA WONNEBERGER, FRANK GRAF, HANS OECHSNER.....	145
Anforderungen und Potenzial von Zuckerrüben für die Vergärung CHRISTA HOFFMANN, PHILIPP STARKE	156
Innovation im Bereich der Energierüben ANDREAS VON FELDE, SEBASTIAN SCHAFFNER, ULRIKE JECHÉ	164
Optimierung der Gärrestdüngung zur Reduzierung der Stickstoffemissionen und Optimierung der Humusbilanz KURT MÖLLER.....	173
Bewertung klimarelevanter Gase aus landwirtschaftlichen Biogasanlagen auf der Basis von Emissionsmessungen JAN LIEBETRAU, JAQUELINE DANIEL-GROMKE, CHRISTIANE REUSCHEL, KATJA OEHMICHEN, JOACHIM CLEMENS, CARSTEN HAUFERMANN, PETER WEILAND, JÖRG FRIEHE	185
Treibhausgasbilanzen und CO ₂ eq-Vermeidungskosten landwirtschaftlicher Biogasanlagen URSULA ROTH, HELMUT DÖHLER, STEFAN HARTMANN, SEBASTIAN WULF.....	196
Wildpflanzenmischungen zur Biogasgewinnung BIRGIT VOLLRATH, ANTJE WERNER	209
Einsatz von Stroh als Gärsubstrat durch technischen Strohaufschluss STEFAN DRÖGE, BENJAMIN PACAN.....	218
Biogas aus Algen, Tang und Seegras? HOLGER SCHNEIDER	230
Gemeinschaftsprojekt zwischen Landwirten und Stadtwerken – Biogaseinspeisung mit Aminwäsche JOHANNES STEINHÄUER	235

Biomethaneinspeisung aus Sicht eines Anlagenbetreibers THOMAS BALLING	243
Potenziale für eine optimierte und Ressourcen schonende Biomethanbereitstellung – Leitlinien für den weiteren Ausbau der Biogasnutzung WOLFGANG URBAN	251
Repowering von Biogasanlagen ANTON BAUMANN	261
Repowering von Biogasanlagen zur Steigerung der Prozesseffizienz MATHIAS EFFENBERGER, MICHAEL LEBUHN	268
Vom Sorgenkind zum Musterknaben – über das Repowering einer Biogasanlage HANS-WERNER GRESS	281

Poster

Sorghumarten und -sorten – Anbaueignung auf Brandenburger Böden MANUELA MÄRTIN, GERT BARTHELMES	286
Biogas- und Methanerträge verschiedener Fruchtarten unter besonderer Berücksichtigung des Anbausystems und des Flächenertrages FRANK HENGELHAUPT, KATJA GÖDEKE, CHRISTOPH STRAUSS.....	288
Sommergetreide im Zweitfruchtanbau für die Biogasnutzung EGON JANSSEN, CHRISTINA SCHMIDT, ROLF RAUBER.....	290
Artenreiches Grünland für die Biogaserzeugung? JOHANNES ISSELSTEIN, DOROTHEE EBELING, BJÖRN BUGDAHL, EGON JANSSEN	291
Sorghum für Biogas – Ergebnisse des bayernweiten Sortenvergleichs 2010 KAREN ZEISE, MAENDY FRITZ	292
Weidelgras-Untersaat in Wintergetreide zur Ganzpflanzensilagen- Nutzung für die Biogasproduktion DOROTHEA HOFMANN, EWALD STICKSEL, ALOIS AIGNER, GEORG SALZEDER, JOACHIM EDER.....	294

Wickroggen zur Biogasnutzung KATHRIN DEIGLMAYR, FRANZ HEIMLER, MAENDY FRITZ.....	296
Arten- und Sortenwahl bei Wintergetreide zur GPS-Nutzung CHRISTINE RIEDEL, DOROTHEA HOFMANN, EWALD STICKSEL, JOACHIM EDER.....	298
Energiepflanzen für warm-trockene, leichte D-Standorte JANA GRUNEWALD, KERSTIN JÄKEL, ANNETTE SCHAEFF	300
Fruchtfolgen mit Energiepflanzen zur Biogas­erzeugung auf ostdeutschen Diluvialstandorten GUNTER EBEL, GERT BARTHELMES	304
Bioenergetische Nutzungskonzepte für kontaminierte landwirtschaftliche Standorte BENEDIKT SAUER, HANS RUPPERT.....	306
Konflikt und Konkurrenz zwischen der Produktion nachwachsender Rohstoffe für die Biogas­erzeugung und den Produktionssystemen der Nutz­tierhaltung in der intensiven Veredelungsregion Weser-Ems FELIX GARLIPP, CLAUS WÖSTE, PETER STYPEREK, HERMAN VAN DEN WEGHE.....	308
Fruchtfolgen mit Energiepflanzen – Ökonomische Untersuchungen auf Schlagebene HAGEN HARTMANN, HORST-HENNING STEINMANN.....	310
Optimierung der Anbautechnik Ganzpflanzengetreide für die Biogas­erzeugung GUNTER EBEL, GERT BARTHELMES	312
Fruchtfolgen aus Energiepflanzen – ein Beitrag zur Reduktion von Pflanzenschutzmitteleinsätzen und phytomedizinischen Risiken BÄRBEL GEROWITT, HAGEN HARTMANN, HORST-HENNING STEINMANN, BECKE STREHLOW, CHRISTINE STRUCK, ANDREAS VON TIEDEMANN, MARK WINTER....	315
Fruchtfolgen mit Energiepflanzen: Grünroggen und Mais im Zweitfruchtanbau – ein phytomedizinisches Risiko? MARK WINTER, ANDREAS VON TIEDEMANN	317
Auswirkungen des Energiepflanzenanbaus auf das Fruchtfolge- und Pflanzenschutzmanagement in landwirtschaftlichen Betrieben – Ergebnisse einer empirischen Studie HAGEN HARTMANN, CHRISTIAN SCHAPER, HORST-HENNING STEINMANN, LUDWIG THEUVSEN	319

Grundwasserschonender Biomasseanbau nach den Anforderungen der EG-Wasserrahmenrichtlinie (EG-WRRL)	
CHRISTINE VON BUTTLAR, BIRGIT KRÄLING, MATTHIAS WILLMS	320
Optimierung der nachhaltigen Biomassebereitstellung von repräsentativen Dauergrünlandtypen für die Biogasproduktion (GNUT – Biogas)	
FLORIAN SCHMIDT, KATJA GÖDEKE, HANS HOCHBERG.....	323
Stoffströme – Möglichkeiten zur Reduktion von Bilanzüberschüssen in Hochverdichtungsräumen (Weser-Ems) der Nutztierhaltung in Verbindung mit der Biogasproduktion	
FELIX GARLIPP, MATHIAS BEERMANN, PETER STYPEREK, HERMAN VAN DEN WEGHE	325
Treibhausgasbilanz der Biogasproduktion unter den Anbaubedingungen Schleswig-Holsteins	
SANDRA CLAUS, BABETTE WIENFORTH, KLAUS SIELING, HENNING KAGE, FRIEDHELM TAUBE, ANTJE HERRMANN	327
Energiepflanzenanbau und energetische Konversion im Klimawandel – Anpassungsstrategien und Bewertung der ökologischen und energetischen Effizienz am Beispiel der Metropolregion Hannover – Braunschweig – Göttingen – Wolfsburg	
CHRISTINE VON BUTTLAR, DANIELA DRESSLER, ROLAND BAUBÖCK, MARIANNE KARPENSTEIN-MACHAN, ACHIM LOEWEN	328
Eine Option für die Biogasanlage – die durchwachsene Silphie (<i>Silphium perfoliatum L.</i>)	
MICHAEL CONRAD, ANDREA BIERTÜMPFEL	331
Rüben als Zukunftssubstrat für Biogasanlagen – Ergebnisse aus der großtechnischen Nutzung in einer Biogasanlage zur Optimierung der Rohbiogasproduktion zur Gaseinspeisung in das Erdgasnetz	
RALPH SUTTER, MICHAEL NELLES, JAN LIEBETRAU, FRANK SCHOLWIN.....	332
Grünlandaufwüchse zur Biogasproduktion – Einfluss des Schnittzeitpunktes auf den Methanhektarertrag	
BJÖRN BUGDAHL, JOBST VOLGER, JOHANNES ISSELSTEIN, EGON JANSSEN.....	334
Biogas aus Betarüben – Zucker- und Futterrüben im Vergleich	
PHILIPP STARKE, CHRISTA HOFFMANN	335

Winterrüben für die Biogasanlage – Roh Nährstoffzusammensetzung schossender Zuckerrüben JENS LOEL, CHRISTA HOFFMANN.....	337
Wirtschaftlichkeit des Einsatzes von Grassilage in der Biogasproduktion: Analyse für einen Beispielbetrieb in Südniedersachsen CARSTEN H. EMMANN, CHRISTOPH GELLERMANN, LUDWIG THEUVSEN	338
Aufbereitung und Fermentation von Mais- und Getreidestroh für die Biogaserzeugung LIANE MÜLLER.....	339
Thermischer Aufschluss von Biogassubstraten bei Temperaturen unter 100 °C PETRA ZIGLDRUM, JÜRGEN SITZMANN, CAROLA BURKHARD	340
Methanertrag und Energiebilanz der Bioextrusionsvorbehandlung von Grünabfällen als Biogassubstrat RAINER BOLDUAN, MATHIEU BRULÉ, TATIANA DEMEUSY, PASCAL SCHLAGERMANN, GEROLD GÖTTLICHER, STEFFEN EISSLER, HANS OECHSNER	343
Mehr Methan pro Hektar durch Bioextrusion® THILO LEHMANN.....	346
Monofermentation von Maissilagen aus Standorten unterschiedlicher Bodenbeschaffenheit GARNET WACHSMANN, ANDREAS KRIEG, GERD-RAINER VOLLMER.....	349
Praxisversuch zur Steigerung der Faulraumbelastung in landwirtschaftlichen Biogasanlagen bis 19,4 kg oTS/(m ³ · d) PETRA ZIGLDRUM	352
Biologische Aktivität und Spurenelementkonzentrationen in Biogasfermentern NILS ENGLER, UTE MERRETTIG-BRUNS, ADAM FEHER, THOMAS FRITZ, MICHAEL NELLES.....	353
Spurenelemente in Biogasanlagen: Eine ausreichende Versorgung durch Zufuhr unterschiedlicher Energiepflanzenmischungen oder Gülle ist möglich BENEDIKT SAUER, HANS RUPPERT.....	356

Biomasserrückhaltung mithilfe magnetischer Aufwuchsträger PATRICE RAMM, CARSTEN JOST, JAN MUMME, ELISABETH NEITMANN, ULRICH SOHLING, FRIEDRICH RUF, KARL WEINBERGER, OLIVER MENHORN	358
Betone für biogenen Säureangriff im Landwirtschaftsbau ANDREAS KÖNIG, FRANK DEHN	359
„METHANOS“ – Mikroorganismen zur signifikanten Erhöhung der Effizienz von Biogasanlagen MONIKA REUTER, DORIS SCHMACK.....	360
Untersuchungen zur Wirkung von Prozesshilfsstoffen auf die Abbaukinetik des Welschen Weidelgrases CLAUDIA DEMMIG, FRANK HÖPPNER, MICHAEL NELLES.....	362
Substratausnutzung in Biogasanlagen mit und ohnegasdichtem Gärrestbehälter FRIEDRICH WEISSBACH, NILS ENGLER, STEFANIE WESSELING	365
Methanverluste von Gärresten unter Praxisbedingungen SIMON BOLLI, ALINA SOLTERMANN, LUDO VAN CAENEGEM, MATTHIAS SCHICK.....	369
Emissionen klimarelevanter Treibhausgase während der Biogas- Gärrestlagerung JAN REENT KÖSTER, ANDREAS PACHOLSKI, O. TOM DENMEAD, DELI CHEN, HENNING KAGE, KARL HERMANN MÜHLING, KLAUS DITTERT.....	371
Geruchserhebungen bei Betrieben mit landwirtschaftlichen Biogasanlagen KERSTIN MAGER, MARGRET KECK, SABINE SCHRADER.....	372
NH ₃ -Emissionen nach Gärrestapplikation und Ertragspotenziale verschiedener Biogas-Anbausysteme in der Marschregion Schleswig-Holsteins ROBERT QUAKERNACK, ANNA TECHOW, ANTJE HERMANN, FRIEDHELM TAUBE, HENNING KAGE, ANDREAS PACHOLSKI.....	374
Quantifizierung der kurzfristigen N-Düngewirkung von Biogas- Gärresten aus verschiedenen Biogasproduktionssystemen auf einem Marschstandort ANNA TECHOW, ROBERT QUAKERNACK, ANDREAS PACHOLSKI, HENNING KAGE, FRIEDHELM TAUBE, ANTJE HERRMANN	376

Effizienzsteigerung bei der Verwertung von Wirtschaftsdüngern HAUKE BRONSEMA, SYLVIA WARNECKE, MARKUS BIBERACHER, HANS-JÖRG BRAUCKMANN, GABRIELE BROLL, LUDWIG THEUVSEN.....	378
Pflanzenbauliche Verwertung von Gärresten als organische Dünger innerhalb einer Energiepflanzen-Fruchtfolge BEATE FORMOWITZ, MAENDY FRITZ	380
Humusreproduktion von Gärprodukten aus Biogasanlagen KAREN SENSEL, KERSTIN NIELSEN, VERENA WRAGGE	382
Potenzielle Wertschöpfung für Biogasanlagenbetreiber durch die Aufbereitung von Fermentierungsabfällen zu Brennstoff oder zu lagerfähigem Dünger SWANTJE MIGNON SCHLEDERER	384
Ökonomische Beurteilung von Wärmenutzungskonzepten für Biogasanlagen CLEMENS FUCHS, JOACHIM KASTEN, JOCHEN BLANKEN, ROBERT BELOW.....	386
Einfluss der Biogasproduktion auf den Landpachtmarkt in Niedersachsen CARSTEN H. EMMANN, CORD-HERWIG PLUMEYER, LUDWIG THEUVSEN.....	389
Durchführung einer ökobilanziellen Bewertung von Biogasanlagen unter Berücksichtigung der niedersächsischen Verhältnisse MEIKE SCHMEHL, MARTINA HESSE, JUTTA GELDERMANN	391
Modellbasierte Optimierung der Biogasnutzung im deutschen Energiesystem DAVID BALUSSOU, TOBIAS HEFFELS, RUSSELL MCKENNA, WOLF FICHTNER.....	392
Steuerbare und bedarfsorientierte Stromerzeugung aus Biogas WIEBKE BEYRICH, UWE HOLZHAMMER	394
Anschriften der Autoren.....	396
KTBL-Veröffentlichungen	401
aid-Veröffentlichungen.....	405
FNR-Veröffentlichungen	406

Perspektiven der Biogasnutzung als Teil der deutschen Energieversorgung

STEFAN RAUH

1 Einleitung

Die Rolle der Biogasnutzung hat sich in den vergangenen 30 Jahren von einer technischen Basterei einiger Überzeugungstäter zum wichtigen Bestandteil der Energieversorgung in Deutschland entwickelt. Ursächlich hierfür sind die Vorteile, die die Biogasnutzung mit sich bringt. Biogas kommt aufgrund seiner vielfältigen Nutzungsmöglichkeiten zur Strom-, Wärme- und Kraftstofferzeugung eine Sonderrolle zu. Biogas ist der einzige Energieträger, der eine regenerative Alternative zum fossilen Energieträger Erdgas im bestehenden Gasnetz darstellt. Nicht zuletzt bietet Biogas die Möglichkeit, dem Verbraucher bedarfsgerecht oder kontinuierlich Energie zur Verfügung zu stellen. Dies sind besondere Qualitäten des Energieträgers Biogas, die der Gesetzgeber anerkennt und fördert. Das wichtigste Förderinstrument ist hierbei das Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG). Nachdem das EEG im Frühsommer 2011 in einem extrem kurzen Überarbeitungsprozess novelliert wurde, gelten ab dem 01.01.2012 neue Rahmenbedingungen für Biogasanlagen. Die Entwicklung der Branche wird dadurch maßgeblich beeinflusst werden.

Neben den Neuerungen auf der Erlösseite spielt auch die Kostenseite eine wichtige Rolle, wenn es darum geht, die Weiterentwicklung der Biogasbranche abzuschätzen. Vor allem die Trends auf den Agrarmärkten sind hier von besonderer Bedeutung. Es gilt zu bedenken, dass über 50 Prozent der jährlichen Ausgaben einer Biogasanlage der Substratbeschaffung dienen. Die Substratverfügbarkeit bestimmt damit letztendlich die Potenziale der Biogaserzeugung in der Zukunft.

2 Branchenentwicklung in den zurückliegenden Jahren

Welch großen Einfluss der vom Gesetzgeber vorgegebene Rahmen auf die Entwicklung der Biogasbranche hat, verdeutlicht die Entwicklung der letzten Jahre. Erst mit der Verabschiedung des Stromeinspeisungsgesetzes 1991 wurde die vorrangige Einspeisung und Vergütung von Strom aus erneuerbaren Energien gegenüber fossiler Energie geregelt. Abgelöst wurde es im Jahr 2000 durch das Erneuerbare-Energien-Gesetz, welches in den Jahren 2004 sowie 2009 novelliert wurde. Eine dritte Novelle wurde am 30.06.2011 im Bundestag und am 08.07.2011 im Bundesrat verabschiedet.

Als im Jahr 1992 der Fachverband Biogas gegründet wurde, gab es in Deutschland rund 140 Biogasanlagen. Diese Zahl stieg bis zum Jahr 2000 mit einer anfänglich recht moderaten Entwicklung auf mehr als 1 000 Anlagen an, die über eine installierte elektrische Leistung von insgesamt 65 MW verfügten. Diese Entwicklung setzte sich in den kommenden Jahren beschleunigt fort. Im Jahr 2010 konnten bereits 5 900 Biogasanlagen und 2 290 MW installierte elektrische Leistung verzeichnet werden. Für das Jahr 2011 prognostiziert der Fachverband Biogas eine Gesamtanzahl in Höhe von 7 000 Biogasanlagen und eine installierte elektrische Leistung von 2 728 MW.

Bei der Betrachtung des jährlichen Zubaus ergibt sich ein differenzierteres Bild. So waren in einzelnen Jahren enorm hohe und in anderen Jahren erstaunlich niedrige Zuwächse zu beobachten (Abb. 1).

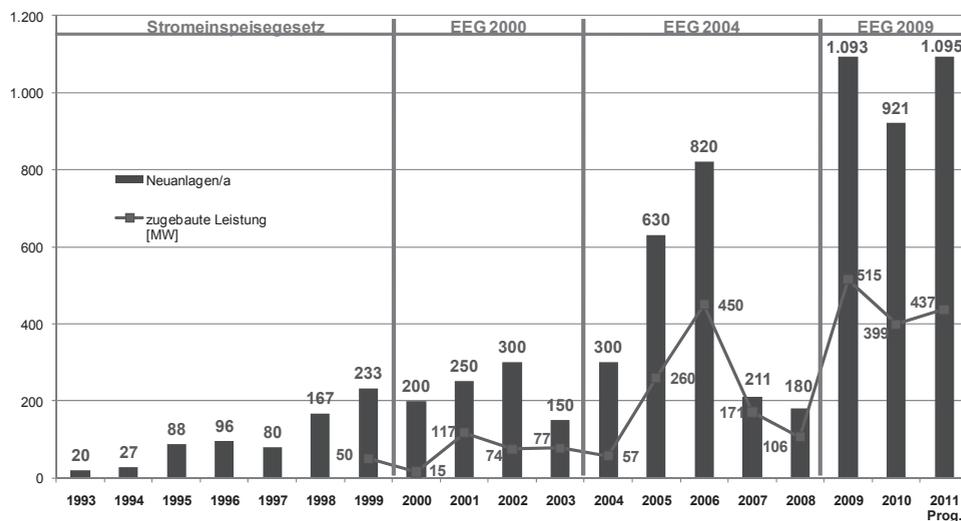


Abb. 1: Entwicklung des Anlagenzubaus und der zugebauten elektrischen Leistung je Jahr in Abhängigkeit vom gesetzlichen Rahmen

Die Einflüsse für diesen Verlauf können im Einzelnen recht unterschiedlich sein, stimmen aber in der Grundtendenz mit den jeweiligen Novellierungen des EEG überein. So ist ein Anstieg des Zubaus zu beobachten, wenn durch den ausgestalteten gesetzlichen Rahmen eine wirtschaftlich interessante Investitionsalternative geboten wird. Durch die Einführung des NawaRo-Bonus im EEG 2004 erfuhr die Biogasbranche enormen Auftrieb. Zurückhaltende Entwicklungen lassen dagegen Rückschlüsse auf ein schlechtes Investitionsklima aufgrund einer ungünstigeren gesetzlichen Lage schließen. Weitere Einflussfaktoren auf die Biogasbranche sind natürlich auch die Preisentwicklung der einzusetzenden Substrate sowie die Haltung der Gesellschaft gegenüber der Biogastechnologie. Deutlich wurde dies in der öffentlich umfassend diskutierten Frage „Teller oder Tank?“,

welche den Einsatz der Substrate in Biogasanlagen aus ethischer Sicht thematisierte. Diese Gründe sowie die anstehende Novelle führten in den Jahren 2007 und 2008 zu einer sehr zurückhaltenden Branchenentwicklung. Mit dem Inkrafttreten des EEG 2009 entlud sich diese Zurückhaltung in einem Bauboom. Es wurden 2009 knapp 110 Biogasanlagen angeschlossen, deren elektrische installierte Leistung 516 MW umfasste. Ursächlich hierfür ist die Ausgestaltung des EEG 2009, das sich hinsichtlich der Systematik gegenüber jenem aus dem Jahr 2004 nur wenig unterscheidet, aber aufgrund des Gülle-Bonus eine bessere Vergütung gewährleistete. Da sich viele Landwirte die guten Konditionen des EEG 2009 in diesem Jahr noch sichern wollen, geht der Fachverband Biogas e.V. davon aus, dass im Jahr 2011 weitere 1100 Anlagen mit knapp 440 MW installierter elektrischer Leistung ans Netz gehen werden.

3 Perspektiven der Biogasnutzung in Deutschland

3.1 Biogas im EEG 2012

3.1.1 Regelungen im EEG 2012

Mit der diesjährigen Novelle verabschiedet sich der Gesetzgeber von der Vergütungsstruktur des EEG 2009. Das EEG 2009 blieb dahingegen bei der Struktur des EEG 2004, welche lediglich durch zusätzliche Boni ergänzt wurde. Im EEG 2012 ist diese Struktur gänzlich überarbeitet worden (Tab. 1).

Eine Vielzahl der ehemaligen Boni (Technologie-, Landschaftspflege- und KWK-Bonus) wurden im Zuge der Novellierung gestrichen und gehen nun in der leicht erhöhten Grundvergütung auf. Gleichzeitig wurde eine Leistungsstufe bei 750 kW eingeführt. Der Erhalt der Vergütung ist allerdings an mehrere Anforderungen gebunden. Die Anlage erhält nur eine Vergütung, wenn im Inbetriebnahmehjahr sowie dem darauf folgenden Jahr mindestens 25 % des Stroms in Kraft-Wärme-Kopplung erzeugt werden. Danach erhöht sich die Wärmeanforderung auf 60 %. Alternativ zu dieser Vorgabe kann der Vergütungsanspruch auch durch einen Mindestgülleinsatz von mindestens 60 Masseprozent erfüllt werden. Gleichzeitig darf der Einsatz von Mais oder Getreide 60 Masseprozent nicht überschreiten. Zusätzlich zur Grundvergütung ist eine Zusatzvergütung in Abhängigkeit vom Eingangssubstrat möglich. Je nachdem in welcher Einsatzstoffvergütungsklasse ein Substrat eingeordnet ist, wird eine Zusatzvergütung in Höhe von 6 oder 8 ct/kWh gewährt. Die Vergütung, welche zur Grundvergütung addiert wird, richtet sich nach der aus den jeweiligen Substraten erzeugten Strommenge. Neu ist zudem die Revidierung des Ausschließlichkeitsprinzips, wodurch NawaRo und Abfälle gleichermaßen eingesetzt werden können, ohne den Wegfall des Vergütungsanspruchs befürchten zu müssen, wie das ehemals im EEG 2009 der Fall war.

Tab. 1: EEG 2012 Vergütungsstruktur

Leistungs- klassen kW	Grund- vergütung ¹⁾ ct/kWh	Einsatzstoff- vergütungs- klasse I ¹⁾ ct/kWh	Einsatzstoff- vergütungs- klasse II ¹⁾ ct/kWh	Vergütung für Vergärung von Bioabfällen ⁵⁾ ct/kWh	Gasaufbereitungs- bonus ⁶⁾
≤ 75		25 ²⁾		-	
≤ 150	14,30	6	8	16	3 ct/kWh bis 700 Nm ³ /h
≤ 500	12,30	6	8	16	2 ct/kWh bis 1 000 Nm ³ /h
≤ 750	11	5/2,50 ³⁾	8/6 ⁴⁾	14	1 ct/kWh bis 1 400 Nm ³ /h
≤ 5 000	11	4/2,50 ³⁾	8/6 ⁴⁾	14	Nennleistung der Gasauf- bereitungsanlage
≤ 20 000	6	0	0	14	

1) Der Vergütungsanspruch besteht in der genannten Höhe nur, wenn und solange 1. mindestens a) 25 % bis zum Ende des ersten auf die erstmalige Erzeugung von Strom in der Anlage folgenden Kalenderjahres und danach b) 60 % des in dem jeweiligen Kalenderjahr in der Anlage erzeugten Stroms in Kraft-Wärme-Kopplung nach der Maßgabe der Anlage 2 zum EEG 2012 erzeugt wird; hierbei wird im Fall der Stromerzeugung aus Biogas die Wärme in Höhe von 25 Prozentpunkten des in Kraft-Wärme-Kopplung erzeugten Stroms zur Beheizung des Fermenters angerechnet, oder 2. der Strom in Anlagen erzeugt wird, die Biogas einsetzen, und zur Erzeugung des Biogases in dem jeweiligen Kalenderjahr durchschnittlich ein Anteil von Gülle von mindestens 60 Masseprozent eingesetzt wird. Der Vergütungsanspruch gilt ferner in der genannten Höhe nur, wenn die Anlagenbetreiber durch eine Kopie eines Einsatzstoff-Tagebuchs mit Angaben und Belegen über die Art, Menge und Einheit sowie Herkunft der eingesetzten Stoffe den Nachweis führen, welche Biomasse eingesetzt wird und, dass keine anderen Stoffe eingesetzt werden, und für Strom 1. aus Anlagen, die Biogas einsetzen, nur, wenn der zur Erzeugung des Biogases eingesetzte Anteil von Mais (Ganzpflanzen(silage), CCM, Lieschkolbenschrot) und Getreidekorn einschließlich Körnermais in jedem Kalenderjahr insgesamt höchstens 60 Masseprozent beträgt, 2. aus Anlagen, die Biomethan nach § 27c Absatz 1 (aus dem Erdgasnetz) einsetzen, soweit der Strom in Kraft-Wärme-Kopplung nach Maßgabe der Anlage 2 zu diesem Gesetz erzeugt wird.

2) Gilt nur bei Vor-Ort-Verstromung und beim Einsatz von mindestens 80 Masseprozent Gülle (= Rindergülle/-festmist, Pferdemist, Schafmist, Ziegenmist) im Durchschnitt des jeweiligen Kalenderjahres. Die Vergütung kann nicht mit anderen Vergütungen der Tabelle kombiniert werden. Maßgeblich ist die am Standort der Biogaserzeugungsanlage installierte Leistung und nicht die Bemessungsleistung (= eingespeiste kWh/8 760 Jahresstunden), d. h. keine Anteiligkeit für Anlagen > 75 kW.

3) Die Absenkung auf 2,5 ct/kWh gilt nur für Strom aus Rinde oder Waldrestholz, das nicht der Definition von Nr. 25 der Anlage 2 entspricht.

4) Die Absenkung auf 6 ct/kWh gilt nur für Strom aus Gülle im Sinne der Nummern 3, 9, 11 bis 15 der Anlage 3 (= Geflügelmist/-trockenkot, Rindergülle/-festmist, Schweinegülle/-festmist, Pferdemist, Schafmist, Ziegenmist).

5) Gilt nur für Strom aus Anlagen, die im Kalenderjahr durchschnittlich mindestens 90 Masseprozent Bioabfälle im Sinne der Abfallschlüsselnummern 20 02 01 (biologisch abbaubare Abfälle), 20 03 01 (gemischte Siedlungsabfälle) und 20 03 02 (Marktabfälle) einsetzen und die Einrichtungen zur anaeroben Vergärung der Bioabfälle unmittelbar mit einer Einrichtung zur Nachrotte der festen Gärrückstände verbunden sind und die nachgerotteten Gärrückstände stofflich verwertet werden. Die Vergütung kann nicht mit anderen Vergütungen der Tabelle kombiniert werden. Anlagen, die vor dem 1. Januar 2012 in Betrieb genommen worden sind und die Bedingungen erfüllen, können die „Bioabfallvergütung“ in Anspruch nehmen.

6) Der Anspruch auf den Gasaufbereitungsbonus nach § 27c Absatz 2 besteht für Strom, der in Anlagen mit einer Bemessungsleistung bis einschließlich 5 MW erzeugt wird, soweit das Gas nach § 27c Absatz 1 eingespeist und vor der Einspeisung in das Erdgasnetz aufbereitet wurde und nachgewiesen wird, dass folgende Voraussetzungen eingehalten wurden:

1. Methanemissionen in die Atmosphäre bei der Aufbereitung von höchstens 0,2 %,
2. ein Stromverbrauch für die Aufbereitung von höchstens 0,5 kWh pro Normkubikmeter Rohgas,
3. Bereitstellung der Prozesswärme für die Aufbereitung und die Erzeugung des deponie-, Klär- oder Biogases aus erneuerbaren Energien, Grubengas oder aus der Abwärme der Gasaufbereitungs- oder Einspeiseanlage ohne den Einsatz zusätzlicher fossiler Energie und
4. eine Nennleistung der Gasaufbereitungsanlage von höchstens 1 400 Normkubikmetern aufbereitetem Deponiegas, Klärgas oder Biogas je Stunde.

Quelle: Fachverband Biogas e.V. Stand: 08.07.2011; keine Gewähr für die Richtigkeit der Angaben

Neben der gerade dargestellten „normalen“ Vergütungssystematik wurden zwei Sondervergütungsklassen neu geschaffen. Entsprechend einer Forderung des Fachverbands Biogas e.V. wurde eine gezielte Förderung von kleinen, güllebasierten Biogasanlagen mit einer maximalen installierten Leistung von 75 kW eingeführt. Voraussetzung für die Vergütungszahlungen dieser Leistungsklasse sind die Vor-Ort-Verstromung und der Einsatz von über 80 Masseprozent Gülle. Ziel dieser Änderung ist es, die Anzahl kleiner Biogasanlagen in landwirtschaftlichen Betrieben zu erhöhen, da diese aufgrund der Größenbeschränkung zumeist standortangepasst gebaut werden und durch den vermehrten Gülleeinsatz wirkungsvoll THG-Emissionen reduzieren und dadurch effektiv zum Klimaschutz beitragen können.

Die zweite Sonderklasse im EEG 2012 umfasst die sogenannten Bioabfallvergärungsanlagen. Damit Abfallanlagen die im Vergleich zur regulären Vergütung erhöhten Sätze beziehen können, müssen sie im Jahresdurchschnitt mindestens 90 Masseprozent Bioabfälle einsetzen, die mit definierten Schlüsselnummern belegt sind. Der Vergärung muss eine Nachrotte nachgeschaltet sein.

Für Stromerzeugungsanlagen, die Biomethan einsetzen, ist zusätzlich noch ein Gasaufbereitungsbonus vorgesehen. Die Höhe des Gasaufbereitungsbonus richtet sich nach der Nennleistung der Gasaufbereitungsanlage und kann bis zu einer maximalen Nennleistung in Höhe von 1 400 Nm³/h sowie einer Anlagenbemessungsleistung von 5 MW in Anspruch genommen werden.

3.1.2 Einschätzung der Wirkung des EEG 2012 auf die Biogasbranche

Mit der Novelle des EEG hat der Gesetzgeber die Vergütungshöhe im Bereich bis 500 kW z.T. deutlich reduziert, während im oberen Leistungsbereich sogar eine Besserstellung vorgenommen wurde (Tab. 2).

Tab. 2: Vergleich der EEG-Vergütung bei unterschiedlichen Anlagengrößen

	Vergütung [ct/kWh]		
	150-kW-Anlage	500-kW-Anlage	1 000-kW-Anlage
EEG 2009	23,4	20,8	17,2
EEG 2012	20,5	19,1	17,6
Veränderung	-13 %	-8 %	+2 %

Anmerkungen: Berechnung unter Annahme einer Wärmenutzung, die den Anforderungen des EEG 2012 entspricht.
Quelle: Eigene Berechnungen

Schon allein dieser Umstand legt die Vermutung nahe, dass sich im niedrigeren Leistungsbereich der Zubau in Zukunft verlangsamten wird. Viel kritischer zu sehen ist aber die oben beschriebene verpflichtende Wärmenutzung von 60 %. Eine Finanzierung von Biogasprojekten wird hierdurch in Frage gestellt, da die Wärmeanforderung in der Rea-

lität kaum zu erfüllen ist. Es besteht immer die Gefahr, dass ein Wärmeabnehmer wegbriecht (z.B. Insolvenz eines Industriebetriebs, der Wärme abgenommen hat; milde Winter), wodurch die 60 % in einem Jahr unterschritten werden und damit der komplette Vergütungsanspruch für das entsprechende Jahr wegfallen würde. Gegen dieses Risiko kann sich der Anlagenbetreiber in aller Regel nicht absichern und wird dadurch gleichermaßen erpressbar.

Aus diesem Grund werden Biogasprojekte auf Wärmenutzungen der Positivliste zurückgreifen (z.B. Holz Trocknung), deren Sinnhaftigkeit nicht in jedem Fall gegeben ist. Hier kann sich der Anlagenbetreiber sicher sein, die Wärmeanforderung zu erfüllen. Vorhandene Wärmesenken in der Nähe der Biogasanlage werden unter Umständen nicht erschlossen. Deshalb wäre es sinnvoller gewesen, die Nutzung von Wärme durch Anreize zu belohnen. Der bisherige KWK-Bonus im EEG 2009 hat sich weitgehend als Anreiz für die Wärmenutzung bewährt und hätte beispielsweise um ein Effizienzkriterium erweitert werden können.

Schwierig abzuschätzen ist die Attraktivität der neuen Vergütungsklasse der Güllekleinanlagen bis 75 kW. Alle Biogasanlagen und damit auch dieser Anlagentypus müssen die Anforderungen im EEG hinsichtlich der Abdeckung der Gärrestlager einhalten. Gefordert wird, dass alle neu errichteten Gärrestlager gasdicht ausgeführt werden müssen und gleichzeitig eine Mindestverweildauer im gasdichten Raum von 150 Tagen nachgewiesen werden muss. Biogasanlagen mit hohen Gülleanteilen weisen große Behältervolumina auf, deren Errichtung aufgrund der genannten Anforderungen sehr kostenintensiv ist. Es ist deshalb fraglich, ob die garantierten 25 ct/kWh tatsächlich ausreichen, um einen Investitionsanreiz zu setzen. Nach Einschätzung des Fachverbands Biogas e.V. und auch anderer Experten wären mindestens 27 ct/kWh erforderlich gewesen. Es wird sich zeigen, inwieweit sich kostengünstigere Anlagenkonzepte in dieser Anlagenklasse entwickeln.

Eine Chance besteht sicher für Tierhaltungsbetriebe, die in der Biogasanlage ausschließlich flüssige Gülle mit weniger als 15 % Trockenmasse einsetzen. Der Gesetzgeber hat für diesen Sonderfall die Pflicht der Gärrestlagerabdeckung nicht vorgesehen. Betriebe mit mehr als 400 Großvieheinheiten, wie sie vor allem im Norden und Osten Deutschlands zu finden sind, haben damit die interessante Option die vorhandene Gülle ohne übermäßige Investitionen zu vergären und trotzdem eine vernünftige Anlagengröße zu realisieren.

Im Bereich der Vergärung von Bioabfällen werden Neuanlagen ab dem 01.01.2012 vergütungstechnisch bessergestellt als Altanlagen. Das gilt sowohl für „reine Bioabfallvergärungsanlagen“ als für Anlagen in der normalen Systematik, die zudem NawaRo einsetzen können und hierfür eine Zusatzvergütung erhalten. Infolge dieser Neuregelung besteht die Gefahr, dass bestehende, auf die Vergärung von Abfällen spezialisierte, Biogasanlagen ihrer Rohstoffbasis beraubt werden. Die höheren Vergütungssätze im EEG

2012 für Abfallstoffe erzeugen zudem Mitnahmeeffekte in der Abfallwirtschaft, welche die EEG-Umlage unnötig erhöhen ohne nennenswerte Mengen an bisher nicht vergorenen Reststoffen in Biogasanlagen zu lenken. Aufgrund dieser Regelung besteht sogar die Gefahr der Quersubventionierung der Abfallwirtschaft.

3.1.3 Situation im Bereich der Gaseinspeisung

Die Gaseinspeisung von aufbereitetem Biogas ins Erdgasnetz wird auch im EEG 2012 durch die Zahlung eines Technologiebonus auf den aus Biomethan erzeugten Strom gefördert. Im Gegensatz zum EEG 2009, in dem bis zu einer Aufbereitungskapazität von 350 Nm³/h Biomethan 2 ct/kWh und darüber bis 750 Nm³/h 1 ct/kWh zusätzlich gewährt wurden, sind es ab nächstem Jahr drei Vergütungsstufen (Tab. 1). Die erste Stufe wird auf 700 Nm³/h nach oben gezogen und ein Bonus von 3 ct/kWh gezahlt. Darüber folgen noch die Grenzen bei 1000 Nm³/h (2 ct/kWh) und 1400 Nm³/h (1 ct/kWh). Damit soll die Wirtschaftlichkeit verbessert werden, sodass eine größere Marktdurchdringung erreicht wird.

Ob diese Maßnahmen ausreichen, darf bezweifelt werden. Der Fachverband Biogas e.V. sieht in diesem Bereich ebenfalls ein hohes Entwicklungspotenzial für die Branche, weshalb er einen Gesetzesvorschlag (EEGasG) zum Marktanschub der Einspeisung und Speicherung von Gas aus erneuerbaren Energien entwickelt hat.

Das EEGasG sieht vor, dass Einspeiser von erneuerbaren Gasen ins Erdgasnetz eine knapp auskömmliche Vergütung erhalten, die ausschließlich die Finanzierung der Investitionen absichert. Die Vergütung soll nach wenigen Anlagengrößenklassen gestaffelt sein und eine an die Entwicklung des Erdgaspreises gekoppelte Marktkomponente enthalten. Das so geförderte und eingespeiste Methan aus Biogas und Wasserstoff verliert seine „grüne“ Eigenschaft und wird einer effizienten Nutzung in Gas- und Dampfkraftwerken (GuD) und KWK-Anlagen zugeführt. Den Kraftwerksbetreibern entstehen keine Mehrkosten, weil sie das EE-Gas zum Erdgas-Marktpreis beziehen. Die Differenz zwischen Biomethan und Erdgaspreis soll über die Stromnetznutzungsentgelte umgewälzt werden. Für Stromverbraucher würde sich keine Erhöhung der Strompreise ergeben, da die Differenzkosten aus dem EEGasG nur die wegfallende KWKG-Umlage ersetzen. Durch den Wegfall der „grünen“ Eigenschaft und die rein investitionssichernde Vergütung entsteht kein (Förder-)Wettbewerb zu bestehenden gesetzlichen Rahmenbedingungen (EEG, EEWärmeG, Biokraftstoffquotengesetz). Mit dem EEGasG sollen gerade diese gesetzlichen Nutzungspfade, in denen die „grüne“ Eigenschaft des Biogases bzw. der EE-Gase beigehalten wird, stimuliert und erleichtert werden. Auch ein Wechsel zwischen den Systemen ist möglich.

3.2 Agrarmärkte als entscheidender Einflussfaktor auf die Entwicklung der Biogasbranche

Die Entwicklung der Biogasbranche wird, wie gerade dargestellt, entscheidend von den politischen Rahmenbedingungen geprägt. Allerdings sind auch die Agrarmärkte ein bedeutender Faktor. Ein Vergleich von Abbildung 1 und 2 zeigt, dass die zurückhaltende Entwicklung in den Jahren 2007 und 2008 trotz identischer gesetzlicher Rahmenbedingungen auch mit den hohen Agrarpreisen in Verbindung gebracht werden kann. In den Hochpreisjahren 2007/2008 ist der Betriebszweig Biogasanlage trotz garantierter Einspeisevergütung nur bedingt wettbewerbsfähig. Die Situation hat sich im darauf folgenden Jahr wieder ins Gegenteil gekehrt. Die niedrigen Agrarpreise im Jahr 2009 haben bedeutenden Anteil am Biogas-Boom in diesem Jahr, wobei auch das novellierte EEG 2009 dazu beigetragen hat.

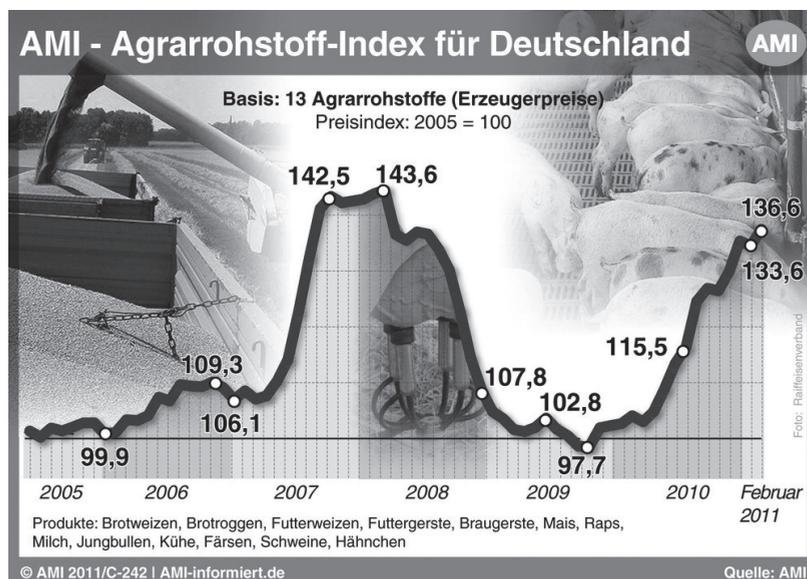


Abb. 2: Entwicklung des Agrarrohstoff-Index in Deutschland (AMI 2011)

Im Frühsommer 2011 zeigt sich wieder ein stark steigender Agrarpreis-Index, sodass die Attraktivität des Neubaus von Biogasanlagen verringert wird. Die schwankenden Agrarpreise zeigen aber auch, wie wichtig die Diversifizierung im landwirtschaftlichen Betrieb in Zukunft wird. Der Betriebszweig Biogas generiert dabei ein zusätzliches Einkommen in Zeiten niedriger Agrarpreise, sodass die Stabilität des Gesamtbetriebes gesteigert wird. Profitieren können hierbei nicht nur Anlagenbetreiber, sondern vielmehr auch Substratlieferanten, die einen Teil ihrer Ernte zu auskömmlichen Preisen veräußern können.

Aufgrund der Volatilität der Märkte ist Anlagenbetreibern zu raten, der Substratversorgung eine hohe Priorität beizumessen. Besonders zu den Konditionen im EEG 2012 bewegt sich der Betreiber nur dann auf der wirtschaftlich sicheren Seite, wenn er die Biogasanlage anhand der am Standort verfügbaren Substrate dimensioniert und weniger stark auf Zukäufe angewiesen ist. In intensiven landwirtschaftlichen Regionen mit begrenzten Flächen sind hier wahrscheinlich kleinere Konzepte vorteilhafter, bei denen hauptsächlich auf Wirtschaftsdünger zurückgegriffen wird. Strukturen, wie sie beispielsweise in Ostdeutschland zu finden sind, sind aber weiter dazu geeignet, NawaRo für den Betrieb einer Biogasanlage in die Fruchtfolge mit einzubauen, da hier der Einzelbetrieb ausreichend Fläche zur Verfügung hat.

3.3 Potenziale für den Ausbau der Biogasproduktion

Unabhängig von den wirtschaftlichen Rahmenbedingungen wird oft die Frage nach den Potenzialen der Biogaserzeugung gestellt (Tab. 3). Ein großer Vorteil der Biogaserzeugung liegt in der großen Vielfalt der einsetzbaren Substrate. Nahezu jede Form von Biomasse lässt sich vergären. Hier lassen sich zwei Hauptsubstratgruppen unterscheiden. Auf der einen Seite die aktiv angebaute Biomasse auf landwirtschaftlichen Flächen und auf der anderen Seite Abfall- und Reststoffe sowie Nebenprodukte der Lebensmittelproduktion. Auf der Basis der Daten des KTBL (2009) für die Potenziale bei den Abfall- und Reststoffen sowie der Annahme eines Anbaus von Energiepflanzen für die Biogasproduktion auf 2 Mio. Hektar kommt der Fachverband Biogas e.V. auf ein aufsummiertes Potenzial von gut 7 800 MW installierbarer elektrischer Leistung. Bei einem Stromeigenbedarf von 8 % sowie 8 000 Volllaststunden könnten somit 57,6 TWh Strom erzeugt werden.

Tab. 3: Biogaspotenzial bis zum Jahr 2020

	Potenzial	
	installierbare Leistung MW	Nettostromproduktion TWh
Energiepflanzen	3 750	27,6
Wirtschaftsdünger (Gülle, Mist usw.)	1 545	11,4
Ldw. Nebenprodukte (Rübenblatt, Stroh usw.)	1 503	11,1
Rein pfl. Nebenprodukte (Rapskuchen usw.)	562	4,1
Bioabfälle	337	2,5
Tier. Nebenprodukte (Tierblut, Fette usw.)	126	0,9
Summe	7 823	57,6

Anmerkungen: Berechnung unter folgenden Annahmen 4 Mio. ha Ackerflächen stehen für den Anbau von Energiepflanzen zur Verfügung, davon 2 Mio. ha für Biogas; 8 000 Volllaststunden und 8 % Eigenstrombedarf.
Quelle: Eigene Berechnungen (KTBL: Die Landwirtschaft als Energieerzeuger, 2009, verändert)

Mit 7 823 MW installierter Biogasleistung können 6 der 17 Atomkraftwerke, welche insgesamt 21 000 MW bereitstellen, ersetzt werden. Allerdings muss bedacht werden, dass es sich hierbei um ein theoretisches Potenzial handelt, da sicher nicht alle Stoffe zu 100 % in eine Biogasanlage wandern werden. Trotzdem zeigt das Ergebnis, dass Biogas sehr wohl in der Lage ist, einen nennenswerten Beitrag zur Stromversorgung aus erneuerbaren Energien zu leisten. Die Bundesregierung formuliert im EEG 2012 ein Ziel von 35 % erneuerbarem Strom bis 2020. Aktuell liegt der Anteil bei 17 %.

4 Zusammenfassung und Ausblick

Bei genauer Betrachtung des EEG 2012 muss bezweifelt werden, dass die Ziele der Energiewende erreicht werden können. Nach Einschätzung des Fachverbands Biogas e.V. bewirken insbesondere der vorgeschriebene Wärmenutzungsgrad sowie die Vorgaben im Bereich der Bioabfallvergärung voraussichtlich nicht die in dem Energiewendepaket vorgesehene Realisierung der nachhaltigen Energieerzeugung im beabsichtigten Zeitraum. Auch vor dem Hintergrund steigender Agrarpreise ist es kaum zu erwarten, dass die Potenziale des regenerativen Energieträgers Biogas ausgeschöpft werden, weder in quantitativer noch in qualitativer Hinsicht.

Die Vorzüge von Biogas, wie die bedarfsgerechte Stromeinspeisung als auch die Bereitstellung von Kraftstoff und Wärme infolge der Biogasnutzung werden so nicht vollständig ausgeschöpft. Das vom Fachverband Biogas e.V. vorgeschlagene Gesetz zum Marktanschub der Einspeisung und Speicherung von Gas aus erneuerbaren Energien könnte hier einen wichtigen Beitrag leisten, damit durch die Nutzung der Durchleitungs- und Speicherkapazitäten des bestehenden Gasnetzes Biogas seinen Beitrag zu einer nachhaltigen und bedarfsgerechten Strombereitstellung leisten kann.

Die Entwicklung von Biogas in Europa

MARC FLEURECK

1 Politik zur Entwicklung des ländlichen Raums 2007–2013

Über 56 % der Bevölkerung der 27 EU-Mitgliedstaaten leben in ländlichen Gebieten, die 91 % der Fläche der EU ausmachen. Daher ist die ländliche Entwicklung ein wichtiger Politikbereich. Die Land- und Forstwirtschaft ist für die Landnutzung und die Bewirtschaftung der natürlichen Ressourcen in den ländlichen Gebieten der EU sowie als Plattform für die wirtschaftliche Diversifizierung in den ländlichen Gemeinden nach wie vor von herausragender Bedeutung. Aus diesen Gründen ist die Stärkung der EU-Politik zur Entwicklung des ländlichen Raums eine übergreifende Priorität der EU.

Die wichtigsten Bestimmungen der Politik für die Entwicklung des ländlichen Raums im Zeitraum 2007-2013 sowie die politischen Maßnahmen, die Mitgliedstaaten und Regionen zur Verfügung stehen, sind in der Verordnung (EG) Nr. 1698/2005 des Rates festgelegt. Zum Verständnis dieses Textes sind die folgenden Definitionen (aus Artikel 2 der Verordnung) zu beachten:

- „Schwerpunkt“: ein kohärentes Bündel von Maßnahmen, die spezifische Zielsetzungen haben, welche sich direkt aus ihrer Umsetzung ergeben und zu einem oder mehreren der in Artikel 4 beschriebenen Ziele beitragen
- „Maßnahme“: ein Bündel von Vorhaben, die zur Umsetzung eines Schwerpunkts im Sinne von Artikel 4 Absatz 2 beitragen
- „Vorhaben“: ein Projekt, ein Vertrag oder eine sonstige Initiative, die nach den im betreffenden Entwicklungsprogramm für den ländlichen Raum festgelegten Kriterien ausgewählt und von einem oder mehreren Begünstigten durchgeführt werden, um die Ziele gemäß Artikel 4 zu erreichen
- „Begünstigter“: ein Wirtschaftsbeteiligter oder eine Einrichtung bzw. ein Unternehmen des öffentlichen oder privaten Rechts, der/die/das mit der Durchführung der Vorhaben betraut ist oder dem/der die finanzielle Förderung gewährt wird.

1.1 Struktur der Politik zur Entwicklung des ländlichen Raums

In der Verordnung (EG) Nr. 1698/2005 wurden für die Politik zur Entwicklung des ländlichen Raums 2007–2013 vier Schwerpunktbereiche, auch „thematische Achsen“ genannt, festgelegt. Diese Bereiche formulieren gleichzeitig die Ziele, zu denen die Förderung der Entwicklung des ländlichen Raums beitragen soll. Es handelt es sich um folgende Themen (ab Artikel 4):

- Verbesserung der Wettbewerbsfähigkeit der Land- und Forstwirtschaft (Schwerpunkt 1)
- Verbesserung der Umwelt und der Landschaft (Schwerpunkt 2)
- Verbesserung der Lebensqualität im ländlichen Raum und Förderung der Diversifizierung der ländlichen Wirtschaft (Schwerpunkt 3).

Um ausgewogene politische Maßnahmen zu gewährleisten, sind die Mitgliedstaaten und Regionen verpflichtet, die Finanzierung ihrer ländlichen Entwicklung zwischen diesen drei thematischen Achsen aufzuteilen.

Es gibt einen vierten Schwerpunkt mit dem Namen „Leader“. Der „Leader-Ansatz“ der ländlichen Entwicklung beruht auf äußerst individuellen Projekten, die von lokalen Partnerschaften für lokale Probleme entwickelt und durchgeführt werden. Er fordert die Entscheidungsgewalt für lokale Aktionsgruppen zur Ausarbeitung und Umsetzung lokaler Entwicklungsstrategien. Eine weitere Anforderung besteht darin, dass ein Teil der Finanzmittel Projekten zukommen muss, die auf den Erfahrungen mit den Leader-Gemeinschaftsinitiativen (1) beruhen.

Wie bis 2007 muss jeder Mitgliedstaat (oder gegebenenfalls die zuständige Region) ein Programm für die ländliche Entwicklung vorlegen, in dem festgelegt ist, welche Finanzmittel im Zeitraum 2007–2013 für welche Maßnahmen ausgegeben werden.

1.2 Förderungsmaßnahmen für erneuerbare Energien im Rahmen der Politik zur Entwicklung des ländlichen Raums

Vor der Gesundheitsprüfung der Gemeinsamen Agrarpolitik (GAP) im Jahr 2008 gewährte die EU eine Energiepflanzenprämie von 45 Euro/ha auf maximal 2 Mio. Hektar Ackerland, um den Landwirten den Anbau von Energiepflanzen auf ihren Betrieben zu ermöglichen. 2009 war das letzte Anwendungsjahr, in dem sich ein Landwirt für diesen Energiepflanzenzuschuss bewerben konnte (2). Auf die gleiche Art und Weise wurde die Stilllegungsverpflichtung als Angebotskontrollmaßnahme abgeschafft, um der EU die schnellere Reaktion auf den Versorgungsbedarf bei Preisanstiegen zu ermöglichen.

Seit der Abschaffung dieser beiden Fördersysteme und nach der Prüfung der Gemeinsamen Agrarpolitik 2008 hat die Politik zur Entwicklung des ländlichen Raums sechs neue Aufgaben bzw. Prioritäten festgelegt (biologische Vielfalt, Wasserwirtschaft, erneuerbare Energien und Klimawandel wurden festgelegt im Rahmen der Gesundheitsprüfung). Darunter erneuerbare Energien (EE) und Klimawandel, bei denen die EU-Co-Finanzierung aus dem Europäischen Landwirtschaftsfonds für die Entwicklung des ländlichen Raums (ELER) möglich wurde. Die Verordnung Nr. 1698/2005 und ihre Änderung (3) beinhalten eine Liste mit den Maßnahmen, den Arten von Vorhaben sowie den erwarteten Ergebnissen beim Anbau von Energiepflanzen und die Verarbeitung von landw. Biomasse zur Produktion von EE (Tab. 1). Bei diesen Maßnahmen werden die Projekte und die zu co-finanzierenden Bedingungen allerdings nicht von der Europäischen Kommission, sondern nach individu-

ellem Bedarf von den Mitgliedstaaten festgelegt. In der Praxis bedeutet das: Jeder Unternehmer in der EU, der vom EU-Fördersystem für die ländliche Entwicklung profitieren möchte, sollte direkt bei seiner für die Förderprogramme 2007–2013 zuständigen Landesbehörde anfragen, welche Maßnahmen auf nationaler Ebene angewandt werden (Tab. 1).

Im Anhang II der novellierten Verordnung Nr. 74/2009 ist eine indikative Liste der Arten der Vorhaben und potenziellen Wirkungen für die sechs Prioritäten nach Artikel 16a aufgeführt (4).

Tab. 1: Anhang II der Verordnung Nr. 74/2009, Priorität: Erneuerbare Energien

Art der Vorhaben	Artikel und Maßnahmen	Potenzielle Wirkung
Biogasproduktion mit organischen Abfällen (betriebliche/örtliche Anlagen)	Artikel 26: Modernisierung landwirtschaftlicher Betriebe Artikel 53: Diversifizierung auf nichtlandwirtschaftliche Tätigkeiten	Ersatz fossiler Brennstoffe, Reduzierung von Methan (CH ₄)
Mehrjährige Energiepflanzen (Niederwald mit Kurzumtrieb und krautige Gramineen)	Artikel 26: Modernisierung landwirtschaftlicher Betriebe	Ersatz fossiler Brennstoffe, Kohlenstoffbindung, Reduzierung von Distickstoffoxid (N ₂ O)
Erneuerbare Energie aus land-/forstwirtschaftlicher Biomasse	Artikel 26: Modernisierung landwirtschaftlicher Betriebe Artikel 28: Erhöhung der Wertschöpfung bei land- und forstwirtschaftlichen Erzeugnissen Artikel 29: Zusammenarbeit bei der Entwicklung neuer Produkte, Verfahren und Technologien in der Land- und Ernährungswirtschaft sowie im Forstsektor Artikel 53: Diversifizierung hin zu nichtlandwirtschaftlichen Tätigkeiten Artikel 54: Förderung von Unternehmensgründung und -entwicklung	Ersatz fossiler Brennstoffe
Anlagen/Infrastruktur für erneuerbare Energien aus Biomasse und anderen erneuerbaren Quellen (Sonnen- und Windenergie, Erdwärme)	Artikel 53: Diversifizierung hin zu nichtlandwirtschaftlichen Tätigkeiten Artikel 54: Förderung von Unternehmensgründung und -entwicklung Artikel 56: Grundversorgung für die ländliche Wirtschaft und Bevölkerung Artikel 30: Infrastruktur im Zusammenhang mit der Entwicklung und Anpassung der Landwirtschaft und der Forstwirtschaft	Ersatz fossiler Brennstoffe
Information und Verbreitung von Wissen über erneuerbare Energien	Artikel 21: Berufsbildung und Informationsmaßnahmen Artikel 58: Ausbildung und Information	Sensibilisierung und Aufklärung und damit indirekt Verstärkung der Wirksamkeit anderer Maßnahmen in Bezug auf erneuerbare Energien

Tab. 2: Maßnahmen für erneuerbare Energien und Biogas

Maßnahme	Titel	Art. Verordnung 1698/2005	Ausschöpfungssatz 2007–2009 ¹⁾
Maßnahme 121	Modernisierung landwirtschaftlicher Betriebe	Artikel 26	22 %
Maßnahme 311	Diversifizierung hin zu nichtlandwirtschaftlichen Tätigkeiten	Artikel 53	6 %
Maßnahme 321	Grundversorgung für die ländliche Wirtschaft und Bevölkerung	Artikel 56	5 %
Maßnahme 312	Unternehmensgründung und -entwicklung	Artikel 54	3 %

¹⁾ ELER-Ausgaben von 2007–2009 und Ausschöpfung.

1.3 Verteilung zusätzlicher Mittel für Programme zur Entwicklung des ländlichen Raums

Nach der Gesundheitsprüfung der Gemeinsamen Agrarpolitik (GAP) wurden 2010 zusätzliche Mittel von insgesamt 5 Mrd. Euro in die Landwirtschaft, die Umwelt und die Breitbandversorgung in ländlichen Gebieten investiert, um Problemen wie Wirtschafts- und Milchkrise oder Klimawandel entgegenzuwirken. Diese Summe enthält auch eine zusätzliche Euromilliarde aus dem Europäischen Konjunkturprogramm (EERP, European Economic Recovery Plan), das als weitere Priorität die Einrichtung und den Ausbau der Breitband-Infrastruktur in ländlichen Gebieten nennt (Abb. 1).

An der länderspezifischen Verteilung ist zu erkennen, dass die beiden osteuropäischen Staaten Rumänien und Bulgarien bei der Gesundheitsprüfung 35 % des Budgets (Ges.-Pr. + EERP) in die Priorität Erneuerbare Energien zu investieren planen, dicht gefolgt von

Verteilung der Mittel für Gesundheitsprüfung und Konjunkturprogramm in den Schlüsselprioritäten [% aller Mittel (4,95 Mrd. Euro)]

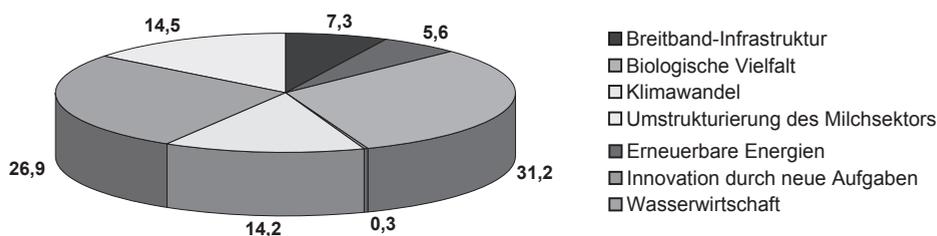


Abb. 1: Verteilung der Mittel für Gesundheitsprüfung der Gemeinsamen Agrarpolitik (GAP) und Konjunkturprogramm in den Schlüsselprioritäten (Quelle: GD AGRI/G1)

Schweden, den Niederlanden und der Tschechischen Republik. Elf Länder wollen gar keine Gelder in EE investieren (Abb. 2).

Gesamtanteil der Mittel für die Priorität Erneuerbare Energien pro Mitgliedstaat (Ges.-Pr. + EERP)

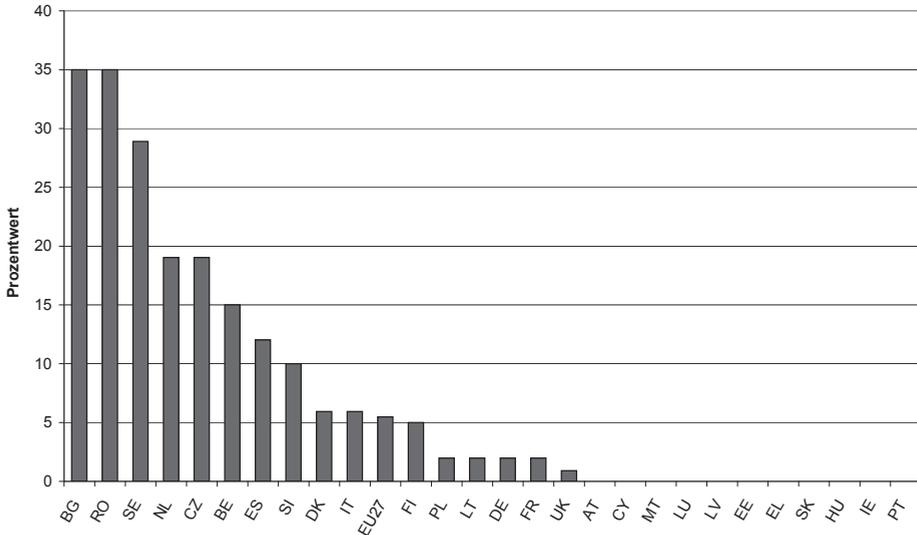


Abb. 2: Gesamtanteil der Mittel für die Priorität Erneuerbare Energien pro Mitgliedstaat (Quelle: Europäische Kommission, GD AGRI)

1.4 Kumulierte ELER-Gesamtausgaben im Vergleich zum Finanzrahmen

Die kumulierten ELER-Gesamtausgaben im Vergleich zum Finanzrahmen für die oben genannten Maßnahmen zur EE-Förderung sind in Tabelle 3 zusammengestellt.

Tab. 3: ELER-Ausgaben 2011 (Q1) im Vergleich zu den Gesamtausgaben

Maßnahme	Titel	Finanzen %	Kumuliert %	Q1 2011 %
Maßnahme 121	Modernisierung landwirtschaftlicher Betriebe	11	13	12
Maßnahme 321	Grundversorgung für die ländliche Wirtschaft und Bevölkerung	3,2	1,6	3,5
Maßnahme 312	Unternehmensgründung und -entwicklung	2,3	0,7	2,1
Maßnahme 311	Diversifizierung hin zu nichtlandwirtschaftlichen Tätigkeiten	1,5	0,7	1,1

1.5 Fördergrundlagen für Investitionen in die EE-Erzeugung auf landwirtschaftlichen Betrieben; neue Entwicklungen in der Anwendung von Regeln über staatliche Beihilfen

Modernisierung landwirtschaftlicher Betriebe (Maßnahme 121)

Die Maßnahme 121 zur Entwicklung des ländlichen Raums („Modernisierung landwirtschaftlicher Betriebe“, Artikel 26 der Verordnung (EG) Nr. 1698/2005) kann Investitionen in EE-Anlagen auf landwirtschaftlichen Betrieben finanzieren. In diesem Rahmen kann nach den Regeln zur staatlichen Agrarbeihilfe (neuer Artikel 42 des Vertrags von Lissabon, vormals Artikel 36 des EG-Vertrags) eine Förderung gewährt werden, solange die produzierte Energiemenge auf den Eigenverbrauch beschränkt ist. Denn eine solche Energiemenge ist im landwirtschaftlichen Produktionszyklus als Zwischenprodukt zu betrachten.

Trotz des steigenden Interesses unter landwirtschaftlichen Betrieben, in die EE-Erzeugung zu investieren, wurde die Ausschöpfung der Maßnahme 121 im Programmzeitraum 2007–2013 durch einige Bedingungen eingeschränkt:

- Die Anlagenkapazität ist begrenzt auf den Eigenverbrauch an Energie auf dem Betrieb (beschränkt auf kleine Anlagen mit einem relativ niedrigen Wirkungsgrad und geringer Rentabilität; die Anlagenkapazität liegt meist weit unter dem eigentlichen Potenzial der betriebseigenen verfügbaren EE-Biomasse) und
- Energie darf nicht über die Grenzen des Betriebs hinaus veräußert werden. So sind praktisch alle EE-Strom erzeugenden Anlagen nicht mehr zuschussfähig, obgleich die Anlagenkapazität geringer ist als der Eigenverbrauch. Da Elektrizität im Gegensatz zu anderen Energiearten nicht gespeichert werden kann, muss der vom Betrieb nicht genutzte Teil entweder vergeudet oder an das Versorgungsnetz verkauft werden. Dabei ist der Ökostrom für Landwirte und für die Umwelt die interessanteste und aussichtsreichste erneuerbare Energieform.

Neben den Verbesserungsmöglichkeiten bei der Ausschöpfung der Hauptmaßnahme zur EE-Förderung wurde im Rahmen der Entwicklung des ländlichen Raums auch diskutiert, ob die Förderung unter Schwerpunkt 1 (Wettbewerb) oder Schwerpunkt 3 (Diversifizierung) oder beidem gewährt werden soll. Es besteht nämlich die Gefahr, dass verschiedene Regeln über die staatliche Beihilfe nicht eingehalten werden und aus diesem Grund eine Wettbewerbsverzerrung entstehen könnte.

Klar ist, dass die Landwirte die weniger strikten Regeln über die staatliche Agrarbeihilfe den allgemeinen Regeln vorziehen würden. Allerdings entstehen Probleme, wenn die produzierte Energie an den Markt verkauft wird, da erneuerbare Energien laut Anhang 1 des EG-Vertrags nicht als landwirtschaftliche Erzeugnisse zu betrachten sind (5).

Das Ergebnis dieser Debatte ist die Klärung der Bedingungen für den Eigenverbrauch in Relation zur produzierten Energiemenge (Strom, Wärme oder Kraftstoff) und zur maximalen Anlagenkapazität. Die Bedingungen sollten gleichzeitig eine gewisse Flexi-

bilität bei der Verwendung der Elektrizität oder Wärme zu Spitzenzeiten ermöglichen. So könnte ein Landwirt, wenn sein Hauptziel der Eigenverbrauch wäre, beispielsweise in eine güllebetriebene Biogasanlage investieren und die Wärme im Winter zum Heizen oder im Herbst zum Trocknen von Getreide nutzen.

Die ELER-Durchführungsbestimmungen werden in Verordnung Nr. 1698/2005 wie folgt geändert:

... zur Änderung der Verordnung (EG) Nr. 1974/2006 mit Durchführungsbestimmungen zur Verordnung (EG) Nr. 1698/2005 über die Förderung der Entwicklung des ländlichen Raums durch den Europäischen Landwirtschaftsfonds für die Entwicklung des ländlichen Raums (ELER)

Es ist möglich, dass Maßnahmen zur Erzeugung EE in landwirtschaftlichen Betrieben gemäß Artikel 26 der Verordnung (EG) Nr. 1698/2005 nicht unter Artikel 42 des Vertrags fallen. Um sicherzustellen, dass die Vorschriften für staatliche Beihilfen im Agrarsektor eingehalten werden, ist eine Sonderbestimmung für Investitionen in die Erzeugung erneuerbarer Energien in landwirtschaftlichen Betrieben festzulegen.

Folgender Artikel 16a wird eingefügt:

Für die Anwendung von Artikel 26 der Verordnung (EG) Nr. 1698/2005 kommen bei Investitionen zur Erzeugung von Wärme und/oder Strom aus erneuerbaren Energieträgern in landwirtschaftlichen Betrieben die Anlagen zur Erzeugung EE nur dann für eine Beihilfe in Betracht, wenn ihre Produktionskapazität nicht größer ist als die Menge Wärme und Strom zusammengenommen, die der landwirtschaftliche Betrieb samt seinem Haushalt jährlich im Durchschnitt verbraucht. Bei Investitionen zur Herstellung von Biokraftstoffen im Sinne der Richtlinie 2009/28/EG (ABl. L 140, 5.6.2009, S.16) in landwirtschaftlichen Betrieben kommen die Anlagen zur Erzeugung EE nur dann für eine Beihilfe in Betracht, wenn ihre Produktionskapazität nicht größer ist als die Kraftstoffmenge, die der landwirtschaftliche Betrieb jährlich im Durchschnitt verbraucht.

Berechnungsbeispiel nach Maßnahme 121

Ausgehend von Investitionsbeispielen aus Italien und genehmigten staatlichen Beihilfen in Spanien kann Maßnahme 121 bis zu 40 % der auf dem Betrieb getätigten Investition finanzieren. Noch größere Anteile sind vorgesehen für Junglandwirte und benachteiligte Gebiete sowie für spezifische EE-Vorhaben. Wie oben erwähnt, sind nur jene EE-Anlagen zuschussfähig, die für den Eigenverbrauch arbeiten. Wenn ein Teil der erzeugten Energie über die Grenzen des Betriebs hinaus verkauft wird, werden die Bedingungen zur staatlichen Agrarbeihilfe nicht mehr erfüllt.

Weitere Förderungsmöglichkeiten

Wenn der Betrieb den Marktverkauf der produzierten Energie als Hauptziel hat, werden die Bedingungen für die staatliche Agrarbeihilfe nicht mehr erfüllt. Dann können die Investitionen in EE-Anlagen nach der Verordnung zur Entwicklung des ländlichen Raums

mit anderen Maßnahmen gefördert werden. Allerdings sind diese meist weniger umfangreich und unterliegen starken Einschränkungen: Maßnahme 311 („Diversifizierung hin zu nichtlandwirtschaftlichen Tätigkeiten“) ist nur auf „ländliche Gebiete“ und in einigen Fällen sogar nur auf bestimmte „Schwerpunktbereiche“ beschränkt – die Beihilfebeträge sind hier eher gering. Das nicht-agrarische De-minimis-Förderprogramm stellt eine weitere Fördermöglichkeit dar, aber der Beihilfebetrags (maximal 200.000 Euro auf drei Jahre) ist zu gering für die Finanzierung einer EE-Anlage von ausreichender Größe. Hilfen aus dem Regionalfonds werden nur in bestimmten Regionen vergeben. Daher ergeben sich für nicht-agrarische staatliche Beihilfen zwei Möglichkeiten:

- Staatliche Umweltschutzbeihilfen (SUB)
- Gruppenfreistellungsverordnung (GFV)

Berechnungsbeispiele

Bei Investitionen, die zur Gründung eines kleinen oder mittleren Unternehmens (KMU) getätigt werden, bewilligen die Leitlinien der SUB bis zu 80 % der Zusatzkosten. Als Zusatzkosten gelten alle Mehrkosten für die EE-Anlage verglichen mit einer konventionellen Anlage ähnlicher Kapazität (bei einer Biogasanlage würde z.B. der Vergleich zu einem Erdgaskraftwerk angestellt). Nicht berücksichtigt werden die zusätzlichen Betriebskosten und Zuschüsse in den ersten fünf Betriebsjahren. Einspeisetarife und grüne Zertifikate gelten dabei als Teil der zusätzlichen Zuschüsse.

Es ergibt sich, dass die Beihilfeintensität (Beihilfebetrags/Gesamtinvestitionskosten) auf die gesamten Investitionskosten hauptsächlich von den Mehrkosten im Vergleich zum Bezugskraftwerk und der tarifären Ebene (oder anderen öffentlichen Betriebsprämien) abhängt. Daher wird die Beihilfeintensität für die Gesamtinvestitionskosten in Mitgliedstaaten mit hohen Einspeisetarifen niedrig, und in Mitgliedstaaten mit keinen oder geringen Einspeisetarifen höher sein.

Der Artikel 23 der GFV (Verordnung Nr. 800/2008 der Kommission, die Ende 2013 ausläuft) über Investitionsbeihilfen zur Förderung EE hält fest, dass KMU mit bis zu 65 % der zuschussfähigen Zusatzkosten gefördert werden können. In diesem Fall enthalten die zuschussfähigen Zusatzkosten – im Vergleich zum konventionellen Bezugskraftwerk – nicht die Betriebsprämien und -kosten. Daher ist die endgültige Beihilfeintensität für die Gesamtinvestitionskosten nicht von den Einspeisetarifen betroffen. Also wäre es das Einfachste, eine einheitliche Obergrenze für die Beihilfeintensität auf die Gesamtinvestitionskosten einzurichten, die für EE-Anlagen aller Arten und Größen EU-weit Gültigkeit hat.

2 Interne Studien der Kommission zu EE und Biogas

2.1 Studie zu EU-Landwirten mit Bioenergieanlagen (laufend)

Die Generaldirektion Landwirtschaft und ländliche Entwicklung der Kommission ist die beauftragende Stelle der neuen Studie „Erneuerbare Energien in der europäischen Landwirtschaft“ (2010–2011). Die Veröffentlichung der Ergebnisse werden Ende 2011 erwartet.

Ziel der Studie ist die Analyse des tatsächlichen Beitrags der landwirtschaftlich erzeugten erneuerbaren Energien zu den EU-weiten EE-Gesamtzielen und zur Verringerung von THG-Emissionen sowie das mittelfristige Potenzial. Sie soll die Rolle der EE-Erzeugung hinsichtlich Ökonomie, Einkommen und Zuordnung von Produktionsfaktoren bewerten sowie der Antrieb hinter ihrer raschen Ausbreitung bzw. die Gründe für Entwicklungs- oder Ausschöpfungshemmnisse in bestimmten Regionen mit erheblichem Potenzial ermitteln und analysieren.

Nach einer umfassenden Beschreibung der Märkte für landwirtschaftlich erzeugte EE-Arten und einer Schätzung der tatsächlich erzeugten EE-Menge analysiert die Studie die Wirtschaftlichkeit und die Strukturen der erzeugenden Betriebe und benennt die wichtigsten Auswirkungen auf ihre Betriebsaktivitäten. Insbesondere sollte sie die Nutzung der Produktionsfaktoren, der Organisation, dem Einkommensniveau und der Einkommensstabilität, der finanziellen Lage und Risikoanfälligkeit des Betriebs sowie die Synergien und Zielkonflikte der laufenden Aktivitäten beleuchten. Außerdem untersucht die Studie den Ursprung und die Arten der EE-Rohstoffe: Hierbei geht es auch um Eigenverbrauch, Marktverkauf sowie um die Abnehmer von anderweitig für Energiezwecke verkaufte Nebenprodukte und Biomassen.

Die Studie wird die Schlüsselfaktoren bestimmen, welche die EE-Erzeugung und die entsprechenden Investitionen auf dem Agrarsektor begünstigt haben. Zusätzlich wird sie die Hemmnisse, welche die EE-Erzeugung und die Investitionen geschmälert, verhindert oder verzögert haben, sowie insbesondere die rechtlichen und administrativen Aspekte aufzeigen und analysieren.

Diese Analyse dürfte ein repräsentatives Bild der EU-27 darstellen. Sie sollte auf einer Aufarbeitung der einschlägigen Literatur beruhen, auf die verfügbaren Statistiken und Daten auf nationaler und EU-Ebene zurückgreifen und zusätzliche Informationen aus Umfragen, Expertenbefragungen und Fallstudien berücksichtigen. Die Studie sollte Antworten auf die folgenden Leitfragen liefern:

- Wie viel regenerative Energie produziert die Landwirtschaft in der EU derzeit und wie viel kann mittelfristig (bis 2020), insgesamt und je Energiequelle, erwartet werden?
- Welche organisatorischen, ökonomischen und technischen Auswirkungen hat die Erzeugung von EE auf die klassischen landwirtschaftlichen Aktivitäten, in Bezug auf den einzelnen Betrieb und auf die umliegende ländliche Wirtschaft?

- Warum engagieren sich Landwirte in der Produktion von erneuerbaren Energien, und wenn sie dies nicht tun, was sind die größten Hemmnisse?
- Welche wirtschaftliche Rolle spielen die erneuerbaren Energien in den verschiedenen Arten landwirtschaftlicher Betriebe? Unter welchen Bedingungen hat die Produktion von erneuerbaren Energien den höchsten positiven Beitrag zur wirtschaftlichen Situation des jeweiligen Hofes und der ländlichen Wirtschaft?
- Was sind die Haupthindernisse, die einem weiteren Ausbau entgegenstehen? Wie könnten die Rahmenbedingungen verbessert werden, um den Ausbau der erneuerbaren Energien im landwirtschaftlichen Bereich zu begünstigen?
- Welche Funktion hat die EE-Politik, und wie kann diese Funktion gestärkt werden?

2.2 Studie zu Methoden und Bedingungen für die Anrechnung von Strom, Wasserstoff und Methan aus erneuerbaren Ressourcen auf das Ziel von 10 % erneuerbaren Energien im Verkehrssektor (laufend)

Diese Studie befasst sich mit der Verbesserung der Methoden zur Erreichung des Mindestziels von 10 % EE im Verkehrssektor, sofern möglich, bezüglich Ökostrom, Wasserstoff gemäß EE-Richtlinie und Biomethan für das Netz. Auch werden die treibenden Kräfte dieser Technologien analysiert, um sie mit den angewendeten Methoden in Verbindung zu bringen bzw. in Relation zu setzen. Die Studie berücksichtigt alle im Versorgungsnetz verteilten Energieträger, die den Verkehrssektor und andere Abnehmer versorgen.

Für Strom aus EE können die Mitgliedstaaten jetzt die durchschnittliche Elektrizität auf nationaler oder EU-Ebene mit dem Stromverbrauch multiplizieren. Dazu gibt es auch den Faktor 2,5 zur Anrechnung bei Elektrofahrzeugen, der den Wirkungsgrad der Fahrzeuge berücksichtigt. Für Wasserstoff gibt es bislang ebenso wenig eine Methode wie für Biomethan, außer als Biokraftstoff, wobei Biomethan allerdings in der Studie berücksichtigt wurde. Ein Gesetzesvorschlag wird am Ende des Jahres vorliegen. Andere Arbeitspakete sind die öffentliche Beratung (noch nicht veröffentlicht), die Entwicklung der Methode und die Beurteilung der Optionen.

Literatur

- (1) Verordnung Nr. 1698/2005 des Rates über die Förderung der Entwicklung des ländlichen Raums durch den Europäischen Landwirtschaftsfonds (ELER) vom 20. September 2005. <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2005:277:0001:0001:DE:PDF>
- (2) Kapitel 5 in Titel IV der Verordnung 1782/2003
- (3) Änderung 74/2009, Anhang II
- (4) Anhang II der Verordnung (EG) Nr. 74/2009 – Indikative Liste der Arten von Vorhaben <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2009:030:0100:0111:DE:PDF>
- (5) Rahmenregelung der Gemeinschaft für staatliche Beihilfen im Agrar- und Forstsektor 2007–2013. http://europa.eu/legislation_summaries/agriculture/general_framework/l24281_de.htm

Biologie der methanogenen Archaea und ihre Bedeutung für die mikrobielle Prozessführung in Biogasanlagen

HELMUT KÖNIG, ROBBIN STANTSCHIEFF, KERSTIN SEYFARTH, STEFAN DRÖGE

1 Einleitung

Jüngste Schätzungen gehen davon aus, dass die weltweiten Reserven von Öl und Gas noch für etwa 40 Jahre bzw. 60 Jahre zur Versorgung des Energiebedarfes reichen werden (BWT 2006).

Zurzeit sind einige Prozesse zur Methanproduktion noch nicht konkurrenzfähig mit den billigeren fossilen Brennstoffen, aber wegen der endlichen Verfügbarkeit der fossilen Ressourcen besteht ein dringender Bedarf an der Entwicklung von alternativen Energiequellen aus erneuerbaren Rohstoffen. Das „Renewable Energy Scenario of the European Renewable Energy Council“ geht davon aus, dass bis zum Jahre 2020 20 % und bis 2050 sogar 100 % des Energiebedarfes aus erneuerbaren Energiequellen gedeckt sein soll (EUROPEAN COMMISSION FOR ENERGY 2007, EUROPEAN RENEWABLE ENERGY COUNCIL 2010). Die Biogaserzeugung aus landwirtschaftlich angebauten erneuerbaren Rohstoffen kann hier einen signifikanten Beitrag leisten (GÖRISCH und HELM 2006, EDER und SCHULZ 2006, FNR 2006, 2008, TILCHE und GALATOLA 2008, KTBL 2009). Nachdem die gesetzlichen Rahmenbedingungen im Jahre 2000 geschaffen wurden (BUNDESMINISTERIUM DER JUSTIZ 2008) ist die Zahl der Biogasanlagen in Deutschland stetig gestiegen. Heute sind bereits rund 5000 Biogasanlagen in Deutschland in Betrieb. Damit gehört Deutschland zu der Spitzengruppe der Biogasproduzenten aus erneuerbaren Rohstoffen (NawaRo).

Allgemein ist die Mikrobiologie des anaeroben Abbaus von organischem Abfall zu Methan gut untersucht (ROHLICH 1977, HORI et al. 2005, DIAZ et al. 2006, ZVERLOV et al. 2010), aber speziell von laufenden Biogasanlagen liegen noch recht wenige Untersuchungen vor. Die publizierten Arbeiten beschäftigen sich hauptsächlich mit dem molekularbiologischen Nachweis der Mikrobiota (KARAKASHEV et al. 2005, HORI et al. 2006, KLOCKE et al. 2007, 2008, KRAUSE et al. 2008, BAUER et al. 2008, 2009, WEISS et al. 2008, NETTMANN et al. 2008, 2010, LIU et al. 2009, KRÖBER et al. 2009, SEYFARTH et al. 2009, KLOCKE et al. 2009, WEILAND 2010, KRAKAT et al. 2010a, b, JAENICKE et al. 2011, STANTSCHIEFF et al. 2011).

Die bisherigen molekularbiologischen Identifizierungsversuche der letzten zehn Jahre haben gezeigt, dass in Biogasanlagen die ersten drei Schritte durch die grampositiven Firmicutes wie Clostridia und Bacilli, aber auch durch gramnegative Bakterien, die zu den Bacteroidetes, Actinobacteria sowie die Fibrobacteres-/Acidobacteria-Gruppe durchgeführt werden. Im dritten Schritt wurden durch direkte 16S rDNA-Analyse unter-

schiedliche Methanbakterien nachgewiesen. Diese gehören zu den Gattungen *Methanobacterium*, *Methanoculleus*, *Methanospirillum*, *Methanosarcina* und *Methanosaeta*.

In diesem Artikel wollen wir uns mit der Mikroorganismengruppe des vierten Schrittes des anaeroben Abbaus von organischem Material, den methanogenen Bakterien (methanogene Archaea), befassen.

2 Entdeckung der Methanbakterien

Der erste Bericht über die Methanbildung in Seesedimenten stammte von Alessandro Volta aus dem Jahre 1776. Etwa ein Jahrhundert später ergaben Studien zum Celluloseabbau, dass Methanbildung mit anaeroben mikrobiellen Abbauprozessen verbunden ist. Die ersten Methanbakterien in Reinkultur wurden erst nach 1947 erhalten. Für die Kultur der strikt anaeroben methanogenen Bakterien mussten spezielle Kulturbedingungen ausgearbeitet werden. Ihre distinkte phylogenetische Position, die Methanbakterien waren die ersten entdeckten Species der Domäne Archaea, wie auch ihre einzigartigen biochemischen und genetischen Merkmale sowie geochemische Aspekte stimulierten die wissenschaftlichen Untersuchungen in den letzten drei Jahrzehnten (KANDLER 1982, WOESE und WOLFE 1985, KANDLER und ZILLIG 1986, DANSON et al. 1992, FERRY 1993, KATES et al. 1993, KÖNIG 1993). Sie spielen generell eine wichtige Rolle im letzten Schritt des anaeroben Abbaus von organischem Material. In jüngster Zeit kommen auch ökonomische Aspekte dazu, da Methanbakterien in Kläranlagen und auch Biogasanlagen, die mit erneuerbaren Rohstoffen beschickt werden, das als Energiequelle nutzbare Methan bilden. Im Falle der Rinderzucht bedeutet die Methanbildung im Pansen einen Verlust im Energiegehalt des angebotenen Futters. Weiterhin sind die Umweltverschmutzung, die Abfallbehandlung und die Bildung von Treibhausgas Probleme, die gelöst werden müssen. Wegen der begrenzten Verfügbarkeit der fossilen Energiereserven wird besonders die Suche nach alternativen Energiequellen wie Methan verstärkt.

3 Ökologie

Methanbakterien sind weltweit in anoxischen Biotopen verbreitet. Methanbakterien spielen eine wichtige Rolle in den letzten Schritten des anaeroben Abbaus von organischen Material und damit Recyclings von CO_2 , das jährlich durch Pflanzen fixiert wird. Etwa 5 % des durch Pflanzen fixierten CO_2 wird zu atmosphärischem Methan (ROHLICH et al. 1977). Ein großer Teil des atmosphärischen Methans wird in Reisfeldern, Marschland, Feuchtgebieten, in Frischwasser- und Meeressedimente sowie vulkanischen Habitaten

gebildet. Die Gesamtmenge an jährlich gebildetem Methan beträgt ca. 430×10^{12} g, wovon etwa 280×10^{12} g biogenen Ursprungs sind. Allein die Produktion durch die Darmflora von Termiten wird auf $2\text{--}5 \times 10^{12}$ g je Jahr geschätzt.

Die anaerobe mikrobielle Bildung von Biogas durch Abbau von organischen Material (MUDRAK und KUNST 1994) verläuft im Wesentlichen in vier Schritten: (1) In einer hydrolytischen Stufe werden hauptsächlich pflanzliche Polymere wie Cellulose, Hemicellulose und Stärke in Monomere gespalten. Lignin kann unter anaeroben Bedingungen nicht mikrobiell abgebaut werden. (2) Die anschließende Umwandlung der monomeren Bestandteile in Säuren und Alkohole wird durch die sogenannten primären Gärer (Versäuerung) durchgeführt. (3) Der anaerobe Abbau (Acetogenese) von Säuren wie Buttersäure oder Propionsäure ist endergon und kann nur in syntrophen Kulturen, die den Wasserstoffpartialdruck niedrig halten, bewerkstelligt werden. (4) Diese sekundären Gärer interagieren mit den Methanbakterien (methanogene Archaea) in der letzten Stufe des anaeroben Abbaus (Methanogenese). „Interspecies“ Wasserstoffübertragung ermöglicht so den Abbau von länger-kettigen Fettsäuren. Acetat, Kohlendioxid und Wasserstoff sowie Methanol, Methylamine und Dimethylsulfid sind die Abbauprodukte, die als methanogene Substrate fungieren. So wird organisches Material in Methan und CO_2 überführt. In der Natur kann Methan unter aeroben Bedingungen durch methylotrophe Bakterien zu CO_2 oxidiert werden, womit das durch Pflanzen fixierte CO_2 wiederverwendet wird.

Unter Licht-, Sulfat- oder Nitratlimitation spielen Methanbakterien eine wichtige Rolle beim Abbau von Acetat. Einige Methanbakterien können elementaren Stickstoff fixieren. Beispiele für Biotope mit anaeroben Nahrungsketten sind marine und Frischwassersedimente, Klärschlämme und Reisfelder. Weiterhin kommen Methanbakterien im Intestinaltrakt von Lebewesen vor, so im Pansen von Wiederkäuern und im Blinddarm (Caecum) von anderen Pflanzenfressern, im Darm von Fischen, im Vormagen von Walen und im Hinterdarm von holzfressenden Insekten wie Termiten. Bei Menschen wurden sie im Dickdarm und in Zahnbelag nachgewiesen. Im Unterschied zu Sedimenten sind Wasserstoff und Kohlendioxid sowie Formiat die Hauptsubstrate in letzteren Biotopen. Nur drei Bakteriengruppen sind in der letzten Stufe des anaeroben Abbaus von organischem Material beteiligt. Es handelt sich um Methanbakterien, homoacetogene Bakterien oder Sulfat reduzierende Bakterien. In einigen Biotopen kann eine von diesen Gruppen dominant auftreten. Der K_m -Wert für die Aufnahme von Wasserstoff ist für Methanbakterien $4\text{--}8 \mu\text{M H}_2$, für Sulfatreduzierer $2 \mu\text{M H}_2$, und für acetogene Bakterien etwa $6 \mu\text{M H}_2$. Sulfatreduzierer haben demnach die höchste Affinität zu Wasserstoff. Das kann in sulfatreichen Biotopen zu einer Verdrängung der Methanbakterien führen. Methanbakterien können in syntrophen Kulturen mit Wasserstoff produzierenden Bakterien wie *Syntrophomonas* sp. or *Syntrophobacter* sp. (interspecies H_2 -transfer) leben. So ist der

anaerobe Abbau von Propionsäure oder Buttersäure endergon. Der Abbau ist nur möglich, wenn der Wasserstoffpartialdruck niedrig gehalten wird. Das ist der Fall zwischen etwa 10^{-6} to 10^{-4} atm. Methanbakterien leben auch intrazellulär in anaeroben Protozoen wie den Flagellaten *Pentatrichomonoides scroa* aus der Termiten *Mastotermes darwiniensis*. Auch *Methanobacterium formicicum* und *Methanoplanus endosymbiosus* wurden aus Protozoen isoliert. *Methanobrevibacter* sp. wurde als intrazellulärer Symbiont von *Pentatrichomonoides scroa* (FRÖHLICH and KÖNIG 1999) identifiziert. Diese anaeroben Flagellaten besitzen keine Mitochondrien, sondern Hydrogosome, die Wasserstoff und CO_2 als methanogene Substrate produzieren.

Geothermische Biotop und alkalophile wie auch hypersaline Habitats sind ein anderes extremes Biotop für Methanbakterien. In kontinentalen Solfataren und marinen Hydrothermalquellen werden die Substrate Wasserstoff und Kohlendioxid geochemisch produziert. Geothermale Bereiche, in denen Methanbakterien (*Methanothermobacter feravidus*, *Methanocaldococcus jannaschii*, *Methanopyrus kandleri*) leben, findet man in Island, dem Yellowstone National Park oder bei der italienischen Insel Vulcano. Methanbakterien kommen in Sedimenten bei 2 °C und in Hydrothermalsystemen bis 113 °C (*Methanopyrus kandleri*) vor. Der Great Salt Lake in Utah ist als ein Biotop für das Vorkommen von hypersalinen Methanbakterien bekannt. Methanproduktion wurde auch in Torfproben mit einem pH-Wert von unter 4 nachgewiesen. Aber in der Regel liegt das pH-Optimum über 6. In Kultur wurde ein Wachstum unter einem pH-Wert von 5 nicht beobachtet. Auch Fettsäuren hemmen das Wachstum bei niedrigen pH-Werten. Methanbakterien leben normalerweise in anaeroben Biotopen, aber einige sind etwas Sauerstoff toleranter und leben auch am Darmepithel von Termiten, das durch Tracheen mit Sauerstoff versorgt wird.

Methan ist auch ein Treibhausgas (geschätzte Halbwertszeit: 14 Jahre). Bis zum 17. Jahrhundert war die atmosphärische Methankonzentration recht konstant. Aber sie steigt seit dieser Zeit kontinuierlich an (700 ppbv um das Jahr 1650, 1600 ppbv im Jahre 1994) (GRAEDEL und CRUTZEN 1994). Die jährliche globale Methanproduktion ist heutzutage signifikant (heutige jährliche Zunahme: 10–17 ppbv). Methan kann in der Regel nur in aeroben Zonen durch methylotherme Bakterien abgebaut werden. Bereits vor 30 Jahren wurde eine anaerobe Methanoxidation beobachtet. Vor einigen Jahren wurden Konsortien aus Sulfatreduzierern und Methanoxidierern entdeckt, die auch anaerob Methan in marinen Methanhydraten abbauten (reverse Methanogenese). Methanhydrate sind ein großes Methanreservoir. Sie sind stabil unterhalb einer Meerestiefe von 300 Metern.

4 Morphologie

Die strikt anaeroben Methanbakterien besitzen ganz unterschiedliche Morphotypen. Spezies der grampositiven Methanobacteriales bilden kurze bis lange Stäbchen oder Kokken, die einzeln oder in Paketen vorkommen. Die grampositiven Methanosarcinen, die zu den Methanomicrobiales gehören, leben als Einzelzellen oder in großen Paketen. Die anderen Methanbakterien gehören zu den Methanomicrobiales oder Methanococcales und reagieren gramnegativ. Sie kommen als unregelmäßige Kokken oder flachen Zellen vor. Einige bilden Stäbchen, die sich in langen Filamenten zusammenlagern (Methanospirillum, Methanosaeta).

Reservestoffe wie Polyphosphat oder Glycogen wurden in *Methanlobus*, *Methanosarcina* und *Methanococcus* nachgewiesen. Gasvesikel wurden in *Methanosarcina vacuolata* und *Methanosarcina barkeri* gefunden.

Einige Spezies der Gattungen *Methanococcus*, *Methanlobus*, *Methanospirillum* und *Methanomicrobium* besitzen Flagellen und sind beweglich. Chemotaxis wurde in Gegenwart von Acetat, Leucin oder Isoleucin als Attraktans beobachtet.

5 Taxonomie

Die Methanbakterien unterscheiden sich von allen anderen Prokaryoten durch die Bildung von Methan (CH₄) als Endprodukt. Neben diesem gemeinsamen physiologischen Merkmal sind die Methanbakterien recht heterogen (BOONE und WHITMANN 1989, WOESE et al. 1990, BOONE und CASTENHOLZ 2001). Die Sequenzanalyse ihrer 16S rDNA führt Ende der Siebzigerjahre des letzten Jahrhunderts zu der Entdeckung der Archaea. Diese repräsentieren neben den Bacteria und Eukarya die dritte Domäne des Lebens. Entsprechend diesen Sequenzanalysen sind die Archaea zu den Eukarya näher verwandt als zu den Bacteria. Sie werden zurzeit in vier Linien aufgeteilt. Der methanogene Ast (Euryarchaeota) ist einer davon. Methanbakterien sind die erste mikrobielle Gruppe, bei der die Taxonomie auf einer natürlichen Phylogenie beruht. Bisher sind 162 methanogene Spezies bekannt (EUZÉBY 2011).

Viele Isolate sind morphologisch ähnlich und sind physiologisch nicht leicht zu unterscheiden. Für eine eindeutige Identifizierung ist es deshalb notwendig, etwas schwieriger zu bestimmende biochemische oder molekulare Marker zu untersuchen. Ein Panel an Antikörpern wurde zur Differenzierung von Methanbakterien in unterschiedlichen Habitaten entwickelt (CONWAY de MACARIO und MACARIO 2010). Minimale Standards für die Identifizierung der Arten sind beschrieben worden (BOONE und WHITMANN 1989).

6 Ungewöhnliche Zellkomponenten

6.1 Zellhüllen

Methanbakterien besitzen keine einheitliche Zellwandzusammensetzung. Verschiedene Zellwandtypen wurden identifiziert. Allen Methanbakterien fehlt das allgemeine Zellwandpolymer der Bakterien, das Murein (CLAUS und KÖNIG 2010).

Die Zellwände der grampositiven Methanbakterien bestehen aus Pseudomurein (Methanobacteriales, Methanopyrales) oder aus Methanochondroitin (Methanosarcina). Bei *Methanothermobacter* und *Methanopyrus* besitzt die Zellwand zwei Lagen, einen Pseudomureinsacculus und einen S-Layer. Einige Spezies von *Methanosarcina* zeigen einen Lebenszyklus, bei dem die Zellen einzeln oder als Aggregate vorkommen. Während der Disaggregation der Zellen geht die Methanochondroitinschicht verloren.

Die gramnegativen methanogenen Archaea haben Zellhüllen, die aus kristallin angeordneten (Glyco-)Proteinen bestehen (*Methanococcus* sp., *Methanoplanus* sp.). Im Falle von *Methanospirillum* und *Methanosaeta* kommen die individuellen Zellen in langen Ketten vor, die von einer distinkten Zellwandlage umgeben sind. Einzelne Zellen sind durch einen Spacer getrennt und die äußere Hülle der Filamente besteht aus einer Proteinscheide. Zellen mit unterschiedlichen Zellhüllen teilen sich auf verschiedene Weise: Zweiteilung mit Septumbildung (Pseudomurein, *Methanobacterium*), Konstriktion (S-Layer, *Methanococcus*) oder Fragmentation (Scheide, *Methanosaeta*). Wegen ihrer ungewöhnlichen Zellhüllen sind Methanbakterien gegen viele Antibiotika und lytische Agenzien (Lysozym) unempfindlich, die in die Zellwandsynthese bei Eubakterien hemmen oder den Zellwandsacculus lysieren.

6.2 Cytoplasmamembran

Glycerol-Fettsäureester sind die Hauptbestandteile der Membranen der Bacteria und Eukarya. Mit Ausnahme von *Methanosphaera* fehlen diese typischen Fettsäureglycerolipide bei Methanbakterien. Statt dessen kommen Phytanyldiether oder Biphytanyltetraether mit Kettenlängen von 20, 25 oder 40 C-Atomen vor. Im Gegensatz zu den Bakterien besitzen die Glycerolreste die sn-2,3-Stereokonfiguration. Die Diether ermöglichen die Bildung von Lipidbilayern, während die Tetraether die Cytoplasmamembran durchspannen und Monolayer bilden.

6.3 Niedermolekulare Komponenten

In Methanbakterien findet man eine Reihe von seltenen Kofaktoren. Die blau-grüne Fluoreszenz von Methanbakterien im Epifluoreszenzmikroskop wird durch Faktor F₄₂₀ verursacht. Es handelt sich um ein Deazariboflavinderivat substituiert mit Ribitol-, Phosphat- und Glutamylresten mit einem Absorptionsmaximum bei 420 nm im oxidierten

Zustand. Die reduzierte Form ist farblos. Als Koenzym von Hydrogenasen und der Formiathydrogenase fungiert F_{420} als Elektronenüberträger (Hydridtransfer). Ein weiterer Kofaktor ist Methanofuran, der an dem ersten Schritt der CO_2 -Reduktion beteiligt ist. Die Formylgruppe wird auf Methanopterin (F_{432}), ein 7-Methylpterinderivat übertragen. Coenzym F_{430} ist ein Nickeltetrapyrrol, das eine Rolle im terminalen Schritt der Methanbildung spielt. Es ist die prosthetische Gruppe der Methylreduktase (Coenzym M). Weitere Kofaktoren der Methyl-CoM-Reduktase sind 7-Mercapto-N-Heptanoyl-O-Phospho-L-Threonine (Coenzym B, CoB) und 2-Mercaptoethansulfonsäure (Coenzym M, CoM). Corrinoid abhängige Methyltransferasereaktionen sind bei der Bildung von Acetat beteiligt (Acetyl-CoA-Weg). Cyclo-2,3-Diphosphoglycerat stabilisiert die Enzyme bei thermophilen Methanbakterien.

7 Kulturtechniken

Methanbakterien sind strikt anaerobe Organismen. Deshalb müssen strikt anaerobe Kulturtechniken für die Herstellung der Medien wie auch beim Transfer der Zellen angewandt werden (HIPPE 1991, ATLAS 1993, BALCH et al. 1979, ROBB et al. 1995). Ein Redoxpotenzial unter -0.3 V sollte eingehalten werden. Die Proben werden in Glaskulturgefäße überführt, die mit Butylstopfen verschlossen werden (Abb. 1). Die Medien enthalten Reduktionsmittel wie H_2S , Cystein oder Dithionit. Die gasförmigen Substrate CO_2 und H_2 müssen sauerstofffrei sein und werden deshalb über einen Palladiumkatalysator geleitet. Die Medien werden in einer Anaerobenkammer hergestellt. Die Gefäße (Bellco Glass Inc.) werden mit H_2 und CO_2 begast ($100\text{--}200$ kPa, $H_2/CO_2 = 80 : 20$ Vol.-%). Die Zellen werden mit Spritzen transferiert. Für die Kultur auf festen Medien werden die Petrischalen in Stahlzylindern bei $100\text{--}200$ kPa inkubiert.

Die Nährstoffansprüche der Methanbakterien reichen von chemolithotroph bis komplex bei einigen heterotrophen Methanbakterien. Substrate und Energiequellen sind H_2/CO_2 , Methanol, Methylamin, Formiat, Acetat, Methylmercaptan und Dimethylsulfid. Viele Methanbakterien werden durch komplexe Nährstoffe wie Hefeextrakt, Pepton oder Pansenflüssigkeit oder Flüssigkeit von Biogasreaktoren stimuliert. Ammonium und Sulfid sind die wichtigsten Stickstoff- und Schwefelquellen. Ein komplexes Spektrum an Spurenelementen und Vitaminen wird von einigen Spezies benötigt. Die Aufnahme von Zuckern wurde nicht beobachtet. Die Wachstumstemperaturen reichen von mesophil (25 °C; *Methanobus tindarius*) bis extrem thermophil (110 °C; *Methanopyrus kandleri*). Die Temperaturoptima liegen zwischen 30 °C und 40 °C bei den mesophilen, zwischen 60 °C und 70 °C bei den thermophilen und zwischen 80 °C und 98 °C bei den hyperthermophilen Arten. Am besten wachsen die Spezies unter neutralen pH-Bedingungen

(pH 6.5–7.5). Während einige alkalophile Isolate bekannt sind, wurden acidophile Vertreter bisher nicht beschrieben. Extrem halophile Methanbakterien benötigen erhöhte Salzkonzentrationen und wachsen zwischen 2,5 und 4,3 M NaCl optimal. Die Kombination der entwickelten anaeroben Kulturtechniken (Abb. 1; serum bottle technique, Wolin-Miller tube) (BALCH et al. 1979), die von der Roll-Tube-Technik nach Hungate abgeleitet sind und die Anwendung von Anaerobenkammern führten seit Ende der Vierzigerjahre des letzten Jahrhunderts zur Isolierung von Reinkulturen. Die meisten Methanbakterien lassen sich in einem von drei Medien mit entsprechenden Modifikationen züchten. Dauerkulturen können in Glycerin (10 Vol.-%) oder Dimethylsulfoxid (5 Vol.-%) bei $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$, $-70\text{ }^{\circ}\text{C}$ oder am besten in flüssigem Stickstoff (Siedepunkt: $-191\text{ }^{\circ}\text{C}$) angelegt werden.

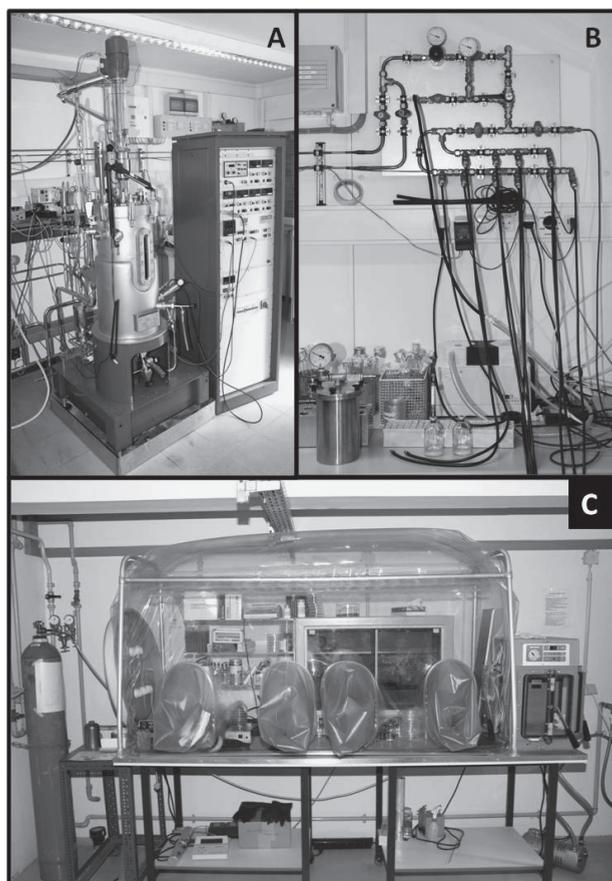


Abb. 1: Kulturtechniken für Methanbakterien
 A = Pilotfermenter, B = Begasungseinheit mit Kulturgefäßen und Zylinder für Petrischalen,
 C = Anaerobenkammer (Quelle: Institut für Mikrobiologie und Weinforschung, Johannes Gutenberg-Universität, Mainz)

8 Energiestoffwechsel

Methanbakterien gewinnen Energie durch Methanbildung aus relativ wenigen Substraten wie H_2/CO_2 , Kohlenmonoxid, Methanol, Methylamine, Methylmercaptan, Dimethylsulfid, Formiat und Acetat. Sekundäre Alkohole (2-Propanol) können als Elektronendonatoren fungieren (Tab. 1).

Tab. 1: Energieliefernde Reaktionen bei Methanbakterien (FERRY 1993)

Reaktion	ΔG° [kJ/mol CH_4]
$4 \text{H}_2 + \text{HCO}_3^- + \text{H}^+ \rightarrow \text{CH}_4 + 3 \text{H}_2\text{O}$	-135
$4 \text{HCOO}^- + \text{H}^+ + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CH}_4 + 3 \text{HCO}_3^-$	-145
$4 \text{CO} + 5 \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CH}_4 + 3 \text{HCO}_3^- + 3 \text{H}^+$	-196
$2 \text{CH}_3\text{CH}_2\text{OH} + \text{HCO}_3^- \rightarrow 2 \text{CH}_3\text{COO}^- + \text{H}^+ + \text{CH}_4 + \text{H}_2\text{O}$	-116
$\text{CH}_3\text{COO}^- + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CH}_4 + \text{HCO}_3^-$	-31
$\text{CH}_3\text{OH} + \text{H}_2 \rightarrow \text{CH}_4 + \text{H}_2\text{O}$	-113
$4 \text{CH}_3\text{OH} \rightarrow 3 \text{CH}_4 + \text{HCO}_3^- + \text{H}_2\text{O} + \text{H}^+$	-105
$4 \text{CH}_3\text{NH}_3^+ + 3 \text{H}_2\text{O} \rightarrow 3 \text{CH}_4 + \text{HCO}_3^- + 4 \text{NH}_4^+ + \text{H}^+$	-76
$2 (\text{CH}_3)_2\text{NH}_2^+ + 3 \text{H}_2\text{O} \rightarrow 3 \text{CH}_4 + \text{HCO}_3^- + 2 \text{NH}_4^+ + \text{H}^+$	-76
$4 (\text{CH}_3)_3\text{NH}^+ + 9 \text{H}_2\text{O} \rightarrow 9 \text{CH}_4 + 3 \text{HCO}_3^- + 4 \text{NH}_4^+ + 3 \text{H}^+$	-76
$2 (\text{CH}_3)_2\text{S} + 3 \text{H}_2\text{O} \rightarrow 3 \text{CH}_4 + \text{HCO}_3^- + 2 \text{H}_2\text{S} + \text{H}^+$	-49

Der Weg der CO_2 -Reduktion mit molekularem Wasserstoff zu Methan ist relativ gut bekannt (FERRY und KASTED 2007, KASTER 2011). Die Kofaktoren Methanofuran, Methanopterin, Coenzym M, Coenzym B, F_{420} , F_{430} , Methanophenazin, ein Heterodisulfid und Cytochrom sind an der Methanogenese und ATP-Bildung beteiligt, wobei CO_2 sequenziell zu CH_4 reduziert wird. Die erste stabile Verbindung ausgehend von CO_2 ist Formylmethanofuran. Elektronendonatoren für die CO_2 -Reduktion können Wasserstoff, Formiat, Kohlenmonoxid und Alkohole sein. Nach Übertragung der Formylgruppe entsteht 5-Formyltetrahydromethanopterin (5-Formyl H_4MPT) als nächstes Zwischenprodukt. Sukzessiv wird 5-Formyl H_4MPT zu 5,10-Methenyl H_4MPT , 5,10-Methylen H_4MPT und 5-Methyl H_4MPT reduziert. Ähnlich wie bei Tetrahydrofolsäure sind N5- und N10-Positionen an der Reduktion der Formylgruppe beteiligt. Die Methylgruppe wird dann auf Mercaptoethansulfonsäure (HS-CoM) übertragen und $\text{CH}_3\text{-CoM}$ entsteht. Im letzten Schritt der Methanbildung wird ein Heterodisulfid gebildet, das zu HS-CoM und Coenzym B reduziert wird. Die Reduktion des Heterodisulfids ist ein exergoner Prozess und ist mit der ATP-Bildung gekoppelt. Energie wird durch einen chemiosmotischen Mechanismus gebildet. Belege für eine Substratkettenphosphorylierung wurden nicht gefunden (Abb. 2).

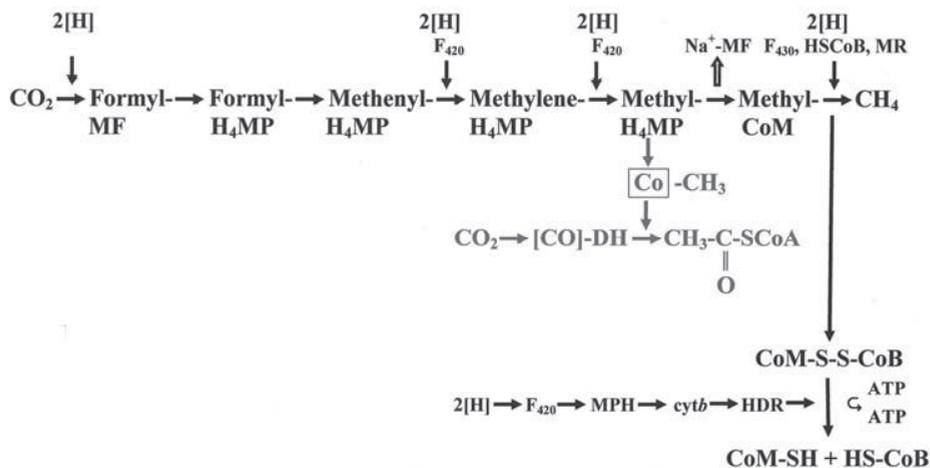


Abb. 2: Mechanismus der Methanbildung aus CO₂ und H₂ (dunkel) und der autotrophen CO₂-Fixierung (hell)

Methylotrophe Methanbakterien disproportionieren Methanol zu CO₂ und CH₄ (Tab. 1). Methanol oder die Methylgruppe von Methylaminen wird auf Corrinnoide übertragen und dann auf Coenzym M oder Methanopterin. Acetoklastische Methanbakterien dismutieren Acetat zu Methan und Kohlendioxid. Acetat wird aktiviert durch HSCoA, das dann durch die CO-Dehydrogenase weiter umgesetzt wird. Die CO-Dehydrogenase oxidiert die Carboxylgruppe zu CO₂ und überträgt die Methylgruppe auf ein Corrinoid. Schließlich wird Methyl-CoM gebildet und dann Methan freigesetzt.

9 Kohlenstoffwechsel

Viele Methanbakterien wachsen autotroph und verwenden CO₂ als einzige Kohlenstoffquelle für den Aufbau der Zellsubstanz. Ein Pentosephosphatweg (Calvin-Zyklus) fehlt. In *Methanothermobacter thermoautotrophicus* wird über 90 % des fixierten CO₂ für die Energiegewinnung benötigt und nur 10 % stehen für die Biosynthese von Zellbestandteilen zur Verfügung. In Methanbakterien spielt der Acetyl-CoA-Weg eine zentrale Rolle bei der CO₂-Fixierung. (Abb. 2). Acetat wird aus zwei CO₂-Molekülen synthetisiert. Die Methylgruppe wird sukzessiv über N-5-Methyltetrahydromethanopterin, einem Zwischenprodukt aus der Methanogenese und einem Methylcobamidderivat, bereitgestellt. Die Carboxylgruppe entsteht durch die Reduktion von CO₂ zu CO. Die Reduktion der von CO₂ zu einer Nickel gebundenen CO-Gruppe wird durch die CO-Dehydrogenase katalysiert. In *Methanothermobacter*, *Methanospirillum* und *Methanococcus* wurde ein unvoll-

ständiger reduktiver Citronensäurezyklus nachgewiesen. Einen unvollständigen oxidativen Citratcyclus besitzt *Methanosarcina*. Die Biosynthese von Hexosen erfolgt über die klassische Gluconeogenese. Glucose-6-Phosphat wird ausgehend von Pyruvat über einen reversiblen Emden-Meyerhof-Parnas-Weg (EMP) gebildet. Enzyme, die an irreversiblen Reaktionen beteiligt sind, werden ersetzt: die ADP- und ATP-abhängige Phosphofruktokinase durch eine Fructose-1,6-Biphosphatase und die Pyruvatkinase durch eine Phosphoenolpyruvatsynthetase.

Methanbakterien nehmen keine Zucker auf. Sie bilden aber Reservestoffe wie Glycogen. Der Abbau der Zucker erfolgt im Falle von *Methanococcus* über einen modifizierten Emden-Meyerhof-Parnas-Weg.

10 Molekularbiologie

Das Gesamtgenom von einigen Methanbakterien wurde bereits sequenziert. Dazu zählen *Methanosphaera stadtmanae* MCB-3, *Methanothermobacter thermoautotrophicus* Delta H, *Methanopyrus kandleri* AV19, *Methanosarcina mazei* Goe1, *Methanosarcina acetivorans* C2A und *Methanocaldococcus jannaschii*. Das erste Genom, das bei den Archaea sequenziert wurde, war das von *Methanocaldococcus jannaschii*. Es ist 1,66 Mbp groß und setzt sich aus etwa 1700 Genen zusammen. Damit ist es kleiner als das Genom von *Escherichia coli* mit 4,64 Mbp. Die Gene für die metabolischen Stoffwechselwege (Phänotyp) ähneln denen von Bakterien, während die Gene, die für molekulare Eigenschaften (Genotyp) kodieren, eher mit den Eukarya verwandt sind. Etwa 50 % der Gene von *Methanocaldococcus jannaschii* sind bisher nicht in Datenbanken bekannt. Die Gene sind wie bei Bakterien in Operons organisiert.

Der G+C-Gehalt liegt zwischen 23 bis 62 mol%, was für eine große verwandtschaftliche Diversität spricht. Der G+C-Gehalt korreliert nicht mit der Wachstumstemperatur. *Methanothermobacter fervidus* wächst optimal bei 84 °C, hat aber nur einen G+C-Gehalt der DNA von 33 mol%. Histonartige Proteine, DNA-Bindeproteine und hohe intrazelluläre Salzkonzentrationen stabilisieren wahrscheinlich die DNA bei hohen Temperaturen. *Methanothermobacter fervidus* besitzt die Histone HmfA und HmfB. DNA (90–100 bp) windet sich um ein Tetramer aus HmfA und HmfB und bildet nucleosomähnliche Partikel. In den letzten Jahren wurde die Genomstruktur bei Methanbakterien intensiv untersucht. Informationen wurden erhalten über Codongebrauch, Prozessorsignale, Replikation und Transkription (RINGO 2006, CAVACCHIOLI 2007, THOMM 2007).

11 Kultivierung der methanogenen Bakterien aus laufenden maisgefütterten Biogasanlagen

Wir beprobten in den letzten zwei Jahren 8 mesophil laufende Biogasanlagen (STANTSCHIEFF et al. 2011), die mit Mais gefüttert wurden (Tab. 2). Zunächst haben wir unter Anwendung von selektiven DNA-Primern mithilfe der direkten 16S rDNA-Analyse einen Überblick über die in den verschiedenen untersuchten Biogasanlagen vorhandenen Methanbakterien erhalten. Die durch direkte 16S rDNA-Analyse unter Berücksichtigung der oben erwähnten bekannten Eigenschaften, Nährstoffansprüche der Methanbakterien und Anwendung der anaeroben Kulturtechniken sowie durch die 16S rDNA-Analyse erhaltenen Kenntnisse über die vorhandenen Methanbakterien wurden verschiedene selektive flüssige und feste Nährmedien (DSMZ media database, modifiziert) in einer Anaerobenkammer (Coy Laboratory Products Inc. Michigan, USA) hergestellt und mit den Fermenterproben beimpft. Die Kulturgefäße wurden mit Butylstopfen und Alukappen verschlossen.

Tab. 2: Anlagenparameter einer Auswahl der untersuchten Biogasanlagen

Parameter	Einheit	BGA Arenath	BGA Glahn	BGA Friedrich	BGA Wagner
Fermenter		Rührkessel	Rührkessel	Rührkessel	Rührkessel
Rührung		LARW/TMRW ¹⁾	LARW/TMRW ¹⁾	Zentralrührwerk	LARW/TMRW ¹⁾
Bruttovolumen	m ³	1 × 1400	1 × 1260	2 × 1000	2 × 1260
Nachgärer		Rührkessel	Rührkessel	Rührkessel	Rührkessel
Rührung		TMRW ¹⁾	TMRW ¹⁾	LARW ¹⁾	TMRW ¹⁾
Bruttovolumen	m ³	1 × 1400	1 × 1260	1000	1 × 1260
Elektrische Leistung	kW	345	370	380	550
Inputstoffe ³⁾					
fest	t/d	MS ²⁾ /GS ²⁾ 12/8	MS 18	MS/GPS ²⁾ 20/2	MS 33
flüssig	m ³ /d	RG ²⁾ 10	SG ²⁾ 5	SG 5	SG 6
pH-Wert ³⁾		7,3–7,5	7,5–7,7	7,2–7,6	7,2–7,5
Temperatur	°C	40	41	39	40
NH ₄ -N ³⁾	mg/kg	1500–1700	1800–2000	2000–2500	1400–1500
Gesamtsäure	mg/kg	< 250	500–2000	1000–4500	1000–2500

¹⁾ BGA = Biogasanlage, LARW = Langachsührwerk; TMRW = Tauchmotorrührwerk.

²⁾ MS = Maissilage; GS = Grassilage; RG = Rindergülle; SG = Schweinegülle; GPS = Ganzpflanzensilage

³⁾ Spektrum im Betrachtungszeitraum.

Für die Isolierung von hydrogenotrophen Methanbakterien (DSM Medium 287, modifiziert) wurden die Kulturgefäße (Hungate tubes, Bormioli injection flasks) mit 200 kPa H₂/CO₂ (80 %/20 %) begast. Für acetoklastische Methanbakterien (DSM Medium 334, modifiziert) wurde Acetat als Kohlenstoff- und Energiequelle zugegeben. Methylotro-

Die Methanbakterien wurden mit Methanol (DSM Medium 318, modifiziert) angezogen. In beiden Fällen bestand die Gasphase aus N_2/CO_2 (80 %/20 %, 200 kPa). Dem Medium wurde 5 % (V/V) sterile und filtrierte Reaktorflüssigkeit zugegeben. Wachstum von Methanbakterien wurde durch das Auftreten von grün-fluoreszierenden Zellen im Fluoreszenzmikroskop und Methanbildung angezeigt.

Aus den erhaltenen Anreicherungskulturen wurden durch serielle Verdünnungsreihen und Ausstriche Reinkulturen isoliert. Es wurden Isolate von allen Spezies erhalten, die zuvor durch die direkte 16S rDNA-Analyse in den Proben nachgewiesen wurden: *Methanobacterium formicicum* (Substrate: H_2/CO_2 , Formiat), *Methanoculleus bourgensis* (H_2/CO_2), *Methanosarcina mazei* (H_2/CO_2 , Methanol, Methylamine, Acetat), *Methanosarcina barkeri* (H_2/CO_2 , Methanol, Methylamine, Acetat), *Methanosaeta concilii* (Acetat). Es handelt sich um Methanbakterien, die mit den Gasen H_2 und CO_2 , den Säuren Formiat und Acetat sowie auch Methanol und Methylaminen wachsen können. Durch die Isolate ist es nun möglich, die effektivsten Methanbildner der einzelnen physiologischen Gruppen zu vergleichen und daraus Starterkulturen zu entwickeln. Wir sind dabei, spezifische Sonden für die Spezies zu entwickeln, um jederzeit den Titer der einzelnen Gruppen der Methanbakterien in laufenden Biogasanlagen zu überprüfen. Mit diesen Kenntnissen wird es den Betreibern möglich sein, zeitnah Störungen in der Methan bildenden Mikrobiota festzustellen und geeignete Maßnahmen zur Behebung einer anstehenden Störung zu ergreifen. Dazu kann auch die Beimpfung mit einzelnen Methankulturen gehören.

Literatur

Die Literaturliste kann bei Prof. Dr. König erfragt werden.

Danksagung

Wir danken den Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz (BMELV) und der Fachagentur für Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR) als Projektträger sowie der Stiftung Rheinland-Pfalz für Innovation für die finanzielle Unterstützung. Wir danken auch den Betreiber (C. Glahn, H.-H. Gebel, M. Lieser, P. Neumann, A. Billen, M. Dimmer, A. Friedrich, H. Wagner) der Biogasanlagen, die uns in den letzten Jahren stets mit Fermenterproben versorgt haben.

Wirksamkeit und Wirkungsweise von Enzymen im Biogasprozess

**MONIKA HEIERMANN, TERESA SUÁREZ QUIÑONES, MATTHIAS PLÖCHL,
JÖRN BUDDE, ROBERT KAUSMANN, KATRIN PÄZOLD**

Neuerdings werden in Biogasanlagen als Hilfsmittel technische oder mikrobiell hergestellte Enzympräparate zur Effizienzsteigerung der Methanerzeugung eingesetzt. Enzyme sind hochmolekulare Eiweißkörper, die als Biokatalysatoren chemische Reaktionen beschleunigen, indem sie die Aktivierungsenergie herabsetzen, die überwunden werden muss, damit es zu einer Stoffumsetzung kommt. Nach ihrer Wirkungsspezifität werden Enzyme in Enzymklassen (Oxidoreduktasen, Transferasen, Hydrolasen, Lyasen, Isomerasen und Ligasen) eingeteilt.

Der anaerobe Abbau von organischem Material zu Methan beginnt mit der Hydrolyse. In dieser Phase werden ungelöste biogene Polymere biochemisch unter Anlagerung von Wasser in niedermolekulare Verbindungen gespalten. Da in Biogasanlagen viele schwer abbaubare pflanzliche Gerüstsubstanzen wie Cellulose, Hemicellulose und Lignin gelangen, ist die Hydrolyse der geschwindigkeitsbestimmende Schritt. Dementsprechend werden Hydrolasen als hydrolytisch spaltende Enzyme (z.B. Ester-, Peptid- und Glycosidspaltungen) als aussichtsreichste Enzyme zur Vorbehandlung faserreicher Einsatzstoffe für die anaerobe Vergärung eingeschätzt.

Innerhalb der Biogasprozesskette kann die Zugabe von Enzymen an unterschiedlichen Orten erfolgen. Es kommen folgende Möglichkeiten infrage:

- zu den Einsatzstoffen (externe Hydrolyse)
- in einen Vorhydrolysebehälter
- in den Hauptfermenter.

In Abhängigkeit vom Zugabeort werden die Enzyme bzw. Enzympräparate unterschiedlichen Milieubedingungen ausgesetzt, die wiederum einen direkten Einfluss auf deren Wirkungsweise und Wirksamkeit haben.

Primär soll die Applikation von hydrolytischen Enzymen die Verwertbarkeit von faserreichen Roh- und Reststoffen für die Biogaserzeugung erhöhen, indem zwei Effekte zum Tragen kommen: eine Beschleunigung der Umsetzung und/oder eine Erhöhung der Methanausbeute einzelner Substrate. Sekundär hat der Enzyemeinsatz auch Auswirkungen auf Viskosität und Schwimmdeckenbildung. Hier wird vermutet, dass sich Rührzeiten und Rührleistung und somit der Eigenstrombedarf einer Anlage erheblich senken lassen. Folglich sind mit der Anwendung von Enzymen die Erwartungen verknüpft, dass sie zur Erhöhung der Betriebssicherheit und Sicherung der Prozessstabilität sowie zur

Reduzierung von Betriebskosten, insbesondere durch Verringerung des Eigenenergieverbrauchs und Verlängerung der Wartungsintervalle, beitragen.

Ergebnisse einer umfassenden Literaturrecherche zeigen, dass grundsätzliche Effekte auf den Biogasprozess im Labormaßstab sowohl in Batch- als auch in kontinuierlichen Verfahren nachgewiesen werden können. In der Praxis hängt die Wirkung von Enzympräparaten sehr stark vom Prozesszustand der jeweiligen Biogasanlage ab. Deshalb sind diese Resultate mit großen Streuungen behaftet und allgemein gültige Aussagen derzeit nicht möglich.

Hingegen belegen Forschungsergebnisse (Labor), dass die Milieubedingungen nur einen geringen Einfluss auf die Enzymwirksamkeit ausüben. Die Wirksamkeit wird vielmehr von der Zusammensetzung der Polysaccharide (Lignocellulosebestandteile) der Substrate (Substratspezifität) und der Enzymklasse (Wirkungsspezifität) bestimmt.

Um Enzymwirkungen auch in der Praxis reproduzieren und nutzen zu können, müssen Enzym-Substrat-Reaktionen im Reaktor noch besser verstanden werden. Untersuchungen zu Wirkmechanismen, Dosis-Effekt-Beziehungen, der Abhängigkeit der Enzymwirkung von Grad und Art der Fütterung sowie vom Prozesszustand und schließlich die Beeinflussung der verschiedenen Prozessparameter durch den Enzymeinsatz sind gegenwärtig Bestandteil des Arbeitsprogramms des FNR-geförderten Verbundvorhabens BiogasEnzyme (FKZ 22027707).

Spurenelemente in NawaRo-Biogasanlagen zum Ausgleich substratbedingter Mangelercheinungen und zur Stabilisierung des Gärprozesses

HANS OECHSNER, ANDREAS LEMMER, DANIEL PRESSLER

1 Einleitung

Bis zur Novellierung des Erneuerbaren-Energien-Gesetzes im Jahre 2004 wurden landwirtschaftliche Biogasanlagen in Deutschland vorwiegend mit Flüssigmist und biogenen Reststoffen beschickt. Damit war die Zahl der Biogasanlagen mit etwa 2000 und die installierte elektrische Leistung mit 390 MW noch relativ bescheiden (FACHVERBAND BIOGAS 2011). Bei der Novellierung des EEG im Jahre 2004 wurde erstmals eine spezielle Vergütung für den Einsatz von Pflanzenmaterial gewährt, das speziell für die Biogaserzeugung angebaut wurde. Mit dem zusätzlich gewährten „Innovationsbonus für Trockenvergärungsanlagen“ wurden sogar Anlagen besonders unterstützt, die auf den Einsatz von tierischen Exkrementen verzichteten. Vor dem Hintergrund einer Überproduktion von Nahrungsmitteln in Europa war damit möglich, auf landwirtschaftlicher Fläche nachwachsende Rohstoffe zu erzeugen und über die Biogasschiene energetisch zu verwerten. Damit stieg die Zahl landwirtschaftlicher Biogasanlagen wie deren Leistung deutlich an, sodass Ende 2010 nunmehr 6000 landwirtschaftliche Biogasanlagen mit einer gesamt installierten elektrischen Leistung von 2300 MW betrieben werden (FACHVERBAND BIOGAS 2011).

Es war nun für landwirtschaftliche Betriebe auch dann möglich eine Biogasanlage zu bauen und zu betreiben, wenn sie nicht über eigene oder von einem Nachbarbetrieb bezogene Gülle verfügen. Allerdings bietet der Einsatz von Flüssigmist in Biogasanlagen in der Regel eine Reihe von gravierenden Vorteilen für die Stabilität des Prozesses: Zum einen bringt speziell der Kot von Rindern einen Nachschub an Mikroorganismen in die Anlage. Die Inhaltstoffe von Flüssigmist bieten ausgezeichnete puffernde Wirkung und es werden nicht zuletzt Spurenelemente und alle für den Biogasprozess relevanten Nährstoffe geliefert. Es zeigte sich sehr schnell, dass ein Verzicht auf den Einsatz von Flüssigmist empfindliche Nachteile für die Stabilität des Biogasprozesses zur Folge haben kann. In umfangreichen Untersuchungen wurde daher in Hohenheim und auch in anderen Instituten überprüft, inwieweit Mangelsituationen entstehen und durch Additivzugabe ausgeglichen werden können (OECHSNER 2005).

2 Literaturübersicht

2.1 Besonderheiten des Biogasprozesses

Beim Biogasprozess wird die in den Pflanzen gespeicherte Sonnenenergie biologisch umgewandelt und energetisch nutzbar gemacht. Im Gegensatz zu aeroben Abbauprozessen ist der Biogasprozess relativ komplex und funktioniert dank der intensiven Zusammenarbeit der Organismengruppen. Oftmals wird der Gesamtprozess auf der Basis der von den Mikroorganismen gebildeten Zwischen- und Endprodukte in vier wesentliche Einzelschritte unterteilt (FUCHS 2007). Diese Einzelschritte werden als Hydrolyse, Acidogenese, Acetogenese und Methanogenese untergliedert (Abb. 1).

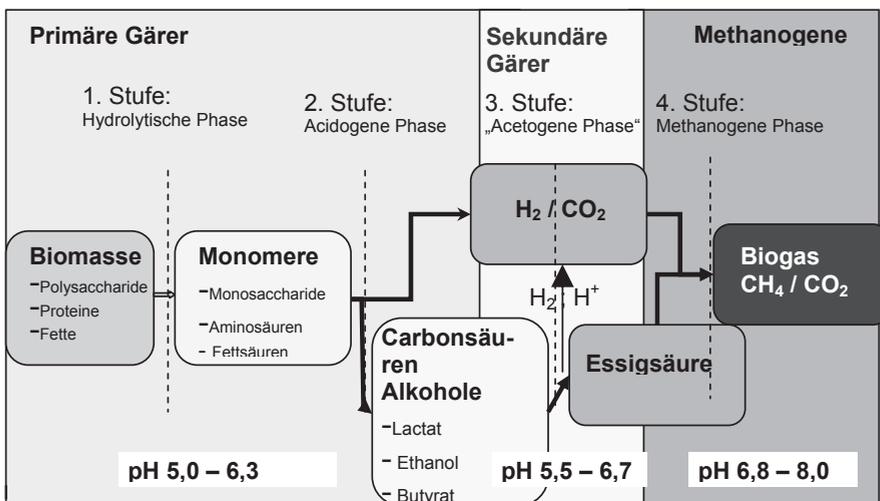


Abb. 1: Schematische Darstellung des anaeroben Stoffabbaus zur Erzeugung von Biogas mit Angabe der optimalen pH-Werte der Prozessstufen

Bei der Hydrolyse werden die chemischen Verbindungen der Ausgangsprodukte wie Eiweiß, Kohlehydrate oder Fette im Stoffwechsel durch Enzyme, dies sind in der Regel von primären Gärern emittierte Exoenzyme in ihre Grundbausteine (Monomere wie Aminosäuren, Monosaccharide, Fettsäuren), zerlegt. Nur diese niedermolekularen Substanzen können schließlich von den Mikroorganismen über spezifische Transportsysteme aufgenommen und weiter abgebaut werden (KABASCI 2009). Die von den primären Gärern aufgenommenen Einzelbausteine werden zu organischen Säuren, Alkoholen und Kohlendioxid umgewandelt (Acidogenese). Die sogenannten sekundären Gärer nutzen in der anschließenden Acetogenese die langkettigen Carbonsäuren und Alkohol um sie zu Essigsäure, Wasserstoff und Kohlendioxid umzusetzen. Der nachfolgende Hauptschritt, die Methanogenese nutzt zum einen die Essigsäure um sie über eine Disproportionie-

rungsreaktion zu Methan und Kohlendioxid umzuwandeln. Dies wird von den acetotophen Methanbakterien erledigt. Die hydrogenotophen Methanbakterien nutzen Wasserstoff und Kohlendioxid zur Erzeugung von Methan (KLOCKE 2009, SCHERER et al. 2009).

Im heute weitgehend eingesetzten Biogasverfahren, bestehend aus einem Fermenter mit Nachgärer oder in Kaskaden angeordneten Fermentern, laufen in der Regel alle hier genannten Prozessstufen nebeneinander ab. Damit liegen zwar nicht für alle am Prozess beteiligten Mikroorganismen jeweils die optimalen Umgebungsbedingungen vor, allerdings können bei pH-Werten über 6,8 alle am Prozess beteiligten Mikroorganismen ihre Abbauvorgänge erledigen.

2.2 Nährstoffversorgung der Mikroorganismen im Biogasprozess

Wesentliche Ausgangsstoffe für den Stoffwechsel der Mikroorganismen stellen die rein organischen Bestandteile der Biomasse bzw. die organischen Stoffwechselprodukte der vorgelagerten Mikroorganismen dar. Für den Aufbau der Mikroorganismen und auch ganz besonders für den Aufbau der katalysierenden Enzyme benötigen die am anaeroben Abbau beteiligten Mikroorganismen verschiedenste mineralische Elemente und organische Verbindungen. So sind diese Mineralstoffe beispielsweise Bestandteil der durch die Mikroorganismen gebildeten Enzyme und Koenzyme (FUCHS 2009). Ohne die Arbeit dieser Enzyme würde der Biogasprozess nicht funktionieren. Die ausreichende Versorgung der am Biogasprozess beteiligten Mikroorganismen mit Nährstoffen und Spurenelementen ist daher die Grundvoraussetzung für eine effiziente Abbautätigkeit.

Spurenelemente sind Mineralstoffe und damit natürliche Elemente, die in Böden, in Gesteinen oder Gewässern vorkommen. Sie sind für alle Organismen lebensnotwendig. Nach TERNES et al. (2005) sind sie als Katalysatoren am Stoffwechsel beteiligt, unentbehrlich für die Regulation des pH-Wertes, für die Schaffung von Puffersystemen oder die Förderung von Enzymsystemen. Sie werden von Pflanzen über die Wurzeln aus dem Boden aufgenommen und in die Biomasse eingebaut. Von den insgesamt 92 verschiedenen natürlichen Elementen können 40 bis 50 in Pflanzen nachgewiesen werden. Jedoch sind lediglich 16 davon für die Pflanze unentbehrlich. Daher werden diese auch als essenzielle Nährstoffe bezeichnet. In Abhängigkeit der von den Pflanzen benötigten Mengen können die Mineralstoffe in Makronährstoffe (> 50 mg/kg Biomasse) oder Mikronährstoffe (< 50 mg/kg Biomasse) unterteilt werden (ENTRUP und OEHMICHEN 2008).

Nach BISCHOFFSBERGER et al. (2005) besteht die Trockenmasse von Mikroorganismen etwa zu 50 % aus Kohlenstoff, zu 11 % aus Stickstoff, zu 2 % aus Phosphor und zu 1 % aus Schwefel. Der Kohlenstoff wird von den Mikroorganismen zum Aufbau ihrer Zellstruktur benötigt. Stickstoff ist vor allem für den Proteinaufbau als auch zur Bildung verschiedener Enzyme nötig. Phosphorverbindungen sind essenziell für die Bildung der Energieträger ATP und NADP und Schwefel ist der Bestandteil wichtiger Säuren wie

Cystein und Methionin. WEILAND (2000) empfiehlt im Gärsubstrat ein C:N:P:S-Verhältnis von 600:15:5:3, um die beteiligten Mikroorganismen optimal mit Makronährstoffen zu versorgen.

Neben Makronährstoffen sind auch Spurenelemente essenziell für das Überleben und die Leistungsfähigkeit von Mikroorganismen. Über die genaue Bedeutung vieler Spurenelemente können allerdings oft nur Vermutungen angestellt werden. Bisher sind vier wesentliche Aufgaben von Spurenelementen in der anaeroben Konversion bekannt:

- Spurenelemente sind am Aufbau von Koenzymen bzw. Kofaktoren maßgeblich beteiligt. Bisher sind sieben verschiedene Koenzyme bekannt, die im methanogenen Stoffwechsel eine Rolle spielen. Zu diesen zählen unter anderem das Coenzym F₄₃₀ oder die Formylmethanofuran-Dehydrogenase (BAUER et al. 2009).
- Oxidierte Formen der Spurenelemente dienen als Elektronenakzeptoren in den Prozessen der anaeroben Atmung, z.B. Eisenoxid und Manganoxid (PICKERING 1986)
- Spurenelemente reduzieren die Sulfidtoxizität. Eisen geht beispielsweise eine Bindung mit Schwefel zu Eisensulfid ein, was im Gärsubstrat ausfällt und damit die toxische Wirkung von Schwefel im Substrat mindert.
- Spurenelemente wie Cobalt stimulieren das methanogene Wachstum (OLESKIEWICZ und SCHARMA 1990).

2.3 Spurenelemente im Biogasprozess

Als wichtige Spurenelemente für den Biogasprozess sind die Elemente Cobalt, Mangan, Molybdän, Wolfram, Nickel und Selen einzustufen. Außerdem ist noch das Eisen besonders hilfreich im Biogasprozess, allerdings sind hier größere Anteile erforderlich (PREISSLER et al. 2009). Eisen ist vor allem ein wichtiges Element bei der Sulfidfällung. Außerdem ist es wichtiger Bestandteil vieler Enzyme beim anaeroben Stoffabbau. Cobalt fungiert als wichtiges Element beim Aufbau von Enzymen sowohl für die methanogenen als auch die acetogenen Bakterien. Molybdän und Wolfram sind ebenfalls für die Bildung von verschiedenen Enzymen unerlässlich. Nickel gilt im Biogasprozess als Universalelement, denn es ist am Aufbau vieler verschiedener Enzyme beteiligt. Hierbei ist Nickel vielfach als Zentralatom wie beim Cofaktor F₄₃₀ eingebaut. Selen ist beim Aufbau von Proteinen erforderlich und kann zum wachstumslimitierenden Faktor werden (BAUER et al. 2009; CHASTEEN und BANTLEY 2003; VAN DE WJINGAARD et al. 1988).

Bei allen Spurenelementen ist die Konzentration, in der die Elemente vorliegen, sowie deren Verfügbarkeit für die Mikroorganismen von entscheidender Bedeutung (BAUER et al. 2009). Für jede Komponente gibt es sowohl eine Art Minimal- als auch eine Maximalkonzentration, bei deren jeweiliger Unter- bzw. Überschreitung der mikrobielle Stoffwechselprozess eingeschränkt bzw. gehemmt wird (BISCHOFBERGER et al. 2005). Sind die Spurenelemente in zu geringen Konzentrationen vorhanden, so können unter anderem

die für den Stoffwechsel benötigten Enzyme und Koenzyme nicht mehr ausreichend gebildet werden. Als Folge sinkt nicht nur die Leistungsfähigkeit der methanogenen Mikroorganismenpopulationen, wobei diese oft zum limitierenden Faktor bei der Biogasbildung wird. Die primäre Gärung, d.h. die Bildung der längerkettigen Carbonsäuren und Alkohole ist hiervon meist nicht betroffen. Daher reichern sich die in diesen vorgelagerten Prozessschritten gebildeten Stoffwechselprodukte an – allen voran die Propionsäure. Oftmals steigt bei einem Spurenelementmangel auch die Viskosität des Gärsubstrates. Dies führt in aller Regel zu einem deutlich erhöhten Rühraufwand und im Extremfall zu einer direkten Limitierung der maximalen Faulraumbelastung, da sich das Gärsubstrat im Fermenter nicht mehr ausreichend durchmischen lässt (PREISSLER und LEMMER 2010). Wird im Gärsubstrat eines Fermenters ein Spurenelementmangel festgestellt und dieser durch die Zugabe technischer Mineralstoffmischungen anlagenindividuell ausgeglichen, so setzt meist innerhalb weniger Tage eine deutliche Prozessstabilisierung mit einhergehendem Säureabbau ein und die Faulraumbelastung kann wieder bzw. weiter gesteigert werden. Zudem wird oftmals die Substratausnutzung verbessert und der Rühraufwand reduziert.

Jedoch können auch zu hohe Spurenelementgehalte die mikrobielle Aktivität hemmen oder zum Erliegen bringen. Die dabei ablaufenden Mechanismen sind sehr vielfältig. Häufig wird die Aktivität eines Enzyms behindert, indem ein Zentralmetall durch ein unpassendes Element substituiert wird, oder indem sich Sulfide an Enzyme anlagern (BAUER et al. 2009). Einige Stoffe schädigen aber auch die Zellstruktur der Mikroorganismen. Hier ist vor allem die oligodynamische Wirkung von Kupfer hervorzuheben (FUCHS 2007). Kupfer gelangt vor allem als Kupferklauenbad oder als Futterzusatzstoff in der Schweinefütterung in die Gülle und damit in den Biogasprozess.

3 Untersuchungen zu Spurenelementen im Biogasprozess

3.1 Ergebnisse aus Praxiserhebungen an weitgehend güllerefrei betriebenen Biogasanlagen

An landwirtschaftlichen Praxisbiogasanlagen, die mit geringem Anteil oder ohne tierische Exkremente beschickt wurden, konnte beobachtet werden, dass die Konzentration von Essig- und besonders von Propionsäure, aber auch von längerkettigen Carbonsäuren kontinuierlich ansteigt und der Prozess damit instabiler wird. Häufig treten bei solchen Anlagen nach 1 bis 2 Verweilzeiten ohne Güllezusatz erhebliche Prozessstörungen auf – mit schlechter Biogasqualität und verminderter Gasausbeute bis hin zum „Umkippen“ der Fermenterbiologie.

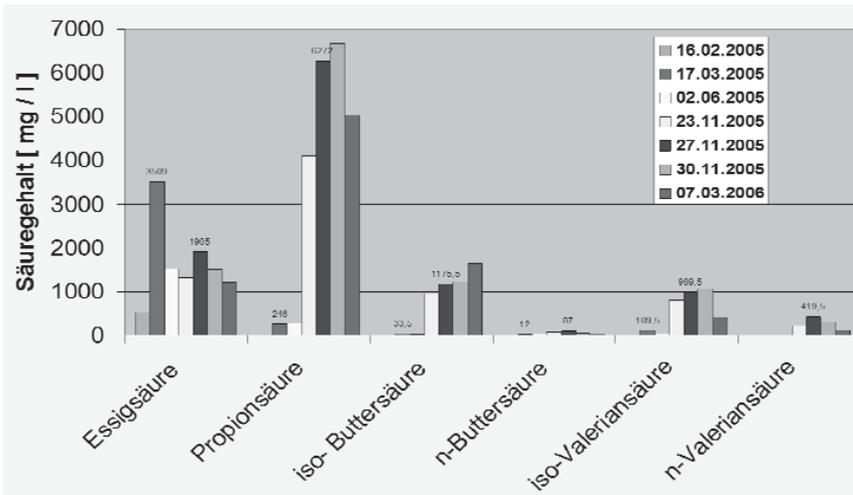


Abb. 2: Entwicklung der Fettsäurezusammensetzung im Fermenter bei güllefreier Vergärung über 13 Monate

Abbildung 2 zeigt am Beispiel einer Biogasanlage in instabilem Zustand den Anstieg der Konzentration längererkettiger Carbonsäuren über die Dauer eines Jahres. Ähnliche Ergebnisse konnten an zehn weiteren Praxisanlagen beobachtet werden, die ohne oder mit nur geringer Zugabe von tierischen Exkrementen betrieben wurden.

3.2 Untersuchungen zur Prozessstabilität des Biogasprozesses in Laborfermentern bei Einsatz von Additiven

Im Rahmen von Untersuchungen an 15 semikontinuierlich betriebenen Laborfermentern (1 mal pro Tag beschickt) sollte überprüft werden, welche Inhaltsstoffe der Gülle eine Stabilisierung des Biogasprozesses bewirken. Diese Laborfermenter waren zuvor mit einer Mischung aus Maissilage und Rindergülle über einen Zeitraum von mehr als drei Verweilzeiten im mesophilen Bereich (37 °C) bei einer Faulraumbelastung von 2,5 kg oTS / (m³ · d) und einer hydraulischen Verweilzeit von 35 Tagen betrieben worden (MUKENGELE 2006). Vor Versuchsbeginn wiesen alle Fermenter eine Fettsäurekonzentration unterhalb von 300 ppm Essigsäureäquivalent auf. Damit konnten sämtliche Fermenter als biologisch sehr stabil angesehen werden.

Zu Beginn des Versuchs wurde die zuvor täglich eingebrachte Güllemenge durch Wasser ersetzt. Die Verweilzeit blieb unverändert, die Faulraumbelastung reduzierte sich um die in der Gülle enthaltene organische Substanz auf 2,2 kg oTS/(m³ · d).

Nach Absetzen der Gülle traten bei der Maissilagevergärung bereits während der ersten Verweilzeit erhebliche Prozessstörungen auf, die auch durch eine Halbierung der täglich zugeführten Silomaismenge nicht behoben werden konnten. Der pH-Wert im Fer-

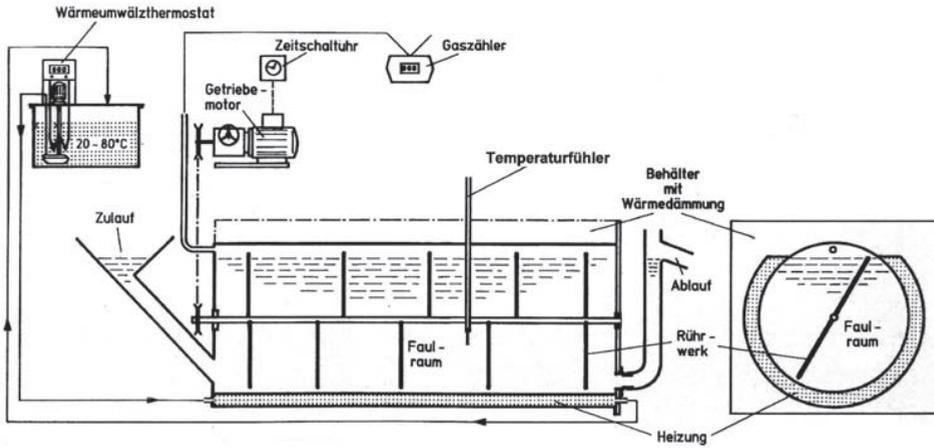


Abb. 3: Labor-Horizontalfermenter Universität Hohenheim mit 17 l Nutzvolumen – Schema

menter sank soweit ab, dass kein stabiler Prozess mehr möglich war (Abb. 4). Innerhalb der ersten drei Verweilzeiten reduzierte sich die Pufferkapazität im Gärsubstrat um 63 %, der TS-Gehalt um 50 %, die Ammoniumkonzentration um 52 % und die Spurenelementkonzentration um 25 bis 75 %.

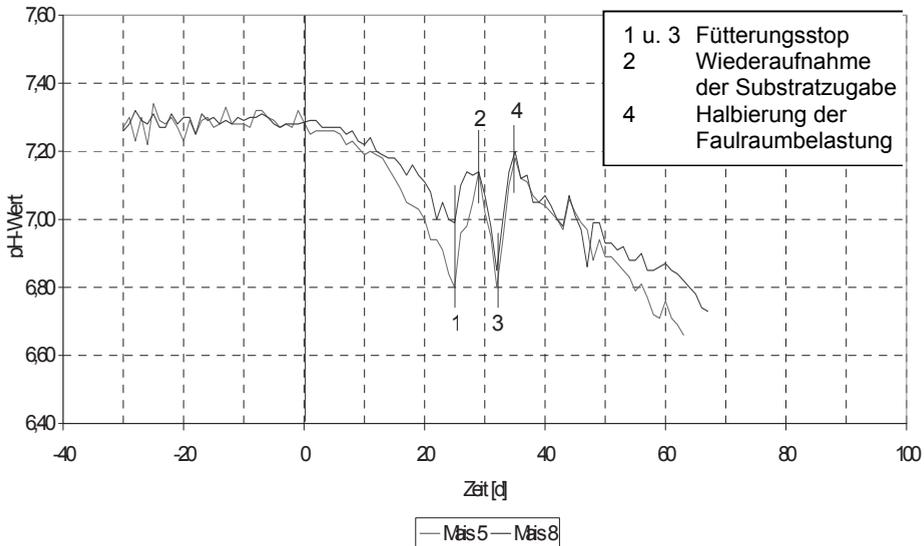


Abb. 4: Entwicklung des pH-Wertes bei güllefreier Silomaisvergärung in Laborfermentern, Raumbelastung 2,2 kg oTS/(m³•d), HRT 35 d

Daher wurden in einem darauf folgenden Versuch Varianten zusammengestellt, bei denen gezielt die zuvor erkannte „Mangelsituation“ durch Zugabe von Prozesshilfsstoffen beseitigt werden sollte. Zunächst wurde eine Kofermentation von Gülle und Maissilage über 100 Tage eingefahren. Danach wurde bei einer hydraulischen Verweilzeit (HRT) von 40 Tagen und einer Raumbelastung von $2,5 \text{ kg oTS}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ der Gülleanteil durch Wasser ersetzt und verschiedene Additive zugesetzt (Tab. 1):

- Zum Teil wurde Puffersubstanz (Dinatriumhydrogenphosphat) zugegeben.
- Bei anderen Varianten wurde versucht, durch Zugabe von Holzfasern die unverdaulichen Fraktionen der Rindergülle nachzubilden und den Mikroorganismen eine bessere Besiedelungsfläche zu bieten.
- Bei anderen Varianten wurde die Ammoniumkonzentration durch Zugabe von Harnstoff ausgeglichen.
- Bei einigen Versuchsvarianten wurde eine Spurenelementmischung eingesetzt, die bis dahin noch nicht im Handel erhältlich war. Die zugeführten Spurenelemente sollten ein mögliches Spurenelementdefizit der Maissilage ausgleichen.
- Die genannten Additive wurden in verschiedenen Mischungen zusammengestellt, so dass sich insgesamt 5 Versuchsvarianten ergaben, die einer Kontrolle gegenübergestellt wurden, bei der nur Maissilage und Wasser zugesetzt wurden.

Tab. 1: Versuchsplan zur güllefreien Vergärung von nachwachsenden Rohstoffen und Zusatz verschiedener Prozesshilfsstoffe

Variante	Zugesetzte Substrate
Kontrolle	Maissilage und Wasser
1	Maissilage, Wasser und Puffersubstanz
2	Maissilage, Wasser, Puffersubstanz und Holzfaser
3	Maissilage, Wasser, Puffersubstanz und Spurenelemente
4	Maissilage, Wasser, Harnstoff, Spurenelemente und Holzfaser
5	Maissilage, Wasser, Puffer, Spurenelemente, Harnstoff und Holzfaser

Bei den Varianten ohne Spurenelementzugabe wurde 25 bis 28 Tage nach Versuchsbeginn der für essigsäure- und methanbildende Mikroorganismen notwendige neutrale Bereich von $\text{pH} > 6,8$ unterschritten (Abb. 5). Zu diesem Zeitpunkt lag die Säurekonzentration dieser Varianten bereits bei 2870–5070 mg/l Essigsäureäquivalent und stieg weiter an. Nur zwei Wochen später betrug die Säurekonzentration dieser Varianten bereits 8830–10150 mg/l Essigsäureäquivalent. Die gebildete Biogasmenge lag sehr niedrig: unter 0,6 l je Liter Fermentervolumen bei einem Methangehalt von weniger als 45 %. Der Prozess dieser Varianten wies eine massive Störung auf. Der Fermenterbetrieb wurde daher am 42. Tag abgebrochen.

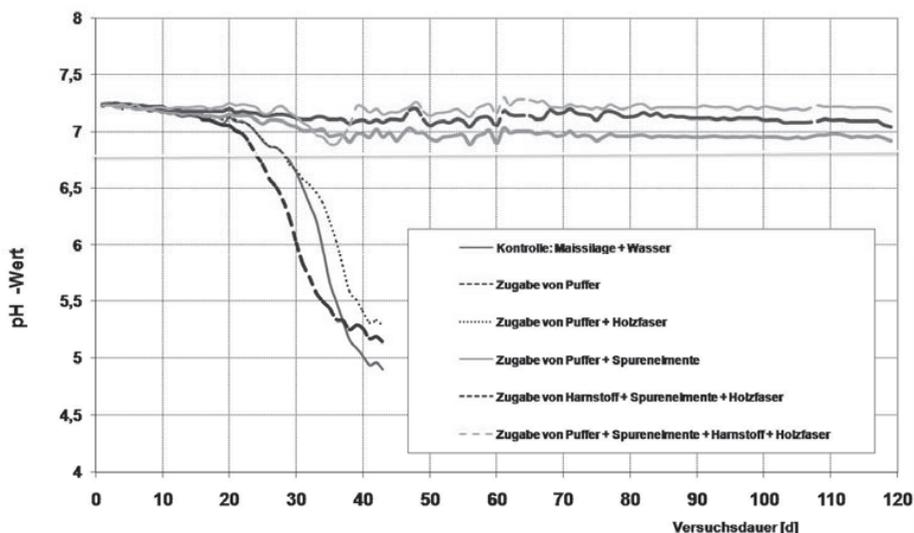


Abb. 5: Entwicklung des pH-Wertes im Gärsubstrat während des Versuches
 HRT: 40 Tage, Raumbelastung 2,5 kg oTS/(m³ · d); Zugabe von verschiedenen Hilfsstoffen (PRESSLER 2009)

Die Varianten, bei denen neben Puffersubstanzen, Harnstoff und Holzfasern auch Spurenelemente zugesetzt wurden, zeigten bis über das Ende der dritten Verweilzeit hinaus einen stabilen Prozessverlauf. Zu diesem Zeitpunkt waren bereits mehr als 95 % des Ausgangssubstrates aus den Fermentern verdrängt und es war ein Gleichgewichtszustand erreicht, sodass keine Prozessstörungen mehr zu erwarten waren. Die Gesamtsäurekonzentrationen im Fermenter lagen bei diesen Varianten zum Teil unterhalb von 50 mg/l und maximal bei 300 mg/l Essigsäureäquivalent. Sowohl die reaktorspezifischen Gaserträge mit bis zu 1,6 l/l Faulraumvolumen, als auch die substratspezifischen Methanerträge mit bis zu 335 l/kg oTS entsprachen dem Niveau einer stabil laufenden Kofermentation von Maissilage. Während die Zugabe von Puffersubstanz und Holzfaser nicht reichte den Prozess zu stabilisieren, wurde jeweils bei Beteiligung von Spurenelementen eine Prozessstabilisierung über lange Zeit erzielt und der pH-Wert der Fermenterinhalt blieb deutlich über der kritischen Grenze von pH 6,8. Die positive Wirkung auf den biologischen Prozess kann damit eindeutig der Zugabe der Spurenelementmischung zugewiesen werden.

Bei einem weiteren Versuch wurde in zwei Laborfermentern nach und nach über die Dauer eines Jahres die Raumbelastung bis zu 5 kg oTS/(m³ · d) gesteigert. Auch nach Erreichen der Raumbelastung von 5 kg oTS/(m³ · d) blieb ein stabiler Fermenterbetrieb erhalten. Ebenso stieg die Methanausbeute parallel zur Raumbelastung an (Abb. 6). Die Konzentration an Carbonsäuren blieb auf sehr niedrigem Niveau. Bei einer Faulraumbelastung von 4,5 kg oTS wurden lediglich 245 mg/l Essigsäure und 100 mg/l Propionsäure

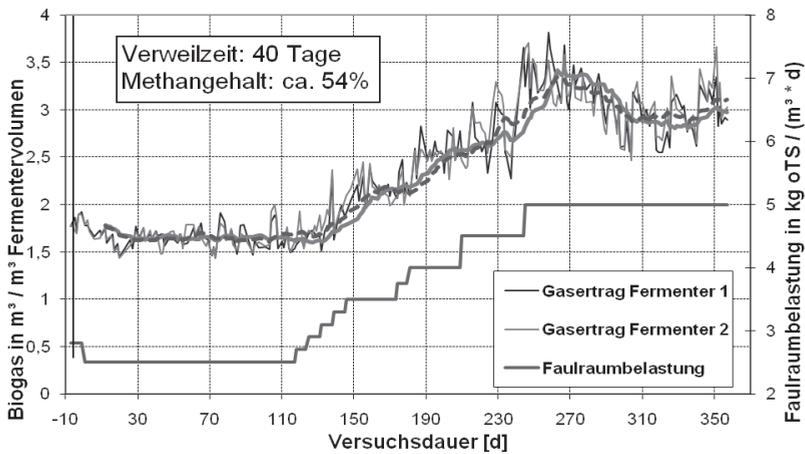


Abb. 6: Biogasertrag bei güllefreier Vergärung von Maissilage unter Zusatz von Spurenelementen bei steigender Raumbelastung

gemessen. Die beobachteten Werte weisen auf eine ungehemmte und schnelle Umsetzung der Säuren in Methan hin. Aufgrund der Geometrie der Laborfermenter konnte im Rahmen dieser Untersuchung leider keine höhere Raumbelastung als $5 \text{ kg oTS}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ erprobt werden. Eine am Ende des Versuches zu beobachtende Stagnation der Methanertragssteigerung kam durch Wechsel der Maissilage mit geringerem Kolbenanteil zustande.

3.3 Richtwerte für die Ergänzung von Spurenelementen im Biogasprozess

In weiteren Laborversuchen wurde sowohl im Durchflussbetrieb als auch mit dem Hohenheimer Biogasertragstest (HBT) im Batchbetrieb untersucht, welche Spurenelemente in welchen Konzentrationen erforderlich sind, um einen optimalen Fermenterbetrieb zu erzielen (PREISLER et al. 2011). Untersuchungen von LINDORFER (2009) zeigen, dass die Mineralstoffgehalte in Biogasanlagen in einem weiten Bereich schwanken. Die hier erwähnten Untersuchungen von PREISLER et al. 2009 belegen, dass zum Erreichen optimaler Stoffwechselraten der methanogenen Mikroorganismen insbesondere Nickel, Cobalt, Molybdän, Selen und Eisen von entscheidender Bedeutung sind (Tab. 2). In Abhängigkeit der Faulraumbelastung, der Verweilzeit sowie der Makronährstoffgehalte können nach den bisherigen Erkenntnissen die in der Tabelle genannten Gehalte im Gärsubstrat von Biogasanlagen als Richtwerte angesehen werden, die zum Erhalt einer hohen Stoffwechselleistung der methanogenen Mikroorganismen notwendig sind.

Tab. 2: Richtwerte wesentlicher Mineralstoffgehalte im Gärsubstrat von NawaRo-beschickten Biogasanlagen (PREISSLER et al. 2009, LEMMER et al. 2010)

Elemente	Mineralstoffgehalt [mg/kg TM]	
	Minimum	Maximum
Nickel	3,0	16,0
Cobalt	0,4	5,0
Molybdän	1,0	6,0
Selen	0,2	2,0
Eisen	1 500	3 000
Mangan	100	1 500
Wolfram	0,1	30
Zink	30	300

3.4 Praxisergebnisse beim Einsatz von Spurenelementen

Neben diesen Untersuchungen im Labor wurde auch an Praxisbiogasanlagen gearbeitet. Ein Untersuchungsbeispiel hierzu ist in Abbildung 7 dargestellt. Der Untersuchungsbetrieb war mit zwei identischen Fermentern mit je 1 500 m³ Nutzvolumen ausgestattet, die parallel betrieben wurden. Diese wurden mit Rindergülle von 180 GV sowie Maissilage, Getreide-GPS, Getreidekorn und Grassilage beschickt. Trotz eines Gülleanteils von mehr als einem Drittel in der Mischung, konnte kein nachhaltiger stabiler Fermenterbetrieb erreicht werden. Die Anlage konnte nur mit einer Raumbelastung von 2 kg oTS/(m³ · d) betrieben werden. Trotzdem lag in beiden gleich beschickten Fermentern eine sehr hohe Konzentration an Carbonsäuren vor. Es wurde ein Essigsäureäquivalent von über 7 000 mg/l gemessen. Der hohe Anteil von Propionsäure von knapp 6 000 mg/l und der Anteil von Essigsäure von ca. 1 500 mg/l belegten eine Prozessstörung bei gehemmter Acetogenese und Methanogenese. Die Leistung der Biogasanlage lag deutlich unter dem geplanten Soll. Durch Reduzierung der Futtermenge und damit der Raumbelastung über 2 Wochen konnte kaum eine Reduzierung der Konzentration an Carbonsäuren erreicht werden (Abb. 7). Als Ursache für diesen instabilen Substratabbau wurde ein Spurenelementmangel im Substrat vermutet, obwohl ein hoher Anteil von Flüssigmist in der Futterration vorlag. Eine Ergänzung der essenziellen Spurenelemente in einem der beiden Fermenter zeigte innerhalb von 2 Wochen ein klares Resultat. Die Propionsäure wurde abgebaut, sodass nur noch eine Konzentration um 600 mg/l vorlag. Die Konzentration stabilisierte sich weiterhin und pendelte sich auf einem Niveau von 200 mg/l ein. Dies blieb auch dann so, als die Futtermenge fast verdoppelt wurde und eine Raumbelastung von 4 kg oTS/(m³ · d) gefahren werden konnte. Der Gehalt an Essigsäure fiel zunächst auf etwa 500 mg/l und stieg bei Erhöhung der Raumbelastung an, blieb aber unter 1 000 mg/l. Die Biogasproduktion stieg parallel zur Steigerung der Raumbelastung auf das Doppelte an. Der zunächst nicht mit Spurenelementen versorgte Fermenter 2 zeigte

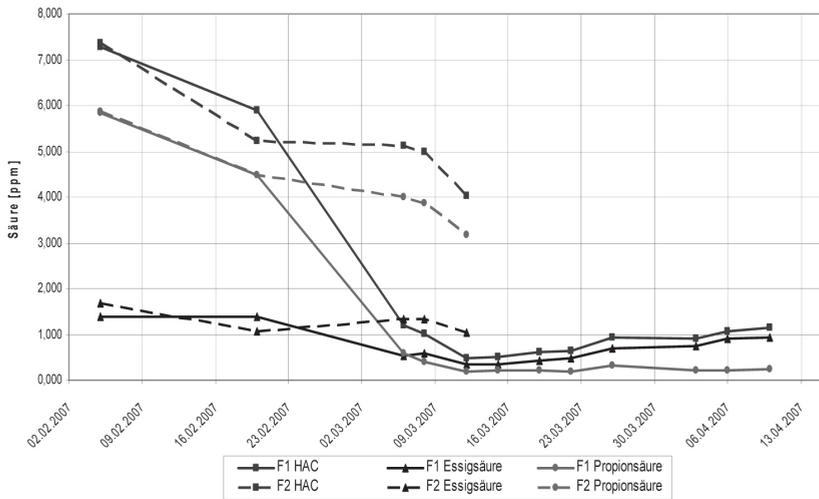


Abb. 7: Gehalt an Carbonsäuren im Fermenter in einer Praxisbiogasanlage mit 2 Fermentern ohne und mit Spurenelementergänzung (PREISLER 2009)

keine weitere Reduzierung der Carbonsäuren. Nach zwei Wochen wurde auch dieser Fermenter mit Spurenelementen versorgt, wodurch auch dessen Säurekonzentration schnell abnahm. Der Fermenter 2 wurde ab dem 13.02. nicht mehr beprobt.

4 Spurennährstoffkonzentration im Gärsubstrat

Durch Verwitterungsvorgänge werden Mineralstoffe aus Gestein freigesetzt und gelangen so in unterschiedlichen Konzentrationen in den Boden. Die Spurenelementaufnahme der Pflanzen aus dem Boden ist relativ gering, sodass je nach Element oftmals nur wenige Gramm je Hektar aufgenommen werden. Entsprechend gering ist der Mikronährstoffgehalt in pflanzlicher Biomasse (ALEXANDER et al. 2007). Über die pflanzliche Biomasse gelangen die Spurenelemente direkt oder indirekt als verdaute Biomasse aus der Tierhaltung in den Biogasprozess.

In einer Studie wurden an der Landesanstalt für Agrartechnik und Bioenergie Untersuchungen zur Konzentration der für den Biogasprozess essenziellen Spurenelemente in Pflanzenmasse und tierischen Exkrementen durchgeführt. Hierbei wurden Proben von 13 landwirtschaftlichen Betrieben aus verschiedenen Regionen Baden-Württembergs untersucht (BÄUERLE 2010, LEMMER et al. 2010).

Dabei zeigte sich, dass sich die mittleren Makro- und Mikronährstoffgehalte je nach der Art des pflanzlichen Substrates stark unterscheiden. Vor allem Grassilage (hier wurden 24 Proben analysiert) weist besonders hohe Konzentrationen an Spurenelementen

auf (Abb. 8). Das untersuchte Rübenmus zeigte einen noch höheren Gehalt, allerdings lag hier nur eine Substratprobe vor. Getreide-GPS (n = 6) und Maissilage (n = 23) bieten dagegen nur eine sehr geringe Lieferung von Spurennährstoffen, was erklärt, warum besonders bei einseitigem Einsatz dieser Gärsubstrate häufig Probleme in der Praxis auftreten.

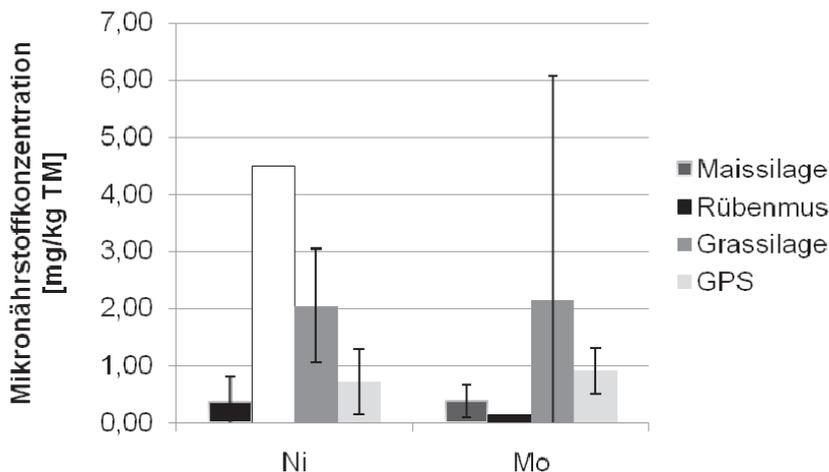


Abb. 8: Mikronährstoffgehalt von Nickel und Molybdän in der Pflanzenmasse
 Probenzahlen: Maissilage: n = 23; Rübenmus: n = 1; Grassilage: n = 24; GPS: n = 6

Die Gehalte an Spurennährstoffen aus tierischen Exkrementen liegen dagegen verhältnismäßig hoch und spiegeln die Bedeutung dieser Substrate für den Biogasprozess wieder. Vor allem Schweinegülle und Hühnerkot zeigen besonders hohe Konzentrationen. Auch Rindergülle enthält höhere Spurennährstoffkonzentrationen als nach Tabelle 2 für einen optimalen biologischen Prozess erforderlich sind. Damit können die Exkremente in der Regel zu einem gewissen Ausgleich von fehlenden Spurennährstoffen in Pflanzenmasse genutzt werden.

Oftmals reichen die Spurenelementgehalte der in die Biogasanlage eingebrachten Substrate jedoch trotz Gülleeinsatz nicht aus, um eine ausreichende Spurenelementversorgung der Fermenterbiologie zu gewährleisten. In solchen Fällen kann eine Limitierung des Biogasprozesses nach dem Liebigschen Gesetz des Minimums durch Zugabe der im Mangel befindlichen Elemente behoben werden.

5 Zusammenfassung

Durch Analyse der biologischen Zusammenhänge beim Biogasprozess in Kombination zu umfangreichen Untersuchungen konnte gezeigt werden, dass für einen effektiven Verlauf der vier Abbaustufen des Biogasprozesses eine optimale Versorgung der Mikroorganismen mit Spurenelementen unerlässlich ist. Spurenelemente sind unter anderem am Aufbau von Koenzymen bzw. Kofaktoren maßgeblich beteiligt, dienen als Elektronenakzeptoren in den Prozessen der anaeroben Atmung, reduzieren die Sulfidtoxizität und stimulieren das methanogene Wachstum. Bei Fehlen einzelner Elemente kann der Biogasprozess empfindlich gestört werden, was bis zum „Umkippen“ der Fermenterbiologie und Einstellung der Biogasproduktion führen kann.

In Untersuchungen an der Landesanstalt für Agrartechnik und Bioenergie konnte ermittelt werden, welche Mikronährstoffe in welchen Konzentrationen beim Biogasprozess essenziell erforderlich sind. Durch Untersuchungen an nachwachsenden Rohstoffen und tierischen Exkrementen konnte die Nachlieferung aus diesen Quellen bewertet werden.

Die Resultate aus den Erhebungen und Laboruntersuchungen wurden durch Versuche an Praxisbiogasanlagen erprobt und abgesichert. Bei ineffizient arbeitenden Biogasanlagen mit hohem Gehalt an Carbonsäuren, besonders an Propionsäure im Substrat liegt ein Mangel an Spurennährstoffen nahe. Nach Analyse der Spurennährstoffgehalte im Fermenter und gezielter Ergänzung der fehlenden Elemente kann der Biogasprozess in den meisten Fällen reanimiert und stabilisiert werden. Dadurch wird der Substratabbau optimiert. Häufig kann der Fermenter danach mit einer höheren Raumbelastung betrieben werden. Durch dieses Vorgehen lässt sich die Effizienz des Biogasprozesses wesentlich verbessern.

Literatur

Die Literaturliste kann bei Herrn Dr. Oechsner erfragt werden.

EEG – aktuelle Entwicklungen für den Biogasbereich

ULRICH KEYMER

1 Präambel

Das EEG 2009 hat, wie vom Gesetzgeber beabsichtigt, positive Anreize gesetzt. Trotzdem waren Anpassungen erforderlich, um die Stromerzeugung aus Biogas unter Berücksichtigung des Ressourcen- und Umweltschutzes sowie der Nachhaltigkeitsanforderungen noch effizienter zu gestalten und die Regelungen zu entschärfen, die den Wettbewerb sowohl innerhalb der Biogasbranche als auch zwischen Biogaserzeugern und landwirtschaftlichen Betrieben verzerren. Der Gesetzgeber hat allerdings, entgegen seiner vielmals geäußerten Absicht, das im Grundsatz bewährte System des EEG 2009 „anzupassen“, „Übertreibungen zu beseitigen“, „zu vereinfachen“ oder „nachzusteuern“, entschieden die Vergütungsstruktur umzukrempeln und die EEG-Novelle wieder unter hohem Zeitdruck über die parlamentarischen Hürden zu peitschen.

Dieser Beitrag soll einen Überblick geben, was auf die landwirtschaftlichen Biogaserzeuger zukommt und wie sich die Neuerungen ökonomisch auswirken. Eine Diskussion der gesamten EEG-Novelle würde den Rahmen dieses Beitrags deutlich überschreiten. Neben vielen inhaltlichen Änderungen sind zu den ehemals 66 Paragraphen weitere 21 hinzugekommen.

2 Technische Vorgaben

Wie schon bisher in § 6 festgelegt, erhalten Anlagenbetreiber erst dann eine Vergütung, wenn bestimmte technische Vorgaben erfüllt sind. Reichte es nach dem alten EEG noch aus, ab einer installierten Leistung von 100 kW_{el} eine ferngesteuerte Einrichtung zur Regelung der Einspeiseleistung und zum Abruf der Ist-Einspeisung bereitzustellen, so müssen zukünftig alle Biogasanlagenbetreiber zusätzlich sicherstellen, dass

1. „ein neu zu errichtendes Gärrestlager am Standort der Biogaserzeugung technisch gasdicht abgedeckt ist und die hydraulische Verweilzeit in dem gasdichten und an eine Gasverwertung angeschlossenen System mindestens 150 Tage beträgt und
2. zusätzliche Gasverbrauchseinrichtungen zur Vermeidung einer Freisetzung von Biogas verwendet werden“ (z. B. eine Gasfackel).

Nota bene: Reserve-BHKW in Biogasanlagen mit einer installierten Leistung über 100 kW_{el}, erfüllen die Anforderungen nach Nr. 2 nicht.

Biogasanlagen, die zur Biogaserzeugung ausschließlich Gülle mit einem Trockensubstanzgehalt von maximal 15 Prozent¹ einsetzen, sind von der Abdeckpflicht und der Einhaltung der Mindestverweilzeit befreit. In der Praxis sind Anlagen, die nur Flüssigmist einsetzen, bisher kaum anzutreffen.

Wirklich neu ist die Forderung nach 150 Tagen Verweilzeit im gasdichten System. Die anderen Auflagen waren schon im EEG 2009 mit einer kleinen aber bedeutsamen Nuance verankert. Nach dem EEG 2009 erhielten Anlagen, die nach dem Bundesimmissionschutzgesetz (BImSchG) genehmigungsbedürftig sind (Feuerungswärmeleistung größer 1 MW), den NawaRo-Bonus nur, „wenn bei der Erzeugung des Biogases das Gärrestlager gasdicht abgedeckt und zusätzliche Gasverbrauchseinrichtungen für einen Störfall oder für eine Überproduktion verwendet werden“. Die neue Regelung weicht dieses strikte Gebot der Abdeckung auf und fordert nur noch die gasdichte Abdeckung für neu zu errichtende Gärrestlager am Standort der Biogasanlage. Damit erhöht der Gesetzgeber einerseits die Auflagen und damit die Kosten für kleine Biogasanlagen deutlich. Andererseits senkt er die Anforderungen an Großanlagen und fordert die Betreiber geradezu auf, nach kreativen Lösungen zu suchen, z. B. durch den Bau oder die Nutzung externer Gärrestlager.

3 Vergütungssystem

Der Paragraph 27 regelt die Vergütung und die Anspruchsvoraussetzungen für Strom aus Biomasse. Das Vergütungssystem wurde vollständig neu gestaltet und alle bisherigen Boni gestrichen. Der Gesetzgeber ist der Auffassung, dass durch diese Änderungen das Vergütungssystem stark vereinfacht wird. Ungeachtet dessen führt er eine gesonderte Vergütung für Bioabfallvergärungsanlagen (§ 27a EEG), eine gesonderte Vergütung für kleine Gülleanlagen (§ 27b EEG) und eine gestaffelte Zusatzvergütung für die Biomethaneinspeisung ein (§ 27c EEG).

3.1 Vergütungsberechnung

Die gesetzlich festgelegten Vergütungen gelten für Anlagen, die bis zum 31. Dezember 2012 erstmals den Betrieb aufnehmen. Ab 2013 sinken die Vergütungen mit Ausnahme des Einsatzstoffklassen-Bonus um jährlich zwei Prozent.

Wie bisher sind die zum jeweiligen Inbetriebnahmezeitpunkt gültigen Vergütungssätze und Boni jeweils für die Dauer von 20 Kalenderjahren zuzüglich des Inbetriebnah-

¹ Gülle ist Wirtschaftsdünger aus tierischen Ausscheidungen, auch mit geringen Mengen Einstreu oder Futterresten oder Zugabe von Wasser, dessen Trockensubstanzgehalt 15 vom Hundert nicht übersteigt (Düngegesetz § 2 Satz 1 Nr. 4).

mejahres zu zahlen. Wie bisher wird die Feststellung des Inbetriebnahmezeitpunktes im Einzelfall zu heftigen Diskussionen führen.

Obwohl viele Experten eine Überarbeitung der Definition angeregt hatten, bleibt der Begriff „Anlage“ unverändert und bezieht sich weiterhin auf die „Einrichtung zur Erzeugung von Strom“. Zumindest dem nicht Rechtskundigen erschließt sich nicht unmittelbar, zu welchem Zeitpunkt eine Anlage in Betrieb genommen wurde, wenn als „Inbetriebnahme“ „die erstmalige Inbetriebsetzung des Generators der Anlage nach Herstellung der technischen Betriebsbereitschaft der Anlage“ gilt. Dass der Gesetzgeber unter „Anlage“ zuerst die Stromerzeugungseinheit meint und dann die gesamte Biogasanlage, lässt sich erst aus der Gesetzesbegründung ableiten. Wenigstens stellt der Gesetzgeber klar: „Der Austausch des Generators oder sonstiger technischer oder baulicher Teile nach der erstmaligen Inbetriebnahme führt nicht zu einer Änderung des Zeitpunkts der Inbetriebnahme“. Wie es sich mit dem Zeitpunkt Inbetriebnahme verhält, wenn die Anlage durch eine neue Anlage höherer Leistung ersetzt wird, bleibt weiterhin unklar.

Erfreulich ist, dass der Gesetzgeber für die Vergütung von Strom aus mehreren Anlagen eine eindeutige Regelung in das Gesetz aufgenommen hat. Mehrere Anlagen gelten nunmehr „unabhängig von den Eigentumsverhältnissen und ausschließlich zum Zweck der Ermittlung der Vergütung für den jeweils zuletzt in Betrieb gesetzten Generator als eine Anlage, wenn sie Strom aus Biogas mit Ausnahme von Biomethan erzeugen und das Biogas aus derselben Anlage zur Erzeugung von Biogas stammt“. Das Anlagensplitting zum Zwecke der Vergütungsoptimierung verliert dadurch deutlich an Attraktivität.

3.2 Vergütung für Anlagen nach § 27

In Absatz 1 regelt Paragraph 27 nach wie vor die Grundvergütung. Sie hat sich im Vergleich zur alten Regelung wesentlich erhöht (Tab. 1). Dies begründet der Gesetzgeber damit, dass

- in die neuen Grundvergütungen der gestrichene KWK-Bonus anteilig mit 2 ct/kWh integriert sei und
- die höheren anlagenbezogenen Kosten berücksichtigt wären, die sich aus den Anforderungen des Fachrechts ergeben (Investitionen in Immissionschutzvorrichtungen, Sicherheits- und Automatisierungstechnik).

Tab. 1: Grundvergütungen nach EEG 2009 und EEG 2012

Bemessungsleistung ¹⁾ der Anlage kW	EEG 2009 ct/kWh _{el}	EEG 2012 ct/kWh _{el}
Bis 150	11,32	14,30
Über 150 bis 500	8,91	12,30
Über 500 bis 5 000	8,00	11,00

1) „Bemessungsleistung“ einer Anlage ist der Quotient aus der Summe der in dem jeweiligen Kalenderjahr erzeugten Kilowattstunden und der Summe der vollen Zeitstunden des jeweiligen Kalenderjahres abzüglich der vollen Stunden vor der erstmaligen Erzeugung von Strom aus erneuerbaren Energien durch die Anlage und nach endgültiger Stilllegung der Anlage.

Bemerkenswert ist, dass die Grundvergütungen für Anlagen bis 150 kW_{el} Bemessungsleistung unterproportional angehoben wurden, obwohl „höhere anlagenbezogene Kosten“ vor allem kleine Biogasanlagen betreffen.

Zusätzlich zu der Grundvergütung führt § 27 Absatz 2 EEG einen neuen Bonus ein. Der Einsatzstoffklassen-Bonus soll bis zu einer Bemessungsleistung von fünf Megawatt, die „Mehrkosten des Einsatzes bestimmter Einsatzstoffe“ abdecken, „die durch die Grundvergütung nicht abgedeckt sind²“. Er ist „weitgehend unabhängig von der Anlagenleistung, da die Einsatzstoffkosten nicht entscheidend von der Anlagengröße abhängig sind“, schreibt der Gesetzgeber in der Begründung und widerspricht sich postwendend in nächsten Satz: „Eine Ausnahme bildet die einsatzstoffbezogene Vergütung für die Einsatzstoffvergütungskategorie I, die ab einer Bemessungsleistung von mehr als 500 Kilowatt für diesen Leistungsanteil ... leicht abgesenkt wird“ (Tab. 2).

Tab. 2: Einsatzstoffklassen-Bonus

Bemessungsleistung der Anlage kW	Einsatzstoffvergütungsklassen		
	Klasse I ct/kWh _{el}	Klasse II (keine Gülle) ct/kWh _{el}	Klasse II (Gülle ¹⁾) ct/kWh _{el}
Bis 500	6,00		8,00
Über 500 bis 750	5,00	8,00	6,00
Über 750 bis 5 000	4,00		

1) Gülle im Sinne des Einsatzstoffklassen-Bonus sind Geflügelmist, Geflügeltrockenkot, Pferdemist, Rinderfestmist, Rindergülle, Schafmist, Ziegenmist, Schweinefestmist und Schweinegülle.

Die einsatzstoffbezogenen Vergütungssätze berücksichtigen, so der Gesetzgeber, dass sich die Rohstoffkosten der einzelnen Einsatzstoffe signifikant unterscheiden. Daher differenziert er zwischen verschiedenen Einsatzstoffvergütungsklassen.

² BT-Drs 17/6071 vom 06.06.2011, S. 141.

- Einsatzstoffvergütungsklasse I (ESK I) umfasst im Wesentlichen Pflanzen und Pflanzenbestandteile, die nach dem EEG 2009 als NawaRo eingestuft waren (Anhang 2). Im Vergleich zum alten NawaRo-Bonus sinkt die Vergütung für kleinere Anlagen, um $0,79 \text{ ct/kWh}_{\text{el}}$. Dagegen steigt der Vergütungssatz im Leistungsbereich zwischen 500 und $750 \text{ kW}_{\text{el}}$ um $1,12 \text{ ct/kWh}_{\text{el}}$ und auch Bemessungsleistungen über 750 kW werden noch um $0,12 \text{ ct/kWh}_{\text{el}}$ besser vergütet als bisher.
- Einsatzstoffvergütungsklasse II (ESK II) beinhaltet sogenannte „ökologisch wünschenswerte Einsatzstoffe, die geringe Nutzungskonkurrenzen aufweisen und deren Einsatz einen hohen Beitrag für den Klimaschutz leisten kann, die jedoch in der Regel nur zu höheren Kosten mobilisiert werden können“. Dazu gehören ausgewählte Wirtschaftdünger, Landschaftspflegematerial, Stroh und einige andere Substrate (Anhang 3). Warum beispielsweise Phacelia oder Klee gras und Luzerne gras „als Zwischenfrucht von Ackerstandorten“ besonders ökologisch wünschenswerte Einsatzstoffe sind, andere Zwischenfrüchte, wie Senf, Weidelgräser, Sommerrüben aber ausgeschlossen sind, ist nicht nachvollziehbar.
- Einsatzstoffvergütungsklasse 0 (ESK 0) definiert alle Einsatzstoffe, die zwar nach der Biomasseverordnung als anerkannte Biomasse gelten aber nicht zu den Einsatzstoffvergütungsklassen I oder II gehören (Anhang 1) und keinen Einsatzstoffklassen-Bonus erhalten, weil sie „keine oder nur geringe Bereitstellungskosten verursachen“.

Die Berechnung der Einsatzstoffvergütung basiert auf Standardmethanerträgen, die für jeden einzelnen Einsatzstoff in der Biomasseverordnung (Anhang 1 bis 3) festgelegt sind. Entsprechend dem Anteil der Einsatzstoffklassen am Gesamtmethanertrag errechnet sich die Höhe des Bonus.

Dazu ein Beispiel: Eine kleine Biogasanlage setzt auf das Jahr gerechnet $3\,000 \text{ t}$ Mais-silage, 750 t Grassilage, $2\,200 \text{ t}$ Rindergülle, 500 t Rindermist und 200 t Getreideausputz ein. Der theoretische Methanertrag für die einzelnen Einsatzstoffklassen lässt sich entsprechend der Tabelle 3 ermitteln. Der Einsatzstoffklassen-Bonus beträgt dann für $77,41 \%$ des tatsächlich eingespeisten Stromes $6,00 \text{ ct/kWh}_{\text{el}}$ (ESK I); für $12,59 \%$ erhält die Anlage $8,00 \text{ ct/kWh}_{\text{el}}$ (ESK I). Keinen Bonus gibt es für die restlichen $10,01 \%$ des eingespeisten Stromes (ESK 0).

Nota bene: Flüssige Biomasse, einschließlich Pflanzenölmethylester, zur Zünd- und Stützfeuerung geht in die Berechnung nicht ein und ist damit wie bisher bonus-unschädlich.

Tab. 3: Ermittlung des theoretischen Methanertrags für die einzelnen Einsatzstoffklassen

Einsatzstoffe	Methanertrag nach Biomasse-VO m ³ CH ₄ /t FM	Masse t FM	Theoretischer Methanertrag m ³ CH ₄
Maissilage	106	3 000	318 000
Grassilage	100	750	75 000
Einsatzstoffklasse I			393 000
Rindergülle	17	2 200	37 400
Rinderfestmist	53	500	26 500
Einsatzstoffklasse II			63 900
Getreide(Ausputz)	254	200	50 800
Einsatzstoffklasse 0			50 800

Alle Einsatzstoffe die in den Anhängen 1 bis 3 enthalten sind oder sich den einzelnen Klassen zuordnen lassen, können zukünftig in einer Biogasanlage, die nach dem 31. Dezember 2011 in Betrieb gegangen ist, eingesetzt werden. Die scharfe Trennung zwischen Bioabfällen einerseits und NawaRo oder Wirtschaftsdünger von Nutztieren andererseits wird mit dieser Regelung endgültig aufgehoben, nachdem bereits das EEG 2009 mit der Freigabe „rein pflanzlicher Nebenprodukte“ das Ausschließlichkeitsprinzip aufgeweicht hatte. Der Gesetzgeber erhofft sich dadurch „eine bessere Erschließung von teilweise bislang nicht nutzbaren Reststoffpotenzialen“.

Derzeit werden Reststoffe und Bioabfälle, die außerhalb der Landwirtschaft anfallen, soweit nach Bioabfallverordnung zulässig, in spezialisierten Bioabfallvergärungsanlagen behandelt. Wesentliche, zusätzliche Mengen sind nach derzeitigem Kenntnisstand kaum für die Biogaserzeugung zu erschließen. Die Begrenztheit und Fehlleitung von Abfallstoffströmen war im Jahr 2004 ein Grund für die Einführung des NawaRo-Bonus. Die Neuregelung erschwert die Überwachung der Stoffströme. Die Erhöhung der Vergütung und die Aufhebung des Ausschließlichkeitsprinzips wird die Nachfrage nach Bioabfällen steigern und aufgrund des begrenzten Angebots die Entsorgungserlöse senken. Spezialisierten Abfallanlagen gehen, so ist zu befürchten, entsorgungspflichtige Rohstoffe bzw. Erlöse für die Abnahme und Verwertung dieser Stoffe verloren. Bioabfälle, für deren Entsorgung bisher bezahlt werden musste, könnten sogar wieder einen Verkaufspreis erzielen. Die Zeche zahlt der Stromkunde. Dem Verursacherprinzip wird so eine Regelung schwerlich gerecht. Für landwirtschaftliche Biogasanlagen kann der Einsatz von Bioabfällen im Einzelfall erhebliche genehmigungs-, abfall- und düngerrechtliche Konsequenzen nach sich ziehen. Schon beim Einsatz geringer Mengen mutiert die landwirtschaftliche Biogasanlage zur Bioabfallbehandlungsanlage.

Baurechtlich genehmigte Biogasanlagen können dann sehr schnell nach dem Bundes-Immissionsschutzgesetz genehmigungsbedürftig werden. Der gesamte Gärrest wird zu Bioabfall und unterliegt den Anwendungsbeschränkungen der Bioabfallverordnung.

3.2.1 Neue Anspruchsvoraussetzungen

Die Absätze 3 bis 5 regeln im Wesentlichen einzelne Bedingungen, an die der Vergütungsanspruch geknüpft ist. Neu sind folgende Regelungen:

- Alle Anlagen, die nach Inkrafttreten des Gesetzes in Betrieb gehen, haben nur dann einen Vergütungsanspruch, wenn „mindestens 60 Prozent des in dem jeweiligen Kalenderjahr in der Anlage erzeugten Stroms in Kraft-Wärme-Kopplung nach Maßgabe der Anlage 2 zu diesem Gesetz erzeugt wird“. Für Biogasanlagen vermindert sich die nachzuweisende Mindestwärmenutzung auf 35 Prozent, da 25 Prozentpunkte pauschal als Prozesswärme angerechnet werden. Ausnahmsweise sind Anlagen von der Erfüllung der Mindestwärmequote befreit, wenn sie im Durchschnitt des Jahres mindestens 60 Masseprozent Gülle einsetzen. Problematisch wird es sein den „erzeugten Strom“ zu messen. Bisher wird diese Kenngröße in keiner Biogasanlage genau erfasst. Die Anforderungen an die Wärmenutzung der Anlage 2 entsprechen im Wesentlichen den bekannten und zum Teil heftig kritisierten Vergütungsvoraussetzungen für den KWK-Bonus. Unklare Formulierungen und fehlende Effizienzkriterien ermöglichen weiterhin ineffiziente Wärmenutzungen. Grundsätzlich positiv ist, dass der Gesetzgeber die Trocknung von Holz bis zu einem Verbrauch 0,9 kWh Wärme pro Kilogramm Holz wieder als Wärmenutzung anerkennt. Leider hat er sich zur Holzfeuchte nicht geäußert. Zu begrüßen ist auch die deutlich Anhebung der Obergrenzen des anrechenbaren Wärmeverbrauchs für die Beheizung von Tierställen. Den Weg von der Negativliste auf die Positivliste hat die Abwärmenutzung zur Verstromung gefunden – ohne Effizienzkriterium. Es reicht also aus, Strom zu erzeugen! Neu in der Positivliste ist auch die „Wärmeverwertung zur Hygienisierung oder Pasteurisierung von Gärresten, die nach geltendem Recht der Hygienisierung oder Pasteurisierung bedürfen“. Fachlich sinnvoller und wesentlich energieeffizienter wäre es allerdings, nur die hygienisierungspflichtigen Substrate zu behandeln anstatt den gesamten Gärrest zu erhitzen.
- Bei Neuanlagen darf der Anteil von Mais (Ganzpflanze), Getreidekorn einschließlich Corn-Cob-Mix und Körnermais sowie Lieschkolbenschrot in jedem Kalenderjahr insgesamt höchstens 60 Masseprozent vom Gesamtinput betragen. Die Beschränkung des Einsatzes von Maissilage wird den Flächenbedarf für die Biogaserzeugung erhöhen.

Die Vergütungsvoraussetzungen sind durch jährliche Umweltgutachten zu belegen. Die Mindestwärmequote, alternativ die Mindestgüllequote ist zusätzlich bei der erstmaligen Inanspruchnahme der Vergütung durch ein Umweltgutachten nachzuweisen.

Für große Anlagen ist der Stichtag 31.12.2013 zu beachten. Erfolgt die erste Inbetriebnahme nach diesem Datum, erhalten nur noch Anlagen bis 750 kW installierter elektrischer Leistung eine feste Einspeisevergütung. Größere Anlagen müssen dann die Marktprämie in Anspruch nehmen (§ 27 Absatz 3 EEG).

3.3 Vergärung von Bioabfällen (§ 27a)

Bioabfallverwerter haben einige Voraussetzungen zu erfüllen, wenn sie in den Genuss der Vergütungen (Tab. 4) kommen wollen. Zum einen muss die Biogasanlage unmittelbar mit einer Einrichtung zur Nachrotte der festen Gärrückstände verbunden sein und die nachgerotteten Gärrückstände stofflich verwerten. Zum anderen müssen mindestens 90 Masseprozent des Gesamtinputs aus getrennt erfassten

- biologisch abbaubaren Abfällen (Abfallschlüssel 20 02 01), z. B. Garten- und Parkabfälle oder Landschaftspflegeabfälle,
- Fraktionen gemischter Siedlungsabfälle (Abfallschlüssel 20 03 01), z. B. getrennt erfasste Bioabfälle privater Haushalte und des Kleingewerbes,
- Marktabfällen (Abfallschlüssel 20 03 02)

im Sinne der Bioabfallverordnung Anhang 1 Nr. 1 bestehen. Eine Mindestwärmequote gilt für diese Anlagen nicht. Die Kombination mit den vorgenannten Vergütungen nach § 27 ist nicht möglich. Anlagen die nach dem 31.12.2013 in Betrieb gehen, erhalten die Vergütung nur, wenn die installierte Leistung 750 kW_{el} nicht übersteigt.

Tab. 4: Vergütung für Bioabfallanlagen nach § 27a

Bemessungsleistung der Anlage [kW _{el}]	Vergütung [ct/kWh _{el}]
Bis 500	16,0
Über 500 bis 20000	14,0

3.4 Vergärung von Gülle (§ 27b)

Kleine Gülleanlagen mit einer installierten Anlagenleistung von maximal 75 kW_{el}, erhalten für den eingespeisten Strom eine Vergütung in Höhe von 25 ct/kWh_{el}, wenn die Stromerzeugung am Standort der Biogasanlage stattfindet und mindestens 80 Masseprozent Gülle anaerob vergoren werden.

Als Gülle gelten im Sinne des Gesetzes: Pferdemist, Rinderfestmist, Rindergülle, Schafmist, Ziegenmist, Schweinefestmist und Schweinegülle. Die Einhaltung der Bedingungen ist einmalig, bei der erstmaligen Inanspruchnahme der Vergütung und danach

jährlich durch ein Umweltgutachten und die Vorlage einer Kopie des Einsatzstofftagebuchs nachzuweisen.

3.5 Gasaufbereitung (§ 27c)

Anlagen bis zu einer Bemessungsleistung von 5 MW_{el}, die Biomethan aus dem Erdgasnetz entnehmen, das vor der Einspeisung in das Erdgasnetz aufbereitet wurde, können einen Gasaufbereitungsbonus erhalten (Tab. 5), sofern das aufbereitete Biogas nicht aus kleinen Gülleanlagen stammt. Inhaltlich entspricht der Gasaufbereitungsbonus dem bisherigen Technologiebonus für die Gasaufbereitung. Allerdings hat sich die Nennleistung der Gasaufbereitungsanlage, für die der Bonus gewährt wird, verdoppelt. Zusätzlich hat der Gesetzgeber den Bonus deutlich angehoben. Dies ist ein starkes Indiz dafür, dass die Aufbereitung von Bisher kaum wirtschaftlich zu bewerkstelligen war. Im Gegenzug wurden die erlaubten Methanemissionen in die Atmosphäre bei der Aufbereitung von 0,5 auf 0,2 Prozent je Kubikmeter Rohgas drastisch gesenkt. Der maximal zulässige Stromverbrauch für die Aufbereitung von höchstens 0,5 Kilowattstunden je Normkubikmeter Rohgas ist gleich geblieben. Auch an den Nachweispflichten hat sich nichts wesentlich verändert.

Tab. 5: Gasaufbereitungsbonus

Nennleistung der Gasaufbereitungsanlage Nm ³ aufbereitetes Biogas	Bonus ct/kWh _{el}
Bis 700	3,00
Über 700 bis 1 000	2,00
Über 1 000 bis 1 400	1,00

3.6 Direktvermarktung

War die Direktvermarktung bisher ein wenig beachteter Bestandteil des EEG, gewinnt sie jetzt erheblich an Bedeutung. Alle Biogasanlagenbetreiber können ihren Strom ganz oder anteilig direkt vermarkten. Ab 2014 müssen Anlagen, die neu in Betrieb gehen und mehr als 750 kW_{el} installierter Leistung haben, ihren gesamten Strom in ein Netz einspeisen und an Dritte veräußern. Grundsätzlich muss auch der direkt vermarktete Strom vergütungsfähiger Strom im Sinne der festen Einspeisevergütung sein; d. h., die jeweiligen Vergütungsvoraussetzungen und Auflagen sind einzuhalten. Mit einer Ausnahme: Wer sich zur Direktvermarktung entschließt, ist für den entsprechenden Zeitraum vom Nachweis der Mindestwärme- oder Mindestgüllequote befreit. Im engeren Sinn gibt es zwei Möglichkeiten der Vermarktung.

Anlagenbetreiber können ihren Strom entweder direkt vermarkten und dafür eine Marktprämie in Anspruch nehmen oder an einen „Grünstromhändler“ verkaufen, der ihn für das „Grünstromprivileg“ nutzt. Eine Aufteilung der Strommenge ist zulässig. Ein

Wechsel zwischen den verschiedenen Formen der Direktvermarktung und zurück zur EEG-Vergütung ist grundsätzlich möglich. Es würde allerdings im Rahmen dieses Beitrags zu weit führen, auf Details einzugehen. Deshalb sollen im Folgenden nur noch die Mechanismen der Marktprämie etwas genauer beleuchtet werden.

3.6.1 Marktprämie

Das Marktprämienmodell verpflichtet den Biogasanlagenbetreiber seinen Strom im Wettbewerb mit anderen Anbietern auf dem Strommarkt zu vermarkten bzw. vermarkten zu lassen. Der Direktvermarkter bekommt für den verkauften Strom zum einen den auf dem Strommarkt erzielten Erlös; zum anderen erhält er eine Marktprämie, sozusagen als Anreiz, um vom System der festen EEG-Vergütung zum Marktprämienmodell zu wechseln.

Das zentrale Element des Marktprämienmodells ist eine „gleitende Prämie“, welche die Differenz zwischen der anlagenspezifischen EEG-Vergütung und der allgemeinen Entwicklung des Marktpreises ausgleichen soll. Dieser Marktpreisindikator ist der im Nachhinein ermittelte, ungewichtete Monatsmittelwert der Stundenkontrakte am Spotmarkt der Strombörse in Leipzig. Durch die Kopplung an den Monatsmittelwert des Marktpreises sind die Risiken der allgemeinen Marktpreisentwicklung ausgeschaltet, so die Auffassung des Gesetzgebers. In der Folge wird, so die Hoffnung, der Direktvermarkter angereizt, seinen Strom möglichst dann einzuspeisen, wenn eine ausreichend hohe Nachfrage besteht und der erzielbare Erlös oberhalb des Monatsdurchschnittes liegt. An die Stelle des Übertragungsnetzbetreibers (ÜBN) tritt der Direktvermarkter selbst oder ein Stromhändler, der die Vermarktung bzw. den Handel organisiert und für die Erfüllung der Fahrpläne verantwortlich zeichnet. Wie beim ÜBN fallen auch beim Direktvermarkter Kosten für den Ausgleich von Prognosefehlern und für die Handelsabwicklung an. Als Ausgleich dafür erhält der Direktvermarkter zusätzlich einen Pauschbetrag, die sogenannte Managementprämie.

Die Marktprämie (MP) wird kalendermonatlich, jeweils für den zurückliegenden Monat nach folgender Formel berechnet: $MP = EV - MWEPEX + PM_{BG}$ [ct/kWh_{el}].

Wobei EV der anlagenspezifischen EEG-Vergütung nach § 27, § 27a oder § 27c entspricht, die eine Anlage für den Strom bekommen würde. MWEPEX ist der tatsächliche Monatsmittelwert der Stundenkontrakte am Spotmarkt der Strombörse EPEX Spot SE in Leipzig und PM ist die Managementprämie. Sie beträgt im Jahr 2012 für Strom aus Biogas 0,30 ct/kWh_{el} und vermindert sich bis 2015 jährlich um 0,025 ct/kWh_{el}.

Ob unter dem Strich bei Inanspruchnahme der Marktprämie mindestens die EEG-Vergütung übrig bleibt, ist derzeit nur schwer einzuschätzen. Die Befürchtung, dass aufgrund der sehr niedrig angesetzten Managementprämie vor allem die etablierten Stromvertriebe bevorteilt werden könnten, ist auch nicht ganz von der Hand zu weisen.

Bemerkenswert ist in diesem Zusammenhang eine Stellungnahme des BDEW³ der die Handelsanbindungs- und Fahrplannerfüllungskosten für nicht ausreichend berücksichtigt hält und schlussfolgert: „Dies ... kommt bei Biogasanlagen einer versteckten Vergütungsabsenkung gleich und gefährdet damit die Wirtschaftlichkeit der für die Erreichung der EE-Ausbauziele benötigten Biogasanlagen“.

Sollte sich die Einschätzung des BDEW bewahrheiten, werden nur die Anlagen die Marktprämie nutzen, die das EEG ab 2014 in die Marktprämie zwingt. Ob dann allerdings noch Anlagen mit einer installierten Leistung von mehr als 750 kW_{el} gebaut werden?

3.6.2 Flexibilitätsprämie

Die Anreizwirkung der Marktprämie, sofern überhaupt vorhanden, reicht nicht, eine sich am Bedarf orientierende Stromerzeugung zu fördern. Auch die Spreizungen zwischen Hoch- und Niedrigpreisphasen bieten keinen wirklichen Anlass sowohl in zusätzliche Motorenleistung als auch in Gas- und Wärmespeicher zu investieren. Vergleicht man beispielsweise für das Jahr 2010 die Monatsmittelwerte der Stundenkontrakte am Spotmarkt mit den Monatsmittelwerten, berechnet aus den 12 Tagesstunden mit den höchsten Preisen, so zeigt sich, dass bei kontinuierlicher Einspeisung nur an diesen 12 Hochpreisstunden pro Tag, aufs Jahr gerechnet, ein durchschnittlicher Mehrerlös von lediglich 0,82 ct/kWh hätte erzielt werden können.

Der Gesetzgeber schafft deshalb einen zusätzlichen Anreiz zur bedarfsgerechten Stromeinspeisung. Ergänzend zur Marktprämie, können Direktvermarkter vom Netzbetreiber für maximal 10 Jahre eine sogenannte Flexibilitätsprämie fordern, wenn der gesamte in der Anlage erzeugte Strom direkt vermarktet wird und die Anlage für den bedarfsorientierten Betrieb technisch geeignet ist, d. h., es muss eine jederzeit abrufbare Leistungsreserve installiert sein. Diese Zusatzleistung ist als Saldo der installierten Leistung und der Bemessungsleistung des jeweils abgelaufenen Jahres definiert. Um unterschiedliche Auslastungen rudimentär abzubilden, geht die Bemessungsleistung mit dem Faktor 1,1 für Biogas bzw. 1,6 für Biomethan in die Berechnung ein. Die so ermittelte Zusatzleistung muss mindestens 20 % der installierten Leistung betragen, höchstens sind 50 % der installierten Leistung anrechenbar.

Die Höhe der Flexibilitätsprämie ist mit 130 €/kW Zusatzleistung vor allem für kleinere Anlagen knapp bemessen, wenn daraus neben der Erweiterung des BHKW auch noch Pufferspeicher für Gas, Prozesswärme und die Erweiterung der Netzanschlussleistung finanziert werden müssen. Sinkt zusätzlich der durchschnittliche Wirkungsgrad des

³ Stellungnahme des BDEW zur öffentlichen Anhörung des Ausschusses für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit vom 07.06.2011.

BHKW aufgrund der häufigen Stillstandszeiten werden sich die Investitionen kaum noch rechnen.

4 Übergangsbestimmungen

Für Altanlagen ändert sich im Großen und Ganzen nur wenig. Kleine Anlagen werden allerdings nachinvestieren müssen, denn ab 2014 haben alle Biogasanlagen zusätzliche Gasverbrauchseinrichtungen zur Vermeidung einer Freisetzung von Biogas vorzuhalten. Biomethanerzeuger sind verpflichtet, ab dem 01. Mai 2012 den neuen Grenzwert für Methanemissionen in die Atmosphäre bei der Aufbereitung von höchstens 0,2 % einzuhalten. Dies könnte der einen oder anderen Anlage schwer zu schaffen machen. Grundsätzlich positiv ist, dass auch Altanlagen die Marktprämie und die Flexibilitätsprämie nutzen dürfen und Bioabfallvergärungsanlagen die Vergütung für die Vergärung von Bioabfällen in Anspruch nehmen können, wenn sie die Bedingungen erfüllen.

5 Bewertung

Das Vergütungssystem hat sich zwar deutlich verändert, trotzdem sind die aus landwirtschaftlicher Sicht wesentlichen Komponenten erhalten geblieben. Der NawaRo-Bonus heißt jetzt Einsatzstoffklassen-Bonus und regelt in Einsatzstoffklasse I die Vergütung für Einsatzstoffe, die der Gesetzgeber als NawaRo klassifiziert; der Gülle-Bonus ist in Einsatzstoffklasse II aufgegangen. Die Zuordnung einzelner Einsatzstoffe zu den Einsatzstoffklassen I und II (Anhang 2 und 3) ist fachlich wenig überzeugend. Warum sind „Hülsenfrüchte (Ganzpflanze)“ in Einsatzstoffklasse I eingruppiert, „Leguminosen-Gemenge“ und „Lupine“ aber der Einsatzklasse II zugeordnet? In der Konsequenz bedeutet dies, dass Leguminosen in Reinkultur und in Mischung unterschiedlich bewertet werden, sofern es sich nicht um Lupinen handelt. Es ist geradezu absurd, der Lupine den Status eines „ökologisch wünschenswerten Einsatzstoffes“ zuzuweisen, diesen aber anderen Eiweißpflanzen, z. B. der Acker- oder Sojabohne zu verweigern. Warum Phacelia, Winterrüben oder Klee gras und Luzerne gras „als Zwischenfrucht von Ackerstandorten“ besonders ökologisch wünschenswerte Einsatzstoffe sind, andere Zwischenfrüchte, wie Senf, Raps, Sommerrüben oder Buchweizen aber ausgeschlossen sein sollen, ist nicht nachvollziehbar.

Diskussionen wird es sicherlich auch um die Abgrenzung von „Blühflächen“ oder „Schonstreifen“ geben oder wie „Grünschnitt von maximal zweischürigem Grünland“ zu überprüfen sein soll. Neue Gestaltungsspielräume eröffnen leider die frischmassebezogenen Methanerträge. Es könnte sich beispielsweise lohnen zu prüfen, ob geringfügig

mit Harn verunreinigtes Stroh (Energieertrag 161 m³ CH₄/t) grundsätzlich als Pferdemist (Energieertrag 35 Nm³ CH₄/t) zu deklarieren ist. Weidelgras (79 m³/t) wird an Bedeutung verlieren und zunehmend durch Ackergras (100 m³/t) ersetzt.

Wenig überzeugend ist die Beschränkung von Mais und Getreidekorn auf höchstens 60 Masseprozent vom Gesamtinput. Im Fokus steht dabei die Maispflanze, denn Getreidekörner in größerem Umfang einzusetzen, ist bei den derzeitigen Agrarrohstoffpreisen ökonomisch nicht sinnvoll. Muss also Mais substituiert werden, wird wahrscheinlich überwiegend Getreide-GPS zum Einsatz kommen. Getreide-GPS ist an vielen Standorten nach Silomais das günstigste Substrat. In Ackerbau-Regionen, in denen Maisanbau eher einer Auflockerung der engen Fruchtfolge bedeutet, wird es zu einer weiteren Erhöhung des Getreideanteils kommen. Geht man davon aus, dass ca. 1,5 ha Getreide-GPS erforderlich sind um ein Hektar Mais zu substituieren, dann bedeutet die Maisbeschränkung auf 60 Masseprozent am Gesamtinput eine Erhöhung des Flächenbedarfs um ca. 15 %. Höherer Flächenbedarf kann zu steigenden Pachtpreisen führen, die wiederum die Substratkosten weniger effizienter Ackerfrüchte überproportional erhöhen. In letzter Konsequenz reduziert diese Regulierung die Flächeneffizienz der Biogaszeugung und schmälert das energetische Potenzial aus Energiepflanzen. Originäres Ziel der Forderung nach einer Limitierung des Maisanbaus, war es, die vermeintliche „Vermaisung der Landschaft“ zu stoppen. Die Beschränkung der Einsatzmenge in Biogasanlagen wird das Problem nicht lösen können, weil sie die eigentliche Ursache des Problems nicht löst. Wenn, aus welchen fachlich fundierten Gründen auch immer, eine Begrenzung des Maisanteils an der Ackerfläche geboten sein sollte, dann muss diese Regulierung im Rahmen des landwirtschaftlichen Fachrechts erfolgen, z. B. über eine Fruchtfolgebeschränkung.

Das EEG 2012 koppelt die Ermittlung der Vergütung noch stärker als bisher an die konkrete Ermittlung der substratspezifischen Massen. Damit steigt der Druck auf die Biogaszeuger, diese Massen auch hinreichend genau und nachweisbar zu erfassen. Ob dann die etablierten Schätzverfahren noch ausreichen, lässt sich jetzt noch nicht beantworten. Wenigstens sind „Messgeräte zur Bestimmung des Volumens oder der Masse, die in landwirtschaftlichen Betrieben im geschäftlichen Verkehr bereitgehalten und deutlich erkennbar als nicht geeicht gekennzeichnet sind⁴“, bisher von der Eichpflicht ausgenommen.

5.1 NawaRo-Anlagen mit Gülle

Eine Biogasanlage, deren Gesamtinput aus 30 % Rindergülle, 50 % Maissilage und 20 % Getreide-GPS besteht, hätte nach dem alten EEG die Grundvergütung, den NawaRo-

⁴ Eichordnung vom 12.08.1988 (BGBl. IS. 1657), zuletzt durch Artikel 1 der Verordnung vom 06.06.2011 (BGBl. IS. 1035) Anhang A (zu § 8) Nr. 17 geändert

Bonus und den Gülle-Bonus für den gesamten eingespeisten Strom erhalten. Nach dem neuen EEG bekommt dieselbe Anlage neben der Grundvergütung für den energetischen Anteil aus Maissilage und Getreide-GPS (93,52 %) den ESK I und nur für den energetischen Gülleanteil (6,48 %) den ESK II.

Berechnet man in einem ersten Schritt die möglichen Erlöse von Biogasanlagen, die diesen Substratmix einsetzen, nach den Bedingungen des EEG 2012 und des EEG 2009 für das Inbetriebnahmejahr 2012 und bildet den Saldo, so ergibt sich die in Abbildung 1 dargestellte Erlösdifferenzkurve (1). Sie zeigt, dass kleinere und mittlere Anlagen mit einer massiven Verschlechterung der Erlössituation rechnen müssen. Kleinanlagen können nach dem neuen EEG nur noch mit einer Vergütung in Höhe von 20,43 ct/kWh_{el} rechnen. Sie bekommen somit ca. 2,60 ct/kWh_{el} weniger für den eingespeisten Strom als nach der alten Regelung. Für eine Anlage mit 100 kW installierter elektrischer Leistung bedeutet dies Mindereinnahmen in Höhe von rund 21.000 €/a. Der Vergütungslogik des EEG 2009 folgend, sind die größten Verlierer Neuanlagen mit einer Bemessungsleistung von 150 kW, die nach dem EEG 2012 rund 34.000 € weniger bekommen als vorher. Sollte diese Anlagen-Kategorie bisher auskömmliche Unternehmensgewinne erzielt haben, wird sich das zukünftig unter sonst gleichen Bedingungen ändern.

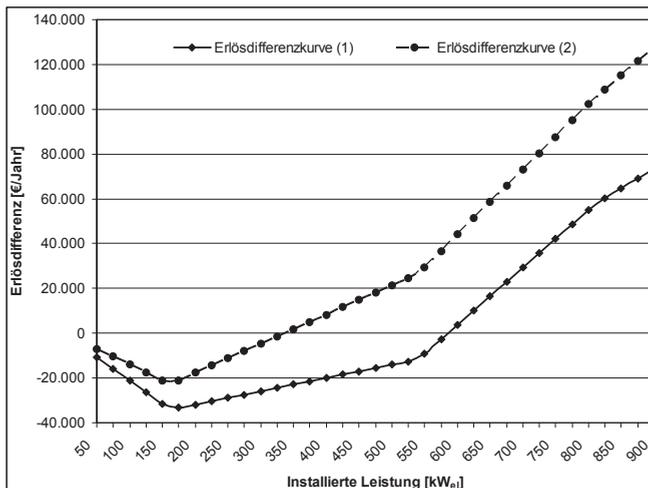


Abb. 1: Differenz der Erlöse berechnet nach EEG 2009 und EEG 2012 für Anlagen mit 35 % Wärmenutzung (Erlösdifferenzkurve (1): EEG 2009 mit Gülle-Bonus und EEG 2012 mit 6,48 % ESK II; Erlösdifferenzkurve (2): EEG 2009 mit Gülle-Bonus und EEG 2012 mit 50 % ESK II)

Mit steigender Anlagenleistung vermindert sich der Nachteil der neuen Regelung und ab 585 kW_{el} installierter Leistung (~550 kW_{el} Bemessungsleistung) profitieren Neuanlagen vom EEG 2012 zunehmend. Eine Anlage mit 900 kW_{el} erhält beispielsweise im Durchschnitt etwa 1,00 ct/kWh_{el} mehr vergütet als nach dem EEG 2009 mit Gülle-Bonus.

In summa sind das bei guter Auslastung rund 74.000 €/a. Diese Mehrerlöse ließen sich beispielsweise zur Finanzierung einer kreativen Lösung zur Wärmenutzung einsetzen oder für Substratbeschaffung verwenden. Rund 4,50 €/t Silage könnte die 900-kW_{el}-Anlage beispielsweise zusätzlich für deren Bereitstellung ausgeben.

Mit zunehmendem Anteil von Substraten der ESK II nimmt die Erlösdifferenz (Erlösdifferenzkurve (2)) ab. Das ändert aber nichts an der grundsätzlichen Aussage, dass kleinere Anlagen nach dem EEG 2012 schlechter gestellt werden.

Kleinere Anlagen haben aber nicht nur geringere Erlöse, sondern müssen zusätzlich mit höheren Festkosten kalkulieren. Die Auflagen, die bisher nur genehmigungsbedürftige Anlagen zu erfüllen hatten, sind finanziell für kleinere Biogasanlagen nur schwer zu stemmen. Wie sich das unter dem Strich auswirkt, zeigen die in Abbildung 2 zusammengefassten Modellrechnungen. Die Gewinne (ohne Berücksichtigung der Lohnkosten bzw. -ansätze) brechen deutlich ein. Die Forderung, neu zu errichtende Gärrestlager gasdicht abzudecken und an ein gasführendes System anzuschließen, hebt die spezifischen Anschaffungskosten der kleinen Anlagen zum Teil deutlich an, obwohl im Kalkulationsbeispiel unterstellt ist, dass die vorhandenen Güllebehälter als Gärrestlager weiter genutzt werden und nur für den NawaRo-Anteil neue offene (EEG 2009) bzw. abgedeckte (EEG 2012) Gärrestlager zu bauen sind. Aus ökonomischer Sicht spannend wird die Auslegung des Terminus „neu zu errichtendes Gärrestlager“ sein.

Die Aufhebung der generellen Verpflichtung, Gärrestlager gasdicht abzudecken, könnte für Halter großer Tieranlagen ein gewichtiges Argument sein, nochmals über

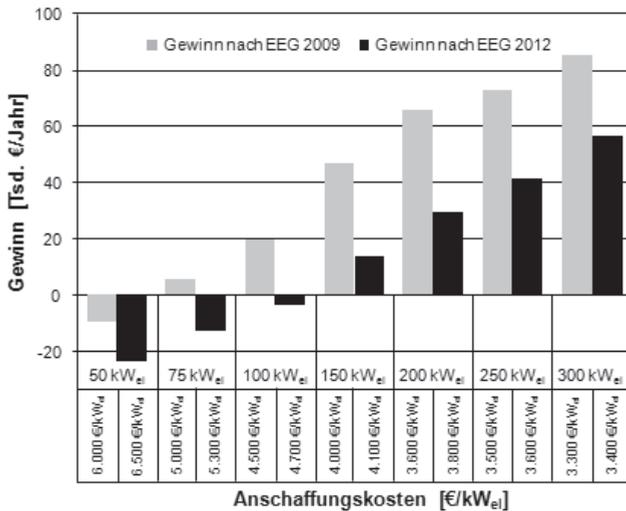


Abb. 2: Gewinne berechnet nach EEG 2009 und EEG 2012 für Anlagen mit 40 % Gülle (entspricht 9,66 % ESK II) und 35 % Wärmenutzung

die Verwertung von Gülle nachzudenken. Bisher hat diese Auflage für genehmigungsbedürftige Anlagen vor allem in Ostdeutschland den Gülleinsatz behindert. Wird ausschließlich Flüssigmist mit einer Trockensubstanz bis 15 % verarbeitet, muss die Mindestverweilzeit nicht beachtet werden. Güllelager sind meist in ausreichendem Umfang vorhanden, sodass neue gasdichte Gärrestlager nicht erforderlich sind.

Wenn Kofermente zum Einsatz kommen, greift allerdings die 150-Tage-Regelung. Zwar ist dann das gasdicht abzudeckende Gesamtvolumen beträchtlich, wenn die Mindestgüllequote von 60 Masseprozent erreicht werden soll, aber die Mehrerlöse werden unter sonst gleichen Annahmen in vielen Fällen ausreichen, die gasdichte Abdeckung zu finanzieren. Eine überschlägige Berechnung soll das belegen: Eine Anlage mit 900 kW installierter elektrischer Leistung setzt ca. 21 000 t Rindergülle und 14 000 t Maissilage um.

Sie erzielt nach den neuen Vergütungsregeln einen Mehrerlös von knapp 90.000 € und muss bei einer durchschnittlichen Verweilzeit im Fermenter von 50 Tagen (RB ~ 3,3 kg oTM/m³ Fermenter) rund 8 500 m³ gasdicht abgedecktes Endlager bauen. Bei unterstellten Jahreskosten von 15 % könnten bis zu 600.000 € investiert werden. Dieser Betrag sollte ausreichen die Endlager zu erstellen.

5.2 NawaRo-Anlagen ohne Gülle

Deutlich besser stellt das EEG 2012 Anlagen, die nach dem EEG 2009 „nur“ den NawaRo-Bonus und den KWK-Bonus (35 % Wärmenutzung) erhalten hätten. Während sich kleine Anlagen im Vergleich zum EEG 2009 mit einem Zuschlag von etwas mehr als einem Cent pro Kilowattstunde zufrieden geben müssen, erhalten Großanlagen rund den doppelten Betrag (Abb. 3).

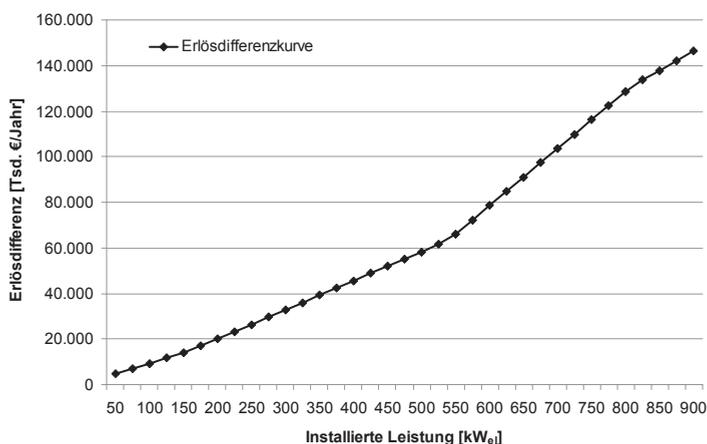


Abb. 3: Differenz der Erlöse berechnet nach EEG 2009 und EEG 2012 für Anlagen mit 35 % Wärmenutzung (EEG 2009 mit NawaRo- und KWK-Bonus und EEG 2012 mit 100 % ESK I)

Die Mehrerlöse für eine 150-kW_{el}-Anlage machen ca. 14.000 €/a aus; rund 146.000 €/a sind es für eine Anlage mit 900 kW_{el} installierter Leistung bzw. 830 kW_{el} Bemessungsleistung. Wäre der NawaRo-Bonus tatsächlich für die Wettbewerbsverzerrungen zwischen Biogaserzeugung und Landwirtschaft verantwortlich gewesen, wie vielfach behauptet wurde, würde diese Konkurrenzsituation durch das EEG 2012 nochmals verschärft.

5.3 Kleine Gülleanlagen

Kleine Gülleanlagen bis zu 75 kW_{el} installierter Leistung würden nach dem alten EEG, wenn sie mindestens 80 Masseprozent Gülle einsetzen, eine Vergütung in Höhe von ca. 22,00 bis 22,50 ct/kWh_{el} eingespeisten Strom bekommen – je nachdem ob noch ein kleiner Anteil der Abwärme nutzbar ist oder nicht. Nach der neuen Vergütungsregel sind es 2,50 bis 3,00 Ct/kWh_{el} mehr. Die Mehrerlöse können bei optimal ausgelasteten Anlagen bis zu 18.000 € betragen. Im Leistungsbereich zwischen 50 und 75 kW_{el} brauchen solche Anlagen je nach elektrischem Nutzungsgrad zwischen 9000 t und 14000 t Rindergülle oder ca. 12000 bis 18000 t Schweinegülle, wenn sie ausschließlich mit Gülle betrieben werden sollen (Tab. 6 a und 6b). Bei 80 % Gülle und Kofermentation von Silagen sinkt der Bedarf auf ca. 3000 bis 4700 t Rindergülle bzw. rund 3300 bis 5100 t Schweinegülle. Kommen statt der Silagen Getreidekörner zum Einsatz, vermindert sich der Güllebedarf nochmals um knapp 60 %.

Tab. 6a: Substratbedarf kleiner Gülleanlagen in Abhängigkeit von der Anlagenleistung und dem elektrischen Nutzungsgrad des BHKW

Nutzungsgrad η_{el}	Installierte Leistung	Bemessungsleistung	Rindergülle 100%	Rindergülle 80%	Silagen 20%	Rindergülle 80%	Getreide 20%
%	kW _{el}	kW _{el}	t/a	t/a	t/a	t/a	t/a
30	50	47	10217	3453	863	1462	366
32	50	47	9579	3237	809	1371	343
34	50	47	9015	3047	762	1290	323
33	75	70	13933	4709	1177	1994	499
35	75	70	13137	4440	1110	1880	470
37	75	70	12426	4200	1050	1778	445

Tab. 6b: Substratbedarf kleiner Gülleanlagen in Abhängigkeit von der Anlagenleistung und dem elektrischen Nutzungsgrad des BHKW

Nutzungsgrad η_{el}	Installierte Leistung	Bemessungsleistung	Schweinegülle 100%	Schweinegülle 80%	Silagen 20%	Schweinegülle 80%	Getreide 20%
%	kW _{el}	kW _{el}	t/a	t/a	t/a	t/a	t/a
30	50	47	13 121	3 732	933	1 510	378
32	50	47	12 301	3 499	875	1 416	354
34	50	47	11 577	3 293	823	1 332	333
33	75	70	17 892	5 089	1 272	2 059	515
35	75	70	16 870	4 799	1 200	1 942	485
37	75	70	15 958	4 539	1 135	1 837	459

Annahmen: Rindergülle (8 % TM, 24,3 Nm³ Biogas, 55 % CH₄)
 Schweinegülle (5 % TM, 16,8 Nm³ Biogas, 62 % CH₄)
 Ø Silagen (33,6 % TM, 200,4 Nm³ Biogas, 52,3 % CH₄)
 Getreide (87 % TM, 616 Nm³ Biogas, 52 % CH₄)

Lässt man die Extremvariante mit Gülle und Getreide außen vor, kann eine kleine Gülleanlage durchaus einer Überlegung wert sein. Allerdings greift man auch hier zu kurz, würde man nur die Erlöse betrachten. Die Auflage das Gärgemisch 150 Tage in dem gasdichten und an eine Gasverwertung angeschlossenem System zu halten, frisst im schlechtesten Fall die höheren Erlöse fast auf (Abb. 4, Anlage 6). Die Modellanlage vergärt 6 600 t Gülle (89 Masseprozent) und setzt als Ergänzung 825 t Maissilage ein, um an die 75-kW-Grenze bei 8 200 Volllaststunden zu fahren. Bei der unterstellten Raumbelast-

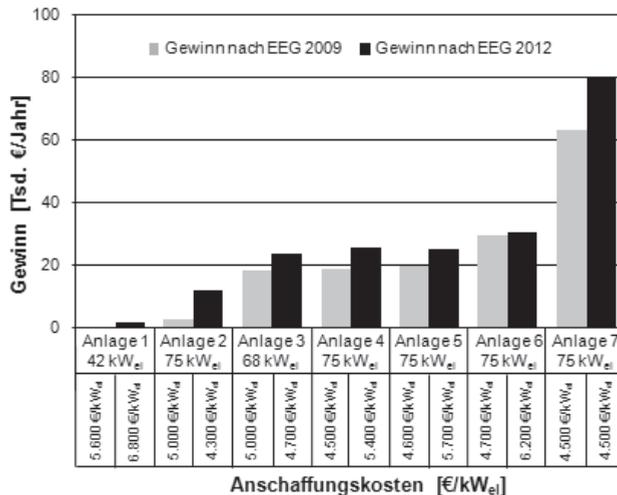


Abb. 4: Gewinnerwartung kleiner Gülleanlagen berechnet nach EEG 2009 und EEG 2012

tung von 2 kg oTM/m³ Fermentervolumen und Tag ergibt sich eine rechnerische Verweilzeit von nur 46 Tagen; d. h. um die 150 Tage einhalten zu können, muss ein relativ großer gasdichter Lagerbehälter (2 000 m³) gebaut werden, den der Betrieb eigentlich nicht braucht, weil, wie bei allen Modellanlagen unterstellt, ein dem Tierbestand adäquates Güllelager vorhanden ist. Nur Anlage 7 muss sich um die 150 Tage Verweilzeit keine Gedanken machen. Sie setzt ausschließlich Gülle ein und profitiert in vollem Umfang von der Vergütung für kleine Gülleanlagen. Die Einzelheiten zu den übrigen Modellkalkulationen können dem Anhang 4 entnommen werden.

6 Resümee

Die vom Gesetzgeber angekündigte Vereinfachung des Vergütungssystems erweist sich bei näherer Analyse als Trugschluss. Das Bestreben des Gesetzgebers Detailregelungen zu treffen, hat die Komplexität des Gesetzes nochmals deutlich erhöht. Neue Sachverhalte schaffen neue Probleme, die zu Irritationen und anhaltenden Diskussionen führen werden.

Die Direktvermarktung ebnet den Weg hin zu zentralen Vermarktungsstrukturen. Nicht zuletzt aus diesem Grund präferiert wahrscheinlich das neue EEG 2012 große Anlagen und stärkt die Wettbewerbskraft der Biomethanerzeugung. Die Konflikte zwischen Landwirtschaft und Biogaserzeugung werden sich deshalb mittelfristig verschärfen; auch weil die Beschränkung des Maiseinsatzes zusätzlich Ackerflächen bindet. Die Aufgabe des Ausschließlichkeitsprinzips zugunsten der vielleicht trügerischen Hoffnung, bislang nicht nutzbaren Reststoffpotenzialen bessere zu erschließen, wird den Druck auf die Flächen nicht vermindern. Den KWK-Bonus in die Grundvergütung zu integrieren und eine auf den ersten Blick nur schwer erfüllbare Mindestwärmenutzung vorzuschreiben, verbessert die Effizienz der Biogaserzeugung nicht, solange unklare Formulierungen und fehlende Effizienzkriterien eine ineffiziente Wärmenutzung ermöglichen.

Ob der Gesetzgeber gut beraten war, ein neues suboptimales Vergütungssystem zu etablieren, anstatt die Mängel der bestehenden Lösung behutsam zu korrigieren, wird sich noch erweisen. Unabhängig davon, sorgt jede Gesetzesänderung im Grundsatz für Verunsicherung und muss interpretiert und kommuniziert werden. Häufige und in die Substanz eingreifende Novellierungen sind kontraproduktiv, behindern mutige Zukunftsentscheidungen und verursachen starke Angebots- und Nachfrageschwankungen.

Anhang 1: Einsatzstoffe, die keinen Anspruch auf eine einsatzstoffbezogene Vergütung begründen, und ihr Energieertrag (nach BiomasseVO, Anlage 1)

	Einsatzstoffe zur Biogaserzeugung Energieertrag	Energieertrag (Methanertrag [m ³ /t FM])
1.	Altbrot	254
2.	Backabfälle	344
3.	Biertreber (frisch/abgepresst)	61
4.	Buttermilch, frisch (nicht oder nicht mehr zum Verzehr geeignet)	32
5.	Casein	392
6.	Fettabscheiderinhalte	15
7.	Flotatfette	43
8.	Flotatschlamm	81
9.	Frittierfette	562
10.	Gemüse (aussortiert)	40
11.	Gemüseabputz	26
12.	Getreide (Ausputz)	254
13.	Getreideabfälle	272
14.	Getreideschlempe mit Ausnahme von Nummer 15	22
15.	Getreideschlempe aus der Alkoholproduktion	18
16.	Getreidestaub	172
17.	Glyzerin	421
18.	Grünschnitt aus privater und öffentlicher Garten- und Parkpflege	43
19.	Heil- und Gewürzpflanzen (aussortiert)	58
20.	Kartoffelbruchwasser aus der Stärkeproduktion	11
21.	Kartoffeln (aussortiert)	92
22.	Kartoffeln (gemust, mittlerer Stärkegehalt; nicht oder nicht mehr zum Verzehr geeignet)	66
23.	Kartoffelprozesswasser aus der Stärkeproduktion	3
24.	Kartoffelpülpe aus der Stärkeproduktion	61
25.	Kartoffelschalen	66
26.	Kartoffelschlempe mit Ausnahme von Nummer 27	18
27.	Kartoffelschlempe aus der Alkoholproduktion	17
28.	Kleie	270
29.	Labmolke, eingedickt	44
30.	Labmolke, frisch	18
31.	Mageninhalt (Schwein)	27
32.	Magermilch, frisch (nicht oder nicht mehr zum Verzehr geeignet)	33
33.	Magermilch, trocken	363
34.	Melasse aus der Rübenzuckerherstellung	166
35.	Milch (nicht oder nicht mehr zum Verzehr geeignet)	70
36.	Milchzucker	378
37.	Milchzuckermelasse	91
38.	Milchzuckermelasse, proteinarm	69
39.	Molke mit Ausnahme von Nummer 40	18
40.	Molke, teilenzuckert, trocken	298
41.	Obsttrester und Traubentrester (frisch/unbehandelt)	49

Fortsetzung nächste Seite

	Einsatzstoffe zur Biogaserzeugung	Energieertrag (Methanertrag [m ³ /t FM])
42.	Panseninhalt	33
43.	Quark (nicht oder nicht mehr zum Verzehr geeignet)	92
44.	Rapsextraktionsschrot	274
45.	Rapskuchen	317
46.	Rübenkleinteile (aus der Zuckerverarbeitung)	50
47.	Sauermolke, eingedickt	42
48.	Sauermolke, frisch	20
49.	Schnittblumen (aussortiert)	55
50.	Speisereste	57
51.	Straßenbegleitgras	43
52.	Tierblut	83
53.	Zuckerrübenpresskuchen aus der Zuckerproduktion	64
54.	Zuckerrübenschnitzel	64
55.	Für Einsatzstoffe zur Biogaserzeugung, die weder in dieser Liste noch in Anlage 2 oder in Anlage 3 genannt werden, ist folgender Energieertrag „E 0“ zu verwenden: 110 m ³ /t FM.	

Anhang 2: Einsatzstoffe der Einsatzstoffvergütungskategorie I und ihr Energieertrag
(nach BiomasseVO, Anlage 2)

	Einsatzstoffe zur Biogaserzeugung	Energieertrag (Methanertrag [m ³ /t FM])
1.	Corn-Cob-Mix (CCM)	242
2.	Futtermübe	52
3.	Futtermübenblatt	38
4.	Getreide (Ganzpflanze) ¹⁾	103
5.	Getreidekorn	320
6.	Gras einschließlich Ackergras	100
7.	Grünroggen (Ganzpflanze) ¹⁾	72
8.	Hülsenfrüchte (Ganzpflanze) ¹⁾	63
9.	Kartoffelkraut	30
10.	Körnermais	324
11.	Lieschkolbenschrot	148
12.	Mais (Ganzpflanze) ¹⁾	106
13.	Sonnenblume (Ganzpflanze) ¹⁾	67
14.	Sorghum (Ganzpflanze) ¹⁾	80
15.	Sudangras	80
16.	Weidelgras	79
17.	Zuckerrüben	75
18.	Zuckerrübenblatt mit Anteilen Zuckermübe	46
19.	Für sonstige Pflanzen oder Pflanzenbestandteile zur Biogaserzeugung, die in landwirtschaftlichen, forstwirtschaftlichen oder gartenbaulichen Betrieben anfallen und die keiner weiteren als der zur Ernte, Konservierung oder Nutzung in der Biomasseanlage erfolgten Aufbereitung oder Veränderung unterzogen wurden (nachwachsende Rohstoffe), ist folgender Energieertrag „E I“ zu verwenden: 50 m ³ / t FM.	

¹⁾ Werte für Ganzpflanzen und Gräser gelten für silierte und unsilierte Substrate.

Anhang 3: Einsatzstoffe der Einsatzstoffvergütungskategorie II und ihr Energieertrag (nach BiomasseVO, Anlage 3)

	Einsatzstoffe zur Biogasferzeugung	Energieertrag (Methanertrag [m ³ /t FM])
1.	Blühstreifen, Blühflächen, Schonstreifen, Ackerstandorten, Wildblumenaufwuchs	72
2.	Durchwachsene Silphie	67
3.	Geflügelmist, Geflügeltrockenkot	82
4.	Kleegrass (als Zwischenfrucht von Ackerstandorten)	86
5.	Landschaftspflegematerial einschließlich Landschaftspflegegras. Als Landschaftspflegematerial gelten alle Materialien, die bei Maßnahmen anfallen, welche vorrangig und überwiegend den Zielen des Naturschutzes und der Landschaftspflege im Sinne des Bundesnaturschutzgesetzes dienen und nicht gezielt angebaut wurden. Marktfrüchte wie Mais, Raps oder Getreide sowie Grünschnitt aus der privaten oder öffentlichen Garten- und Parkpflege oder aus Straßenbegleitgrün, Grünschnitt von Flughafengrünland und Abstandsflächen in Industrie- und Gewerbegebieten zählen nicht als Landschaftspflegematerial. Als Landschaftspflegegras gilt nur Grünschnitt von maximal zweischürigem Grünland.	43
6.	Leguminosen-Gemenge	79
7.	Lupine	80
8.	Luzernegrass (als Zwischenfrucht von Ackerstandorten)	79
9.	Pferdemist	35
10.	Phacelia	80
11.	Rinderfestmist	53
12.	Rindergülle	17
13.	Schafmist, Ziegenmist	59
14.	Schweinefestmist	45
15.	Schweinegülle	12
16.	Stroh. Als Stroh gilt das halmgutartige Nebenprodukt von Getreide, Ölsaaten oder Körnerleguminosen, wenn das Hauptprodukt (Korn) nicht energetisch genutzt wird und das halmgutartige Nebenprodukt vom Korn separiert vorliegt.	161
17.	Winterrüben	70

Anhang 4: Modellkalkulationen kleiner Gülleanlagen

Kennwerte	Einh.	BGA 1 (42 kW)		BGA 2 (75 kW)		BGA 3 (68 kW)	
Maissilage (33% TM)	t	613		100		913	
CCM (65% TM)	t	0		507		0	
Rindergülle (8% TM)	t	2.200		2.200		3.300	
Rinderfestmist (25% TM)	t	250		250		350	
Gülleanteil nach § 27b	%	80		80		80	
Gasertrag	Nm ³	202.222		333.446		299.669	
Heizwert (Hi)	kWh	5,31		5,27		5,31	
Vollbenutzungsstunden	h	8.200		8.200		8.200	
Elektrischer Nutzungsgrad	%	32		35		35	
installierte BHKW-Leistung	kW _{el}	45		75		70	
Transformationsverluste	kWh _{el}	3.439		6.150		5.573	
Stromkennzahl	--	0,58		0,67		0,67	
Stromeinspeisung	kWh _{el}	340.491		608.851		551.766	
EEG-Vergütung einschl. Boni	EEG Ct/kWh _{el}	2009 22,28	2012 25,00	2009 22,28	2012 25,00	2009 22,28	2012 25,00
Stromerlöse	€	75.875	85.123	135.676	152.213	122.955	137.941
Wärmenutzung	kWh	59.113		91.372		82.805	
Wärmeerlöse	€	2.462		3.107		2.936	
Summe Erlöse	€	78.337	87.585	138.783	155.320	125.891	140.877
Spez. Anschaffungskosten	€/kW _{el}	5.600	6.800	4.300	5.000	4.700	5.700
Raubelastung	kg/ m ³ ·d ⁻¹	2,00		2,00		2,00	
Notw. Fermenter- nutzvolumen	m ³	529		751		783	
Verweilzeit	d	63		90		63	
Neubau gasdichter Behälter	m ³	--	667	--	433	--	998
Abschreibungen (Ø 10 % v. A.)	€	26.066	30.437	33.289	37.539	33.589	39.255
Zinsansatz (4 % v. A.)	€	5.976	7.256	7.648	8.892	7.802	9.460
Versicherung (0,6 % v. A.)	€	1.512	1.836	1.935	2.250	1.974	2.394
Instandhaltung	€	13.880	15.351	18.944	20.374	18.376	20.284
Stromzukauf (16 Ct/kWh _{el})	€	4.402		7.872		7.134	
sonstige Kosten pauschal	€	3.000		3.000		3.000	
Jahreskosten Biogasanlage	€	54.836	62.282	72.687	79.927	71.875	81.527
Substratkosten	€	23.275		62.080		34.675	
Gesamtkosten	€	78.111	85.557	134.767	142.007	106.550	116.202
Gewinnerwartung	€	226	2.028	4.016	13.314	19.342	24.675

Fortsetzung nächste Seite

Kennwerte	Einh.	BGA 4 (75 kW)		BGA 5 (75 kW)		BGA 6 (75 kW)		BGA 7 (75 kW)	
Maissilage (33 % TM)	t	771		1.100		825		0	
CCM (65 % TM)	t	130		0		0		0	
Rindergülle (8 % TM)	t	3.300		4.400		6.600		13.137	
Rinderfestmist (25 % TM)	t	350		0		0		0	
Gülleanteil nach § 27b	%	80		80		89		100	
Gasertrag	Nm ³	331.351		331.161		328.652		319.480	
Heizwert (Hi)	kWh	5,30		5,30		5,35		5,50	
Vollbenutzungsstunden	h	8.200		8.200		8.200		8.200	
Elektrischer Nutzungsgrad	%	35		35		35		35	
installierte BHKW-Leistung	kW _{el}	75		75		75		75	
Transformationsverluste	kWh _{el}	6.150		6.139		6.150		6.150	
Stromkennzahl	--	0,67		0,67		0,67		0,67	
Stromeinspeisung	kWh _{el}	608.850		607.809		608.850		608.849	
EEG-Vergütung einschl. Boni	EEG Ct/kWh _{el}	2009	2012	2009	2012	2009	2012	2009	2012
		22,28	25,00	22,28	25,00	22,28	25,00	22,28	25,00
Stromerlöse	€	135.676	152.213	135.444	151.952	135.676	152.213	135.676	152.212
Wärmenutzung	kWh	91.371		91.215		91.371		91.371	
Wärmeerlöse	€	3.107		3.104		3.107		3.107	
Summe Erlöse	€	138.783	155.320	138.548	155.056	138.783	155.320	138.783	155.320
Spez. Anschaffungs- kosten	€/kW _{el}	4.500	5.400	4.600	5.700	4.700	6.200	4.500	4.500
Raubelastung	kg/ m ³ ·d ⁻¹	2,00		2,00		2,00		2,00	
Notw. Fermenter- nutzvolumen	m ³	836		858		933		1.152	
Verweilzeit	d	67		57		46		32	
Neubau gasdichter Behälter	m ³	--	936	--	1.291	--	1.996	--	--
Abschreibungen (Ø 10 % v. A.)	€	34.503	39.967	35.110	41.789	35.717	44.824	34.503	34.503
Zinsansatz (4 % v. A.)	€	8.003	9.603	8.181	10.136	8.359	11.024	8.003	8.003
Versicherung (0,6 % v. A.)	€	2.025	2.430	2.070	2.565	2.115	2.790	2.025	2.025
Instandhaltung	€	19.352	21.192	19.534	21.782	19.761	22.827	19.352	19.352
Stromzukauf (16 Ct/kWh _{el})	€	7.872		7.859		7.872		7.872	
sonstige Kosten pauschal	€	3.000		3.000		3.000		3.000	
Jahreskosten Biogasanlage	€	74.756	84.063	75.753	87.130	76.824	92.337	74.755	74.755
Substratkosten	€	44.260		41.800		31.355		0	
Gesamtkosten	€	119.016	128.323	117.553	128.930	108.179	123.692	74.755	74.755
Gewinnerwartung	€	19.768	26.996	20.994	26.127	30.605	31.628	64.027	80.564

Nutzung der KWK-Wärme in der Praxis – Erfahrungen aus Sicht des Umweltgutachters

MICHAEL HUB

1 Einführung – KWK im EEG 2009

Durch das Erneuerbare-Energien-Gesetz 2009 (EEG 2009) sind die Vergütungen für Strom aus Biogasanlagen erheblich angestiegen. Nicht zuletzt hat das EEG 2009 eine erhebliche Erhöhung des KWK-Bonus von 2 auf 3 Cent bewirkt, wenngleich die vergütungsfähigen Wärmenutzungen gegenüber dem EEG 2004 deutlich eingeschränkt wurden. Der mit dem EEG 2009 erhöhte KWK-Bonus ist bei Erfüllung der entsprechenden Voraussetzungen grundsätzlich auch für Altanlagen (Inbetriebnahme vor 01.01.2009) erhältlich.

Gemäß Anlage 3 Nr. II.2 EEG 2009 ist der Nachweis über die Einhaltung der Voraussetzungen für den KWK-Bonus zwingend durch das Gutachten eines Umweltgutachters zu erbringen. In der Praxis hat sich gezeigt, dass sowohl Anlagenbetreiber als auch Netzbetreiber, die letztlich die Vergütungen gewähren, bereits für die erstmalige Beantragung des KWK-Bonus das Gutachten eines Umweltgutachters wünschen.

Bei Nutzung von Biomethan zur Stromerzeugung ist gar die Vergütung überhaupt davon abhängig, dass der Strom vollständig in Kraft-Wärme-Kopplung erzeugt wird.

Neben der eigentlichen Vergütung der Wärmenutzung nach EEG 2009, ist der Wärmeverkauf die einzige Möglichkeit für den Anlagenbetreiber steigende Kosten abzufedern; alle anderen Vergütungsbestandteile sind für die Laufzeit von 20 Jahren fixiert.

Ergo: Eine Biogasanlage mit Wärmenutzung ist erheblich wettbewerbsfähiger, weshalb heute die meisten Anlagen ein KWK-Konzept besitzen oder dieses anstreben. Gemäß dem Erfahrungsbericht 2011 der Bundesregierung zum Erneuerbare-Energien-Gesetz wird der KWK-Bonus von 73 % aller Biogasanlagen genutzt.

Wichtig in diesem Zusammenhang ist, dass die Voraussetzungen für eine Vergütung nach EEG 2009 erfüllt werden. Welche konkreten Herausforderungen dabei in der Praxis zu bestehen sind, soll im folgenden Beitrag näher beleuchtet werden. Außerdem wird ein Ausblick auf das EEG 2012 hinsichtlich möglicher Wärmenutzungen vorgenommen.

Die in diesem Beitrag gemachten Aussagen wurden nach bestem Wissen erstellt. Sie stellen keine verbindliche Rechtsauskunft dar. Daher lassen sich aus den Inhalten dieses Beitrags keine Rechtsansprüche ableiten.

2 Voraussetzungen und Prüfungsbestandteile für den KWK-Bonus nach EEG 2009

Der KWK-Bonus ist für Neuanlagen in § 27 Abs. 4 Nr. 3 EEG 2009 und für Altanlagen in § 66 Abs. 1 Nr. 3 EEG 2009 geregelt. Voraussetzung ist in beiden Fällen, dass die Anforderung der Anlage 3 EEG 2009 erfüllt wird. Dazu ist zwingend die Einschaltung eines Umweltgutachters erforderlich. Das Vorgehen des Umweltgutachters ist in Abbildung 1 schematisch dargestellt.

Prüfschema des Umweltgutachters für den KWK Bonus

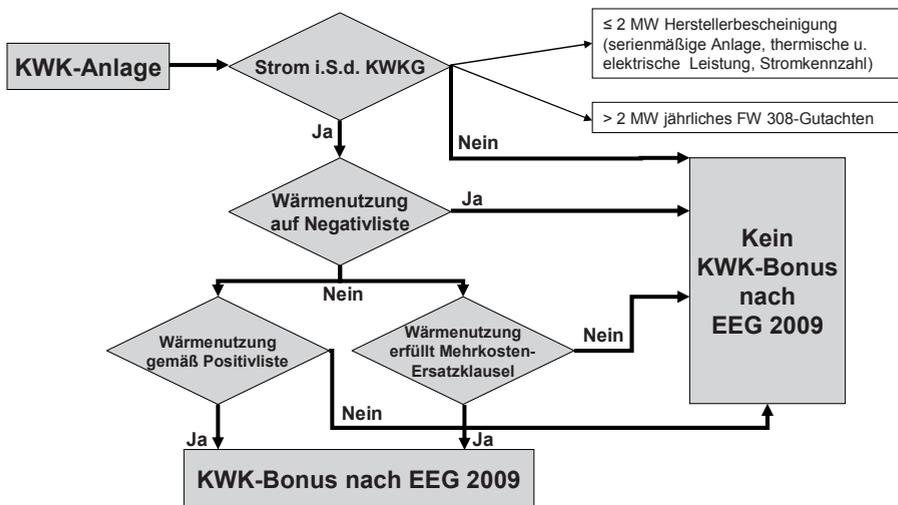


Abb. 1: Prüfschema KWK-Bonus

Für Anlagen mit einer elektrischen Leistung über 2 MW oder für nicht serienmäßig hergestellte Anlagen ist jährlich der Nachweis zu erbringen, dass es sich um Strom im Sinne des Kraft-Wärme-Kopplungs-Gesetzes (KWKG) handelt. Dies geschieht durch ein Gutachten eines Umweltgutachters gemäß Arbeitsblatt FW 308 – Zertifizierung von KWK-Anlagen – des AGFW (Energieeffizienzverband für Wärme, Kälte und KWK e.V.). Für serienmäßig hergestellte Anlagen mit einer elektrischen Leistung von bis zu 2 MW genügt eine Herstellerbescheinigung, aus der die elektrische und die thermische Leistung sowie die Stromkennzahl der KWK-Anlage hervorgehen.

Im zweiten Schritt prüft der Umweltgutachter, ob die Wärmenutzungen unter die Negativliste (Anlage 3 Nr. IV EEG 2009) fallen. Ist dies der Fall, so kann kein KWK-Bonus erzielt werden.

Anschließend ist durch den Umweltgutachter zu prüfen und ggf. zu bestätigen, ob die Wärmenutzungen entweder die Positivliste (Anlage 3 Nr. III EEG 2009) oder aber die Mehrkosten-Ersatz-Klausel (Anlage 3 Nr. I.3 EEG 2009) erfüllen.

3 Wichtige Begriffe im Zusammenhang mit dem KWK-Bonus nach EEG 2009

Wärmenetz

Eine häufige Wärmenutzung von Biogasanlagen sind Wärmenetze. Hier stellt sich die Frage: Was ist ein Wärmenetz im Sinne der Positivliste?

Nach Anlage 3 Nr. III.2 EEG 2009 unterliegen Wärmenetze mit einer Länge von mindestens 400 m und Verlusten unter 25 % des Nutzwärmebedarfs der Wärmekunden der Positivliste und können somit den KWK-Bonus erhalten. Gemäß § 3 (13) KWKG sind Wärmenetze wie folgt definiert:

„Wärmenetze im Sinne dieses Gesetzes sind Einrichtungen zur leitungsgebundenen Versorgung mit Wärme, die eine horizontale Ausdehnung über die Grundstücksgrenze des Standorts der einspeisenden KWK-Anlage hinaus haben [...]. An das Wärmenetz muss mindestens ein Abnehmender angeschlossen sein, der nicht gleichzeitig Eigentümer oder Betreiber der in das Wärmenetz einspeisenden KWK-Anlage ist.“

Also muss ein Wärmenetz über die Grundstücksgrenze der einspeisenden KWK-Anlage hinausgehen und es muss mindestens ein Abnehmer angeschlossen sein, der nicht gleichzeitig Eigentümer oder Betreiber der KWK-Anlage ist.

Im Folgenden wird versucht, einige Begriffe zur Mehrkosten-Ersatz-Klausel (Anlage 3 Nr. I.3 EEG 2009) herzuleiten, da das EEG 2009 hierzu keine näheren Definitionen bietet. Dies sind: Wärmeäquivalent und Wärmebereitstellung

Wärmeäquivalent

Gemäß Begründung zum EEG 2009 gilt ein Wärmeäquivalent dann als vergleichbar, wenn

„die Biomasse-Wärme mindestens 75 Prozent der fossilen Wärme ersetzt. Demnach muss eine Kilowattstunde Biomasseabwärme, die zur Berechnung des KWK-Stromanteils für den KWK-Bonus in Ansatz gebracht werden darf, mindestens 0,75 Kilowattstunden fossiler Energie ersetzen.“

Nach Auffassung des Verfassers ist dies so zu interpretieren, dass Energieverluste von bis zu einem Drittel der Nutzwärme (0,25 kWh von 0,75 kWh), z. B. durch Leitungsverluste, bonusfähig sind.

Bei der Verlustbetrachtung ist weiter zu berücksichtigen, dass im fossilen Bereitstellungsfall auch Wärmeverluste bei der Erzeugung entstehen (durch Abgas-, Stillstands- und Kesselstrahlungsverluste). Diese sind mit mindestens 4 % (bezogen auf Brennwert H_2) der eingesetzten fossilen Energie, von der in der Begründung zum EEG 2009 die Rede ist, anzunehmen (also mind. 4 % der Nutzwärme), da selbst heutige moderne Heizungsanlagen Verluste in mindestens dieser Größenordnung besitzen. Der fossile Energieverbrauch ist also mindestens um diese Wärmemenge größer als die durch die jeweilige fossile Heizung bereitgestellte nutzbare Wärmeenergie.

Da bei der Biogaswärme bereits die bereitgestellte Wärme gemessen wird, sind nach hier vertretener Auffassung die im fossilen Bereitstellungsfall anfallenden Verluste noch zu dem o. g. Drittel der Nutzwärme hinzuzurechnen. Mithin wären Verluste sogar in Höhe von bis zu 38,85 % der Nutzwärmemenge vergütungsfähig (Abb. 2), im Falle weniger effizienter fossiler Heizungen beim Wärmekunden sogar noch entsprechend mehr.

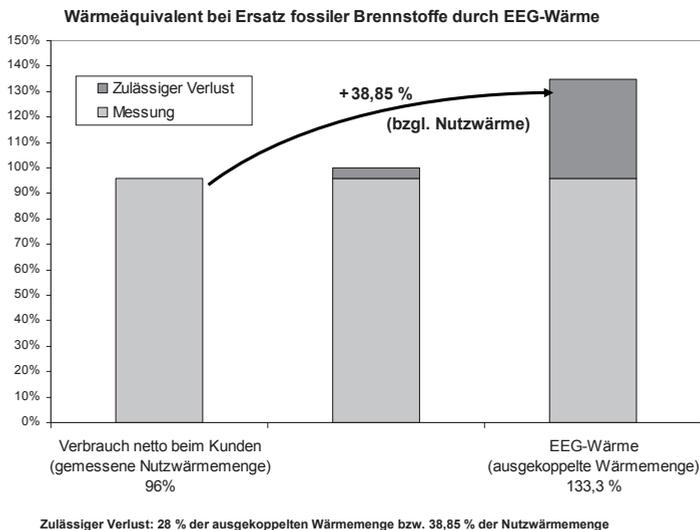


Abb. 2: Schematische Darstellung des Wärmeäquivalents

Wärmebereitstellung

Unter den Kosten für die Wärmebereitstellung werden gemäß Begründung zum EEG 2009 Kosten für technische Einrichtungen (Wärmetauscher, Dampferzeuger, usw.) und für die Wärmeleitung verstanden. Brennstoffkosten sollen hingegen nicht angesetzt werden können. Da in der Begründung auch der Dampferzeuger aufgeführt ist, umfassen die Kosten für die Wärmebereitstellung nach hier vertretener Auffassung nicht nur die Kosten für die Wärmeweiterleitung, sondern auch die Kosten für etwaige Umwandlungs-

aggregate zur Nutzung der Biogaswärme (z. B. Dampferzeuger, Kältesorptionsmaschinen) sowie Energieübertragungseinrichtungen (z. B. Trocknungsanlagen).

Zusammenfassend sind unter den Einrichtungen zur Wärmebereitstellung sämtliche Anlagenteile zu verstehen, die benötigt werden um die Biogaswärme vom BHKW zum Wärmenutzer zu übertragen (Abb. 3).

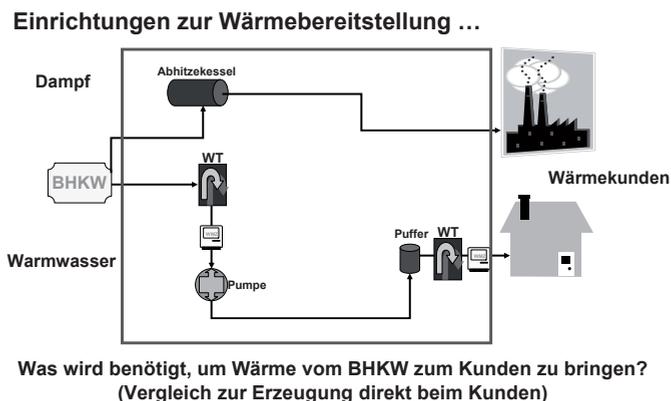


Abb. 3: Abgrenzung der Einrichtungen zur Wärmebereitstellung

4 Häufige Befunde aus der Praxis des Umweltgutachters

Im Folgenden kann nur ein kleiner Ausschnitt von Befunden bei der Begutachtung des KWK-Bonus in Biogasanlagen dargestellt werden. Es werden insbesondere Befunde aufgeführt, die häufiger auftreten und daher von allgemeinem Interesse sein dürften.

Viele Anlagenbetreiber sind unzureichend über Möglichkeiten und Anforderungen zur Erlangung des KWK-Bonus nach EEG 2009 informiert. Daher werden viele Fragen gestellt, welche Wärmenutzungen überhaupt bonusfähig sind. Aufgrund zahlreicher unbestimmter Rechtsbegriffe im EEG (siehe auch Kap. 3) besteht eine große Unsicherheit bei Investitionen in externe Wärmenutzungen. Auch ist einigen Anlagenbetreibern nicht klar, wie sich der KWK-Bonus berechnet (Nutzwärmemenge multipliziert mit Stromkennzahl).

Zuweilen kommt es vor, dass die vorgelegten Herstellerunterlagen zur Stromkennzahl nicht aussagekräftig sind. Netzbetreiber und/oder deren Wirtschaftsprüfer monieren ungewöhnliche hohe Stromkennzahlen und verlangen dann ein Gutachten nach FW 308. Auch auffällige Kennzahlen (Quotient Stromerzeugung zu Wärmeauskopplung sehr hoch oder stark schwankend) können Rückfragen auslösen.

Der Nachweis des Investitionsaufwands für die Wärmebereitstellung ist oftmals nicht nachvollziehbar oder nicht abgegrenzt. Beispielsweise sind die Kosten für den Abgaswärmetauscher, der im Regelfall nur bei einer externen Wärmenutzung benötigt wird, nicht separat in der Rechnung für das BHKW ausgewiesen. Abhilfe kann hier eine nachträglich vom Lieferanten ausgestellte Bescheinigung über die anteiligen Kosten sein.

In einer Reihe von Anlagen können die Wärmeverluste nicht nachvollzogen werden, da Messeinrichtungen (beim Wärmenutzer) fehlen. In vielen Fällen ist es aber unerlässlich, die Wärmeverluste nachzuweisen (bei Wärmenetzen sowie bei allen Wärmenutzungen die nach der Mehrkosten-Ersatzklausel geprüft werden). Fehlen entsprechende Messeinrichtungen müssen sie nachgerüstet werden. Alternativ können in einigen Fällen die Verluste auch berechnet werden.

Für zahlreiche Wärmenutzungen der Positivliste sind Informationen über den Wärmenutzer erforderlich, wie die Nutzfläche nach EnEV, die Genehmigung nach 4. BImSchV oder die Anzahl der Tiere. In einigen Fällen waren diese nicht verfügbar, weil der Anlagenbetreiber diese Daten vom Wärmekunden nicht bekam.

Ein häufiger Fehler ist, dass die Verluste bei Wärmenetzen falsch ermittelt werden. Wenn in der Fernwärmebranche üblicherweise die in ein Netz abgegebene Wärmemenge Grundlage für die Verlustberechnung bildet, verlangt das EEG 2009 eine Angabe in Prozent der beim Kunden genutzten Wärme.

Zuletzt sei noch erwähnt, dass auch auf Seiten der Netzbetreiber hohe Unsicherheiten bestehen, weshalb diese zu einem Übermaß an Sicherheit neigen und z. T. Anwaltskanzleien mit der Überprüfung der eingereichten Unterlagen beauftragen.

5 Zu erwartende Neuerungen durch das EEG 2012

Obleich zum Redaktionsschluss dieses Beitrags das ab dem 01.01.2012 geltende novelierte EEG (im Folgenden „EEG 2012“ genannt) noch nicht verabschiedet war, zeichnen sich doch aufgrund der vorliegenden Entwürfe und Stellungnahmen wesentliche Änderungen hinsichtlich des KWK-Bonus und der Wärmenutzungen ab, die im folgenden Abschnitt skizziert werden sollen.

Eine der wesentlichsten Änderungen ist, dass der KWK-Bonus gestrichen wurde und im Gegenzug Grundvergütung und Boni nur noch dann gezahlt werden sollen, wenn 60 % (vom Bundesrat werden 50 % vorgeschlagen) des in dem jeweiligen Kalenderjahr in der Anlage erzeugten Stroms in Kraft-Wärme-Kopplung erzeugt wird; hierbei wird im Fall der Stromerzeugung aus Biogas die Wärme in Höhe von 25 % des in Kraft-Wärme-Kopplung erzeugten Stroms zur Beheizung des Fermenters angerechnet.

Mit anderen Worten, wenn eine ab dem 01.01.2012 in Betrieb gehende Neuanlage kein externes Wärmekonzept besitzt, ist eine Vergütung nach EEG 2012 ausgeschlossen (nur Anlagen mit einem Gülleinsatz von über 60 Masse-% sollen hiervon ausgenommen sein). Nach Meinung des Bundesrats soll diese Mindestwärmenutzung nur für Anlagen von über 2 MW Feuerungswärmeleistung gelten und bei Nichteinhaltung auch kein kompletter Entfall der Vergütung erfolgen, sondern lediglich ein Abzug in Höhe von 3 Cent pro kWh.

In Anlage 2 wurden einige Klarstellungen eingefügt. Inhaltlich entspricht Anlage 2 EEG 2012 im Wesentlichen den bisherigen Anforderungen zur Gewährung des KWK-Bonus nach Anlage 3 zum EEG 2009, nur dass sie jetzt die Anforderungen an eine qualifizierte Wärmenutzung definiert, ohne die eine Vergütung nach EEG nicht mehr möglich sein soll (siehe oben). Die wesentlichen geplanten Änderungen sind:

- Wärmenutzungen im Sinne der Mehrkosten-Ersatz-Klausel sind nicht mehr wie bisher an nachweisbare Mehrkosten von mindestens 100 Euro pro kW Wärmeleistung geknüpft.
- Die erforderlichen Nachweise hinsichtlich der Mindestwärmenutzung sind bei der erstmaligen Geltendmachung des gesetzlichen Vergütungsanspruchs und danach kalenderjährlich jeweils bis zum 28. Februar zu erbringen. Bereits bei der erstmaligen Geltendmachung des Vergütungsanspruchs ist ein Gutachten eines Umweltgutachters vorzulegen, das die zu erwartende Mindestwärmenutzung von 60 % (beziehungsweise 35 % zuzüglich des anzurechnenden Fermenter-Wärmebedarfs) bescheinigt. Dieses Gutachten muss insbesondere Aussagen machen über die zu erwartende Wärmeproduktion anhand der Stromkennzahl und der geplanten Betriebsstunden sowie Angabe des jährlich zu erwartenden Wärmebedarfs für Wohngebäude und technische Einrichtungen (z. B. zur Holz Trocknung) oder über eine Anschlussprognose von Wärmenetzen, nach der die notwendige Anschlussdichte nach drei Jahren erreicht werden kann.
- Bei der Einspeisung von Wärme in ein Wärmenetz sollen zukünftig Wärmeverluste in Höhe von 25 % oder mehr des Nutzwärmebedarfs der Wärmekunden nicht mehr automatisch zu einer Unzulässigkeit dieser Wärmenutzung im Sinne der Positivliste führen. Jedoch werden Wärmeverluste durch Wärmeverteilung und -übergabe nur bis zu 25 % des Nutzwärmebedarfs der Wärmekundinnen oder -kunden anerkannt.
- Die berücksichtigungsfähigen Obergrenzen für die Beheizung von Tierställen sollen neu festgelegt (i. d. R. deutlich erhöht) und als Bezugsgröße von „Tier“ auf „Tierplatz“ umgestellt werden.

- Die Anforderungen an die Wärmenutzung zur Holz Trocknung sollen erweitert werden, sodass jegliche Trocknung von Holz zur stofflichen oder energetischen Nutzung (z. B. von Holzpellets oder von Holzhackschnitzeln) bis zu einem Wärmeeinsatz von 0,9 kWh je kg Holz berücksichtigt werden kann. Der Bundesrat möchte dies präzisiert wissen auf 1,2 kWh je kg Wasserentzug.
- Als neue Wärmenutzungen sollen die Bereitstellung als Prozesswärme für die Aufbereitung von Biogas und für die Hygienisierung oder Pasteurisierung von Gärresten (Bundesrat möchte dies präzisiert haben auf Gärsubstrate, die nach geltendem Recht der Hygienisierung oder Pasteurisierung bedürfen) aufgenommen werden.

6 Sonderfall Gasaufbereitung

Seit 2009 wird es aufgrund gesetzlicher Änderungen (EEG 2009, Gasnetzzugangsverordnung) erheblich attraktiver, Biogas auf Erdgasqualität aufzubereiten. Das Biogas kann dann dort verstromt werden, wo die Kraft-Wärme-Kopplung ihre Vorteile voll ausspielen kann, sprich in unmittelbarer Nähe von Wärmesenken. Kostenintensive und verlustreiche Wärmeleitungen sind dann nicht mehr nötig. Die KWK-Anlagen können überall dort errichtet werden, wo das Erdgasnetz hinreicht und werden dann in aller Regel wärmegeführt in der Grundlast betrieben, wodurch eine hohe Jahresauslastung und Wirtschaftlichkeit erreicht werden können.

Für Anlagen zur Stromerzeugung aus Biomethan besteht gemäß § 27 Abs. 5 Nr. 2 EEG 2012 wie schon nach bisherigem Recht (§ 27 Abs. 3 Nr. 3 EEG 2009) der Vergütungsanspruch nur dann, wenn der Strom in Kraft-Wärme-Kopplung nach Maßgabe der Anlage 2 EEG 2012 (Anlage 3 EEG 2009) erzeugt wird. Die vollständige Wärmenutzung als Vergütungsvoraussetzung besteht bei der Stromerzeugung aus Biomethan auch, wenn der Strom nach § 33a EEG 2012 direkt vermarktet wird. Somit ist ein Umweltgutachten zwingend erforderlich!

Die Nachweisführung für Biomethan ist vergleichsweise komplex (Abb. 4) und würde den Umfang dieses Beitrags sprengen, weshalb sie an dieser Stelle nicht weiter vertieft werden soll. Da der Anlagenbetreiber der KWK-Anlage, der letztlich die EEG-Nachweise gegenüber seinem Stromnetzbetreiber erbringen muss, meist nicht identisch ist mit dem Betreiber der Biomethananlage, kommt hier zumeist ein Umweltgutachter zum Einsatz, der die Eigenschaften des Biomethans oder gleich des KWK-Stroms insgesamt bestätigt.

Nachweise für aus dem Gasnetz entnommenes Biogas

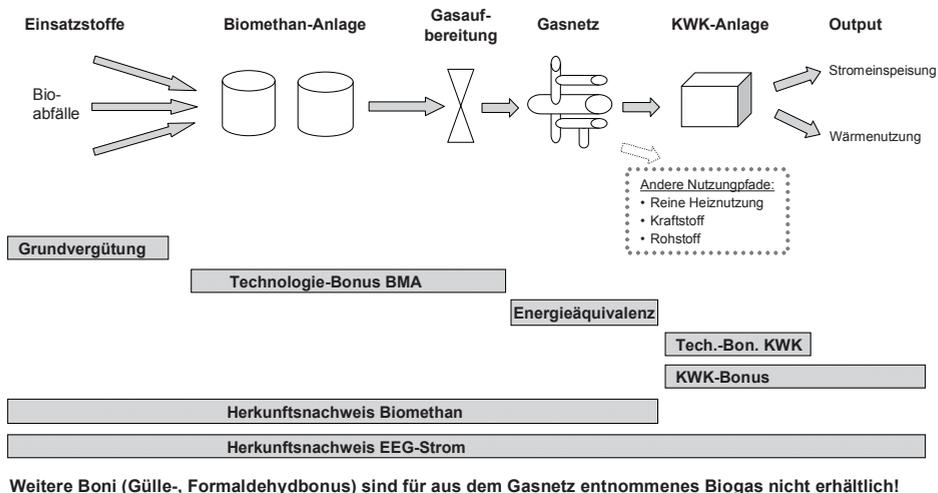


Abb. 4: Vergütungsbestandteile bei Gaseinspeisung

7 Fazit

Das EEG 2009 hat neue und höhere Vergütungen für Strom aus Biogas ermöglicht. Insbesondere der KWK-Bonus wurde erheblich angehoben.

Aufgrund zahlreicher unbestimmter Rechtsbegriffe bestehen sowohl auf Seiten der Anlagen- als auch der Netzbetreiber erhebliche Unsicherheiten. Diese gilt es im Rahmen eines transparenten Umweltgutachtens auszuräumen.

Für die Gewährung des KWK-Bonus nach EEG 2009 ist stets das Gutachten eines Umweltgutachters erforderlich.

Anstelle des KWK-Bonus wird das EEG 2012 eine Mindestwärmenutzung für nahezu alle Anlagen vorschreiben, die durch ein Umweltgutachten zu bestätigen ist.

Die Aufbereitung von Biogas auf Erdgasqualität und die Einspeisung in das Erdgasnetz ermöglichen einen ökologisch und ökonomisch optimierten Anlagenbetrieb, weshalb immer mehr Anlagen mit einer Gasaufbereitung errichtet werden. Eine Vergütung für die Verstromung von Biomethan ist sowohl nach dem EEG 2009 als auch nach dem Entwurf des EEG 2012 nur möglich, wenn der Strom in Kraft-Wärme-Kopplung erzeugt wurde. Die Erstellung der komplexen Nachweise für den Stromnetzbetreiber erfordert einen erfahrenen Umweltgutachter.

Literatur

Entwurf eines Gesetzes zur Neuregelung des Rechtsrahmens für die Förderung der Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien, Bundestagsdrucksache 17/6071, 06.06.2011

Stellungnahme des Bundesrates zum Entwurf eines Gesetzes zur Neuregelung des Rechtsrahmens für die Förderung der Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien, Bundesratsdrucksache 341/11, 17.06.11

Hub, M. (2010): Begutachtung von Abfall-Biogasanlagen durch den Umweltgutachter – Umsetzung der EEG-Novelle. In: Praxis der Verwertung von Biomasse aus Abfällen. Witzenhausen-Institut (Hrsg.), S. 55–61

Hub, M. (2009): Güllebonus – Wie bekommt man ihn? BIOGAS Journal 1, S. 12–13

Hub, M. (2008): EEG 2009 – Mangelware Umweltgutachter. energie pflanzen 12(6), S. 24–26

Kahnt-Ralle, E. (2008): So will es das Gesetz (Tätigkeit des Umweltgutachters). Joule 18(2), S. 10–11

Neuerungen bei den rechtlichen Aspekten der Biogasproduktion und -nutzung

HARTWIG VON BREDOW

1 Einführung

Neben den Vorgaben des Gesetzes für den Vorrang erneuerbarer Energien (EEG) wird die Biogasproduktion und -nutzung von verschiedenen anderen Rechtsgebieten beeinflusst. Neben den Klassikern Bau- und Immissionsschutzrecht können u. a. Abfallrecht, Hygienerecht, Düngerecht und Wasserrecht eine Rolle spielen. Für die Biogaseinspeisung sind zudem die Regelungen zum Netzanschluss von zentraler Bedeutung. Im Folgenden wird eine kurze Einführung in die gegenwärtigen Entwicklungen einiger der vorgenannten Rechtsgebiete gegeben.

2 Baurecht

Das Baurecht lässt sich in Bauplanungsrecht und Bauordnungsrecht unterteilen. Während im Bauplanungsrecht geregelt ist, wo welche Art von baulichen Anlagen errichtet werden darf, ist im Bauordnungsrecht geregelt, wie gebaut werden darf. Für das Bauplanungsrecht hat der Bund die Gesetzgebungskompetenz, für das Bauordnungsrecht sind die Länder zuständig.

Dementsprechend existieren im Baurecht einschlägige Rechtsvorschriften sowohl des Bundes (Baugesetzbuch (BauGB), Baunutzungsverordnung (BauNVO)) als auch des jeweiligen Landes (Landesbauordnungen), die einzuhalten sind. Im Bauordnungsrecht, das vor allem Regelungen zur Gefahrenabwehr (Abstandsregelungen, Brandschutz usw.) enthält, finden sich jedoch keine speziellen Vorschriften für Biogasanlagen.

Auch im Bauplanungsrecht richtet sich die Zulässigkeit von Biogasanlagen grundsätzlich nach den allgemeinen Vorschriften, die für alle Bauvorhaben gelten. Mit § 35 Absatz 1 Nummer 6 BauGB hat der Gesetzgeber allerdings eine Privilegierung für Biogasanlagen im sogenannten Außenbereich geschaffen. „Außenbereich“ sind alle Gebiete, die nicht einem Bebauungsplan unterliegen und die nicht innerhalb im Zusammenhang bebauter Ortsteile liegen. Hierzu gehören in der Regel Hofstellen außerhalb von Ortschaften. Der Außenbereich soll aus Gründen der Schonung der freien Landschaft (naturgegebene Bodennutzung, Erholungsraum für die Allgemeinheit) grundsätzlich von Bebauung freigehalten werden.

Bislang regelte die Privilegierung in § 35 Absatz 1 Nummer 6 BauGB, dass ein Vorhaben im Außenbereich normalerweise zulässig ist, wenn

- „a) das Vorhaben im Rahmen eines land- oder forstwirtschaftlichen Betriebes oder einem Tierhaltungsbetrieb nach § 35 Absatz 1 Nummer 4 BauGB stattfindet und in einem räumlich-funktionalen Zusammenhang mit diesem steht,*
- b) die Biomasse überwiegend aus dem Betrieb oder überwiegend aus diesem und aus nahe gelegenen Betrieben nach dem vorgenannten Punkt stammt,*
- c) je Hofstelle oder Betriebsstandort nur eine Anlage betrieben wird und*
- d) die installierte elektrische Leistung der Anlage 0,5 MW nicht überschreitet.“*

Insbesondere der letzte Punkt war dabei nicht besonders glücklich formuliert, da eine Biogasanlage nicht zwingend über einen Generator verfügen muss, der eine installierte elektrische Leistung aufweist und zudem auch bei Vorhandensein eines Generators die Erzeugungskapazität der Biogasanlage nicht durch die installierte elektrische Leistung des Generators begrenzt ist. Für die Biogasaufbereitung und -einspeisung beinhaltet die Wortlaut des § 35 Absatz 1 Nummer 6 BauGB keine Obergrenze. In der Praxis hatte sich daher die Auffassung durchgesetzt, dass die installierte elektrische Leistung zumindest für Anlagen, die auch Gas zur Weiterleitung an Dritte erzeugen, auf eine entsprechende Erzeugungskapazität von 2,3 Millionen Normkubikmetern je Jahr umzurechnen sei. Die installierte elektrische Leistung als Bezugsgröße im Hinblick auf den zu erwartenden technischen Fortschritt hat sich auch im Übrigen als zu unflexibel erwiesen. So bestand die Gefahr, dass eine nach § 35 Absatz 1 Nummer 6 BauGB privilegierte Biogasanlage nach einer Modernisierung die Privilegierung verlieren könnte, wenn sie aufgrund eines besseren Wirkungsgrades eine elektrische Leistung von mehr als 0,5 MW erzielt hätte. Daher wurde schon länger vertreten, dass anstatt auf die installierte elektrische Leistung, auf die Gesamtfeuerungswärmeleistung der Anlage abzustellen sei. Die meisten Bundesländer haben dies in sogenannten Erlassen geregelt und dabei zwischen 1,5 bis 2 MW als anzusetzende Größe genannt.

Inzwischen ist das BauGB durch das „Gesetz zur Stärkung der klimagerechten Entwicklung in den Städten und Gemeinden“ vom 22. Juli 2011 geändert worden. Das Kriterium der installierten elektrischen Leistung ist durch die Kombination einer maximalen Feuerungswärmeleistung und einer maximalen Erzeugungskapazität ersetzt worden. Der neue § 35 Absatz 1 Nummer 6 d) BauGB hat nun folgenden Wortlaut:

- „d) die Feuerungswärmeleistung der Anlage überschreitet nicht 2,0 Megawatt und die Kapazität einer Anlage zur Erzeugung von Biogas überschreitet nicht 2,3 Millionen Normkubikmeter Biogas pro Jahr.“*

Aus dem neu gefassten Wortlaut ergibt sich nicht eindeutig, ob für Biogasanlagen allein die Erzeugungskapazität begrenzt wird oder ob auch die Feuerungswärmeleistung auf 2 MW begrenzt ist. Die Semantik des § 35 Absatz 1 Nummer 6 d) BauGB und die Geset-

zesbegründung sprechen jedoch dafür, dass eine Biogasanlage stets beide Voraussetzungen erfüllen muss, um unter den Privilegierungstatbestand zu fallen. Dies ist kritikwürdig, da damit die im EEG 2012 besonders geförderte marktangepasste Stromerzeugung erschwert wird. Eine Biogasanlage mit einer Erzeugungskapazität von jährlich 2,3 Mio. Normkubikmetern Biogas, die im Interesse einer marktorientierten Erzeugungsflexibilität neben einem Blockheizkraftwerk (BHKW) mit einer Feuerungswärmeleistung von 2 MW noch über ein weiteres BHKW mit einer Feuerungswärmeleistung von 1 MW verfügt, wäre dann nicht nach § 35 Absatz 1 Nummer 6 BauGB privilegiert, auch wenn im Jahresdurchschnitt von nur 2 MW Feuerungswärmeleistung Gebrauch gemacht wird.

Die mit dem Gesetzentwurf befassten Ausschüsse hatten zudem angeregt, § 35 Absatz 1 Nummer 6 BauGB so zu ändern, dass die Formulierung „im Rahmen“ des zugrundeliegenden Betriebes entfällt. Dahinter steht die Problematik, dass dieses „im Rahmen“ in der Praxis teilweise so aufgefasst wird, dass eine Biogasanlage nur dann privilegiert sei, wenn der Inhaber des Betriebes selbst Eigentümer der Biogasanlage ist oder zumindest maßgeblichen Einfluss auf die Betriebsführung der Biogasanlage hat. Dementsprechend sind nach dieser Auffassung Biogasanlagen, die von reinen Betreibergesellschaften ohne Beteiligung eines örtlichen Landwirtes betrieben werden sollen, auch wenn alle anderen Voraussetzungen der Privilegierung erfüllt sind, nicht privilegiert und daher – sofern nicht ein vorhabenbezogener Bebauungsplan aufgestellt wird – allenfalls nach der Ausnahmevorschrift des § 35 Absatz 2 BauGB genehmigungsfähig. Da die oben dargestellte, enge Auslegung zur Betriebsführung teilweise zu Umgehungsstrukturen geführt hat, deren Zulässigkeit fraglich ist, wäre eine Änderung oder Präzisierung der Vorschrift zu begrüßen. Die Empfehlung der Ausschüsse hat letztlich jedoch keine Mehrheit gefunden.

3 Immissionsschutzrecht

Weiterhin unterliegen Biogasanlagen ab einer bestimmten Größe dem Immissionsschutzrecht, insbesondere dem Bundesimmissionsschutzgesetz (BImSchG) und den Bundesimmissionsschutzverordnungen (BImSchV). Ist für die jeweilige Anlage ein immissionsschutzrechtliches Genehmigungsverfahren durchzuführen, so hat dieses eine Konzentrationswirkung und umfasst auch die baurechtliche Prüfung, nicht allerdings zwingend alle notwendigen Genehmigungen. So ist beispielsweise die Genehmigung nach § 8 Wasserhaushaltsgesetz gesondert einzuholen.

Ab welcher Anlagengröße das Immissionsschutzrecht anzuwenden ist, ergibt sich aus der 4. BImSchV. Gemäß § 2 Absatz 2 in Verbindung mit dem Anhang 4. BImSchV ist für alle Anlagen

- mit einer Feuerungswärmeleistung größer 1 MW oder
- mit Behältern, in denen auch Gülle aufbewahrt wird mit einem Fassungsvermögen von mehr als 6 500 m³ oder
- zur biologischen Behandlung von nicht gefährlichen Abfällen, auf die die Vorschriften des Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetzes Anwendung finden, mit einer Durchsatzleistung von 10 t bis weniger als 50 t Abfällen je Tag oder
- mit einem Gärrestlager mit einem Fassungsvermögen von über 100 t

das vereinfachte Verfahren nach § 19 BImSchG durchzuführen. Für alle Anlagen mit einer Feuerungswärmeleistung größer 50 MW oder für die eine Umweltverträglichkeitsprüfung nach dem Gesetz über die Umweltverträglichkeitsprüfung vorgeschrieben ist, ist das reguläre Genehmigungsverfahren nach § 10 BImSchG durchzuführen. Auch für Biogasanlagen, die Teil oder Nebenanlage einer genehmigungspflichtigen Tierhaltungsanlage sind, ist eine Genehmigung nach dem BImSchG erforderlich. Für Anlagen mit einer Feuerungswärmeleistung von bis zu 1 MW wird dagegen in der Regel keine immissionsschutzrechtliche Genehmigung benötigt.

In der Praxis wirft die Störfallverordnung (StörfallV – 12. BImSchV), die eine Reihe von sicherheitsrelevanten Betreiberpflichten vorsieht, einige Fragen auf. Biogas gilt grundsätzlich als hochentzündliches Gas im Sinne der Nummer 8 des Anhangs I zur StörfallV. Damit findet die StörfallV auf Biogasanlagen Anwendung, wenn die potenziell vorhandene Gasmenge den Schwellenwert von 10 000 kg übersteigt. Welche Behälter dabei berücksichtigt werden und welcher Wert (Biogasdichte in kg/m³) bei der Umrechnung des Schwellenwertes auf das maximal zulässige Behältervolumen Anwendung finden soll, ist umstritten. Die Bundesländer haben hier eine jeweils eigene Verwaltungspraxis entwickelt. Zu beachten ist auch, dass auf Erdgasqualität aufbereitetes Biogas in einigen Bundesländern als Erdgas im Sinne der Nummer 9 des Anhangs I zur StörfallV gewertet wird. Auf Erdgas wird die StörfallV erst ab einem Schwellenwert von 50 000 kg angewendet.

Derzeit gibt es Bestrebungen, dieses komplexe System an verschiedenen Stellen im Anhang der 4. BImSchV zu vereinfachen und einen einheitlichen Genehmigungstatbestand für Biogasanlagen zu schaffen. Inhalt der Regelung soll sein, abgesehen von wenigen Ausnahmen, alle Biogaserzeugungs- oder Aufbereitungsanlagen mit einem Volumenstrom von mindestens 100 Normkubikmetern einem einheitlichen Genehmigungstatbestand zu unterwerfen (Bundesrats-Drucksache 69/11 (Beschluss) vom 18. März 2011). Damit würden alle Biogaserzeugungsanlagen ab einer elektrischen Leistung von etwa 200 kW_{el} oder einer Feuerungswärmeleistung von ca. 500 bis 600 kW dem BImSchG

unterliegen. Die bisher geltende Grenze würde halbiert. Biogasaufbereitungsanlagen würden dann generell einer Genehmigung nach dem BImSchG bedürfen.

4 Abfall- und Düngerecht

Bei Einsatz von bestimmten Einsatzstoffen oder der Verwendung des Gärrestes als Dünger ist das Abfall-, Hygiene- und Düngemittelrecht zu beachten, insbesondere die Verordnung (EG) Nr. 1774/2002 des europäischen Parlaments und des Rates vom 3. Oktober 2002 mit Hygienevorschriften für nicht für den menschlichen Verzehr bestimmte tierische Nebenprodukte (EU-HygieneVO), das Tierische Nebenprodukte-Beseitigungsgesetz (TierNebG), das Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz (Krw-/AbfG), die Bioabfallverordnung (BioAbfV), das Düngemittelgesetz (DüG) und die Düngemittelverordnung (DüV).

Der häufigste Anwendungsfall für das Abfall- und Hygienerecht ist die Verwendung von Gülle in der Biogasanlage. Hierfür bedarf es einer (zusätzlichen) Genehmigung nach Art. 15 der EU-HygieneVO in Verbindung mit dem TierNebG, die gegebenenfalls in einer BImSchG-Genehmigung, nicht jedoch in einer Baugenehmigung, enthalten ist.

Das Krw-/AbfG und die daran enthaltene Definition des Begriffes Abfall bzw. die Einordnung der Einsatzstoffe der Biogasanlage als Abfall nach dem Krw-/AbfG ist aber auch für das Vorliegen einer Genehmigungspflicht nach dem BImSchG relevant. So liegen die Anforderungen für die Erforderlichkeit einer BImSchG-Genehmigung beim Einsatz von Abfällen nach dem Krw-/AbfG bisher, aber insbesondere auch nach der geplanten Änderung der 4. BImSchV deutlich niedriger als bei den explizit für Biogasanlagen geschaffenen Vorschriften. Derzeit ist nicht rechtssicher geklärt, ob beispielsweise Gülle als Abfall im Sinne des Krw-/AbfG oder als Wirtschaftsdünger einzustufen ist. Derzeit befindet sich die Neufassung des Krw-/AbfG im Gesetzgebungsverfahren. Vorgesehen ist unter anderem, im Krw-/AbfG festzuschreiben, dass Wirtschaftsdünger (u. a. Gülle) kein Abfall im Sinne des Krw-/AbfG ist und damit der Gülleeinsatz in Biogasanlagen nicht dem Gesetz unterfällt. Tierische Nebenprodukte, zu denen nach der Verordnung (EG) Nr. 1069/2009 des europäischen Parlaments und des Rates vom 21. Oktober 2009 (VO 1069/2009 (EG)) und der vorher geltenden Verordnung 1774/2002 (EG) auch Gülle zählt, unterliegen ferner den Bestimmungen des Tierische Nebenprodukte-Beseitigungsgesetzes (TierNebG) und der Verordnung zur Durchführung des Tierische Nebenprodukte-Beseitigungsgesetzes (TierNebV).

Beim Einsatz von Bioabfällen in Biogasanlagen ist regelmäßig die BioAbfV einzuhalten. Zu den Bioabfällen zählen dabei gemäß § 2 Absatz 1 BioAbfV alle Abfälle tierischer oder pflanzlicher Herkunft zur Verwertung, die durch Mikroorganismen, bodenbürtige Lebewesen oder Enzyme abgebaut werden können. Dies umfasst gemäß Nr. 1

des Anhangs 1 zur BioAbfV neben pflanzlichen Nebenprodukten und Abfällen aus der Lebensmittelindustrie unter anderem auch Gülle. Die Verordnung nennt verschiedene Behandlungsverfahren, Vorgaben und Grenzwerte, die bei der Hygienisierung der Bioabfälle zu beachten sind. Die BioAbfV befindet sich derzeit in der Novellierung. Die Bundesregierung hat der EU-Kommission kürzlich eine überarbeitete Fassung der BioAbfV zur Notifizierung vorgelegt. Der Entwurf sieht eine Verschärfung bestimmter Grenzwerte vor und ändert die Anforderungen an die Prozessparameter und Nachweise. Zudem soll die Ausbringung von Gärresten auf Anbauflächen für Tabak, Freilandtomaten sowie Gemüse- und Zierpflanzen eingeschränkt werden. Zukünftig muss die Abfallvergärung zudem räumlich vollständig von der Tierhaltung getrennt sein.

5 Biogaseinspeisung

Die Rahmenbedingungen für die Biogaseinspeisung werden mit dem Erneuerbare-Energien-Gesetz in der ab dem 1. Januar 2012 (EEG 2012) geltenden Fassung deutlich verbessert (Keymer 2011). Bereits im September 2010 ist zudem die Gasnetzzugangsverordnung (GasNZV) neu gefasst worden. Die Neufassung der GasNZV hat für die Betreiber von Biomethananlagen zahlreiche Verbesserungen bewirkt. Dies gilt insbesondere für den Gasnetzanschluss, der zuvor für manches Projekt einen Stolperstein dargestellt hat. So ist beispielsweise der vom Anschlussnehmer zu tragende Teil der Investitionskosten seit Inkrafttreten der Verordnung regelmäßig auf 250.000 € gedeckelt (§ 33 Absatz 1 Satz 3 GasNZV). Inzwischen ist auch allgemein anerkannt, dass die Deckelung auch dann Anwendung findet, wenn die Anschlussleitung die Länge von einem Kilometer übersteigt. Zudem legen der zuständige Netzbetreiber und der Anschlussnehmer zu Beginn der Planung- und Errichtungsphase in einem Realisierungsfahrplan verbindlich fest, bis zu welchem Zeitpunkt die Inbetriebnahme des Netzanschlusses und die Umsetzung aller hierfür erforderlichen Schritte jeweils erfolgen sollen (§ 33 Absatz 7 GasNZV). Für die Transportkunden von eingespeistem Biogas haben sich ebenfalls einige Verbesserungen ergeben. In § 19 Absatz 1 Satz 3 Gasnetzentgeltverordnung (GasNEV) ist klargestellt worden, dass auch für die Einspeisung von Biogas in Fernleitungsnetze kein Entgelt erhoben werden darf. Zudem ist das pauschale Entgelt, das Transportkunden von Biomethan zusteht, für einen Zeitraum von zehn Jahren festgelegt worden (§ 20a GasNEV).

Schäden und Mängel an Biogasanlagen

WALDEMAR GRUBER, ARNE DAHLHOFF

1 Einleitung

Die Landwirtschaftskammer Nordrhein-Westfalen unterhält seit 2001 eine Biogasanlagen-Betreiberdatenbank, in der wesentliche Betriebsdaten der landwirtschaftlichen Biogasanlagen erfasst werden. In der Datenbank werden Biogasanlagen berücksichtigt, die mit nachwachsenden Rohstoffen (NawaRo) oder mit außerlandwirtschaftlichen Reststoffen (außerlandwirtschaftlichen Kofermenten) betrieben werden. Die Datenbank enthält keine Angaben über industrielle oder kommunale Biogasanlagen, die Abgrenzung erfolgt über den landwirtschaftlichen Bezug. Als landwirtschaftlich gilt im Sinne der Erfassung für die Datenbank eine Biogasanlage dann, wenn mindestens ein Betreiber oder Gesellschafter Landwirt oder Gärtner ist.

Der Datenbestand der Biogasanlagen-Betreiberdatenbank wird laufend aktualisiert und jährlich ausgewertet. Die vorliegende Auswertung entspricht dem Stand vom 31. März 2011.

Die Unterhaltung der Biogasanlagen-Betreiberdatenbank der Landwirtschaftskammer NRW erfolgt mit freundlicher Unterstützung des Ministeriums für Klimaschutz, Umwelt, Landwirtschaft, Natur und Verbraucherschutz des Landes NRW.

Zum Stichtag der vorliegenden Auswertung waren in der Biogasanlagen-Betreiberdatenbank 393 Datensätze erfasst. Die Aufnahme der Biogasanlagendaten in der Datenbank ist für die Anlagenbetreiber freiwillig. Nach wie vor sind nicht alle Biogasanlagenbetreiber dazu bereit, die Daten ihrer Anlage in der Datenbank erfassen zu lassen. Wir unterstellen daher, wie in den Vorjahren, dass die tatsächliche Anzahl und Leistung der landwirtschaftlichen Biogasanlagen in NRW um 10 % höher sind als in der Datenbank angegeben.

Diesen Umstand berücksichtigend, gehen wir davon aus, dass zum Ende des Jahres 2010 in Nordrhein-Westfalen 432 Biogasanlagen mit einer installierten elektrischen Gesamtleistung von 171 MW in Betrieb waren.

Die im Jahr 2010 neu installierte elektrische Leistung beträgt etwa 45 MW. Damit war der Zubau in 2010 so groß wie in den Jahren 2008 und 2009 zusammen.

Bis Ende 2011 werden in NRW voraussichtlich etwa 500 Biogasanlagen mit einer installierten elektrischen Gesamtleistung von 197 MW in Betrieb sein.

Die letzte EEG-Novellierung hat durch die Kopplung des eingeführten Güllebonus an den NawaRo-Bonus dazu geführt, dass die Kofermentanlagen vergleichsweise deutlich

schlechter vergütet werden als NawaRo-Biogasanlagen. Die angespannte Situation der Beschaffung qualitativ hochwertiger Kofermente, sowie deren Preisanstieg haben die wirtschaftliche Situation der Kofermentanlagen deutlich verschlechtert. Als Konsequenz daraus wurden in den Jahren 2009 und 2010 Kofermentanlagen auf den Betrieb mit nachwachsenden Rohstoffen umgestellt.

Die Bedeutung der Kofermentanlagen war daher auch im Jahr 2010 weiter rückläufig. Wie Abbildung 1 zeigt, arbeiteten 8,5 % der Biogasanlagen mit außerlandwirtschaftlichen Kofermenten im Jahr 2010. Die durchschnittliche elektrische Leistung dieser Anlagen war höher als bei den NawaRo-Biogasanlagen, wodurch der Anteil der Kofermentanlagen an der installierten elektrischen Gesamtleistung bei 11 % lag.

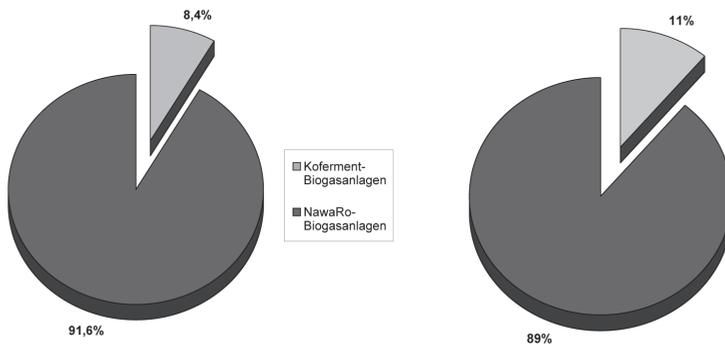


Abb. 1: Anteil der Koferment-Biogasanlagen an der Anzahl der Biogasanlagen (links) und an der installierten elektrischen Leistung (rechts)

Neben der Betriebsweise der Biogasanlagen wurden für die aktuelle Auswertung auch Art und Menge der eingesetzten Substrate erfasst.

Für die Auswertung wurden dazu ausschließlich NawaRo-Biogasanlagen berücksichtigt. Von insgesamt 123 NawaRo-Biogasanlagen mit einem Gesamtinput von 1 256 839 t standen für die Auswertung Betreiberangaben zur Verfügung.

Abbildung 2 zeigt die Einsatzhäufigkeit der einzelnen in NawaRo-Biogasanlagen eingesetzten Substrate sowie deren Anteil an der eingesetzten Gesamtmasse (1 256 839 t).

Bei Betrachtung der Ergebnisse fällt die hohe Bedeutung des Silomais als Substrat für NawaRo-Biogasanlagen auf. In 98,4 % der Biogasanlagen wurde Silomais vergoren. Der Anteil des Silomais an der eingesetzten Gesamtmasse lag bei 48,8 %.

Der Wirtschaftsdüngeranteil betrug 41,6 % der eingesetzten Substratmasse. Trotz Güllebonus wurde der Wirtschaftsdüngeranteil in der Vergärung also nicht maßgeblich gesteigert. In den meisten Biogasanlagen wurden über den Substratanteil aus Wirtschaftsdünger lediglich die Mindestanforderungen für die Inanspruchnahme des Güllebonus erfüllt.

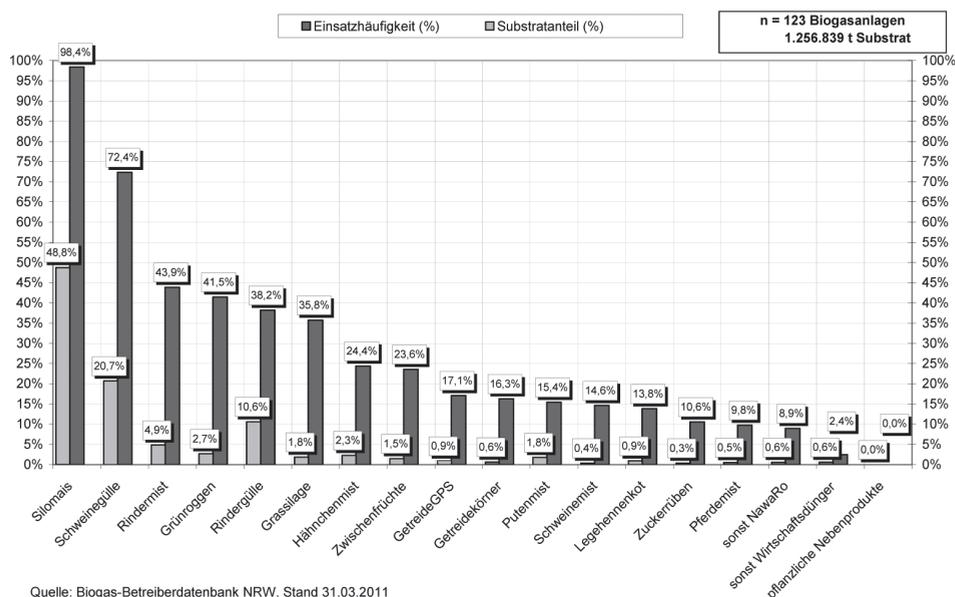


Abb. 2: Einsatzhäufigkeit und Substratanteil unterschiedlicher Inputstoffe in NawaRo-Biogasanlagen in NRW

Die Bedeutung anderer nachwachsender Rohstoffe war in NRW im Jahr 2010 gering, lediglich 9,6 % der eingesetzten Substrate entstammten weder Silomais noch Wirtschaftsdünger.

Auch die Zuckerrübe hatte, anders als aufgrund der intensiven öffentlichen Diskussion zu vermuten gewesen wäre, im Jahr 2010 keine nennenswerte Bedeutung als Substrat in den betrachteten Biogasanlagen.

Völlig unbedeutend sind pflanzliche Nebenprodukte im Sinne des EEG 2009 als Substrat für NawaRo-Biogasanlagen. Keine der ausgewerteten Anlagen setzte im Jahr 2010 pflanzliche Nebenprodukte als Substrat ein.

2 Anlagentechnik

2.1 Zufriedenheit der Anlagenbetreiber

Hinsichtlich des installierten Gär- und Lagervolumens konnten 197 Biogasanlagen ausgewertet werden.

Im Durchschnitt verfügten diese Anlagen über 6,11 m³ Gärvolumen (Fermenter, Nachgärer) je Kilowatt installierter elektrischer Leistung, die Standardabweichung war mit 2,97 allerdings hoch.

Das durchschnittliche Endlagervolumen für Gärreste lag bei den betrachteten Biogasanlagen bei 11,34 m³/kW installierter elektrischer Leistung (Standardabweichung 5,57).

Der Anteil der gasdicht abgedeckten Endlager lag im Jahr 2010 bei knapp 31 %, allerdings zeigt sich ein klarer Trend zur gasdichten Abdeckung von Endlagerbehältern bei neuen Biogasanlagen. So sollen knapp 82 % der Endlager an Biogasanlagen, die im Laufe des Jahres 2011 in Betrieb gehen, gasdicht abgedeckt werden.

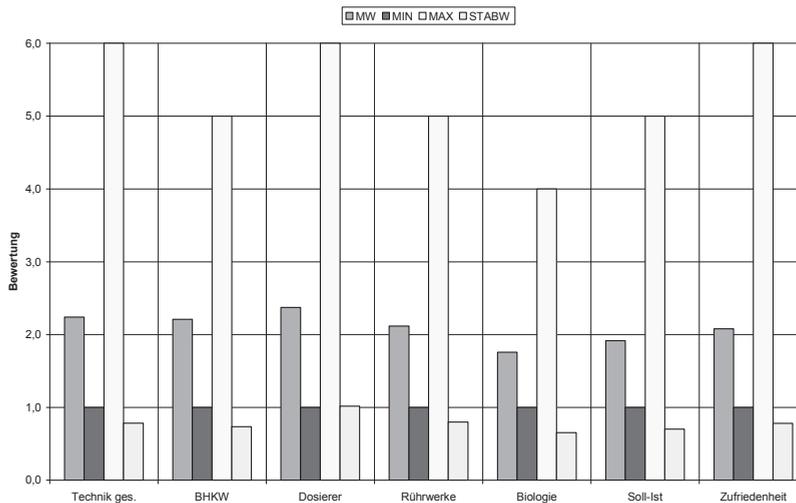


Abb. 3: Zufriedenheit der Anlagenbetreiber mit Baugruppen Ihrer Biogasanlage

Hinsichtlich der verwendeten BHKW-Technik wird zwischen Zündstrahl- und Gas-Otto-BHKW unterschieden. Während 2009 der Anteil der Zündstrahl-BHKW etwas höher war als der Anteil der Gas-Otto-BHKW, hat sich dieses Verhältnis im Jahr 2010 umgekehrt. Von insgesamt 403 ausgewerteten BHKW waren 207 Gas-Otto-BHKW (51,4 %), die übrigen 196 (48,6 %) arbeiteten nach dem Zündstrahl-Prinzip.

Die Ursache für die steigende Verbreitung der Gas-Otto-BHKW wird im Wesentlichen darin liegen, dass die elektrischen Wirkungsgrade bei den kleineren Gas-Otto-BHKW innerhalb kurzer Zeit deutlich verbessert werden konnten. Für die Zündstrahl-BHKW kam erschwerend hinzu, dass als Stützfeuerung nur biogenes Zündöl verwendet werden durfte. Innovative Entwicklungen zur Steigerung der Wirkungsgrade bei den Zündstrahl-BHKW konnten sich im Jahr 2010 noch nicht am Markt durchsetzen.

Die Zufriedenheit der Anlagenbetreiber mit den BHKW war in der Regel hoch. Die Gas-Otto-BHKW wurden im Mittel mit der Note 2,1 (Standardabweichung 0,68) bewertet. Die Bewertungen für die Zündstrahl-BHKW war unwesentlich schlechter (2,2, Standardabweichung 0,72).

Insgesamt waren die Anlagenbetreiber mit der Anlagentechnik recht zufrieden. Die gesamte Anlagentechnik erhielt durch die Anlagenbetreiber die Note 2,2 (Standardabweichung 0,78). Die beste Bewertung wurde für die Stabilität der Gärbiologie (1,8, Standardabweichung 0,66) vergeben. Die schlechteste Bewertung erhielt auch im Jahr 2010 die Technik zur Feststoffdosierung (2,4, Standardabweichung 1,02).

2.2 Störfälle an Biogasanlagen

In Abbildung 4 werden Störfälle an landwirtschaftlichen Biogasanlagen nach der NRW-Betreiberstatistik aufgezeigt. Die häufigsten Störungen treten hiernach am Feststoffdosierer mit 23 % der Nennungen und am Blockheizkraftwerk mit 22 % der Nennungen auf. Danach folgen Störungen an den Rührwerken mit 16 % und an den Pumpen mit 15 %. Weitere Störungen werden genannt die am Überlauf, dem Gasspeicher, der Drucksicherung und dem Fermenter selbst auftraten.

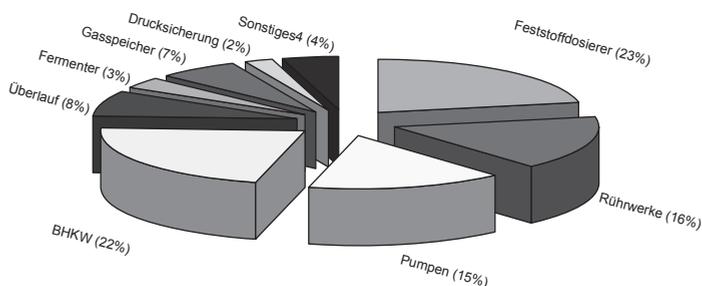


Abb. 4: Störfälle an Biogasanlagen

2.2.1 Feststoffdosierer

In den vergangenen Jahren wurden überwiegend Biogasanlagen zur Vergärung von nachwachsenden Rohstoffen geplant und gebaut. Die nachwachsenden Rohstoffe sind in der Regel stapelbar, haben ein Trockensubstanzgehalt von über 18 % und weisen nicht selten hohe Anteile an faserigem Material auf. Deswegen können diese Stoffe nicht mehr in einer Vorgrube in Flüssigkeit eingerührt und zudosiert werden, sondern benötigen eine spezielle Eintragstechnik mit vorgeschalteten Vorratsbehältern. Der Substrateintrag in den Fermenter erfolgt dann über Schnecken, Kolben oder Pumpen. Einfache Dosierstationen verfügen meist über einen trichterförmigen Vorratsbehälter. Durch den auftretenden Druck strömt das Gärsubstrat in Richtung des Behälterbodens. Dort wird es von einem umlaufenden Messer einer Querförderschnecke zugeführt, die das Substrat über weitere Transporteinrichtungen in den Fermenter bringt. Solche einfachen Feststoffdosierer sind häufig von Fördertechniken für rieselfähiges Material abgeleitet. Werden ei-

ner Biogasanlage auch fasrige Stoffe, wie Festmist oder Gras zugegeben, führt dies in solchen Dosierstationen schnell zur Brückenbildung. Um diese Störung zu vermeiden, kommen verstärkt stationäre Futtermischwagen und davon abgeleitete Techniken als Vorlagebehälter zum Einsatz. Diese haben den Vorteil, dass sowohl eine Zerkleinerung der Langfasern stattfindet als auch eine intensive Durchmischung und Homogenisierung der Substrate. Um den Leistungsbedarf bei den eingesetzten Futtermischwagen zu reduzieren laufen die Mischwerkzeuge mit geringer Umdrehungszahl. Dies führt zu einem niedrigeren Energieverbrauch. Aufgrund der geringeren Umdrehungszahl nimmt jedoch die Zerkleinerungswirkung auch deutlich ab.

Biogasanlagen im oberen Leistungsbereich verbrauchen täglich erhebliche Massen an Substraten. Dies bedeutet, dass sehr große Bevorratungskapazitäten notwendig sind. Die Bunker werden häufig mit einem Schub- oder Kratzbodenaustragssystem versehen. Der Antrieb der Kratz- und Schubböden erfolgt hydraulisch. Somit treten keine stoßweisen Belastungen auf und es kann von einer geringen Anfälligkeit und langen Standzeiten der Kratzbodenketten ausgegangen werden. Schubböden werden häufig in Betonbunker eingebaut. Dadurch lassen sich sehr große Vorratsstätten herstellen. Gegenüber den Kratzböden hat der Schubboden den Nachteil, dass es immer dann zu einer Entmischung bei der Zudosierung kommt, wenn unterschiedlich rieselfähige Materialien in den Bunker gefüllt werden. Eine Schichtung von Gärsubstrat über dem Schubboden hat zur Folge, dass zuerst die komplette unterste Schicht den Querfördereinrichtungen zugeführt wird. Wird bei der Befüllung des Bunkers das Gärsubstrat dagegen hintereinander gesetzt, transportiert der Schubboden zunächst das Material mit der besten Rieselfähigkeit und danach in Abhängigkeit der jeweiligen Rieselfähigkeit alle weiteren. In beiden Fällen findet die Zudosierung unterschiedlicher Gärsubstrate separat und nacheinander statt. Nicht zuletzt deshalb wurden Abschiebecontainer als Feststoffdosierstationen konstruiert. Bei diesen wird das in den Vorratsbunker gegebene Material von einer hydraulisch bewegten Rückwand den Dosierwalzen zugeführt. Das Leeren des Vorratsbehälters findet entsprechend den mit Schub- oder Kratzböden ausgestatteten Vorlagebunkern statt. Die Zerkleinerung und Zudosierung zu den Querfördereinrichtungen wird in diesem System von stehenden oder liegenden Fräswalzen übernommen. Die Mängel, die an Feststoffdosierern auftreten, sind wie folgt zu beschreiben. Aufgrund des Säuregehaltes der Silagen und des damit verbundenen Korrosionsrisikos tritt ein erhöhter Verschleiß in den Dosier- und Transportsystemen auf. Aus diesem Grund sollten die Trichter der Vorratsbehälter und die Einbringsysteme aus Edelstahl bestehen oder mit Kunststoff ausgekleidet sein. Ist dies nicht der Fall müssen oft schon nach 2 Jahren die Trichter der Dosierstationen mit erheblichem Aufwand repariert werden. Auch ist zu beobachten, dass nach einem solchen Zeitraum Schnecken- und Stempeldosiersysteme wegen erheblichen Verschleißes ausgetauscht werden müssen. Oft sind die Antriebe der Dosiereinrichtungen nicht

auf die betrieblichen Ansprüche angepasst. Es werden Störungen in den Motoren, den Übersetzungen oder den Materialausführungen beobachtet, die dann zu einem kompletten Stillstand der Fütterung führen. Heutzutage sind alle gängigen Dosierstationen mit einer Verwiegung ausgestattet. Hierdurch soll die Mengenkontrolle und die mengengeführte Dosierung ermöglicht werden. Die meist ungeeichten Waagen sind jedoch aufgrund von angeflanschten Schnecken häufig ungenau. Teilweise sind Wiegezellen nicht entstört oder anfällig gegenüber Schwingungen beim Befüllen, was dann zu ungenauen Messungen führt. Bei den Schneckeneintragsystemen sind die Übergabestellen, z.B. von Steig- zu Stopfschnecke, oftmals eine Schwachstelle. Es wird beobachtet, dass die Antriebe aufeinander nicht abgestimmt sind, die Dimensionierung der Schnecken und des Schneckenmantels wie auch die Übergabeknicke können bei unterschiedlichen Substraten zu Problemen führen. Im Winter sollten die Schnecken immer leer laufen, damit kein Substrat festfriert.

2.2.2 BHKW

Am zweithäufigsten treten an landwirtschaftlichen Biogasanlagen wohl Probleme am Blockheizkraftwerk auf. Trotz der erheblichen technischen Entwicklungen in den zurückliegenden Jahren sind hier Defekte an der Motorsteuerung, in den Verbrennungsräumen, dem Turbolader und an der Ladeluftkühlung zu nennen. Häufig treten auch Defekte an den Wasserpumpen auf. Bei Zündstrahlmotoren werden an den Einspritzdüsen Verkokungen oder Verstopfungen beobachtet. Auch wird genannt, dass diese häufig und nach kurzen Laufzeiten ausgetauscht werden müssen. Die Entwicklung an den Blockheizkraftwerken ging in den letzten Jahren deutlich in Richtung der Steigerung des elektrischen Wirkungsgrades. Dies wird erreicht durch eine Optimierung der Brennmulden, eine höhere Verdichtung, mithilfe der 4-Ventiltechnik oder bei Gasmotoren mit optimierten Zündsystemen. Die Betriebssicherheit der BHKW versucht man zu verbessern, indem zunehmend das Gas konditioniert wird bevor es das Blockheizkraftwerk erreicht. Durch Filtern und Abkühlen des Biogases werden Schadstoffe (Schwefel, Ammoniak usw.) sowie Wasser entzogen. Die modernen Motoren der Blockheizkraftwerke sind mit Sensoren ausgestattet, die den Betreiber über den jeweiligen Betriebszustand informieren.

2.2.3 Pumpen

Am häufigsten werden Verdrängerpumpen, also Exzentrerschnecken- oder Drehkolbenpumpen, in Biogasanlagen verwendet. Sie haben den Vorteil, dass sie Substrate auch ansaugen können. Exzentrerschneckenpumpen reagieren empfindlich auf Steine, Metallteile und langfasriges Material. Ein Steinfang hilft zumindest teilweise diese Probleme zu vermeiden. Drehkolbenpumpen sind gegenüber Trockenlaufen unempfindlicher, sie sind relativ kompakt gebaut und es ist mit ihnen möglich die Förderrichtung zu ändern.

Druckmesser an den Pumpen geben Aufschluss über eine nachlassende Förderleistung der Pumpen und verhindern das Trockenlaufen. Kreiselpumpen, die in der Gülletechnik weit verbreitet sind, kommen weniger zum Einsatz bei Biogasanlagen, da sie nur Materialien mit Trockensubstanzgehalten deutlich unter 10 % fördern können und nicht in der Lage sind Material anzusaugen. Störungen, die an Pumpen häufig auftreten sind das Trockenlaufen, was durch einen Trockenlaufschutz verhindert werden kann. Langfasrig oder grob gehäckseltes Material führt zu Verstopfungen. Auch werden häufig Störungen durch Steine oder Feststoffkörper beschrieben, was durch einen Steinfang abzuschalten ist. Sind hohe Sandanteile im Faulschlamm ist ein erhöhter Verschleiß an den drehenden Körpern festzustellen.

2.2.4 Rührwerke

Durch das Rühren des Gärsubstrates sollen Schwimm- und Sinkschichten vermieden oder falls entstanden aufgelöst werden. Darüber hinaus wird frisches Material im Gärsubstrat vermischt, entstandenes Gas ausgetrieben sowie die Temperatur im Fermenter gleichmäßig verteilt. Im Vergleich zur Güllelagerung sind die Bedingungen im Fermenter schwieriger. Die Temperatur liegt in der Regel mindestens bei 38–42 °C. Weiterhin ist das Gärsubstrat deutlich aggressiver als Gülle, sodass es schnell zu Korrosion durch vorhandenen Schwefel kommen kann. Dies ist bei der Installation von technischen Einrichtungen im Fermenter und dann gerade bei den Rührwerken, zu berücksichtigen. In stehenden Fermentern verwendet man häufig Tauchmotorrührwerke. Die gute Verstellmöglichkeit dieser Rührwerke über eine Seilwinde ermöglicht das Aufrühren aller Bereiche, auch bei unterschiedlichen Füllständen. Auch Schwimmschichten und Sinkschichten lassen sich gezielt damit zerstören. Tauchmotorrührwerke mit hohen Anschlusswerten weisen jedoch auch einen hohen Energieverbrauch auf. Durch ihren schnellen Propellerlauf ist ihr Verschleiß relativ hoch. Durch die Führungsschienen, an denen die Tauchmotorrührwerke angebracht sind, befinden sich viele bewegliche Teile im Fermenter, was dann auch zu Anfälligkeiten führen kann. An Tauchmotorrührwerken wird als Störfaktor häufig Feuchtigkeitseintritt in den Motor genannt. Deswegen sollten Undichtigkeiten an den Rührwerken überwacht werden. Ansonsten werden häufig Verschleiß und Verzopfungen durch langfasriges Material an diesen Rührwerken festgestellt. Langsam laufende Paddel-, Schräglangachs- oder Zentralrührwerke kommen zunehmend zum Einsatz. Ihr Vorzug liegt im niedrigeren spezifischen Energieverbrauch. Der Motor dieser Rührwerke wird außerhalb des Fermenters platziert, somit sind Wartungsarbeiten einfacher durchzuführen. Allerdings ist es schwierig, mit diesen Rührwerken eine bestehende Schwimmschicht aufzulösen.

Mitunter sind Rührwerkzeuge zu schwach dimensioniert und brechen bei der Arbeit ab. Hydraulische oder pneumatische Rührreinrichtungen erreichen in landwirtschaftli-

chen Biogasanlagen, in denen überwiegend nachwachsende Rohstoffe eingesetzt werden, nicht die notwendige Leistung. Allenfalls werden diese in größeren Anlagen zusätzlich zu mechanischen Rührwerken eingesetzt.

Häufig wird bemängelt, dass die Rührwerke nicht groß genug dimensioniert worden sind, um mit hohen Trockensubstanzgehalten im Fermenter oder Nachgärbehälter zurechtzukommen. Schwachstellen, die an Rührwerken genannt werden sind Materialabrieb oder Korrosion an den Rührwerkzeugen, Überhitzungen des Motors oder Abriss langachsiger Rührwerkzeuge. Überwiegend treten Störungen an den Rührwerken im Fermenter auf, in Nachgärern werden deutlich weniger Störungen festgestellt. Dies lässt sich damit begründen, dass die Rührwerke im Nachgärbehälter erheblich geringere Laufzeiten aufweisen als die Rührwerke im Fermenter.

2.2.5 Sonstiges

Weiterhin wird genannt, dass der Überlauf von Fermenter zu Nachgärbehälter verstopft. Dies liegt daran, dass die Querschnitte zu gering dimensioniert sind oder eben zu zähfließendes Material übergeben werden soll. Eine Abhilfe kann ein Luftenblasen in die Überlaufrohre sein. Bildet sich sehr zähfließendes Material im Fermenter aufgrund hoher Trockensubstanzgehalte in der Fütterung, muss vom Fermenter in den Nachgärbehälter dann der Faulschlamm gepumpt werden. Probleme an Gasspeichern entstehen durch zu hohen Winddruck bei Sturm. Hier zeigt sich, dass der Gasspeicher durch ein Tragluftdach deutlich besser geschützt ist und dem Winddruck standhält als nur ein Foliengasspeicher ohne Wetterschutz. Wiederholt werden undichte Gasspeicher bemängelt. Ein Grund hierfür kann eine schlecht ausgeführte Befestigung sein. Es muss jedoch auch genannt werden, dass die Folien der Gasspeicher altern und nach einem Zeitraum verschlissen sind und ausgetauscht werden müssen. Dies ist vielen Anlagenbetreibern so nicht bewusst.

Schäden treten dann noch mit 3 % an den Fermentern auf. Über 90 % der Anlagen in Nordrhein-Westfalen verfügen über Behälter aus Stahlbeton. Dieser Anteil wird für die gesamte Bundesrepublik nicht wesentlich anders liegen. Genannt wird als Schaden Betonangriff im Gasspeicherraum durch Säuren. Der Grund hierfür ist häufig die biologische Entschwefelung des Biogases im Gasspeicherraum, die so in den meisten Biogasanlagen stattfindet. Bei der biologischen Entschwefelung nehmen Schwefelbakterien, Schwefelwasserstoff (H_2S) auf und formen diesen in elementaren Schwefel um. Da im Gasspeicherraum immer Feuchtigkeit vorhanden ist und durch das Einblasen von Frischluft auch Sauerstoff in den Gasraum gelangt, kann sich Schweflige- oder Schwefelsäure (H_2SO_4) bilden. Die größte Gefahr der Schwefelsäurebildung entsteht wenn überschüssig Luft zugeführt wird, also mehr Luft in den Gasspeicher eingeblasen wird, als die Schwefelbakterien Sauerstoff zur Fällung des Schwefelwasserstoffes benötigen. Eine Beton-

korrosion will man vermeiden, indem säurebeständige Beschichtungen aufgetragen werden. Ob diese auf Dauer beständig sind, bleibt jedoch abzuwarten. Auch eine externe Endschwefelung reduziert die Gefahr der Korrosionsschäden im Fermenter deutlich.

3 Schlussbetrachtung

Die Betriebssicherheit der Biogasanlagen konnte in den letzten Jahren gravierend gesteigert werden. Dies liegt auch daran, dass mehr Professionalität beim Anlagenbau eingekkehrt ist. Dennoch fallen Bauteile auf, bei denen häufig Störungen oder Schäden auftreten. Es wird nicht möglich sein alle Risiken und Schäden auszuschließen. Für den Erfolg einer Anlage ist es jedoch wichtig, die Schwachstellen zu erkennen, in der Arbeitszeit- und Kostenkalkulation mit einzubeziehen und wenn möglich rechtzeitig abzustellen.

Lernen aus Havarien, Schäden und deren Ursachen und Abhilfen im Anlagenbetrieb von Biogasanlagen – Berichte aus der Praxis

WOLFGANG HORST STACHOWITZ

1 Einleitung

Nach den allgemein bekannten Großschäden und den entsprechenden „reißerischen“ Presseartikeln in 2007 bis 2010, die die DAS-IB GmbH mit den beauftragten Sachverständigen am 7. April 2008 und 17. März 2010 in Hannover auf den Veranstaltungen „Aktuelle Schadensfälle in Biogasanlagen“ und in weiteren Seminaren aufgearbeitet hat, hatten wir uns zum Ziel gesetzt, 2008 einen Entwurf von Sicherheitsregeln für Methanogasanlagen – insbesondere Biogasanlagen – zu erstellen. Dieser Entwurf wurde 2008 auf unserer Jahrestagung in Dessau sowie auf unserer KAS-Tagung im gleichen Jahre in Hannover vorgestellt und führte zu zahlreichen Diskussionen und Verbesserungen. Im März 2009 wurde dann die Endversion verfasst. Diese wurde sowohl im Internet kostenfrei zum download angeboten, als auch in unseren Tagungs- und Seminarbüchern seit 2009 abgedruckt.

Nach nunmehr zweijähriger Praxiserprobung und zahlreichen weiteren Erkenntnissen aus Schäden, Havarien und Prüfungen nach § 29a BImSchG und als befähigte Person im Sinne der Betriebssicherheitsverordnung (BetrSichV) und der Technischen Regeln für Betriebssicherheit (TRBS) sowie Diskussionen und durch die Änderungen und Ergänzungen der TRBS haben wir nun die Version III 2011 zur erneuten breiten Diskussion im Internet sowie auf unser Tagung „Biogasanlagen & StörfallV“ am 29.03.2011 sowie am 04.05.2011 „Synergien nutzen – voneinander lernen V“ in Erfurt vorgestellt. Diese Version wird aktuell vom Sachverständigenkreis Biogas (SVKBiogas) weiter verbessert und ergänzt, um eine aktuelle Umsetzungshilfe der verbindlichen Regularien aus der BetrSichV für die Betroffenen zu erhalten.

Das Ziel ist es, diese Sicherheitsregeln auf eine breite Basis zu stellen, damit Schäden und Havarien wirklich vermieden werden und nicht das Augenmerk auf eine nicht zielführende „EX-Zonen“- und Blitzschutz-Diskussion abgelenkt.

Auch führt die „Gläubigkeit“ an eine Technische Information 4 (TI4) oder Arbeitsunterlage 69 (AU69) nicht zur Abstellung der Havarien und Schäden. Aus unserer Sicht ist der „Dreh- und Angelpunkt“ der Arbeitgeber im Sinne der BetrSichV, der nicht nur seine „Möglichkeiten“ aus seiner eigenen Gefährdungsbeurteilung genießen sollte (im Sinne von mit „Leben ausfüllen“), sondern auch seinen aktiven Verpflichtungen in Form von Prüfungen, Tests usw. nachkommen muss.

Diese Fakten merken nun auch immer mehr Versicherungen, die entweder die Versicherungsverträge kündigen oder die Prämien (wesentlich) erhöhen.

Somit werden zur Zeit nicht nur die Verursacher, sondern auch die „guten“ Arbeitgeber bestraft.

An dieser Stelle also zu den notwendigen Prüfungen – die oft schon als Herausforderung für die PrüferInnen angesehen werden müssen. Deshalb an dieser Stelle zu den Verpflichtungen aus der BetrSichV (also keine Kür!).

Die inhaltlichen Prüfungen (insb. Prüfungsumfang und Haftung der PrüferInnen) von Biogasanlagen durch „befähigte Personen“ im Sinne der BetrSichV und TRBS 1203 (Mai 2010) sowie der BImSchG-Sachverständige nach § 29a lassen nach wie vor eine breite Möglichkeit von: Angebot und Auftragsinhalt zu, sodass aus diesen Quellen die unterschiedlichsten „Erfahrungen“ kommen: Von fehlenden Konformitätserklärungen und -bescheinigungen bis fehlenden Hersteller- und Installationsbescheinigungen. Beispielfhaft sei an dieser Stelle angeführt:

- Dichtigkeitsprüfungen aller verbauten Medienleitungen
- Elektroinstallation inkl. Potenzialausgleich, Schalt- und Strompläne
- Sicherheitstechnische Verschaltungen mit Folgehandlungen von Einzelkomponenten/ Einzelanlagen bzw. der Gesamtanlage
- Explosionsschutzdokument mit anlagenbezogener Gefährdungsbeurteilung auf Basis von Gefahren- & Risikoanalyse der Hersteller
- Sicherheitstechnische Bewertung des „Betreibers“ im Sinne der TRBS 1111
- Festlegung des „bestimmungsgemäßen Betriebes“ – „Normalbetrieb“ sowie Gefährdungsbeurteilung, Schutzmaßnahmen und Unterweisungen
- Risikobeurteilung im Sinne der Maschinenrichtlinie 2006/42/EU
- Erstellung eines Feuerwehrplanes als Brandschutzplan oder Brandschutzordnung mit der zuständigen Feuerwehr
- Schweißprüfungen/Schweißzeugnisse bzw. Nachweis von und zu Klebeverbindungen
- Auslegungen von Be- und Entlüftungen, Über- und Unterdrucksicherungen, usw.
- Prüfprotokolle der Gaswarnanlage(n) mit Folgehandlungen
- Protokolle über Funktions-, Prüf- und Wartungsarbeiten
- Auslegungen von Ölauffangwannen
- Herstellererklärungen zur ordnungsgemäßen Montage und Installation von Armaturen und Bauteilen (z.B. Wanddurchführungen für Substrat- und Gasleitungen)
- Herstellererklärungen zur ordnungsgemäßen Montage und zu den wiederkehrenden Prüfungen von Schutzanstrichen (z.B. im Gas- und/oder Substratraum) oder zur Auswahl von Material (z.B. Beton-, Rohr-, Stahlgüte etc.)

Bis hin zur Durchführung von realen Prüfungen mit z.B. Prüfgas und Fehlersimulation (z.B. Kabelbruch an Gebern) und Funktionsprüfungen (z.B. Raumluftüberwachung,

Abblaseeinrichtungen, Temperaturschalter, Lüftungen) von Anlagenteilen (z.B. Test der Überwachungen einer Fackel: Flammenüberwachung, Zündüberwachung) durch die vorgenannten Sachverständigen.

Nach unserer Recherche bei Sachverständigen und eigenen Erfahrungen aus der Bearbeitung von mehr als 55 Schäden/Havarien an Biogasanlagen, Versicherungsunternehmen und Rückversicherer sind die Hauptschäden seit Sommer 2008 wie folgt gegliedert:

- statisches Versagen von Anlagenteilen (z.B. Behälter, Rührwerke, Holzbalkenkonstruktionen für Tragluftdächer) bzw. Nicht- oder Fehlfunktionen der zugehörigen Überwachungseinrichtungen
- Brände durch zu geringe Abstände von heißen Anlagenteilen (Abgasleitungen zu Holzkonstruktionen, Abriß von Ölleitungen, undichten Abgasleitungen) verursacht
- Unwetter – Tragluftdächer fliegen vom Fermenter – keine/mangelnde statische Auslegung in Abhängigkeit der Wetterbedingungen vor Ort
- Gasundichtigkeiten von z.B. Abgasleitungen s.o. und „Bullaugen“ /Schaugläsern am Fermenter in Räumen (!), Gasspeichern
- Falsche Montage und Überwachung von Armaturen und Betriebsmittel z.B. Wanddurchführungen von Substrat – und Gasleitungen
- Motorschäden durch mangelnde oder falsche Wartung, z.B. fehlende Rohgas- und/oder Ölanalysen
- Sachbeschädigungen durch vorsätzliche Bedienfehler, z.B. Überfüllung von Fermentern
- Umweltschäden durch Montagefehler, z.B. keine oder falsche Ringraumdichtungen am Fermenter
- Mangelhafte Ausführung von Schutzanstrichen, z.B. Ölfangwanne nach Wasserhaushaltsgesetz (WHG), Gas- und Substraträumen in Fermentern
- falsche Materialauswahl im Bau und Betrieb
- fehlerhafte Elektro-Installationen, z.B. keine oder falsche Folgehandlungen
- Schäden und Beschädigungen von Dritten oder „unmotiviertes“ Personal

Leider werden, wie eingangs erwähnt, „einfache“ Arbeitgeber-/Betreiberpflichten oft ignoriert:

- Erstellen des anlagenbezogenen Explosionsschutzdokumentes und der Gefährdungsbeurteilung
- Durchführung einer sicherheitstechnischen Bewertung der Biogasanlage (BGA) mit einer anlagenbezogenen Gefährdungsbeurteilung
- Erstellen von Betriebsanweisungen z.B. Begehung von Schächten und unterirdischen Bauwerken, Schweißerlaubnisscheinen usw.
- Erstellen und Durchführen von Wartungs- und Instandsetzungsarbeiten sowie Durchführung von notwendigen Prüfungen auf Dichtheit der Sicherheitsfunktionen usw.
- Durchführung von Unterweisungen: MitarbeiterInnen, Fremdfirmen, Besucher etc.

- Absprachen mit der zuständigen Feuerwehr u. a. zum Verhalten auf der BGA

Zur Vertiefung und Diskussion haben wir also unsere Sicherheitsregeln mit der Umwelttechnik Bojahr (UTB) erneut verbessert. Sie finden diese kostenlos auf <http://www.das-ib.de/sachverst.htm>. Ferner führt die DAS-IB regelmäßige Schulungen (Seminare und Fortbildungen) von Betreibern, Anlagenbauer, Planern, Ingenieurbüros etc. in der Deponie-, Klär- und Biogastechnik durch. Die aktuellen Termine dieser inhouse - oder offenen Veranstaltungen finden Sie auf: <http://www.das-ib.de/veranstaltungen.htm>.

Ferner sei an dieser Stelle auch das Merkblatt des Sachverständigenkreis Biogas (SVK Biogas) erwähnt, welches zum ersten Mal den „Arbeitgebern“ eine Möglichkeit gibt, Prüfungen der Biogastraglufthauben/Doppelmembrangasspeicher(dächer) im Sinne der Dichtigkeit und des Explosionsschutzes, durchzuführen. Das Merkblatt steht zum kostenlosen download unter <http://www.das-ib.de/sachverst.htm> sowie <http://www.svkbiogas.de> zur Verfügung und wurde vom SVK Biogas in Erfurt auf der vorgenannten Tagung im Mai 2011 vorgestellt.

2 Sicherheitsregeln – woran muss ich mich halten und wer bestimmt die Auswahl der Regelwerke?

In der EU und damit auch in Deutschland gilt grundsätzlich folgende Reihenfolge, der zu folgen ist:

1. EU-Richtlinien hier 92/99 (Arbeitgeber) und 94/9 (ausführende Firma)
2. Nationale Gesetze z. B. WHG, Arbeitsschutzgesetz (ArbSchutzG), usw.
3. Nationale Verordnungen hier BetrSichV und 11. Geräte- und Produktsicherheitsgesetz (GPSGV)
4. Regelwerke, Normen, Unfallverhütungsvorschriften (UVV) usw.
5. Technische Informationen (z. B. TI4), Merkblätter usw.

Somit ist an dieser zweiten hierarchischen Stelle definiert, wer, was durchführen muss und was inhaltlich durchgeführt werden muss:

Wer:

„ § 1 Anwendungsbereich“ aus der BetrSichV

„(1) Diese Verordnung gilt für die Bereitstellung von Arbeitsmitteln durch Arbeitgeber sowie für die Benutzung von Arbeitsmitteln durch Beschäftigte bei der Arbeit. „

Hinweis: D.h. also ganz deutlich Arbeitgeber und nicht Behörde, Sachverständige, Anlagenbauer oder sonstige Dritte.

Was: aus der BetrSichV – Auszüge

„§ 3 Gefährdungsbeurteilung“

„(1) Der Arbeitgeber hat bei der Gefährdungsbeurteilung nach § 5 des Arbeitsschutzgesetzes unter Berücksichtigung der Anhänge 1 bis 5, des § 7 der Gefahrstoffverordnung und der allgemeinen Grundsätze des § 4 des Arbeitsschutzgesetzes die notwendigen Maßnahmen für die sichere Bereitstellung und Benutzung der Arbeitsmittel zu ermitteln. Dabei hat er insbesondere die Gefährdungen zu berücksichtigen, die mit der Benutzung des Arbeitsmittels selbst verbunden sind und die am Arbeitsplatz durch Wechselwirkungen der Arbeitsmittel untereinander oder mit Arbeitsstoffen oder der Arbeitsumgebung hervorgerufen werden.“

Hinweis: Die Biogas-, Klärgas- oder Deponiegasanlage ist – wie eine Bohrmaschine – ein Arbeitsmittel im Sinne dieser Verordnung.

„§ 5 Explosionsgefährdete Bereiche „

„(1) Der Arbeitgeber hat explosionsgefährdete Bereiche im Sinne von § 2 Abs. 10 entsprechend Anhang 3 unter Berücksichtigung der Ergebnisse der Gefährdungsbeurteilung gemäß § 3 in Zonen einzuteilen.“

„§ 6 Explosionsschutzdokument“

„(1) Der Arbeitgeber hat unabhängig von der Zahl der Beschäftigten im Rahmen seiner Pflichten nach § 3 sicherzustellen, daß ein Dokument (Explosionsschutzdokument) erstellt und auf dem letzten Stand gehalten wird.

(2) Aus dem Explosionsschutzdokument muß insbesondere hervorgehen,

- 1. daß die Explosionsgefährdungen ermittelt und einer Bewertung unterzogen worden sind,*
- 2. daß angemessene Vorkehrungen getroffen werden, um die Ziele des Explosionsschutzes zu erreichen,*
- 3. welche Bereiche entsprechend Anhang 3 in Zonen eingeteilt wurden und*
- 4. für welche Bereiche die Mindestvorschriften gemäß Anhang 4 gelten.*

(3) Das Explosionsschutzdokument ist vor Aufnahme der Arbeit zu erstellen. Es ist zu überarbeiten, wenn Veränderungen, Erweiterungen oder Umgestaltungen der Arbeitsmittel oder des Arbeitsablaufes vorgenommen werden.“

Hinweis: D. h. also ganz deutlich Arbeitgeber und nicht Behörde, Sachverständige, Anlagenbauer oder sonstige Dritte.

Das Problem ist „bloß“, weiß der „Arbeitgeber“ von seinen Pflichten bzw. wie kommt er an das Wissen, dass er verpflichtet ist und nicht Dritte diese Arbeiten durchzuführen. Und interessant ist sicherlich auch (und dies nicht nur juristisch), wenn diese Arbeiten und Vorgaben von Dritten kommen: „Wer haftet für den Inhalt?“

Aufgrund dieser Tatsachen (Rangfolge von Gesetzen und Regelwerken) und oft fehlerhaften Auflagen in Genehmigungs- und Baubescheiden, hier unsere Frage an die Juristen und die Verwaltung:

Darf „man“ wissentlich etwas Falsches „Genehmigen/Vorschreiben/Auferlegen“? Und wie sind die Verwaltungsakte bezüglich „Verhältnismäßigkeit“ & „fehlerfreie Ermessungsausübung“ nach 40 VwVfG (Verwaltungsgerichtsordnung) und nach 114 VwGO (Verwaltungsverfahrensgesetz) zu bewerten.

Grundsätzlich gibt es neben der BetrSichV auch die Störfallverordnung (StörfallV), die bei einem Biogasinventar > 10 t (Die Dichte ist in Abhängigkeit der realen Betriebsbedingungen: Gasqualität, Gastemperatur, Gasdruck etc. zu berücksichtigen) zusätzlich greift.

Grundsätzliche Risiken und Schäden

Alle in der Einleitung benannten Unsicherheiten und Risiken in der Planung, im Bau, in der Bauüberwachung über Probeläufe, Funktionstests bis zur Abnahme bei den Prüfungen im Betrieb einschl. Wartung, Inspektionen und regelmäßigen wiederkehrenden Tests haben uns dazu bewegt, die vorgenannten Sicherheitsregeln mit dem SVK Biogas zu überarbeiten und neu zu diskutieren. Somit ist jedeR BetreiberIn (Arbeitgeber) in der Lage, selber zu prüfen, was auf ihrer/seiner Anlage umgesetzt werden soll, was fehlt, und wie hoch das Risiko aus diesem Fehlen möglicherweise ist.

Grundsätzliches zur Schadensvermeidung

Die Planung, Erstellung (Bau mit Montagen bis zur Inbetriebnahme und Probebetrieb) sowie die sicherheitstechnischen Prüfungen und der Betrieb von Biogasanlagen erfordert eine interdisziplinäre Zusammenarbeit von mehreren Firmen, Personen und Institutionen. Die eigentliche Herausforderung ist es, diese Zusammenarbeit ständig zu koordinieren sowie den „Überblick“ zu behalten und zu optimieren, um für die Zukunft einen erfolgreichen und sicheren Betrieb einer Biogasanlage dauerhaft zu gewährleisten. Oft gibt es jedoch Probleme und Aufgaben, die schon durch mangelnde Abstimmung, Ausführungen und Kontrollen der Beteiligten beim Bau der Biogasanlage ihren Ursprung haben und dann während des Betriebs zu Ausfällen, Schäden oder gar Unfällen führen.

Um das Risiko solcher „Probleme“ zu minimieren, ist der Einsatz eines unabhängigen und fachkundigen Bauüberwachers, z. B. als Fremdüberwacher und/oder einer gründlichen Prüfung vor oder während der Inbetriebnahme der Biogasanlage zu empfehlen. Diese Prüfung sollte sich nicht nur auf eine Dokumentenprüfung beschränken, sondern sollte die gesamte Anlagentechnik (Ist-Zustand vor Ort) mit erfassen. Ebenso haben Tests sicherheitsrelevanter Abschaltungen und Funktionen ihre Berechtigung in der Praxis

erhalten. Wenn in den täglich genutzten Anlagenteilen Fehler sind, werden diese zumeist schnell vom Betriebspersonal bemerkt und behoben. Anders ist dies bei Sicherheitsfunktionen. Diese werden nur selten oder im Idealfall nie benötigt. Eine Fehlfunktion wird daher auch fast nie bemerkt, es sei denn, aus den Fehlfunktionen resultieren kritische Betriebssituationen, Schäden oder gar Unfälle. Sinnvoll wäre es also, diese Sicherheitsfunktionen mindestens während der Inbetriebnahme „Live“ zu testen, ebenso ist eine wiederkehrende Prüfung nach einem gewissen Zeitraum sinnvoll.

Teilgewerke die zur Erstellung einer Biogasanlage nötig sind:

- Bauplanungen z.B. Honorarordnung für Architekten- und Ingenieurleistungen (HOAI)–Leistungsphasen ggfs. Fremdüberwachung
- Baustatiken und Bauausführungen
- Erd-, Tief- und Betonbau mit der entsprechenden Bauausführung
- Hochbau
- Rohrleitungsbau
- MSR - Technik
- Elektroinstallation
- Potentialausgleich/Blitzschutz
- Sicherheitstechnik
- Beschickungs-, Förder- und Pumptechnik
- Gastechnik
- Motoren-/Maschinentechnik
- Brandschutzordnung z.B. nach DIN 14096.

An der Zahl der Gewerke wird die Herausforderung der Koordinierung beim Bau einer BGA deutlich. Oft wird jedes unterschiedliche Teilgewerk von verschiedenen Fachfirmen ausgeführt, was eine Vielzahl von Schnittstellen bei der Bauausführung zur Folge hat.

3 Zusammenfassung

Der Bau und Betrieb einer Biogasanlage kann durch verschiedene Maßnahmen „sicher gemacht“ werden. Die einfachsten und effektivsten Methoden sind:

- Übergreifende Planung der BGA in Anlehnung an die HOAI – Planungsphasen
- Vergabe an Fachfirmen, die in der Lage sind: Herstellererklärungen, Konformitätserklärungen, Fachunternehmererklärungen usw. mit der Dokumentation und den Betriebsanweisungen der BGA dem Endkunden auszuhändigen
- Bauüberwachung mit der Koordination der Einzelgewerke
- ggfs. Fremdüberwachung zur Kontrolle von Ausführungen in der Montagephase, die während der Inbetriebnahme oder der Tests nicht mehr gesehen werden können

- Sicherheitstechnische Prüfungen der BGA mindestens durch „befähigte Personen“ im Sinne der BetrSichV und einem ausgesuchten Umfang der Fachgebiete von § 29 a BImSchG - Sachverständige auf Basis eines sinnvollen Sicherheitskonzeptes. Hier müssen die Sicherheitseinrichtungen und die Folgehandlungen praktisch geprüft werden. Der/Die PrüferIn muss dafür dann „rechtsverbindlich“ unterschreiben.
- eine intensive, umfassende und wiederkehrende (mindestens alle 2 Jahre) aktenkundige Betreiberschulung
- Durchführung von allen vorgeschriebenen Wartungen und Instandsetzungen der Hersteller der „Teil“ - Gewerke einer BGA und nicht nur des Gasmotors
- Klärung der Haftungsfragen vor dem Schadeneintrittsfall.

Jede noch so sicher gebaute Anlage kann nur mit einem/R entsprechend handelnden und geschultem/n „AnlagenfahrerIn“ sicher betrieben werden. Dieses Verständnis muß jedoch dann jedem/R Einzelnen auch bewusst sein, sodass die Verantwortung für das Konzept und das Handeln auch „begriffen“ und getragen werden kann.

Wir laden Sie also zur Diskussion und Verbesserung der vorgenannten Sicherheitsregeln 2011 herzlich ein.

Literatur

- DAS-IB GmbH (2011): Bio- und Deponiegas Fachtagung 2011 „Synergien nutzen und voneinander lernen V“, Tagungsbuch, Erfurt 3./4.05.2011
- DAS-IB GmbH (2011): Biogas- & Deponiegashandbuch, 10. Aufl.
- DAS-IB GmbH (2011): Tagung: Biogasanlagen & Störfallverordnung, 29.03.2011, Hannover
- DAS-IB GmbH (2010): Bio- und Deponiegas Fachtagung 2010 „Synergien nutzen und voneinander lernen IV“, Tagungsbuch, Düsseldorf 04./05.05.2010
- Stachowitz, W. (2010): Mängel bei Biogasanlagen – Ursachen und Vermeidung, Regelwerke & Schadenbeispiele & Abwehrmaßnahmen, 19. Jahrestagung 2010 des FVB e.V. (Fachverband Biogas) in Leipzig
- DAS-IB GmbH (2009): Anlagenbezogene Sicherheitsbetrachtung von Biogasanlagen, „Internationale Bio – und Deponiegas Fachtagung 28./29.04. 2009 „Synergien nutzen und voneinander lernen III“
- DAS-IB GmbH (2010): Aktuelle Schadensfälle in Biogasanlagen, Tagungsbuch vom 17.03.2010 in Hannover, Veranstaltung für den Meinungs- und Erfahrungsaustausch für Sachverständige nach § 29 a BImSchG und Interessierte
- DAS-IB GmbH (2008): Aktuelle Schadensfälle in Biogasanlagen, Tagungsbuch vom 7.4.2008 in Hannover, Veranstaltung für den Meinungs- und Erfahrungsaustausch für Sachverständige nach § 29 a BImSchG und Interessierte
- DAS-IB GmbH (2008): Bio- und Deponiegas Fachtagung 2008 „Synergien nutzen und voneinander lernen II“, Tagungsbuch, Dessau 22./23. April 2008

Ursachen und Vermeidung von Behälterschäden durch Biokorrosion

JAN KUEVER

1 Korrosion durch Mikroorganismen?

Mikroorganismen besiedeln gerne Oberflächen, da sie dort besser gegen Fressfeinde geschützt sind oder weil die Oberfläche ihnen Nahrung, Mineralien und Spurenelemente liefert, die sie für ihr Wachstum benötigen. In jedem Fall findet eine Interaktion zwischen den Mikroorganismen und der Materialoberfläche statt. Sehr häufig werden regelrechte Biofilme ausgebildet. Die Stoffwechselaktivität der Mikroorganismen kann an bestimmten Stellen zu veränderten chemischen Konzentrationen führen, die dann zu Ablagerungen oder aber Materialabtrag führen.

Die Korrosion durch Mikroorganismen wird in der Literatur allgemein als MIC (mikrobiell induzierte Korrosion) bezeichnet.

2 MIC in Abwesenheit von Sauerstoff

Biogasanlagen sind in der Regel komplett frei von Sauerstoff, da sonst die Bakterien und Archaeen (verantwortlich für die Methanbildung) in ihrer Stoffwechselaktivität nachhaltig gestört werden. Sauerstoff wirkt auf diese Organismen toxisch. Der mit dem Substrat eingebrachte Sauerstoff wird sehr schnell umgesetzt. Eine Ausnahme bildet die Zudosierung von Luft, um eine Entfernung des Schwefelwasserstoffs zu erzielen. Hier wird der in der Luft vorhandene Sauerstoff genutzt, um eine Oxidation des Schwefelwasserstoffs zu elementarem Schwefel zu ermöglichen. Dieser Prozess verläuft in der Regel ohne die Beteiligung von Mikroorganismen rein chemisch. Die damit verbundenen möglichen Probleme werden in Kapitel 3 und 4 behandelt.

2.1 MIC durch sulfatreduzierende Bakterien (SRB)

Die wichtigste Gruppe für MIC sind die Sulfat reduzierenden Bakterien (SRB). Sie oxidieren organische oder anorganische Verbindungen und reduzieren Sulfat oder andere Schwefelverbindungen wie Sulfit, Thiosulfat oder Thionate zu Schwefelwasserstoff (Sulfid). Vereinfacht ausgedrückt: Sie führen eine Sulfatatmung durch. Sauerstoff ist für SRB toxisch, daher sind sie nur in anoxischen Bereichen zu finden.

Die Verbindungen, die SRB als Nahrungsquellen nutzen können, sind äußerst vielfältig; neben einfachen organischen Verbindungen können auch aliphatische oder aro-

matische Kohlenwasserstoffe, Rohöl und einige Polymere genutzt werden. Die Öl fördernde Industrie (Pipelines und Förderanlagen, besonders im offshore Bereich) hat große Probleme mit dieser Gruppe von Mikroorganismen, da sie nicht nur Korrosionsschäden verursachen, sondern auch große Menge des äußerst giftigen Schwefelwasserstoffs freisetzen können.

In der Biogasanlage sind diese Bakterien unmittelbare Nahrungskonkurrenten der Methan produzierenden Archeaen. Der Betreiber sollte daher den Gehalt an oxidierten Schwefelverbindungen, in erster Linie Sulfat, so niedrig wie möglich halten. Neben der Verringerung der Methanausbeute kann es durch die Schwefelwasserstoffbildung auch zu massiven Korrosionserscheinungen kommen.

Um die Rolle der SRB an der Korrosion zu erklären, wurde bisher das Modell der „kathodischen Depolarisierung“ (Abb. 1) benutzt. Es wurde davon ausgegangen, dass durch diesen Prozess molekularer Wasserstoff gebildet wird, welcher dann durch die SRB kontinuierlich aus dem Gleichgewicht entfernt wird.

Die klassische Depolarisierungstheorie ist in der folgenden Reaktion dargestellt:



Der direkte Mechanismus, an dem die SRB an dieser Reaktion beteiligt sind, ist die aktive Entfernung des zwischenzeitlich gebildeten Wasserstoffs.

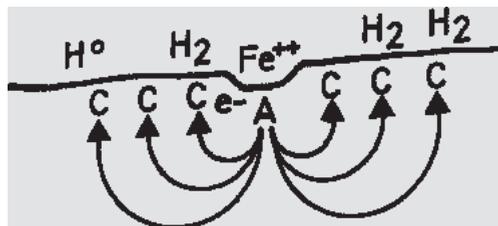


Abb. 1: Bildung von Wasserstoff durch kathodische Depolarisierung in Abwesenheit von Sauerstoff

Der indirekte Mechanismus, der ohne die Beteiligung der SRB abläuft, lässt sich in die folgenden Einzelreaktionen zerlegen:

Eisenoxidation:



Wasserspaltung:



Reduktion der Protonen (chemisch):



Der gebildete Wasserstoff wird durch die SRB aus dem chemischen Gleichgewicht entzogen, wobei Schwefelwasserstoff gebildet wird. Dieser reagiert dann mit den zweiwertigen Eisenionen zu Eisensulfid.

Sulfatreduktion:



Eisensulfidfällung:



In der heutigen Literatur ist dieses Modell immer noch üblich, obwohl es klare wissenschaftliche Belege dagegen gibt. Heutzutage ist davon auszugehen, dass es bestimmte SRB gibt, die direkt die Elektronen aus dem Eisen aufnehmen (DINH et al. 2004).

Einen weiteren indirekten Mechanismus, der durch die SRB verursacht wird, lässt sich aus der Freisetzung von Schwefelwasserstoff erklären. Als Gesamtreaktion wie folgt dargestellt:



Als Einzelreaktionen sind folgende zu unterscheiden:



Deutlich wird hier, dass die Freisetzung von Schwefelwasserstoff durch die Stoffwechselaktivität der SRB zu einer verstärkten Wasserstofffreisetzung führt.

Das Endprodukt der Sulfatreduktion liegt entweder in der Wasserphase als HS^- oder als H_2S in der Gasphase vor. Bestimmt wird dieses durch den pH-Wert. Bei einem pH-Wert von 7 liegt die Hälfte als Schwefelwasserstoff in der Gasphase vor. Bei einem pH-Wert von 9 liegt so gut wie alles dissoziiert in der Wasserphase vor. Im sauren Bereich

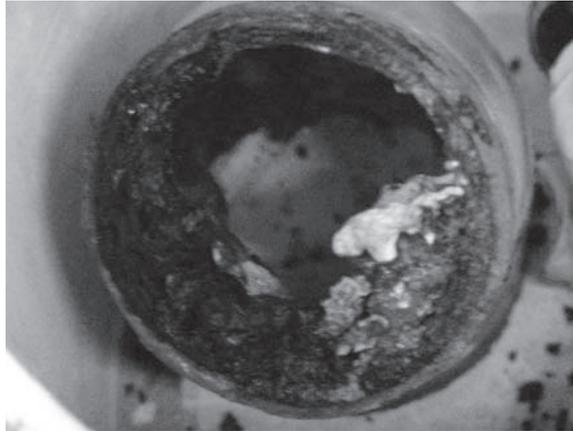


Abb. 2: Eisensulfidablagerungen (schwarz) und carbonatische Ablagerungen in einem Abwasserrohr aus Guss

gelangt es in die Gasphase (pH 6,0: ca. 90%). Ein leicht saurer pH-Wert, wie er typisch für Biogasanlagen ist, kann somit die Korrosion durch den in die Gasphase freigesetzten Schwefelwasserstoff massiv beschleunigen.

Neben der Eisensulfidfällung kann es auch zur Bildung von Eisenhydroxid und -carbonat kommen.

2.2 MIC durch methanbildende Archeen

Die gleichen Prozesse, die für die SRB in Kapitel 2.1 beschrieben wurden, können auch für Methan bildende Archeen nachgewiesen werden (DINH et al. 2004). Auch hier ist die Umsetzung des Wasserstoffs und die mögliche direkte Elektronenaufnahme zu unterscheiden. Bisher ist die Beteiligung dieser Mikroorganismen an der Korrosion nur in marinen Systemen erfolgt, es ist aber davon auszugehen, dass diese Ergebnisse auch auf Lebensräume mit geringerem Salzgehalt zu übertragen sind. Im Bereich der Ölförderung wird diese Art der Korrosion in letzter Zeit vermehrt beobachtet.

Die Oxidation in Kopplung mit der Methanbildung lässt sich in der folgenden Gleichung darstellen:



Auffällig ist, dass durch diesen Prozess eine vermehrte Carbonatausfällung stattfindet.

2.3 Wasserstoffbildung und damit verbundene Probleme

Die Bildung von Wasserstoff kann zu einer Versprödung/Materialermüdung von Metallen führen. In diesem Prozess dringt atomarer Wasserstoff in das Gittergefüge des Metalls

ein und führt zu Dehnungen. Vor allem hochwertige Stähle und mechanisch beanspruchte Teile können dadurch geschädigt werden.

2.4 Säurefreisetzung und damit verbundene Probleme

Während der Fermentation des Substrats werden in der Biogasanlage jede Mengen organischer Säuren freigesetzt, diese können z.B. Fettsäuren, Milchsäure, Oxalsäure, Zitronensäure oder andere einfache Verbindungen sein. In der Biogasanlage werden große Mengen dieser Verbindungen zusammen mit Wasserstoff und Alkoholen gebildet. Einige dieser Säuren (vorzugsweise Fettsäuren oder Dicarbonsäuren) können Metallionen (z.B. Fe-II-Ionen) komplexieren (chelatieren) und damit dem chemischen Gleichgewicht entziehen und die Auflösung beschleunigen. Die Funktion von Schwefelwasserstoff als Säure wurde bereits zuvor besprochen. Unter bestimmten Bedingungen ist auch zu berücksichtigen, dass es zu einer starken Bildung von Kohlensäure kommt, die eine Schädigung von Betonbauteilen bewirken kann.

3 Korrosion in Anwesenheit von Sauerstoff

Die in der Biogasanlage gebildeten Stoffwechselprodukte sind mit Ausnahme des Kohlendioxids alle reduziert. Treffen diese dann mit Sauerstoff zusammen kann es zu einer chemischen Oxidation kommen. Betroffen sind hier z.B. Schwefelwasserstoff und zweiwertiges Eisen, welche zu elementarem Schwefel und dreiwertigem Eisen (Rost) oxidiert werden. In Biogasanlagen wird die gezielte Zudosierung von Luft und damit Sauerstoff genutzt, um ein Entfernung des Schwefelwasserstoffs zu erreichen. Der dabei gebildete Schwefel lagert sich ab und ist damit aus der Gasphase verschwunden. Diese Zudosierung ist vom Prinzip her simpel, birgt aber erhebliche Gefahren, die wenig bekannt sind. Erschwerend kommt hinzu, dass diese Zudosierung in den meisten Fällen nicht gesteuert erfolgt und somit eine Über- oder Unterdosierung erfolgen kann.

3.1 Schwefelsäurebildung durch Mikroorganismen (biogene Schwefelsäurebildung)

Die in der Biogasanlage gebildeten reduzierten Schwefelverbindungen (in erster Linie Schwefelwasserstoff) können durch spezialisierte Mikroorganismen zu Schwefelsäure oxidiert werden. Diese als Schwefel oxidierende Bakterien (SOB) und Archaeen bezeichnete Gruppe können Schwefelwasserstoff, Metallsulfide, Schwefel, Thiosulfate und Tetrathionate zu Sulfat (bzw. Schwefelsäure) oxidieren. Häufig ist der Schwefelwasserstoff jedoch schon chemisch zu Schwefel oxidiert worden und bildet dann gelb-weiße Ablagerungen in bestimmten Bereichen (Kap. 3).

Die folgende Gleichung beschreibt sowohl die chemische als auch die biologische Oxidation von Schwefelwasserstoff zu Schwefel. In der Biogasanlage erfolgt die chemische Oxidation durch den Eintrag von Luftsauerstoff sehr rasch und ist damit vorherrschend.



Der entstandene Schwefel wird durch die oben genannten Bakterien zu Schwefelsäure oxidiert. Für diesen Prozess benötigen die Bakterien Sauerstoff. Der Sauerstoff ist gerade in den Bereichen, wo eine Entfernung des Schwefelwasserstoffs durch Luftzudosierung erwirkt wird, immer vorhanden. Es herrschen dort quasi besonders günstige Bedingungen für diese Bakterien vor.



In ähnlicher Weise können auch Pyrit und Metallsulfide allgemein oxidiert werden.



Mit dieser Reaktion verbunden, ist eine drastische Ansäuerung der Umgebung. Einige Vertreter können auch noch bei einem pH-Wert von 0 leben.

Die gebildete Schwefelsäure führt zur Korrosion von Metallbauteilen, wobei auch edlere Stähle betroffen sind. In der Regel sind die in Biogasanlagen verwendeten Stähle nicht stabil gegenüber Schwefelsäure. Erhöhte Temperaturen, z. B. bei thermophiler Prozessführung der Biogasanlage, können den Prozess erheblich beschleunigen.

Mineralische Baustoffe, wie Beton, werden durch die Säure angegriffen, wobei das Calciumhydroxid und die Calcium-Silikat-Hydrat-Phasen aufgelöst werden (biogene Schwefelsäurekorrosion von Beton). Durch die Schwefelsäure gelangen Sulfate in das Betongefüge und bilden sekundären Ettringit. Da Ettringit ein größeres Volumen einnimmt (Bildung von Nadeln), kommt es zu einer treibenden Wirkung dieser Verbindungen, die zum Absprengen von Material und Rissbildung führen kann (Abb. 3). Dieser Prozess ist in Betonabwasserrohren eine häufige Schadensursache.



Abb. 3: Rissbildung und Korrosion von Beton durch Schwefelsäure

4 Folgeschäden durch Mikroorganismen

4.1 Inaktivierung von Filtern und Katalysatoren

Bei der Verbrennung des Biogases können Rückstände entstehen, die zu Problemen mit Filtern und Katalysatoren führen können.

4.2 Abbauprodukte aus der Vergärung

Neben mineralischen Ablagerungen kann es aber auch zu ungewöhnlich organischen Ablagerungen kommen. Substanzen dieser Art können sich im Kühlsystem anreichern und dort für Probleme sorgen, wobei der Transport u. a. durch Tröpfchen in der Gasphase passieren kann.

4.3 Ablagerungen im Rohrsystem

Mineralische Ablagerungen in Rohrsystemen werden in erster Linie durch carbonatische oder sulfidische Ablagerungen hervorgerufen (Abb. 2 und 4). Sehr häufig sind lamellenartige Strukturen zu erkennen, da die Ablagerungen schichtweise wachsen. Durch den diskontinuierlichen Betrieb und starke Temperaturunterschiede wird die Entstehung beschleunigt. Wie in Abbildung 4 zu sehen ist, kommt es sehr häufig zu einer erheblichen Reduktion des Rohrquerschnitts.



Abb. 4: Überwiegend carbonatische Ablagerungen im Rohrbereich

5 Vermeidung von Korrosion in Biogasanlagen

Um MIC in Biogasanlagen zu verhindern oder zumindest zu minimieren, sind einige einfache Regeln zu beachten:

- Proteinhaltige Substrate sollten mit anderen verdünnt werden.
- Die Metalloberfläche sollte mit einem Korrosionsschutzanstrich oder -beschichtung versehen sein, der nach Möglichkeit porenfrei ist.
- Beschädigungen der Beschichtung sollte vermieden werden (Gefahr der Unterwanderung, Aufplatzen).
- Der Gehalt an oxidierten Schwefelverbindungen, vor allem Sulfat, im Substrat oder im Wasser sollte gering gehalten werden.
- Der Eintrag von Sauerstoff sollte vermieden werden (Schwefelsäurebildung).
- Schwefelwasserstoff sollte kontinuierlich entfernt werden.
- Es sollte eine kontinuierliche Überwachung der Gas- und Wasserphase erfolgen.
- Eine vernünftige Trennung von Wasser und Gasphase; Gastrocknung.

Literatur

Dinh, H.T.; Kuever, J.; Mußmann, M.; Hassel, A.W.; Stratmann, M.; Widdel, F. (2004): Iron corrosion by novel anaerobic microorganisms. *Nature* 427, pp. 829–832

Anaerober Abbau cellulosehaltiger Substrate – Bionische Implementierung des Vormagensystems des Wiederkäuers

DIRK WEICHGREBE, PAUL STOPP, KARL-HEINZ ROSENWINKEL, GERHARD BREVES,
MICHAEL STRECKER

1 Einleitung

Die landwirtschaftlich verfügbare Fläche der Erde ist angesichts der rasch wachsenden Weltbevölkerung längst ein knappes Gut. Einhergehend mit unserem globalen wirtschaftlichen Handeln und dem Druck auf regenerative Energien entsteht eine grundsätzliche Konkurrenz zwischen Anbauflächen für Nahrungsmittel und nachwachsenden Rohstoffen (WAMHOFF 2008).

Die Biogasproduktion spielt eine wichtige Rolle beim Ausbau des Anteils an Erneuerbaren Energien am Primärenergiebedarf in Deutschland. Derzeit in Deutschland installierte NawaRo-Biogasanlagen verwerten zumeist nur die leicht abbaubaren Bestandteile der Pflanze, die hauptsächlich aus dem Fruchtanteil stammen. Die faserreiche Fraktion kann innerhalb einer wirtschaftlich sinnvollen Verweildauer nicht umgesetzt werden. Die Nutzung der Fruchtanteile zur Energiegewinnung steht dabei aber in direkter Konkurrenz zur Nahrungsmittelproduktion, was zwangsläufig zu steigenden Lebensmittelpreisen oder Importen führt. Durch Vergärung faserreicher Substrate, die als Nahrungsmittel ungeeignet sind, kann dieses Problem entschärft werden. Die energetische Nutzung von nachwachsenden Rohstoffen sollte die Nahrungsmittelversorgung nicht beeinträchtigen (MERKEL 2011).

Wesentliche, faserreiche Biomassenstoffströme, beispielsweise Stroh, Grasschnitt, Landschaftspflegematerial und andere organische Reststoffe, sind bisher keine für die Biogasproduktion rentablen Substrate. Diese bestehen hauptsächlich aus anaerob schwer abbaubaren Polymeren wie Cellulose, Hemicellulose oder Lignocellulose. Aktuell entwickelte Vorbehandlungsmethoden zur Verbesserung der Verdaulichkeit wie Mikro-Zerkleinerung, Desintegration oder höhere Hydrolysetemperaturen konnten bislang in der Praxis nicht überzeugen. Meistens rechtfertigt der erreichte Mehrertrag nicht die für die Vorbehandlung eingesetzte Energie.

Die Vergärung faserreicher, schwer abbaubarer Substrate ließe sich rentabel betreiben, wenn es gelingen könnte, die Verweildauer zu reduzieren bzw. die Raumbelastung zu erhöhen. Der anaerobe Abbau von organischen Polymeren erfolgt in mikrobiellen Konsortien. Die beteiligten Mikroorganismen weisen zum Teil erheblich abweichende Milieuanforderungen auf (BISCHOFBERGER et al. 2005) Steigert man die Raumbelastung in

einem einstufigen System führt dies zunehmend zur Inhibierung der beteiligten Mikroorganismen. Bei konventionell gefütterten einstufigen Biogasanlagen führen Raumbelastungen über $5,5 \text{ kg oTS}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ zur Versäuerung und dem Abbruch der Fermentation (DAHLHOFF 2007).

Eine Erhöhung der Raumbelastung auf Hochlast lässt sich durch eine an den Ablauf des anaeroben Abbaus angepasste Prozesstrennung von Hydrolyse und Methanisierung erreichen. Das Vormagensystem der Wiederkäuer ist ein natürliches Vorbild für einen Hochlastreaktor für Hydrolyse und Versäuerung (HRHV). Im Pansen einer Milchkuh kann die Raumbelastung ohne Probleme bis zu $50 \text{ kg oTS}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ betragen.

Das Vormagensystem lässt sich technisch durch eine zweistufige Anordnung von Hydrolyse/Versäuerung (erste Stufe) und Methanisierung (zweite Stufe) übertragen, wobei beide Stufen über einen Feststoffrückhalt und die Rezirkulation des Prozesswassers verbunden sind. Die erste Stufe produziert aus zellulosereichen Substraten die kurz-kettigen flüchtigen organischen Säuren (VFA). In der zweiten Stufe findet die Umsetzung der VFA zu Biogas statt. Die technische Realisierung wird vom Europäischen Fonds für regionale Entwicklung (EFRE) geförderten Kooperationsprojekt RUMEN-DAUMEN 2.0 des Instituts für Siedlungswasserwirtschaft und Abfalltechnik (ISAH) der Leibniz Universität Hannover (LUH) und dem Physiologischen Institut (PI) der Stiftung Tierärztliche Hochschule Hannover (TiHo) untersucht. Ziel ist es, durch effiziente Hydrolyse in dem HRHV-Reaktor die Umsetzung von cellulosehaltigen Reststoffen rentabel zu gestalten und in einer anschließenden Hochlaststufe zur Methanisierung die produzierten Fettsäuren effizient in Biogas umzuwandeln.

2 Grundlagen

2.1 Anaerober Abbau von Cellulose

Cellulose ist die am häufigsten vorkommende organische Verbindung in der Natur. Es ist ein Homopolymer aus Cellobioseeinheiten, die ihrerseits aus zwei Molekülen Glukose bestehen. Die Anzahl der Monomere kann zwischen 500 und 14000 variieren. Die Cellulosemoleküle sind durch Wasserstoffbrücken und Van-der-Waals-Kräfte zu Mikrofasern und dann zu Fasern verbunden. Cellulose liegt zu 20–90 % in kristalliner Form in der Pflanze vor. Sie ist meistens mit weiteren Verbindungen, wie Hemicellulose, Pektine, Lignin, oder Proteinen assoziiert. Der Grad dieser Vernetzung beeinflusst maßgeblich die biologische Abbaubarkeit, ein weiterer Faktor ist die Unlöslichkeit in Wasser und in vielen organischen Lösungsmitteln.

Nach LESCHINE (1995) sind die Mechanismen für den aeroben und anaeroben Abbau von Cellulose grundlegend verschieden. Unter anaeroben Bedingungen ist für den Abbau

zu Kohlenstoffdioxid (CO₂), Methan (CH₄) und Wasser (H₂O) ein komplexes Konsortium von verschiedenen Mikroorganismen notwendig, das sensibel auf Umwelteinflüsse reagiert. Der Abbau von Cellulose zu Cellobiose erfolgt durch die Enzymfamilie der Cellulasen. Diese sind bei anaeroben Mikroorganismen in komplexe, fragile Enzymkomplexe, den Cellulosomen, organisiert. Bei thermophilen Mikroorganismen findet man auch strukturell einfachere Cellulase-Komplexe. Die Komplexe sind außerhalb der Zelle lokalisiert, entweder in der freien Umgebung oder häufiger an die Zellaußenwand gebunden. Die Cellulosomen verbinden die Bakterienzelle mit dem Cellulosestrang und geben über interne Kanäle die Abbauprodukte direkt an die Zelle ab. Zellfreie Cellulase-Komplexe haben den Vorteil, in schmale Lücken des Cellulose-Lignin-Geflechts eindringen zu können und vergrößern somit die Verdaulichkeit.

Die Produkte der Cellolyse: Cellobiose, Cyclodextrine und Glukose werden über verschiedene Gärungen zu organischen Säuren, Alkoholen sowie CO₂ und H₂ umgesetzt. Methanogene und Homoacetogene setzen CO₂, H₂ zu CH₄ und Acetat um. Organischen Säuren und Alkohole, die nicht von den Methanogenen genutzt werden können, werden in sekundärer Gärung zu Acetat, H₂ und CO₂ und letztendlich von den Methanogenen zu CH₄ und CO₂ umgesetzt. Dabei spielen die syntrophischen Beziehungen zwischen den sekundären Fermentieren und den Methanogenen eine wichtige Rolle. Diese Konsortien reagieren sehr sensibel auf Umwelteinflüsse und weisen sehr lange Generationszeiten auf (LESCHINE 1995).

2.2 Verdauungstrakt der Wiederkäuer

Wiederkäuer haben im Laufe der Evolution ein besonderes Verdauungssystem entwickelt (Abb. 1), das die Energiegewinnung aus Cellulose erlaubt. Der Pansen (Rumen) ist der größte der vier Vormägen und spielt bei der Hydrolyse von Cellulose die wichtigste Rolle. Er enthält eine in ihrer Diversität einzigartige mikrobielle Gemeinschaft aus Bakterien, Archaeen, Pilzen und Protozoen (VAN SOEST 1994). Besonders die pansenspezifischen,

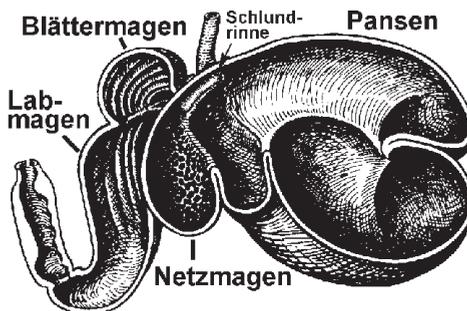


Abb. 1: Das Verdauungssystem eines Hausrindes (HEITLAND und BÄUMLER 2000)

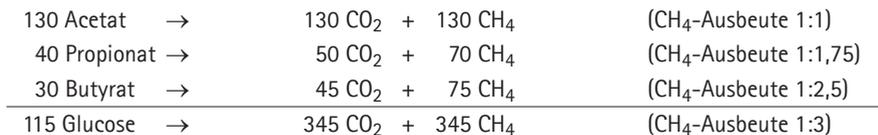
anaeroben Pilze spielen eine wichtige Rolle beim Abbau von faserreichen Substraten, da sie mit den Hyphen die Pflanzzellwände durchdringen können und zur mechanische Auftrennung des Cellulose-Lignin-Geflechtes beitragen.

Die Nahrung der Wiederkäuer besteht zu 75 % aus faserigen Kohlenhydraten, die dem Tier und den Pansenmikroorganismen als die Hauptenergiequelle dienen. Der Pansen fungiert dabei als Chemostat und gewährleistet optimale Wachstumsbedingungen für hydrolytische Mikroorganismen. An den Pansenwänden anhaftende aerobe Mikroorganismen verzehren den mit der Nahrung eingebrachten Sauerstoff und halten das Milieu anaerob mit einem Redoxpotenzial von -250 bis -300 mV. Der pH-Wert liegt zwischen 5,5 und 7. Die Produkte der mikrobiellen Gärung (VFA) werden von der Pansenwand resorbiert und die acetoclastische Methanisierung dadurch weitgehend gehemmt. Das im Pansen produzierte Methan ist weitgehend hydrogenotrophen Ursprungs, da die hydrogenotrophen Methanogene eng mit den sekundären Fermentierern assoziiert sind. Dies bewirkt, dass Acetat als das Hauptprodukt entsteht und nicht die energetisch ungünstigere Milchsäure. Im Netzmagen (Reticulum) werden die nicht hydrolysierten Fasern separiert und in den Pansen zurückgeführt. Die fermentierten Nährstoffe gelangen in den Blättermagen (Omasum). Im Blättermagen wird der Nahrungsbrei entwässert und gelangt in den Labmagen (Abomasum), der von der Funktion dem menschlichen Magen gleicht.

Die Gesamtstöchiometrie der im Pansen parallel stattfindenden Prozesse – Hydrolyse und Versäuerung mit geringer Gasbildung – lässt sich dabei wie folgt beschreiben (Angaben in der Basiseinheit mol):



Die vom Tier für dessen Stoffwechsel genutzten VFA könnten Grundlage für andere Produkte sein. Fettsäuren werden im anaeroben Milieu letztendlich zu Methan und Kohlendioxid umgesetzt:



Somit werden 50 % der hydrolysierten Cellulose zu CH₄ umgewandelt. Für die mit Lignin assoziierte Cellulose sind nur aerobe und extrem langsam ablaufende anaerobe Abbauege bekannt (BENNER et al. 1984). Damit ist ein Teil des Substrates praktischerweise für den anaeroben Abbau nicht verfügbar. Je nach Ligninanteil im Substrat ist im Idealfall mit einem anaeroben Abbau von 80–90 % der faserreichen Substrate zu rechnen.

2.3 Technische Umsetzung des Pansenprinzips

Im Projekt RUMEN-DAUMEN 2.0 werden die Forschungslinien aus den achtziger und Anfang neunziger Jahren vor allem von ZWART et al. (1988) und KIVAISI (1992) aufgegriffen. Die Vorteile einer Kombination aus Hydrolyse mit Pansenmikroorganismen und Methanstufe wurden schon damals untersucht und hervorgehoben. Im Gegensatz zu anderen vorgeschlagenen Modellen, wie der „Weihenstephaner Kuh“ (GLEIXNER 2005), wird die Hydrolyse ausschließlich durch die Tätigkeit von Mikroorganismen ohne chemische oder mechanische Vorbehandlung bewerkstelligt.

Der Einsatz der Pansenmikroorganismen zur Hydrolyse wurde in der Literatur nur im Labormaßstab beschrieben. Der für Laborversuche verwendete Versuchsaufbau kann nicht ohne eine Weiterentwicklung zu einer großtechnischen Anlage umgesetzt werden. Vor allem die Frage der Feststoffabscheidung und damit Trennung der Biozönosen wurde nie zufriedenstellend gelöst. Für eine zuverlässige Bewertung des Konzepts und Datenerhebung für eine Modellierung ist zumindest eine Versuchsanlage im Pilotmaßstab notwendig, was in der Praxis aber zu bestätigen ist.

Die Prozessführung basiert auf dem RUMEN-Konzept der Firma ARES-Consults GbR (STRECKER 2007). Es zeichnet sich durch Trennung und gezielte Anreicherung der Mikrobiologien von Hydrolyse und der Methanogenese aus (Abb. 2). Während die Feststoffe in der Hydrolysestufe verbleiben, werden die VFA mit der permanent zirkulierenden Prozesslösung (vergleichbar mit dem Speichel im Vormagensystem) in die Methanstufe geführt und zu Biogas umgesetzt. Durch Umsetzung der VFA wird die Prozesslösung regeneriert und kann anschließend in der Hydrolysestufe erneut mit VFA angereichert werden.

Am ISAH wird parallel ein verwandtes technisches Konzept untersucht (DAUMEN-Konzept), das sich neben einem speziellen Modul für den Feststoffrückhalt durch den Einsatz einer Hochlaststufe zur Methanproduktion mit spezialisierten Mikroorganismen

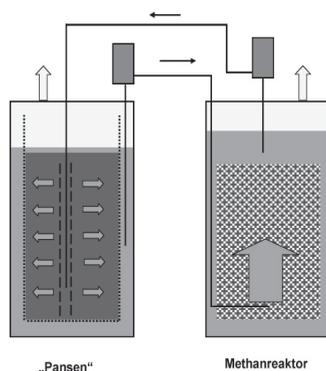


Abb. 2: Schematische Darstellung des RUMEN-Konzepts der Firma ARES

menstämme (Pelletschlamm aus anaeroben Anlagen zur Industrieabwasserbehandlung) unterscheidet (Abb. 3).

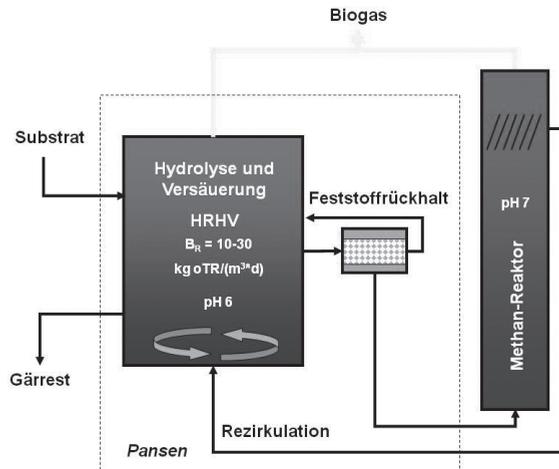


Abb. 3: Schematische Darstellung des DAUMEN-Konzepts

3 Ergebnisse und Diskussion

3.1 Spezifischer Gasertrag

Mit dem RUSITEC (Rumen Simulation Technique)-Verfahren kann im Labormaßstab die Verdaulichkeit von unterschiedlichen Substraten unter simulierten Pansenbedingungen untersucht werden (CZERKAWSKI und BRECKENRIDGE 1977). Gemessen wird vor allem die Produktionsrate an VFA sowie Qualität und Quantität des Hydrolysegases. Aus diesen Daten lässt sich der spezifische Methanertrag für das jeweilige Substrat berechnen.

Abbildung 4 zeigt den Vergleich der RUSITEC-Ergebnisse mit Methanerträgen, die vom selben Substrat nach VDI 4630 erreicht wurden, die keine separate Hydrolysestufe vorsieht. Die Lag-Phase beim VDI 4630-Versuch und die Equilibrierungsphase beim RUSITEC-Versuch wurden nicht betrachtet, weil diese in dem kontinuierlichen DAUMEN-Prozess entfallen. Da hierbei eine möglichst kurze Verweildauer angestrebt wird, reicht die Datenaufnahme über einen Zeitraum von zwei Wochen nach dem Einsetzen der VFA bzw. Gasproduktion aus. Exemplarisch werden hier Ergebnisse für Maissilage als Referenzsubstrat und für Reisstroh als schwer abbaubares Substrat vorgestellt. Bei Maissilage wurde mit $258 \text{ l}_\text{N}/\text{kg oTS}$ ein Mehrertrag von $74 \text{ l}_\text{N}/\text{kg oTS}$ nach 6 Tagen ermittelt. Bei Reisstroh betrug der Methanertrag $176 \text{ l}_\text{N}/\text{kg oTS}$ und der Mehrertrag $56 \text{ l}_\text{N}/\text{kg oTR}$ nach 8 Tagen Verweildauer.

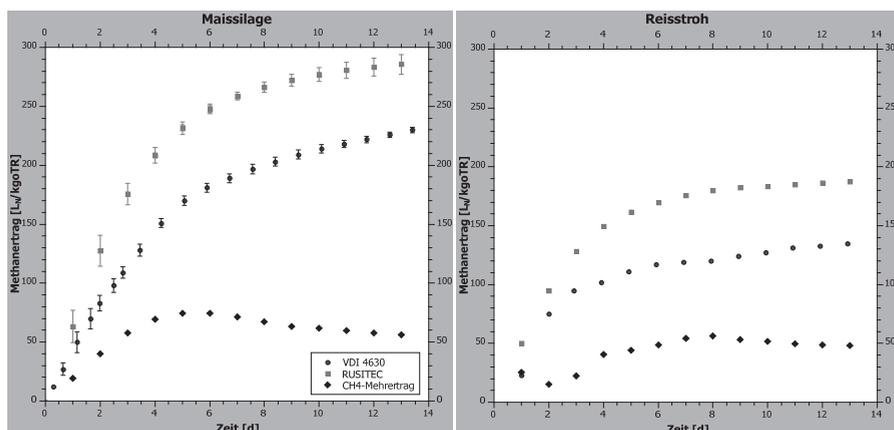


Abb. 4: Vergleich des spezifischen Methanertrags von Pansenmikrobiologie (RUSITEC) und Faulschlamm (VDI 4630)

Mit längerer Versuchsdauer nähern sich die Kurven an und es würde sich für beide Verfahren ein gleicher Methanmaximalertrag ergeben. Bei einer relativ kurzen Aufenthaltszeit ist aber ein bedeutender Mehrertrag durch die Hydrolyse unter Pansenbedingungen zu verzeichnen. Der Mehrertrag ist substratspezifisch und ist zwischen 5–10 Tagen am höchsten. Der ermittelte Mehrertrag ist ein wichtiger Parameter zur Berechnung der optimalen Verweildauer in einem kontinuierlichen Prozess.

3.2 Erprobung des RUMEN-Prinzips im Technikumsmaßstab (TiHo)

Bereits 2007 wurde die erste Scale-Up-Stufe eines künstlichen Pansens mit 120 l in Betrieb genommen und bis heute aufrechterhalten (Abb. 5). Es ist gelungen, die Mikroorganismenkultur des Pansens außerhalb des lebenden Tieres zu erhalten und sogar gezielt zu vermehren. Bisher wurde die Anlage mit den verschiedensten Substraten beschickt, zu denen auch für den Betrieb von Biogasanlagen untypische Stoffe zählen wie Heu, Stroh, Mais ohne Fruchtanteil, Grasschnitt, Sonnenblumen, Rübenblätter, Laubabfälle, Altpapier, Kartonagen, Weizenkleie, Biertreber sowie Gelbsenf und andere Zwischenfrüchte oder Bodenverbesserer.

Die Raumbelastung kann mit etwa $6 \text{ kg oTS}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ veranschlagt werden und überschreitet das bei konventionellen Biogasanlagen übliche Niveau. Die Anlage sollte nur die Möglichkeit der langjährigen Erhaltung der Pansenkultur demonstrieren und ist daher nicht mit einer verlässlichen Feststoffabtrennung ausgerüstet.

Weitere Versuchsanlagen mit einem Hydrolysevolumen von 1 m^3 und 5 m^3 sind an der TiHo im Betrieb. Die Versuche werden Ende 2011 abgeschlossen und ausgewertet.



Abb. 5: 120 l-künstlicher Pansen, gekoppelt mit einer Methanstufe

3.3 Erprobung des DAUMEN-Prinzips (ISAH)

Im Jahr 2010 wurde am ISAH eine zweistufige Versuchsanlage in Betrieb genommen. Die erste Stufe besteht aus einem Hydrolysereaktor (ca. 1 m³) mit Feststoffrückhalt, gekoppelt mit einem 105 l-UASB (Upflow anaerobic sludge blanket)-Reaktor als zweite Stufe (Abb. 6). Der UASB-Reaktor zeichnet sich durch seine kompakte Bauweise und einen guten Rückhalt der Mikroorganismen aus. Der UASB wurde mit Pellettschlamm aus der anaeroben Abwasserbehandlung der Ethanolproduktion angeimpft. Ziel der Untersuchung ist es, für die Substrate Stroh, Birtreber, Kleie und dem Referenzsubstrat Maissilage durch Erhöhung der Raumbelastung jeweils in beiden Stufen Parameter für eine wirtschaftliche Betriebsweise zu ermitteln.

In Anlehnung an die Physiologie des Pansens und unter Berücksichtigung der maximalen Aufstromgeschwindigkeit im UASB, wurde der Prozesswasserstrom so eingestellt,

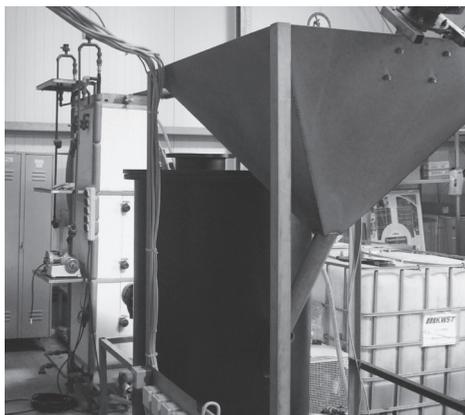


Abb. 6: Versuchsanlage am ISAH, 1 m³-Hydrolyse, 105 l-UASB-Reaktor

dass im HRHV-Reaktor eine hydraulische Verweilzeit (HRT) von 2 Tagen und im UASB von 0,3 Tagen erreicht wurde. Zum Feststoffrückhalt im HRHV wurde ein selbstreinigendes Sieb mit 3 mm Lochgröße installiert und durch einen Nylonkerzenfilter ergänzt. Die Feststoffverweilzeit (SRT) wurde für den HRHV zunächst auf 30 Tage eingestellt, um einen möglichst vollständigen Abbau der Substrate zu erreichen.

Bisher wurde ein kontinuierlicher Betrieb bis zu einer Raumbelastung von ca. 3 kg oTS/(m³ · d) mit dem Referenzsubstrat Maissilage gefahren. Die Methanausbeute betrug dabei im Gesamtsystem 298 l_NCH₄/kg oTS, wovon ca. 40 % in der HRHV und 60 % im UASB gebildet wurden. Problematisch erwies sich bei der feinkörnigen Maissilage der strikte Feststoffrückhalt, sodass die Raumbelastung bisher nicht weiter gesteigert werden konnte.

Mit Stroh (Einstreuqualität) konnte bisher nur ein Methanertrag von 130 l_NCH₄/kg oTS bei einer Raumbelastung von 1,5 kg oTS/(m³ · d) erreicht werden. Hier erwies sich die Durchmischung im HRHV als ungenügend, sodass weitere Versuche mit gehäckseltem Stroh (2–5 cm) in Vorbereitung sind. Da der Feststoffrückhalt bei Stroh (Einstreuqualität) jedoch unproblematisch war, dürfte eine deutliche Steigerung der Raumbelastung möglich sein.

4 Zusammenfassung und Ausblick

Eigene Laborversuche nach Vorschrift der RUSITEC-Methode haben die bestehenden Erkenntnisse aus den 1980er-Jahren über die Vorteile des Pansensystems zum anaeroben Abbau von faserreichen Substraten bestätigt. Es wurden Abbaukurven unter simulierten Pansenbedingungen über einen Versuchszeitraum von 14 Tagen für Reisstroh und Maissilage erstellt, deren Auswertung als Grundlage für die Modellierung und Berechnung von substratspezifischen Anlagenkennwerten (Hydrolyseraten, Verweilzeit) dient. Es wurden dazu standardisierte Batch-Tests nach der VDI 4630-Vorschrift durchgeführt, um die Unterschiede des Pansensystems zu einstufigen Biogasanlagen quantitativ beschreiben zu können. Die deutlich höheren Hydrolyseraten und damit Methanerträge ergaben sich zwischen 5–10 Tagen. Mit zunehmender Verweildauer nimmt der Mehrertrag gegenüber einem einstufigen System ab.

Im Pilotmaßstab wurde die Hydrolyseleistung des HRHV in Verbindung mit dem UASB-Reaktor untersucht. Für das Referenzsubstrat Maissilage wurde bislang ein Methanertrag von 298 l_NCH₄/kg oTS bei einer Raumbelastung von 3 kg oTS/(m³ · d) gemessen. Für Stroh (Einstreuqualität) konnte aufgrund mangelnder Durchmischung bisher nur eine Raumbelastung von 1,5 kg oTS/(m³ · d) und dabei ein Methanertrag von 130 l_NCH₄/kg oTS erzielt werden.

Die Versuche nach dem DAUMEN- und RUMEN-Konzept werden mit Stroh (gehäckselt) und Kleie weitergeführt. Dabei sollen die Versuchsanlagen auf CSB-Basis bilanziert werden. Mit den gewonnenen Daten wird die Hydrolyse in einem an den Pansen angelehnten System in Verbindung mit einer Methanstufe mit einem mathematischen Modell beschrieben und letztendlich hinsichtlich Wirtschaftlichkeit auf großtechnische Anwendung hin überprüft.

Literatur

- Benner, R.; Maccubbin, A. E.; Hodson, R. E. (1984): Anaerobic Biodegradation of the Lignin and Polysaccharide Components of Lignocellulose and Synthetic Lignin by Sediment Microflora. *Applied and Environmental Microbiology* 47(5)
- Bischofsberger, W.; Dichtl, N.; Rosenwinkel, K.-H.; Seyfried, C. F.; Böhnke, B. (2005): *Anaerobotechnik*. Berlin, Heidelberg, Springer-Verlag
- Czerkawski, J.; Breckenridge, G. (1977): Design and development of a long-term rumen simulation technique. *Br. J. Nutr.* (38)
- Dahlhoff, A. (2007): Auswirkungen einer erhöhten Faulraumbelastung auf die Prozessbiologie bei der Vergärung, Dissertation, Göttingen
- Gleixner, A. J. (2005): Voraufbereitung durch Separierung und Hydrolyse. 2. Norddeutsche Biogastagung, Hildesheim
- Heitland, W.; Bäumler, W. (2000): http://www.faunistik.net/BSWT/MAMMALIA/UNGULATA/ruminantia_magen_im01.html, Zugriff am 01.07.2011
- Kivaisi, A. K.; Gijzen, H. J.; Op Den Camo, H. M.; Vogels, G. D. (1992): Conversion of cereal residues into biogas in a rumen-derived process. *World Journal of Microbiology and Biotechnology* 8
- Leschine, S. B. (1995): Cellulose degradation in anaerobic environments. *Annual Reviews Mikrobiologie* 49
- Merkel, A. (2011): Rede von Bundeskanzlerin Angela Merkel anlässlich des Deutschen Bauerntags 2011. http://www.bundesregierung.de/nn_1264/Content/DE/Rede/2011/06/2011-06-30-merkel-deutscher-bauerntag.html, Zugriff am 01.07.2011
- Strecker, M. (2007): Verfahren und Vorrichtung zur Gewinnung von Biogas, Offenlegungsschrift DE 10 2006 012 130 A1
- Van Soest, P. J. (1994): *Nutritional Ecology of the Ruminant*. New York, Cornell University Press
- Wamhoff, W. (2008): Nahrungsmittel – Nachwachsende Rohstoffe – Naturschutz Wie nutzen wir die Flächen der Welt in nachhaltiger Weise? 21. Hülsenberger Gespräche, Lübeck
- Zwart, K. B.; Gijzen, H. J.; Cox, P.; Vogels, G. D. (1988): Anaerobic Digestion of a Cellulosic Fraction of Refuse by a Two-Phase Rumen-Derived Process. *Biotechnology and Bioengineering* 32

Vergärung nachwachsender Rohstoffe im Aufstromverfahren

JAN MUMME, BERND LINKE, PATRICE RAMM

Kurzfassung

Ziel dieser Arbeit war die Erprobung des neuentwickelten Aufstromverfahrens hinsichtlich der Eignung und Effizienz für die Vergärung fester nachwachsender Rohstoffe. Versuche im labor- und kleintechnischen Maßstab mit Raumbelastungen von bis zu 16 g oTS/(l·d) zeigten eine außerordentlich hohe Abbaurate bei praxisüblichen Methanausbeuten im Bereich von 309–387 l/kg oTS. Neben der hohen Belastbarkeit gehören zu den Vorteilen des Aufstromverfahrens ein geringer Energiebedarf und die gute Eignung für faserreiche Stoffe.

1 Einleitung

Die gegenwärtig in der Praxis vorherrschenden Rührkesselreaktoren wurden ursprünglich für die Vergärung von flüssigen Biomassen, v.a. Rinder- und Schweinegülle entwickelt. Mit zunehmendem Anteil von Feststoffen wie Maissilage und Festmist in der Substratmischung erhöht sich der technische und energetische Aufwand deutlich. Die Optimierung und Neuentwicklung von Biogasanlagen im Hinblick auf den Feststoffeinsatz ist daher ein wichtiges Ziel von Herstellern und Wissenschaft. Grundsätzlich lassen sich die neuen Verfahren zur Feststoffvergärung nach ihrer Betriebsweise in kontinuierliche und diskontinuierliche Verfahren einteilen. Während diskontinuierliche Verfahren bereits seit einigen Jahren in der Praxis zum Einsatz kommen, befinden sich kontinuierlich arbeitende Systeme noch im Stadium der Forschung und Entwicklung. Hierzu gehört auch das am ATB entwickelte Aufstromverfahren. Vorteile dieser Verfahren sind die fehlende Durchmischung, das hohe Aufnahmevermögen für Feststoffe sowie eine weitgehend mechanisch ungestörte Behandlung der beteiligten Mikroorganismen.

2 Material und Methoden

Das Aufstromverfahren ist gekennzeichnet durch einen aufwärtsgerichteten Strom der zu vergärenden Feststoffe. Diese werden unten in den Aufstromreaktor zugegeben und

oben als Gärrest entnommen werden (Abb. 1). Das Verfahren nutzt dazu den natürlichen Auftrieb durch die Biogasbildung.

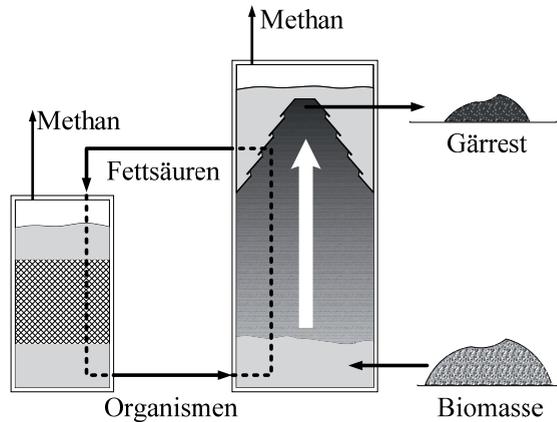


Abb. 1: Kleintechnischer Aufstromreaktor und Funktionsprinzip mit Prozessflüssigkeitszirkulation zwischen Aufstromreaktor (rechts) und Methanreaktor (links)

Durch eine Kreislaufführung der Prozessflüssigkeit kann zusätzlich eine zielgerichtete Verteilung der Mikroorganismen und deren Stoffwechselprodukte erfolgen. Für leicht abbaubare Stoffe wie Maissilage empfiehlt sich die Integration eines Hochleistungsmethanreaktors in die Zirkulation. Dieser kann überschüssig gebildete Fettsäuren sehr effektiv abbauen.

Zur Erprobung und Optimierung des Aufstromverfahrens wurden Versuche im Labor und kleintechnischen Maßstab durchgeführt. Dazu wurde ein Verbund aus Aufstromreaktor (AFR) und Methan produzierendem Festbettreaktor (FBR) eingerichtet. Neben der Reaktorgröße wurden das Eingangssubstrat, die Temperatur sowie die Raumbelastung variiert, wobei der experimentelle Schwerpunkt auf der thermophilen Vergärung von Maissilage lag. Direkt am Versuchsstand wurden die Gasbildungsrate, die Gaszusammensetzung, der pH-Wert sowie die Temperaturen erfasst. Darüber hinaus wurden der Gärrest und die Prozessflüssigkeit regelmäßig hinsichtlich ihrer chemischen Eigenschaften analysiert.

3 Ergebnisse und Diskussion

3.1 Versuche im Labormaßstab

Zur Erprobung des Aufstromverfahrens wurde ein 68-tägiger Fermentationsversuch mit Einsatz von Maissilage unter thermophilen Temperaturen (55 °C) durchgeführt. Der Versuchsstand bestand aus einem AFR (26,5 l) sowie einer Kaskade aus zwei FBR (insgesamt 79,2 l). Die Zudosierung von frischer Biomasse erfolgte manuell 2-mal täglich, wobei die organische Trockensubstanz (oTS)-Raumbelastung in zwei Stufen von 6,3 auf 16 g/(l • d) gesteigert wurde. Die Gärrestentnahme erfolgte ebenfalls manuell, in der Regel 1- bis 2-mal je Woche. Für den Austausch der Prozessflüssigkeit wurde eine Peristaltikpumpe verwendet. Die Erwärmung erfolgte über doppelwandige Reaktorgefäße.

Der Biogasbildungsstrom von AFR und FBR wurde über den 68-tägigen Versuchszeitraum durchgängig aufgezeichnet. Der aus den Reaktoren abfließende Strom flüchtiger Fettsäuren (FFS) wurde von Tag 3 bis 61 anhand der gemessenen FFS-Konzentrationen und der eingestellten Prozessflüssigkeitsströmung ermittelt. Der zeitliche Verlauf der beiden genannten Parameter sowie der Methankonzentration spiegelt die Wirkung der schrittweise erhöhten Raumbelastung auf den Gärprozess wider (Abb. 2).

Der Biogasbildungsstrom von AFR bewegte sich mit Ausnahme der etwa einwöchigen Startphase sowie der Abklingphase überwiegend zwischen 110 und 140 l/d. Eine nachhaltige Veränderung durch die Erhöhung der oTS-Raumbelastung war nicht zu erkennen. Nach Beendigung der Substratzuführung am Tag 60 ging die Gasbildung innerhalb von 8 Tagen auf 19 l/d zurück. Im Gegensatz zum Volumenstrom änderte sich die Zusammensetzung des im AFR gebildeten Biogases mit jeder Erhöhung der Belastung deutlich. In Bezug auf Methan lassen sich den drei oTS-Belastungsstufen $B_{R6,3}$, $B_{R11,3}$ und B_{R16} nach Erreichen des Gleichgewichtszustands Konzentrationen von 53, 40 bzw. 30 Vol.-% zuordnen.

Abweichend vom Verhalten des AFR zeigte der Biogasbildungsstrom der FBR-Stufe eine deutliche Abhängigkeit von der Belastung des AFR. Während bei $B_{R6,3}$ nur sehr geringe Werte von zumeist unter 20 l/d beobachtet wurden, erhöhte sich die Gasbildung während $B_{R11,3}$ und B_{R16} auf bis zu 80 bzw. 135 l/d. Der Methangehalt des in der FBR-Stufe gebildeten Biogases bewegte sich im Versuchszeitraum zumeist zwischen 70 und 80 Vol.-%. Eine Beeinflussung durch die Raumbelastung ist dabei nicht erkennbar.

Der FFS-Massestrom aus AFR zeigte aus nachvollziehbaren Gründen eine ähnliche Entwicklung wie die Gasbildung der FBR-Stufe. So stieg der FFS-Strom ausgehend von einem geringen Niveau von zumeist unter 5 g/d nach der Erhöhung der Belastung auf $B_{R11,3}$ und B_{R16} auf bis zu 270 bzw. 560 g/d. Nach der Erhöhung auf B_{R16} wurde eine zunehmende Rückverlagerung der FFS in den AFR beobachtet. Hieraus leiten sich Rückschlüsse auf die Leistungsfähigkeit der Festbettreaktoren ab.

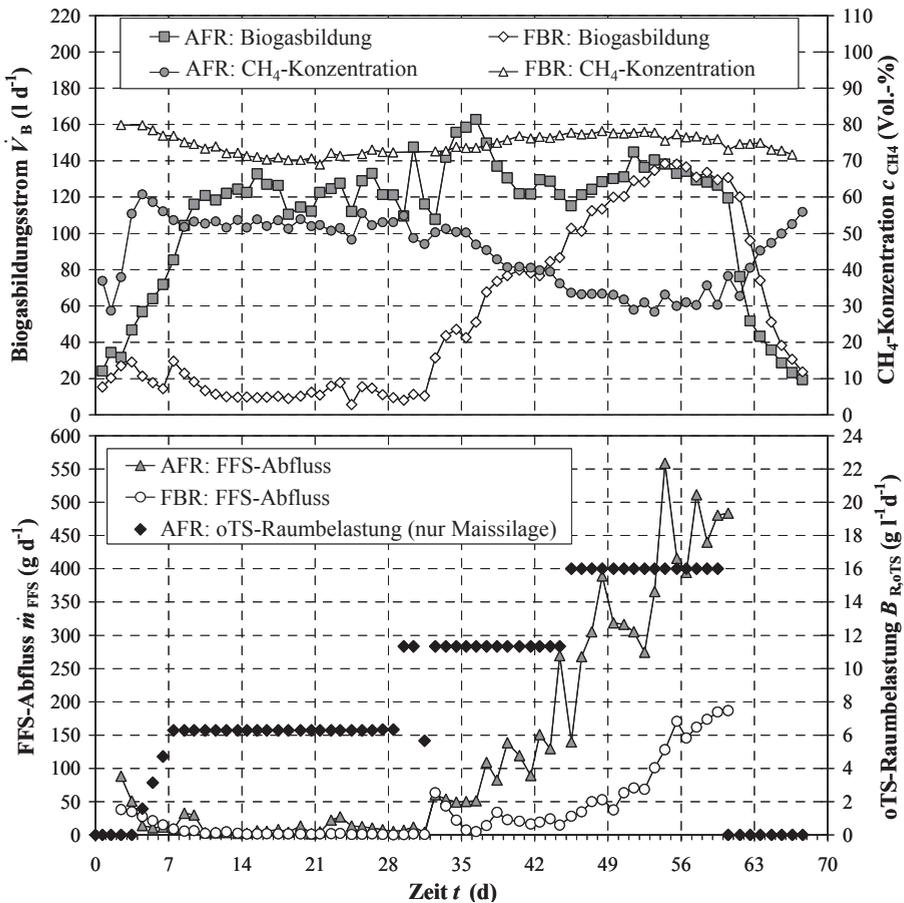


Abb. 2: Gasbildung und Verlagerung von FFS im Laborsystem

Die Ergebnisse zum Prozessverlauf bestätigen die prinzipielle Funktionsfähigkeit des Aufstromverfahrens. Bemerkenswert ist die hohe methanogene Aktivität des Aufstromreaktors, durch die sich der zweistufige Charakter des Verfahrens erst bei vergleichsweise hohen Raumbelastungen herausbildete. Ergänzende Informationen und Ergebnisse betreffend die Versuche im Labormaßstab können aus weiteren Publikationen entnommen werden (MUMME 2008; MUMME et al. 2010).

3.2 Versuche im kleintechnischen Maßstab

Basierend auf den erfolgreichen Arbeiten im Labormaßstab wurde die weitere Erprobung und Optimierung des Aufstromverfahrens im kleintechnischen Maßstab fortgesetzt. Hierzu wurde ein Aufstromreaktor mit einem hydraulischen Nutzvolumen von 400 l errich-

tet, ausgestattet mit einem teilautomatisierten Ein- und Austrag der Feststoffe. Die Zugabe erfolgte dabei durch ein vertikales Zugaberohr mit innenliegendem, automatisiert bewegtem Pressstempel (Abb. 1). Bedingt durch den hohen technischen Aufwand wurde das Eintragssystem für eine maximale σ_{TS} -Raumbelastung von $6 \text{ g}/(\text{l} \cdot \text{d})$ ausgelegt. Die Gärrestentnahme erfolgte am Reaktorkopf durch einen umlaufenden Räumerschild. Entsprechend des labortechnischen Versuchsstands wurden für den Flüssigkeitsaustausch eine Peristaltikpumpe und für die Beheizung auf $55 \text{ }^\circ\text{C}$ doppelwandige Reaktorgefäße verwendet. Einrichtungen für die Online-Analytik bezogen sich auf Gasvolumenstrom, Gasbestandteile, Reaktionstemperatur sowie pH-Wert, Redox-Potenzial und elektrische Leitfähigkeit. Im Labor wurde periodisch die chemische Zusammensetzung von Prozessflüssigkeit und Gärrest bestimmt.

Abweichend von den Versuchen im Labormaßstab wurden neben dem FBR zwei weitere Reaktortypen – jeweils Schlammbedtreaktoren – auf ihre Leistung und Passfähigkeit im Aufstromsystem getestet. Wie von MUMME et al. (2011 a) beschrieben, erbrachte der FBR das deutlich beste Gesamtergebnis. Die weitere kleintechnische Erprobung wurde daher mit dem FBR als alleinigen Methanreaktor fortgesetzt. Abbildung 3 zeigt die Entwicklung der Methanbildung in AFR und FBR im Rahmen eines 84-tägigen Versuchs, wiederum mit Maissilage als Substrat.

Die Raumbelastung des AFR mit Maissilage wurde in diesem Zeitraum von $2,5$ auf $6,2 \text{ g}/(\text{l} \cdot \text{d})$ gesteigert. Bedingt durch technische Störungen musste die Zudosierung an einigen Tagen ausgesetzt werden. Wie aus Abbildung 3 zu entnehmen ist, entspricht die Methanbildung von AFR und FBR im Grundsatz den Laborversuchen: Höhere Raumbel-

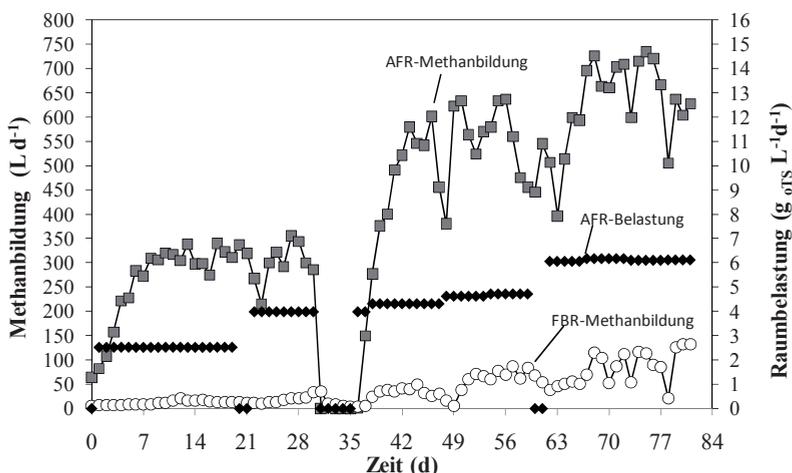


Abb. 3: Gasbildung und Verlagerung von FFS im kleintechnischen System

lastungen lassen die Methanbildung des FBR überproportional ansteigen. Dies zeigt, dass das Funktionsprinzip des Aufstromverfahrens unabhängig vom Maßstab gültig ist.

3.3 Prozessleistung

Die Fermentationsleistung des Aufstromsystems kann anhand von Raumbelastung, Methanrate und Methanausbeute beschrieben werden. Tabelle 1 zeigt die gemittelten Ergebnisse für beide Systeme.

Tab. 1: Leistungsparameter aus der Erprobung des Aufstromverfahrens

Parameter	Einheit	Laborsystem (AFR 26,5 l; FBR 79,2 l)			Kleintechnisches System (AFR 400 l; FBR 100 l)			
Belastung AFR	g oTS/(l • d)	6,3	11,3	16	2,5	4,6	6,2	5,0 ¹⁾
AFR-Methanrate	l/(l • d)	2,4	2,3	1,6	0,8	1,4	1,7	1,8
FBR-Methanrate	l/(l • d)	0,1	0,6	1,3	0,1	0,7	0,8	0,31)
Methanausbeute (davon aus AFR)	l/kg oTS	384 (88 %)	333 (55 %)	312 (30 %)	312 (96 %)	337 (89 %)	309 (88 %)	387 (93 %)

¹⁾ Separater Langzeitversuch bei Raumbelastung 5,0 g oTS/(l • d), neben dem FBR (100 l) wurde parallel ein Schlammbedreaktor (100 l) zur Aufbereitung der Flüssigphase verwendet.

Die gemessenen Methanraten beider AFR bewegten sich in gleicher Größenordnung, wobei unter Raumbelastung 6,3 bzw. 6,2 der großtechnische AFR etwa 30 % unter der Leistung des Labor-AFR lag. Dies begründet die ebenfalls geringere Methanausbeute. Als wahrscheinliche Ursache kann eine unterschiedliche Qualität der verwendeten Maissilagen vermutet werden. So ergab ein separater Langzeitversuch von über 100 Tagen bei konstanter Raumbelastung von 5 g oTS/(l • d) für den kleintechnischen Aufbau eine gemittelte Methanausbeute von 387 l/kg oTS. Dies entspricht dem Laborsystem.

Das Grundmuster, nachdem sich bei höheren Raumbelastungen die Methanbildung vom AFR in den FBR verlagert, ist in beiden Systemen im gleichen Maße gut zu erkennen. Der Anteil des AFR an der gesamten Methanausbeute bei Raumbelastung 6,3 bzw. 6,2 stimmt mit jeweils 88 % in beiden Systemen erstaunlich gut überein. Für die volumenspezifische Hydrolyserate im AFR wurde, basierend auf dem chemischen Sauerstoffbedarf (CSB), ein Maximalwert von 16,4 g/(l • d) bestimmt. Dies übersteigt den in der Praxis üblichen Bereich deutlich und zeigt die außerordentliche Leistungsfähigkeit des Aufstromverfahrens (MUMME et al. 2008).

4 Fazit

Wie mehrjährige Versuche im labor- und kleintechnischen Maßstab zeigen, erlaubt der Aufstromreaktor sehr hohe Raumbelastungen bei praxisüblichen Methanausbeuten. Bisher wurden neben Maissilage, auch die Substrate Weizenstroh und Reisstroh erfolgreich getestet. In Planung sind die Optimierung für den Einsatz fester Wirtschaftsdünger sowie die Errichtung einer großtechnischen Pilotanlage. Darüber hinaus wird an der Veredelung der festen Gärreste zu Biokohle als Bodenverbesserungsmittel gearbeitet. Die grundsätzliche Machbarkeit konnte bereits nachgewiesen werden (MUMME et al. 2011 b).

Literatur

- Mumme, J. (2008): Vergärung nachwachsender Rohstoffe im Aufstromverfahren. Dissertation an der Landwirtschaftlich-Gärtnerische Fakultät der Humboldt-Universität zu Berlin. Dissertation, dissertation.de
- Mumme, J.; Linke, B.; Tölle, R. (2010): Novel upflow anaerobic solid-state (UASS) reactor. *Bioresource Technology* 101, pp. 592–99
- Linke, B.; Mumme, J.; Ramm, P. (2011 a): Vergärung von nachwachsenden Rohstoffen im Aufstromverfahren. Schlussbericht zum Vorhaben im Auftrag der Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. www.fnr-server.de/ftp/pdf/berichte/22019507.pdf, Zugriff am 04.08.2011
- Mumme, J.; Eckervogt, L.; Pielert, J.; Diakité, M.; Rupp, F.; Kern, J. (2011b): Hydrothermal carbonization of anaerobically digested maize silage. *Bioresource Technology*, doi: 10.1016/j.biortech.2011.06.099 (im Druck)

Danksagung

Die Arbeiten wurden vom BMELV über die Projektförderung durch die Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. unterstützt. Für die technische Unterstützung danken die Autoren Frau Rehde und Frau Schelle.

Zweiphasige Druckfermentation – Neue Verfahren der Biogasproduktion zur Einspeisung in Erdgasnetze

ANDREAS LEMMER, SIMON ZIELONKA, YULING CHEN,
ANNA-MARIA WONNEBERGER, FRANK GRAF, HANS OECHSNER

Zusammenfassung

Von der DVGW-Forschungsstelle am Enlger-Bunter-Institut des KIT und der Landesanstalt für Agrartechnik und Bioenergie der Universität Hohenheim wird derzeit ein Verfahren zur zweiphasigen Druckfermentation entwickelt. Bei diesem neuartigen Verfahren zur Erzeugung von Biogas wird die Biomasse zunächst in ein CSB (chemischer Sauerstoffbedarf)-reiches Perkolat überführt, das anschließend in einem Festbettreaktor unter Druck zu Methan umgesetzt wird. Die zweiphasige Druckfermentation baut auf den Untersuchungen der zweiphasigen Vergärung mit Fest-Flüssigtrennung auf und stellt ein vielversprechendes Optimierungswerkzeug für die biologische Erzeugung eines einspeisefähigen Biogases dar.

Im Vergleich zu den konventionellen Verfahren der fermentativen Biogasgewinnung trägt die zweiphasige Prozessführung zu einer Reduktion der Verweilzeit und einer Steigerung der Raumbelastung bei. Durch niedrige pH-Werte und hohe Temperaturen in der ersten Phase können auch schwer abbaubare Substrate aufgeschlossen und somit das Substratspektrum erhöht werden. Gleichzeitig kann ein wasserstoffreiches Gas erzeugt werden, das in einem BHKW oder einer Brennstoffzelle genutzt werden kann.

Die zweiphasige Fermentation, bei der der Methanreaktor auf einem hohen Druckniveau (0,5–2 MPa) betrieben wird, führt zu einem Biogas mit einem stark erhöhten Methangehalt, der u. a. bedingt durch einen Wäscheffekt des Perkolatstroms über 90 Vol.-% betragen kann. Zusätzlich bewirkt der erhöhte Druck eine Einsparung beim Energieaufwand der Aufbereitung des Biogases, da eine Kompression auf den für viele Aufbereitungsverfahren notwendigen Prozessdruck bzw. auf Einspeisedruck entfällt. Dadurch und durch die in-situ Abtrennung von einem Großteil des CO₂ (bei 2 MPa 97 %) wird die Gasaufbereitung stark vereinfacht, was zu einer deutlichen Kostenreduktion führen könnte. Das Vorhaben wird vom BMBF im Rahmen der Forschungsinitiative „Bioenergie 2010“ gefördert.

1 Einleitung

Vor dem Hintergrund des globalen Klimawandels und endlicher fossiler Ressourcen ist die Entwicklung effizienter Verfahren zur Erzeugung regenerativer Energieträger eine der wichtigsten Herausforderungen unserer Zeit. Dazu zählt auch die Biogasproduktion. Von deutschlandweit über 6000 Anlagen (FNR 2010) speisten nur 57 Aufbereitungsanlagen in das Erdgasnetz ein. Nach dem derzeitigen Planungsstand werden Ende 2011 etwa 100 Anlagen mit einer stündlichen Einspeisung von ca. 64000 Kubikmetern Biomethan (NTP Normal Temperature and Pressure) am Netz sein (DNA, 2011). Die Aufbereitung und Einspeisung von Biogas in Erdgasnetze führt zu einer zeitlichen und räumlichen Entkopplung der Produktion des Gases von dessen Nutzung, so dass dieses an Orten mit entsprechenden Wärmesenken und zu den Bedarfszeiten erfolgen kann. Dies führt insgesamt zu einer Effizienzsteigerung des Biogasverfahrens.

Zur Erzeugung eines einspeisefähigen Biogases wird bisher i. d. R. eine Biogasanlage auf der Basis einer einphasigen Nassvergärung mit einer Anlage zu CO₂ Abscheidung kombiniert. Hierzu kommen häufig die Verfahren der Druckwasserwäsche (DWW), der Druckwechseladsorption (DWA) oder der Aminwäsche zum Einsatz. Vereinzelt werden auch Gastrennverfahren auf der Basis von Membranen getestet. Das dabei verwendete Verfahren der Biogasherstellung, die anaerobe Nassfermentation, ist bisher nicht für die Aufbereitung des Biogases und die Einspeisung in Gasnetze optimiert. Im Rahmen des vorgestellten Forschungsvorhabens wird ein innovatives Verfahren entwickelt, das die biologische Erzeugung und Einspeisung von aufbereitetem Biogas in Verteilnetze effizienter und kostengünstiger gestalten könnte.

2 Grundlagen der zweiphasigen Vergärung

2.1 Biologische Grundlagen

Aus mikrobiologischer Sicht handelt es sich bei der biologischen Biogasgewinnung um eine unvollständige Mineralisierung von Biomasse. Diese kann in die Prozesse der Gärung und die der Methanbildung unterteilt werden. Die Gärung untergliedert sich dabei wiederum in die primäre und sekundäre Gärung.

Neben der Abgrenzung der Vorgänge bei der Biogasbildung anhand der beteiligten Gruppen von Mikroorganismen wird der Gesamtprozess oftmals auf Basis der von den Mikroorganismen gebildeten Zwischen- und Endprodukte in vier wesentliche Einzelschritte unterteilt (FUCHS 2007). Diese vier Einzelschritte sind die Hydrolyse, Acidogenese, Acetogenese und Methanogenese.

Der Abbau von organischer Substanz unter Luftabschluss wird immer von den sog. primären Gärern eingeleitet. Diese sekretieren Exo-Enzyme, die die komplexen Makromoleküle der Ausgangsstoffe durch das Auftrennen der Wasserstoffbrückenbindungen bei gleichzeitiger Einbindung von Wasser auflösen. Dieser Schritt wird Hydrolyse genannt und ermöglicht es den Mikroorganismen, die gebildeten Monomere oder Dimere aufzunehmen und umzuwandeln. Die aufgenommenen Einzelbausteine werden von den Mikroorganismen zu organischen Säuren, Alkoholen und CO_2 umgewandelt (Acidogenese, 2. Schritt).

Im dritten Konversionsschritt, der Acetogenese werden die gebildeten Säuren und Alkohole zu Essigsäure, Wasserstoff und CO_2 durch die sekundären Gärer umgesetzt. Im vierten Konversionsschritt, der Methanogenese, bilden die Mikroorganismen aus Essigsäure bzw. aus Wasserstoff und CO_2 das im Biogas enthaltene CH_4 und CO_2 . Neue Forschungsergebnisse zeigen, dass CH_4 aus Acetat auf zwei verschiedenen Wegen gebildet werden kann: die beschriebene Disproportionierung (one step reaction) und die two-step reaction. Bei diesem zweiten Weg wird Acetat zunächst zu H_2 und CO_2 oxidiert. Anschließend werden diese Zwischenprodukte wieder über die anaerobe Atmung zu CH_4 , CO_2 und Wasser umgesetzt (KARAKASHEV et al. 2006, KLOCKE et al. 2009, SCHERER et al. 2009).

Während in einphasigen Biogasanlagen die vier Einzelschritte der Biogasbildung zeitgleich in einem Reaktor stattfinden, wird bei zweiphasigen Systemen versucht, eine räumliche Trennung der Säurebildung und der Methanbildung zu erreichen. Dadurch soll der Gesamtprozess biologisch stabiler und der Abbau der organischen Substanzen beschleunigt werden (GHOSH und POHLAND, 1974).

2.2 Verfahrenstechnik der Biogaserzeugung

Angepasst an die unterschiedlichen Eigenschaften der zur anaeroben Konversion geeigneten nachwachsenden Rohstoffe und biogenen Abfallstoffe findet heute eine Vielzahl verschiedener Fermentersysteme Anwendung in der Biogasverfahrenstechnik. Sollen neben pumpfähigen auch feste, stapelbare Substrate zur Biogaserzeugung eingesetzt werden, müssen Fermenter zur Nassvergärung von Biomasse mit geeigneten Feststoffdosierern und Rührwerken ausgerüstet werden. Biogene Abfallstoffe sind entsprechend der gesetzlichen Regelungen einer mechanischen und/oder thermischen Vorbehandlung zu unterziehen. Gemeinsam mit den baulichen Anlagen zur Annahme und Lagerung der Einsatz- und Reststoffe, den technischen Einrichtungen zur Rohbiogasbehandlung sowie der Verfahrenstechnik der Gasnutzung entstehen Verfahrenssysteme, die unter dem Begriff „Biogasanlage“ zusammengefasst werden.

Die gesamte Verfahrenstechnik einer Biogasanlage kann in die Funktionsbereiche „Biogaserzeugung“ und „Biogasnutzung“ unterteilt werden. An der überwiegenden Zahl der Biogasanlagen in Deutschland wird derzeit das Biogas in einem Block-Heiz-Kraft-

werk (BHKW) direkt an der Anlage oder in geringer Entfernung zu dieser genutzt. Bei einer Aufbereitung und Einspeisung des Biogases ins Erdgasnetz entfällt der gesamte Funktionsbereich „Biogasnutzung“, so dass die Biogasanlage auf den Bereich „Biogaserzeugung“ reduziert wird. Kernstück der Biogaserzeugungsanlage ist der Fermenter. Derzeit werden überwiegend einphasige Fermentersysteme eingesetzt, in denen die primäre und sekundäre Gärung sowie die Methanogenese gleichzeitig in einem Fermenter ablaufen. Echte zweiphasige Systeme, in denen die Gärung und die Methanogenese in getrennten Behältern ablaufen, werden derzeit bis auf wenige Ausnahmen lediglich als Laboranlagen zu Forschungszwecken betrieben.

Da es sich bei den methanogenen Archaea um siedelnde Organismen handelt, würden sich bei sehr geringen Trockensubstanzgehalten der Einsatzstoffe in einfachen Ausschwemmreaktoren nur geringe Populationsdichten mit einer geringen Leistungsfähigkeit etablieren. Einfache Ausschwemmreaktoren, die auch als CSTR (continuous stirred-tank reactor) bezeichnet werden, können für Substrate mit einem Trockensubstanzgehalt von mindestens 4 Mass.-% verwendet werden. Zum Erhalt einer stabilen Population an Mikroorganismen müssen CST-Reaktoren so ausgelegt werden, dass eine Mindestverweilzeit von 15–20 Tagen gewährleistet wird.

Für Substrate mit einem sehr hohen Wassergehalt haben sich Fermenter mit einer Biomasserückhaltung etabliert. Viele industrielle Abwässer weisen niedrige organische Belastungen und Trockensubstanzgehalte von unter 3 Mass.-% auf. Zur anaeroben Konversion der in den Abwässern enthaltenen organischen Stoffe müssen Fermentersysteme eingesetzt werden, die ein Ausschwemmen der methanogenen Mikroorganismen aus dem Fermenter verhindern. Ziel dieser Systeme ist es, trotz der sehr niedrigen TS-Gehalte der zugeführten Stoffe eine hohe Populationsdichte der Mikroorganismen im Reaktor zu erreichen. Gleichzeitig wird durch die niedrige Energiedichte TS-armer Abwässer eine sehr kurze Verweilzeit bedingt, um eine hohe reaktorspezifische Methanproduktion zu gewährleisten. Zur Anreicherung der Bakterienbiomasse wurden in den vergangenen Jahren verschiedene Reaktorsysteme entwickelt (BISCHOSBERGER 2005). UASB (Upflow Anaerobic Sludge Blanket) Reaktoren nutzen die Eigenschaft der methanogenen Mikroorganismen, sich bei bestimmten Bedingungen zu schweren Pellets mit guten Absetzeigenschaften zusammen zu ballen (LEMMER 2010). Fest- und Fließbettreaktoren immobilisieren die Bakterienbiomasse im Fermenter indem ein Großteil des Reaktorvolumens mit Trägermaterialien gefüllt ist.

2.3 Zweiphasige Systeme zur Erzeugung von Biogas aus Wirtschaftsdüngern, nachwachsenden Rohstoffen und Abfallstoffen

In konventionellen einphasigen Biogasanlagen herrschen für alle am anaeroben Abbau von Biomasse verantwortlichen Mikroorganismengruppen dieselben physikalischen und chemischen Bedingungen. Der Betrieb dieser Anlagen richtet sich deshalb nach den sensibleren und sich relativ langsam vermehrenden methanogenen Mikroorganismen. In der Praxis liegen die Verweilzeiten in der Regel über 40 Tage (FNR 2009). Die primären Gärer benötigen hingegen lediglich Generationszeiten von 34 min bis zu 5 h. In einphasigen Biogasanlagen kann es zudem schnell zu biologischen Prozessstörungen durch Disbalancen zwischen Umsatzraten der primären und sekundären Gärer und der methanogenen Mikroorganismen kommen (GHOSH und POHLAND 1974). Ist der Intermediatabbau der sekundären Gärer und methanogenen Mikroorganismen gehemmt, kommt es zu einer Anreicherung von organischen Säuren im Fermenter und damit zu einem pH Abfall, der so stark sein kann, dass die methanogenen Mikroorganismen ihre Stoffwechselaktivität völlig einstellen.

Finden die Versäuerung (Hydrolyse und Acidogenese) und Methanbildung (Acetogenese und Methanogenese) räumlich getrennt statt, spricht man von einer Phasentrennung oder einem zweiphasigen System zur Biogaserzeugung. In dem ersten Reaktor wird festes oder dickflüssiges Substrat versäuert (Hydrolyse und Acidogenese). Im zweiten Reaktor findet die Acetogenese und Methanogenese statt.

Für die zweiphasige Biogasproduktion ist theoretisch jede denkbare Kombination einphasiger Reaktoren möglich. Es wird jedoch zwischen zwei grundlegenden Systemen unterschieden:

- Verfahrensvarianten mit vollem Substratdurchgang (z.B. zwei hintereinander geschaltete CSTR)
- Verfahrensvarianten mit einer Fest-Flüssigtrennung zwischen Versäuerung und Methanbildung.

Diese Fest-Flüssigtrennung kann aktiv, durch eigens dafür eingesetzte Vorrichtungen wie z. B. Schneckenpressen (SCHÄFER, LEHTO und TEYE 2006), oder passiv, z. B. durch Membranen (DALHOFF et al. 2003, BORCHARDT, 1971), oder eine Siebbodenabtrennung im Fermenter (KUSCH 2007), wie bei Perkolationsfermentern, erfolgen. Die Feststoffabtrennung ermöglicht den Einsatz von leistungsfähigen Reaktoren zur Flüssigsubstratvergärung mit Biomasserückhalt, wie z. B. UASB- oder Festbettreaktoren. Dadurch ist es möglich, die, im Vergleich zu den acidogenen Mikroorganismen, längeren Generationszeiten der methanogenen Mikroorganismen auszugleichen und den Prozess zu beschleunigen oder den Methanreaktor kleiner zu dimensionieren.

3 Aktuelle Untersuchungen zur zweiphasigen Prozessführung

3.1 Diskontinuierliche zweiphasige Fermentation von Feststoffen

Im Rahmen des BCN Forschungs-Verbundprojektes (Biogas-Crops-Network) wurden an der Landesanstalt für Agrartechnik und Bioenergie Untersuchungen zur zweiphasigen Vergärung von Biomasse durchgeführt. Dabei wurde eine Anlage mit Fest-Flüssigtrennung eingesetzt, die aus einem diskontinuierlich betriebenen Perkolationsfermenter zur Säuregewinnung sowie einem Festbett-Methanreaktor bestand.

Die diskontinuierlich betriebenen Perkolationsfermenter wurden zu Versuchsbeginn jeweils mit Grassilage beschickt; je 50 l Fermenter wurde 1 kg organischer Trockensubstanz (oTS) zugeführt und über eine Dauer von 20 bis 28 Tagen vergoren. Das gewonnene CSB-reiche Perkolat wurde einmal täglich dem Festbett-Methanreaktor zugeführt. Im Rahmen verschiedener Versuche wurde der Einfluss unterschiedlicher Prozessparameter auf die Konversion der zugeführten Biomasse untersucht.

Aus der Literatur ist bekannt, dass generell die Temperatur einen entscheidenden Einfluss auf die am Biogasprozess beteiligten Mikroorganismen hat. Im Rahmen der Untersuchungen sollte geprüft werden, welchen Einfluss diese insbesondere auf die Abbaugeschwindigkeit und die gebildeten Produkte während der primären Gärung hat. Dazu wurden drei Temperaturen in den Perkolationsfermentern im mesophilen und thermophilen Bereich eingestellt. Die Temperaturen orientieren sich an den aus der Literatur bekannten Optima von 38 °C für den mesophilen Betrieb und 55 °C für den thermophilen Betrieb. Mit einer ergänzenden 25 °C Variante sollte überprüft werden, ob die Beheizung der Perkolationsreaktoren notwendig ist oder ob die Versäuerung auch bei Außentemperatur stattfinden kann. Die Temperatur der Festbettreaktoren wurde bei allen Versuchen und Varianten bei 38 °C belassen. Um die Ergebnisse zu bestätigen wurden insgesamt drei Versuchsläufe durchgeführt.

Die thermophile Variante zeigte in allen drei Durchläufen die schnellste und stärkste Gasbildung. Die Methanbildung der 38 °C Variante war etwa 40 % langsamer, die der 25 °C Variante sogar 60 %. Es wurde in der thermophilen Variante, sowohl in dem Perkolationsfermenter wie auch im gesamten System, die größte Menge an Methan gebildet und auch die höchsten Abbaugrade der organischen Substanz erreicht (Tabelle 1). Die Abbaugrade sanken mit der Temperatur und damit mit der Abbaugeschwindigkeit und lagen bei der 38 °C Variante bei etwa 68 % der oTS und bei der 25 °C Variante bei ca. 40 % der zugeführten oTS (ZIELONKA et al. 2010). Vergleichbare Ergebnisse wurden auch von SCHÖNBERGER (2010) für die Vergärung von Roggen-Ganzpflanzensilage erzielt.

Tab. 1: Erzielter spezifischer Methanertrag, CSB-Ausbeute und Abbaugrad der organischen Trockensubstanz bei der Untersuchung der Perkolationsfermentertemperatur (Substrat: G7, G11, G12) (Werte in Zeilen mit denselben Kleinbuchstaben sind nicht signifikant verschieden bei einem Signifikanzniveau von 0,05)

Hydrolysetemperatur	°C	55	38	25
Y_{CH_4} -Gesamtanlage	$\text{l}_\text{N}/\text{kg oTS}$	$399 \pm 11 \text{ a}$	$348 \pm 8 \text{ b}$	$275 \pm 8 \text{ c}$
CH_4 -Anteil Festbettreaktor	%	$59 \pm 4 \text{ a}$	$74 \pm 3 \text{ b}$	$96 \pm 3 \text{ c}$
CSB-Ausbeute ¹⁾	$\text{g}/\text{kg oTS}$	$651 \pm 33 \text{ a}$	$739 \pm 23 \text{ a}$	$737 \pm 23 \text{ a}$
oTS-Abbaugrad	MA.-%	$83 \pm 2 \text{ a}$	$72 \pm 2 \text{ b}$	$52 \pm 2 \text{ c}$

¹⁾ CSB-Ausbeuten sind aus interpolierten Daten ermittelt worden.

3.2 Verfahrenskonzept der zweiphasigen Druckmethanisierung

Aufbauend auf den Erkenntnissen des BCN-Verbundprojektes wurde ein neuer Typ von Biogasanlagen entworfen, dessen Entwicklung im Rahmen des vom BMBF-geförderten Forschungsprojektes B2G – Biomass to Gas gefördert wird. Dieses Verfahrenskonzept sieht ebenso wie die vorgestellte Anlage zur Feststofffermentation eine zweiphasige Verfahrensführung mit Fest-Flüssigtrennung vor. Die zweite Prozessphase, die wiederum die Acetogenese und Methanbildung umfasst, findet dabei jedoch unter einem gegenüber dem Umgebungsdruck erhöhten Druck statt.

Das Substrat (z.B. Energiepflanzen, Wirtschaftsdünger, Biomüll) wird im ersten Reaktor, der sog. Hydrolyse (Hydrolysereaktor HR), hydrolysiert und versäuert. Das im Bioleaching gewonnene Perkolat wird in den Druck-Methanreaktor überführt, der durch den Einsatz eines gesinterten Festbettmaterials sehr hohe Raumbelastungen erreichen kann.

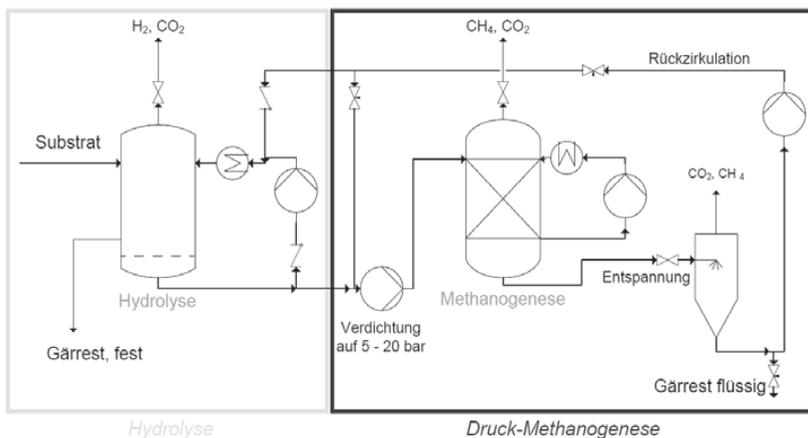


Abb. 1 Vereinfachtes Verfahrensfliessbild einer zweistufigen Druckfermentation

Diese zweite Prozessstufe ist die namensgebende Druck-Methanogenese und der grundlegend innovative Prozessschritt des Verfahrens. Hier wird durch die kontinuierliche Gasproduktion der Bakterien kontrolliert Überdruck aufgebaut und gehalten. Angestrebt wird zunächst ein Prozessdruck zwischen 0,5 und 2 MPa (absolut). Das austretende Biogas liegt somit bereits unter einem erhöhten Prozessdruck vor, wie er in einer anschließenden Gasaufbereitung oder zur Netzeinspeisung benötigt wird. Ein Teil der ausgegorenen Fermentationsflüssigkeit wird in die erste Stufe zurückgeführt, um diese zu perkolieren. Im ausgeführten Perkolat ist durch den Druck in der Methanogenese ein Teil des gebildeten Gases, insbesondere das CO_2 , gelöst. Damit wirkt die Fermentationsflüssigkeit bereits wie eine integrierte Druckwasserwäsche oder eine schwache chemische Wäsche. Das gelöste CO_2 entweicht in einer Entspannungsstufe und wird im Folgenden als Entspannungsgas bezeichnet. Das selektive Entfernen von CO_2 aus dem Biogas wird dabei durch dessen höhere Löslichkeit im Vergleich zu Methan in wässrigen Lösungen bedingt. So kann bereits im Fermentationsprozess eine Erhöhung des Methananteils im Biogas erreicht werden.

Um den Einfluss des Prozessdrucks auf die Gaszusammensetzung zu quantifizieren wurde an der DVGW-Forschungsstelle eine Modellbeschreibung in MATLAB® entwickelt. Dabei werden neben dem Methanogenesereaktor bis zu zwei Entspannungsstufen betrachtet. Im Rahmen der Modellkalkulationen wird vereinfachend davon ausgegangen, dass der Druckeinfluss auf die Methanogenese vernachlässigbar ist, was durch Literaturangaben belegt wird. Unter dieser Annahme kann aus den bekannten spezifischen Gasausbeuten und -zusammensetzungen das sich einstellende Lösungsgleichgewicht berechnet werden. Die Konzentrationen der im Perkolat gelösten Gase CH_4 und CO_2 wurden dabei nach dem Gesetz von Henry berechnet. Im Modell wurde ferner berücksichtigt, dass für CO_2 neben der physikalischen Löslichkeit noch die Kohlensäurereaktion stattfindet. Diese führt pH-Wert abhängig zu einer erhöhten scheinbaren Löslichkeit von CO_2 . Spurengase wie z. B. H_2S oder NH_3 werden in den dargestellten Abschätzungen nicht betrachtet.

Um die Gaszusammensetzung unter Druck zu berechnen, wurde unter Annahme einer unveränderten Gärbiologie der Gesamtdruck im Fermenter erhöht. Abbildung 2 zeigt die Gaszusammensetzung in Abhängigkeit vom Druck. Dafür wurde ein pH-Wert von 7,3 im Methanreaktor unterstellt. Für die Gasproduktion wird weiterhin angenommen, dass CO_2 und CH_4 in einem Verhältnis von 1:1 erzeugt werden. Die aus dem MR ausgeführte Flüssigkeit wird auf 0,1 MPa absolut entspannt. Das Verhältnis von produziertem Gasstrom zu Lösemittelstrom kann durch eine Kreislaufführung erhöht werden. In der Abbildung ist ein Verhältnis von zugeführtem Flüssigkeitsstrom zu zirkulierendem Strom von 5 gewählt.

In der folgenden Abbildung wird deutlich, dass durch eine Druckerhöhung bis auf 2 MPa die Erzeugung eines Gasstromes mit über 90 Vol.-% CH_4 (91,6 Mol.-%) möglich ist. Dieser Gasvolumenstrom enthält dann nur noch 8,3 Mol.-% CO_2 . Dies liegt an der viel niedrigeren Löslichkeit von CH_4 im Gegensatz zu CO_2 . Damit liegt in der Fermentationsflüssigkeit eine höhere Konzentration von CO_2 als von CH_4 vor. Wegen der geringen Löslichkeit entweicht aber der größte Teil des CH_4 in der Entspannung, während ein hoher Anteil des CO_2 gelöst verbleibt. Mit steigendem Betriebsdruck im Methanreaktor steigt auch der Methananteil im Entspannungs gas an. Der Entspannungs gasstrom enthält bei 2 MPa 14 Mol.-% CH_4 . Dies entspricht 10,0 % des erzeugten CH_4 . Dieser Anteil muss vor Ort energetisch genutzt werden.

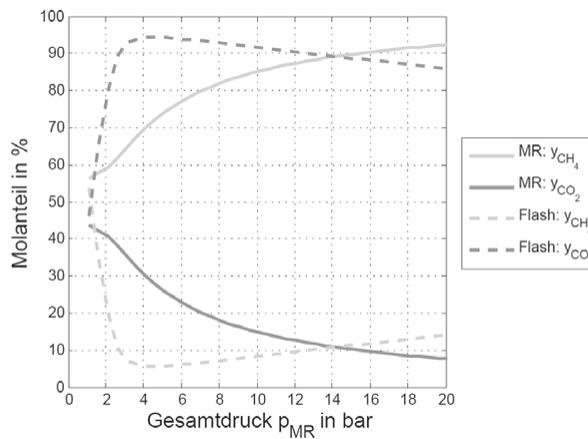


Abb. 2: Gaszusammensetzung in der Druckfermentation und in der Flashentspannung bei 1 bar

Der Methanverlust in der Entspannung kann noch optimiert werden, indem eine zweite Entspannungsstufe verwendet wird. Die erste wird auf einem höheren Druck (0,3–0,5 MPa abs.) betrieben, um ein methanreicheres Gas zu erzeugen als bei einer sofortigen Entspannung auf 1 bar. Dies ist möglich da in diesem Druckbereich noch ein Großteil des CO_2 gelöst vorliegt während CH_4 bereits vorrangig in die Gasphase entweicht. In der zweiten Entspannungsstufe ist nur noch ein geringer Methananteil vorhanden, so dass größtenteils CO_2 in die Gasphase übergeht.

4 Ausblick

Zur Aufbereitung von Biogas auf Erdgasqualität werden unterschiedliche Verfahren eingesetzt. Am weitesten verbreitet sind die Druckwechseladsorption (DWA) und chemische (MEA, DEA) oder physikalische Wäschen, wie die Druckwasserwäsche (DWW) oder die Genosorb-Wäsche. Sowohl bei DWA als auch bei DWW muss das Biogas auf einen erhöhten Druck (meist größer 5 bar) komprimiert werden. Für eine Einspeisung des aufbereiteten Biogases muss dieses zudem auf Netzdruck verdichtet werden. In der hier vorgestellten zweistufigen Fermentation wird der Druck hingegen bereits bei der Methanogenese durch die Gasproduktion der Mikroorganismen aufgebracht. Die energieintensive Komprimierung vor einer weiteren Gasaufbereitung kann eingespart werden, was direkt zu einer Kostenreduktion des Gesamtprozesses beiträgt.

Die notwendige Komprimierung der Fermentationsflüssigkeit (des Perkolates) nimmt weitaus weniger Energie in Anspruch als die des entstehenden Gases. Die Einsparung ist dabei umso höher, je höher der erforderliche Prozessdruck für das jeweilige Gasaufbereitungsverfahren oder für die Gaseinspeisung ist. Derzeit wird an der Landesanstalt für Agrartechnik und Bioenergie der Universität Hohenheim eine entsprechende zweiphasige Anlage zur Druckfermentation im Labormaßstab aufgebaut, getestet und verfahrenstechnisch optimiert.

Literatur

- Bischofsberger, W.; Dichtl, N.; Rosenwinkel, K.-H.; Seyfried, C.F.; Böhnke, B. (Hrsg.) (2005): Anaerobtechnik, Berlin Heidelberg: Springer Verlag, 2. Auflage
- Borchardt, J.A.; Pohland, F.G. (Hrsg.) (1971): Anaerobic phase separation by dialysis technique: Anaerobic Biological Treatment Processes, Gould, R.F. (Hrsg.). 105. Houston: American Chemical Society
- Dalhoff, R.; Rababah, A.; Sonakya, V.; Raizada, N.; Wilderer, P.A. (2003): Membrane separation to improve degradation of road side grass by rumen enhanced solid incubation. In: Water Science and Technology 48, Nr. 4, S. 163–168
- DENA (2011): Deutsche Energie-Agentur GmbH Berlin, Internetveröffentlichung unter: <http://www.biogaspartner.de/index.php?id=10072>, August 2011
- FNR (2010): Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR), Basisdaten Biogas
- FNR (2009): Biogas-Messprogramm II – 61 Biogasanlagen im Vergleich, 1. Auflage. Gülzow: FNR
- Fuchs, G. (Hrsg) (2007): Allgemeine Mikrobiologie, Stuttgart u. New-York: Thieme-Verlag, 8. Auflage

- Ghosh, S.; Pohland, F.G. (1974): Kinetics of Substrate Assimilation and Product Formation in Anaerobic Digestion. In: Journal (Water Pollution Control Federation) 46, Nr. 4, S. 748–759
- Karakashev, D.; Batstone, D.J.; Trably, E.; Angelidaki, I. (2006): Acetate oxidation is the dominant methanogenic pathway from acetate in the absence of Methanosaetaceae. Washington DC: American Society for Microbiology (Hrsg.), Applied and environmental Microbiology 72(7), , S. 5138–5141
- Klocke, M.; Mundt, K.; Sontag, M.; Schönberg, M.; Linke, B. (2009): Mikrobielle Lebensgemeinschaften in einem zweistufigen Biogasreaktor mit Bioleaching und Roggensilage. Wie viel Biogas steckt in Pflanzen? Abschluss-Symposium des Biogas Crops Network (BCN). Potsdam Bornim: Leibnitz-Institut für Agrartechnik Potsdam Bornim e.V., Bornimer Agrartechnische Berichte, Heft 68, S. 126
- Kusch, S. (2007): Methanisierung stapelbarer Biomassen in diskontinuierlich betriebenen Feststofffermentationsanlagen. München, Universität Hohenheim, Dissertation
- Lemmer, A. (2011): Biogaserzeugung. Biogas – Erzeugung, Aufbereitung, Einspeisung, Oldenbourg Industrieverlag GmbH, München, S. 75–118
- Oheimb, R. von (1993): Entwicklung, Stand und Perspektiven landwirtschaftlicher Biogaserzeugung in der Bundesrepublik Deutschland. Kosten landwirtschaftlicher Biogaserzeugung, Darmstadt: Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V. (KTBL) (Hrsg.), Arbeitspapier 185, , S. 7–10
- Pohland, F.G.; Ghosh, S. (1971): Development in anaerobic stabilization of organic wastes. The Two-Phase Concept. In: Environmental Letters 1, Nr. 4, S. 255–266
- Schäfer, W.; Lehto, M.; Teye, F. (2006): MTT Agrifood research Finland. Dry anaerobic digestion of organic residues on-farm - a feasibility study: Agrifood research reports. 77. MTT Agrifood research Finland, Vihti
- Scherer, P.; Krakat, N.; Satke, K.; Westphal, A.; Neumann, L.; Schmidt, O.; Demirel, B.; Scharfenberg, N.; Rösner, C.; Unbehauen, M. (2009): Wie viel Biogas steckt in Pflanzen? Abschluss-Symposium des Biogas Crops Network (BCN). Potsdam Bornim: Leibnitz-Institut für Agrartechnik Potsdam Bornim e.V., Bornimer Agrartechnische Berichte, Heft 68, S. 79–95
- Zielonka, S.; Lemmer, A.; Oechsner, H.; Jungbluth, T. (2010): Energy balance of a two-phase anaerobic digestion process for energy crops. In: Engineering in Life Sciences 10, Nr. 6, S. 515–519

Anforderungen und Potenzial von Zuckerrüben für die Vergärung

CHRISTA HOFFMANN, PHILIPP STARKE

1 Zuckerrüben als Substrat für die Vergärung

Zuckerrüben wurden bis zur Novellierung des EEG 2009 nur selten in Biogasanlagen eingesetzt. Wegen des mittlerweile hohen Maisanteils in einigen Regionen und der damit einhergehenden Akzeptanzprobleme in der Bevölkerung werden inzwischen immer mehr Zuckerrüben eingesetzt. Zugleich kann damit die Substratversorgung der Biogasanlagen auf eine breitere Basis gestellt werden.

Aufgrund des geringen Einsatzes von Zuckerrüben in der Vergangenheit liegen nur wenige Daten über die Vergärung von Rüben vor. Diese werden allerdings benötigt, um zum einen die Gasausbeute der Anlage abschätzen zu können, zum anderen aber auch, um die Substratversorgung auf Grundlage eines Biogasertrags je Flächeneinheit planen zu können. Informationen über die Vergärung von Zuckerrüben sind darüber hinaus erforderlich, um eine Sortenwahl treffen zu können und Anbaumaßnahmen wie die N-Düngung zu optimieren.

Wenn Zuckerrüben verstärkt auch für die Biogasgewinnung eingesetzt werden, ist es notwendig, ein Kriterium zu definieren, mit dem der Biogasertrag möglichst einfach und zuverlässig abgeschätzt werden kann, ohne dass langwierige Batchversuche durchgeführt werden müssen. Bisher wird für Zuckerrübensorten der (bereinigte) Zuckerertrag ermittelt. Für Biogasrüben ist zu prüfen, welcher Parameter eine enge Beziehung zum Biogasertrag aufweist und ob dieser Parameter u.U. mit einem schon jetzt in der Routine erhobenen Merkmal korreliert.

Ziel der Untersuchungen war es, anhand eines Sortenspektrums mit unterschiedlichen Ertrags- und Qualitätsmerkmalen zu klären, welche Eigenschaften eine Zuckerrübensorte aufweisen muss, um einen hohen Biogasertrag zu erzielen. Daraus sollte ein Kriterium entwickelt werden, mit dem der Biogasertrag einfach abgeschätzt werden kann.

2 Datenbasis

Grundlage der Untersuchungen bilden Feldversuche mit Zucker- und Futterrüben, die als vollrandomisierte Anlagen mit vier Wiederholungen 2009 und 2010 durchgeführt wurden. Die Parzellen waren 21,6 m² (6 Reihen) groß mit einer Bestandesdichte von 96000 Pflanzen je Hektar. Die mittleren 3 Reihen wurden manuell beerntet. Die Rüben

wurden unterhalb der grünen Blattansätze geköpft, sodass das Blatt neben dem Blattapparat auch den Rübenkopf umfasst. Anschließend wurden die Rüben gewaschen und zu einem homogenen Brei verarbeitet.

In diesem Brei wurde die Zusammensetzung der Rübe durch die Weender Futtermittelanalyse erfasst (NAUMANN und BASSLER 1976).

Das Gasbildungspotenzial von Rübe und Blatt wurde in Gärversuchen im Batchverfahren nach DIN-Norm 38414-8 in Anlehnung an die VDI-Richtlinie 4630 über eine Dauer von 21 Tagen bei 35 °C durchgeführt. Als Gärbehälter dienten 1000 ml große Glasbehälter, die mit 50 g des frischen Probematerials und Impfsupstrat aus Presswasser einer landwirtschaftlichen Kofermentationsanlage gefüllt wurden. Von jeder Probe wurden drei Analysen durchgeführt. Der Gasertrag wurde täglich erfasst.

3 Zusammensetzung der Zuckerrübe

Die Trockenmasse von Zuckerrüben setzt sich zu über 95 % aus leicht umsetzbarer organischer Substanz zusammen (Stickstofffreie Extrakte (NfE) = Zucker, Rohprotein, Teil der Rohfaser). Das ist der Grund für die extrem schnelle Vergärung von Zuckerrüben innerhalb von wenigen Tagen. So waren 90 % des Substrates nach vier Tagen umgesetzt (STARKE und HOFFMANN 2011). Dagegen waren beim Zuckerrübenblatt wegen des höheren Anteils an Rohfasern 90 % des Substrats erst nach zehn Tagen umgesetzt (STARKE und HOFFMANN 2011).

In der Zusammensetzung der Rübe ergaben sich keine Unterschiede zwischen verschiedenen Zuckerrübensorten. Zuckerrüben weisen somit eine recht konstante Zusammensetzung der Trockenmasse auf, die wenig von anderen Faktoren beeinflusst ist. Die Unterschiede zwischen Sorten im Zuckergehalt von 12 bis 19 %, die für die Zuckergewinnung eine wesentliche Rolle spielen, sind im Hinblick auf die Vergärung irrelevant, da sie sich nicht in der Zusammensetzung der Trockenmasse, sondern vielmehr in der Höhe des Trockenmassegehaltes der Rübe auswirken (Tab. 1). Bezogen auf organische Trockenmasse wiesen Futterrüben daher einen ähnlichen spezifischen Biogasertrag wie Zuckerrüben auf, bezogen auf Trockenmasse oder aber Frischmasse dagegen einen wesentlich geringeren.

Es kommt demnach darauf an, einen hohen Gehalt an organischer Trockenmasse zu realisieren. Nach Literaturangaben liegt der Gehalt an Rohasche, der von der Trockenmasse abgezogen wird, um die organischen Trockenmasse zu errechnen, für Zuckerrüben zwischen 5 % (LEWANDOWSKI und BÖHMEL 2009) und 10 % (KEYMER 2004, KTBL 2007). Bei diesen Tabellenwerken ist nicht ganz klar, welche Untersuchungen zugrunde liegen. Tatsächlich wurden in unseren Untersuchungen Werte um 2 % gefunden, sodass sich auch

ein wesentlich höherer organischer Anteil von 97,8 % der Trockenmasse für Zuckerrüben ergibt. Der Gehalt an Rohasche variierte nicht zwischen Sorten oder durch N-Düngung und kann somit pauschal mit 2 % angenommen werden.

Tab. 1: Trockenmassegehalt, spezifischer Biogasertrag und Methangehalt von Zuckerrüben, Futterrüben und Zuckerrübenblatt – Mittel von 6 Standorten (ZR) bzw. 2 Standorten (FR) 2009 und 2010

	Einheit	Zuckerrüben	Futterrüben	ZR-Blatt
Trockenmasse (TM)	% FM	22,5	15,2	14,6
Organische TM	% TM	97,8	95,0	79,2
Spez. Biogasertrag	IN/kg oTM	755	752	699
Spez. Biogasertrag	IN/kg TM	738	714	554
Spez. Biogasertrag	IN/kg FM	166	109	81
CH ₄ -Gehalt	%	53,4	46,7	55,9

IN = Liter Normgas, bei 1,01325 bar und 0 °C (nach DIN 1343); FM = Frischmasse

Wenn der Gehalt an Rohasche nicht variiert und somit auch nicht der Anteil an organischer Trockenmasse, ist folglich der Trockenmassegehalt der Rübe entscheidend für die spezifische Biogasausbeute und damit bezogen auf eine Flächeneinheit der Trockenmasseertrag für den Biogasertrag.

4 Einfluss der N-Düngung auf den Trockenmasseertrag von Zuckerrüben

Es wird diskutiert, dass die N-Düngung der Zuckerrüben erhöht werden kann bzw. muss, wenn das Ziel nicht mehr darin besteht, den höchsten bereinigten Zuckerertrag zu erzielen, sondern den höchsten Trockenmasseertrag.

Der Trockenmasseertrag von Zuckerrüben erreichte unabhängig von der N-Düngung 20 t/ha, der von Futterrüben lag signifikant niedriger (Abb. 1). Diese Unterschiede zwischen Zucker- und Futterrüben waren unabhängig von der N-Düngung. Auch der Blatt-ertrag war bei Futterrüben wesentlich geringer als bei den Zuckerrüben. Das ist nicht alleine auf den geringeren Frischmasseertrag des Blattes zurückzuführen. Bei Futterrüben ist der Trockenmassegehalt nicht nur in der Rübe, sondern auch im Blatt geringer als bei Zuckerrüben (HOFFMANN 2011).

Für die Zuckergewinnung wirkt es sich negativ aus, wenn der Zuckergehalt bei übermäßigen N-Gaben sinkt und gleichzeitig der Amino-N-Gehalt stark ansteigt (HOFFMANN 2005). Wenn die Verarbeitungsqualität nicht berücksichtigt werden muss, könnte sich das N-Optimum demnach zu einer höheren N-Düngung verschieben.

Allerdings haben die Versuche keine Änderung in der Reaktion auf N-Düngung gezeigt, wenn der Trockenmasseertrag betrachtet wird. Für den Trockenmasseertrag der Rübe ergibt sich somit ein sehr breites Optimum, ähnlich wie auch für den bereinigten Zuckerertrag. Nur der Blatttrockenmasseertrag reagiert eindeutig positiv auf ein gesteigertes N-Angebot, sodass auch der Gesamttrockenmasseertrag mit steigender N-Düngung bis zu einem Optimum leicht ansteigt. Jedoch ist das Rübenblatt aufgrund des geringen Trockenmassegehaltes nur bedingt transportwürdig, zudem spielt es wegen des hohen Nährstoffgehaltes eine wichtige Rolle für die Bodenfruchtbarkeit (BEISS 1986). Wenn alleine die Rüben betrachtet werden, ist daher die Höhe der N-Düngung nicht vom Verwendungszweck abhängig und sollte angemessen niedrig sein.

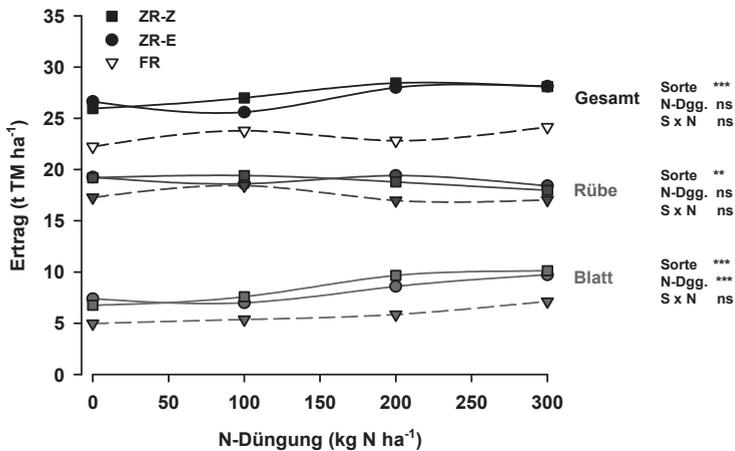


Abb. 1: Einfluss der N-Düngung auf den Trockenmasseertrag von Zuckerrüben (ZR-Z = zuckerbetont, ZR-E = ertragsbetont) und Futterrübe (FR) –Mittelwert von zwei Standorten 2009 und 2010

5 Biogasertrag von Zuckerrüben

Der Biogasertrag wurde anhand von sehr unterschiedlichem Rübenmaterial (Sorten, N-Düngung, Erntetermine, Standorte) ermittelt. Unabhängig davon, durch welchen Faktor der Trockenmasseertrag beeinflusst war, stieg der Biogasertrag linear mit steigendem Trockenmasseertrag der Rübe an (Abb. 2 links); ebenso der Zuckerertrag (Abb. 2 rechts). Mit Zuckerrüben wurde ein Biogasertrag von bis zu 22000 m³/ha bei einem Methan-gehalt von 53,4 % erzielt. Somit können Zuckerrüben das Ertragsniveau von Mais durch- aus erreichen. In Klimaregionen mit kürzerer Vegetationszeit und langsamer Erwärmung im Frühjahr dürfte die relative Vorzüglichkeit von Zuckerrüben aufgrund des geringeren Temperaturanspruchs sogar höher sein.

Da sich die Sorten nicht im spezifischen Biogasertrag unterscheiden, wird der höchste Flächenertrag mit Sorten erzielt, die den höchsten Trockenmasse- bzw. Zuckerertrag aufweisen. Für die Sortenwahl bedeutet das, dass die Rüben mit dem höchsten Zuckerertrag auch die besten Rüben für die Biogasgewinnung sind.

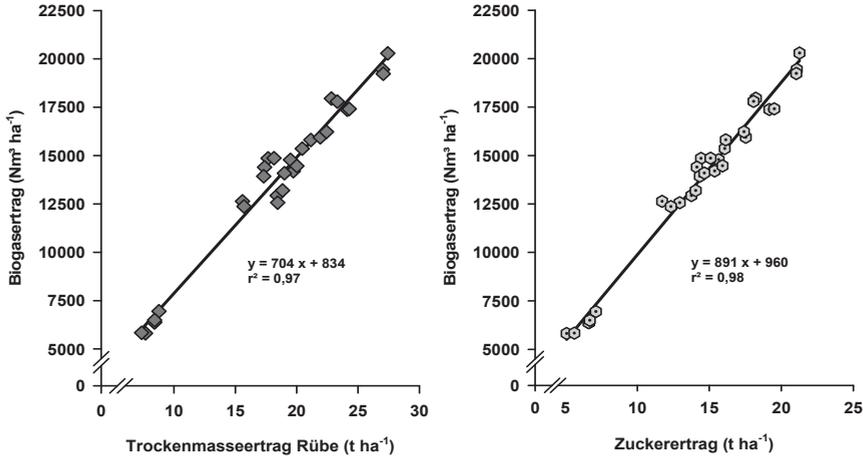


Abb. 2: Beziehung zwischen Biogasertrag und Trockenmasseertrag der Rübe (links) bzw. Zuckerertrag (rechts) von Zuckerrüben und Futterrübe; 6 Standorte, 5 Sorten, 3 N-Düngungsstufen, 2 Erntetermine, 2009 und 2010

6 Beziehung zwischen Trockenmasse- und Zuckerertrag

Für Zuckerrüben liegen keine Daten zum Trockenmasseertrag vor, da der Trockenmassegehalt wegen des hohen Aufwands in der Routine nicht erfasst wird. Das gilt sowohl für die Sortenzulassung als auch für Untersuchungen zum Einfluss von Umwelt, Anbaumaßnahmen, Erntezeitpunkt oder anderen Faktoren. Daher wäre es hilfreich, wenn der Trockenmasseertrag über einen anderen Parameter abgeschätzt werden könnte.

Die Ergebnisse aus Versuchsserien des Instituts für Zuckerrübenforschung von 2000 bis 2010 zeigen, dass ein sehr enger linearer Zusammenhang zwischen dem Trockenmasseertrag der Rübe und dem Zuckerertrag besteht (Abb. 3). Jede einzelne der einbezogenen Versuchsserien mit einer Vielzahl von Einflussfaktoren hat auch alleine eine enge Beziehung zwischen beiden Größen mit einem r^2 (Bestimmtheitsmaß) von mindestens 0,98 gezeigt (HOFFMANN et al. 2011). Die Beziehung gilt für einen Bereich von 1 bis 23 t/ha Zuckerertrag und ist auch unabhängig davon, ob die Rüben geköpft oder entblättert sind.

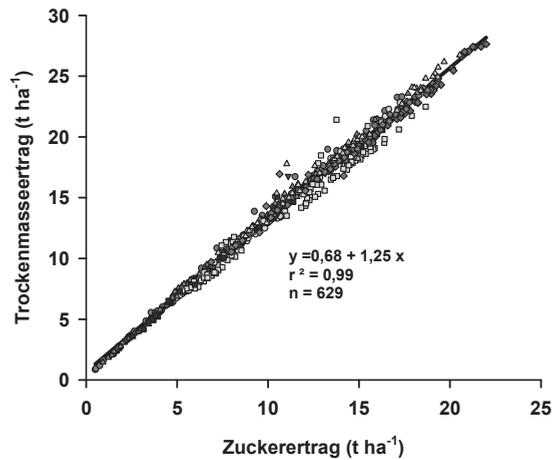


Abb. 3: Beziehung zwischen Trockenmasseertrag der Rübe und Zuckerertrag in 8 Versuchsserien mit unterschiedlichen Sorten, Standorten, Ernteterminen, N-Düngungsstufen, 2000–2010

Schon bei sehr jungen Rüben mit einem sehr niedrigen Zuckerertrag (Ernte Juli, August) ergibt sich dieselbe Beziehung zwischen Trockenmasse- und Zuckerertrag. Das ist darauf zurückzuführen, dass bei Zuckerrüben keine speziellen physiologischen Stadien der Reife existieren, sondern der Zuckergehalt ab Juli einen konstanten Anteil an der Trockenmasse ausmacht (MILFORD 1973, KENTER und HOFFMANN 2006). Daher ist die Regression über einen weiten Bereich linear und kann somit als allgemeingültig angesehen werden. Es ist demnach möglich, den Trockenmasseertrag von Zuckerrüben mit der gegebenen Gleichung aus ihrem Zuckerertrag zu berechnen.

Die Steigung der Regressionsgeraden ist größer als 1, da bei Zuckerrübensorten der Markgehalt mit steigendem Zuckergehalt zunimmt, d.h. zuckerreiche Sorten haben auch einen überproportional höheren Markgehalt (BEISS 1988, 1989, KENTER und HOFFMANN 2008, 2009). Das ist darauf zurückzuführen, dass Sorten mit einem hohen Zuckergehalt mehr Kambiumringe sowie kleinere oder auch mehr Parenchymzellen bilden als Sorten mit hohem Rübenenertrag (MILFORD 1976, HOFFMANN et al. 2005). Daher steigt der Trockenmassegehalt stärker als der Zuckergehalt, was sich für die Biogasgewinnung jedoch doppelt positiv auswirkt, da die beiden Hauptbestandteile der Trockenmasse, Zucker (NfE) und Mark (NfE, Rohfaser), sehr gut vergärbar sind.

Offensichtlich ist die Zusammensetzung der Trockenmasse der Rübe von Zuckerrüben (und Futterrüben) sehr wenig variabel. Unabhängig von den verschiedenen Einflussfaktoren variierte die Zusammensetzung der Rübe immer entlang der Regressionsgeraden. Es wird daher wahrscheinlich auch in Zukunft keine Sorten geben, die zwar einen hohen Trockenmasseertrag, aber einen geringen Zuckerertrag aufweisen, zumal sich die Tro-

ckenmasse von Zuckerrüben auch aus keinen anderen Stoffen zusammensetzen kann als aus Zucker oder Zellwandbestandteilen. Das hat für die Züchtung den Vorteil, dass weiterhin auf hohen Zuckerertrag gezüchtet werden kann, unabhängig von der Verwendung der Zuckerrüben.

7 Schlussfolgerungen

Da es keine Unterschiede im spezifischen Biogasertrag (l_N/kg oTM) gibt und sich Zuckerrüben auch nicht in ihrem Gehalt an Rohasche unterscheiden, ist alleine der Trockenmasseertrag bzw. der Zuckerertrag ausschlaggebend für den Biogasertrag von Zuckerrüben. Der Trockenmasseertrag lässt sich aus dem Zuckerertrag nach folgender Gleichung berechnen:

$$\text{Trockenmasseertrag R\u00fcbe} = 1,25 \times \text{Zuckerertrag} + 0,68$$

Diese Gleichung gilt \u00fcber einen sehr weiten Bereich und ist somit derzeit als allgemeing\u00fcltig anzusehen, da die Zusammensetzung der R\u00fcbentrockenmasse bei Zuckerr\u00fcben und Futterr\u00fcben kaum variiert. Sie kann daher auch verwendet werden, um den Trockenmasseertrag bei Kreuzungen von Zuckerr\u00fcben mit anderen R\u00fcbentypen abzusch\u00e4tzen. Ob diese Allgemeing\u00fcltigkeit auch zuk\u00fcnftig bestehen bleibt, wenn in der Z\u00fcchtung die genetische Variabilit\u00e4t erweitert wird, ist Gegenstand weiterer Untersuchungen.

Literatur

- KTBL (2007): Faustzahlen Biogas. Darmstadt
- Beiß, U. (1986): Futterwert und D\u00fcngewert des R\u00fcbenblattes. Zuckerr\u00fcbe 35, S. 254–256
- Beiß, U. (1988): Einfluss verschiedener Faktoren auf den Markgehalt der Zuckerr\u00fcbe. Zuckerindustrie 113, S. 1041–1048
- Beiß, U. (1989): Sorten- und standortbedingte Unterschiede im Markgehalt von Zuckerr\u00fcben. Zuckerindustrie 114, S. 806–811
- Hoffmann, C. (2005): Changes in N composition of sugar beet varieties in response to Increasing N supply. Journal of Agronomy and Crop Science 191, pp. 138–145
- Hoffmann, C. (2011): Ertrag und Qualit\u00e4t des R\u00fcbenkopfes sowie Blattertrag bei verschiedenen Zuckerr\u00fcbensorten und einer Futterr\u00fcbe. Zuckerindustrie (im Druck)
- Hoffmann, C.; Kenter, C.; Bloch, D. (2005): Marc concentration of sugar beet (*Beta vulgaris L*) in relation to sucrose storage. Journal of the Science of Food and Agriculture 85, pp. 459–465

- Hoffmann, C.; Starke, P.; Märländer, B. (2011): Trockenmasse- und damit Zuckerertrag als Kriterium für den Biogasertrag von Zuckerrüben. Zuckerindustrie (im Druck)
- Kenter, C.; Hoffmann, C. (2006): Seasonal patterns of sucrose concentration in relation to other quality parameters of sugar beet (*Beta vulgaris L.*). Journal of the Science of Food and Agriculture 86, pp. 62–70
- Kenter, C.; Hoffmann, C. (2008): Änderungen im Markgehalt von Zuckerrüben - Bedeutung für die Schnitzmenge und -qualität. Zuckerrübe 57, S. 214–216
- Kenter, C.; Hoffmann, C. (2009): Ursachen der Verringerung des Markgehaltes von Zuckerrüben und Auswirkungen auf Menge und Qualität der Schnitzelerzeugung. Zuckerindustrie 133, S. 61–69
- Keymer, U. (2004): Biogasausbeuten verschiedener Substrate. <http://www.lfl.bayern.de/ilb/technik/10225/>, Zugriff am 19.05.2011
- Lewandowski, I.; Böhmel, C. (2009): Zucker- und Stärkepflanzen. In: Energie aus Biomasse. Kaltschmitt, M.; Hartmann, H.; Hofbauer, H. (Hrsg.), Springer Verlag, Heidelberg Milford, G.F.J. (1973): The growth and development of the storage root of sugar beet. Annals of Applied Biology 75, pp. 427–438
- Milford, G.F.J. (1976): Sugar concentration in sugar beet: varietal differences and the effects of soil type and planting density on the size of the root cells. Annals of Applied Biology 83, pp. 251–257
- Naumann, C.; Bassler, R. (1976): Methodenhandbuch Band III. Die chemische Untersuchung von Futtermitteln. VDLUFA-Verlag, Darmstadt
- Starke, P.; Hoffmann, C. (2011): Zuckerrüben als Substrat für die Biogaserzeugung. Zuckerindustrie 136, S. 242–250

Danksagung

Das Projekt von P. Starke wurde von der Firma Syngenta Seeds unterstützt.

Innovation im Bereich der Energierüben

ANDREAS VON FELDE, SEBASTIAN SCHAFFNER, ULRIKE JECHE

1 Einleitung

Die Rübe ist längst kein „Newcomer“ mehr unter den Biogassubstraten, sondern gilt in vielen Biogashochburgen Deutschlands neben Kulturen wie Mais oder Roggen als gesetztes Substrat. Zuerst fand die Rübe den Weg in den Fermenter in den traditionellen Rübenanbaugebieten. Mittlerweile dehnt sich der „Energierüben“-Anbau auch in Gebieten aus, in denen die ertragsstarke Kultur bislang nicht zu finden war oder nach der Reform der Zuckermarktordnung fast gänzlich verschwunden ist.

Viele Biogasanlagenbetreiber haben die Vorteile der Rübe erkannt und nutzen die positiven Eigenschaften der süßen Trockenmasse für die Fermentation und die Gestaltung des Rohstoffkonzeptes. Mittlerweile lassen sich auch die Verarbeitungs- und Lagerungsverfahren immer mehr standardisieren.

2 Die Eignung der Rübe als Biogasrohstoff

Die Rübe überzeugt im Fermenter durch ihre vorzüglichen Substrateigenschaften. Rüben bestehen zu über 90 % aus leicht fermentierbaren Kohlenhydraten, benötigen daher nur kurze Verweilzeiten und können somit den Durchsatz des Fermenters erhöhen (Abb. 1).

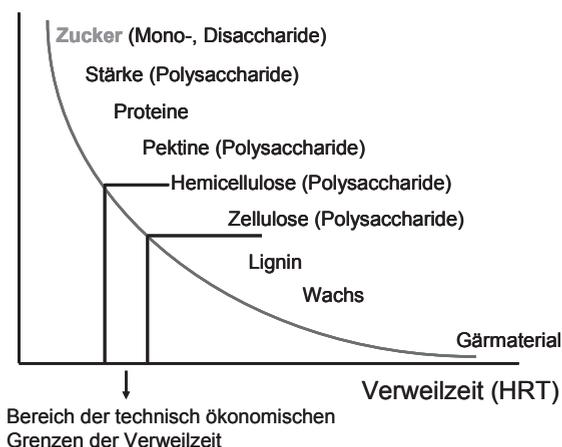


Abb. 1: Abbaugeschwindigkeit von Stoffgruppen (EDER und SCHULZ 2006)

Auch die nicht lösliche pflanzliche Substanz, das sogenannte Mark, ist hervorragend fermentierbar, da es im Gegensatz zu anderen Kulturen keine Lignozellulose (verholzte Gerüstsubstanzen) enthält. Somit liefert die Rübe die Energie sozusagen auf dem Silbertablett.

Da der größte Teil der silierten Rübe in weniger als 15 Tagen umgesetzt ist, eignet sie sich auch hervorragend zur Feinregulation bei Gasschwankungen oder Wartungsarbeiten. Der hohe Wassergehalt der Rübe wirkt sich zudem positiv auf die Rühr- und Pumpeigenschaften in der Biogasanlage aus, was sich vor allem in Anlagen ohne Gülle deutlich auswirkt.

Praktiker berichten ebenfalls, dass der Methangehalt im Biogas bei 20–30 % Rübenanteil in der Ration um bis zu zwei Prozentpunkte ansteigen kann. Zudem haben Beobachtungen ergeben, dass Substratmischungen mit Rüben die Gasausbeuten von anderen Substraten, beispielsweise Mais, ebenfalls steigern lassen.

Neben den bereits erwähnten Vorteilen kann die Rübe dazu beitragen Arbeitsspitzen zu entzerren. Die Rüben werden spät im Herbst gerodet, somit zu einer Jahreszeit in der andere Substrate bereits geerntet und einsiliert worden sind.

Im Feld überzeugt die Rübe mit sehr hohen Trockenmasseerträgen und den bereits erprobten Anbauverfahren. Ergebnisse aus Wissenschaft und Praxis belegen Methanerträge von ca. 400 m³ CH₄/t TM der Rübe.

3 Züchtung – Was zeichnet Sorten für Biogas aus?

Hohe Trockenmasseerträge (TME) pro Hektar sind die Voraussetzung für eine wirtschaftliche Substratproduktion. Neben einer effektiven Substratversorgung wird mit einem hohen TME eine effiziente Flächennutzung gewährleistet. Die Rübe bietet hierfür die besten Voraussetzungen. Intensive züchterische Arbeiten sorgen dafür, dass auch in Zukunft Leistungspotenzial und Anbaueigenschaften der Rübe optimiert werden. Als Rüben für Biogas stehen sowohl Zuckerrübensorten als auch neu entwickelte Energierüben zur Verfügung.

Zuckerrüben mit hohen Zuckererträgen eignen sich hervorragend zur Biogasproduktion. Zuckerertrag und Trockenmasseertrag korrelieren bei Zuckerrüben besonders gut. Höchste Trockenmasseerträge weisen die Zuckerrübensorten mit den höchsten Zuckererträgen auf. Die sehr schnelle Fermentation als Substrat und positive Effekte auf den Methangehalt des Biogases bringen sie von Hause aus mit. Rüben sind somit bestens als Substrat für Biogasanlagen geeignet. Zusätzlich stehen viele leistungsstarke Sortentypen für besondere Anbaubedingungen zur Verfügung. Resistente oder mehrfachtolerante

Sorten helfen hohe Ertragspotenziale auch unter Befallsbedingungen mit Nematoden, Rizomania oder Cercospora, zu erreichen.

Leistungsfähige Energierüben werden derzeit in einem neuen Züchtungsprogramm entwickelt. Mit hohen Trockenmasseerträgen sind sie für hohe Biogaserträge je Hektar optimiert. Gleichzeitig haben sie eine hochverdauliche organische Substanz für ein schnelles Gasbildungsvermögen; Inhaltsstoffe wie Kalium, Natrium und Amino-N-Verbindungen, die speziell für die Zuckererzeugung möglichst niedrig sein sollen, haben bei der Biogasproduktion keinen negativen Einfluss. Entsprechend sind Energierüben nicht für die Anlieferung in Zuckerfabriken zugelassen. Energierüben können sich ebenfalls durch gute Abreinigungseigenschaften auszeichnen.

4 Vom Feld auf die Biogasanlage

Ernteverfahren und Verladung

Die Ernte der Rüben erfolgt meist überbetrieblich durch private Lohnunternehmer oder Maschinenringe. Die Rodung von Rüben als Biogassubstrat hat andere Ansprüche als die Ernte von Rüben für die Zuckererzeugung. Hier werden die Rüben „geköpft“ geerntet, da es bei den „Fabrikrüben“ darauf ankommt einen möglichst geringen Blatt- und Kopfannteil im Erntegut zu erreichen, um den Anteil von Melassebildnern bei der Zuckererzeugung zu reduzieren. Für die Ernte der Rüben als Biogassubstrat ist der Kopf allerdings als zusätzliche Trockenmasse genauso wertvoll wie der eigentliche Rübenkörper und bildet zusätzliches Ertragspotenzial.

Verschiedene Quellen sprechen von Mehrerträgen von 3–5 % im Vergleich zum praxisüblichen Köpfschnitt (Abb. 2). Bei einem Rübenfrischmasseertrag von ca. 75 t/ha können so über 3 t Frischmasse/ha mehr geerntet werden! Die etablierten Hersteller der Rodetechnik verfolgen unterschiedliche Systeme zur Entblattung (Abb. 3).

Auch durch Einstellung der bisher bewährten Schlegel- und Nachköpftechnik lässt sich ein Verlust des Kopfes vermeiden. Bei der Einstellung muss allerdings beachtet werden, dass an den Rüben verbliebene Blattstrünke gegebenenfalls bei der Weiterverarbeitung stören können. Nach einigen Tagen trocknen diese Blattreste aus und werden zäh wie Leder. Müssen nun die Rüben beispielsweise gewaschen bzw. entsteint werden, können in der Maschine abgerissene Blattreste zu Störungen führen. Ähnliches gilt für viele Häcksler. Damit wäre der gewonnene Ertragsvorteil durch Mehrarbeit verloren.

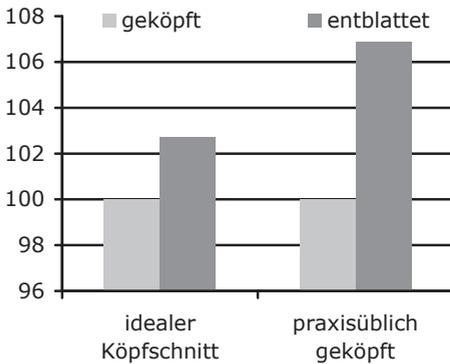


Abb. 2: Mehrerträge entblätterter Rüben
(TOP AGRAR 2010)



Abb. 3: Gut entblattete Biogas-Rübe (Foto: KWS)

Verladung am Feldrand und Transport zur Biogasanlage

Nach der Rodung ist es von großem Vorteil die Rüben zunächst am Feldrand auf Mieten zwischenzulagern. Dies entzerrt die Logistik und bietet zudem den großen Vorteil, dass anhaftende Erde an den Rüben antrocknet und bei der folgenden Verladung mit überbetrieblich organisierten Reinigungsladern, oft „Maus“ genannt, zum großen Teil bereits abgereinigt wird und auf dem Feld verbleibt (Abb. 4 und 5). Je nach Bodenart und Erdanteil können die Rüben mit einer Stundenleistung von 100–200 t/h verladen werden. Bei der Transportplanung ist zu berücksichtigen, dass eine Tonne Rüben ein Schüttgewicht von ca. 700 kg/m³ erreicht. Sind Temperaturen unter dem Gefrierpunkt angekündigt, hat sich eine Abdeckung der Rübenmieten mit schwerem Vlies bewährt.



Abb. 4: Verladung mit der „Maus“ (Foto: ROPA)



Abb. 5: Reinigungslander (Foto: Holmer)

5 Auf der Anlage

Lagerungskonzept – Silierung von Rüben (Abb. 6)

Bevor die Rüben auf der Biogasanlage weiter verarbeitet oder gar zerkleinert werden muss das Konzept zur Lagerung stehen! Frische Rüben sind abhängig von der Witterung bis Mitte März oder gar April lagerfähig.

Sollen Rüben ganzjährig zur Verfügung stehen, müssen sie einsiliert werden. Werden die Rüben einsiliert ist ein konsequenter Ansatz das Substrat solo, ohne weitere Mischungspartner, einzusilieren. Zum einen kann die Rübe entweder komplett zerkleinert als Brei in Edelstahlsilos, Lagunen oder flexiblen Tanks (letzteres wird gerade von KWS in der Praxis getestet) eingelagert werden. Zum anderen kann die Rübe unzerkleinert im Fahrsilo einsiliert werden. Versucht man gebröckelte Rüben zu silieren treten ca. 300 l aggressiver Sickersaft/t Frischmasse auf, der in der Siloanlage kaum zu bewältigen ist. Für gebröckelte Rüben empfehlen sich Mischungen mit Silomais, CCM oder LKS, um den Saft aufzunehmen.

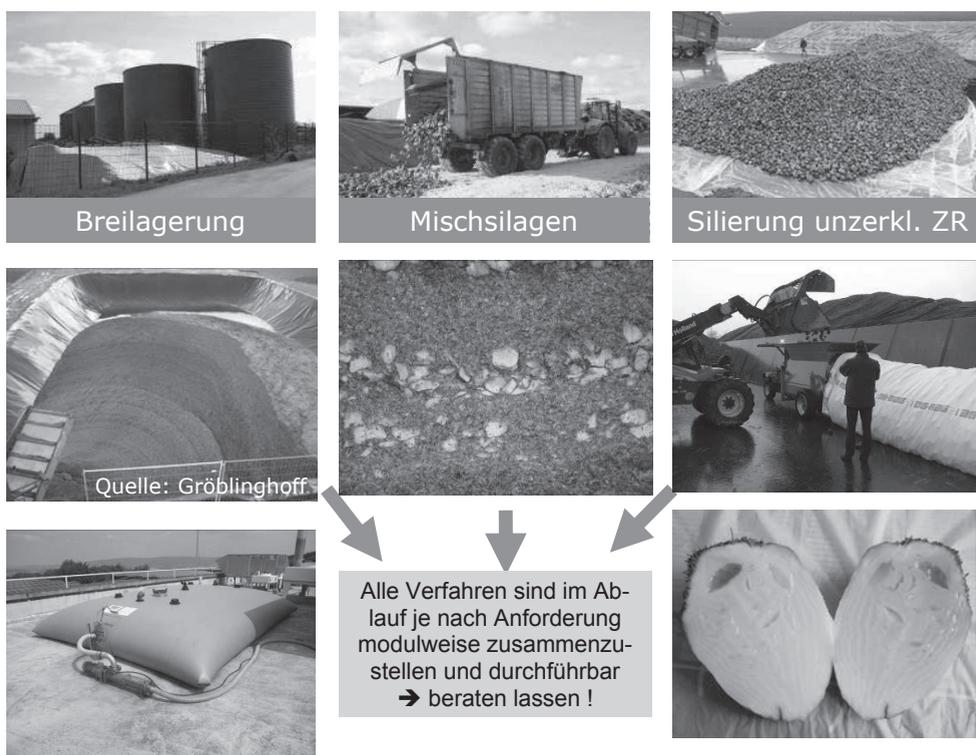


Abb. 6: Bildbeispiele verschiedener Rübensilage-Lagerungsformen in der Praxis (Quelle: KWS 2010 eigene Bilder sowie Gröblinghoff)

Die Silierung unzerkleinerter Rüben im Fahrsilo muss so erfolgen, dass bei der Silierung entstehendes CO₂ nicht nach unten „abfließen“ kann, da es schwerer ist als Luft und die Rübenmiete nicht rückverdichtet werden kann. Daher ist eine Unterziehfolie einzusetzen, um den Erfolg der Silage zu ermöglichen.

Die silierte Rübe bietet auch deutliche Vorteile in der Fermentation gegenüber den frischen Rüben. Durch die Silierung wird ein Großteil des Zuckers in Essigsäure und Ethanol umgesetzt. Diese Verbindungen bewirken die Konservierung der Rübe. Gleichzeitig sind sie für die Bakterien ein hervorragendes Substrat, was sich direkt am Methangehalt des Biogases feststellen lässt.

Erde und Steine im Substrat (Abb. 7 und 8)

Die größte Herausforderung beim Einsatz von Rüben als Biogassubstrat ist der mögliche Eintrag von Steinen und Sand mit dem Erntegut. Während Ton, Lehm und Schluffanteile in den meisten Biogasanlagen durch Rühren und Pumpen in der Schwebe bleiben, sich an die Organik im Fermenter anheften und mit dem Gärrest größtenteils wieder ausgebracht werden, neigt der Sand zur Sedimentation. Andererseits hängt an Rüben, die auf sandigen Böden angebaut werden, absolut gesehen, aber weniger Erde an. Und wenn sandiger Boden anhängt, lässt sie sich mit den vorhandenen Geräten zur Nass- und Trockenreinigung gut säubern.

Wichtig ist, dass keine der bewährten Nass- oder Trockenabreinigungstechniken eine vollkommene Erdfreiheit sicherstellen kann! Hier müssen sich die Betreiber der Biogasanlagen allerdings bewusst sein, dass es generell keine erdfreien NawaRo-Substrate gibt. Grassilagen, GPS oder auch Mais und Gülle oder gar Hühnertrockenkot (HTK) weisen immer gewisse Ascheanteile und Verunreinigungen auf, man sieht sie nur nicht.

Zur Trennung der Steine aus dem Erntegut ist derzeit die Dichtentrennung im Wasser das einzig sichere System. Technisch findet die Dichtentrennung im Wasser verschiede-



Abb. 7: KWS Rübenwäsche (Foto: KWS)



Abb. 8: Rübenwasch- und -schneidschaufel von Holaras (ohne Steintrennung) (Foto: KWS)

ne Umsetzungen. Die Dichte der Rüben liegt bei $\sim 1,1 \text{ kg/m}^3$. KWS hat gemeinsam mit dem Technikhersteller Putsch die erste funktionierende mobile Rübenwäsche und -entsteinung vorgestellt. Betrieben wird die Anlage über das Lohnunternehmen Blunk aus Schleswig-Holstein. Die Anlage hat bereits mehrere zehntausend Tonnen Rüben verarbeitet. Die KWS Rübenwäsche erzeugt einen Wasserauftrieb, der die Rüben in einem Trommelsteinabscheider aufschwimmen lässt und so die Steine aus dem Erntegut trennt. Grundsätzlich gilt aber: Hat man nur wenige Steine im Erntegut und die Möglichkeit diese mechanisch mit einer Häckselschaufel ohne großen Schaden zu finden, sollte man sich den hohen Waschaufwand sparen! Muss gewaschen werden, sollte dieser Arbeitsgang vor der Silierung eingeplant werden.

Zerkleinerung (Abb. 9–11)

Eine Zerkleinerung der Rüben vor dem Eintrag in den Fermenter ist in jedem Fall empfehlenswert. Unzerkleinerte Rüben würden schnell auf den Fermenterboden absinken, sind nur langsam umsetzbar und bringen die Gefahr einer Verstopfung von Pumpen und Leitungen mit sich.

Zur Erzeugung von Rübenbrei stehen verschiedene technische Lösungen zur Verfügung. Wichtig sind dabei der Durchsatz und die Homogenität des erzeugten Breis, um Sedimentationsschichten im Lager zu vermeiden. Die Schichtenbildung ist zwar für die Silierung kein Nachteil, erschwert aber die gleichmäßige Zuführung zur Fermentation.

Neben einzelnen Pumpen mit kombinierten Häckseleinrichtungen, die allerdings nur geringe Durchsätze erreichen, ist der Einsatz von Kompost- oder Holzschreddern weit verbreitet. Vorteil dieser Technik ist zum einen der hohe Durchsatz (je nach Gerät



Abb. 9: Willibald-Schredder mit hoher Durchsatzleistung und „Steintoleranz“ (Foto: KWS)



Abb. 10: Zerreißer von Putsch mit hohem Durchsatz und direkt angeschlossener Pumpe, allerdings steineempfindlich (Foto: KWS)



Abb. 11: Technikette mit Rübenwäsche, Willibald-Schredder und Betonpumpe im Einsatz zur Füllung eines Edelstahlsilos (Foto: KWS)

> 100 t/h) und die Möglichkeit gegebenenfalls auch Steine direkt mit zu zerkleinern und sie nicht abtrennen zu müssen.

Auch andere Mühlen mit schnell laufenden Werkzeugen sind verfügbar, jedoch ist hier meist eine vorherige Steintrennung die Bedingung. Zudem finden sich noch verschiedene Hersteller aus dem Recyclingbereich, die sogenannte Querstromzersetzer oder Prallreaktoren anbieten. Diese Geräte sind ebenfalls steintolerant, aber meist nicht mobil und überbetriebllich verfügbar, was hohe Invest- und Stückkosten zur Folge hätte.

Erzeugung von groben Schnitzeln (Abb. 12 und 13)

Weit verbreitet und zuverlässig einsetzbar sind mit Ölmotoren angetriebene Häcksel-schaufeln für den Anbau am Teleskoplader oder im Dreipunkt.



Abb. 12: Holaras Häcksel-schaufel (Foto: KWS)



Abb. 13: vdw-Häcksel-schaufel (Foto: Schmihing)

Vorteil dieser Schaufeln ist der flexible Einsatzbereich und die Robustheit des Systems. Kommt ein größerer Stein in die Häckselwelle und blockiert diese, bleibt der Ölmotor stehen. Nun kann die Schaufel ausgekippt und der Stein entfernt werden. Dies ist bei geringem Steinbesatz die günstigste Lösung zur Steintrennung.

Die Schaufeln erzeugen je nach Einstellung faust- bis streichholzschachtelgroße Schnitzel, die für den Feststoffeintrag ideal sind. Die Schaufeln gibt es sowohl in kleiner Ausführung für den Teleskoplader (ca. 1,5 t Fassungsvermögen) als auch im großen Maßstab (ca. 3 t Fassungsvermögen) für den Radladeranbau.

Denkbar ist auch der Einsatz von Futtermischwagen zur Zerkleinerung von Zuckerrüben.

6 Fazit

Die Rübe ist eine bekannte und ertragreiche Kultur für die eine schlagkräftige Produktionstechnik zur Verfügung steht. Als bewährte Kulturpflanze bietet sie sowohl aus pflanzenbaulicher als auch aus Sicht der Substrateignung eine interessante Ergänzung zum Mais. Die Vorteile der Trockenmasse der Rübe in der Fermentation sind unbestritten.

In den letzten vier Jahren hat sich im Bereich der Aufbereitungstechnik für Rüben als Biogassubstrat sehr viel getan. Den individuellen Bedürfnissen vieler Biogasanlagen und jedes Bodens, auf dem die Rüben produziert wurden, können mittlerweile mit einer großen Auswahl an Aufbereitungstechnik Rechnung getragen werden. Der Weg der Rübe in den Fermenter ebnet sich.

Literatur

- Wollenweber, Töppe und Schäfer (2010): Rüben entblättern statt köpfen?, Top Agrar 3, S. 88
 Eder, Schulz (2006): Grundlagen, Planung, Anlagenbau, Beispiele, Wirtschaftlichkeit. Ökobuch Verlag, 3. vollständig überarbeitete und erweiterte Neuauflage 2006

Optimierung der Gärrestdüngung zur Reduzierung der Stickstoffemissionen und Optimierung der Humusbilanz

KURT MÖLLER

1 Einleitung

Biogasanlagen wurden ursprünglich zur Zwischennutzung von landwirtschaftlichen „Abfällen“ wie Gülle, Stallmist und Futterresten errichtet. Durch die veränderten wirtschaftlichen Rahmenbedingungen ist es seit einigen Jahren betriebswirtschaftlich interessant, nicht nur Abfälle, sondern gezielt angebaute Energiepflanzen (z.B. Silo- bzw. Energiemais, Energierüben) für die Vergärung in Biogasanlagen anzubauen. Dies hat in den vergangenen Jahren zu einer erheblichen Ausweitung des Anbaues von Energiepflanzen geführt, insbesondere von Energiemais, zu Lasten von Blattfrüchten (z.B. Raps, Klee gras), von Stilllegungsflächen und von Getreide (HERRMANN et al. 2008, KRUSKA und EMMERLING 2008, MÖLLER et al. 2011). In bestimmten Regionen Deutschlands wurden auch massiv Grünlandflächen umgebrochen (HERRMANN et al. 2008). Mais gehört zu den Kulturpflanzen, die einerseits sehr stark den Humusvorrat im Boden beanspruchen (KÖRSCHENS et al. 2004), andererseits nach der Ernte im Herbst im Boden vergleichsweise hohe Mengen an mineralischem Stickstoff (N) hinterlassen (RANDALL et al. 1997, VAN ES et al. 2006, SCHMIDT et al. 2007).

Die Biogastechnologie ermöglicht jedoch zugleich auch eine Nutzung von bisher nicht genutzten Gründüngungspflanzen (z.B. Klee gras, Zwischenfrüchte). Dies ist eine aus pflanzenbaulicher Sicht besonders interessante Alternative für vieharme oder viehlose Betriebe des ökologischen Landbaus, da durch die Vergärung ein mobil einsetzbarer organischer Dünger bereitgestellt wird (STINNER et al. 2008, MÖLLER et al. 2008a, GUNNARSSON et al. 2011). Der gezielte Anbau von Zwischenfrüchten zur Vergärung in Biogasanlagen wird vereinzelt auch auf konventionell geführten Betrieben praktiziert (MÖLLER et al. 2011).

Bei der Vergärung entsteht bei den heute üblichen Vergärungsverfahren ein gülleähnlicher organischer Dünger, der im Vergleich zum Ausgangssubstrat einen niedrigeren Trockensubstanzgehalt, einen höheren Anteil an Ammonium (NH_4^+) am Gesamtstickstoff, einen höheren pH-Wert, und einen niedrigeren biologischen Sauerstoffbedarf aufweist, während die Gesamtmengen an Nährstoffen im Gärrest kaum beeinflusst werden (ASMUS et al. 1988, MÖLLER et al. 2008b). Werden gezielt angebaute Energiepflanzen vergoren, kann die Menge an organischen Düngern zur Ausbringung auf die landwirtschaftliche Nutzfläche erheblich steigen (MÖLLER et al. 2011). Bei einer meistens auf sechs Monate beschränkten Gärrestlagerkapazität ist dies gleichzeitig mit einem Anstieg der organi-

schen Düngung im Herbst vor Eintreten der gesetzlichen Sperrfristen verbunden, um genügend freie Gärrestlagerkapazität für die Wintermonate vorhalten zu können (MÖLLER et al. 2010, 2011). Dieser Anstieg der organischen Düngung im Herbst ist gleichbedeutend mit einer Erhöhung der Gefahr von N-Verlusten, da der Stickstoff bei einer Ausbringung im Herbst nicht mehr ausreichend durch Grünlandbestände oder Ackerpflanzen verwertet werden kann (SMITH und CHAMBERS 1993, CHAMBERS et al. 2000).

Werden dagegen Pflanzen vergoren, die vorher zur Gründüngung genutzt wurden, verändern sich nicht die Gesamtmengen an organischen Düngern im Betriebssystem, aber es stehen höhere Mengen an mobil einsetzbaren organischen Düngern zur Verfügung. Diese können innerhalb des Betriebssystems zu einem optimalen Zeitpunkt zu den Kulturpflanzen mit dem höchsten Nährstoffbedarf umverteilt werden, sodass die N-Mengen in der im Herbst eingearbeiteten organischen Düngung erheblich reduziert werden können (MÖLLER et al. 2008a, MÖLLER 2009). Dagegen ist die Einarbeitung von Gründüngungspflanzen mit einem engen C/N-Verhältnis im Herbst mit einem erheblichen Anstieg der Gefahr von N-Verlusten durch Nitratverlagerung und durch Lachgasemissionen verbunden (MÖLLER et al. 2008a, MÖLLER und REENTS 2009, MÖLLER und STINNER 2009).

Durch die Errichtung von Biogasanlagen werden die N-Verluste während der Vergärung und Lagerung der organischen Dünger erheblich reduziert (sofern die Gärrestlagerung in geschlossenen Nachgärbehältern erfolgt) (CLEMENS et al. 2006). Die anschließende Handhabung des Gärrestes ist jedoch mit einer erheblichen Gefahr von N-Verlusten verbunden. Der höhere NH_4^+ -Gehalt und der höhere pH-Wert des Gärrestes erhöhen die Gefahr von N-Verlusten aus einem offenen Gärrestendlager bzw. während und nach der Gärrestausrückführung (MÖLLER und STINNER 2009). Werden Gärreste in eine flüssige und eine stallmistähnliche feste Fraktion getrennt, entsteht ein Feststoffdünger mit sehr hohen NH_4^+ -Gehalten und einer entsprechend starken Gefahr von gasförmigen N-Verlusten (HANSEN et al. 2006, THORMAN et al. 2007, PETERSEN und SØRENSEN 2008, MÖLLER et al. 2010).

Probleme bestehen in der Praxis auch mit der Bemessung der kurzfristigen N-Düngewirkung von Gärresten („Direkt bzw. Sofortwirkung“ in Mineraldüngeräquivalenten (MDÄ)), und der Nachwirkung in den Folgejahren (MÖLLER et al. 2011), denn die N-Düngewirkung von organischen Düngern ist nicht mit der N-Düngewirkung eines mineralischen N-Düngemittels zu vergleichen, sodass nicht nur die applizierten N-Gesamtmengen steigen können, sondern auch nicht selten von einer Überdüngung durch Unterschätzung der Düngewirkung von Gärresten auszugehen ist (MÖLLER et al. 2011).

Wie bereits oben dargestellt, ist der Anbau von Mais mit einer überdurchschnittlichen Beanspruchung des Bodenumhumusvorrates verbunden. Wird dieser Humusabbau nicht adäquat ersetzt, kann dies langfristige negative Folgen für die Bodenfruchtbarkeit nach sich ziehen. Aber auch die Vergärung von Gülle und Biomasse an sich wird häufig

mit negativen langfristigen Folgen für die Bodenfruchtbarkeit in Verbindung gebracht. Durch den Abbau von organischer Substanz im Fermenter steht dem Boden insgesamt weniger Kohlenstoff zur Reproduktion des Bodenumhumusvorrates zur Verfügung, dies soll sich negativ auf die Humusbilanzen auswirken können.

Aus der Zusammenschau der erwähnten Effekte kann geschlossen werden, dass die Einführung einer Biogasanlage einerseits mit der Chance zur Optimierung der innerbetrieblichen Nährstoffkreisläufe (und einer Reduzierung der N-Verluste) verbunden ist, andererseits aber auch die unsachgemäße Handhabung der Gärreste oder durch die Einrichtung von „einfältigen“ Anbausystemen eine erhebliche Erhöhung von N-Emissionen bewirken kann. Aus diesem Spannungsfeld heraus stehen Biogasbetriebe vor vielfältigen Herausforderungen, um ihre Nährstoffkreisläufe zu optimieren, ihre N-Verluste auf ein Minimum zu reduzieren und dabei die Humusbilanzen im Blick zu behalten. Ziel dieses Beitrages ist es, einige Möglichkeiten zur Optimierung herauszuarbeiten.

2 Optimierung der Gärrestdüngung zur Vermeidung von N-Emissionen

2.1 Düngewirkung von Gärresten

Grundlage eines jeden Optimierungsansatzes der Gärrestdüngung im Hinblick auf eine Reduzierung möglicher N-Verluste stellt eine angemessene Anrechnung der N-Düngewirkung der Gärrestdüngung in der Düngeplanung dar. Hier besteht jedoch das Problem, dass die Zusammensetzung der Gärreste sehr stark in Abhängigkeit der eingesetzten Substrate variieren kann (SENSEL und ELLMER 2007, WRAGGE und ELLMER 2007, KLUGE et al. 2008, PFUNDTNER 2008, MÖLLER et al. 2010). Dies erschwert es, der Praxis allgemein gültige Empfehlungen zur Anrechenbarkeit von Gärrest-N bei der Düngeplanung zur Verfügung zu stellen. Zudem beeinflussen eine mögliche Gärrestaufbereitung (z.B. Fest-Flüssig-Trennung), die Ausbringungstechnik (gasförmige N-Verluste, N-Immobilisierung im Boden) und der Ausbringungszeitpunkt maßgeblich deren direkte N-Düngewirkung (MÖLLER et al. 2008b).

2.1.1 Düngewirkung in Abhängigkeit von der Gärrestzusammensetzung

Allgemein bekannt ist, dass die N-Freisetzung aus organischen Düngern u. a. von deren C/N-Verhältnis und vom Ammonium-Stickstoff-Gehalt ($\text{NH}_4^+\text{-N}$) abhängt (VAN KESSEL et al. 2000, KYVSGAARD et al. 2000). Gärreste mit einem engen C/N-Verhältnis und einem hohen $\text{NH}_4^+\text{-N}$ -Anteil weisen bei einer Ausbringung zu einem optimalen Ausbringungszeitpunkt demnach eine hohe direkte N-Düngewirkung auf, bei einer Ausbringung zu einem ungünstigen Zeitpunkt (z.B. im Herbst) kann von solchen Gärresten jedoch auch eine hohe N-Verlustgefahr ausgehen. Gärreste mit einem weiteren C/N-Verhältnis und

einem vergleichsweise niedrigen NH_4^+ -Anteil weisen dagegen eine deutlich geringere direkte N-Freisetzung auf, mit entsprechenden Auswirkungen auf die direkte N-Düngewirkung und auf die Gefahr von N-Verlusten bei nicht angepasster Ausbringung.

Systematische Untersuchungen über die N-Freisetzung und die N-Düngewirkung im Anwendungsjahr von Gärresten unterschiedlicher Zusammensetzung liegen nicht vor und sind dringend notwendig, um diesbezügliche Unsicherheiten durch widersprüchliche Aussagen auszuräumen. Nach derzeitigen Erkenntnissen dürfte die N-Freisetzung im Anwendungsjahr zwischen < 50 und 80 Mineraldüngeräquivalenten (MDÄ) liegen, in Abhängigkeit ihrer Zusammensetzung und der Ausbringungstechnik. Als Anhaltspunkt kann der NH_4^+ -Gehalt im Gärrest herangezogen werden, sofern die Gärreste unmittelbar (= innerhalb weniger Minuten) nach der Ausbringung eingearbeitet werden (MÖLLER et al. 2011). Auch wenn keine systematischen Untersuchungen vorliegen, kann anhand von Modellrechnungen eine stark positive Beziehung zwischen dem N-Gehalt und der Abbaubarkeit des Substrates einerseits, und dem NH_4^+ -Gehalt und dem C/N-Verhältnis im Gärrest andererseits abgeleitet werden (MÖLLER et al. 2010). Gärsubstrate mit einem hohen N-Gehalt und einer hohen biologischen Abbaubarkeit der organischen Substanz (z.B. Getreide) führen zu Gärresten mit einer schnellen N-Freisetzung (hoher NH_4^+ -Anteil > 80 % und enges C/N-Verhältnis), während Gärsubstrate mit einem eher niedrigen N-Gehalt und einer mittleren biologischen Abbaubarkeit (Silomais und andere C_4 -Pflanzen) Gärreste mit einer viel niedrigeren direkten N-Düngewirkung (mittlerer NH_4^+ -Anteil von ca. 50 %, weiteres C/N-Verhältnis) hervorbringen (MÖLLER et al. 2010).

2.1.2 Düngewirkung in Abhängigkeit vom Ausbringungszeitpunkt

Alle vorliegenden Untersuchungen belegen, dass die N-Düngewirkung von Gülle bei einer Applikation im Spätwinter und Frühjahr am höchsten ist (CHAMBERS et al. 2000, SMITH und CHAMBERS 1993, MÖLLER et al. 2008b). Da die Eigenschaften von Gärresten denen einer Gülle in vielen Punkten ähneln, können die Ergebnisse auf die Gärrestanwendung übertragen werden. Bei einer Ausbringung im Hochsommer können Grünland und Zwischenfrüchte den Stickstoff aus der organischen Düngung noch optimal ausnutzen, allerdings können die hohen Temperaturen zu hohen gasförmigen N-Verluste führen, sofern die Gärreste nicht unmittelbar nach Ausbringung eingearbeitet werden. Da bei nahezu allen unseren Kulturpflanzen die Mineralisierung des Boden-N eine ausreichende N-Versorgung der Bestände im Herbst gewährleistet, ist eine Gärrestdüngung im Herbst stets mit einer hohen N-Verlustgefahr verbunden. Ergebnisse mit der Düngung von Gülle belegen, dass in Gebieten mit eher milden Wintern die höchsten N-Verluste bei einer Ausbringung im Zeitraum September bis November eintreten, eine Gölledüngung im August wird noch einigermaßen verwertet, bei einer Gölledüngung im Winter (ab Dezember oder Januar) sinkt die N-Verlustgefahr und es steigt damit die N-Düngewirkung

wieder deutlich an, da aufgrund der niedrigen Temperaturen die Mineralisierungs- und Nitrifizierungsvorgänge so langsam ablaufen, dass ein großer Anteil des freigesetzten Stickstoffs bis zur Pflanzenaufnahme im Frühjahr nicht aus dem Wurzelraum verlagert wird (CHAMBERS et al. 2000, SMITH und CHAMBERS 1993). Vergleichbares gilt auch für eingearbeitete Gründüngungspflanzen (MÖLLER und REENTS 2009) und dürfte für Gärreste gleichermaßen gelten.

2.1.3 Chancen und Probleme der Gärrestseparierung

Bei der Gärrestseparierung entsteht ein jaucheähnliches, wasserreiches Fugat und ein stallmistähnlicher faserreicher, fester Trennrest (Feststoff). Fugate zeichnen sich durch hohe N-, NH_4^+ - und K-Gehalte und niedrige P-Gehalte aus (MÖLLER et al. 2010). Feststoffe weisen dagegen vergleichsweise hohe N- und P-Gehalte auf, mit einem hohen Anteil an „humuswirksamen“ Faserstoffen. Daher eignen sich Fugate besonders zur Düngung von Grünlandflächen (Grünland enthält hohe N- und K-Gehalte, und niedrige P-Gehalte), und zur Kopfdüngung im Ackerbau (MÖLLER et al. 2011), denn ihre geringe Viskosität ermöglicht eine schnelle Infiltration in den Boden und hat deutlich niedrigere NH_4^+ -N-Verluste nach Ausbringung zur Folge (MÖLLER und STINNER 2009). Separierte Feststoffe sollten dagegen bevorzugt auf dem Ackerland zum Einsatz kommen, denn auf Ackerflächen werden zum einen Kulturen mit vergleichsweise hohen P-Entzügen angebaut (Körnerfrüchte), zum anderen wird dort deren direkte „Humuswirkung“ zum Ausgleich der Humusbilanzen benötigt. Grünlandflächen gelten als optimal mit Humus versorgt und benötigen daher eigentlich keine externe C-Zuführung (KÖRSCHENS et al. 2004). Zudem ermöglicht eine Gärrestseparierung eine jeweils angepasste Ausbringung (räumlich wie zeitlich): Feststoffe können bereits zur Pflugfurche ausgebracht werden, um Mineralisierungsvorgängen mehr Zeit zu geben, oder sie können zu Kulturpflanzen mit geringerem N-Bedarf gedüngt werden, während Fugate eher zur kurzfristigen Deckung des N-Bedarfs von Kulturpflanzen mit einem hohen N-Bedarf geeignet sind (MÖLLER 2009).

Allerdings ist der NH_4^+ -Anteil solcher Feststoffe vergleichsweise hoch (bis zu ca. 40 %) (MÖLLER et al. 2010). Sie werden zudem während der Lagerung oftmals mehrfach umgesetzt und über einen längeren Zeitraum gelagert. Dies ist mit erheblichen N-Verlusten verbunden (MÖLLER et al. 2010). Daher sollten separierte Feststoffe nach Möglichkeit unmittelbar nach der Separierung ausgebracht und wenn möglich rasch eingearbeitet werden, bzw. die Separierung erst unmittelbar vor der Ausbringung erfolgen. Allerdings können unseparierte Gärreste mit einem sehr hohen Faseranteil im Gärrestendlager aufgrund der Temperaturabsenkung ihre Viskosität erhöhen und damit ihre Rühr- und Pumpeneigenschaften so verändern, dass eine weitere Verarbeitung hohe technische Anforderungen stellt. Dies ist ggf. zu berücksichtigen.

2.2 Vermeidung von N-Verlusten

2.2.1 Vermeidung von gasförmigen N-Verlusten bei der Gärrestdüngung

Gärreste zeichnen sich durch ihre im Vergleich zu Gülle teilweise deutlich höheren NH_4^+ -Anteile und deutlich höheren pH-Werte aus. Beides erhöht die Gefahr von gasförmigen NH_4^+ -N-Verlusten als Folge unsachgemäßer Handhabung. An dieser Stelle sollen Möglichkeiten zur Reduzierung der gasförmigen N-Verluste nur kurz skizziert werden:

- Einsatz von Verlust mindernden Applikationstechniken: Der Einsatz von Schleppschlauchverfahren bewirkt eine eher geringe Reduzierung der gasförmigen N-Verluste im Vergleich zu den früher gebräuchlichen Verfahren (Prallteller). Eine substanzielle Verbesserung wird erst bei Verwendung von Schlitz- bzw. Schleppschuhverfahren erzielt, oder bei sofortiger Einarbeitung nach der Ausbringung (= am besten innerhalb weniger Minuten). In den ersten Minuten nach einer Gärrestausrückführung sind die Emissionsraten am höchsten!
- Ein weiterer Ansatz zur Reduzierung gasförmiger N-Verluste bietet die Separierung der Gärreste; die flüssigen Fugate weisen niedrigere gasförmige N-Verluste auf (MÖLLER und STINNER 2009).
- Weitere Ansätze zur Reduzierung von gasförmigen N-Verlusten sind in der Literatur ausführlich beschrieben (SOMMER und HUTCHINGS 2001).

2.2.2 Vermeidung von Nitratauswaschungsverlusten

Die Vergärung von Gülle hat keine Auswirkungen auf die Gefahr von Nitratauswaschungsverlusten im Vergleich zur Applikation unvergorener Gülle (MÖLLER und STINNER 2009). Dagegen sinkt die Gefahr von Nitratauswaschungsverlusten, wenn Gründüngungspflanzen und N-reiche Erntereste im Sommer und Herbst geerntet und zur Vergärung in einer Biogasanlage abgefahren werden, statt sie direkt in den Boden einzuarbeiten (MÖLLER und STINNER 2009). Unter solchen Bedingungen wird N im Herbst von der Fläche entfernt, über Winter „sicher“ im Silo bzw. Fermenter zwischengelagert, und größtenteils erst im Frühjahr wieder auf die Felder zurückgeführt, wenn das Pflanzenwachstum eine rasche N-Aufnahme aus dem Boden bewirkt (MÖLLER 2009).

Deutlich komplizierter sind die Verhältnisse, wenn gezielt angebaute Energiepflanzen (Silo- bzw. Energiemais) in einer Biogasanlage vergoren werden. Ein solches Vorgehen erhöht die absolute Menge an organischen Düngern, die auf die Felder ausgebracht werden, zumal sie nach der derzeit gültigen Dünge-VO nicht auf die Gesamtmenge der organischen Düngung angerechnet werden muss (MÖLLER et al. 2011). Zudem erhöhen sich die Mengen an organischen Düngern, die bereits im Herbst auf die Felder ausgebracht werden, um entsprechende freie Lagerkapazitäten für das Winterhalbjahr vorhalten zu können (MÖLLER et al. 2010). Beides erhöht die Gefahr von N-Verlusten infolge von Nit-

ratauswaschung und möglicherweise auch die Entgasung des besonders klimaschädlichen Lachgases (N_2O).

Die Problematik erhöhter Nitratauswaschungsverluste wird dadurch verschärft, als dass die am häufigsten angebaute Energiefrucht Silomais im Herbst relativ hohe N_{\min} -Restmengen im Boden hinterlässt im Vergleich zu Getreide (siehe oben). Einseitige (Energie-)Fruchtfolgen (ein sehr hoher Maisanteil) haben zudem noch den Nachteil, dass sie im Kalenderjahr nur wenige Zeitfenster zur sinnvollen Ausbringung von Gärresten bieten. Bei Maisfruchtfolgen ist nur im späten Frühjahr eine Gärrestdüngung wirklich sinnvoll im Sinne einer optimalen Nährstoffverwertung. Zudem werden kaum Nährstoffe aus dem Betriebssystem exportiert (MÖLLER et al. 2011). Vielfältige Fruchtfolgen mit sehr unterschiedlichen Aussaatzeiten bieten dagegen mehr Zeitfenster eines sinnvollen Gärreisteinsatzes. Insbesondere der Zwischenfruchtanbau ermöglicht zu einer relativ fortgeschrittenen Jahreszeit die Ausbringung relativ hoher Mengen an Gärresten (MÖLLER et al. 2008 a).

2.3 Konsequenzen für das pflanzenbauliche Anbaumanagement und das Biogasanlagenmanagement

2.3.1 Konsequenzen für das Anbaumanagement

Aus den oben genannten Zusammenhängen lässt sich ableiten, dass N-Verluste am wirksamsten durch eine Kombination verschiedener Maßnahmen minimiert werden können. Hierzu gehören insbesondere:

- Möglichst luftdichte Lagerung von Gärresten, sowie ihre sofortige Einarbeitung nach der Ausbringung.
- Vermeidung bzw. Reduzierung der Gärrestdüngung im Zeitraum September bis Dezember, nebst den Maßnahmen, die nach der Dünge-VO ohnehin zu beachten sind.
- Konsequenter Ausbau des Zwischenfruchtanbaus, um einerseits über einen langen Zeitraum eine Wasser- und Nährstoffaufnahme durch die Pflanze zu bewirken, und andererseits um ein weiteres Zeitfenster zur optimalen Gärrestnutzung bei einer Ausbringung im Sommer zur Verfügung zu haben. Zweinutzungskultursysteme mit einer Ernte der Zwischenfrucht im Frühjahr dürften besonders effektiv die Gefahr von N-Verlusten (Nitrat, Lachgas) reduzieren.
- Alle diese Ziele lassen sich idealerweise am ehesten im Rahmen vielfältiger Fruchtfolgen erreichen, um verteilt über das Jahr möglichst zahlreiche Zeitfenster zur Gärrestdüngung zur Verfügung zu haben. Vor jeder Aussaat ist i. d. R. eine Einarbeitung der Gärreste mit herkömmlicher Technik möglich.
- Gegebenenfalls kann auch eine Fest-Flüssig-Trennung der Gärreste eine Maßnahme zur gezielteren Nährstoffrückführung und zur Reduzierung der gasförmigen N-Verluste darstellen (MÖLLER 2009, MÖLLER et al. 2011).

2.3.2 Konsequenzen für das Biogasanlagenmanagement

Ziel sollte es sein, einen möglichst hohen Anteil des über die Biogasanlage umgesetzten N im Frühjahr zur Düngung bereitzustellen und einen möglichst geringen im Herbst. Zugleich sollten die Gärreste im Frühjahr ein enges C/N-Verhältnis und hohe NH_4^+ -Anteile aufweisen, bei einer Ausbringung im Herbst sollten die Gärreste entgegengesetzte Eigenschaften besitzen (MÖLLER et al. 2010). Diese pflanzenbaulichen Erfordernisse können beim Substratmanagement von Biogasanlagen gezielt beachtet werden (MÖLLER et al. 2010). Ein optimiertes Gärsubstratmanagement sieht die Vergärung von N-reichen Gärsubstraten bzw. von Gärsubstraten mit einer hohen Abbaubarkeit und hohen Trockensubstanzgehalten (Getreide, Gräser, Klee gras, Putenmist) bevorzugt im Herbst und Winter vor, sodass die hieraus entstehenden Gärreste für die Frühjahrsdüngung zur Verfügung stehen. Dies wirkt sich nach MÖLLER et al. (2010) gleich mehrfach aus:

- Hohe N-Gehalte im Substrat führen zu Gärresten mit hohen N-Mengen je Volumeneinheit; es können höhere N-Mengen im vorliegenden Gärrestlager über Winter zwischengelagert werden.
- Hohe N-Gehalte im Substrat führen zu Gärresten mit einem engeren C/N-Verhältnis und einer höheren direkten N-Düngewirkung.
- Eine hohe Abbaubarkeit bewirkt eine stärkere Volumenreduzierung (geringerer Gärrestlagerbedarf, höhere N-Mengen je Volumeneinheit), eine stärkere Einengung des C/N-Verhältnisses, und vermutlich auch einen höheren NH_4^+ -Anteil im Gärrest.
- Ein hoher TS-Gehalt des Gärsubstrates hat zur Folge, dass täglich geringere (Frischmasse-)Mengen an Substrat (und damit v. a. Wasser) in den Fermenter geführt werden müssen, und der relative Volumenabbau im Fermenter zugleich stärker ist. Beides zusammen führt zu einer deutlichen „Schonung“ der freien Gärrestlagerkapazität während der Wintermonate, sodass im Herbst geringere Mengen an Gärresten ausgebracht werden müssen, und ein höherer Anteil zur Gärrestdüngung im Frühjahr vorgehalten werden kann.

Im Unterschied hierzu eignen sich Substrate mit hohen Wassergehalten und ggf. einer hohen Abbaubarkeit der organischen Substanz (z. B. Zuckerrüben, Kartoffeln). Besonders als Ausgangssubstrat für Gärreste, die im Spätfrühjahr oder Sommer zur Kopfdüngung verwendet werden sollen. Zu diesem Zeitpunkt stellt die Kapazität der Gärrestlager kein Problem dar, wasserreiche Gärreste reduzieren dafür die Höhe der gasförmigen N-Verluste nach einer Ausbringung. Ist eine Leerung der Gärrestlager im Herbst nötig, sollten dagegen im Sommer Gärreste mit niedrigen N-Gehalten, einer geringeren Abbaubarkeit der organischen Substanz und ggf. hohen Wassergehalten vergoren werden (z. B. Silomais oder andere C_4 -Pflanzen, strohreiche Substrate), um möglichst geringe N-Mengen im Herbst auszubringen, bei gleichzeitig eher niedriger kurzfristiger N-Freisetzung.

Die mit einer solchen Optimierung des Gärsubstratmanagements verbundenen Auswirkungen auf den Prozessverlauf und die Prozessstabilität in der Biogasanlage sind bislang unzureichend erforscht. Hohe Eiweißgehalte erhöhen nicht nur die NH_4^+ -Gehalte im Fermenter, sondern auch die zugeführten Schwefelmengen und damit die Bildung von Schwefelwasserstoff (H_2S). Hohe Gehalte dieser Stoffe können die mikrobiologischen Prozesse in der Biogasanlage stören, hohe S-Gehalte sollen die Bioverfügbarkeit bestimmter Spurenelemente beeinträchtigen.

3 Auswirkungen auf den Boden-C-Haushalt

Alle vorliegenden Untersuchungen belegen, dass die C-Bestandteile und damit die Ausgangsstoffe zur Humusversorgung des Bodens nach einer Biogasgärung eine deutlich höhere Abbaustabilität aufweisen als die Ausgangsstoffe (ASMUS et al. 1988, REINHOLD et al. 1991, SÁNCHEZ et al. 2008, ALBURQUERQUE et al. 2011). REINHOLD et al. (1991) schließen aus ihren Inkubationsversuchen, dass bei der Applizierung von unvergorener Gülle und daraus hergestellten Gärresten jeweils die gleichen C-Mengen (ca. 62 %) zur langfristigen Reproduktion der organischen Bodensubstanz im Boden zurückbleiben. Bei unvergorener Gülle finden in den ersten Tagen nach der Applikation deutlich höhere (unproduktive) C-Verluste in Form von CO_2 statt als bei der Anwendung vergorener Gülle. Die Unterschiede entsprachen den vorangegangenen produktiven C-Verluste durch die Biogasgärung (REINHOLD et al. 1991). Unabhängig hiervon wird bei einer ganzheitlichen Betrachtung aller C-Inputs in den Boden unter Einbeziehung von Ernteresten, Gründüngung usw. bei einer alleinigen Vergärung der organischen Reststoffe aus der Tierhaltung der Gesamt-C-Input in den Boden nur minimal beeinflusst, die Humusbilanz des gesamten Anbausystems gar nicht oder nur minimal beeinflusst (MÖLLER 2009). Daher können nach heutigem Kenntnisstand eine negative langfristige Wirkung der Vergärung von Gülle oder Stallmist nahezu ausgeschlossen werden.

Der gezielte Anbau von Energiepflanzen zur Vergärung in Biogasanlagen kann dagegen zu einer Erhöhung oder Reduzierung des Humusbilanzsaldos von landwirtschaftlichen Betrieben führen (MÖLLER et al. 2011). Erhöhungen des Humusbilanzsaldos werden v. a. in Betrieben mit einer starken Ausweitung des Zwischenfruchtanbaus festgestellt, eine Verminderung dagegen in solchen mit einer Ausweitung des Maisanbaus (MÖLLER et al. 2011). Im Durchschnitt stellten MÖLLER et al. (2011) eine etwa 10 %ige Reduzierung des Humussaldos nach Errichtung von NawaRo-Biogasanlagen und der damit einhergehenden Veränderungen im Anbausystem fest. Möglichkeiten zum Ausgleich solcher Entwicklungen bestehen in der konsequenten Ausweitung des Zwischenfruchtanbaus und einer überproportionalen Rückführung von separierten Feststoffen auf betroffenen

Ackerflächen. Ein weiterer Ansatz besteht in der Nutzung von Grünlandaufwüchsen zur Biogasgärung. Sie führen zu faserreichen Gärresten, eine anschließende Fest-Flüssig-Trennung der Gärreste und die gezielte Ausbringung der daraus gewonnenen Feststoffe auf Ackerland bietet die Möglichkeit, die Humusbilanz von Ackerflächen auszugleichen. Wird dagegen Grünland zum Anbau von Energiemais umgebrochen, fällt dieser indirekte humusmehrende Effekt für die Ackerflächen weg.

Literatur

- Alburquerque, J. A.; de la Fuente, C.; Bernal, M.P. (2011): Chemical properties of anaerobic digestates affecting C and N dynamics in amended soils. *Agriculture, Ecosystems & Environment* (im Druck)
- Asmus, F.; Linke, B.; Dunkel, H. (1988): Eigenschaften und Düngerwirkung von ausgefauter Gülle aus der Biogasgewinnung. *Arch. Acker- Pflanzenbau Bodenkd, Berl.* 32, S. 527-532
- Chambers, B. J.; Smith, K. A.; Pain, B. F. (2000): Strategies to encourage better use of nitrogen in animal manures. *Soil Use and Management* 16, pp. 157-161
- Clemens, J.; Trimborn, M.; Weiland, P.; Amon, B. (2006): Mitigation of greenhouse gas emissions by anaerobic digestion of cattle slurry. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 112, pp. 171-177
- Gunnarsson, A.; Lindén, B.; Gertsson, U. (2011): Biodigestion of Plant Material Can Improve Nitrogen Use Efficiency in a Red Beet Crop Sequence. *Hort. Science* 46, pp. 765-775
- Hansen, M. N.; Henriksen, K.; Sommer, S. G. (2006): Observations of production and emission of greenhouse gases and ammonia during storage of solids separated from pig slurry: effects of covering. *Atmospheric Environ.* 40, pp. 4172-4181
- Herrmann, A.; Miehe, A. K.; Taube, F. (2008): Potentielle ökologische Konsequenzen der Biogasproduktion - Monitoring zu Substratanbau und Gärrestverwertung in Schleswig-Holstein. *Mitt. Ges. Pflanzenbauwissenschaften* 20, S. 95-96
- Kluge, R.; Wagner, W.; Mokry, M.; Dederer, M.; Messner, J.; Haber, N. (2008): Abschlussbericht des Projektes Inhaltsstoffe von Gärprodukten und Möglichkeiten zu ihrer geordneten landwirtschaftlichen Verwertung. https://www.landwirtschaft-bw.info/servlet/PB/show/1241517_11/ltz_Projektbericht%20Inhaltsstoffe%20von%20Gaeerprodukten%20und%20Moeglichkeiten%20zu%20ihrer%20geordneten%20Verwertung.pdf
- Kyvsgaard, P.; Sørensen, P.; Møller, E.; Magid, J. (2000): Nitrogen mineralization from sheep faeces can be predicted from the apparent digestibility of the feed. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 57, pp. 207-214
- Körschens, M.; Rogasik, J.; Schulz, E. (2004): Humusbilanzierung: Methode zur Beurteilung und Bemessung der Humusversorgung von Ackerland. *Verband Deutscher Landwirtschaftlicher Untersuchungs- & Forschungsanstalten*. <http://www.vdlufa.de/joomla/Dokumente/Standpunkte/08-humusbilanzierung.pdf>
- Kruska, V.; Emmerling, C (2008): Flächennutzungswandel durch Biogaserzeugung – Regionale und lokale Erhebungen in Rheinland-Pfalz. *Naturschutz und Landschaftsplanung* 40, S. 69-72

- Möller, K. (2009): Influence of different manuring systems with and without biogas digestion on soil organic matter and nitrogen inputs, flows and budgets in organic cropping systems. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 84, pp. 179-202
- Möller, K.; Reents, H.J. (2009): Effects of Various Cover Crops after Peas on Nitrate Leaching and Nitrogen Supply to Succeeding Winter Wheat or Potato Crops. *Journal Soil Science and Plant Nutrition* 172, pp. 277-287
- Möller, K.; Stinner, W. (2009): Effects of different manuring systems with and without biogas digestion on soil mineral nitrogen content and on gaseous nitrogen losses (ammonia, nitrous oxides). *European J. of Agronomy* 30, pp. 1-16
- Möller, K.; Stinner, W.; Leithold, G. (2008a): Growth, composition, biological N₂ fixation and nutrient uptake of a leguminous cover crop mixture and the effect of their removal on field nitrogen balances and nitrate leaching risk. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 82, pp. 233-249
- Möller, K.; Stinner, W.; Deuker, A.; Leithold, G. (2008b): Effects of different manuring systems with and without biogas digestion on nitrogen cycle and crop yield in mixed organic dairy farming systems. *Nutr. Cycl. Agroecosyst.* 82, pp. 209-232
- Möller, K.; Schulz, R.; Müller, T. (2010): Substrate inputs, nutrient flows and nitrogen loss of two centralized biogas plants in southern Germany. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 87, pp. 307-325
- Möller, K.; Schulz, R.; Müller, T. (2011): Effects of setup of centralized biogas plants on crop acreage and balances of nutrients and soil humus. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 89, pp. 303-312
- Petersen, J.; Sørensen, P. (2008): Loss of nitrogen and carbon during storage of the fibrous fraction of separated pig slurry and influence on nitrogen availability. *J. Agric. Sci., Camb.* 146, pp. 403-413
- Pfundtner, E. (2008): Nährstoff- und Humuswirkung von Gärresten aus Biogasanlagen. In: Arbeitsgemeinschaft für Lebensmittel- Veterinär- und Agrarwesen (Hrsg.). Tagungsband. ALVA-Jahrestagung 2008, Gumpenstein, 26. und 27. Mai 2008. http://www.alva.at/upload/Publikationen/Tagungsband/Tagungsband_2008.pdf, S. 131-133
- Randall, G.W.; Huggins, D.R.; Russelle, M.P.; Fuchs, D.J.; Nelson, W.W.; Anderson, J.L. (1997): Nitrate losses through subsurface tile drainage in Conservation Reserve Program, alfalfa and row crop systems. *J. Environ. Qual.* 26, pp. 1240-1247
- Reinhold, G.; Klimanek, E.-M.; Breitschuh, G. (1991): Zum Einfluss der Biogaserzeugung auf Veränderungen in der Kohlenstoffdynamik von Gülle. *Arch. Acker- Pflanzenbau Bodenkd.* 35, S. 129-137
- Sánchez, M.; Gomez, X.; Barriocanal, G.; Cuertos, M.J.; Morán, A. (2008): Assessment of the stability of livestock farm wastes treated by anaerobic digestion. *International Biodeterioration & Biodegradation* 62, pp. 421-426
- Schmidt, T.; Gödecke, B.; Antony, F. (2007): Wasserschutzwirkung von Agrarumweltmaßnahmen – Statistische Auswertung von Herbst-Nmin-Werten aus Niedersächsischen Wassergewinnungsgebieten. *Landbauforschung Völkenrode SH 307*, S. 229-252
- Sensel, K.; Ellmer, F. (2007): Gärrückstände aus der Erzeugung von Biogas mit Energiepflanzen – Stoffkenngrößen und Variabilität. *Mitt. Ges. Pflanzenbauwiss.* 19, S. 204-205
- Smith, K.A. Chambers, B.J. (1993): Utilizing the nitrogen content of organic manures on farms – problems and practical solutions. *Soil Use Manage.* 9, pp. 105-112

- Sommer, S.G.; Hutchings, N.J. (2001): Ammonia emissions from field applied manure and its reduction - invited paper. *European J. of Agronomy* 15, pp. 1-15
- Stinner, W.; Möller, K.; Leithold, G. (2008): Effects of biogas digestion of clover/grass-leys, cover crops and crop residues on nitrogen cycle and crop yield in organic stockless farming systems. *European Journal of Agronomy* 29, pp. 125-134
- Thorman, R.E.; Chadwick, D.R.; Harrison, R.; Boyles, L.O.; Matthews, R. (2007): The effect on N₂O emissions of storage conditions and rapid incorporation of pig and cattle farm-yard manure into tillage land. *Biosyst. Engineering* 97, 501-511
- van Es, H.M.; Sogbedji, J.M.; Schindelbeck, R.R. (2006): Effect of Manure Application Timing, Crop, and Soil Type on Nitrate Leaching. *J. Environ. Qual.* 35, pp. 670-679
- van Kessel, J.S.; Reeves, J.B.; J.J. Meisinger (2000): Nitrogen and Carbon Mineralization of Potential Manure Components. *J. Environ. Qual.* 29, pp. 1669-1677
- Wragge, V.; Ellmer, F. (2007): Rückstände aus der Biogaserzeugung als Düngemittel bei Sommerweizen. *Mitt. Ges. Pflanzenbauwiss.* 19, S. 206-207

Bewertung klimarelevanter Gase aus landwirtschaftlichen Biogasanlagen auf der Basis von Emissionsmessungen

JAN LIEBETRAU, JAQUELINE DANIEL-GROMKE, CHRISTIANE REUSCHEL,
KATJA OEHMICHEN, JOACHIM CLEMENS, CARSTEN HAFERMANN,
PETER WEILAND, JÖRG FRIEHE

1 Hintergrund

Die Einführung des Erneuerbaren-Energien-Gesetzes (EEG) hat zu einem starken Ausbau von Biogasanlagen in Deutschland geführt. Im Jahr 2010 sind ca. 5 900 Anlagen mit einer installierten Leistung von ca. 2 300 MW_{el} (WITT et al. 2011) am Netz. Ein Ziel des verstärkten Einsatzes von erneuerbaren Energien ist laut EEG die nachhaltige Energiebereitstellung im Interesse des Klimaschutzes. Damit ergibt sich für die Energiebereitstellung durch erneuerbare Energiequellen die Anforderung, eine Reduzierung der klimarelevanten Emissionen gegenüber konventionellen Verfahren zu gewährleisten. Ein Verfahren zur Bewertung der Auswirkungen auf das Klima ist dabei die Ökobilanzierung. Die Bilanzierung der klimarelevanten Wirkungen von Prozessen kann nur dann präzise durchgeführt werden, wenn die tatsächlich anfallenden Emissionen repräsentativ an großtechnischen Anlagen gemessen werden. Bisher wurden für den Biogasprozess Annahmen getroffen, da ein umfassendes Messprogramm nicht realisiert werden konnte. Die Probleme bei der Bewertung der Emissionen des Prozesses liegen neben der messtechnischen und methodischen Durchführung der Untersuchungen in der Verallgemeinerung der Ergebnisse auf den Gesamtprozess.

In einem vom Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz (BMELV), vertreten durch die Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR), geförderten Vorhaben mit dem Titel „Emissionsanalyse und Quantifizierung von Stoffflüssen durch Biogasanlagen im Hinblick auf die ökologische Bewertung der landwirtschaftlichen Biogasgewinnung und Inventarisierung der deutschen Landwirtschaft“ (FKZ 22023606) wurden zehn Anlagen hinsichtlich ihrer Emissionen untersucht. Parallel wurde in dem Vorhaben durch Umfragen der Stand der Technik im Biogassektor abgebildet, durch Versuche der Einfluss der Prozessführung auf das Emissionspotenzial der Gärreste untersucht sowie die entstehenden Emissionen bei der Ausbringung von Gärresten quantifiziert.

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Treibhausgasbilanzen auf der Basis der Emissionsmessungen der untersuchten Biogasanlagen dargestellt.

2 Methodik

2.1 Anlagenauswahl

Die untersuchten Anlagen wurden entsprechend der eingesetzten Verfahren und Verfahrenskomponenten ausgewählt. In Tabelle 1 sind die wesentlichen Anlagendaten der betrachteten Biogasanlagen im Überblick dargestellt.

Tab. 1: Untersuchte Biogasanlagen und Anlagencharakterisierung

Anlage	Vergärungs- verfahren	Anzahl Prozessstufen	Installierte Leistung kW _{el}	Gärrest- lager	Verweilzeit Gesamtprozess d	Substrate
1	Feststoff- vergärung	3	526 + 185	gasdicht 2 400 m ³	135	NawaRo
2	Nassvergärung	2	350	Nachgärer als Gärrestlager	164	NawaRo, 25 % WD
3	Nassvergärung	2	537	offen 4 950 m ³	105	NawaRo, 3-4 m ³ Wasser/d
4	Nassvergärung	1	526	abgedeckt 4 100 m ³	69	NawaRo, 30 % WD
5	Feststoff- vergärung (Batch)	1 (7 Garagen)	526	Feldlagerung	80 (inkl. Rück- führung)	NawaRo, 36 % WD
6	Feststoff- vergärung	1	2 × 249	gasdicht 3 500 m ³	36	NawaRo
7	Nassvergärung	2	2 × 160	offen (Lagunen)	41	NawaRo, 92 % WD
8	Nassvergärung	2	Gasauf- bereitung; entspricht 2 200	offen 2 × 5 000 m ³	102	NawaRo
9	Nassvergärung	4 × 1	Gasauf- bereitung; entspricht 2 600	abgedeckt 4 × 4 200 m ³	58	NawaRo, WD
10	Nassvergärung	2	1 000	offen 4 200 m ³	90	NawaRo, 26 % WD

WD: Wirtschaftsdünger, NawaRo: Nachwachsende Rohstoffe.

Bei den Feststofffermentationsanlagen handelt es sich um Anlagen, die den Trockenfermentationsbonus erhalten. Anlage 5 wird als Garagenfermentersystem betrieben und stellt ein klassisches Feststofffermentationsverfahren dar. Außer bei Anlage 5, die im Batchverfahren betrieben wird, handelt es sich bei allen anderen Anlagen um kontinuierlich betriebene Fermenter. Sieben der Anlagen hatten zum Zeitpunkt der Messung keine gasdichte Abdeckung der Gärrestlager. Bei den verwendeten Substraten dominieren die nachwachsenden Rohstoffe (NawaRo). Anlage 7 ist eine Anlage, bei der über 90 % der eingesetzten Substrate Wirtschaftsdünger sind. Die Anlagen 8 und 9 sind Gasaufbereitungsanlagen, wobei Anlage 8 mit einer Druckwechseladsorption und Anlage 9 mit der Druckwasserwäsche betrieben wird.

2.2 Emissionsmessungen

Die Emissionsmessungen wurden in jeweils zwei Kampagnen von ca. 5 Arbeitstagen je Anlage realisiert. Nach der Begehung der Anlage und der Identifizierung von Bereichen verstärkter Emissionen (diffuse Quellen) und Leckagen, erfolgt die Durchführung von Emissionsmessungen an geführten Quellen (Punktquellen) in Anlehnung an VDI 4200 und DIN EN 15259. Untersucht wurden die Gase Methan, Lachgas und Ammoniak. In Abhängigkeit vom Gas wurden geschlossene und offene Hauben verwendet. Auf den Gärrestlagern werden Messungen sowohl bei offener als auch bei geschlossener Haube auf eventuellen Schwimmschichten gesondert bestimmt. Emissionen, die eventuell über temporär geöffnete Überdruckventile abgegeben werden, konnten im Rahmen dieses Vorhabens nicht quantifiziert werden. Detailliertere Informationen zu den verwendeten Messmethoden und -verfahren sind in der Literatur (LIEBETRAU et al. 2011) ausführlich dargestellt.

Emissionsmessungen wurden bei den betrachteten Anlagen – sofern vorhanden – an folgenden Anlagenkomponenten vorgenommen:

- Silagelagerung
- Beschickungssystem (Feststoffdosierer, Anmaischtank, Vorgrube)
- Fermenter (Betondach, Foliendach)
- Gärrestlager (gasdicht, abgedeckt, offen)
- Gasverwertung (BHKW, Biogasaufbereitungsanlage).

Die an den Komponenten der einzelnen Anlagen gemessenen Emissionen in den zwei Messkampagnen wurden, sofern es möglich war, gemittelt.

Die gemessenen Massenströme wurden auf die produzierte Strommenge bezogen, wobei von einer Auslastung des Blockheizkraftwerks (BHKW) von 100 % zum Zeitpunkt der Messung ausgegangen wurde. Die zur Auslastung des BHKW benötigte Methanmenge wurde unter der Annahme eines elektrischen Wirkungsgrades von 40 % und einem Energiegehalt von 10 kWh/m³ Methan errechnet. Diese Größe wurde als Basis genom-

men, um die ermittelten Emissionen in Relation zu der umgesetzten Methanmenge darzustellen.

2.3 Treibhausgasbilanzen

Ausgehend von den Ergebnissen der Emissionsmessungen werden Treibhausgasbilanzen erstellt. Hierfür kommt das Instrument der Ökobilanzierung zum Einsatz. Für die Erstellung einer solchen Bilanz existieren die international gültigen Normen ISO 14040 und ISO 14044 (2006). Der Bilanzierungsrahmen der Strombereitstellung aus Biogas umfasst die Lagerung der Energiepflanzen, die Konversion zu Biogas sowie die Verstromung des Biogases. In zwei von zehn Anlagen wird das Biogas zu Biomethan aufbereitet (Anlage 8 und 9). Der Bilanzierungsrahmen wird daher für diese zwei Anlagen um die Biogasaufbereitung ergänzt. Für die Darstellung der Treibhausgasbilanzen wird angenommen, dass das Biomethan ebenfalls in einem BHKW verstromt wird.

Für alle Stufen der Prozesskette sind Input- und Outputströme von Energie sowie Hilfs- und Einsatzstoffe notwendig. Die für die Bilanzierung gültige funktionelle Einheit wird für die dargestellten Treibhausgasemissionen als 1 kWh Strom definiert. Die mit der Produktion des Biogases und Nutzung im BHKW verbundenen Aufwendungen und Emissionen werden in der Bilanzierung des Stroms aus Biogas berücksichtigt. Zur Quantifizierung der Emissionen aus dem Einsatz von Hilfsstoffen und Hilfsenergeträgern wird auf die Datenbasis des DBFZ sowie auf die international anerkannte Ecoinvent Datenbank für Ökoinventare Version 2.0 (Datenstand 2007; FRISCHKNECHT 2007) zurückgegriffen. Für die ökologische Bewertung können verschiedene Wirkungskategorien berücksichtigt werden. Im Rahmen dieser Untersuchung wird die Wirkungskategorie der Treibhausgasemissionen betrachtet, d. h., innerhalb dieser Kategorie werden die Treibhausgasemissionen für alle zu bewertenden Prozesse als CO₂-Äquivalente dargestellt. Die betrachteten Treibhausgase werden dabei mithilfe der Charakterisierungsfaktoren des Intergovernmental Panel on Climate Change 2007 (IPCC 2007) in CO₂-Äquivalente (Charakterisierungsfaktor nach IPCC 2007: Lachgas (N₂O): 298, Methan (CH₄): 25) umgerechnet.

3 Ergebnisse und Diskussion

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Emissionsmessungen als Treibhausgasbilanzen dargestellt. Die abgebildeten Ergebnisse basieren auf punktuellen Emissionsmessungen an verschiedenen Anlagenkomponenten ausgewählter Biogasanlagen, sodass Rückschlüsse auf die Emissionsbilanz der Anlagen mit Blick auf das gesamte Jahr nicht möglich sind. Die Ergebnisse sollen in erster Linie die emissionsrelevanten Quellen bestehender Anlagen verdeutlichen und Optimierungspotenziale aufzeigen. Darüber hin-

aus waren nicht alle vorhandenen Anlagenkomponenten bei allen betrachteten Anlagen gleichermaßen messtechnisch erfassbar.

Die Ergebnisse umfassen dabei lediglich die anlagenseitigen Emissionen der gemessenen Anlagenkomponenten, sodass keine vollständige Bilanzierung der betrachteten Anlagenkonzepte dargestellt ist. Für eine umfassende Bilanzierung sind neben den anlagenseitigen Emissionen auch die Emissionen aus dem Anbau der Biomasse, aus dem Transport der Biomasse zur Anlage und aus der Gärrestausbringung einzubeziehen. Darüber hinaus könnten die bei der Stromerzeugung anfallenden Koppelprodukte als Gutschriften berücksichtigt werden. Die bei der Stromerzeugung im BHKW anfallende Wärmemenge könnte somit fossile Energieträger ersetzen, sofern sie extern genutzt wird (Wärmegutschriften). Ferner können durch den Einsatz von Gülle zur Biogaserzeugung die bei der konventionellen Güllelagerung entstehenden Treibhausgasemissionen vermieden werden. Diese „eingesparten“ Emissionen können der Treibhausgasbilanz des betrachteten Biogasprozesses gutgeschrieben werden (Güllegutschrift), wenngleich hinsichtlich der Quantifizierung der Emissionen erhebliche Unsicherheiten bestehen. Durch die Anrechnung der jeweiligen Wärme- und Güllegutschriften können die dargestellten anlagenseitigen Emissionen in Abhängigkeit vom Anlagenkonzept (Höhe der externen Wärmenutzung bzw. Höhe des Anteils tierischer Exkrememente) teils erheblich reduziert werden.

Die Ergebnisse der Treibhausgasbilanz – ausgewiesen als Treibhausgasemissionen in g CO₂-Äquivalente je kWh_{el} – sind in den Abbildungen im Kapitel 3.2 dargestellt.

3.1 Ergebnisse der Anlagenmessungen

Im Folgenden werden die gemessenen Anlagenkomponenten der betrachteten Biogasanlagen kurz dargestellt.

Die Methanemissionen aus der Silagelagerung sind, wie aufgrund der niedrigen pH-Werte zu erwarten war, vernachlässigbar gering. Die Emissionen aus den verschiedenen Beschickungssystemen schwanken sehr stark, allerdings auf niedrigem Niveau und fallen für die Betrachtung der Treibhausgasbilanz nicht ins Gewicht.

Feststoffdosierer fallen emissionsseitig kaum ins Gewicht. Bei der BGA 1 traten Emissionen aufgrund eines Problems des Füllstandes im Fermenter auf; die Fütterungsöffnung befand sich zum Zeitpunkt der Messung teilweise in der Gasphase. Ein weiterer Feststoffdosierer (BGA 7) war messtechnisch nicht erfassbar. Konkret konnte, durch nach unten weisende Öffnungen, der Feststoffeintrag der BGA 9 messtechnisch nicht abgedeckt werden, um eine Emissionsmessung durchzuführen.

Die gasdichte Ausführung der Fermenter ist integraler Bestandteil einer funktionsfähigen Biogasanlage. Auf den Anlagen mit Betondeckung konnten keine Emissionen festgestellt werden – nur in einem Fall wurden an einer Leckage Emissionen festgestellt,

die allerdings nach der Reparatur in der zweiten Messkampagne nicht mehr gemessen werden konnten. So wies BGA 3 in der ersten Messperiode signifikante Emissionen ($0,56 \text{ g CH}_4/\text{kWh}_{\text{el}}$, entspricht $0,31 \%$ CH_4 -Verlust) im Bereich des Betonfermenters auf. Gravierender fällt an dieser Anlage aber ein Havariefall an einer Fermenterklappe mit $9,05 \text{ g CH}_4/\text{kWh}_{\text{el}}$ bzw. $5,04 \%$ CH_4 -Verlust ins Gewicht. In der zweiten Messkampagne waren keinerlei Emissionen in diesem Zusammenhang mehr nachweisbar.

Bei den Fermentern mit Foliendächern wurden bei 28 Messungen in 17 Fällen keine Emissionen festgestellt, das Mittel über alle Messungen beträgt $0,004 \%$ als Methanverlust. Bei BGA 4 wurden an den Folienfermentern zwar erhöhte Methankonzentrationen festgestellt, da sich aber das Leck unter der Schutzfolie in der Gasfolie befand, war eine Emissionsmessung nicht möglich. Bei BGA 10 wies nur einer von zwei Nachgärern in einer der beiden Messperioden Methanemissionen auf, bei dem anderen konnten keine Emissionen festgestellt werden.

Emissionen aus Gärrestlagern sind von vielen, teilweise saisonal stark veränderlichen Größen wie Temperatur, Luftdruck, Füllstand, Wind und Prozesscharakteristik der vorgeschalteten Biogasanlage abhängig. Die hier durchgeführten Messungen stellen immer nur einen kleinen Zeitausschnitt dar, sodass die erhaltenen Ergebnisse nicht auf das gesamte Jahr übertragbar sind. So sind hinsichtlich der Temperatur in Gärrestlagern, die einen wesentlichen Einfluss haben dürfte, bisher keine fundierten Messergebnisse verfügbar. Hinsichtlich einer exakten Bestimmung von Emissionen aus Gärrestlagern besteht daher noch weiterer Forschungsbedarf. Trotzdem zeigt die Untersuchung, dass Emissionen aus Gärrestlagern durchaus eine ernstzunehmende Größe darstellen. Die Situation der Nutzung der Gärrestlager ist teilweise sehr heterogen. Bei BGA 2 liegt kein Gärrestlager vor; hier übernimmt der Nachgärer die Endlagerfunktion. Bei der BGA 5 beziehen sich die Emissionen auf das Austragsmaterial der Biogasanlage, welches vor der Anlage bis zur Ausbringung zwischengelagert wird. Die Gärrestlager der BGA 7 bestehen aus drei Lagunen von denen nur eine als Gärrestlager verwendet wurde, die anderen beiden Lagunen dienten als Regenwasserauffangbehälter und als sogenannter Milchsee. Die zwei Gärrestlager der BGA 8 waren in der ersten Messkampagne leer und wurden während der zweiten Messkampagne gasdicht geschlossen.

In der überwiegenden Anzahl der Fälle findet eine Verwertung des Gases in Verbrennungsmotoren und die direkte Umwandlung in Elektrizität auf der Biogasanlage statt. Die Gasverwertung ist ohne Zweifel nach den offenen Gärrestlagern die größte Emissionsquelle. Durch unvermeidbare, unvollständige Verbrennung werden im Mittel zwischen $0,44$ und $2,43 \%$ des verwerteten Methans emittiert. Die Werte liegen in der gleichen Größenordnung vergleichbarer Literaturwerte (WOESCH-GALLASCH 2007, ASCHMANN et al. 2006, 2009). Der Methanschleupf ist nicht völlig vermeidbar, nur mit einer nachgeschalteten Oxidationsstufe kann dies signifikant verringert werden.

Die Biogasaufbereitung zu Biomethan verursacht in erster Linie durch den Methanverlust (Methanschlupf) und den Eigenstrombedarf der Aufbereitungsanlage klimarelevante Emissionen. Die Emissionen der Biogasaufbereitung bezüglich des Methanverlustes zeigen dabei deutliche Unterschiede. In der Regel können Methanverluste der Aufbereitungsverfahren durch den Einsatz geeigneter Nachverbrennungsverfahren reduziert werden. Bei BGA 8 wird davon ausgegangen, dass die Nachverbrennungseinrichtung (E-Flox-Anlage) außer Funktion gewesen ist und daher zum Zeitpunkt der Messung höhere Emissionen auftraten.

3.2 Darstellung der Treibhausgasbilanz

Die Treibhausgasemissionen, die seitens der betrachteten Biogasanlagen ermittelt wurden, zeigt Abbildung 1. Die Betrachtung umfasst die Silierung der Anbaubiomasse, die Einbringung in den Fermenter, die Konversion zu Biogas oder Biomethan und die Gasverwertung im BHKW.

Ersichtlich ist, dass wesentliche klimarelevante Emissionen bei der Strombereitstellung der betrachteten Biogasanlagen aus der nicht gasdicht abgedeckten Gärrestlagerung

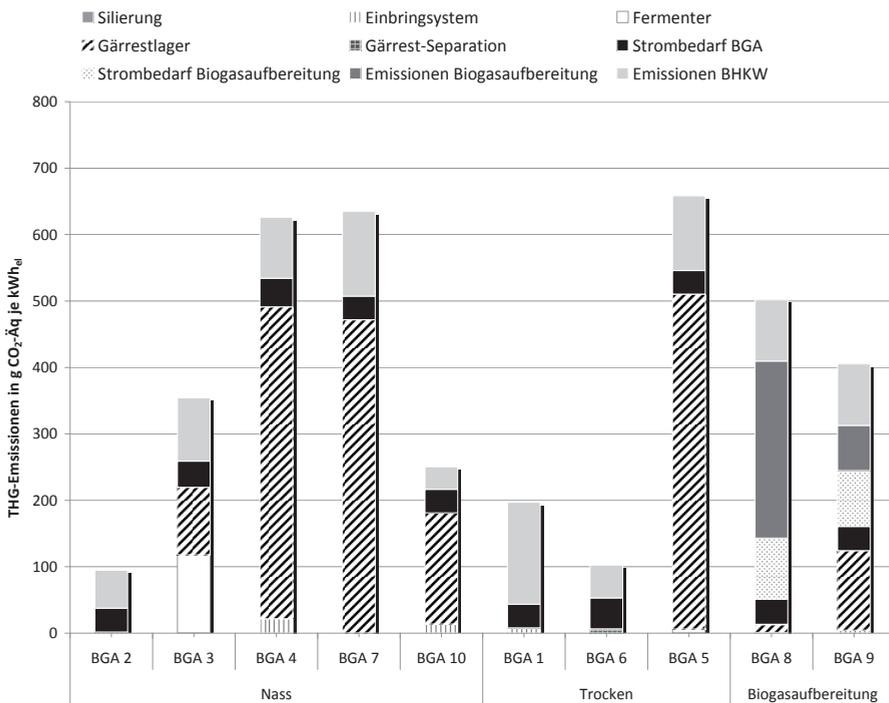


Abb. 1: Treibhausgasemissionen der betrachteten Biogasanlagen in g CO₂-Äq. je kWh_{el} unter Berücksichtigung der gemessenen Anlagenkomponenten

und der Gasverwertung resultieren. Die Messergebnisse der Emissionen aus den Gärrestlagern unterlagen großen Schwankungen und die Emissionen unterliegen einer Vielzahl von veränderlichen Einflussfaktoren und sind daher nicht auf das ganze Jahr übertragbar. Trotzdem wird deutlich, dass hier relevante Emissionen entstehen, die mit einer gasdicht abgedeckten Lagerung der Gärreste oder einer effizienteren Substratausnutzung reduziert werden können.

Da die Emissionen aus den Gärrestlagern mit Unsicherheiten behaftet sind und durch eine gasdichte Abdeckung von Gärrestlagern ein erhebliches Treibhausgas-Einsparpotenzial besteht wird, werden die Ergebnisse in Abbildung 2 zur Verdeutlichung sowohl mit (Variante a) als auch ohne Gärrestlager (Variante b) abgebildet. Erkennlich sind die erheblichen Einsparpotenziale klimarelevanter Gase.

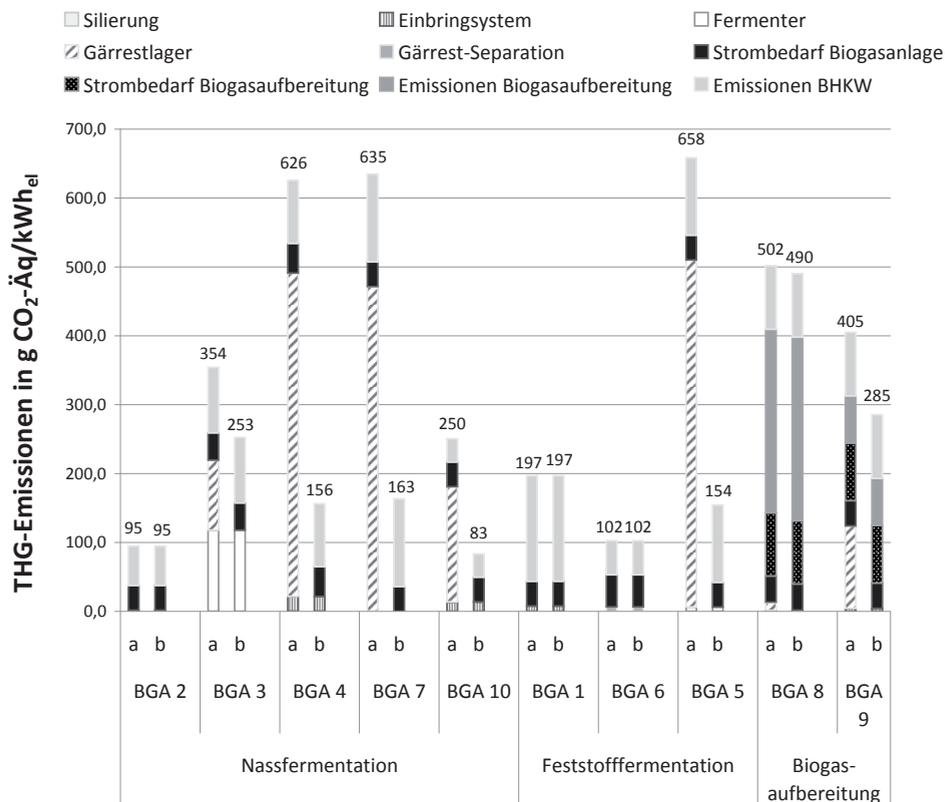


Abb. 2: Treibhausgasbilanz der betrachteten Biogasanlagen in g CO₂-Äq. je kWh_{el} mit und ohne Darstellung der Emissionen aus den Gärrestlagern (a = mit Gärrestlageremissionen; b = ohne Gärrestlageremissionen)

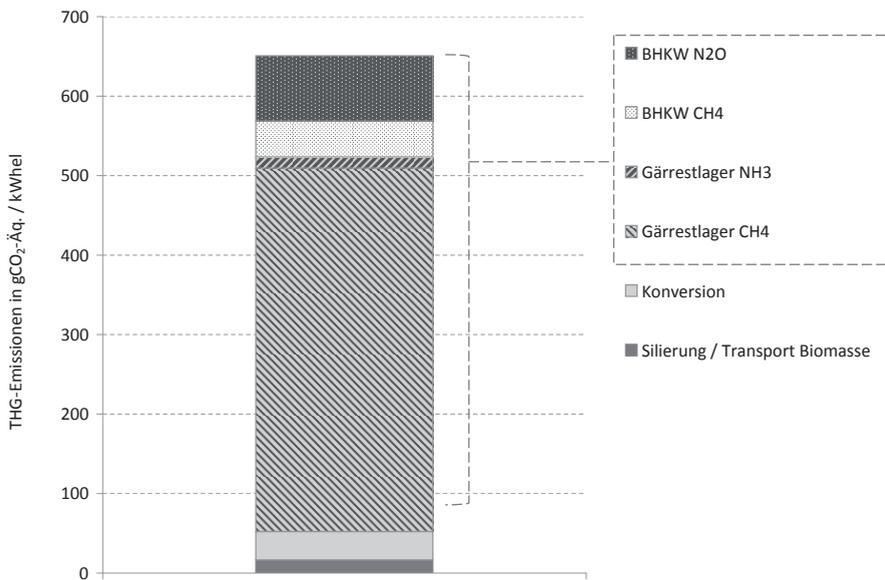


Abb. 3: Verteilung der anlagenseitigen Treibhausgasemissionen am Beispiel der BGA 7 in g CO₂-Äq. je kWh_{el}

Nicht in der Bilanzierung berücksichtigt sind die Wärmegutschriften für die Substitution fossiler Energieträger bei externer Wärmenutzung und die Anrechnung von Güllegutschriften für die vermiedenen Methanemissionen im Vergleich zur konventionellen Güllelagerung. Unter Einbeziehung dieser Gutschriften können die dargestellten klimarelevanten Anlagenemissionen zum Teil deutlich kompensiert werden.

In Abbildung 3 sind die Anteile der untersuchten direkten und indirekten klimarelevanten Emissionen (Methan, Lachgas, Ammoniak) an den ermittelten CO₂-Äquivalenten am Beispiel der BGA 7 dargestellt. Demzufolge sind für die Anlage 7 dargestellten anlagenseitigen Treibhausgasemissionen mit rund 70 % überwiegend auf die Methanemissionen des Gärrestlagers und mit rund 12,7 % auf die Lachgasemissionen des BHKW zurückzuführen, die hier in beiden Messperioden ungewöhnlich hoch waren. Betrachtet man hier die Treibhausgasemissionen allein beim BHKW, so resultieren etwa 1/3 der Treibhausgasemissionen am BHKW aus den Methanemissionen und 2/3 aus den Lachgasemissionen. Bei den Gärrestlagern stellen die Methanemissionen rund 97 % der Treibhausgasemissionen aus dem Gärrestlager, während etwa 3 % auf die Ammoniakemissionen zurückgeführt werden können. Die ermittelte Emissionsverteilung ist beispielhaft für eine Anlage abgebildet und erhebt keinen Anspruch auf Repräsentativität.

4 Zusammenfassung

Anhand der Emissionsmessungen ausgewählter Biogasanlagen konnten wesentlichen Quellen für Emissionen identifiziert werden. Die Auswertung der Treibhausgasbilanz zeigt, dass die wesentlichen Emissionsquellen die nicht gasdichte Gärrestlagerung und die Gasverwertung (BHKW, Aufbereitung) darstellen. Wesentliche Treibhausgasemissionen sind auch auf den Strombedarf der Biogasanlage bzw. der Aufbereitungsanlage zurückzuführen. Weitere klimarelevante Emissionen, die für die Biogasproduktion von Bedeutung sind, hier jedoch nicht dargestellt sind, resultieren aus dem Anbau von Biomasse und der Gärrestausrückführung.

Unter Berücksichtigung der anlagenseitigen Emissionen kann generell festgehalten werden, dass Emissionen durch unsachgemäßen Betrieb oder mangelhafter Ausführung von Konstruktionsdetails nicht häufig auftraten, jedoch in den gefundenen Fällen signifikante Emissionen entstanden. So konnten beispielsweise durch eine nicht sachgemäß verschlossene Rührwerksdurchführung am Fermenter erhebliche Methanemissionen gemessen werden, die in der Größenordnung von über 5 % der umgesetzten Methanmenge lagen. An einer anderen Stelle konnten an einer Leckage auf einem Betondach eines Fermenters Methanemissionen von 0,31 % der umgesetzten Methanmenge gemessen werden. Hier konnten nach der Reparatur in der zweiten Messperiode keine weiteren Emissionen festgestellt werden. An einigen schlecht geschmierten Seildurchführungen für Tauchmotorrührwerke konnten ebenso erhöhte Konzentrationen an Methan detektiert werden, die jedoch nicht quantifizierbar waren. Daher bietet es sich an, Kontrollen in Form von Begehungen der Anlage durchzuführen, um bei auftretenden Verlusten zeitnah handeln zu können.

Bei den genannten Emissionsquellen fallen klimarelevante Emissionen an, sodass an diesen Stellen potenzielle Minderungsmaßnahmen ansetzen sollten. In diesem Vorhaben konnte eine Bewertung von Emissionen aus Überdrucksicherung nicht durchgeführt werden. Hierzu sind weitere Untersuchungen notwendig.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass die Ergebnisse sehr unterschiedlich ausfallen. Es konnte jedoch gezeigt werden, dass die Energieproduktion aus Biogas einen erheblichen Beitrag zur Reduktion der klimarelevanten Gase leisten kann. Die exakte Bestimmung von Emissionen aus der Gärrestlagerung muss jedoch weiterhin untersucht werden, um eine eindeutige und differenzierte Bewertung zu ermöglichen.

Literatur

- Aschmann, V.; Effenberger, M.; Gronauer, A. (2009): Emissionsproblematik und Energieeffizienz biogasbetriebener BHKW im Verlauf der Standzeit, Band 1, Internationale Biogas-tagung Biogas Science, Freising, S. 196
- Aschmann, V.; Kissel, R.; Gronauer, A. (2006): Emissions- und Leistungsverhalten von Biogasverbrennungsmotoren in Abhängigkeit von der Motorwartung, Bayerisches Landesamt für Umwelt, Augsburg, S. 66
- Frischknecht, R. (2007): Ecoinvent 2007 database 2.0
- IPCC (2007): Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories
- ISO 14040 (2006): Umweltmanagement - Ökobilanz - Grundsätze und Rahmenbedingungen, Deutsche und Englische Fassung, DIN EN ISO 140 40: 2006, 10/2006
- ISO 14044 (2006): Umweltmanagement - Ökobilanz - Anforderungen und Anleitungen, Deutsche und Englische Fassung, DIN EN ISO 140 44: 2006, 10/2006
- Liebetrau, J.; Clemens, J.; Cuhls, C.; Hafermann, C.; Friehe, J.; Weiland, P.; Daniel-Gromke, J. (2010): Methane emissions from biogas-producing facilities within the agricultural sector. *Eng. Life Sci.* 10(6), pp. 1–5
- Liebetrau, J.; Reuschel, C.; Clemens, J.; Hafermann, C.; Friehe, J.; Weiland, P. (2011): Analysis of greenhouse gas emissions from 10 biogas plants within the agricultural sector. International IWA-Symposium on Anaerobic Digestion of Solid Waste and Energy Crops. Vienna, 2011
- Witt, J. et al. (2011): Monitoring zur Wirkung des Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG) auf die Entwicklung der Stromerzeugung aus Biomasse. Leipzig, März 2011.
http://www.dbfz.de/web/fileadmin/user_upload/Userupload_Neu/Stromerzeugung_aus_Biomasse_Zwischenbericht_Maerz_2011.pdf, Zugriff am 15.07.2011
- Woesch-Gallasch, S.; Enzinger, P.; Jungmaier, G.; Padinger, R. (2007): Treibhausgasemissionen aus Biogasanlagen, Graz. http://www.lea.at/download/Endbericht_THG_Biogas_.pdf

Treibhausgasbilanzen und CO₂eq-Vermeidungskosten landwirtschaftlicher Biogasanlagen

URSULA ROTH, HELMUT DÖHLER, STEFAN HARTMANN, SEBASTIAN WULF

1 Einleitung

Im Rahmen der Erneuerbaren Energien Richtlinie der EU (2009/28/EG) hat sich die Bundesrepublik auf eine Erhöhung des Anteils erneuerbarer Energien am Endenergieverbrauch von derzeit 11 auf 18 % bis 2020 verpflichtet. Die Bundesregierung hat ihre Strategie, um dieses Ziel zu erreichen, in ihrem Integrierten Energie- und Klimaprogramm sowie im Nationalen Aktionsplan für erneuerbare Energien (NREAP) festgeschrieben. Bereits jetzt werden 12,6 % der Stromproduktion aus erneuerbaren Energien aus Biogas produziert. Zugleich wird die Biomethaneinspeisung zunehmend ausgebaut, so dass weiterhin mit einem Anlagenzuwachs zu rechnen ist.

Die Nachhaltigkeit der Biogasproduktion, auch im Vergleich zu anderen erneuerbaren Energieträgern, wird immer wieder diskutiert. Neben den Treibhausgasemissionen aus der Energiepflanzenproduktion werden die zunehmende Flächenkonkurrenz zu Tierhaltungs- und Marktfruchtbetrieben und der steigende Anteil an Mais in der Fruchtfolge ebenso angeführt wie indirekte Landnutzungsänderungen, die z. B. für Biokraftstoffe auf EU-Ebene im Rahmen der Nachhaltigkeitszertifizierung als Bewertungskriterium berücksichtigt werden müssen.

Den beobachteten Fehlentwicklungen, die zum Teil durch die bisherige Gesetzgebung verstärkt wurden, soll durch die 3. Novelle des EEG entgegengewirkt werden. Im Folgenden wird das Potenzial der landwirtschaftlichen Biogasproduktion zur Treibhausgaseinsparung am Beispiel typischer, nach der Novellierung des EEG zu erwartenden, Anlagen dargestellt und die damit verbundenen Vermeidungskosten berechnet. Mit den Modellrechnungen und dem Vergleich mit Analysen von Praxisanlagen werden die wichtigsten Stellschrauben für einen effizienten Klimaschutz durch Biogasnutzung identifiziert.

2 Methoden

Zur Bewertung der landwirtschaftlichen Biogaserzeugung hinsichtlich Klimawirksamkeit und Energieaufwand muss die gesamte Prozesskette von der Biomasseproduktion über Anlagenerrichtung und -betrieb (einschl. der Konversion zu Strom und ggf. Wärme) bis hin zur Gärrestausbringung berücksichtigt werden. Die klimarelevanten Emissio-

nen (Methan, Kohlenstoffdioxid, Lachgas) sowie mögliche Gutschriften für Wärme- oder Wirtschaftsdüngernutzung werden für Einzelanlagen berechnet und mit den Werten zur Energiebereitstellung aus fossilen Ressourcen verglichen. Durch die anschließende Gegenüberstellung der Gestehungskosten für Biogasstrom und den Bereitstellungskosten für fossilen Strom und ggf. Wärme werden zusätzlich die Treibhausgasvermeidungskosten (€/t CO₂eq) berechnet. Synonym werden in diesem Beitrag auch CO₂eq- bzw. THG-Vermeidungskosten verwendet.

Die Berechnungen folgen dem allgemeinen Ansatz der Lebensweganalyse nach ISO 14040 ff. Emissionsäquivalente für die verschiedenen Materialien und Betriebsmittel stammen vor allem aus der ecoinvent-Datenbank (ecoinvent 2004–2008) und vom FFE (2005). Die Substratbereitstellung wird auf Basis von KTBL-Daten zu landwirtschaftlichen Produktionsverfahren modelliert (KTBL 2007, KTBL 2008). Direkte und indirekte Emissionen bei der Substratbereitstellung und aus Anlagenerrichtung und -betrieb werden ebenso berücksichtigt wie Leckagen und der Methanschluß des BHKW. Da von gasdicht abgedeckten Gärrestlagerbehältern ausgegangen wird, werden keine Emissionen aus dem Gärrest angerechnet.

Für die Erstellung der Treibhausgasbilanz der Biogasstromproduktion werden die so ermittelten Emissionen für die Bereitstellung einer Kilowattstunde Strom zunächst mit den Gutschriften für die Nutzung der BHKW-Abwärme (Ersatz Heizöl) sowie für die Vermeidung von Methanemissionen aus der offenen Lagerung unbehandelter Wirtschaftsdünger verrechnet. Erst bei Berechnung der CO₂eq-Vermeidungskosten werden die Emissionen des fossilen Strommixes berücksichtigt.

Die wichtigsten Annahmen sowie die hier verwendeten Referenzen für Strom und Wärme sind in Tabelle 1 zusammengefasst.

Tab. 1: Annahmen und Referenzen

Referenzen	
Strom: fossiler Strommix	0,72 kg CO ₂ eq/kWh _{el} ; 4,5 Ct/kWh _{el}
Wärme: Heizöl	0,31 kg CO ₂ eq/kWh _{th} ; 6,5 Ct/kWh _{th}
Substratkennwerte	
Gasertrag	nach KTBL 2010
Silageverluste	12 % Masse-FM
N₂O-Emissionen aus der Energiepflanzenproduktion (IPCC 2006)	
Direkt	1,0 % des applizierten N
Indirekt ¹⁾	0,37 % des applizierten N
Diffuse Emissionen	
Leckagen	1,0 % des erzeugten Methans
Methanschluß BHKW	0,5 % des erzeugten Methans
Methanemissionen Gärrestlager	keine (gasdichtes Endlager)
Emissionsminderung durch Wirtschaftsdüngernutzung (IPCC 2006) (KTBL 2010)	10 % des pot. CH₄ bei Rindergülle 17 % des pot. CH₄ bei Schweinegülle

¹⁾ Durch Eintrag von freigesetztem NH₃, oberflächlichem N-Austrag und Leaching.

Bei der Auswahl der betrachteten Anlagen wurden die wichtigsten Kriterien des neuen EEG (Stand Juni 2011) umgesetzt (Tab. 2):

- Begrenzung des Maisanteils auf max. 60 % Masseanteil,
- Mindestwärmenutzung von 60 % (25 % für Fermenterbeheizung anrechenbar, d. h. mind. 35 % externe Wärmenutzung),
- Sondervergütung für Anlagen bis 75 kW bei mind. 80 % Masseanteil Gülle.

Tab. 2: Die wichtigsten Kenndaten der Modellanlagen

	WSD	NawaRo	
	75 kW	150 kW	500 kW 1 000 kW
Substrate (% FM-Input)			
Rindergülle ¹⁾	80 %		20 %
Maissilage	20 %		60 %
Getreide-GPS	0 %		20 %
Transportentfernung NawaRo und Gärreste ²⁾		3 km 5 km	
Wärmenutzung extern ³⁾ (% der prod. Wärme)	30 %		40 %

WSD: Wirtschaftsdünger GPS: Ganzpflanzensilage

¹⁾ Betriebseigene Gülle, d. h. kein Transport.

²⁾ Lediglich Berücksichtigung des NawaRo-bedingten Anteils am Gärrest (Transport des Gülleanteils ist der Tierhaltung zuzurechnen).

³⁾ Zusätzlich 25 % für Fermenterbeheizung (nach Entwurf zur EEG-Novelle 2012).

3 Ergebnisse und Diskussion

3.1 Gesteungskosten von Biogasstrom

Die Stromgestehungskosten nehmen mit zunehmender Anlagengröße ab (Abb. 1), Ursache hierfür sind die vergleichsweise höheren spezifischen Investitionen für kleinere Anlagen. Während bei der 75 kW-Anlage die Hälfte der Kosten kapitalbedingt ist, sind dies bei der 1 MW-Anlage nur noch lediglich ein Viertel. Den zweiten entscheidenden Kostenfaktor stellen die Substratbereitstellungskosten (inkl. Transport) dar. Diese unterscheiden sich aufgrund des einheitlichen Substratmixes nur wenig in ihrer absoluten Höhe für die NawaRo-Anlagen. Prozentual stellen sie jedoch bei den beiden größeren Anlagen die wichtigste Kostengröße mit annähernd 50 % dar, da hier zugleich die spezifischen Kapitalkosten deutlich unter denen der 150 kW Anlage liegen. Bei der kleinen Gülleanlage hingegen beläuft sich der Anteil der Substrate an den Gesamtkosten durch den geringen NawaRo-Anteil und deutlich höhere spezifische Kapitalkosten nur auf 22 %. Betriebsmittel, Reparaturen und Arbeitskosten sind für alle Anlagen untergeordnete Kostenfaktoren. Höhere Kosten für Betriebsmittel bei den beiden kleinen Anlagen sind durch den Zündölbedarf der BHKWs bedingt.

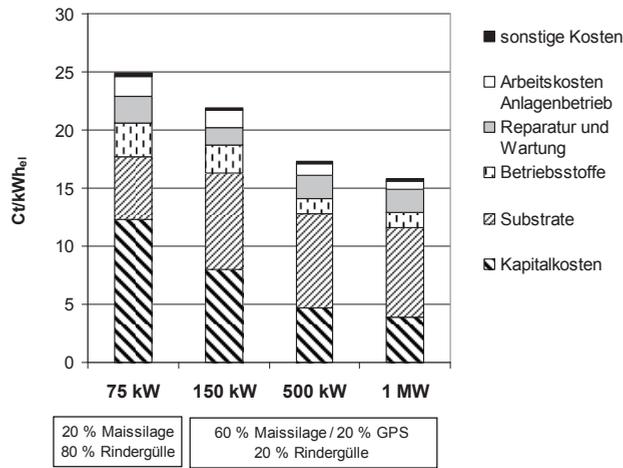


Abb. 1: Stromgestehungskosten für die Biogasanlagenmodelle (Bruttokosten, d. h. ohne Berücksichtigung der Wärmeeinnahmen)

3.2 Treibhausgasemissionen von Biogasstrom

Die Gesamtemissionen der Biogasproduktion und -konversion zu Strom belaufen sich für die betrachteten Anlagen auf ca. 0,29–0,34 kg CO₂eq/kWh_{el} (Abb. 2). Die Errichtung der Biogasanlage selbst hat nur einen geringen Anteil an den Gesamtemissionen; dies gilt auch für den Substrat- und Gärrestransport.

Es zeigen sich im vorliegenden Vergleich keine gravierenden Unterschiede zwischen den NawaRo- und der güllebasierten Anlage: Trotz des deutlich niedrigeren NawaRo-Anteils bei der Gülleanlage (20 gegenüber 80 % bei den mit NawaRo betriebenen Anlagen) liegen die Gesamtemissionen je kWh_{el} lediglich um ca. 15 % niedriger als für die NawaRo-Anlagen. So ist bei der 75 kW Gülleanlage der Energiepflanzenanbau in der Summe für ca. 38 % der Gesamtemissionen verantwortlich, im Vergleich zu 51–54 % bei den NawaRo-Anlagen. Dies ist bedingt durch den höheren Gasertrag von Maissilage im Vergleich zur Gülle, die bei der 75 kW Gülleanlage trotz 80 % Massenanteil lediglich für 36 % der gesamten Stromproduktion (ohne Berücksichtigung des Anteils aus Zündöl (6,6 %)) verantwortlich ist. Den etwas geringeren Emissionen aus dem Energiepflanzenanbau bei der Gülleanlage stehen zudem zusätzliche Emissionen bei der Anlagenerrichtung, aus dem Zündöl und beim Transport sowie durch den geringeren BHKW-Wirkungsgrad gegenüber.

Ergebnisse aus vergleichbaren Berechnungen (nicht dargestellt) zeigen, dass bei einem Maisanteil von nur 5 % bereits 21 % der Emissionen je kWh_{el} auf den Maisanbau zurückzuführen sind sowie 27 % der Stromproduktion. Selbst bei einer Steigerung des Maisan-

teils von 5 % auf 90 % sind lediglich 49 % der spezifischen Treibhausgasemissionen auf den Energiepflanzenanbau zurückzuführen, bei einem Anteil an der Stromproduktion von dann 98 %. Für überwiegend mit Gülle betriebene Anlagen bis 75 kW bleibt nach dem neuen EEG die Sondervergütung von 25 Ct/kWh_{el} bis zu einem Maisanteil von 20 Masse-% erhalten. Aus Gründen der ökonomischen Optimierung ist daher damit zu rechnen, dass v.a. Anlagenkonzepte mit dem maximal zulässigen Anteil umgesetzt werden, mit entsprechend höheren spezifischen CO₂eq-Emissionen für den produzierten Strom als für Anlagen mit höheren Gülleanteilen.

In der Darstellung in Abbildung 2 wird der Energiepflanzenanbau nicht nach Mais- und GPS-Anbau differenziert. Im Vergleich zu Mais entstehen beim GPS-Anbau jedoch um 25 % höhere Emissionen bezogen auf die Frischmasse aufgrund der geringeren Methanhektarerträge. Die Begrenzung des Maisanteils im neuen EEG bedingt daher je nach Wahl der Alternative u. U. höhere spezifische Treibhausgasemissionen aus dem Energiepflanzenanbau im Vergleich zu älteren Anlagen, die als NawaRo oftmals lediglich Mais-silage einsetzen.

Neben der Biomasseproduktion haben die diffusen Emissionen einen bedeutenden Anteil an den gesamten Treibhausgasemissionen. Da sowohl für den BHKW-Schlupf als auch für Leckagen default-Werte verwendet werden (in der Summe 1,5 % des produzierten Methans), unterscheidet sich der Anteil dieser Emissionsquellen bei den betrachteten Anlagen nicht. Für beide Faktoren ist jedoch in der Praxis mit einer großen Spannweite zu rechnen und von oftmals höheren Werten auszugehen (LIEBETRAU et al. 2011). Beim

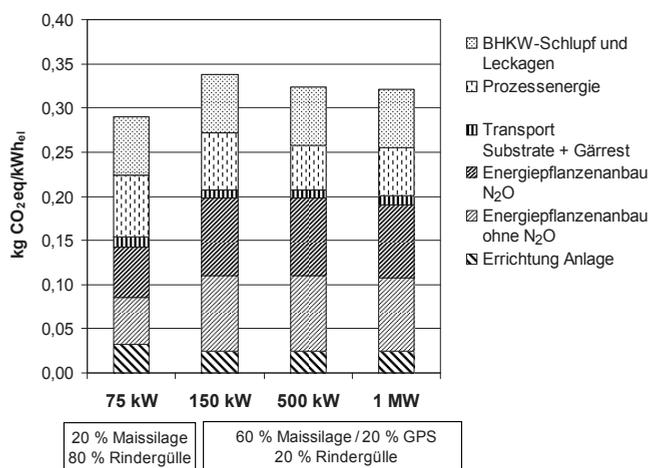


Abb. 2: Treibhausgasemissionen bei der Biogasproduktion und -konversion auf vier landwirtschaftlichen Biogasanlagen

BHKW-Schlupf ist dies überwiegend technisch bedingt und hängt vom BHKW-Wirkungsgrad oder dem Vorhandensein einer Abgasreinigung ab (ASCHMANN et al. 2009), während die Höhe der Leckagen häufig auf Fehler im Bau bzw. beim Anlagenmanagement zurückzuführen sind (LIEBETRAU et al. 2011). Eine Steigerung der diffusen Emissionen um nur 1 % des produzierten Methans führt zu zusätzlichen Emissionen von 0,044 kg CO₂eq/kWh_{el} und somit zu einer deutlichen Erhöhung der Gesamtemissionen (vgl. Abb. 2).

Restgasemissionen sind im vorliegenden Beitrag nicht berücksichtigt, da von einer gasdichten Ausführung der Gärrestlager ausgegangen wird, wie es bei neueren Anlagen i. A. der Fall ist. Ergebnisse des BMP II (FNR 2009) zeigen, dass die offene Lagerung von Gärresten zu bedeutenden Methanverlusten führen kann, die selbst für mehrstufige Anlagen bei suboptimalen Prozessbedingungen eine Größenordnung von über 5 % des produzierten Methans erreichen können. Zugleich bewirkt eine schlechte Substratausnutzung deutlich höhere anteilige Emissionen aus dem Energiepflanzenanbau, da für die gleiche Strommenge ein höherer Substratinput benötigt würde als unter optimalen Gärbedingungen.

Als weiterer wichtiger Faktor ist der Prozessenergiebedarf zu nennen. Neben dem Prozessstrom (Zukauf von Netzstrom) ist bei den beiden kleinen Anlagen (75 und 150 kW) zusätzlich der Zündölbedarf berücksichtigt. Der Prozessstrombedarf beläuft sich bei der kleinen Gülleanlage auf 8 %, bei den NawaRo-Anlagen auf 7 % des produzierten Stroms. Zusätzliche Verbraucher, z. B. zur Substrataufbereitung, oder falsch dimensionierte Komponenten können den Prozessstrombedarf auf deutlich über 10 % der Stromproduktion steigen lassen, verbunden mit entsprechend höheren Gesamtemissionen bzw. -kosten.

3.3 Treibhausgasbilanz und –vermeidungskosten von Biogasstrom

Lediglich die 75 kW Gülleanlage weist nach Abzug der Gutschriften für Wärme und Wirtschaftsdüngernutzung keine CO₂eq-Emissionen für die Produktion von Biogasstrom auf (Abb. 3). Die drei NawaRo-Anlagen verursachen demgegenüber 0,16–0,17 kg CO₂eq-Emissionen je kWh Biogasstrom. Bei Gegenüberstellung mit den Emissionen des fossilen Strommixes ergibt sich für die Gülleanlage eine um 35–40 % höhere Treibhausgaseinsparung als bei den NawaRo-Anlagen (0,76 gegenüber ca. 0,55 bzw. 0,56 kg CO₂eq/kWh_{el}; nicht abgebildet).

Die drei NawaRo-Anlagen unterscheiden sich aufgrund der zugrunde liegenden Annahmen lediglich hinsichtlich der CO₂eq-Vermeidungskosten: Bedingt durch sinkende Stromgestehungskosten nehmen diese mit der Anlagengröße stark ab. Aus diesem Grund liegen bei der kleinen Gülleanlage trotz der deutlich höheren Treibhausgaseinsparung die Vermeidungskosten lediglich 10 % unter denen der kleinsten NawaRo-Anlage. Keine der Anlagen erreicht die als volkswirtschaftlich vertretbar angesehene Schwelle von max. 100 € je Tonne eingespartem CO₂eq. Auch die 1 MW NawaRo-Anlage liegt mit 156 €/t

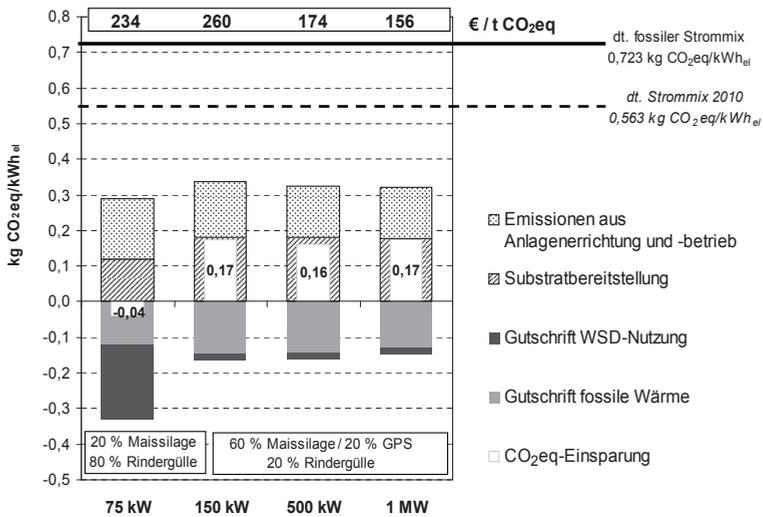


Abb. 3: Treibhausgasbilanzen und -vermeidungskosten auf den Modellanlagen. Die ausgewiesenen CO₂eq-Vermeidungskosten beziehen sich auf den deutschen fossilen Strommix.

CO₂eq deutlich darüber. Allerdings wurde die genannte Wirtschaftlichkeitsspanne für andere Bereiche abgeleitet (z. B. Maßnahmen zur Steigerung der Energieeffizienz wie Wärmedämmung). Für die Energiebereitstellung erscheinen höhere Werte durchaus vertretbar, nicht zuletzt unter dem Gesichtspunkt der Ressourcenschonung oder vor dem Hintergrund eines Wegfalls der Kernenergie. Zudem stellt Biogas eine der wenigen grundlastfähigen Energiequellen für den Bereich der Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien dar.

Auch ohne die Nutzung der BHKW-Abwärme würden auf den Modellanlagen noch Treibhausgase im Vergleich sowohl zum fossilen als auch zum tatsächlichen Strommix (für 2010: 0,563 kg CO₂eq/kWh_{el}; UBA 2011) eingespart.

4 Wichtige Einflussfaktoren auf Treibhausgasbilanzen und -vermeidungskosten

4.1 Wärmenutzungsgrad

Neben Substratzusammensetzung und dem Prozessenergiebedarf ist die Wärmenutzung einer der wichtigsten direkt beeinflussbaren Faktoren für die Treibhausgaseinsparung bei der Biogasproduktion. Da sich die Wärmenutzung durch die damit verbundene Wärmegutschrift und die Einsparung von Heizölkosten sowohl emissions- als auch kostenseitig positiv auswirkt, kann hier eine Optimierung die Vermeidungskosten deutlich senken.

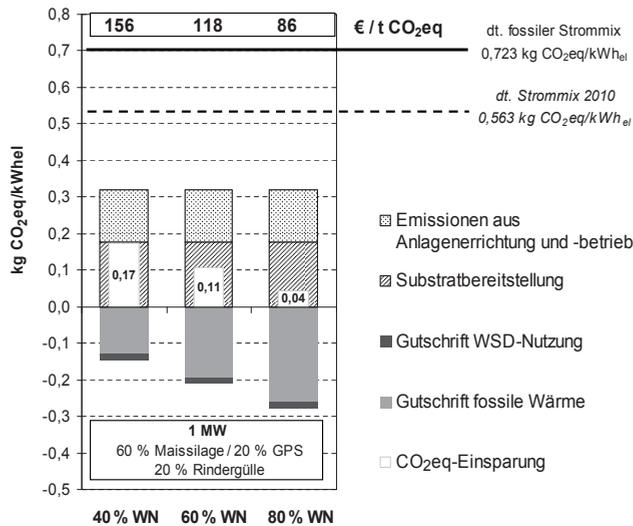


Abb. 4: Einfluss der Wärmenutzung auf Treibhausgasbilanz und -vermeidungskosten einer 1 MW NawaRo-Biogasanlage. Die ausgewiesenen CO₂eq-Vermeidungskosten beziehen sich auf den deutschen fossilen Strommix.

In der Praxis lassen sich deutlich höhere Wärmenutzungsraten realisieren als für die Modellrechnungen (vgl. Tab. 2) angenommen. Der Einfluss der Wärmenutzungsrate auf die CO₂eq-Vermeidungskosten ist daher in Abbildung 4 am Beispiel der 1 MW NawaRo-Anlage für 40, 60 bzw. 80 % externe Wärmenutzung dargestellt. Durch die Nutzung von 60 % der produzierten Wärme können die Vermeidungskosten im Vergleich zu einer 40%igen Nutzung von 156 auf 118 €/t CO₂eq und somit um ein Viertel reduziert werden. Bei 80%iger externer Wärmenutzung können Vermeidungskosten von deutlich unter 100 € erreicht werden.

Bei überwiegend mit Gülle betriebenen Anlagen können entsprechende Wärmenutzungsgrade allerdings nicht erreicht werden, da in der Heizperiode der Eigenwärmebedarf der Anlage ebenfalls sehr hoch ist und nur begrenzt Wärme abgegeben werden kann. Dies wurde bei der kleinen Gülleanlage dadurch berücksichtigt, dass der über das gesamte Jahr erreichbare Anteil der externen Wärmenutzung hier mit lediglich 30 % der produzierten Wärme angesetzt wurde. Im Einzelfall sind jedoch auch hier durch entsprechende Wärmekonzepte höhere Nutzungsgrade realisierbar.

4.2 Indirekte Landnutzungsänderung (iLUC) durch Energiepflanzenanbau

Im Bereich der Biokraftstoffe ist mittlerweile der Nachweis einer nachhaltigen Biomasseproduktion verpflichtend (RENEWABLE ENERGY DIRECTIVE 2009 (RED), umgesetzt durch Biokraftstoff-Nachhaltigkeitsverordnung 2009 (Biokraft-NachV)). Dies umfasst auch die Ab-

schätzung von dadurch verursachten indirekten Landnutzungsänderungen (iLUC), die mit einer Freisetzung von im Boden gebundenen CO₂ verbunden und dem jeweiligen Biokraftstoff bei der Treibhausgasbilanzierung zuzurechnen ist. Eine innerhalb der EU abgestimmte Methodik zur Quantifizierung von iLUC existiert noch nicht; der deutsche Vorschlag (FRITSCHKE et al. 2010) befindet sich noch in der Diskussion (IFEU 2009; FRITSCHKE et al. 2011).

Eine Anwendung dieses Kriteriums auf den gesamten Energiepflanzenanbau, unabhängig vom Endprodukt, wird von verschiedenen Seiten gefordert (z.B. FRITSCHKE et al. 2010 und 2011). Mit Hinweis auf den derzeit in Deutschland noch überwiegenden Anbau von NawaRo zur Biogasproduktion auf ehemaligen Stilllegungsflächen, wird dieser Faktor jedoch von anderer Seite zum Teil als zumindest momentan nicht relevant angesehen. Allerdings kann bei einem weiteren Ausbau der energetischen wie stofflichen Biomassenutzung für die Zukunft ein solcher Effekt nicht ausgeschlossen werden – gerade vor dem Hintergrund der zum Teil ambitionierten nationalen und EU-weiten Ausbauziele für Erneuerbare Energien. In diesem Fall müssten iLUC auch für weitere bzw. alle Bereiche der Biomasseproduktion bei der Bewertung der Nachhaltigkeit einbezogen werden. Daher wird hier exemplarisch die Auswirkung von iLUC auf die Treibhausgaseinsparung und die Vermeidungskosten von Biogasanlagen dargestellt (Abb. 5). Als Anhaltswert für das Ausmaß von iLUC wird auf den von FRITSCHKE et al. (2010) vorgeschlagenen Wert von 3,5 t CO₂eq/ha • a zurückgegriffen. Dieser wird von den Autoren als untere Grenze angegeben und erscheint vor dem Hintergrund bisher nicht oder nur in geringem Umfang auftretender iLUC für eine erste Bewertung gerechtfertigt.

Selbst bei der mit lediglich 20 % Masseanteil Maissilage betriebenen Anlage steigen die CO₂eq-Emissionen der Stromproduktion aus Biogas bei Berücksichtigung von iLUC um über 40 %. Aufgrund der hohen Güllegutschrift und der 30%igen Wärmenutzung wird dieser Effekt im Vergleich zur 1 MW NawaRo-Anlage in der Bilanz jedoch abgeschwächt. Bei der Bilanzierung gegenüber fossilem Strom ergibt sich lediglich eine Verringerung der Treibhausgaseinsparung um nur 16 % bei um 20 % höheren Vermeidungskosten. Bei der mit 80 % NawaRo betriebenen Anlage resultieren aus iLUC um 57 % höhere Emissionen für die Biogasstromproduktion und in der Folge um ein Drittel geringe Einsparungen gegenüber fossilem Strom und um 50 % höhere Vermeidungskosten. Auch hier wirkt sich die Begrenzung des Maisanteils durch das neue EEG negativ aus, da Ganzpflanzensilage als gewählte Alternative einen höheren Flächenbedarf für die Produktion des entsprechenden Stromäquivalents aufweist.

Bereits unter Annahme von geringen CO₂-Freisetzungsraten durch iLUC (3,5 t/ha • a) ist der Effekt auf die Treibhausgasemissionen bzw. -einsparung bei NawaRo-Anlagen also erheblich, während für überwiegend mit Gülle betriebene Anlagen (> 90 % Masseanteil Gülle) hinsichtlich der Einsparungen und Vermeidungskosten nur geringe Änderungen zu erwarten sind.

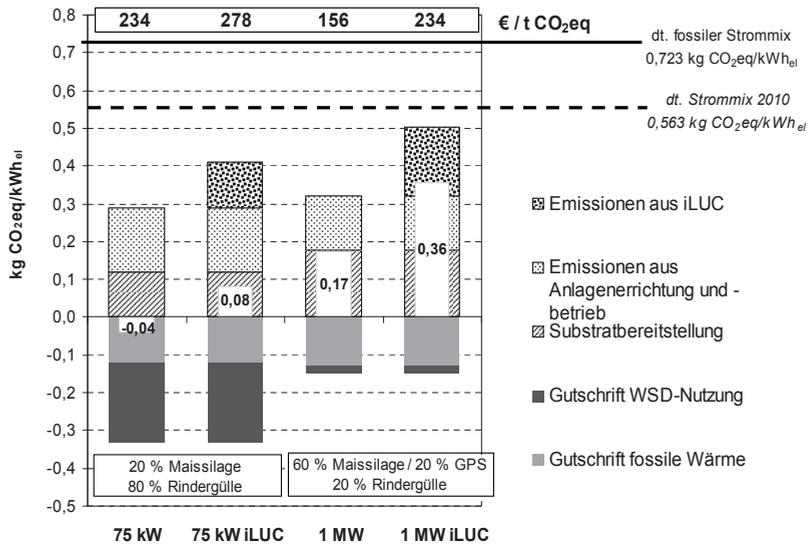


Abb. 5: Treibhausgasbilanz und -vermeidungskosten für zwei Modellbiogasanlagen bei Einbeziehung von indirekten Landnutzungsänderungen (iLUC) durch den Energiepflanzenanbau. Die ausgewiesenen CO₂eq-Vermeidungskosten beziehen sich auf den deutschen fossilen Strommix.

4.3 Wirtschaftsdünger-/Reststoffnutzung

Die positive Wirkung des Einsatzes von Wirtschaftsdüngern bei der Biogasproduktion zeigt sich bei der 75 kW Modellanlage aufgrund des noch 20%igen Maisanteils bei alleiniger Betrachtung der Emissionen des Biogasprozesses nur eingeschränkt (Abb. 1). Neben Wirtschaftsdüngern stellen Reststoffe, auch nicht-landwirtschaftliche, eine sinnvolle Alternative für eine klimaeffiziente Biogasproduktion dar. Über den Transport hinaus sind diesen je nach Stoff und Verfahren keine oder nur geringe Treibhausgasemissionen für ihre Bereitstellung zuzuschreiben.

Das mögliche Potenzial der Wirtschaftsdünger- und Reststoffnutzung lässt sich an Ergebnissen von zwei Praxisanlagen zeigen, die im Rahmen eines EU-Projektes vor und nach Umsetzung von Optimierungsmaßnahmen unter den Gesichtspunkten Wirtschaftlichkeit und Klimarelevanz bilanziert wurden (Abb. 6; ROTH et al. 2010). Bei Anlage A (1 MW) wurde ein Großteil der Energiepflanzen im Substratmix durch Glycerin aus der Biodieselproduktion (nach 2009/28/EG keine Allokation von Treibhausgasemissionen) ersetzt. In Anlage B (1,4 MW) werden neben Wirtschaftsdüngern lediglich 10 % Futterreste aus dem angeschlossenen Tierhaltungsbetrieb eingesetzt. Da diese Futterreste als Reststoffe ohne CO₂eq-Allokation gelten, müssen bei dieser Anlage keine Emissionen aus der Substratbereitstellung berücksichtigt werden. Zusätzlich ließ sich durch ein optimiertes Wärmenutzungskonzept mit Trocknung landwirtschaftlicher Güter die Treibhausgasbilanz verbessern.

Es zeigt sich deutlich, dass durch die Verwendung von Wirtschaftsdüngern und Reststoffen sehr günstige Treibhausgasbilanzen mit hohen Einsparungen an CO₂eq möglich sind. Mit solchen Anlagenkonzepten lassen sich Vermeidungskosten von unter 100 €/t CO₂eq erreichen und z.T. deutlich unterschreiten. Strukturen wie bei der untersuchten Praxisanlage B sind jedoch nicht häufig gegeben, so dass vergleichbare Konzepte nur in geringem Umfang zu realisieren sind.

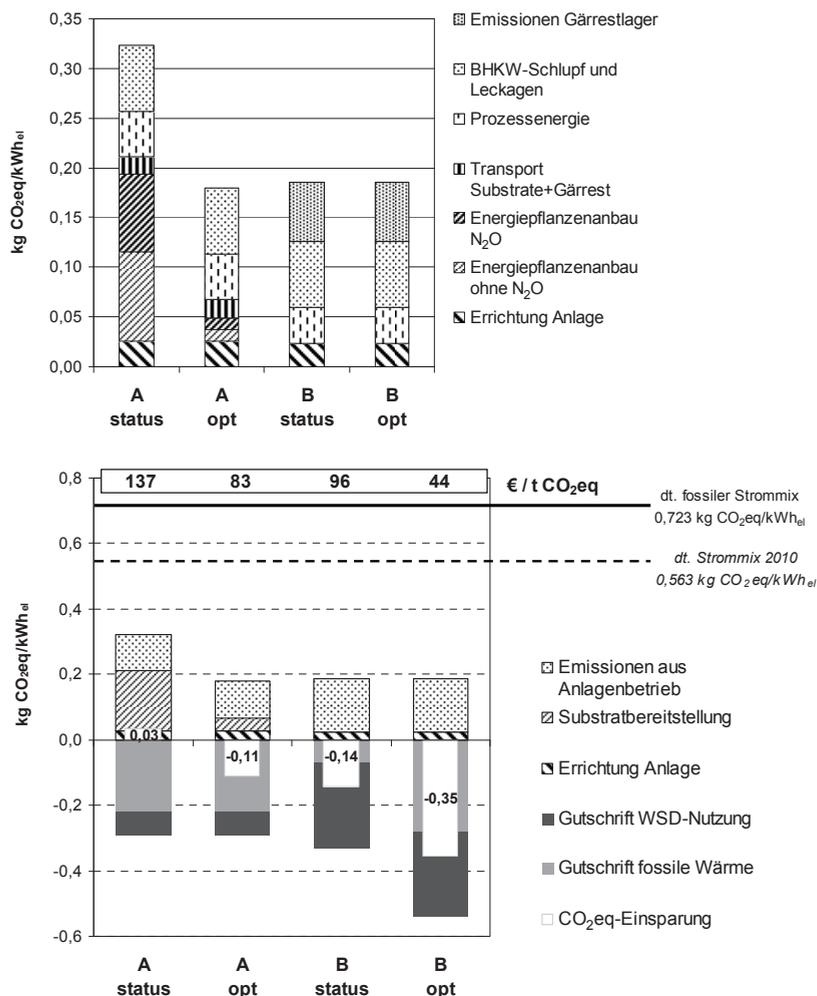


Abb. 6: CO₂eq-Emissionen (oben) sowie Treibhausgasbilanz und -Vermeidungskosten von zwei landwirtschaftlichen Praxisbiogasanlagen vor und nach Optimierung. Anlage A (1 MW): Ersatz von NawaRo durch Glycerin aus der Biodieselproduktion, Anlage B (1,4 MW): Trocknung landwirtschaftlicher Produkte (ROTH et al. 2010). Die ausgewiesenen CO₂eq-Vermeidungskosten beziehen sich auf den deutschen fossilen Strommix.

Auch bei dieser Anlage besteht zudem auch nach Umsetzung des Wärmekonzepts noch Optimierungspotenzial, indem durch gasdichte Abdeckung des Gärrestlagers und Restgasnutzung nochmals 30 % an Emissionen eingespart und zusätzlich Strom produziert werden könnten. Als Restgaspotenzial wurde der im BMP II ermittelte Mittelwert für mehrstufige Anlagen (1,4 % des produzierten Methan; FNR 2009) herangezogen.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Die Biogasproduktion kann eine signifikante Senkung der Klimagasemissionen leisten, CO₂eq-Einsparungen von 500 bis 1000 g CO₂eq/kWh_{el} sind realistisch. Allerdings liegen für die hier ausgewählten Anlagenmodelle die CO₂eq-Vermeidungskosten deutlich oberhalb des als volkswirtschaftlich vertretbar angesehenen Bereichs von 50–100 €/t CO₂eq (IPCC). Dies gilt auch für kleine Wirtschaftsdüngeranlagen, bei denen hohe Stromgestehungskosten (größenbedingt hohe kapitalgebundene Kosten) die im Vergleich zu NawaRo-Anlagen höheren Treibhausgaseinsparungen ausgleichen.

In Praxisanlagen können CO₂eq-Vermeidungskosten von unter 100 €/t CO₂eq erreicht und zum Teil sogar deutlich unterschritten werden. Auch bei bereits bestehenden Anlagen besteht oftmals Optimierungspotenzial, das auch aus ökonomischer Sicht zu nutzen ist. Dies gelingt jedoch nur durch Umsetzung der folgenden Maßnahmen:

- optimierte Nutzung von Wirtschaftsdüngern und/oder Reststoffen,
- Nutzung hoher Anteile der BHKW-Abwärme,
- effiziente Rohstofferzeugung und -ausnutzung sowie
- Minimierung von Methanverlusten.

Die Einbeziehung von indirekten Landnutzungsänderungen (iLUC) durch den Energiepflanzenanbau und den damit verbundenen CO₂-Emissionen erhöht für Anlagen auf NawaRo-Basis die Vermeidungskosten.

Die Begrenzung des Maisanteils im Substratmix durch das neue EEG auf max. 60 % des Frischmasseinputs kann für Anlagen mit einem hohen NawaRo-Anteil zu höheren spezifischen CO₂eq-Emissionen des Biogasstroms führen, da für eine Reihe der alternativen Energiepflanzen die Emissionen aus dem Anbau deutlich über denen von Mais liegen. Aufgrund des zum Teil höheren Flächenbedarfs der Alternativen steigen auch die Emissionen durch indirekte Landnutzungsänderungen.

Zugleich wird bei den vom neuen EEG durch die Sondervergütung von 25 Ct/kWh_{el} favorisierten Gülleanlagen bis 75 kW der emissionsmindernde Effekt nur eingeschränkt wirksam, falls der gesetzlich zulässige Höchstanteil an NawaRo von 20 % ausgeschöpft wird. Unter dem Gesichtspunkt der Treibhausgaseinsparung sind Konzepte mit deutlich über 90 % Gülle im Frischmasseinput zu favorisieren.

Literatur

- Aschmann, V.; Effenberger, M., Gronauer, A. (2009): Emissionsproblematik und Energieeffizienz biogasbetriebener BHKW im Verlauf der Standzeit, Vol. 1, Internationale Biogastagung Biogas Science, Freising. S. 193–200
- EC (2010): Report from the Commission on indirect land-use change related to biofuels and bioliquids COM (2010) 811 final. URL: <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=COM:2010:0811:FIN:DE:PDF> (Zugriff am 15.6.2011)
- ecoinvent (Swiss Centre for Life Cycle Inventories, 2004–2008): The ecoinvent data v2.0
- FFE (2005): Ergebnisse zur Ganzheitlichen Bilanzierung. www.ffe.de
- FNR (2009): Biogas-Messprogramm II (BMP II), Gülzow
- Fritsche, U.; Hennenberg, K.; Hermann, A.; Hünecke, K.; Herrera, R.; Fehrenbach H.; Roth, E.; Hennecke, A.; Giegrich, J. (2010): Entwicklung von Strategien und Nachhaltigkeitsstandards zur Zertifizierung von Biomasse für den internationalen Handel. Hrsg. Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau
- Fritsche, U.; Wiegman, K. (2011): Indirect Land Use Change and Biofuels. Studie im Auftrag des Europäischen Parlaments. URL: <http://www.europarl.europa.eu/activities/committees/studies/download.do?language=en&file=35128> (Zugriff am 15.6.2011)
- ifeu (2009): Synopse aktueller Modelle und Methoden zu indirekter Landnutzungsänderung ILUC – Kurzfassung. URL: http://www.bdbe.de/downloads/PDF/fachinformationen/ifeu-Studie_ILUC/ifeu_Kurzfassung_deutsch.pdf (Zugriff am 15.6.2011)
- IPCC (2006): Guidelines for national green house gas inventories, Volume 4 Agriculture, Forestry and other Land use change, URL: <http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/vol4.html>
- KTBL (2007): MaKost Maschinendatenbank. Online database: <http://www.ktbl.de/index.php?id=800>
- KTBL (2010): Gasausbeute in landwirtschaftlichen Biogasanlagen. Heft 88, 36 S.
- KTBL (2011): Feldarbeitsrechner; URL: <http://www.ktbl.de/index.php?id=806>; Abrufdatum: 10.02.2011
- Liebetrau, J.; Daniel-Gromke, J.; Reuschel, Ch.; Oehmichen, K.; Clemens, J.; Hafermann, C.; Weiland, P.; Friehe, J. (2011): Bewertung klimarelevanter Gase aus landwirtschaftlichen Biogasanlagen auf der Basis von Emissionsmessungen. In: Biogas in der Landwirtschaft – Stand und Perspektiven. FNR/KTBL-Kongress vom 20.–21.9.2011 in Göttingen, S. 185–195
- Roth, U.; Döhler, H.; Niebaum, A.; Amon, T. und G. Friedl (2010): Treibhausgasbilanzen und -minderungskosten landwirtschaftlicher Biogasanlagen. In: OTTI (Hrsg.; 2010): 19. Symposium „Bioenergy“ – Festbrennstoffe, Biokraftstoffe, Biogas. Tagungsband, S. 284–288. Ostbayerisches Technologie-Transfer-Institut e.V. (OTTI), Regensburg, 379 S.
- UBA (2011): Entwicklung der spezifischen Kohlendioxid-Emissionen des deutschen Strommix 1990–2009 und erste Schätzung 2010. URL: <http://www.umweltbundesamt.de/energie/archiv/co2-strommix.pdf> (Zugriff am 15.6.2011)

Wildpflanzenmischungen zur Biogasgewinnung

BIRGIT VOLLRATH, ANTJE WERNER

1 Wildpflanzenansaaten als wertvolle Ergänzung zum Energiemais

In Regionen mit hoher Biogasanlagendichte entstehen häufig monotone, von Maiskulturen geprägte Landschaften, die nur wenigen Tierarten geeignete Lebensräume bieten und vielfältige ökologische Risiken bergen. Gerade hier können mehrjährige wildpflanzenreiche Mischansaaten zur Biogasgewinnung einen wertvollen Beitrag im Sinne einer nachhaltigen, natur- und umweltverträglichen Energieproduktion leisten. Auf Teilbereichen vorhandener Produktionsflächen eingesetzt, erhöhen sie die Biodiversität in der Agrarlandschaft, schaffen Lebensräume für Vögel, Fledermäuse, Insekten und andere Wildtiere und werten das eintönige Landschaftsbild durch bunte Blüten auf, die gleichzeitig Bienen und anderen Insekten als Nahrungsquelle dienen.

Als extensives Anbausystem mit reduziertem Mitteleinsatz und wenigen jährlichen Arbeitsgängen sind die Produktionskosten und -risiken dabei niedrig. Die mehrjährige Bodenruhe in Verbindung mit der ganzjährigen Bodendeckung und dichten Durchwurzelung des Bodens bedeuten eine wesentlich geringere Erosionsgefahr als bei einjährigen Reihenkulturen mit jährlicher Bodenbearbeitung und eventuell monatelang offener Bodenkrume. Positive Auswirkungen auf die Bodenfruchtbarkeit und eine stärkere Kohlenstoffbindung im Boden sind anzunehmen. Hinzu kommen möglicherweise klimarelevante Vorteile durch eine verringerte Lachgasfreisetzung bei dem reduzierten Einsatz von Stickstoffdünger.

2 Das Projekt „Energie aus Wildpflanzen“

Die Biomasseproduktion mit mehrjährigen Wildpflanzenansaaten wird derzeit in dem Forschungsprojekt „Energie aus Wildpflanzen“ weiterentwickelt und in Kooperation mit Praxisbetrieben erprobt. Ökologische Begleituntersuchungen beziehen sich derzeit überwiegend auf Fragen zur Habitatnutzung und Artenvielfalt, beispielsweise bei Vögeln, Fledermäusen oder epigäischen Arthropoden. Bei der Entwicklung der Saatgutmischungen arbeitet die Bayerische Landesanstalt für Weinbau und Gartenbau (LWG) mit dem Saatgutproduzenten Saaten Zeller zusammen. Sie wird durch weitere Partner des Netzwerks Lebensraum Brache begleitet (www.lebensraum-brache.de). Das Projekt wird von

der Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe (FNR) seit August 2008 gefördert (erste Projektphase bis Ende 2011).

Vorrangiges Ziel des Forschungsprojekts ist es, Saatgutzusammensetzung und Kulturführung des Wildpflanzenanbaus so zu optimieren, dass möglichst hohe wiederkehrende Biomassezuwächse und Energieerträge erzielt werden. Durch hohe Biomasserträge soll gewährleistet werden, dass sich der Flächenbedarf eines Biogasbetriebs bei der Einbeziehung von Wildpflanzenansaat nicht wesentlich verändert, eine wichtige Voraussetzung für eine praktische Umsetzung in größerem Umfang. Wirtschaftliche und weitere klimarelevante Vorteile könnten sich durch den deutlich reduzierten Produktions- und Energieaufwand im Vergleich zum intensiven Energiepflanzenanbau ergeben.

3 Vorgehensweise

3.1 Parzellenversuche zur Entwicklung der Saatgutmischungen

Für die Entwicklung der Saatgutmischungen wurden zunächst Pflanzenarten mit hohem Biomassezuwachs ausgewählt. Um hohe Gaserträge zu erzielen, wurde dabei auf die Einbeziehung frühzeitig verholzender Arten verzichtet. Weitere Ausschlusskriterien bezogen sich auf verbreitungsbiologische Eigenschaften, um das Risiko einer Florenverfälschung bei einem späteren großflächigen Anbau bereits im Vorfeld zu minimieren und ackerbau-lichen Problemen bei der Nachnutzung vorzubeugen. Zur Aufwandsminimierung wurden, aufbauend auf langjährigen Erfahrungen in vorangegangenen Projekten der LWG, ein-, zwei- und mehrjährige Arten in Saatgutmischungen so kombiniert, dass sich nach einer einmaligen Ansaat über mehrere Jahre stabile Erntebestände entwickeln können. Durch die Auswahl von spätblühenden Pflanzenarten soll eine späte Ernte gewährleistet werden. Dadurch sollen Vögeln und anderen Wildtieren eine ungestörte Aufzucht ihres Nachwuchses ermöglicht sowie Blütenbesuchern bis in den Spätsommer Nahrungsquellen zur Verfügung gestellt werden.

Aus 40 selektierten Pflanzenarten wurden vier verschiedene Artkombinationen zusammengestellt. Zwei der Artkombinationen enthalten hinsichtlich der Stauden ausschließlich heimische Arten (Mischungen mit heimischen Stauden), bei anderen wird auch mit Wildstauden fremder Herkünfte experimentiert (Mischungen mit erweitertem Herkunftsspektrum). Sie sind entweder auf trockene Standorte abgestimmt (t), oder enthalten auch Arten mit etwas höherem Wasserbedarf (f). Durch Variation der Saatstärke bei den ein- und zweijährigen Arten (+/-) ergaben sich aus den vier Artkombinationen acht Versuchsmischungen.

Diese Mischungen wurden zu Vegetationsbeginn im Frühjahr 2009 und 2010 in Versuchsanlagen auf vier Standorten in Unterfranken (bei Würzburg und bei Miltenberg)

und im Nordwestdeutschen Tiefland (bei Oldenburg und im Saterland) ausgesät. Für das Ansaatjahr 2011 wurden die Mischungen anhand der neuesten Daten weiter verbessert. Im Frühjahr erfolgte jeweils eine Stickstoffdüngung mit KAS (Sollwert: 100 im ersten und 110 kg N/ha im zweiten Standjahr).

Die Pflanzenaufwüchse aller Versuchsvarianten werden hinsichtlich ihrer Eignung als Energielieferanten untersucht. Dabei werden Fragen zum optimalen Erntetermin, Biomasse- und Methanertrag, Trockensubstanzgehalt und zur Artenzusammensetzung des Erntematerials näher betrachtet. Ziel ist es, die für den jeweiligen Standort am besten geeigneten Arten und Mischungen auszuwählen und weiter zu optimieren. Für viel versprechende Arten werden frühzeitig Vermehrungsflächen zur Saatgutgewinnung angelegt und geeignete Varietäten ausgelesen.

3.2 Anbauversuche auf Praxisflächen

Die Mischungen befinden sich derzeit in der Versuchsphase und sind noch nicht im Handel erhältlich. Einige Landwirte und Biogasanlagenbetreiber experimentieren jedoch bereits im Rahmen des Projektes erfolgreich mit einer vorläufigen Testmischung. Sie enthält neben einjährigen Arten überwiegend heimische Staudenarten, für die bereits größere Saatgutmengen verfügbar sind, und wird von Jahr zu Jahr ergänzt und optimiert. Durch die Zusammenarbeit mit Landwirten und Biogasanlagenbetreibern fließen seit Projektbeginn Erfahrungen ein. Sie geben wertvolle Hinweise zur praktischen Umsetzbarkeit des Anbausystems.

Die ersten Praxisflächen wurden bereits zu Projektbeginn im Jahr 2009 angelegt und, entsprechend der Saatgutverfügbarkeit, von Jahr zu Jahr weiter ausgebaut. Im Jahr 2010 wurden deutschlandweit etwa 25 Hektar und 2011 etwa 200 Hektar mit der aktuellen Testmischung angesät. Die Flächengröße lag dabei überwiegend zwischen 0,5 und 2 Hektar, für erste Verwertungsversuche mit höheren Substratanteilen wurden auch einzelne größere Flächen von fünf Hektar und mehr angelegt. Die derzeit etwa 70 beteiligten Landwirte aus 12 Bundesländern erhielten mit dem Saatgut eine Anbauempfehlung und werden fortlaufend über das weitere Vorgehen (z. B. Erntetermin) informiert.

Voraussetzung für eine gute Bestandsetablierung ist ein guter ackerbaulicher Zustand der Fläche. Besonderheiten in der Anbautechnik liegen in der Aussaat auf die Bodenoberfläche, da das Saatgut sehr viele äußerst feinkörnige Wildkräuterarten enthält, die bei tieferer Ablage im Boden nicht keimen. Die Testmischung ist bei einmaliger Aussaat für eine mehrjährige Standzeit von bis zu fünf Jahren ausgelegt. Es erfolgt kein Pflanzenschutz. Auf Praxisflächen wird bis zum Vorliegen der Ergebnisse aus Düngungsversuchen eine Stickstoffdüngung von 100 kg pflanzenverfügbaren Stickstoff im 1. Jahr empfohlen und ab dem 2. Jahr 110 kg, wobei die Stickstoffgabe als Gärsubstrat oder

mineralisch erfolgen kann. Die Ernte erfolgt nur einmal jährlich, weitere Arbeitsgänge sind nicht erforderlich.

4 Ergebnisse der Anbauversuche

4.1 Entwicklung der Wildpflanzenbestände

Nach der Ansaat im Jahr 2009 entwickelten sich bis zum Sommer hohe und blütenreiche Pflanzenbestände (Abb. 1), die, wie erwartet, von einjährigen Arten dominiert wurden. Lediglich an einem Standort (im Saterland) musste aufgrund starker Spontanvegetation im ersten Standjahr ein Schröpfschnitt durchgeführt werden (keine Ertragsbestimmung). Bei der Aussaat im Jahr 2010 zeigte sich, dass infolge der extremen Frühsommertrockenheit auf Standorten mit leichten Böden (bei Oldenburg) der Feldaufgang der einjährigen Arten stark vermindert war.



Abb. 1: Praxisfläche bei Verden im ersten Standjahr (Foto: B. Vollrath)

Erscheinungsbild und Blütenaspekt der mehrjährigen Bestände veränderte sich im zweiten Standjahr deutlich, weil an die Stelle der einjährigen Arten (z.B. Malven und Sonnenblumen) nun überwiegend mehrjährige und einige zweijährige Arten traten. Selbst auf Flächen, die im Vorjahr nur einen lockeren Bewuchs zeigten oder mit einem Schröpfschnitt gepflegt wurden, entwickelte sich jetzt häufig ein dichter, blütenreicher Pflanzenaufwuchs (Abb. 2). Im dritten Standjahr, in dem fast ausschließlich Staudenarten bestandsbildend waren, veränderte sich das Erscheinungsbild nicht mehr wesentlich.



Abb. 2: Praxisfläche bei Würzburg im zweiten Standjahr (Foto: A. Werner)

4.2 Erntetermin

Bedingt durch die unterschiedliche Artenzusammensetzung des Erntematerials variierte der Erntetermin je nach Mischung und Standjahr: Im ersten Standjahr wurde bei den Mischungen mit heimischen Stauden (wie auch bei der Testmischung für Praxisversuche) meist Mitte August geerntet, bei den Mischungen mit Staudenarten fremder Naturräume war der Termin etwa einen Monat später (ungefähr zur Maisernte). Der Trockenmassegehalt des Erntematerials lag dabei meist über der für Transport und Silierung geforderten Grenze von 28 %. Im zweiten Standjahr trieben die bereits etablierten zwei- und mehrjährigen Arten mit Vegetationsbeginn aus und sorgten frühzeitig für einen dichten Pflanzenbewuchs. Infolge der früheren Abreife dieser Pflanzenarten verschob sich der optimale Erntetermin, bei etwas höheren Trockenmassegehalten, im Allgemeinen um etwa einen Monat nach vorne. Er lag aber in allen Fällen nicht vor Mitte Juli, sodass Eingriffe während der Setz- und Aufzuchtzeiten von Wildtieren und der Brutzeiten von Vögeln vermieden werden konnten.

4.3 Biomasserträge der Versuchsmischungen

Die Mischungen mit erweitertem Herkunftsspektrum erzielten nach anfänglich sehr hohen Ertragswerten (Abb. 3, helle Säulenanteile), teilweise so hoch wie Silomais, im zweiten Vegetationsjahr meist nur geringe Biomassezuwächse (Abb. 3, dunkle Säulenanteile). Dies lag vor allem am zu geringen Anteil zweijähriger Arten. Auch waren viele der Präriestauden noch nicht voll entwickelt. Bei den Mischungen mit heimischen Stauden waren die Erträge in den beiden Standjahren und bei den verschiedenen Mischungsvarianten wesentlich gleichmäßiger (Abb. 4): Im zweiten Standjahr entwickelten sich hier auf allen Standorten dichte Bestände mit bis zu 2,70 m Höhe und etwas besseren Ertragswer-

ten als im Vorjahr. Unerwünschte spontane Arten, die im ersten Standjahr in einzelnen Beständen verstärkt auftraten, wurden dabei vollständig zurückgedrängt.

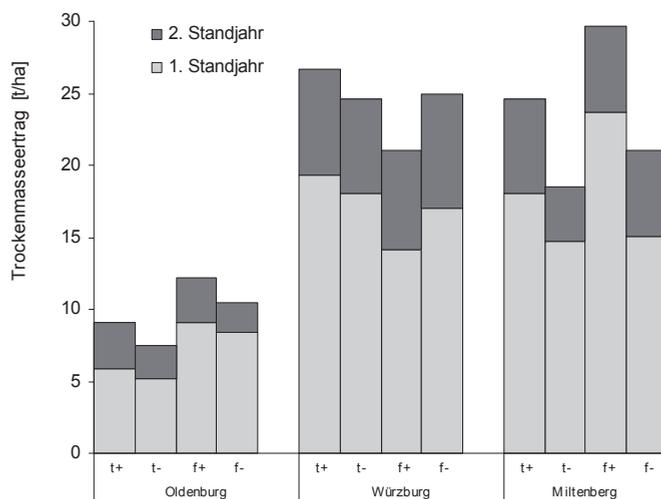


Abb. 3: Aufsummierte Biomasseerträge der ersten beiden Standjahre bei den Versuchsmischungen mit erweitertem Herkunftsspektrum (Ansaat 2009, Mittelwerte, $n = 2$); trockene Standorte (t), Standorte mit etwas höherem Wasserbedarf (f), Variation der Saatstärke bei den ein- und zweijährigen Arten (+/-)

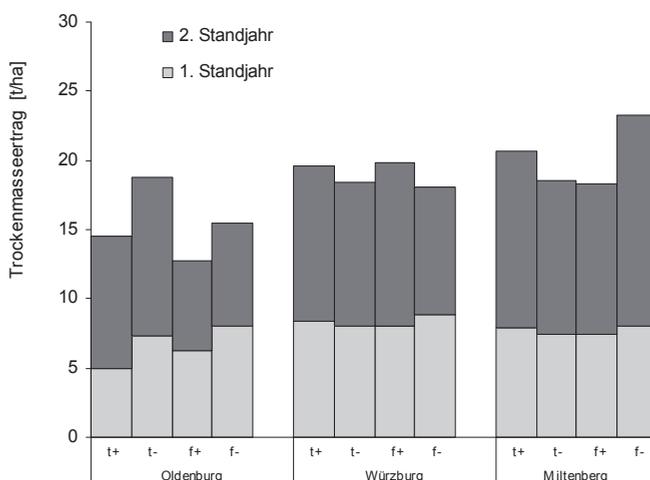


Abb. 4: Aufsummierte Biomasseerträge der ersten beiden Standjahre bei den Versuchsmischungen mit heimischen Stauden (Ansaat 2009, Mittelwerte, $n = 2$)

Die über beide Standjahre höchsten Ertragswerte wurden an den unterfränkischen Standorten von Mischungen mit erweitertem Herkunftsspektrum erzielt, während sich im Nordwestdeutschen Tiefland bisher Mischungen mit heimischen Stauden als überlegen erwiesen. Die ertragsstärksten Mischungsvarianten erzielten über beide Standjahre zwischen 19 und 30 t TM/ha und erreichten damit zwischen 70 und 80 % der Silomaisserträge von Praxisbetrieben der jeweiligen Regionen.

4.4 Gasausbeute der Versuchsarten

Die im Versuch stehenden Einzelarten erreichten, je nach Erntetermin und Art, teils höhere Methanausbeuten als Silomais (Abb. 5). In den Mischungen variierte die Gasausbeute jedoch noch stark und war meist niedriger als beim Silomais, sodass sich für die Methanerträge etwas schlechtere Werte errechneten. Die Analyse der Zusammensetzung des Erntematerials ergab, dass einige Arten der Versuchsmischungen zur Ernte bereits leicht verholzt waren und dadurch, je nach Anteil in der Gesamtmischung, die Gasausbeute mehr oder weniger stark reduzierten. Diese Erkenntnis wurde in den nachfolgenden Versuchsjahren 2010 und 2011 in modifizierten Mischungen umgesetzt. Hierdurch wird eine Steigerung der Methanerträge erwartet.

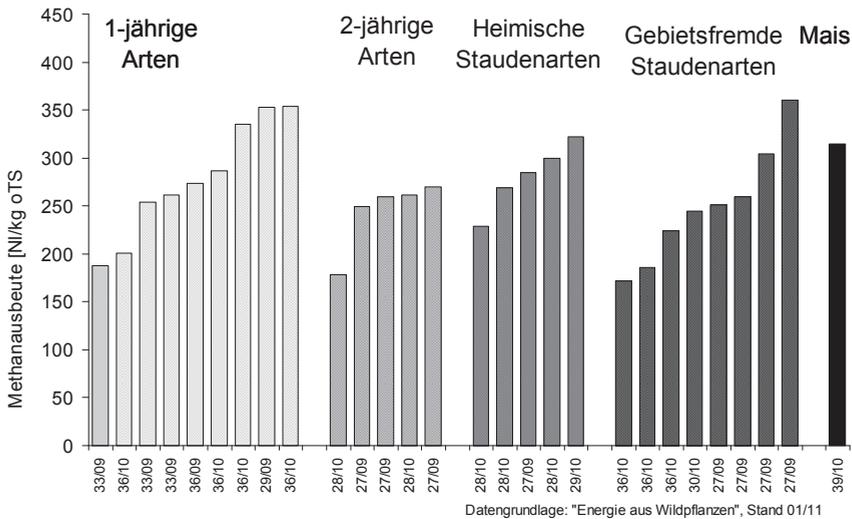


Abb. 5: Methanausbeute von Einzelarten der Versuchsmischungen und von Mais (Labordaten von Probenahmen an Versuchsansaat und -pflanzungen bei Würzburg, Kalenderwoche und Jahr des Erntetermins ist angegeben).

4.5 Erste Erfahrungen aus der Praxis

Die Praxisversuche ergaben, dass sich die Wildpflanzenarten bei oberflächlicher Aussaat zu Vegetationsbeginn meist gut etablieren können. Es wurde im Allgemeinen mit Gärresten oder Gülle gedüngt, wobei die eingesetzten Stickstoffmengen häufig stärker von der empfohlenen Menge (Sollwert 110 kg N/ha) abwichen. Auf einigen Flächen wurde nicht gedüngt. Die Biomasseerträge lagen, wie bei den Parzellenversuchen, überwiegend im Bereich zwischen 5 und 12 t Trockenmasse/(ha • a). Die Ernte und Konservierung des Erntematerials als Silage war problemlos und konnte mit der vorhandenen Technik erfolgen. Bei der Ernte wurde ein reihenunabhängiger Häcksler eingesetzt; bei einigen Betrieben wurde im absätzigen Verfahren geerntet.

5 Faunistische Begleituntersuchungen

Auf in den Jahren 2009 und 2010 im Raum Würzburg angesäten Flächen wurden faunistische Begleituntersuchungen durchgeführt, als Vergleichsfläche diente ein benachbarter Maisbestand.

Die ersten Ergebnisse konnten den hohen ökologischen Wert des Anbausystems bereits bestätigen. So wurden auf den untersuchten wildartenreichen Ansaatflächen bei Würzburg bei fast allen darauf untersuchten Tiergruppen (Spinnen, Laufkäfer, Wanzen, Ameisen, Tagfalter, Heuschrecken) in beiden Jahren deutlich höhere Artenzahlen als auf dem Vergleichsstandort Maisacker festgestellt. Die Untersuchung zur Nutzung der Pflanzenstängel als Lebensraum (seit 2010) ergab keine Hinweise, dass die Pflanzen der Ansaatflächen als „ökologische Fallen“ wirken, d.h., dass beim Abernten eine (unverhältnismäßig) große Anzahl von stängelbewohnenden Tieren getötet wird.

Hohe Artenzahlen zeigten sich auch bei den Vogel- und Fledermauserfassungen. Auf den relevanten Projektflächen wurden bis zu 30 verschiedene Vogelarten, davon 15 Rote-Liste-Arten, und acht Fledermausarten mit jagdlicher Aktivität festgestellt. Die Untersuchungen an blütenbesuchenden Insekten belegen die gute Eignung der meisten heimischen und auch der fremdländischen Arten als Trachtpflanzen für Bienen und andere Pollen- und Nektarsammler – im Sommer besteht in der Feldflur ansonsten ein Mangel an geeigneten Trachtpflanzen.

6 Ausblick

Bisher stand die Entwicklung von Saatgutmischungen mit sicherer Bestandsetablierung und hohen Flächenerträgen im Vordergrund der Untersuchungen. Seit 2011 wird für eine erste Mischung die Wirtschaftlichkeit des Anbausystems im Vergleich zu Standardkulturen eingehend betrachtet. Für Bayern wurde hierzu ein separater Versuch angegliedert (in Zusammenarbeit mit der Bayerischen Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL) und dem Technologie- und Förderzentrum für Nachwachsende Rohstoffe (TFZ), Förderung: Bayerisches Staatsministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten (StMELF)), weitere Versuche in zusätzlichen Bundesländern sollen in einer zweiten Projektphase (ab 2012) beginnen. Daneben sind umfangreiche Versuche zur Optimierung der Kulturführung (Düngung, Erntetermin) und die Weiterentwicklung der Saatgutmischungen unter stärkerer Berücksichtigung standorts- und anwendungsbezogener Unterschiede geplant. Für Standorte mit erschwelter Bestandsetablierung der einjährigen Arten werden Alternativen bei der Bestandsgründung, beispielsweise als Maisuntersaat oder in Verbindung mit Wintergetreide, entwickelt, um hier Ertragseinbußen im ersten Standjahr zu vermeiden. Daneben sollen in Zusammenarbeit mit Praxispartnern Konzepte für eine praktikable Eingliederung der Wildpflanzenansaaten in den Produktionsablauf von Biogasanlagen entwickelt werden, die sowohl wirtschaftlichen als auch ökologischen Anforderungen gerecht werden.

7 Fazit

In Anbetracht des geringen Produktionsaufwands im Vergleich zu Mais zeigen die Ergebnisse, dass Wildpflanzenmischungen ein vielversprechendes Potenzial in der Biogasgewinnung haben. Doch erst nach einer mehrjährigen Standzeit der Wildpflanzenbestände und weiterführenden Versuchen wird sich zeigen, ob sich der Anbau, je nach Standort, wirtschaftlich lohnen kann. Davon wird abhängen, ob längerfristig auch eine Umsetzung in größerem Maßstab möglich ist. Aber auch als ergänzendes Substrat für Biogasanlagen, gegebenenfalls mit entsprechenden Förderprogrammen, können Wildpflanzenmischungen einen wertvollen Beitrag dazu leisten, die Attraktivität und Vielfalt unserer Kulturlandschaft zu erhalten. Die blütenreichen Wildpflanzenbestände bieten für viele wildlebende Tierarten geeignete Lebensräume und bereichern das Landschaftsbild. Sie können für Biogasanlagenbetreiber und Landwirte einen immensen Imagegewinn bedeuten.

Einsatz von Stroh als Gärsubstrat durch technischen Strohaufschluss

STEFAN DRÖGE, BENJAMIN PACAN

1 Einleitung

Bei den Einsatzstoffen in den landwirtschaftlichen Biogasanlagen spielen Energiepflanzen eine zunehmend dominierende Rolle. Auf der Grundlage des Biogasmessprogrammes II liegt der NawaRo-Anteil bezogen auf die Frischmasse bei über 60 %, der weitaus größte Anteil entfällt hierbei auf Maissilage gefolgt von Getreide-Ganzpflanzensilage (GPS) (AUTORENKOLLEKTIV 2009). Legt man die produzierte Energie zugrunde, ist der Energiepflanzenanteil noch deutlich höher, da die verbleibenden Massenanteile im Wesentlichen auf Rinder- und Schweinegülle entfallen, welche vergleichsweise geringe absolute Biogaserträge liefern. Die Ausweitung von Anbauflächen für Energiepflanzen, insbesondere für den Maisanbau, stößt jedoch vermehrt auf Akzeptanzprobleme. Mögliche negative Auswirkungen von Mais-Monokulturen und eine verstärkte Flächenkonkurrenz mit der Nahrungsmittelproduktion bestimmen zunehmend die öffentliche Diskussion. Zudem belasten die zuletzt deutlich gestiegenen Substratpreise den nachhaltigen wirtschaftlichen Betrieb vieler laufender Biogasanlagen. Für die weitere Entwicklung der Biogaserzeugung in Deutschland wäre daher ein verstärkter Einsatz alternativer Rohstoffe dringend geboten.

Ein erhebliches energetisches Potenzial weist hierbei das landwirtschaftliche Koppelprodukt Stroh auf. Einer Nutzung dieses Substrates für die Biogasgewinnung mittels konventioneller Technik steht jedoch die Struktur dieser stark lignifizierten Biomasse entgegen. Im Stroh sind die Hemicellulose- und Cellulosefasern in eine äußerst stabile Ligninmatrix eingebettet wodurch die enzymatische Hydrolyse dieser Strukturpolymere erheblich eingeschränkt ist. Darüber hinaus stehen verschiedene verfahrenstechnische Probleme einem Einsatz von unbehandeltem Stroh entgegen, dies betrifft insbesondere die Einbringtechnik sowie die ausgeprägte Schwimmdeckenbildung von strukturell intaktem Stroh. Eine wesentliche Voraussetzung für eine Nutzung von Stroh für die Biogasproduktion ist daher die Entwicklung geeigneter Aufschlusstechnologien.

Eine Alternative zu mechanischen oder rein chemischen Aufschlussverfahren, welche einen relativ hohen Bedarf an elektrischer Energie haben und einen erheblichen Chemikalieneinsatz erfordern, stellt der hydrothermale Aufschluss mittels Thermo-Druck-Hydrolyse (TDH) dar. Die thermische Hydrolyse von Biomassen wird bei Temperaturen zwischen 120 und 220 °C in speziellen Druckreaktoren durchgeführt. Ein wesentlicher Vorteil des Verfahrens liegt in der weitgehenden strukturellen Desintegration von lig-

nifizierten Biomassen sowie der Möglichkeit einer adäquaten Nutzung der im Rahmen der Biogaserzeugung produzierten Abwärme. Vor diesem Hintergrund hat das Prüf- und Forschungsinstitut Pirmasens (PFI), im Rahmen eines vom Land Rheinland-Pfalz und des Europäischen Fonds für regionale Entwicklung (EFRE) geförderten Forschungsvorhabens, Untersuchungen zum hydrothermalen Aufschluss von Stroh und einer anschließenden Biogasproduktion durchgeführt.

2 Vorkommen und Verfügbarkeit von Stroh

Restbiomassen fallen in Deutschland jedes Jahr in einem erheblichen Umfang an. Allein die Ernterückstände summieren sich, bezogen auf die Frischmasse, auf mehr als 100 Mio t/a (KALTSCHMITT et al. 2003). Bezogen auf die Trockenmasse, die für eine stoffliche oder energetische Nutzung verfügbar ist, hat hierbei Getreidestroh das mit Abstand größte Potenzial (Tab. 1). Strohliefernde Kulturarten wie Getreide, Mais und Ölsaaten werden in Deutschland auf schätzungsweise 8 Mio. ha angebaut. Hieraus errechnet sich ein bundesweites Gesamtstrohaufkommen von knapp 50 Mio t/a. Bezüglich des Anteils, der für eine energetische Nutzung verfügbar ist, kommen verschiedene Studien, je nach Betrachtungsweise, zu sehr unterschiedlichen Ergebnissen. Diese reichen von 20 % bis über 50 % des Gesamtaufkommens, je nachdem inwieweit konkurrierende Nutzungsanforderungen berücksichtigt werden (MÜNCH 2008). Auch bei einem konservativ angesetzten Nutzungsgrad hat Stroh allerdings einen Anteil von ca. 75 % an den insgesamt verfügbaren Ernterückständen (bezogen auf Trockenmasse; siehe Tabelle 1).

Tab. 1: Anfallende Ernterückstände in Deutschland (2000)

Reststoff	Anbaufläche Mio. ha	Anfallende Menge Mio. t FM/a	Nutzbare Menge Mio. t FM/a	Nutzbare Trockenmasse Mio. t TM/a
Stroh	8,1	48,9	9,3	7,6
Gras (Grünland, Wiesen)	5,3	32,8	2,6–4,0	0,9–1,4
Rübenblatt	0,46	23,0	5,8–11,5	0,6–1,1
Kartoffelkraut	0,3	4,4	0,75–1,5	0,15–0,3
Gemüse	0,1	1,4	0,13–0,26	0,01–0,03
Wein, Hopfen	0,12	0,75	0,25–0,5	0,05–0,1
Summe (gerundet)		111	19–27	9–11

Quelle: KALTSCHMITT et al. (2003): Energiegewinnung aus Biomasse. Externes Gutachten für den wissenschaftlichen Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen. Berlin, Heidelberg

Derzeit beschränkt sich die energetische Verwertung in erster Linie auf die Verbrennung von Stroh, die allerdings aufgrund der hohen Emissionen mit einigen Schwierigkeiten verbunden ist. Zu berücksichtigen ist auch, dass Stroh eine wichtiger Humus- und Nährstoffquelle für den Boden darstellt. Dies ist bei Verfahren, die das Stroh vollständig dem Nährstoffkreislauf entziehen, in Rechnung zu stellen und begrenzt den Nutzungsanteil. Der Einsatz als Substrat für Biogasanlagen wäre vor diesem Hintergrund eine interessante Alternative, da über den Gärrest der Lignin- und Mineralstoffanteil den Böden zurückgeführt werden würde.

3 Thermo-Druck-Hydrolyse (TDH)

Das Verfahren der Thermo-Druck-Hydrolyse (TDH) kann zum Aufschluss verschiedener Biomassen, insbesondere auch von schwer abbaubaren lignifizierten Biomassen, verwendet werden. Bei der TDH fungiert Wasser unter subkritischen Bedingungen (120–220 °C und 2–20 bar) als Lösungsmittel, unterstützt durch die natürlichen Inhaltsstoffe der verwendeten Biomasse (BOBLETER 1998). Die mit dem Temperaturanstieg sinkende Oberflächenspannung, eng gekoppelt an die Benetzungseigenschaften und die stark verringerte Dielektrizitätskonstante sind verantwortlich dafür, dass subkritisches Wasser als Lösungsmittel für organische Stoffe verwendet werden kann. Bei den auftretenden hohen Temperaturen und Drücken wird die Hydrolyse von Lipiden, Proteinen und Kohlehydraten, insbesondere der Hemicellulosen, beschleunigt. Daneben kann bei Temperaturen von 180–200 °C Lignin aus dem pflanzlichen Gewebe herausgelöst werden.

Die Thermohydrolyse bewirkt beim Aufschluss des Strohs zweierlei:

- 1) Xylan und andere Hemicellulosebestandteile werden hydrolytisch gespalten:



R1 vornehmlich Xylose, aber auch Arabinose, und R2 Poly- und Disaccharide, die ihrerseits weiter hydrolysiert werden.

- 2) Ca. 50 % des in der Cellulose inkrustierten Lignins werden gelöst.

Eine verstärkte Hydrolyse der Hemicellulosefraktion tritt allerdings erst bei Temperaturen zwischen 170 und 190 °C auf. Für eine Aufspaltung der Cellulose in monomere Zucker sind bereits Temperaturen oberhalb von 200 °C notwendig. Eigene Untersuchungen an verschiedenen Biomassen zeigen, dass sich durch den Einsatz geringer Mengen mineralischer Säuren eine erhebliche Steigerung der Aufschlusseffizienz in Verbindung mit einer signifikanten Absenkung des Temperaturniveaus erzielen lässt. Unter optimierten Bedingungen können so bereits bei Temperaturen zwischen 140 und 150 °C 75 bis > 90 % der Hemicellulosefraktion in Monosaccharide überführt werden.

4 Thermischer Aufschluss von Stroh

Die Untersuchungen zum hydrothermalen Aufschluss von Stroh erfolgten zunächst in einer speziellen Druckmikrowelle. Ziel der Vorarbeiten war es, durch Serienuntersuchungen wesentliche Aufschlussparameter für die folgenden Untersuchungen im Technikuksmaßstab zu ermitteln. Die Aufschlusseffizienz wurde über die Quantifizierung der freigesetzten Monosaccharide Xylose und Glucose mittels HPLC ermittelt. Als Substrate kamen verschiedene Strohsorten zum Einsatz, die nachfolgend dargestellten Ergebnisse beziehen sich auf Weizenstroh mit einem Cellulosegehalt von ca. 46 % sowie einem Hemicellulose- und Ligninanteil von jeweils ca. 20 % (bezogen auf die Trockenmasse).

Zur Absenkung des notwendigen Temperaturniveaus wurden den Ansätzen Salpetersäure in einem Konzentrationsbereich zwischen 0,05 und 0,4 % (v/v) zugegeben. Hinsichtlich der Xyloseausbeute zeigte sich deutlich der Einfluss der zugesetzten Säure auf die Aufschlusseffizienz (Abb. 1). Bei Säurekonzentrationen bis ca. 0,06 % lagen die Xylosekonzentrationen unabhängig von der Aufschlusstemperatur bei maximal 1 % der Trockenmasse. Die Maxima wurden bei den Aufschlusstemperaturen 150 und 160 °C im Konzentrationsbereich zwischen 0,2 und 0,3 % HNO_3 erreicht. Hierbei wurden Xyloseausbeuten von knapp über 20 % der Trockenmasse erzielt.

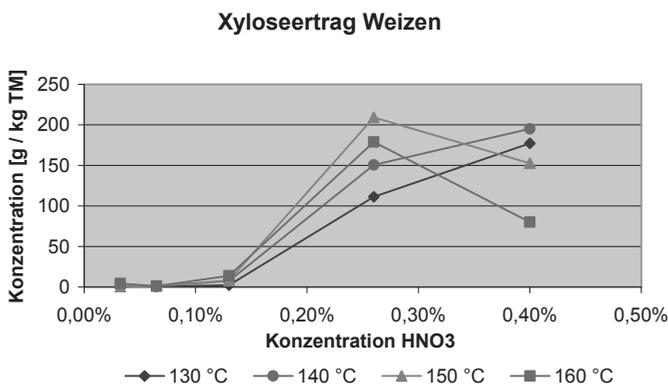


Abb. 1: Xyloseausbeute bei Weizenstroh in Abhängigkeit von Aufschlusstemperatur und Säurekonzentration (TM-Gehalt der Maische ~ 10 %)

Bei den Aufschlusstemperaturen 130 und 140 °C wurden die Maximalausbeuten bei der höchsten eingesetzten Säurekonzentration von ca. 0,4 % HNO_3 erreicht. Die Ansätze mit den höheren Aufschlusstemperaturen zeigten hier bereits einen deutlichen Rückgang der Xylosekonzentration bei einer gleichzeitig starken Zunahme der Furfuralkonzentration.

Die Glucoseausbeuten lagen erwartungsgemäß deutlich niedriger als bei der Xylose. Dies ist auf die sehr stabile Struktur der Cellulosefasern zurückzuführen, sodass hohe Temperaturen und/oder ein starker Säureeinsatz nötig ist, um die Polymere in einem hohen Umfang zu hydrolysieren. Glucosekonzentrationen oberhalb von 5 % der Trockenmasse waren daher nur bei höheren Aufschluss Temperaturen in Verbindung mit verstärktem Säureeinsatz zu beobachten. Die Maximalausbeute beim Weizenstroh lag bei ca. 9 % der Trockenmasse.

Im Anschluss an die Untersuchungen im Labormaßstab erfolgte ein Upscaling des Verfahrens in einen Technikumsmaßstab. Hierzu wurde ein TDH-Aufschlussreaktor mit einem Arbeitsvolumen von 100 l eingesetzt. Bei den Versuchen wurde überprüft, inwieweit sich die Ergebnisse der Mikrowellenaufschlüsse auf den Technikumsmaßstab übertragen lassen. Für die Serienaufschlüsse wurden jeweils 1,5 kg Weizenstroh mit einer Wasservorlage von 10 l für eine Stunde bei Temperaturen zwischen 120 und 160 °C behandelt.

Die Xyloseausbeuten im Technikumsmaßstab erreichten nahezu das Niveau der Mikrowellenaufschlüsse. Eine Ausnahme zeigte sich lediglich bei 140 °C, wo ein signifikant niedrigerer Ertrag erzielt wurde (Abb. 2). Die höchste Ausbeute zeigte sich bei 150 °C mit einem Xylosertrag von ca. 19 %. Dieser Wert repräsentierte den im Rahmen der Untersuchungen ermittelten Maximalertrag.

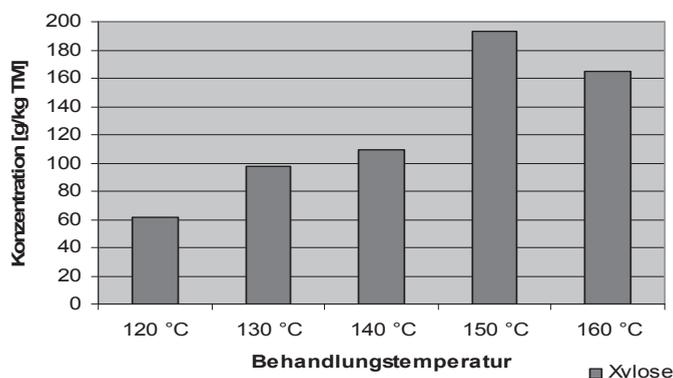


Abb. 2: Xylosertrag in Abhängigkeit von unterschiedlichen Behandlungstemperaturen bei Weizenstroh

Die weitere Erhöhung der Behandlungstemperatur auf 160 °C resultierte in einen Rückgang des Xylosertrages auf rund 16,5 %. Ähnliche Effekte hatten sich bereits im Rahmen der Voruntersuchungen in der Druckmikrowelle gezeigt und lassen sich durch eine verstärkte Furfuralbildung erklären. Die Untersuchungsergebnisse zeigen, dass sich die Hemicellulosefraktion des Strohs unter optimierten Aufschlussbedingungen bei einer

Behandlungstemperatur von 150 °C nahezu vollständig hydrolysieren lässt. Eine Hydrolyse der Cellulosefraktion findet unter diesen Bedingungen nur eingeschränkt statt. Es stellte sich allerdings die Frage, in welchem Maße Cellulosefasern durch die Behandlung aus der Ligninmatrix herausgelöst wurden und damit besser für eine enzymatische Hydrolyse verfügbar sind.

Entsprechende Untersuchungen von TDH-behandeltem und unbehandeltem Stroh wurden mit kommerziell erhältlichen cellulolytischen Enzymen durchgeführt. Die Ansätze (TS-Gehalt der Maische ca. 4 %; pH 4,5) wurden für 20 h mit zwei unterschiedlichen Enzymkonzentrationen (1 und 3 % bezogen auf die Trockenmasse) bei 50 °C inkubiert. Abbildung 3 zeigt den deutlich erhöhten Abbaugrad bei den TDH-behandelten Ansätzen.

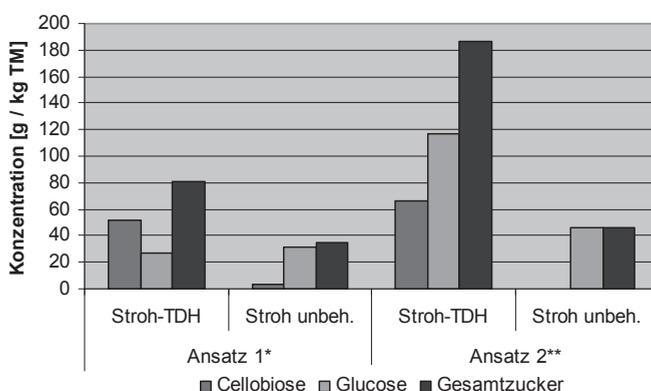


Abb. 3: Zuckerkonzentration nach enzymatischer Hydrolyse; Gesamtzucker = Summe Cellobiose und Glucose dargestellt als Glucoseäquivalent

* 1 % Enzymkonzentration bezogen auf die Trockenmasse;

** 3 % Enzymkonzentration bezogen auf die Trockenmasse

Bezogen auf die Gesamtzucker (Summe Glucose/Cellobiose dargestellt als Glucoseäquivalent) liegt die Steigerung bei einer geringeren Enzymkonzentration bei ca. 100 % während bei einem stärkeren Enzymeinsatz eine ca. 4-fach höhere Konzentration vorlag als im unbehandelten Vergleichsansatz. Der geringe Effekt einer deutlichen Erhöhung der Enzymkonzentration bei unbehandeltem Stroh deutet darauf hin, dass strukturell intakte und in die Ligninmatrix eingebettete Cellulosefasern nur in sehr geringem Maße einem enzymatischen Abbau unterworfen sind.

5 Effekte des thermischen Aufschlusses auf die Vergärbarkeit und den Biogasertrag

Zur vergleichenden Untersuchung der Vergärbarkeit von TDH-behandeltem und unbehandeltem Stroh können verschiedene Versuchsansätze angewandt werden. Beim Versäuerungs- oder Hydrolyseansatz werden die zu untersuchenden Substrate bei sauren Bedingungen (Start pH-Wert < 6) über mehrere Tage bei Sauerstoffabschluss inkubiert. Das über den Versuchszeitraum mittels HPLC aufgenommene Versäuerungsspektrum sowie die Summe der gebildeten Säuren geben einen Aufschluss über die Vergärbarkeit des jeweiligen Substrats. Die in Abbildung 4 dargestellte Säurebildung der Vergleichsansätze (Weizenstroh unbehandelt, Weizenstroh TDH-behandelt) zeigt, dass die Versäuerung im TDH-Ansatz schneller und in einen deutlich stärkeren Umfang stattfindet. Zum Ende des Inkubationszeitraums lag die Summe der organischen Säuren im TDH-Ansatz um mehr als 100 % über dem unbehandelten Vergleichsansatz.

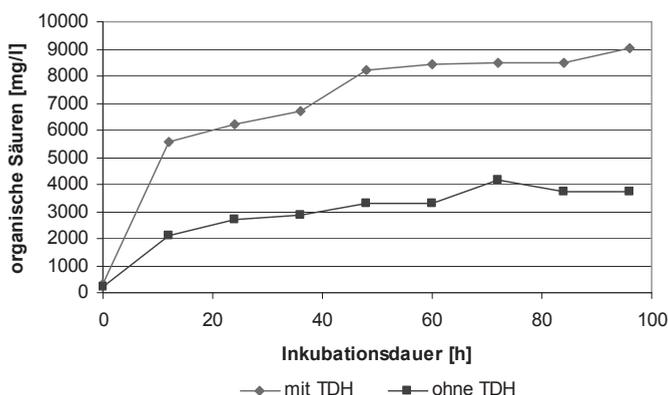


Abb. 4: Summe der organischen Säuren der Vergleichsansätze bei der Vorhydrolyse

Die im Rahmen der Untersuchungen festgestellte schnellere und insbesondere wesentlich stärkere Versäuerung der TDH-behandelten Ansätze deutet auf eine signifikant verbesserte Vergärbarkeit infolge der hydrothermalen Behandlung hin.

Im Anschluss an die Versäuerungsexperimente wurden vergleichende dynamische Gärtest durchgeführt um den Effekt der hydrothermalen Behandlung auf den spezifischen Biogasertrag des Substrats zu überprüfen. Die Untersuchungen wurden mit Pilot-Biogasermentern (100 l Durchflussfermenter) durchgeführt, welche eine praxisnahe Untersuchung von Substraten für den Biogasprozess erlauben. In einem Parallelansatz mit zwei baugleichen Fermentern wurde die Biogasproduktion von TDH-behandeltem

Weizenstroh (1h bei 140 °C) im Vergleich zu unbehandeltem Stroh über einen Zeitraum von 5 Wochen verfolgt. Nach Abschluss der Anfahrphase erreichte der mit unbehandeltem Stroh betriebene Fermenter (F2) im Durchschnitt eine Biogasproduktion von 308 NI/kg oTS bei einem mittleren Methangehalt von 50 %. Beim mit TDH-Stroh betriebenen Vergleichsfermenter (F1) lag die durchschnittliche Produktion im Betrachtungszeitraum bei 490 NI/kg oTS bei einem Methangehalt von ebenfalls ca. 50 %. Somit konnte auf Basis des dynamischen Gärtests eine Steigerung des spezifischen Biogasertrags infolge des hydrothermalen Aufschlusses um ca. 60 % demonstriert werden (Abb. 5).

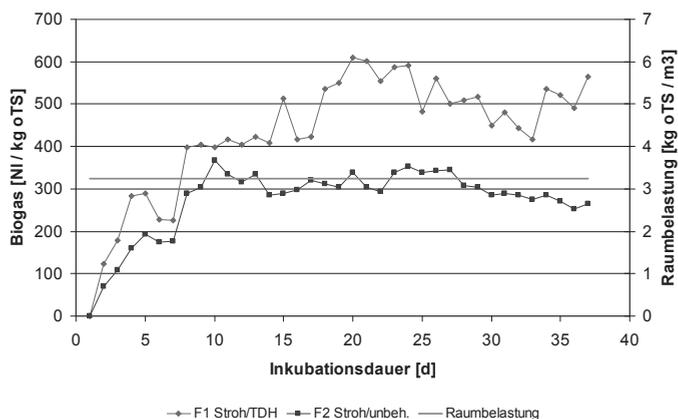


Abb. 5: Vergleichender dynamischer Gärtest mit TDH-behandeltem und unbehandeltem Weizenstroh

Als eine kritische Größe bei der Monovergärung von Stroh erwies sich in beiden Versuchsansätzen der pH-Wert. Aufgrund des Stickstoffdefizits von Stroh liegen in den Fermentern niedrige Ammoniumkonzentrationen und damit eine geringe Pufferkapazität vor. Daraus resultiert bei einer Monofermentation von Stroh ein erhöhtes Risiko einer Versäuerung mit deutlichem pH-Abfall. In der Praxis ließe sich dieses Problem durch den Einsatz eines stickstoffreichen Co-Substrats (z. B. Gülle) beheben. Neben der erheblichen Steigerung des spezifischen Biogasertrags ergeben sich durch die hydrothermale Behandlung weitere verfahrenstechnische Vorteile. Zum einen bringt der Einsatz von unbehandeltem Stroh erhebliche Förderprobleme mit sich, da das Substrat dazu neigt, sich um die Förderschnecke zu wickeln. Weiterhin kommt es im Fermenter sehr schnell zu einer ausgeprägten Schwimmdeckenbildung. Beide Probleme treten bei hydrothermal behandeltem Stroh nicht auf.

Um den Einfluss unterschiedlicher Behandlungstemperaturen auf das Ausgasungsverhalten näher zu untersuchen, wurden im Anschluss statische Gärtests durchgeführt. Als Vergleichsansatz wurde parallel ein Ansatz mit unbehandeltem Stroh untersucht.

Dieser zeigte einen langsamen zweistufigen Anstieg der Gassummenkurven. Nach einem steileren Anstieg innerhalb der ersten 200 h Inkubationsdauer zeigte sich zunächst ein Abflachen, im Anschluss war ein erneuter Anstieg feststellbar bis die Summenkurve ab ca. 700 h zunehmend in den Sättigungsbereich übergang (Abb. 6).

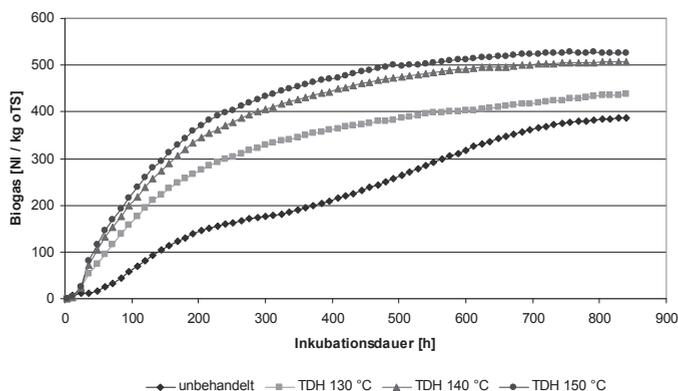


Abb. 6: Vergleichender statischer Gärttest mit TDH-behandeltem und unbehandeltem Weizenstroh

Insgesamt wurde eine Biogasmenge von 386 NI/kg oTS für das unbehandelte Weizenstroh ermittelt. Dieser Ertrag lag damit deutlich oberhalb der Produktion, die im Rahmen des dynamischen Gärttests ermittelt wurde (308 NI/kg oTS). Allerdings wurde dieser Wert erst nach einer Inkubationszeit von 840 h erreicht. Innerhalb der ersten 240 h Inkubationszeit waren hiervon erst rund 41 % und nach 480 h ca. 65 % gebildet. Im Vergleich hierzu zeigte sich bei dem TDH-behandeltem Stroh ein deutlich steilerer und kontinuierlicher Verlauf der Gassummenkurven. Der insgesamt erzielte Mehrertrag im Vergleich zum unbehandelten Stroh lag zwischen 13 und 36 %. Deutlicher wird der Unterschied beim Vergleich der relativ zur Gesamtproduktion erreichten Werte nach den Inkubationszeiten 240 h und 480 h. Der Ansatz TDH 130 °C hatte hier bereits rund 68 % bzw. 87 % der Gesamtmenge produziert. Einen noch höheren Anteil wiesen die Ansätze mit 150 °C und 160 °C Behandlungstemperatur auf. Hier waren nach 240 h 73 und 76 % sowie nach 480 h bereits 92 bzw. 94 % der gesamten Gasmenge gebildet. Diese Werte zeigen den deutlich schnelleren Abbau des TDH-behandelten Materials.

6 Kombinierte stoffliche und energetische Nutzung

Über die rein energetische Nutzung hinaus bietet der hydrothermale Aufschluss von Stroh die zusätzliche Option einer stofflichen Nutzung durch die fermentative Gewinnung von hochwertigen Produkten für die Nahrungsmittelindustrie und die Biopolymerproduktion. Die mit Monosacchariden angereicherten Hydrolysate dienen hierbei als Substrate für verschiedene biotechnologische Konversionen. Im Rahmen des dargestellten Forschungsprojektes konnte die biotechnologische Gewinnung des hochpreisigen Zuckerersatzstoffes Xylitol auf der Basis von Strohhydrolysaten demonstriert werden. Der Zuckeralkohol Xylitol wird für spezielle Anwendungen in der Nahrungsmittelproduktion und im Pharmabereich eingesetzt und erzielt Marktpreise im Bereich von 4.000 €/t. Die biotechnologische Produktion erfolgt auf der Basis von Xylose mit Hefen der Gattung *Candida*. Bei Fermentationsexperimenten mit Strohhydrolysaten konnten Umsatzraten von > 70 % (Xylose/Xylitol [g/g]) erzielt werden. Auf dieser Basis ergibt sich ein Ertragspotenzial von rund 125 kg Xylitol je Tonne Stroh und damit ein erhebliches zusätzliches Wertschöpfungspotenzial. Gegenstand laufender Forschungsarbeiten ist die fermentative Gewinnung des Biopolymers Polyhydroxybuttersäure (PHB) als Alternative zu petrobasierten Kunststoffen wie Polypropylen oder Polyethylen. Die Kombination aus stofflicher und energetischer Nutzung bietet hierbei erhebliche Synergiepotenziale. Die im Rahmen der Biogasproduktion bereitgestellte Abwärme kann für die thermischen Aufschlüsse eingesetzt werden, die Reststoffe der Fermentationen werden wiederum der Biogasanlage zugeführt.

7 Planung einer Großtechnikumsanlage

Auf der Grundlage der gewonnenen Ergebnisse wurde in Kooperation mit einem Anlagenbauer ein Konzept für eine großtechnische Anlage zur stofflichen und energetischen Nutzung von Stroh konzipiert. In dieser Anlage soll zunächst neben dem Biogas ein Xylitolkonzentrat als Nebenprodukt hergestellt werden. Später können auch andere Zielprodukte, wie Polyhydroxybuttersäure (PHB), nach dem Strohaufschluss durch Fermentation gewonnen werden. Die konzipierte Anlage wurde für eine jährliche Strohmenge von 5400 t ausgelegt. Das Stroh sollte in einem Umkreis von 20 km um die Anlage eingesammelt werden. Dies dürfte in Ackerbauregionen mit ausgeprägtem Getreideanbau kein Problem darstellen. Das Konzept sieht vor, dass die Strohaufschluss- und Fermentationsanlage in Verbindung mit einer Biogasanlage mit einer Leistung von 1 MW_{e,l} und 1,2 MW_{th} betrieben wird. Für den Strohaufschlussprozess sollen 400 kW thermischer Leistung aus dem Abgas des BHKW auf hohem Temperaturniveau gewonnen werden.

Ungefähr die Hälfte des Biogaspotenzials stammt aus dem Stroh, während der Rest aus NawaRos (Mais, Zuckerrübe) gewonnen wird.

Die Wirtschaftlichkeit der Xylitolgewinnung auf der Basis von Strohhydrolysaten hängt von verschiedenen Rahmenbedingungen ab, die derzeit noch nicht abschließend bewertet werden können (u. a. Kosten der Fermentationstechnik, erzielbare Produktpreise). Bei einer reinen Biogasproduktion ohne zusätzliche stoffliche Verwertung müssen die notwendigen Investitionen für die Strohaufschlussanlage durch die Mehrerträge aus der Strohvergärung kompensiert werden. Auf Grundlage der oben dargestellten Anlagendaten würde sich ein wirtschaftlicher Betrieb voraussichtlich bei einer Vergütung des aus Stroh produzierten Stroms im Bereich von 20–22 ct/kWh ergeben.

8 Fazit und Ausblick

Der hydrothermale Aufschluss mittels Thermo-Druck-Hydrolyse bietet das Potenzial lignifizierte Biomassen wie Stroh für eine Biogasproduktion verfügbar zu machen. Unter optimierten Aufschlussbedingungen kann bereits bei Temperaturen von 150 °C eine weitgehende Hydrolyse der Hemicellulosefraktion erreicht werden. Darüber hinaus bedingt das Verfahren eine wesentlich verbesserte Abbaubarkeit des Celluloseanteils. In der Summe wird die Vergärbarkeit des Substrates signifikant gesteigert. Im Vergleich zu unbehandeltem Stroh konnte eine Steigerung des Biogasertrages von bis zu 60 % demonstriert werden. Neben dem erhöhten Abbaugrad ergibt sich auch eine deutlich gesteigerte Abbaugeschwindigkeit was in einer Reduktion der notwendigen hydraulischen Verweilzeit resultiert. Durch die weitgehende strukturelle Desintegration des Substrates ergeben sich zudem verfahrenstechnische Vorteile. So lässt sich das aufgeschlossene Substrat mit konventioneller Fördertechnik in den Biogasfermenter einbringen und es tritt keine ausgeprägte Schwimmdeckenbildung auf. Hinsichtlich der nachhaltigen Prozessstabilität ist allerdings von einer Monovergärung von Stroh abzusehen. Aufgrund des Stickstoffdefizits und weiterer fehlender Nähr- und Spurenstoffe sollten Co-Substrate wie Rindergülle vorgesehen werden. Die Ergebnisse der vorliegenden Untersuchungen zeigen, dass die Biogasgewinnung aus thermisch vorgebehandeltem Stroh ein erhebliches Potenzial bietet. Dies gilt insbesondere für Regionen mit intensiven Getreideanbau und erheblichen Strohüberschüssen. Unter der Voraussetzung, dass die vorliegenden Ergebnisse in einem großtechnischen Maßstab bestätigt werden können, sollte daher mittelfristig, analog zur thermochemischen Konversion von Stroh, die Gewährung des Technologiebonus für das Verfahren angestrebt werden.

Darüber hinaus bietet die Thermo-Druck-Hydrolyse, neben der rein energetischen Nutzung von schwerabbaubaren Biomassen, die zusätzliche Option der stofflichen Nut-

zungsschiene. Die im Rahmen des thermischen Aufschlusses gewonnenen zuckerreichen Hydrolysate können für verschiedene biotechnologische Konversionen zu hochpreisigen Zielprodukten eingesetzt werden. Damit eröffnet sich mittelfristig die Möglichkeit zu Errichtung dezentraler Bioraffinerien die lokale Biomassen für eine kombinierte stoffliche und energetische Verwertung nutzen. Aktuell plant das PFI im Rahmen eines Forschungsprojektes den Bau einer entsprechenden Demonstrationsanlage im Energiepark Pirmasens.

Literatur

Autorenkollektiv (2009): Biogasmessprogramm II, 61 Biogasanlagen im Vergleich. Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe, Gülzow

Bobleter, O. (1998): Hydrothermal degradation and fractionating of saccharides and polysaccharides. In: Polysaccharides: Structural Diversity and Functional Versatility. Marcel Dekker, New York. pp. 775–833.

Kaltschmitt, M.; Merten, D.; Fröhlich, N.; Nill, M. (2003): Energiegewinnung aus Biomasse. Externes Gutachten für den wissenschaftlichen Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen. Berlin, Heidelberg

Münch, J. (2008): Nachhaltig nutzbares Getreidestroh in Deutschland. Positionspapier. ifeu – Institut für Energie- und Umweltforschung, Heidelberg

Biogas aus Algen, Tang und Seegras?

HOLGER SCHNEIDER

1 Einleitung

Algen, Tang und Seegras werden immer wieder als alternative Rohstoffquellen für landwirtschaftliche Biogasanlagen diskutiert. Dieser Artikel beruht auf Literaturdaten und Untersuchungen, die an der Fachschule Flensburg im Rahmen studentischer Praktika durchgeführt wurden. Im Rahmen dieser Untersuchungen standen unterschiedliche Fragestellungen im Raum, die jedoch alle das Ziel hatten, das Biogaspotenzial von Mikroalgen, Makroalgen und Treibseln (Gemisch aus Tang, Seegras usw.) zu bestimmen und zu optimieren.

Der Begriff Algen hat unterschiedliche Bedeutungen, deshalb soll erläutert werden, wofür im Rahmen dieses Artikels dieser Begriff benutzt wird.

Algen sind eukaryontische Lebewesen, die Photosynthese betreiben können. Die Vielfalt der Algen reicht von Mikroorganismen bis zu mehreren Metern langen Makroorganismen. Mikroalgen sind beispielsweise ein- oder wenigzellige Mikroorganismen, die sich von den sogenannten Blaualgen (Cyanobakterien) dadurch unterscheiden, dass sie einen Zellkern besitzen und damit eukaryontisch sind. Zu den Makroalgen gehört die speziell gezüchtete und als Nahrungsmittel verwendete Zuckeralge (*Laminaria spp.*). Die Algen können aufgrund unterschiedlicher, photosynthetisch aktiver Farbstoffe rot, gelbbraun oder grün aussehen.

Seegras (*Zostera*) gehört zu den höheren Pflanzen und fällt in großen Mengen an den Stränden der Ostsee an.

Als Tang (Seetang) werden allgemein Rot-, Grün- oder Braunalgen bezeichnet, die sich am Meeresboden verankern können.

2 Gäreigenschaften

Im Folgenden werden die Gäreigenschaften ausgewählter alternativer Rohstoffe für landwirtschaftliche Biogasanlagen am Beispiel vom Makroalgen, Mikroalgen und Treibseln (Gemisch aus Tang, Seegras, Makroalgen usw.) dargestellt. Die hier genannten Ergebnisse beruhen auf den Arbeiten an der Fachhochschule Flensburg.

2.1 Treibsel

Die Treibselproben wurden an unterschiedlichen Stellen von der Ostseeküste Schleswig-Holsteins aus den Kreisen Schleswig-Flensburg bis Ostholstein genommen und analysiert. Die Proben sind charakteristisch für die jährlich anfallenden Treibsel und unterscheiden sich durch ihre Zusammensetzung sehr stark voneinander. Häufig treten zu den Hauptbestandteilen wie Seegras und Makroalgen Beimischungen auf wie Sand, Muscheln, Holz, Plastik. Dadurch variiert der Anteil der Trockensubstanz (TS) und der organischen Trockensubstanz (oTS) sehr stark (Tab. 1).

Tab. 1: Gehalt an Trockensubstanz (TS) und organischer Trockensubstanz (oTS) von Treibselproben der schleswig-holsteinischen Ostseeküste

Ort der Probenahme	TS %	Davon oTS %
Falshöft	78	76
Großenbrode	38	30
Großenbrode	59	20
Scharbeutz	55	25
Grömitz	48	11

Alle untersuchten Proben enthielten einen sehr großen Anteil an nicht organischer Substanz. Durchschnittlich lag der Anteil der organischen Trockensubstanz bei ca. 10 % bezogen auf die Feuchtmasse. Das heißt: In einer Tonne Treibsel befinden sich im Durchschnitt 100 kg organische Masse, die für eine Vergärung zur Verfügung steht.

Der organische Anteil der Treibsel lässt sich im anaeroben Gärungsprozess zum Teil zu Biogas umsetzen (Tab. 2).

Tab. 2: Biogasertrag von Treibselproben der schleswig-holsteinischen Ostseeküste

Ort der Probenahme	Biogasertrag in m ³ /t bezogen auf	
	oTS	Feuchtmasse
Falshöft	140	83
Großenbrode	110	13
Großenbrode	150	18
Scharbeutz	125	17
Grömitz	105	6

Die Treibselproben lassen sich aufgrund des hohen Anteils an nicht vergärbaren- oder schwervergärbaren Substanzen, wie Lignin, Hemicellulose und anderen Polysacchariden, schlecht vergären. Die Biogaserträge bezogen auf den Gehalt an organischer

Trockensubstanz liegen bei max. 20 % der zu erwartenden Werte von ca. 700 m³ Biogas je Tonne organischer Trockensubstanz.

Mit geeigneten Vorbehandlungsmethoden, wie das Vermahlen in einer Hammermühle, ein säurehydrolytischer bzw. thermohydrolytischer Aufschluss, lässt sich der Biogasertrag bis auf 300 m³ Biogas je Tonne organischer Trockensubstanz steigern. Der Biogasertrag bezogen auf die Feuchtmasse steigt dann auf 18–200 m³ je Tonne Treibsel.

Grundsätzlich lassen sich die Treibsel nur mit entsprechendem Aufwand auch in traditionellen Biogasanlagen mit Verweilzeiten von mehr als 30 Tagen gut vergären. Die Wirtschaftlichkeit dieser Anlagen hängt stark vom Standort und der Zusammensetzung der Treibsel ab.

2.2 Makroalgen

In unseren Untersuchungen wurden verschiedene Makroalgenarten einbezogen, die alle aus der Ostsee stammen, jedoch nicht näher bestimmt wurden. Makroalgen zeichnen sich durch einen hohen Wassergehalt aus. Demzufolge ist der Trockensubstanzgehalt niedrig (Tab. 3).

Tab. 3: Gehalt an Trockensubstanz und organischer Trockensubstanz von Makroalgenproben aus der Ostsee

Jahr der Probenahme	TS %	oTS %
2009	9	63
2010	16	72
2011	8	45

Der Gehalt an organischer Trockensubstanz liegt aufgrund des Mineralanteils in Makroalgen bei max. 75 %.

Die Makroalgen lassen sich signifikant besser vergären als die Treibsel. Die mittlere Verweilzeit im Biogasprozess lag bei ca. 25 Tagen mit einem Biogasertrag von bis zu 500 m³ Biogas je Tonne organischer Trockensubstanz (Tab. 4).

Tab. 4: Biogasertrag von Makroalgenproben aus der Ostsee

Jahr der Probenahme	Biogasertrag in m ³ /t bezogen auf	
	oTS	Feuchtmasse
2009	350	20
2010	500	58
2011	300	11

Der Biogasertrag bezogen auf die Feuchtmasse schwankt sehr stark. Wie sich eine Anlage für die Vergärung von Makroalgen wirtschaftlich darstellen lässt, hängt hier von den Zucht- und Erntebedingungen der Makroalgen ab. Der Erntezeitpunkt ist entscheidend für den Energieertrag.

Zusätzlich muss die geringe Lagerfähigkeit der Makroalgen beachtet werden. Eine Stabilisierung der Makroalgen mittels Silierung ist aufgrund des hohen Wassergehaltes nur in Behältern oder abgedeckten Lagunen möglich.

Mechanische Vorbehandlungsmethoden führten zu keiner signifikanten Steigerung des Gasertrages, wogegen thermische und enzymatische Vorbehandlungen zu Steigerungen von über 10 % im Gasertrag führten.

2.3 Mikroalgen

Für unsere Untersuchungen bezüglich der Vergärung von Mikroalgen im Biogasprozess wurde die leicht züchtbare, ubiquitär vorkommende Mikroalge *Chlorella vulgaris* ausgewählt und untersucht. Das erste Problem, das sich bei der Verwendung von Mikroalgen im Biogasprozess zeigt, ist der sehr geringe Gehalt an Trockensubstanz im Wachstumsmedium Wasser. Selbst in Hochleistungsphotobioreaktoren lassen sich nur Trockensubstanzgehalte von 1–8 g/l erzielen. Hier ist die Erntetechnik entscheidend für die Wirtschaftlichkeit.

In unseren Untersuchungen wurden Mikroalgen bis zu einer Konzentration von ca. 1 g/l gezüchtet, geerntet und mittels Vakuumfiltration bzw. Zentrifugation bis auf 3,5 % Trockensubstanzgehalt aufkonzentriert. Der Gehalt an organischer Trockensubstanz lag bei ca. 60 %.

Die Mikroalge *Chlorella vulgaris* lässt sich sehr gut im anaeroben Biogasprozess vergären. Bei einer Verweilzeit von maximal 15 Tagen wurde ein Gasertrag von ca. 400 m³ Biogas je Tonne organischer Trockensubstanz erreicht. Bezogen auf die aufkonzentrierte Algensuspension mit 3,5 % Trockensubstanzgehalt ergab sich ein Biogasertrag von ca. 8,5 m³ Biogas je Tonne Algenfrischmasse. Bezogen auf die ursprüngliche, nicht aufkonzentrierte Algensuspension lag der Biogasertrag bei ca. 0,25 m³ Biogas je m³ Algensuspension.

3 Technische Nutzung und Wirtschaftlichkeit

3.1 Nutzung in Biogasanlagen

Grundsätzlich lassen sich alle hier genannten Substrate in landwirtschaftlichen Biogasanlagen zu Biogas vergären. Die erzielbaren Stromerlöse nach dem EEG 2012 schwanken

zwischen 1,00 und 25,00 € je Tonne Substrat. Für die Nutzung sind jedoch unterschiedliche technische Anpassungen der Anlagen an die jeweiligen Substrate notwendig.

Die Nutzung von Treibseln erfordert eine effektive Sandabscheidung, Makroalgen eine zusätzliche Zerkleinerung und Mikroalgen müssen für eine sinnvolle Biogasproduktion mittels aufwendiger Technik aufkonzentriert werden. Die Wirtschaftlichkeit muss für jeden Anwendungsfall speziell berechnet werden.

3.2 Alternative Nutzung von Algen

Alternativ können Algen – hauptsächlich Mikroalgen – für die Reduktion des CO₂-Ausstoßes von BHKWs genutzt werden. Dazu wird das entstandene Abgas durch Anzuchtbehälter für Mikroalgen geleitet. Die Löslichkeit von CO₂ in Wasser ist jedoch sehr gering, weshalb für eine signifikante Verbesserung der CO₂-Bilanz einer Anlage extrem große Flächen für die Algenzucht bereitgestellt werden müssten.

Sollte jedoch in der Nähe der Biogasanlage ein System installiert werden, in dem mittels Algen Nährstoffe (hauptsächlich Stickstoff und Phosphat) aus landwirtschaftlichen Drainagegräben zurückgehalten werden, dann ist eine Anreicherung dieser Systeme mit CO₂ für ein verbessertes Algenwachstum sinnvoll. Die erzeugten Algen können ihrerseits in der Biogasanlage vergoren werden.

4 Zusammenfassung

Algen, Tang und Seegrass lassen sich im anaeroben Biogasprozess zu Biogas vergären. Der spezifische Biogasertrag ist gering. Die Verarbeitung dieser Substrate erfordert technische Anpassung der Biogasanlagen, wodurch der effektive Nutzen dieser Substrate weiter sinkt. Der erzielbare Nutzen hängt sehr stark vom Standort der Anlagen und den verfügbaren Substraten mit den entsprechenden spezifischen Gaserträgen ab. Die Wirtschaftlichkeit einer Verarbeitung dieser Substrate in landwirtschaftlichen Anlagen muss für den jeweiligen Einzelfall geprüft werden.

Die genannten Substrate sollten, wenn möglich, zunächst stofflich mit höherem erzielbarem Nutzen verarbeitet werden. Die Rest- und Abfallstoffe können dann als Zusatznutzen in landwirtschaftlichen Biogasanlagen umgesetzt werden.

Gemeinschaftsprojekt zwischen Landwirten und Stadtwerken – Biogaseinspeisung mit Aminwäsche

JOHANNES STEINHAUER

1 Gründe für die Biogaseinspeisung

Regenerative Energie ist das Schlagwort, das derzeit in der Energiewirtschaft in aller Munde ist. Biogasenergie ist eine der bevorzugten Energieträger, weil Biogas im Gegensatz zu den meisten anderen Energieträgern lager- und speicherbar ist. Biogas ist also grundlastfähig und kann auch nachts und an windarmen Tagen Energie liefern.

Die Biogasanlage in Hoisten erzeugt ca. 13 000 000 kWh Biogas und kann damit zwischen 700 und 1 200 Haushalte oder 1 800 bis 2 500 Einwohner mit Wärme versorgen. Sie ist damit die größte regenerative Energieanlage der Stadtwerke Neuss. Umgewandelt in Strom und Wärme wird das Biogas jedoch in Kraft-Wärme-Anlagen. Kraft-Wärme-Anlagen sind Anlagen in denen Strom und Heizenergie erzeugt wird. Diese Anlagen befinden sich im Stadtgebiet und haben einen Gesamtwirkungsgrad von ca. 90 %. Zum Vergleich, hocheffektive Kraftwerke (Kohle oder Gas) haben zwischen 45 und 55 % Wirkungsgrad.

Die Stadtwerke Neuss kooperieren auf das Beste mit den Landwirten Königs und Nellen und betreiben eine der ersten, wenn nicht die erste Biogaseinspeiseanlage für privilegierte Anlagen (Anlagen im Außenbereich mit 500 kW elektrischer Leistung). Die Hauptgründe für die Zusammenarbeit waren:

- Verbesserung der Energieausbeutung für den Biogasbauern
- CO₂-neutrale Wärme-/Dampferzeugung an einem Produktionsbetrieb
- Betrieb einer eigenen Biogasanlage für die Stadtwerke Neuss.

2 Rückblick über den Projektlauf

Nachdem die Stadtwerke den Wunsch nach einer eigenen Biogasanlage durch die Preisentwicklung 2007 bis 2008 für die Substrate (Einsatzstoffe) verworfen hatten, ist im Sommer 2008 der Kontakt zu den Energie-Landwirten Königs und Nellen entstanden. Nach der Prüfung von Nahwärmeprojekten ist man schnell zu dem Schluss gekommen, dass eine geeignete Kooperation auch die „natürlichen“ Handlungsstränge der einzelnen Unternehmen berücksichtigen muss, damit ein Erfolg gesichert werden kann. Mit dem einfachen Nenner „jeder macht das, was er am besten kann“ wurde die in der nachfolgenden Auflistung beschriebene Zusammenarbeit begonnen und fortgeführt:

- Planung einer Biogasanlage am Standort Hafen: 10/2006
- Überprüfung der Genehmigungsfähigkeit/Projektierung und Suche nach geeigneten Substratlieferanten bis 09/2008
- Vorläufige Einstellung des Projektes Biogasanlage wegen fehlender Substrate: 09/2008
- Projektierung Biogaseinspeisung: 09/2008
- Letter of Intent: Einspeisung/Vertrag für die Dampfabnahme mit dem Produktionsbetrieb: 12/2008
- Verplanung Einspeisung: 04/2009
- Vertragsabschluss Biogasbauern: 04/2009
- Ausfertigungsplanung: 08/2009
- Vergaben: 08/2009
- Montagebeginn: 11/2009
- Inbetriebnahme der Anlage: 02/2010

Die Umsetzungsgeschwindigkeit kann man in aller Unbescheidenheit als sehr hoch ansetzen.

2.1 Ursprünglich geplanter Ablauf

Ursprünglich sah die Konzeption der Energiewirte Königs und Nellen einen klassischen Betrieb einer Biogasanlage vor, die neben der Stromerzeugung in unmittelbarer Nähe zur Gaserzeugung auch eine Wärmevermarktung im Umfeld vorsah. Gerade die Wärmevermarktung im Umfeld gestaltete sich als äußerst schwierig, da die klassischen Abnehmer – Heizungskunden im Nahbereich – im Planungsstadium der Anlage auch die größten Vorbehalte äußerten (Abb. 1).

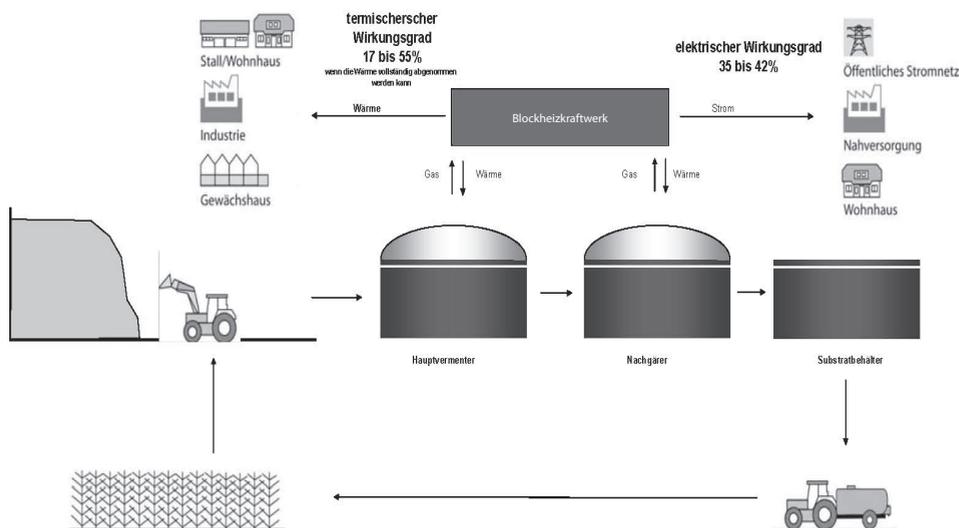


Abb. 1: Ursprünglicher Anlagenaufbau für die Biogasanlage

2.2 Veränderter Ablauf durch Gastransport

Der Ablauf hat sich durch die Möglichkeit zur Gaseinspeisung grundsätzlich geändert. Das Biogas wird in einer Aminwäsche gereinigt und durch die Stadtwerke Neuss auf Erdgasqualität aufbereitet. Damit kann dieses Gas nun ins Erdgasnetz der Stadtwerke übernommen und virtuell gehandelt werden. Durch diese geänderte Verfahrenstechnik ist es möglich, den Gesamtwirkungsgrad der Anlagen erheblich zu steigern und die Gasausbeute zu optimieren, ohne dass die Privilegierung entfällt. Darüber hinaus wurden Wärmepotenziale ausgenutzt, die – wie hier als industrielle Nutzung – auch eine Verbesserung der Vergütungsstruktur mit sich brachten. Der geänderte Ablauf ist schematisch in der Abbildung 2 dargestellt.

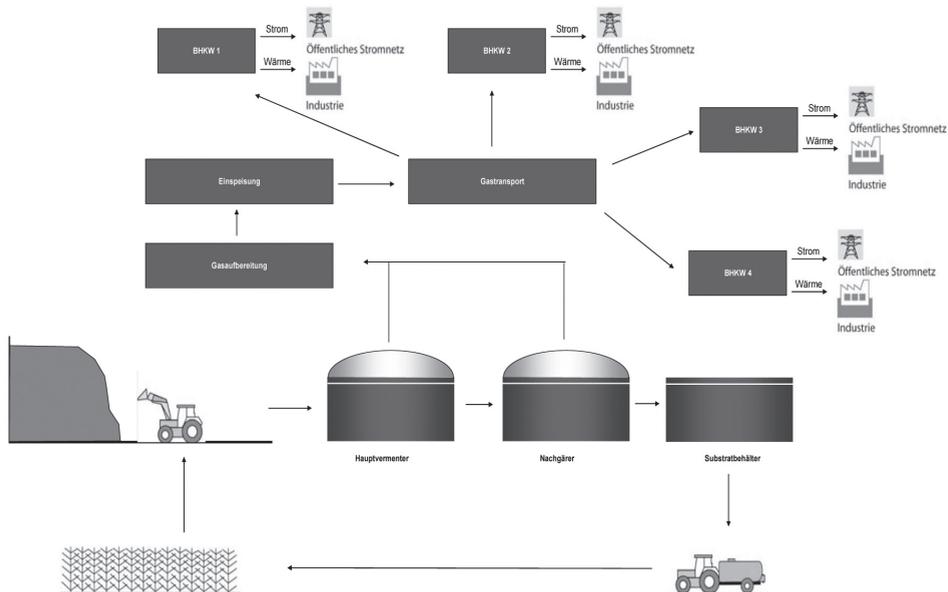


Abb. 2: Geänderter Anlagenaufbau für die Biogasanlage

3 Verfahrensbeschreibung der Gasaufbereitung

In der Abbildung 3 ist der schematische Ablauf der Gasaufbereitung von der Rohbio-gaserzeugung bis zur Einspeisung dargestellt. Zunächst wird über eine Aktivkohle-Reinigung das Rohgas von den Schwefelbestandteilen und -verbindungen gereinigt und danach mithilfe der Aminlösung von CO_2 -Gas befreit. Der Methanengehalt kann bis auf

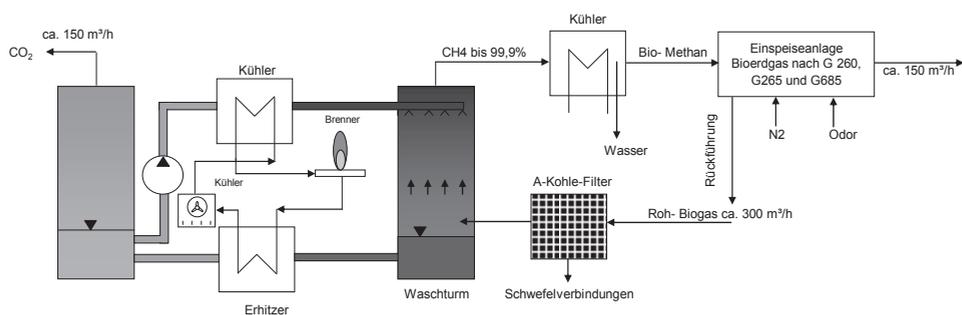


Abb. 3: Schema der Aminwäsche und weiteren Gasaufbereitung

> 99 % eingestellt werden. Das Prinzip beruht auf der Aufnahmefähigkeit von Gasen bei Flüssigkeiten und der Regeneration durch Wärmezugabe. Dies ist aber nicht sinnvoll, weil die Anforderungen an das einzuspeisende Gas nachfolgend beschriebene weitere Eigenschaften aufweisen muss.

Das Gas wird getrocknet und in der Einspeiseanlage mithilfe von Stickstoff und Odo-risierungsmittel auf Erdgasqualität nach den einschlägigen DVGW-Vorschriften aufberei-tet. Die Anforderungen, die durch die Anforderungen an die Abrechengenauigkeit an das Gas gestellt werden, wurden durch das Eichamt verschärft.

Das Eichamt fordert eine maximale Abweichung der Brennwerte zu den Brennwerten im Netz von 1 %. Das Verfahren ist in Abbildung 3 dargestellt.

3.1 Vorgaben an die Gasqualität

Als Netzbetreiber haben die Stadtwerke Neuss die Pflicht, die Qualitätskriterien für das Biomethan festzulegen. Hierbei sind die DVGW-Blätter G 260, G 265 und G 685 maßgebend. Das Erdgas im Neusser Stadtgebiet definiert sich als L-Gas. In der letzten Spalte der Tabelle 1 sind die Abschalt-Kriterien dargestellt. Eine 0 bedeutet, dass das Gas in keinem Fall in das Gasnetz übernommen wird und an den Erzeuger zurückströmt.

Tab 1: Qualitätskriterien an die Gasaufbereitung

Messwert	von	bis	Einheit	Zulässiger Grenzwert	Konsequenz beim Überschreiten
Wobbe-Index $W_{S,n}$ Nennwert	10,5	13 12,4	kWh/m ³ kWh/m ³	13 kWh/m ³	0
Brennwert $H_{S,n}$	8,4	13,1	kWh/m ³	8,4 kWh/m ³	0
relative Dichte d_n	0,55	0,75	-	0,55-0,75	1
Kondensationspunkt		1	°C	1 °C	0
Nebel, Staub, Flüssigkeit				technisch frei	0
Sauerstoff		0,5	%	0,5 %	0
Gesamtschwefel ohne Odierungsmittel		30	mg/m ³	30 mg/m ³	0
Mercaptanschwefel		6	mg/m ³	6 mg/m ³	0/1
Schwefelwasserstoff		5	mg/m ³	5 mg/m ³	0/1
Taupunkttemperatur		2	°C	2 °C	0
Kohlendioxid CO ₂ (aus G 262)		< 6	%	6 %	0
Wasserstoff H ₂ (aus G262)		< 5	%	5 %	0

3.2 Schema der Einspeiseanlage

Der nachfolgenden Abbildung 4 entnehmen Sie bitte das Schema der Einspeisung mit den Bilanzierungseinrichtungen. Sobald das Gas eine der Kriterien unter 3.1 nicht erfüllt, wird das Gas zurückgeführt. Der Vorteil der Bilanzierung des entschwefelten und vom CO₂ befreiten Gas ist neben den vereinfachten Messprinzipien auch der Verzicht auf einen „überqualifizierten“ Korrosionsschutz.

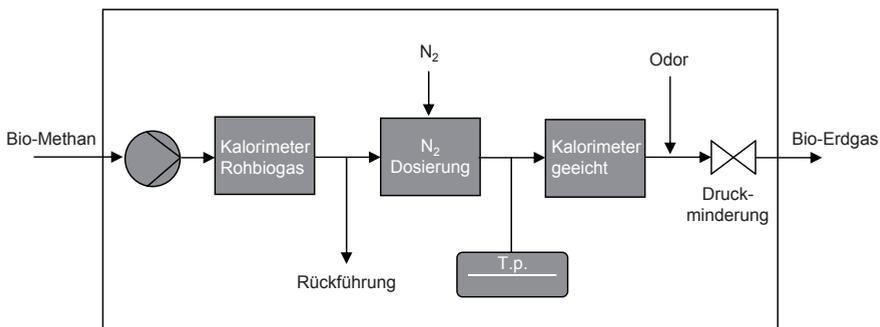


Abb. 4: Einspeiseanlage

3.3 Erforderliche Genauigkeit und Regelbereich

Die Vorgaben an die Kriterien Wobbe-Index, Dichte, Brennwert und Gasbestandteile ist hoch. Die nachfolgende Tabelle zeigt, dass bis maximal 6 % CO₂ noch im Biomethan verbleiben können, eine Regelung über 98 % Methan nicht möglich ist, weil dann der Wobbe-Index mit der gewählten Technik nicht mehr einzuhalten ist.

Schwankungen beim Brennwert von 9,8 bis zu 10,25 kWh/m³ sind nachzubilden. Darüber hinaus nur noch mit einer Flüssiggaszudosierung oder mit dem Ausreizen der Toleranzen (Abb. 5).

					Brennwert Methan	39,9	MJ/m ³
					Dichte Luft	1,293	kg/m ³
					Dichte Methan	0,717	kg/m ³
					Dichte CO ₂	1,977	kg/m ³
CH ₄	95%	96%	97%	98%		99,0%	99,10%
CO ₂	5,00%	4,00%	3,00%	2,00%		1,00%	0,90%
Dichte Gemisch	0,78	0,7674	0,7548	0,7422		0,7296	0,72834
relative Dichte	0,6032	0,5935	0,5838	0,5740		0,5643	0,5633
Brennwert Gemisch	37,905	38,304	38,703	39,102		39,501	39,5409
Brennwert Gemisch	10,529	10,640	10,751	10,862		10,973	10,984
Wobbeindex	13,556	13,811	14,071	14,336		14,607	14,634
					Dichte N ₂	1,25	
Zumischung N ₂	3,9%	4,6%	5,9%	7,2%		8,3%	8,4%
Dichte Gemisch	0,7983	0,7896	0,7841	0,7788		0,7729	0,7722
relative Dichte	0,6174	0,6107	0,6064	0,6023		0,5978	0,5972
Brennwert Gemisch	36,4267	36,5420	36,4140	36,2867		36,2149	36,2149
Brennwert Gemisch	10,1185	10,1506	10,1150	10,0796		10,0597	10,0597
Abweichung zum Mittelwert	-1,427%	-1,115%	-1,461%	-1,806%		-2,000%	-2,000%
Wobbeindex	12,8773	12,9893	12,9892	12,9880		13,0114	13,0171
Abweichung zum Mittelwert	0,601%	1,476%	1,475%	1,466%		1,649%	1,693%
oberer Wobbeindex	13						
unterer Wobbeindex	10,5						
unterer Brennwert	8,4						
oberer brennwert	13,1						
zulässige Abweichung Brennwert	2%						

-2% zulässige Toleranz nach G 685 Ziffer 6.3

Abb. 5: Einsatzbereich der Technik

4 Wirkungsgrade bezogen auf Hu der dezentralen BHKW's

Mit den Wirkungsgraden an den Ausspeisestellen

- Nordbad 90,00 %
- Südpark 96,10 %
- Stadtbad 99,40 %
- Dampfproduktion 65,90 % (seit 12/2011 auf 73 % gesteigert)

und dem gewichteten Gesamtwirkungsgrad von 84,6 % hat sich der Gesamtwirkungsgrad des neuen Systems mit Gasaufbereitung gegenüber dem ursprünglichen System auf 211,5 % gesteigert.

4.1 Nutzen der Landwirte

Die Energielandwirte haben in ihrem ursprünglichen Prozess ca. 7700 Volllaststunden für ihre BHKWs berücksichtigt. Bei einem Wirkungsgrad von ca. 35 % konnten so 11 Mio. kWh/a Heizwert an Brenngas produziert werden. Durch die Gaswäsche können mit der gleichen Anlage 13,5 Mio kWh Brennwert erzeugt werden, dies ist eine Steigerung um 11,6 %.

4.2 Effektivitätssteigerung des Prozesses durch Biogaseinspeisung

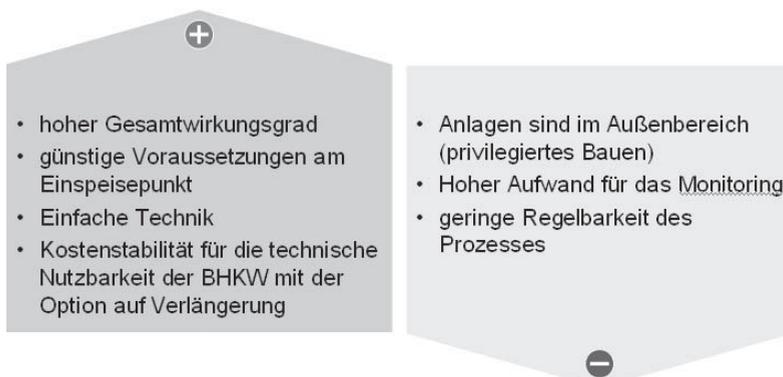
Für den Gesamtprozess lässt sich hierdurch eine Wirkungsgradverbesserung von 111,6 % x 211,5 % = 236 % = 2,36-fach ermitteln. Durch diese Effizienzsteigerung ließen sich die zusätzlichen Investitionen darstellen.

4.3 CO₂-Einsparung

Gegenüber dem Einsatz von Erdgas können bei 1 kWh Erdgas = 190 g CO₂ und 12,5 Mio. kWh = 2375 t CO₂ eingespart werden.

Gegenüber dem Umwandlungsprozess 4,375 Mio. kWh mit 570 g CO₂ je kWh aus Strommix können 2494 t CO₂ eingespart werden und durch die Kraft-Wärme-Kopplung von 49,6 % Wärmenutzung mit 85 % Wirkungsgrad für einen Kessel können bei 6200 Mio. kWh Wärme 224 g CO₂/kWh Wärme = 1389 t CO₂ eingespart werden. Insgesamt können je nach Rechenmethode durch die Effektivität des Prozesses bis zu 3383 t CO₂ eingespart werden.

5 Vorteile/Nachteile der Technik



6 Investitionen

Für das Gemeinschaftsprojekt haben die Projektbeteiligten die folgenden Investitionssummen aufgewendet:

Energiewirte Königs und Nellen

- Biogasanlage ~ 1,40 Mio. Euro
- Gas ~ 1,00 Mio. Euro

Stadtwerke Neuss

- Einspeisung 0,50 Mio. Euro
- BHKWs 1,20 Mio. Euro

Gemeinsam

- Summe 4,10 Mio. Euro

7 Zusammenfassung

Obwohl in der Zusammenarbeit von höchst unterschiedlichen Systemen wie einem Stadtwerk und Energielandwirten ein eigenständiges Expertenwissen vorherrscht, ist eine sinnreiche, ökonomisch und ökologische Zusammenarbeit möglich. Am Beispiel der Energiewirte Königs und Nellen und der Stadtwerke Neuss ist dies praktisch umgesetzt worden. Für nähere Informationen stehen Ihnen alle Projektpartner gern zur Verfügung.

Biomethaneinspeisung aus Sicht eines Anlagenbetreibers

THOMAS BALLING

1 Einleitung

In den letzten Jahren haben wir in verschiedenen Gesellschaften mehrere Biogasanlagen konzipiert und umgesetzt. Waren es am Anfang noch reine Direktverstromungsanlagen mit angegliedertem Wärmenetz, konnten im Jahr 2010 die ersten zwei Biogasanlagen mit angeschlossener Gasreinigung und Einspeisung ins Erdgasnetz umgesetzt werden. Das Ziel unseres Handelns lag immer darin begründet, gemeinsame Projekte vieler Landwirte hinzubekommen, die das produzierte Biogas dann reinigen und einspeisen. Wichtig war bei allen Überlegungen, ein hohes Maß an Sicherheit zu generieren. Dies bezieht sich sowohl auf die Substratversorgung als auch auf die Bereitstellung des Kapitals.

Beim anschließenden Vortrag sind wir im Speziellen auf die Anlage in Unsleben eingegangen. Die anfängliche elektrische Leistung lag bei 625 kW. Die Anlagenleistung wurde im Jahr 2010 auf 888 kW erhöht und es wurde um eine Rohgasanlage mit einer Kapazität von 700 Nm³ für die Gaseinspeisung ergänzt. Dies lässt sich aufgrund des beigefügten Konzepts sehr gut erkennen.

2 Mögliche Schnittstellen bei Einspeiseprojekten

- Substraterzeugung, Biogasproduktion
Biogasproduktion wird von landwirtschaftlichen Betrieben erledigt, während die Aufbereitung von Energieversorgungsunternehmen und die Einspeisung meist vom Gasnetzbetreiber organisiert werden.
- Biogasproduktion, Aufbereitung, Einspeisung
Bei dieser Variante liegen die Gasproduktion sowie die Aufbereitung in einer Hand. Dies können sowohl landwirtschaftliche Gemeinschaften als auch Investoren sein, die Substrate aus der Landwirtschaft zukaufen. Die Einspeisung bleibt beim Netzbetreiber.
- Substraterzeugung, Biogasproduktion, Aufbereitung, Einspeisung
Diese Variante ist ganz ohne Schnittstellen. Alles liegt in einer Hand.

Die Bewertung, welches Konzept das richtige ist, muss von Fall zu Fall entschieden werden und hängt sehr von den vor Ort vorherrschenden Ambitionen ab. Diese gehen jedoch oft sehr weit auseinander. Manchmal möchten landwirtschaftliche Betriebe/Ge-

meinschaften die komplette Wertschöpfung übernehmen, andererseits haben oft auch Energieversorgungsunternehmen (EVU) oder Kapitalgesellschaften die gleichen Interessen. In solchen Fällen entsteht zwangsläufig erhebliches Konfliktpotenzial. Ein Miteinander ist oft nicht mehr möglich und gegensätzliche Interessen verzögern das Projekt schnell um Monate oder bringen es ganz zu Fall.

Unserer Meinung nach sollte man bestrebt sein, möglichst viele regionale Projektpartner mit einzubeziehen. Landwirtschaftliche Urproduktion war schon immer der Feldbau und die Erstverwertung der auf dem Feld erzeugten Produkte. Früher war dies ausschließlich der Stall, heutzutage wird dieser um Biogasanlagen erweitert. Die Landwirtschaft hat in den zurückliegenden Jahren nachhaltig bewiesen, dass sie dies ohne Problem umsetzen kann. Auch wurde mit viel Pioniergeist erhebliche Entwicklungsarbeit im Bereich Biogas geleistet.

Aus diesem Grunde steht es für uns außer Frage, dass der Betrieb der Biogasanlage auf jeden Fall von der Landwirtschaft organisiert werden sollte. Wenn ein vor Ort agierendes EVU Interesse zeigt, in das Geschäftsfeld Biogasaufbereitung zu investieren, liegt es nahe, dass die Gasaufbereitung von diesem betrieben wird. Hier ist über Jahrzehnte hinweg technische Kompetenz gewachsen und die Anforderungen an technische und sicherheitsrelevante Details im Bereich der Aufbereitung sind vorhanden. Auch zeigt sich immer wieder, dass das gemeinsame Auftreten bei Behörden und Zertifizierungsstellen viele positive Aspekte mit sich bringt.

3 Gesellschafts-/Rechtsform

Aufgrund der Tatsache, dass bei Einspeiseprojekten der Flächenbedarf für die Substratbereitstellung im Minimum oberhalb von 500 ha liegt, ist es einzelnen landwirtschaftlichen Betrieben meist nicht möglich, diese Fläche als Einzelunternehmen bereitzustellen. Auch übersteigt das Investitionsvolumen von mehr als 3,5 Mio. € für die Biogasproduktion sowie etwa 1,5 Mio. € für die Aufbereitung meist das Machbare landwirtschaftlicher Betriebe. Insofern ist es naheliegend, dass sich Gemeinschaften von bis zu 40 Landwirten bilden, um gemeinsam ein Projekt für die Gaseinspeisung zu realisieren. Als naheliegende Rechtsform wird meist die GmbH oder die GmbH & Co. KG gewählt. Bei diesen Rechtsformen können auf sehr einfache Weise Handlungs- und Kontrollgremien organisiert werden.

4 Umgesetztes Konzept am Beispiel der Anlage Unsleben

Bei den von uns umgesetzten Anlagen haben sich die mit der Aufbereitung betreuten Stadtwerke nach Absprache mit uns jeweils für die drucklose Aminwäsche entschieden. Nach unseren Berechnungen ist dies bei moderaten Wärmebereitstellungspreisen die wirtschaftlichste Lösung bei gleichzeitig höchster Biomethanqualität für alle Beteiligten. Wenn man davon ausgeht, dass die Biogasproduktion eine Wärmequelle benötigt und diese durch ein Blockheizkraftwerk (BHKW) mit einer Leistung von 600 bis 900 kW abgedeckt wird, so generiert man durch die Aminwäsche einen Wärmeabnehmer direkt vor Ort. Dieser hat einen Wärmebedarf von etwa 400 kW. Insofern hat man auf diese Art und Weise für alle Projektbeteiligten ein sehr interessantes und lukratives Wärmekonzept geschaffen.

Parallel dazu entsteht eine sehr stabile Preissituation, da die Wärmelieferung nicht abhängig ist von den Entwicklungen am Strommarkt. Vielmehr wird über die KWK-Situation die Wertschöpfung bei den beteiligten Unternehmen gehalten, was bei einem Strombezug zum Betrieb der Aufbereitung nicht der Fall gewesen wäre.

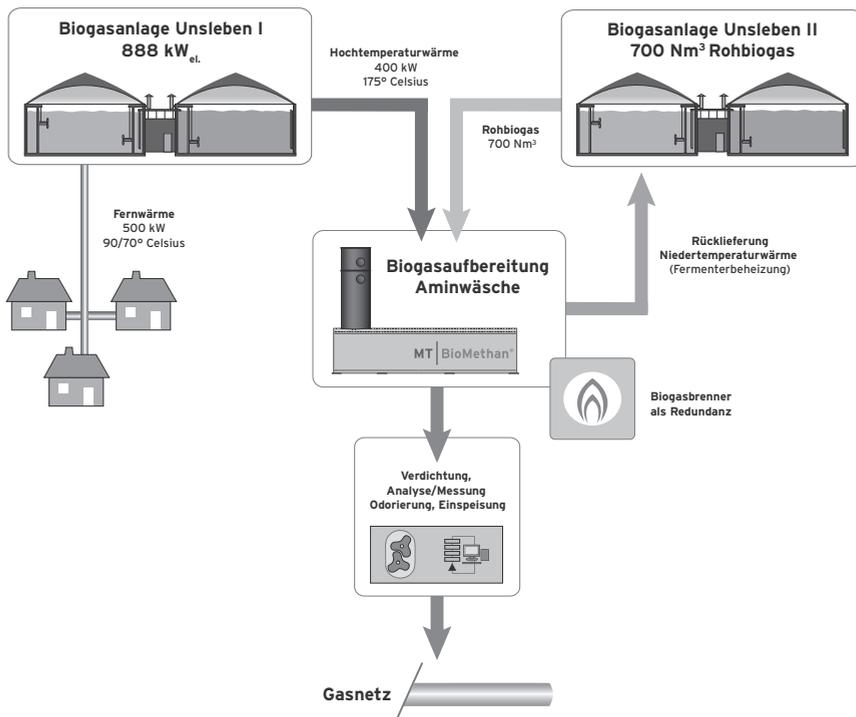


Abb. 1: Fließbild der Anlage Unsleben

Beispiel Unsleben

Wie in Abbildung 1 zu ersehen ist, stehen am Standort zwei Biogasanlagen. Unsleben 1 wurde 2007 errichtet und mit 625 kW_{el} betrieben. Die Wärme wurde über eine Wärmeleitung an ein Ortsnetz und eine Gärtnerei veräußert. In Verbindung mit der Entscheidung am gleichen Standort eine zweite Biogasanlage zu errichten, wurde das bestehende BHKW gegen ein neues Aggregat mit 888 kW ersetzt. Die neue Biogasanlage (Unsleben 2) wurde mit einer Leistung von 700 Nm³ Biogas konzipiert. Dieses Biogas wird an die Biomethan Rhön-Grabfeld, ein Tochterunternehmen der vor Ort ansässigen Erdgasversorgungsgesellschaft, veräußert. Hier wird es aufbereitet und ins Ortsgasnetz der Gemeinde eingespeist.

Besonders stolz sind wir auf das ausgeklügelte Wärmekonzept. Über das gesamte Jahr gesehen können rund 90 % der verfügbaren Wärme (900 kW) aktiv verkauft werden. Gelungen ist uns dies über die Kombination der Wärmekunden. Zum einen werden mit Priorität 1 dauerhaft 400 kW an die Aminwäsche geliefert.

Ebenfalls mit erster Priorität werden 500 kW als Grundlast an das Wärmenetz abgegeben. Sollte hier nicht alle Wärme abgenommen werden, wird diese für die Heizung der Biogasanlagen herangezogen. Des Weiteren wird die Restwärme aus der BGA ausgekoppelt und in die Heizschläuche der Biogasanlage eingeleitet. Um dies sicherzustellen, war es notwendig, einen redundanten Biogasbrenner mit einer Leistung von 700 kW beizustellen.

Sicherheit der Substratversorgung

Aufgrund der Beteiligung der Landwirte als Kommanditisten wurde eine 80 %ige Versorgung mit den benötigten Substraten erreicht. Dies geschieht über ein an die Gesellschafteranteile gebundenes Lieferrecht/Lieferpflicht. Die Preise hierfür schwanken in einer Spanne von 26 bis 35,€/t Mais bei einem Trockensubstanzgehalt von 33 %. Welcher Preis innerhalb der Spanne gezahlt wird, hängt vom Weizenpreis des jeweiligen Erntejahres ab.

Die restlichen 20 % der Substrate, die nicht über die Lieferverpflichtung gedeckt sind, werden auf dem freien Markt zugekauft. Hier versuchen wir, die Kosten der Rohstoffbeschaffung durch den Zukauf günstiger Substrate zu reduzieren. Dies ist immer wieder möglich. Zu nennen sind hier Kartoffelpartien, Grassilage oder auch ganze Getreidepartien, die aus irgendwelchen Gründen für die Verfütterung nicht mehr geeignet sind.

5 Probleme mit Behörden im föderalen System

Bei den Anträgen auf Genehmigung zeigte sich, dass viele Behörden/Landratsämter mit der Genehmigung von großen Biogasanlagen überfordert sind. Auch fällt auf, dass die Anforderungen an Projekte in unterschiedlichen Bundesländern, ja manchmal von Landratsamt zu Landratsamt, sehr stark differieren. Manchmal werden Projekte über Monate verzögert, weil man sich erst behördenintern eine Meinung bilden muss. Dies stellt vor allem die Anlagenhersteller vor große Probleme, da bei der Konzeption der Biogas- und Einspeiseanlage nicht klar ist, welche Anforderungen von der Aufsichtsbehörde bzw. von den zuständigen TÜV-Zertifizierungsstellen verlangt werden. Hier ist großer Handlungsbedarf, da das Nacharbeiten die Projekte unnötigerweise stark verteuert. Es besteht erheblicher Abstimmungsbedarf in den einzelnen Bereichen. Meiner Meinung nach sollte zumindest der notwendige technische Standard auf Bundesebene festgelegt werden. Anforderungen an Natur- und Gewässerschutz müssen jedoch regional bleiben.

6 Auflagen in Bezug auf Gewässer- und Umweltschutz

Bei der Genehmigung von Biogasanlagen stellt man in letzter Zeit fest, dass die Auflagen speziell für den Gewässerschutz immer weiter ansteigen. Dies gipfelt teilweise darin, dass vom Wasserwirtschaftsamt eine Überdachung von Fahrlochanlagen gefordert wird. Bedenkt man, dass Einspeiseanlagen aufgrund ihrer Größe noch mehr im Fokus stehen, so erscheint es logisch, dass hier die Auflagen noch restriktiver ausgelegt und angewendet werden.

Es ist aus diesem Grunde absolut notwendig, schon im Vorfeld der Planung nach Anlagenstandorten zu suchen, die möglichst wenig Konfliktpotenzial besitzen. Sehr hilfreich ist es, wenn anfallendes evtl. leicht verschmutztes Regenwasser nicht in Vorfluter eingeleitet werden muss, sondern auf landwirtschaftlichen Flächen verregnet werden kann.

Generell kann man sagen, dass in Bezug auf die anderen Umweltauflagen meist auch das „Volle Programm“, angefordert wird. Dies beginnt mit Hamstergutachten, über Vogelschutzrichtlinien bis hin zu Lärmgutachten, auch wenn im Umkreis von über 2 km keine Wohnbebauung vorhanden ist.

7 Technische Probleme

Im Großen und Ganzen kann man sagen, dass man den Prozess der Gasreinigung im Griff hat und die Qualitäten des erzeugten Biomethans zwischen 98 und 99 % Methan liegen. Während der Inbetriebnahmephase ist es jedoch immer wieder zu Problemen mit dem Taupunkt gekommen. Dieser muss je nach Gasnetz auf bis zu -56 °C abgesenkt werden, um einer Kondensation im Gasnetz vorzubeugen. Es gestaltete sich schwierig, diesen Wert auf Anrieb zu erreichen bzw. das ausfallende Kondensat ohne Probleme abzuführen. Etwa acht Wochen nach Inbetriebnahme waren diese Probleme dann aber gelöst. Des Weiteren liegt ein großes Problem darin, dass Rohbiogas bis heute nicht eichfähig gemessen werden kann. Insofern ist man immer wieder auf Umrechnungen angewiesen, die aus dem eingespeisten Biomethan abgeleitet werden. Verfügt die Anlage über einen Reinigungsprozess, der einen Methanschluß von unter 0,1 % aufweist, so ist dies problemlos möglich. Es bleibt aber zu bedenken, dass immer noch Reinigungsverfahren am Markt sind, deren Methanschluß deutlich oberhalb der Prozentmarke angesiedelt ist. Hier werden dann Nachverbrenneinrichtungen eingesetzt, um die geforderten Grenzwerte einzuhalten. Eine genaue Erfassung der Liefermenge ist dadurch jedoch nicht möglich.

8 Preisanpassung

Das Problem bei Einspeiseprojekten ist die Preisfindung für das verkaufte Biogas bzw. Biomethan. Wie bei Biogasanlagen mit Direktverstromung errechnet sich der zu erzielende Preis aus den Erlösen für den verkauften Strom, der nach der Entnahme aus dem Gasnetz in Blockheizkraftwerken erzeugt werden kann zzgl. der am Standort erzielbaren Wärmeerlöse. In der Vergangenheit konnten nur 20 % bis 25 % der Wertschöpfung für die erzeugte Wärme angesetzt werden. Diese Menge wurde dann häufig als variabler Faktor mit einer Preisanpassungsklausel in den Vertrag aufgenommen, um die mögliche Inflation auszugleichen. In Direktverstromungsanlagen besteht die Phantasie, dass nach Ablauf von 10 Jahren evtl. der Marktpreis für Strom über der EEG-Vergütung liegt und somit bei Direktvermarktung höhere Erlöse erzielt werden können. Eine Partizipation an höheren Strompreisen ist bei Einspeiseanlagen momentan noch nicht realisierbar. Hier sollten Verträge erarbeitet werden, die eine Wandlung für den Fall stark steigender Strompreise möglich machen.

9 Wirtschaftlichkeit

Die Wirtschaftlichkeit hängt von vielen Faktoren ab. Dies sind vor allem der Verkaufspreis des Biomethans, der Einkaufspreis der Substrate und die Anlagenverfügbarkeit.

- Verkaufspreis Biogas zur Aufbereitung

Die Preise haben sich in den letzten Jahren erheblich verändert. Konnten im Jahr 2008 noch Preise von 5,9 bis 6,1 ct/kWh $H_{s,n}$ erzielt werden, so sank der Preis im Jahr 2010 bis auf 5,7 ct/kWh $H_{s,n}$. Dies war hauptsächlich dadurch begründet, weil sich das Konkurrenzprodukt Erdgas aufgrund eines Überangebotes am Markt im Vergleich zu anderen Energieträgern auf historisch günstigem Niveau bewegte. Im Jahre 2011 haben sich die Preise wieder auf ca. 6,0 ct/kWh $H_{s,n}$ erholt. Hiermit ist zwar bei momentanen Substratpreisen eine Wirtschaftlichkeit zu erzielen. In Anbetracht der Tatsache, dass in Zukunft mit Inflationsraten von 2–3 % gerechnet werden muss, sinkt diese spätestens nach 8 Jahren auf Null. Wenn man den Investitionszeitraum von 20 Jahren betrachtet, ist eine Preisanpassung zwingend erforderlich.

- Substratpreise

Da aus dem Substrateinkauf ca. 50 % der Kosten resultieren, besteht hier das größte Schwankungs- oder Unsicherheitspotenzial. Auf der anderen Seite stehen die Substrate für Biogasanlagen in direkter Konkurrenz zu den anderen Früchten des Feldbaus. Wenn man davon ausgeht, dass sich die Entwicklung des Preisgefüges für Feldfrüchte auch nur moderat nach oben entwickelt, besteht ein erhebliches Gefahrenpotenzial für die Wirtschaftlichkeit von Biogasanlagen. Ein Teil des Risikos kann sicherlich über die Pflanzenzüchtung aufgefangen werden. Bedenkt man, dass der Zuchtfortschritt bei der Erzeugung von Weizen bei 0,7 % jährlich liegt, geht man davon aus, dass im Bereich der Züchtung für den Substratanbau ein Potenzial von ca. 2 % p.a. vorhanden ist. Dieser Unterschied ist darauf zurückzuführen, dass über viele Jahrzehnte die energetische Verwertung von Pflanzen nicht als Zuchtichtung definiert war und somit ein großer Nachholbedarf besteht.

- Anlagenverfügbarkeit

Die von uns betriebenen Biogaserzeugungs- und -aufbereitungsanlagen haben eine Verfügbarkeit von ca. 97 %. Dies ist sehr gut und ist kaum noch weiter zu steigern. Absolut notwendig ist jedoch, dass vom Gesetzgeber in der Novellierung des EEGs Rechtsklarheit geschaffen wird, was die Grenzen bei 350 Nm³ und 700 Nm³ angeht. Würde man einer jährlichen Bilanzierung zustimmen, so könnte ohne Zusatzkosten deutlich mehr Biomethan ins Netz eingespeist werden.

10 Anlagengröße

Die Anlagengröße ist ein Politikum. Auf der einen Seite bestehen Interessen, die möglichst große Anlagen auf den Weg bringen wollen. Man argumentiert hier mit dem Gesetz der abnehmenden Stückkosten, wobei festzuhalten ist, dass eine Kostendegression oberhalb von 700 Nm³ erzeugten Biomethans fast nicht mehr vorhanden ist. Andererseits sind Substrate für Großanlagen immer wieder ein entscheidender Faktor. Bedenkt man, dass bei Anlagengrößen mit einer elektrischen Leistung von 10 MW die Substrate oft bis zu 70 km beigestfahren werden müssen, werden die arbeitswirtschaftlichen Vorteile in der Anlage sehr schnell ins Gegenteil umgewandelt. Meiner Meinung nach liegt die vernünftige Größe für Einspeiseprojekte zwischen 200 und max. 700 Nm³ Biomethan je Stunde. Letztere Zahl ist jedoch nur sinnvoll, wenn durch die neu zu errichtende Biogasanlage keine Konkurrenzsituation zu evtl. bestehenden Anlagen ausgelöst wird.

11 Ausblick

Prinzipiell ist zu sagen, dass der Prozess der Gasreinigung von der technischen Seite her gelöst ist. Er verläuft mit hoher Anlagenverfügbarkeit und verhältnismäßig geringem Wartungsaufwand. Trotzdem besteht wie überall in der Biogasbranche weiterhin erheblicher Forschungsaufwand, da wir nach meiner Überzeugung erst am Anfang der Nutzung regenerativer Energien stehen. Schließlich sind der Menschheit durch die sehr kostengünstige Bereitstellung fossiler Energiequellen fast 100 Jahre an Forschung und Entwicklung im Bereich der erneuerbaren Energien verloren gegangen.

Potenziale für eine optimierte und Ressourcen schonende Biomethanbereitstellung – Leitlinien für den weiteren Ausbau der Biogasnutzung

WOLFGANG URBAN

1 Politische Ausbauziele

Die Bundesregierung hat mit dem im September 2010 vorgestellten Energiekonzept eine langfristige Gesamtstrategie bis 2050 für die Transformation der Energiewirtschaft vorgelegt. Das Ziel ist, Deutschland zur energieeffizientesten und klimafreundlichsten Volkswirtschaft der Welt bei wettbewerbsfähigen Energiepreisen und hohem Wohlstandsniveau zu entwickeln. Erstmals wurden verbindliche Zielvorgaben zur Reduktion von Treibhausgasemissionen vorgelegt. Im Vergleich zu 1990 sollen die CO₂-Emissionen bis 2020 um 40 % und bis 2050 um 80–95 % gesenkt werden. Die Bundesregierung verfolgt im Kern eine Doppelstrategie: bis 2050 sollen Erneuerbare Energien die Energieversorgung weitgehend übernehmen. Des Weiteren soll der Primärenergiebedarf bis 2020 um 20 % abgesenkt und bis 2050 sogar halbiert werden.

Heruntergebrochen auf die Sektoren Strom, Wärme und Mobilität bedeutet dies, dass bis 2020 der Anteil Erneuerbarer Energien im Stromsektor mindestens 30 %, im Wärmesektor 14 % und im Kraftstoffsektor 10 % betragen soll. Die Bioenergie soll in allen drei Sektoren wesentliche Beiträge leisten. Hierfür müssen alle nachhaltig verfügbaren Ressourcen möglichst effizient genutzt werden, weshalb der KWK-Anteil im Stromsektor auf mindestens 25 % anzuheben ist. Der aktuelle Nationale Aktionsplan für erneuerbare Energien (NREAP) – in dem die Bundesregierung auch die Ziele und Vorgaben der EU-Richtlinie 2009/28/EG umsetzt – formuliert detailliert die Ausbauszenarien für gasförmige Biomasse (BMU, 2009). Demnach soll:

- Die Stromerzeugung aus Biogas von heute 12 auf 19 TWh im Jahr 2020 steigen. Das entspricht einer Erhöhung um 63 %. Fast die Hälfte des Stroms wird in Kraft-Wärme-Kopplung erzeugt.
- Die Wärmeerzeugung aus Biogas über KWK-Anlagen von heute 18 TWh (0,7 % des Bruttowärmeverbrauchs in 2009) auf 27 TWh im Jahre 2020 steigen, das entspricht einer Erhöhung um 50 %.
- Die Kraftstoffnutzung von Biogas/Biomethan, die heute noch eine geringe Bedeutung hat, auf etwa 2 Mrd. kWh im Jahre 2020 steigen. Dies deckt den jährlichen Erdgasverbrauch von 1,5 Mio. Erdgasfahrzeugen (Jahresfahrleistung 20 000 km, Erdgasverbrauch 5 kg/100 km).

2 Biogaspotenziale (Rohstoff- und Flächenressourcen)

Für die Biogaserzeugung können sowohl Abfälle und Reststoffe aus der Land- und Forstwirtschaft sowie lebensmittelverarbeitenden Industrie- und Gewerbebetrieben als auch Energiepflanzen verwendet werden; ergänzend sind auch Rohstoff- bzw. Biogasimporte aus anderen Ländern möglich.

Abfall- und Reststoffpotenzial für Biogas

Das für die Biogaserzeugung in Deutschland verfügbare Potenzial an Abfällen und Reststoffen aus der Land- und Forstwirtschaft (z. B. Gülle, Bioabfälle), für die das Energiekonzept stärkere Nutzungsanreize ankündigt, ist mengenmäßig stark begrenzt und fällt in der Regel nur in kleinen Mengen in der Fläche verteilt an.

Reststoffe aus der Viehhaltung („tierische Exkremente und Einstreu“) stellen mit 26,7 TWh (Energieäquivalent im Biogas) das mit Abstand größte technische Potenzial zur Biogaserzeugung dar. Jedoch weist insbesondere Gülle einen sehr geringen Energiegehalt auf, ist deshalb wegen seines hohen Wassergehalts kaum sinnvoll transportfähig, fällt überwiegend in kleinen Mengen dezentral an und ist infolgedessen nur unter vergleichsweise hohen Kosten energetisch erschließbar.

Derzeit werden in Deutschland etwa 15–20 % der anfallenden Güllemengen energetisch genutzt. Eine weitere Anhebung des Anteils energetisch genutzter Güllemengen ist nur unter erheblichen Mehrkosten (kleine und spezifisch teure Biogasanlagen, Gülleaufbereitung über Fest-Flüssig-Separation, Gülletransporte) möglich, weshalb zusätzliche finanzielle Anreize für eine stärkere Güllennutzung unter Klimaschutz- und Kostengesichtspunkten genau abzuwägen sind. Alle weiteren Reststoff- und Abfallpotenziale weisen Potenziale von jeweils deutlich unter 20 PJ auf. Die Bergung von Grasschnitt und Landschaftspflegematerialien verursacht hohe Logistikkosten. Abfälle und Reststoffe aus Gewerbe und Industrie sowie Haushalten (organische Siedlungsabfälle) werden zum großen Teil bereits stofflich verwertet und unterliegen somit Nutzungskonkurrenzen. Die weitere Erschließung von Abfällen und Reststoffen aus der Land- und Forstwirtschaft ist deshalb mit Augenmaß anzugehen. Es ist abzuwägen zwischen den möglichen Klimaschutzwirkungen und den mit der Abfall- und Reststofferschließung verbundenen Kosten.

Zwar ist insgesamt von einem technisch verfügbaren Reststoffpotenzial von 180 PJ (entspricht ca. 44,7 TWh Biogas) auszugehen, jedoch gelten maximal 50 % als wirtschaftlich erschließbar. Bei Ausschöpfung des wirtschaftlich verfügbaren Abfall- und Reststoffpotenzials zur Biogaserzeugung könnte ein Flächenbedarf für den Energiepflanzenanbau von maximal 490 000 ha substituiert werden. Es wird deutlich, dass das verfügbare Reststoff- und Abfallpotenzial sehr stark begrenzt ist und deshalb nur einen

vergleichsweise kleinen Beitrag zur Erreichung der klimapolitischen Ziele leisten kann. Trotzdem ist die weitere Erschließung von Abfällen und Reststoffen nicht nur aus ökologischer Sicht geboten, da durch ihre energetische Verwertung Nutzungskonkurrenzen beim Energiepflanzenanbau minimiert, Stoffkreisläufe geschlossen und Ressourcen effizienter genutzt werden können.

Flächeninanspruchnahme für die Biogaserzeugung

Derzeit werden etwa 2,15 Mio. ha für den Energiepflanzenanbau genutzt (FNR, Stand 2010). Etwa zwei Drittel dieser Fläche entfallen auf die Biokraftstoffproduktion (Rapsdiesel und Bioethanol) und auf etwa 650 000 ha werden Biogassubstrate angebaut. Die Anbaufläche für Biogassubstrate entspricht rund 4 % der landwirtschaftlich genutzten Anbaufläche in Deutschland von 16,9 Mio. ha. Experten gehen auf Basis verschiedener Szenarien davon aus, dass das Flächenpotenzial für die Bioenergieproduktion bis 2020 auf bis zu 3,7 Mio. ha und bis 2030 auf bis zu 4,2 Mio. ha ausgeweitet werden kann (NITSCH et al., 2004).

Davon könnten in 2020 bis zu 1,2 Mio. ha für den nachhaltigen Anbau von Biogassubstraten (ca. 7 % der landwirtschaftlich genutzten Anbaufläche) in Anspruch genommen werden. Dies entspricht in Energieäquivalenten umgerechnet einem Biogaspotenzial von derzeit 30 TWh (108 PJ) und zukünftig von bis zu 56 TWh (200 PJ) in 2020.

Das Verfügbarkeitsszenario unterstellt, dass in der kommenden Dekade die Flächenerträge steigen, bisher ungenutzte Ackerflächen erschlossen und aufgrund rückläufigem Nahrungs- und Futtermittelbedarf (Demografie, sich verändernde Ernährungsgewohnheiten) zusätzliche Flächen für den nachhaltigen Energiepflanzenanbau genutzt werden können.

Allerdings ist nicht sicher abzusehen, in welchem Maße die Flächeneffizienz in den kommenden Dekaden noch erhöht werden kann. Ein wesentlicher limitierender Faktor ist die Wasserverfügbarkeit. Infolge des Klimawandels sind insbesondere in den östlichen Bundesländern zunehmend immer häufiger Trockenperioden zu befürchten. Des Weiteren führt die Ausweitung des Energiepflanzenanbaus in Viehhaltungsregionen bereits lokal zu Nutzungskonkurrenzen und berührt damit zunehmend die öffentliche Akzeptanz.

Tabelle 1 verdeutlicht, dass bereits heute mehr Biogas aus Energiepflanzen erzeugt wird als aus Abfall- und Reststoffen jemals theoretisch gewonnen werden kann, und dass das Biogaspotenzial aus Energiepflanzen das Biogaspotenzial aus Abfall- und Reststoffen perspektivisch um ein Mehrfaches übersteigen kann.

Tab. 1: Flächenverfügbarkeit und Biogaspotenzial aus nachwachsenden Rohstoffen

Jahr	Flächenpotenzial ha	Möglicher Biogasertrag		
		Mrd. m ³ /a	TWh/a	PJ
2008	500 000	4,5	23	83
2010	650 000	5,9	30	110
2020	1 200 000	10,8	56	202
2030	2 140 000	19,2	100	360

Es wird aber auch deutlich, dass das Flächenpotenzial für den Energiepflanzenanbau begrenzt ist und die Flächenausweitung im Kontext der verschiedenen Flächennutzungsansprüche (Nahrungs- und Futtermittelproduktion, Natur- und Landschaftsschutz usw.) zu sehen ist. Das Erreichen der klimapolitischen Ziele der Bundesregierung wird daher zum großen Teil davon abhängen, in welchem Maße ein nachhaltiger Energiepflanzenanbau möglich sein wird. Insgesamt steht für die Biogaserzeugung ein inländisches Biogaspotenzial von derzeit 53 TWh/a und perspektivisch für 2020 bis zu 80 TWh (2030: 120 TWh/a) zur Verfügung.

3 Biogas – Umweltwirkungen und Klimaschutz

Die Erzeugung und Verwendung von Biogas berührt entlang der Wertschöpfungskette vielfach Fragen des Klima- und des Umweltschutzes. Im Wesentlichen sind dies Umwelt- und Naturschutzfragen beim Biomasseanbau, die bei der Biogasproduktion auftretenden Treibhausgas-Emissionen sowie das Treibhausgas-Minderungspotenzial bei der Nutzung des Biogases. Das Treibhausgas-Minderungspotenzial von Biogas hängt entscheidend davon ab, wie das Biogas genutzt wird und welche fossile Energie (Kohle, Öl usw.) verdrängt wird.

Umwelt- und Naturschutz

Die Biomasseproduktion für die energetische Nutzung muss sich ohne Ausnahme den gleichen Naturschutz- und Umwelanforderungen unterwerfen, wie sie im Bereich der Nahrungsmittel- und Futtermittelproduktion üblich sind. Flächen mit hohem Kohlenstoffbestand (Primärwälder, Grünland, Moore), aber auch Lebensräume mit hohem Naturschutzwert (z.B. Dauergrünland) dürfen für die Bioenergieproduktion nicht umgebrochen werden.

Standortangepasste Anbausysteme berücksichtigen die naturräumlichen Gegebenheiten (z.B. Wasserhaushalt, Bodenqualität) sowie die Agrarstrukturen (Betriebsgrößen, Schlaggrößen, regionale Wirtschaftskreisläufe usw.) in der Region und wirken Flächenutzungskonkurrenzen, negativen Umweltbelastungen wie Bodenerosion, abnehmen-

der Biodiversität, Gewässerbelastungen sowie Beeinträchtigungen des Landschaftsbildes entgegen. Des Weiteren können regionale Nährstoffkreisläufe geschlossen und ein Auslaugen der Böden vermieden und damit eine nachhaltige Flächenbewirtschaftung sichergestellt werden. Energiemais ist auf absehbare Zeit die ertragsstärkste bzw. flächeneffizienteste Energiepflanze und deshalb das dominierende Biogassubstrat. Zukünftig sind aber standortangepasste Strategien zur Diversifizierung des Energiepflanzenanbaus zu entwickeln und um weitere Ackerfrüchte zu ergänzen, um negative Auswirkungen auf das Landschaftsbild und verengte Fruchtfolgen zu verhindern.

Klimaschutz

Die Biomasseproduktion ist nicht per se klimafreundlich. Positive Effekte bei der Biomassenutzung (z. B. THG-Minderung) sollten durch negative Umweltwirkungen nicht wieder konterkariert werden, weshalb eine nachhaltige Biomasseproduktion sowie klimaschonende Biomassenutzung sicherzustellen ist. Unter „Nachhaltigkeit“ ist in diesem Zusammenhang zu verstehen, dass die THG-Emissionen beim Energiepflanzenanbau und der Umwandlung der Biomasse zu Biogas so weit wie möglich zu begrenzen sind. Die THG-Emissionen bei der Bereitstellung von Biogas werden entscheidend beeinflusst

- von dem verwendeten Substrat (Energiepflanzen oder Abfall- und Reststoffe),
- von dem Anbausystem der Energiepflanzen (Düngemiteinsatz, Silierung, Maschinenteknik, Erntelogistik, Landnutzungsänderungen) und
- von einer energieeffizienten Anlagentechnik (professionelle Betriebsführung, effiziente Antriebe, Vermeidung diffuser Methan-Emissionen durch z. B. abgedeckte Gärrestlager und gasdichte Rohrleitungen).

Während die Erzeugung und Bereitstellung von Biomethan aus nachwachsenden Rohstoffen (NawaRo) mit THG-Emissionen von ca. 100 bis maximal 145 g CO₂-Äquivalenten je kWh Methan belastet ist, kann Biomethan aus landwirtschaftlichen Rest- und Abfallstoffen klimaneutral, teilweise sogar mit THG-Gutschriften versehen, bereitgestellt werden. Allerdings ist das Abfall- und Reststoffpotenzial begrenzt (siehe oben), weshalb bei der Biomethanbereitstellung auf der Basis von NawaRos die weitere Absenkung der THG-Emissionen das Ziel weiterer Optimierungsbemühungen sein muss. Als erreichbar gelten derzeit 49–67 g CO₂-Äquivalente je kWh Methan auf Basis von NawaRos (VOGT, 2008; ARNOLD und VETTER, 2010).

Des Weiteren ist der Beitrag zum Klimaschutz davon abhängig, wie das Biogas bzw. dessen auf Erdgasqualität veredeltes Pendant Biomethan genutzt wird und welcher fossile Energieträger (Kohle, Öl) substituiert werden kann. Der Klimaschutzbeitrag von Biogas ist umso höher, je höher der Kohlenstoffgehalt des substituierten (fossilen) Energieträgers ist (bei Kohle am höchsten, Erdgas am niedrigsten). Im Stromsektor werden aufgrund des hohen Anteils an Kohlekraftwerken zurzeit noch die meisten Treibhausgase

emittiert. Der Wärmebereich emittiert aufgrund hoher Erdgasanteile (fossiler Energieträger mit dem geringsten Kohlenstoffanteil) weniger Treibhausgase. Mit Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen (KWK) können durch die gleichzeitige Strom- und Wärmeerzeugung THG-Emissionen doppelt vermieden werden. Und: Biogas ist in besonderer Weise für den Einsatz in dezentralen KWK-Anlagen prädestiniert. Dies gilt in gleicher Weise auch für den klimaschonendsten fossilen Energieträger Erdgas, der bei der Transformation der Energieversorgung hin zu Erneuerbaren Energien eine wichtige Brückenfunktion übernehmen kann.

Biogas kann als einziger erneuerbarer Energieträger flexibel in allen drei Sektoren eingesetzt, das heißt, in Strom oder Wärme umgewandelt oder im Mobilitätssektor als Kraftstoff eingesetzt werden. Bei der gleichzeitigen Umwandlung von Biogas oder Biomethan in elektrischen Strom und Wärme in Blockheizkraftwerken können derzeit 563,3 g CO₂-Äquivalente je kWh elektrisch (deutscher Strommix, Stand 2009 und 160,6 g CO₂-Äquivalente je kWh thermisch substituiert werden (BMU/AG EE-Stat, 2010; UBA, 2009).

Im Kraftstoffsektor kann durch die Substitution von fossilem Benzin (235 g CO₂-Äquivalente je kWh, Well-to-Tank-Bilanzierung) durch Biogas ein THG-Minderungspotenzial von ca. 60 % (Nawaro-Biogas) bis 97 % (Gülle-Biogas) erschlossen werden (concaawe, EUCAR, 2006; DBFZ, 2009).

Abbildung 1 verdeutlicht die möglichen Klimaschutzbeiträge der verschiedenen Biogasnutzungspfade im Strom- und Wärmebereich. Danach wird die höchste THG-Minderung durch die gekoppelte Strom-Wärme-Erzeugung aus Biogas bzw. Biomethan erreicht, wobei bei vergleichbarem Wärmenutzungsgrad die Biogasnutzung direkt an der Biogaserzeugungsanlage am klimafreundlichsten ist, da in diesem Fall auch keine THG-Emissionen durch den Biogasaufbereitungsprozess anfallen.

Die reine Wärmebereitstellung mit Biogas im Brennwertkessel weist einen **dreifach geringeren Klimanutzen** auf. Dabei handelt es sich allerdings um eine Momentaufnahme: In dem Maße, wie die Stromversorgung auf Erneuerbare Energien umgestellt wird, sinken auch die THG-Emissionen im Strombereich und damit auch relativ gesehen der Klimaschutzbeitrag von Biogas im Stromsektor. Bei Erreichen der im Energiekonzept verankerten Ausbauziele für Erneuerbare Energien ist davon auszugehen, dass ab 2040 (gegebenenfalls auch früher) Biogas aus Klimaschutzsicht in allen Sektoren gleichermaßen eingesetzt werden kann (URBAN et al., 2009). Mit dem heute wirtschaftlich erschließbaren Biogaspotenzial können je nach Nutzungspfad netto bis zu 13 Mio. Tonnen Treibhausgase vermieden werden; bei ausschließlicher Verwendung im Wärmesektor ohne KWK nur 4,3 Mio. Tonnen THG. Dies verdeutlicht, dass die Nutzung in der reinen Wärmebereitstellung auch mittelfristig noch den bei Weitem geringsten Klimanutzen bewirken wird.

Vermiedene Treibhausgas-Emissionen der vier Nutzungspfade im Vergleich

Vermiedene Treibhausgas-Emissionen (in t CO₂-Äq.), wenn Biogas...

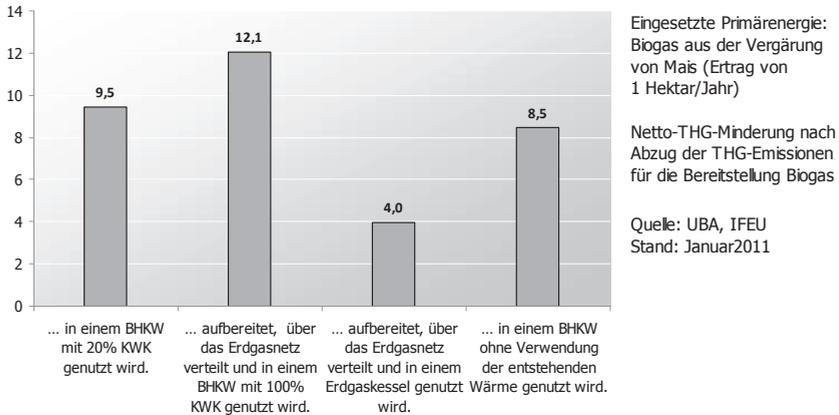


Abb. 1: Beitrag zur Treibhausgasreduzierung in Abhängigkeit des Biogasnutzungspfad

4 Schlussfolgerungen für den Einsatz von Biogas

Für die Erreichung der deutschen Klimaschutzziele und der Ausbauziele für Erneuerbare Energien ist ein weiterer Ausbau der Biogasnutzung unverzichtbar. Die weitere Entwicklung steht jedoch vor gewaltigen Herausforderungen. Auf Basis der zuvor erarbeiteten Ausgangslage werden für die Weiterentwicklung der gesetzlichen Anreizinstrumente im Hinblick auf Biogas folgende Schlussfolgerungen gezogen.

A. Die verfügbaren Ressourcen für Biogas sind begrenzt!

Eine Ausweitung des Biomasseanbaus für die Biogasproduktion ist nur begrenzt möglich und steht in Konkurrenz zur Nahrungs- und Futtermittelproduktion sowie weiteren Flächennutzungsansprüchen. Weitere Flächenertragssteigerungen sind möglich, jedoch darf dies nicht zu Lasten des Natur- und Umweltschutzes gehen. Die nachhaltige Flächenbewirtschaftung muss Kernelement jedweder energetischen und stofflichen Biomassenutzung sein. Mit der Erschließung des landwirtschaftlichen Abfall- und Reststoffpotenzials für die Biogasproduktion kann ein erheblicher Beitrag zum Klima- und Ressourcenschutz geleistet werden. Allerdings ist das Potenzial begrenzt und vielfach mit hohen Erschließungskosten belastet, sodass in diesem Fall zwischen Klimaschutz und Kosten genau abgewogen werden muss. Biomasseimporte für die Biogasbereitstellung können nur zugelassen werden, wenn sowohl Herkunft als auch Transport gesichert nachhaltig erfolgen. Dabei werden jedoch neue Abhängigkeiten geschaffen. Das begrenzt verfügbare Biogaspotenzial verpflichtet zur möglichst klima- und energieeffizienten Nutzung!

B. Der Beitrag von Biogas zum Klimaschutz ist abhängig vom Nutzungspfad

Die höchsten THG-Minderungen werden durch die Substitution fossilen Stroms erreicht, gefolgt vom Einsatz im Kraftstoffsektor. Biogas ist besonders für die gekoppelte Strom- und Wärmeerzeugung in dezentralen BHKW geeignet, wodurch doppelt THG-Emissionen vermieden werden können. Die Verwendung von Biogas zur reinen Wärmeversorgung weist hingegen den geringsten Klimanutzen auf. Zur Erreichung der klimapolitischen Ziele ist der Ausbau der Kraft-Wärme-Kopplung und die vorrangige Verwendung von Biogas zur Stromerzeugung unabdingbar. Keine Förderung erneuerbarer Energien ohne Effizienzanforderungen!

C. Es gilt das Gebot der Kosten- und Energieeffizienz!

Die hohen Kosten für Biogasaufbereitung und Einspeisung in das Erdgasnetz sind nur zu rechtfertigen bzw. förderfähig wenn unter Klimaschutz-, Kosten- und Energieeffizienzgesichtspunkten ein realer Mehrwert erzielt wird. Die Biogasaufbereitung und Einspeisung in das Erdgasnetz ist kein Selbstzweck, sondern muss energieeffizienter und klimafreundlicher sein als der bisherige Stand der Technik (Holzfeuerung, Vor-Ort-Verstromung des Biogases an der Biogasanlage).

D. Nachhaltige Biomassebereitstellung

Die Biomasseproduktion ist nicht per se klimafreundlich. Deshalb muss eine nachhaltige Biomasseproduktion über die gesamte Wertschöpfungskette (von der Anbaufläche bis zur Endenergiebereitstellung) sichergestellt werden. Nachhaltig meint, dass THG-Emissionen bei der Biogasbereitstellung so weit wie möglich zu begrenzen und schädliche Umweltwirkungen zu vermeiden sind. Mit der weiteren Erschließung von Abfall- und Reststoffpotenzialen können der Energiepflanzenanbau etwas begrenzt und Flächennutzungskonkurrenzen sowie Biomasseimporte minimiert werden. Die Erreichung der klimapolitischen Ziele erfordert eine Ausweitung des nachhaltigen Energiepflanzenanbaus bzw. Biogasproduktion aus nachwachsenden Rohstoffen!

E. Biogas ist ein „Joker“ für die EE-Systemintegration

Biogas kann zukünftig einen wichtigen Beitrag zur Integration der fluktuierenden Erneuerbaren Energien wie Windenergie und Solarenergie in die Energieversorgung Deutschlands leisten. Hierbei stellt insbesondere Biogas als der unter den Bioenergieträgern flexibelste Energieträger einen wichtigen Pfeiler für die zunehmend auch den erneuerbaren Energien zufallende Aufgabe dar, bedarfsgerecht Strom zu erzeugen und damit zur Versorgungssicherheit und Systemstabilität im Elektrizitätssektor beizutragen.

F. Energieeffizienz und Endenergieeinsparung

Die Erreichung der im Energiekonzept und im Biomasseaktionsplan fixierten klima- und energiepolitischen Ziele ist nur möglich, wenn alle verfügbaren Ressourcen so effizient wie möglich genutzt werden. Auf Biomasse bzw. Biogas bezogen heißt dies, dass hohe Energieeffizienzanforderungen an die Biogasnutzungspfade zu stellen sind und beim Einsatz von Biogas in KWK-Anlagen hohe Gesamtwirkungsgrade zur Voraussetzung für staatliche Förderungen gemacht werden müssen. Erdgas kann eine wichtige Brückenfunktion in das erneuerbare Energiezeitalter einnehmen. Hierfür muss konsequent eine Dekarbonisierung der Energieversorgung in Deutschland betrieben werden.

Des Weiteren muss der Energieeinsatz bei der Biogaserzeugung vom Acker bis zum BHKW weiter abgesenkt werden. Die Einsatzpriorität von Biogas ist schließlich im Kontext aller Biomassen zu sehen: die Wärmeversorgung auf Basis von Holz ist bezogen auf die eingesetzte Primärenergie deutlich effizienter als Biomethan.

Literatur

- BMU (Hrsg.) (2009): Leitszenario 2009 – Langfristszenarien und Strategien für den Ausbau erneuerbarer Energien in Deutschland unter Berücksichtigung der europäischen und globalen Entwicklung. BMU-Leitstudie 2009. www.erneuerbare-energien.de
- Nitsch, J.; Krewitt, W.; Nast, M.; Viebahn, P.; Gärtner, S.; Pehnt, M.; Reinhardt, G.; Schmidt, R.; Uihlein, A.; Barthel, C.; Fishedick, M.; Merten, F.; Scheurlen, K. (2004): Ökologisch optimierter Ausbau der Nutzung erneuerbarer Energien in Deutschland. In: Umweltpolitik Köllen Druck
- Vogt, R. (2008): Basisdaten zu THG-Bilanzen für Biogasprozessketten und Erstellung neuer THG-Bilanzen. IFEU-Kurzdokumentation im Auftrag der E.ON Ruhrgas, Heidelberg
- Arnold, K.; Vetter, A. (2010): Klima- und Umwelteffekte von Biomethan: Anlagentechnik und Substratauswahl. Wuppertal Papers. Nr. 182, Februar
- BMU/AG EE-Stat (2010): Erneuerbare Energien in Zahlen, Vermiedene Emissionen durch die Nutzung erneuerbarer Energien im Strom-/Wärmesektor 2009, Juni 2010, S. 19/20
- UBA (Hrsg.) (2009): Emissionsbilanz erneuerbarer Energieträger. Durch Einsatz erneuerbarer Energien vermiedene Emissionen im Jahr 2009. Aktualisierte Anhänge 2 und 4 der Veröffentlichung „Climate Change“ 12/2009
- concaawe, EUCAR (Hrsg.) (2006): Well-to-Wheels analysis of future automotive fuels and powertrains in the European context. WELL-to-WHEELS Report Version 2b, May 2006. <http://www.europabio.org/Biofuels%20reports/well-to-wheel.pdf>
- DBFZ (2009): Erdgassubstitute aus Biomasse für die mobile Anwendung im zukünftigen Energiesystem. FZK 22031005 (FNR), April 2009

Urban, W.; Zeidler-Fandrich, B.; BMBF; Fraunhofer UMSICHT (2009): Beseitigung technischer, rechtlicher und ökonomischer Hemmnisse bei der Einspeisung biogener Gase in das Erdgasnetz zur Reduzierung klimarelevanter Emissionen durch Aufbau und Anwendung einer georeferenzierten Datenbank. Bd. 1: Kurzfassung: Abschlussbericht für das BMBF-Verbundprojekt "Biogaseinspeisung", Oberhausen: Fraunhofer UMSICHT, 2009. www.biogaseinspeisung.de

Repowering von Biogasanlagen

ANTON BAUMANN

1 Was bedeutet Repowering bei Biogasanlagen?

Verbesserung der Wirtschaftlichkeit durch:

- mehr Leistung aus der vorhandenen Investition
- höhere Effizienz durch mehr Leistung bei geringerem Eigenenergiebedarf
- höhere Gasausbeute aus dem eingesetzten Substrat
- Optimierung der Erträge
- Reduzierung des Aufwands
 - der Biogasverluste
 - der Stillstandszeiten

In der Regel ist die Verdoppelung der Leistung einer bestehenden Biogasanlage wirtschaftlich günstiger als ein Neubau einer BGA mit vergleichbarer Leistung.

1.1 Voraussetzungen für Repowering von Biogasanlagen

- rechtskonformer und klagefreier Zustand
- kommunalpolitisches „Wohlwollen“ für Flächennutzungsplanänderung
- stabil „hungrige“ Biozönose
- ausreichende Fermenterkapazität
- verfügbarer zusätzlicher Input
- genügend Kapazität im Gärrestelager
- geeigneter Satelliten-BHKW-Standort
- „glaubwürdige“ Wärmesenke
- Abschöpfbarkeit aller möglichen Boni des jeweiligen EEG, in dem sich die Biogasanlage (BGA) befindet
- zuerst die BGA „in Ordnung“ bringen und optimieren, bevor erweitert wird

1.2 Reduktion der Verluste

- Ernte- und Silageverluste verringern
- Oxidationsverluste reduzieren
- Gas-Leckrate verringern
- Gasspeicher vergrößern
- Blockheizkraftwerk (BHKW)-Stillstandszeiten reduzieren
- Eigenverbrauchsstrom reduzieren

- Wirkungsgrade erhöhen (bessere Gemischkühlung, niedrigere Generatortemperaturen, höhere Verdichtung)

1.3 Möglichkeiten des Repowering in der Biogas-Erzeugungsanlage (Abb. 1)

1. Erhöhung der Faulraumbelastbarkeit und Faulraumbelastung durch

- höherer Feinzerkleinerungsgrad (pürieren, passieren, dispergieren)
- höhere Gärtemperatur (thermophil statt mesophil)
- intensivere Bewegung (effizienter rühren)
- Optimierung der Mikro-Nährstoffversorgung
- Verbesserung der Fluidität (Rühr- und Pumpbarkeit)
- kontinuierliche Nassfütterung
- Behandlung von Bypassströmen am Hauptfermenter und Nachgärer (Ultraschall-Kavitation, thermische oder elektronische Desintegration, Beschädigung von Zellmembranen)

2. Verlängerung der biologisch aktiven Verweilzeit durch

- Ausbau des Gärrestelagers zum aktiven Nachgärer
- Vorschaltung einer externen Hydrolysestufe
- Integration einer internen Hydrolyse durch Verfahrensänderung
- selektiv längere Verweilzeit für Feststoffe durch Trennung der dünnflüssigen Phase von den Feststoffen

3. Mehrfach bestätigte praktische Erfahrung

Kontinuierliche Nassfütterung macht Fermenter sehr hungrig und dadurch steigert sich die Leistungsfähigkeit bis hin zur Verdoppelung der Faulraumbelastung.



Abb. 1: Beispiel für Kombination aus Vorschalthydrolyse, Feinpürieren und kontinuierlicher Nassfütterung (Foto: Baumann)

1.4 Probleme der Leistungserhöhung der Gaserzeugungsanlage – mehr Gas oder mehr Probleme?

In der Praxis wird eine Leistungserhöhung von Biogasanlagen nicht gezielt geplant. Es wird einfach ein weiteres BHKW dazugestellt und mehr gefüttert. Dann zeigen sich schon irgendwo oder irgendwie die „Flaschenhalse“ und Schwachstellen:

- Die Fütterungstechnik ist zu klein, erfordert mehrmals tägliches Nachfüllen und verschleißt noch schneller.
- Die Fermenter heizen sich selbst (autotherm) auf Temperaturen teilweise über 60 °C und pasteurisieren sich eventuell selber.
- Rührwerke, insbesondere Tauchmotorrührwerke, versagen bei höheren Fermentertemperaturen, längeren Einschaltzeiten und höherer Viskosität des Fermenterinhalt.
- Die Gasleitungen sind zu eng für das gestiegene Gasvolumen.
- Höhere Biogasausbeute ist durch thermophilen Betrieb nur dann zu erwarten, wenn die Gesamtverweilzeit vorher schon zu kurz für eine vollständige Ausfäulung war.
- Thermophile Biozönosen sind nicht empfindlicher als mesophile, nur die Betreiber reagieren meistens zu langsam!
- Achtung: Schwefeloxidierende Bakterien können nicht in Gastemperaturen über 44 °C arbeiten!

Wenn die Faulraumbelastung über 6 bis 7 kg oTS/m³ je Tag gesteigert wird, so werden erfahrungsgemäß die Probleme der Fluidität zum begrenzenden Faktor.

Eine ausreichende und bioverfügbare Versorgung mit Spurenelementen vorausgesetzt, sind Faulraumbelastungen von über 7 kg oTS/m³ je Tag für eine adaptierte Biozönose kein Problem.

Die neuen Grenzen sind physikalischer und rheologischer Natur: Viskosität nimmt zu, Fluidität nimmt ab.

1.4.1 Anzeichen einer Prozessstörung durch Viskositätsprobleme

- Probleme entstehen bei sehr hoher Lastaufnahme der Rührwerks- und Pumpenmotoren (Ampere).
- Probleme können beim Rühren, Pumpen und Überlauf auftreten.
- Eine Prozessstörung ist möglich bei einer Dichte unter 0,9 kg/l im Fermenter.
- Es gibt Probleme bei einer zähen Konsistenz – erstarrt bei Abkühlung so schnell wie Tortenguss.
- Probleme zeichnen sich ab, wenn die Fließgeschwindigkeit aus einem Messbecher niedrig ist (mit Nachhilfe) oder gar nicht (Thixotropie).
- Der Pegel im Fermenter sinkt deutlich bei intensivem Rühren.

1.4.2 Lösungsmöglichkeit Feststoffseparation

Es entstehen Probleme beim Pumpen und Rühren mit immer „dickflüssigerem“ Fermenterinhalt. Dafür verantwortlich sind die sich im Fermenter schneller anreichernden schwer abbaubaren Pflanzengerüstfasern. Diese können mit gezielten technischen Maßnahmen dem Fermenter- oder Nachgärerinhalt durch Separation teilweise entzogen werden. Damit ist es möglich, rheologisch beherrschbare Bedingungen in den Bioreaktoren und Fermentern zu erhalten.

Nebenbei ermöglicht die Teilstromseparierung eine Form der aeroben Hydrolyse durch die ubiquitären Mist-Tintlinge (Coprinoaceae). Die im Pilzmyzel erzeugten Enzyme (Lignasen, Xylanasen) helfen, die schwer- oder anaerob gar nicht abbaubaren Pflanzengerüstfasern zu „knacken“ (Abb. 2). Die Pflanzengerüstfasern werden dabei in kürzerkettige Zucker und Enzyme umgebaut. In einigen Praxisanlagen bringen im optimalen Stadium der Verpilzung wieder dem Hauptfermenter zugeführte Separatorfeststoffe etwa ein Drittel des Gasertrages von Maissilage.



Abb. 2: Verpilzung von Separatorfeststoff durch Mist-Tintlinge (*Coprinus cinereus*) (Foto: Baumann)

Mit dieser Methode können auch schwer abbaubare Pflanzengerüstfasern wie Stroh oder überständiges Mähgut aus der Landschaftspflege, Schilf usw. mit hoher Faulraumbelastbarkeit vergoren werden. Voraussetzung dafür ist die Separation auf über 25 % Trockensubstanz und eine gezielte aerobe Rotte in nicht zu großen, lockeren Mieten.

Wenn man schon separieren muss, dann sollten alle Optionen richtig genutzt werden, die eine Feststoffseparation bietet.

2 Begrenzender Faktor für Leistungssteigerung von Biogasanlagen

- Verfügbare Biomasse in transportwürdiger Entfernung
- Pachtpreise für landwirtschaftliche Nutzflächen

Es wird in Zukunft nur noch die Biogasanlage die Biomasse beschaffen und bezahlen können, welche wirtschaftlich erfolgreich ist.

3 Möglichkeiten des Repowering in der Biogasverwertungsanlage

Austausch oder Ergänzung vorhandener BHKW gegen neue „Hocheffizienz“-BHKW mit wesentlich höherem Wirkungsgrad.

Tab. 1: Vergleich verschiedener BHKW mit annähernd gleichem Gasverbrauch

Vergleich verschiedener BHKW mit ähnlichem Gasverbrauch	Einheit	Standard Gas-Otto-Motor	Zündstrahler mit Turbogenerator
Elektrische Leistung des BHKW	kW/h	190	265
Gasverbrauch bei 52 % Methan	Nm ³ /h	115	110
Zündölverbrauch RME (pro Betriebsstunde)	l/Bh	0	2,5
Elektrischer Wirkungsgrad ¹⁾	%	36	48
Elektrische Leistung je ha Mais	kWh/ha	20244	25867
Kilowattstunden je Jahr (bei 8000 Bh)	kWh/a	1 520 000	2 120 000
Einspeiseerlös bei Ø 0,18 €/kWh	€/a	273.600	381.600
Differenz im Jahresertrag	€/a		108.000

¹⁾ Herstellerangaben.

4 Der Idealfall des BGA-Repowering – Das Satelliten-BHKW

Ableitung des erzeugten Biogases zu zusätzlichem BHKW an idealer Wärmesenke (Substitution bisher verbrauchter fossiler Brennstoffe).

4.1 Wärmesenken

- Ganzjähriger Wärme- oder Warmwasserbedarf.
- Satelliten-BHKW kann die Grundlast an Wärmebedarf decken.
- Bisher wurden fossile Brennstoffe verbraucht.

Beispiele für ideale Wärmesenken und Satelliten-BHKW-Standorte:

- Krankenhaus
- Kurklinik, Reha-Zentrum
- Pflegeheim
- Hotel mit Wellnessbereich und Pool
- Großküche oder Kantine
- Justizvollzugsanstalt (Abb. 3)
- Schwimmbad, Spaßbad
- Wäscherei für Hygiene- und Berufswäsche
- Schlachthof, Großmetzgerei, Wurstfabrik
- Molkerei und Käseproduktion
- Fabrik für Lebensmittelkonserven
- Getränkeherstellung/Brauerei mit Flaschenwaschanlage
- Schulzentrum mit Freibad
- Gärtnerei mit beheizten Gewächshäusern
- Lebensmittelbetrieb
- BGA mit Gasaufbereitung und Gaseinspeisung
- Denkmalgeschütztes nicht isoliertes Gebäude (Burg, Kloster, Schloss)
- Autobahnraststätte (mit hohem Duschaufkommen für Fernfahrer).



Abb. 3: Satelliten-BHKW an der Gärtnerei einer Justizvollzugsanstalt mit einem Warmwasser-Schichten-speicher von 30 m³ und DVGW-konformer Ausführung der Biogasleitung (Foto: Baumann)

Grundsätzlich gilt: Besser als hoher Heizwärmebedarf im Winter ist ganzjährig hoher Warmwasserbedarf!

Beispiele für suboptimale Wärmesenken:

- Wohnhäuser in Niedrig-Energie-Bauweise
- Wohnsiedlungen mit Einfamilienhäusern an Nahwärmenetz
- Gärtnereien mit Kalthaus-Kulturen (Gemüsebau).

Zitat eines Betreibers: „Wer einmal eingeseift unter der Dusche steht und dann kommt nur noch Kaltwasser, weil wieder mal das BHKW verreckt ist, der wird zum Feind fürs Leben!“

4.2 Voraussetzungen für die Errichtung eines Satelliten-BHKW

- Genehmigungsrechtliche Rückwirkungen auf die Gas abgebende BGA beachten!
- Möglicher Verlust der Außenbereichsprivilegierung nach § 35 Abs. 1 Nr. 6. prüfen.
- Eventuell entsteht eine BImSchG-Pflicht (4. BImSchV Nr. 9.1 b) Spalte 2).
- Eventuell gilt die Störfallverordnung (12. BImSchV) bei insgesamt mehr als 10000 kg hochentzündliche Gase (z.B. durch gasdichtes Gärrestelager).
- Eventuell unterliegt die Biogasleitung dem Energie-Wirtschaftsgesetz (EnWG).
- DVGW-Regelwerk gilt ab Fermenterflansch oder ab Grundstücksgrenze.
- Für Gasleitung gilt Regelwerk DVGW G 472.
- Für Personal und Betriebsorganisation gilt DVGW G 1030.
- Trasse für Biogasleitung sehr sorgfältig planen.
- Durchleitungsrechte für Biogasleitung sind oft sehr schwierig zu erhalten.
- Nur trockenes und schwefelwasserstofffreies Biogas nutzen.
- Molchscheunen für Gasleitungsreinigung vorsehen.
- Keine Kondensatschächte auf fremden Grundstücken bauen.
- Keine gesaugten Biogasleitungen im Unterdruck fahren. Es besteht Detonationsgefahr bei Lufteintritt.
- Möglichst in Zusammenarbeit mit EVU (z.B. Stadtwerke) realisieren.

Machen Sie mehr aus Ihrer Biogasanlage oder holen Sie mehr aus ihr raus. Aber vergessen Sie nicht: Mehr Umsatz ist nicht immer mehr Gewinn!

Repowering von Biogasanlagen zur Steigerung der Prozesseffizienz

MATHIAS EFFENBERGER, MICHAEL LEBUHN

1 Einleitung

Von „Repowering“ spricht man speziell bei der Windkraftnutzung, wenn bestehende ältere Windenergieanlagen durch moderne, effizientere und leistungsstärkere Windturbinen ersetzt werden (BWE 2010). Bei der Biogasnutzung bezeichnet das „Repowering“ hingegen nicht nur den Ersatz des Blockheizkraftwerkes (BHKW), sondern auch andere Maßnahmen zur Steigerung der Anlageneffizienz. Im vorliegenden Beitrag soll ein Überblick über solche Maßnahmen gegeben werden, wobei der Betrachtungsrahmen die Biogasanlage von der Eintragsvorrichtung bis zum Strom- und Wärmeabsatz umfasst.

2 Relevante Kennzahlen für Biogasanlagen

Voraussetzung für die Beurteilung des Erfolgs von Repowering-Maßnahmen, wie sie hier diskutiert werden, ist die Kenntnis wesentlicher Leistungskennwerte der Biogasanlage im aktuellen Zustand. Durch den Vergleich der Kennwerte vor und nach der Repowering-Maßnahme lässt sich der Nutzen derselben beurteilen. Dieser Nutzen ist dem Kostenaufwand gegenüberzustellen. Die verfahrenstechnischen Kennzahlen sind auf Basis eines längeren Zeitraums zu ermitteln. Dieser sollte zumindest die einfache hydraulische Verweilzeit in der Biogasanlage umfassen.

2.1 Verfahrenstechnische Kennwerte

Ein grundlegender Kennwert für die Beurteilung der Ausnutzung des energetischen Potenzials der eingesetzten Biomasse ist die Biogas- bzw. Methanausbeute in Norm-Litern, vorzugsweise je Kilogramm organische Trockenmasse (oTM), alternativ auch bezogen auf die Frischmasse. Zum Abgleich kann das Restgaspotenzial im Ablauf der letzten Gärstufe untersucht werden. Richtwerte für die Methanausbeute (CH₄) aus verschiedenen Einsatzstoffen können aus Datenbanken abgerufen werden, sind aber als konservativ zu betrachten. Die Biogas- bzw. Methanproduktivität liefert eine Aussage über die Nutzungsintensität des verfügbaren Gärvolumens in der Biogasanlage und ist abhängig von der Konzentration der aktiven Mikroorganismen (insbesondere der methanogenen Archaeen) im Gärgemisch.

Die Biogaszusammensetzung muss gemessen werden, um die Methanausbeute und die -produktivität zu bestimmen, zugleich ist sie ein Indikator für den Zustand des Gärprozesses. Für einen einphasigen Gärprozess sollte der CH_4 -Gehalt im Biogas 50 bis 55 % betragen, bei fett- oder proteinbetonten Einsatzstoffen auch einige Prozentpunkte mehr. Der Sauerstoffgehalt (O_2) bei biologischer Entschwefelung durch Lufteinblasung sollte 1,5 % nicht überschreiten. Ein sinkender CH_4 - und steigender Kohlenstoffdioxidgehalt (CO_2) sowie eine erhöhte Konzentration an Wasserstoff (H_2) im Biogas liefern Hinweise auf eine Destabilisierung des Vergärungsprozesses. Bei mehrstufiger oder mehrphasiger Betriebsweise können die Kennwerte für die einzelnen Fermenter deutlich anders ausfallen.

Ein weiterer wichtiger Kennwert ist der Strombedarf für den Betrieb der Biogasanlage. Dieser wird häufig von den Rühraggregaten dominiert, aber auch das BHKW kann einen erheblichen Anteil am Strombedarf haben (LEHNER et al. 2009). Die Stromausbeute bezogen auf die eingesetzte oTM oder Substratmasse liefert einen integralen Kennwert für die Biogasproduktion und -verwertung und ist eine Alternative zur Methanausbeute, falls keine Gasmengenmessung und -analyse erfolgt. Nach Abzug des Eigenstrombedarfs der Biogasanlage ergibt sich die Netto-Stromausbeute. Wird zusätzlich die zur Nutzung abgegebene Wärmeenergie mit berücksichtigt, und ist der normierte Methanertrag bekannt, kann der Methanenergie-Nutzungsgrad bestimmt werden.

Die Arbeitsausnutzung gibt an, zu welchem Anteil die installierte BHKW-Kapazität ausgelastet wird. Eine mangelhafte Arbeitsausnutzung kann ein Indikator für Störungen im Anlagenbetrieb sein. Tabelle 1 fasst wesentliche verfahrenstechnische Kennzahlen zusammen.

Tab. 1: Übersicht über wesentliche verfahrenstechnische Kennzahlen

Bezeichnung	Einheit	Ermittlung
Biogas-/Methanausbeute	$\text{m}_\text{N}^3/(\text{kg oTM})$	normierter Biogasertrag, Methangehalt im Biogas, Masse der Einsatzstoffe, TM- und oTM-Gehalt der Einsatzstoffe
Restgas-/Restmethanpotenzial	$\text{m}_\text{N}^3/(\text{kg oTM})$	normierter Biogas-/Methanertrag im Batch-Gärtest, Einwaage, TM- und oTM-Gehalt der Einwaage
Biogas-/Methanproduktivität	$\text{m}_\text{N}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$	normierter Biogasertrag, Methangehalt im Biogas, Arbeitsvolumen der Gärbehälter
Strombedarf	kWh/t	Masse der Einsatzstoffe, Strombedarf der Biogasanlage
Strombedarfsanteil	%	Strombedarf der Biogasanlage, BHKW-Strom
Stromausbeute	kWh/t	Masse der Einsatzstoffe, BHKW-Strom
Netto-Stromausbeute	kWh/t	Masse der Einsatzstoffe, BHKW-Strom, Strombedarf der Biogasanlage
Methanenergie-Nutzungsgrad	%	normierter Biogasertrag, Methangehalt, BHKW-Strom, Strombedarf der Biogasanlage, Wärmeabsatz
Arbeitsausnutzung	%	BHKW-Nennleistung, Nennzeit, BHKW-Strom

2.2 Gärbiologische Kennwerte

Die gärbiologischen Kennwerte oder Prozessindikatoren stellen im Wesentlichen Momentaufnahmen dar, die auf Basis der entnommenen Proben bestimmt werden. Von besonderem Interesse ist hier der Verlauf der Indikatorwerte, weshalb diese wiederholt und in regelmäßigen Abständen ermittelt werden sollten. Hierbei sollte die Bestimmung immer nach derselben Methode erfolgen, da die Ergebnisse sonst nur eingeschränkt vergleichbar sind. Damit ist es möglich, eine Destabilisierung des Prozesses durch äußere Einflüsse oder Änderungen im Betriebsablauf (Substrat- bzw. Chargenwechsel, Raumbelastungssteigerung, Temperaturschwankungen) rechtzeitig zu erkennen und ihr entgegenzuwirken.

Während chemisch-physikalische Prozessindikatoren in der Praxis schon länger verwendet werden, hat die mikro-/molekularbiologische Analytik zwar in den letzten Jahren wesentliche Fortschritte gemacht und das Prozessverständnis verbessert, steckt aber im Vergleich dazu noch in den Kinderschuhen.

2.2.1 FOS/TAC-Verhältnis und kurzkettige Fettsäuren

Anhand des FOS/TAC-Werts als Verhältnis der Menge an organischen Säuren (FOS) zur Pufferkapazität (TAC) kann eine beginnende Prozessversäuerung zuverlässig erkannt werden. In erster Linie ist hierbei der anlagenindividuelle Trend der FOS/TAC-Werte aussagekräftig, weniger der Absolutwert. Bei hohen Ammoniumgehalten wird der TAC-Wert allerdings überschätzt, was zu Fehlinterpretationen hinsichtlich einer Prozessversäuerung führen kann.

Kurzkettige (flüchtige) Fettsäuren (FFS) sind Zwischenprodukte des anaeroben Abbauprozesses. Acetat- bzw. Propionatgehalte ab ca. 1,5 bzw. 0,5 g/l weisen auf einen angespannten Zustand hin; steigen sie auf etwa 3 bzw. 1 g/l an, ist der Prozess versäuert. Allerdings konnten Fermenter auch mit > 3 g/l Acetat ohne Einbruch der Gasproduktion langfristig stabil betrieben werden. In den genannten Konzentrationen wirken die FFS nicht per se toxisch, sondern zeigen meist eine Limitierung der Methanogenese an. Beispielsweise diente Propionsäure bis etwa 10 g/l in einem gesunden Prozess als Substrat und wirkte erst darüber inhibierend (GRAPENTHIN et al. 2010). Der Nachweis von iso-Buttersäure oder iso-Valeriansäure bereits in Konzentrationen von ca. 50 mg/l ist ein aussagekräftiger Indikator für einen versäuerten Prozess.

2.2.2 Makronährstoffe und Spurenelemente

Um bestmögliche Prozessbedingungen einzustellen, sind die organische Raumbelastung und das Verhältnis der Makronährstoffe zueinander zu optimieren. Als Richtwert kann ein C:N:P:S-Verhältnis von etwa 600:15:5:3 gelten. Die optimale Raumbelastung hängt von der Futtermischung sowie den Anlagegegebenheiten ab und ist individuell

empirisch zu ermitteln. Zu hohe N- und S-Gehalte im Substrat können zu einer Hemmung der mikrobiellen Aktivität im Fermenter führen.

Methanogene Archaeen sowie homoacetogene und syntrophe fettsäureoxidierende Bakterien, die die Acetogenese bzw. die Acetatoxidation durchführen (SCHIEDER et al. 2010), benötigen besondere Spurenelemente in bestimmten Konzentrationsbereichen (Tab. 5). Bei der NawaRo-Vergärung ist besonders auf eine ausreichende Versorgung mit Cobalt, Nickel, Natrium, Selen und Molybdän zu achten, die für den Energiestoffwechsel der genannten physiologischen Mikroorganismengruppen (Gilden) wichtig sind. Die im Prozess gebildeten Säuren werden sonst nicht oder schlecht abgebaut, und es kommt zur Versäuerung des Prozesses (MUNK et al. 2010). Eisen, Kupfer (Cu) und Zink (Zn) sind in NawaRo-Anlagen in der Regel ausreichend vorhanden, wobei in Anlagen mit Güllezu-satz (Ferkel, Schweine) toxisch hohe Konzentrationen an Cu und Zn auftreten können (SAYDER et al. 2009).

Die Gehalte der wichtigsten Metalle (darunter Spurenelemente) in Praxis-Biogasanlagen (nicht nur NawaRo-Anlagen) zeigen eine große Streubreite (SCHATTAUER et al. 2011). Eine geringe Verfügbarkeit von Spurenmetallen infolge einer Sulfidfällung ist in landwirtschaftlichen Biogasanlagen die Ausnahme und nur bei Fütterung mit schwefelreichem Substrat zu erwarten. Eine Bilanzierung der Spurenelemente aus den Gehalten im Substrat und eventuellen Zusätzen kann eine Prognose darstellen, eine gelegentliche Überprüfung durch Analysen aber nicht ersetzen.

2.2.3 Ammoniak-N

Wird eine Biogasanlage mit hohen Anteilen stickstoffreichen/proteinbetonten Substrats gefüttert (Gras-/Kleeegrassilage, Hühnertrockenkot, Schweinegülle, Getreidekörner), kann die Ammoniakkonzentration (NH_3) zu hoch sein und hierdurch der Prozess gehemmt werden. Bei Temperaturanstieg im Fermenter kommt es zu einer Verschiebung des Ammonium-/Ammoniak-Gleichgewichts in Richtung des toxischen freien Ammoniaks (FAN), weshalb der thermophile Betrieb mit solchen Substraten problematisch ist (ANDRADE et al. 2009). Die Angaben zur Hemmschwelle des NH_3 -Gehalts gehen in der Literatur recht weit auseinander, ab etwa 400 bis 500 mg FAN/l sollte man verstärkt Vorsicht walten lassen.

2.2.4 Populationszusammensetzung und Indikatororganismen

Für die Vergärung von Maissilage wurde beispielhaft gezeigt, dass zwischen der Methanproduktivität und der Konzentration methanogener Archaeen im Fermenter ein logarithmischer Zusammenhang besteht, der von der organischen Raumbelastung (und der hydraulischen Verweilzeit invers) beeinflusst wird (MUNK et al. 2010). Die Methanproduktivität stieg mit erhöhter organischer Raumbelastung (OLR) nur bis zu einem Optimum

an (in den betrachteten Systemen etwa $1,6 \text{ l}_N \text{ CH}_4/(\text{l} \cdot \text{d})$), die optimale Konzentration methanogener Archaeen betrug annähernd $10^{12}/\text{l}$.

Die Zusammensetzung der methanogenen Biozönose kann sich abhängig vom Fermenterbetrieb und dem Prozesszustand stark ändern (MUNK et al. 2010, NETTMANN et al. 2010). Bei niedriger OLR (relativ lange Verweilzeit im Fermenter) und geringem Acetatgehalt wurden obligat Acetat verwertende Methanogene (Vertreter der Familie Methanosaetaceae) vergleichsweise häufig gefunden. Die Methanosaeten sind damit ein Bioindikator für einen langsamen aber effizienten Prozess und deuten eine Steigerungsmöglichkeit der OLR an. Steigen Raumbelastung (sinkende Verweilzeit) und Säuregehalte, bekommen die Methanosarcinen Wachstumsvorteile und beginnen neben den hydrogenotrophen Methanogenen (praktisch ausschließlich Vertreter der Ordnungen Methanobacteriales und Methanomicrobiales) zu dominieren. Für einen gesunden Prozess (FOS/TAC bis zu 0,5; OLR 3,6 bis 4,5 $\text{kg oTM}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$) kann als Richtwert gelten, dass die Summe aus Methanobacteriales und Methanosarcinaceae 80 % und mehr der Methanogenen beträgt (MUNK et al. 2010). Eine weitere Steigerung der OLR sollte dann nur vorsichtig vorgenommen werden, denn es besteht die Gefahr der Prozessversäuerung. Ein Indikator für Versäuerung ist ein erhöhter Anteil an Methanomicrobiales, die relativ säuretolerant sind (AKUZAWA et al. 2011) und im versäuerten Prozess zu 46–87 % der gesamten Methanogenenpopulation vorlagen (MUNK et al. 2010). Wenn der Spurenelementstatus stimmt (Tab. 5), muss die OLR zur Prozessentlastung reduziert werden.

2.2.5 Anteil aktiver Mikroorganismen und Aktivierbarkeit

Für Anlagenbetreiber ist eine fundierte Prognose wichtig, ob eine Leistungssteigerung der Mikroorganismen noch möglich ist, oder ob die Möglichkeiten bereits ausgeschöpft sind. Hierzu dienen die Messung der aktuellen Besatzdichte sowie des Aktivitätsstatus der Mikroorganismen und ihrer Aktivierbarkeit. Letztere lässt sich in Batchsystemen in ATS (Aktivitäts-, Toxizitäts- und Supplementierungstests, (GRAPENTHIN et al. 2010)) darstellen, allerdings ist die Übertragbarkeit der Ergebnisse auf Durchflusssysteme noch zu prüfen.

Ein neuer Ansatz betrachtet den „Metabolischen Quotienten“ (MQ) (MUNK et al. 2011). Er setzt die aktuelle zu der bei effizientem Betrieb empirisch ermittelten spezifischen Aktivität der Methanogenen ins Verhältnis und beschreibt deren physiologischen Zustand. Derzeit wird geprüft, ob sich der MQ als „Frühwarnsystem“ vor Prozessstörungen eignet und ob entsprechende Aussagen auch für andere Vergärungssysteme möglich sind. Auch über eine Transkriptionsanalyse (Messung der mRNA im Verhältnis zur DNA) lässt sich die Aktivierbarkeit bestimmter Gilden testen, die Methode steht allerdings noch am Anfang ihrer Entwicklung (MUNK et al. 2011).

3 Repowering-Maßnahmen und deren Bewertung

Repowering-Maßnahmen sind im Allgemeinen mit einem nicht unerheblichen Investitionsbedarf und ggf. auch mit Betriebskosten verbunden. Auf der anderen Seite versprechen Sie eine höhere Produktivität und Leistungsabgabe der Biogasanlage sowie eine verbesserte Prozessstabilität. Aus Sicht des Anlagenbetreibers lohnt sich eine Repowering-Maßnahme nur dann, wenn der Nutzen den Aufwand deutlich übersteigt.

Bevor jedoch ein Repowering angegangen wird, ist zunächst zu beurteilen, ob die betreffende Biogasanlage überhaupt erhebliche Verbesserungspotenziale aufweist und welche Maßnahmen dazu geeignet sind, diese Potenziale auszuschöpfen. Anschließend ist zu überlegen, anhand welcher Kennzahlen die Effekte der Repowering-Maßnahme bewertet werden können und welche Zielgrößen anzustreben sind, um die Maßnahme wirtschaftlich zu gestalten.

3.1 Repowering der Rührtechnik

Untersuchungen an fünf bayerischen Biogas-Pilotanlagen ergaben einen Anteil der Rühraggregate am gesamten Strombedarf der Biogasanlage von ca. 39 bis 69 %, nur in einem Fall war dieser Anteil mit ca. 11 % deutlich geringer (EFFENBERGER et al. 2010). Eine andere Studie nennt hierfür Werte von 29 bis 54 % (SOLARENERGIEFÖRDERVEREIN 2006). Für den spezifischen Strombedarf der Rührwerke bezogen auf den Substratdurchsatz wurden Werte von ca. 3 bis 35 kWh/t ermittelt. Die große Spannweite dieser Werte deutet bereits auf ein erhebliches Optimierungspotenzial hin. Ist der aktuelle Strombedarf für das Rühren hoch und der bauliche Aufwand vertretbar, kann es daher lohnenswert sein – evtl. im Zuge ohnehin fälliger Revisionsmaßnahmen – einen Austausch von Rührwerken vorzunehmen.

Wie der Vergleich in Tabelle 2 eindrucksvoll zeigt, kann sich die Auswahl der Rührtechnik sehr stark auf den Energiebedarf für das Rühren auswirken. In beiden Fällen kann davon ausgegangen werden, dass eine befriedigende Durchmischung des Gärbehälters erreicht wurde, d. h. es kam nicht zur Bildung von Sink- und Schwimmschichten, die den Regelbetrieb der Anlage verhindert hätten. Die Beschaffenheit des Gärgemisches ist ähnlich. Die Rührwerke in Anlage 2 erwiesen sich jedoch als wesentlich weniger effizient, da hier in etwa die dreifache spezifische Rührleistung eingetragen und die Rührwerke ca. dreimal länger betrieben wurden. Bezogen auf den Substratdurchsatz ergibt sich so für Anlage 2 der elffache Strombedarf.

Tab. 2: Vergleich des Strombedarfs für das Rühren des Hauptgärbehälters auf zwei verschiedenen Biogasanlagen

	Einheit	Biogasanlage 1	Biogasanlage 2
Substratdurchsatz	t/d	18,9	22,3
Einsatzstoffe und Massenanteile		Maissilage 63,0 % Grassilage 16,0 % GPS 10,0 % Rindergülle 7,0 % andere 4,0 %	Maissilage 66,6 % Grassilage 20,1 % Rindergülle 6,1 % GPS 3,8 % Rindermist 1,6 % andere 1,8 %
Mittlerer TM-Gehalt im Gärbehälter	%	7,4	7,3
Durchmesser Behälter	m	16	16
Höhe Behälter	m	4	6
Füllhöhe Behälter	m	3,5	5
Arbeitsvolumen	m ³	704	1 005
Rührwerke		Langachsührwerk + Tauchmotorpropeller	2 x Stabmixer
Antriebsleistung	kW	11 + 15 = 26	2 x 15 = 30
Installierte Rührleistung/ Arbeitsvolumen	kW/100 m ³	3,69	2,99
Gemessene Rührleistung/ Arbeitsvolumen	kW/100 m ³	0,72	2,00
Mittlere Betriebsstunden der Rührwerke	h/d	3,5	10,1
Spezifischer Strombedarf der Rührwerke	kWh/t	1,76	19,4

3.2 Repowering der Eintragstechnik, Substrataufbereitung

Auch für die Eintragstechnik ergeben sich aus den Beobachtungen an den bayerischen Pilotanlagen erhebliche Unterschiede im Strombedarf. An zehn Anlagen wurde ein spezifischer Strombedarf für die Förderung und den Eintrag der festen Einsatzstoffe von 0,3 bis 4,3 kWh/t ermittelt (EFFENBERGER et al. 2010). Die Unterschiede erklären sich im Wesentlichen aus dem Dosiersystem und der zu überwindenden Förderstrecke (Abb. 1). Kostenseitig können bei der Feststoffeintragstechnik der Verschleiß sowie Reparaturen stärker zu Buche schlagen als der Stromverbrauch.

Auf dem Markt werden verschiedene Systeme für eine zusätzliche Substrataufbereitung angeboten, welche die Methanausbeute aus den Einsatzstoffen erhöhen und somit die Wirtschaftlichkeit der Biogasproduktion verbessern sollen. Für die Substrataufbereitung kommen (elektro-) mechanische, chemische und thermische Verfahren sowie Kombinationen aus diesen in Frage. Die Fix- und Betriebskosten für diese Verfahren müssen durch die Steigerung der Netto-Stromausbeute mehr als ausgeglichen werden. Tabelle 3

zeigt ein Fallbeispiel für den Effekt einer Substrataufbereitung durch elektrokinetische Desintegration für eine der bayerischen Biogas-Pilotanlagen.

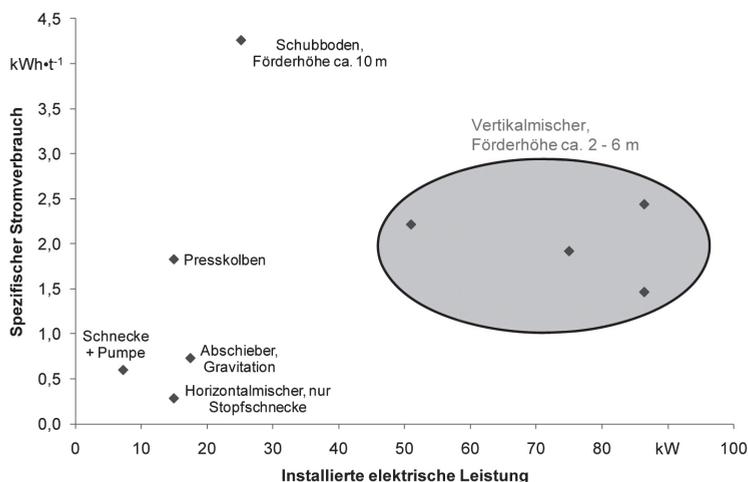


Abb. 1: Installierte elektrische Leistung und gemessener spezifischer Strombedarf unterschiedlicher Systeme für den Feststoffeintrag in Biogasanlagen

Tab. 3: Vergleich der Netto-Stromausbeute für eine Biogasanlage mit und ohne Substrataufbereitung durch elektrokinetische Desintegration

	Einheit	Ausgangszustand	Mit Substrataufbereitung
Substratdurchsatz	t/d	18,5	19,4
Einsatzstoffe und Massenanteile		Maissilage 54 % Schweinegülle 27 % Grassilage 9 % GPS 8 % Getreideschrot 1 % andere 1 %	Maissilage 45 % Schweinegülle 37 % Grassilage 7 % GPS 5 % CCM 3 % Getreide 3 %
Gesamtverweilzeit	d	83	79
Methanproduktivität	$m_N^3/(m^3 \cdot d)$	1,0	1,1
Methanausbeute	m_N^3/kg oTM	354	419
Mittlere TM-Gehalt im Hauptgärbehälter	%	8,2	7,6
Mittlere TM-Gehalt im Nachgärbehälter	%	7,1	7,1
Stromausbeute	kWh/t	348	372
Gesamtstrombedarf	kWh/t	15,5	16,7
Strombedarfsanteil	%	4,5	4,5
Strombedarf Substrataufbereitung	kWh/t	-	4,4
Strombedarf Rührwerke	kWh/t	10,5	7,1
Netto-Stromausbeute	kWh/t	333	355

Betrachtet man für dieses Beispiel den spezifischen Gesamtstrombedarf der Biogasanlage, so nahm dieser durch das zusätzliche Aufbereitungsaggregat zunächst zu. Gleichzeitig erhöhte sich jedoch die Stromausbeute um ca. 7 % und der Strombedarf für das Rühren nahm um nahezu ein Drittel ab. Damit ergab sich eine Zunahme der Netto-Stromausbeute um knapp 7 %. Demnach könnte sich die Substrataufbereitung in diesem Fall lohnen, wenn die Kosten für das Aggregat durch die höhere Stromausbeute überkompensiert werden. Zu berücksichtigen ist allerdings auch, dass sich gleichzeitig die Mischung der Einsatzstoffe geändert hatte.

3.3 Repowering der Biogasverwertung

Häufige Praxis bei der landwirtschaftlichen Biogasnutzung ist es, die Biogasanlage im Verhältnis zur Gas verwertenden Einheit zunächst überzudimensionieren. Später entschließt sich der Betreiber häufig zu einer Erweiterung der BHKW-Kapazität.

Ein Beispiel für eine solche Maßnahme zeigt Tabelle 4. In diesem Fall wurde ein neues Gärrestlager errichtet und das bestehende Gärrestlager zum Nachgärbehälter umfunktionierte.

Tab. 4: Beispiel für das Repowering einer landwirtschaftlichen Biogasanlage durch Vergrößerung des Gärraums und der installierten BHKW-Leistung

	Einheit	Ausgangszustand	Repowering
Substratdurchsatz	t/d	22,3	53,6
Einsatzstoffe und Massenteile		Maissilage 66,6 % Grassilage 20,1 % Rindergülle 6,1 % GPS 3,8 % Rindermist 1,6 % andere 1,8 %	Maissilage 56 % Rindergülle 32 % Grassilage 7 % Getreide 3 % Hühnertrockenkot 2 %
Gesamt-Gärraum	m ³	3.015	4.020
Methanproduktivität	m _N ³ /(m ³ ·d)	0,76	1,1
Spezifische installierte elektrische Leistung	kW/m ³	0,11	0,21
Erreichte spezifische elektrische Leistung	kW/m ³	0,11	0,17
Arbeitsausnutzung	%	98	66
Stromausbeute	kWh/t	347	313
Gesamtstrombedarf	kWh/t	31,6	19,8
Netto-Stromausbeute	kWh/t	315	293
Strombedarfsanteil	%	9,1	6,3

Der Vergleich zeigt, dass diese Biogasanlage im Ausgangszustand mit einer spezifischen installierten elektrischen Leistung von $0,11 \text{ kW/m}^3$ sehr großzügig dimensioniert war und dementsprechend mit einer vergleichsweise geringen Raumbelastung und Methanproduktivität betrieben wurde. Im Zuge des Repowering wurde ein Satelliten-BHKW errichtet, dessen Wärmeproduktion vollständig abgesetzt werden kann. Zugleich wurde der Mix der Einsatzstoffe deutlich verändert, um den Güllebonus beanspruchen zu können.

Nach der Erweiterung der Anlage hat sich die Produktivität des verfügbaren Gär-raums deutlich erhöht. Zugleich ist die Netto-Stromausbeute jedoch aufgrund des deutlich höheren Gülleanteils zurückgegangen, obwohl der spezifische Gesamtstrombedarf der Biogasanlage ebenfalls signifikant abnahm. Am auffälligsten ist allerdings die zum Zeitpunkt der Auswertung unbefriedigende Arbeitsausnutzung von lediglich 66 %. Um eine Arbeitsausnutzung von 91 % (8 000 Jahresvolllaststunden) zu erreichen, müsste die Methanproduktivität des Gär-raums auf $1,5 \text{ mN}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ ansteigen, was mit dem aktuellen Substratmix unrealistisch ist.

3.4 Optimierung der Nährstoffversorgung

Ursache unerklärter Prozesszusammenbrüche vor allem bei einem hohen Anteil von Maissilage in der Futtermischung kann ein Mangel an Spurenelementen sein (Kap. 2.2.2). Tabelle 5 zeigt Empfehlungswerte für die Konzentration wichtiger Spurenelemente im Gärgemisch.

Eine Optimierungsmaßnahme besteht darin, die gewünschten Gehalte zunächst über Substratanalysen und prognostizierende Bilanzierungen im Fermenter einzustellen. Die analytische Verifizierung im Gärgemisch sollte bei unkritischen Substraten etwa jährlich erfolgen, bei kritischen Substraten und nach einer Umstellung der Fütterung etwa alle zwei Monate. Bei Abweichungen von den Prognosewerten sollte allein das fehlende Element spezifisch zur Deckung der Differenzkonzentration zugesetzt werden.

Tab. 5: Empfehlungen für Spurenelementgehalte in NawaRo-Biogasanlagen

Spurenelement	Co	Ni	Na	Se	Mo	Fe	Zn	Cu
	Konzentration in der Frischmasse [mg/kg]							
Mindestgehalt	>0,03	>0,06	>10	>0,008	>0,05	>1	>0,05 ?	>0,05 ?
Optimalbereich	0,06–0,50	0,12–1,0	25–?	0,01–0,05 ?	0,08–0,5	5–100	0,1–10 ?	0,1–10 ?

?: Erfahrungswert, bedarf der experimentellen Absicherung.

Quelle: MUNK et al. (2010) und SCHATTAUER et al. 2011

Es ist mittlerweile gängige Praxis, bei der NawaRo-Vergärung Spurenelemente zuzusetzen. Da es sich hierbei größtenteils um Schwermetalle handelt, die in höherer Dosierung giftig wirken, ist von einer Verwendung spurenelementhaltiger Gärhilfsstoffe ohne Konzentrationsangabe dringend abzuraten. Eine Zugabe nach dem Motto „viel hilft viel“ kann nicht nur toxisch für die Gärbiologie und das Anlagenpersonal sein, sondern auch bei der Ausbringung des Gärrestes eine Umweltbelastung hervorrufen.

3.5 Gezielter Einsatz von Gärhilfsstoffen und Mikroorganismen

Anbieter von Gärhilfsstoffen werben mit Effizienzverbesserung, Prozessbeschleunigung oder Gasmehrertrag bei Einsatz ihrer Präparate, während hierzu wenige wissenschaftliche Untersuchungen vorliegen. KOCH et al. (2010) geben eine Übersicht zu diesem Thema. Betreiberberichten zufolge konnte die Rührenergie nach Enzymeinsatz gesenkt werden. Fallweise scheint die Hydrolyse beschleunigt werden zu können, möglicherweise lassen sich auch Schwimmschichten besser auflösen. Für einen bereits effizient laufenden Gärprozess ließ sich aber ein deutlicher Methanmehrertrag durch Enzymeinsatz bisher nicht darstellen.

Zur Wirkung von Adsorbentien wie auch zum Einsatz speziell selektierter Mikroorganismen(gemeinschaften) liegen unterschiedliche Befunde vor. Es kristallisiert sich heraus, dass in speziellen Problemsituationen, z.B. bei NH_3 -Überschuss im Vergärungssystem, der Zusatz spezifischer Gärhilfsstoffe zumindest vorübergehend effektiv sein kann. Ob sich das Kosten-Nutzen-Verhältnis auch langfristig günstig darstellt, ist im Einzelfall zu zeigen.

Ein Zukunftspotenzial besteht in der Bereitstellung speziell an Problemsituationen angepasster Mikroorganismen(gemeinschaften). Beispielsweise wurde die Leistungsfähigkeit einer an hohe $\text{NH}_4^+/\text{NH}_3$ -Gehalte angepassten Biozönose demonstriert (CALLI et al. 2005). In der Biotechnologie wird die Adaptionfähigkeit der Mikroorganismen zur Herstellung von sogenannten Inokula genutzt, die spezifisch an besondere Verhältnisse adaptiert sind. Diese Technik setzt die Biogasbranche beispielsweise beim Anfahren von Biogasanlagen bereits seit Langem ein.

4 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

Von der Eintragsvorrichtung bis zur Verwertung des Biogases bieten sich grundsätzlich vielfältige Möglichkeiten für das „Repowering“ von Biogasanlagen im Sinne einer Steigerung der Anlageneffizienz. Welche Verbesserungspotenziale im individuellen Fall vorhanden sind, kann nur durch geeignete Kennwerte und Prozessindikatoren beurteilt

werden. Durch die erheblichen Fortschritte der mikro-/molekularbiologischen Analytik und das verbesserte Prozessverständnis tun sich hier neue Möglichkeiten auf.

Beispiele verfahrenstechnischer Maßnahmen sind die Steigerung der Netto-Stromausbeute durch die Optimierung der Rührtechnik oder die Installation eines Aggregats zur Substrataufbereitung. Aus gärobiologischer Sicht steht gegenwärtig insbesondere die Nährstoffversorgung oder der gezielte Einsatz von Gärhilfsstoffen im Fokus, während die Bereitstellung spezieller Mikroorganismen(gemeinschaften) noch intensiver Forschung und Entwicklung bedarf.

Literatur

- BWE (2010): Repowering von Windenergieanlagen - Effizienz, Klimaschutz, regionale Wertschöpfung. Bundesverband Windenergie e.V., Berlin, Stand 3/2010, http://www.windenergie.de/sites/default/files/download/publication/repowering-von-windenergieanlagen/bwe_repowering-broschuere_05-2011.pdf , 2011-0607 14.45
- Lehner, A.; Effenberger, M. (2009): Möglichkeiten zur Senkung des Energiebedarfs von Biogasanlagen. In: FNR (Hrsg.): Biogas in der Landwirtschaft – Stand und Perspektiven. Gülzower Fachgespräche, Band 32, S. 380–388
- Grapenthin, H.; Lebuhn, M.; Gronauer, A. (2010): Spezifische Aktivitäts-, Toxizitäts- und Supplementierungstests zur Optimierung des Anlagenbetriebs. In: Kongressband des 1. C.A.R.M.E.N.-Forschungs-Kolloquiums „Nachwachsende Rohstoffe“, Straubing 04./05.11.2010
- Schieder, D.; Gronauer, A.; Lebuhn, M.; Bayer, K.; Beck, J.; Hiepp, G.; Binder, S. (2010): Prozessmodell Biogas, http://www.biogas-forum-bayern.de/publikationen/Prozessmodell_Biogas.pdf, Zugriff am 08.08.2011
- Munk, B.; Bauer, C.; Gronauer A.; Lebuhn, M. (2010): Population dynamics of methanogens during acidification of biogas fermenters fed with maize silage. *Eng. Life Sci.* 10(6), pp. 496–508
- Sayder, B.; Vitz, H.; Mohring, S.; Merrettig-Bruns, U.; Kabasci, S.; Hamscher, G.; Türk, J. (2009): Gehemmte Biologie. *Biogas Journal* 02, pp. 44–45
- Schattauer, A.; Abdoun, E.; Weiland, P.; Plöchl, M.; Heiermann, M. (2011): Abundance of trace elements in demonstration biogas plants. *Biosys. Engin.* 108, pp. 57–65
- Andrade, D.; Marín Pérez, C.; Heuwinkel, H.; Lebuhn, M.; Gronauer, A. (2009): Biogasgewinnung aus Grassilage: Untersuchungen zur Prozessstabilität. *Proceedings of the 1st International Congress Biogas Science 2009*, 2.12.-4.12.2009, Erding, LfL-Schriftenreihe 16/3, pp. 529–538
- Nettmann, E.; Bergmann, I.; Pramschüfer, S.; Mundt, K.; Plogsties, V.; Herrmann, C.; Klocke, M. (2010): Polyphasic analyses of methanogenic archaeal communities in agricultural biogas plants. *Appl. Envir. Microbiol.* 76/8, pp. 2540–2548
- Akuzawa, M.; Hori, T.; Haruta, S.; Ueno, Y.; Ishii, M.; Igarashi, Y. (2011): Distinctive responses of metabolically active microbiota to acidification in a thermophilec anaerobic digester. *Microb. Ecol.* 61, pp. 595–605

- Munk, B.; Bauer, C.; Gronauer, A.; Lebuhn, M. (2011): A Metabolic Quotient for methanogenic Archaea. submitted
- Effenberger, M.; Bachmaier, H.; Kränzel, E.; Lehner, A.; Gronauer, A. (2010): Wissenschaftliche Begleitung der Bayerischen Pilotanlagen zur Biogasproduktion. Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft (Hrsg.), Schriftenreihe 1/2010, Freising
- Solarenergieförderverein Bayern e.V. (Hrsg.) (2006): Der Eigenstromverbrauch von Biogasanlagen und Potenziale zu dessen Reduzierung. München, <http://www.sev-bayern.de>
- Koch, K.; Gepperth, S.; Andrade, D.; Ebertseder, F.; Gronauer, A. (2010): Hilfsmittleinsatz bei der Biogaserzeugung – Überblick und Erfahrungen aus Labor und Praxis. In: Gülzower Fachgespräche Band 35
- Calli, B.; Mertoglu, B.; Inanc, B.; Yenigun, O. (2005): Effects of high free ammonia concentrations on the performances of anaerobic bioreactors. *Proc. Biochem.* 40, pp. 1285–1292

Vom Sorgenkind zum Musterknaben – über das Repowering einer Biogasanlage

HANS-WERNER GRESS

Nach der feierlichen Einweihung durch die damalige Bundesumweltministerin Künast im Jahr 2001 hofften alle auf eine Erfolgsgeschichte der Biogasanlage in Samswegen (Sachsen-Anhalt). Doch nach der Feier gab es nicht mehr viel Anlass, sich über die Biogasanlage zu freuen. Zu groß waren die technischen Mängel und Probleme. Havarien und geringe Erträge, Geruchsprobleme, Ärger mit Genehmigungsbehörden und Anwohnern und in Folge davon juristische Klagen bestimmten jahrelang den Alltag beim Betrieb der Anlage.

Die von der Schmack AG geplante und errichtete Anlage bestand ursprünglich aus zwei liegenden Pfdropfenstrom-Fermentern mit jeweils 400 m³ und drei Speicherdurchfluss-Fermentern mit jeweils 1200 m³. In den beiden liegenden Fermentern sollte eine Hydrolyse stattfinden, für die eigentliche Methanisierung sollten die drei Fermenter der zweiten Stufe dienen.

Leider war dieses Konzept im praktischen Betrieb der Anlage nicht durchführbar. Es kam immer wieder zu Störfällen und zum Überschäumen der Anlage. Dies bekam man nur mit einer massiven Rezirkulation von einem Mehrfachen der täglichen Einsatzstoffmenge in den Griff. Dadurch wurde aber sowohl die Idee der Vorversäuerung in den Pfdropfenstromfermentern als auch die Stufung zur Vermeidung von Kurzschlussströmen in die Endlager zur Makulatur. Die Folge war eine schlechte Gasausbeute bei sehr sensiblen Betriebsverhalten mit weiterhin häufigen Havarien. Hinzu kamen erhebliche Geruchsprobleme.

Da die Probleme dauerhaft nicht beseitigt werden konnten, wandten sich die Anwohner schließlich auch an die Genehmigungsbehörden, damit diese Abhilfe schaffen sollten. Im weiteren Verlauf kam es dann zwischen den beteiligten Parteien zu diversen Klagen und Klageandrohungen und die Lage verschärfte sich zunehmend.

Im Jahre 2008 wurden Mitarbeiter von ABO Wind, einem Projektentwickler für erneuerbare Energien aus Wiesbaden, bei der Akquisition von Rohstoffen für ein anderes Projekt in der Nähe auf diesen Standort aufmerksam. ABO Wind bot den überdrüssigen Kommanditisten die Übernahme der Kommanditanteile an. Voraussetzung für dieses Geschäft war jedoch, dass diverse Rechtsstreitigkeiten zuvor beigelegt werden sollten und dass die Genehmigungsbehörde prinzipiell grünes Licht für einen Weiterbetrieb und einen Umbau der Biogasanlage geben sollte. Um dies zu erreichen, waren umfangreiche und langwierige Verhandlungen erforderlich.

ABO Wind entwickelte für die zerstrittenen Parteien eine umfangreiche Liste mit Lösungsvorschlägen, der nach längeren Verhandlungen alle zustimmen konnten. Die Lösung bestand in einer Übernahme und einer anschließenden grundsätzlichen Sanierung, Modernisierung und Erweiterung der Biogasanlage.

Geplant war die Anlage ursprünglich für die Kofermentation von täglich ca. 100 m³ Rindergülle und 27 t an diversen gewerblichen Abfallstoffen je Tag. Als Abfallstoffe wurden Rapsschleim, Rapsstaub, Hundefutter, Kartoffelpulpe und Getreidestaub eingesetzt. ABO Wind rüstete die Anlage für den ausschließlichen Betrieb mit Gülle und NawaRos um. Täglich werden nun 100 m³ Rindergülle sowie 25 t nachwachsende Rohstoffe (insbesondere Mais und wenige Tonnen Grassilage) gefüttert. Allein dadurch ergab sich eine erhebliche Reduzierung der Gerüche, insbesondere da die Abfallstoffe zuvor offen gelagert wurden.

Die Lösung beinhaltete zudem die Schaffung weiteren Faulraums durch Umrüstung eines Endlagers in einen weiteren Nachgärbehälter. Die Verweilzeit konnte dadurch um ca. 15 Tage auf nunmehr 50 Tage gesteigert werden. Zwar ist diese Verweilzeit immer noch nicht optimal, jedoch treten aufgrund des dreistufigen Prozesses nur sehr geringe Kurzschlussströme des Substrats auf, d. h., es wird praktisch kein unvergorenes Material aufgrund der Durchmischung im Fermenter in das Endlager ausgetragen. Die gründlichere Ausfäulung ermöglicht einen höheren Gasertrag und eine bessere energetische Ausnutzung der Stoffe. Das führt auch zu einer weiteren Geruchsreduzierung und einer größeren Akzeptanz im Umfeld beim Ausbringen des Gärsubstrats als hochwertiger Dünger.

Zur Steigerung der Effizienz trug auch der Ersatz der bestehenden Alt-BHKW (Gesamtleistung 660 kW_{el}) durch zwei moderne Anlagen mit deutlich höherem Wirkungsgrad bei. Am Standort der Biogasanlage wurde eine schallgedämmte Anlage mit 254 kW_{el} (MAN) errichtet. Eines der alten BHKW bleibt für den Einsatz bei Notfällen weiter bestehen. Das zweite neue BHKW mit einer Leistung von 536 kW_{el} (MWM) wurde an einem ca. 4,5 km entfernt liegenden Standort zur Wärmeversorgung einer größeren Ferkelzuchtanlage aufgestellt. Trotz deutlicher Steigerung der Gesamtleistung konnte so der Lärm am Standort erheblich reduziert werden.

Geruchsprobleme bereiteten bei der Altanlage auch die aus nur einer EPDM-Folie bestehenden Gasspeicher. Insbesondere im Sommer kam es hier immer wieder zur Geruchsbelästigung, möglicherweise aufgrund von Undichtigkeiten oder von Diffusion durch die Folien. Um dies zu beseitigen wurden alle Gasspeicher durch Doppelmembranfoliendächer ersetzt. Weitere Elemente der Sanierung waren die Entleerung und Sanierung der bestehenden Behälter sowie die Nachrüstung langsam laufender Rührwerke zur effektiveren Durchmischung des Substrats, die Verbesserung der Wärmedämmung an den Behältern, der Umbau der kompletten Mess-, Steuer- und Regelungstechnik sowie

der Sicherheitseinrichtungen, der Wärmeverteilung sowie der Gülle- und Gasverrohrung (Abb. 1–4).



Abb. 1: Reinigung der Speicherdurchfluss-Fermenter



Abb. 2: Reinigung der Propfenstrom-Fermenter



Abb. 3: Einsatz neuer langsam laufender Rührwerke



Abb. 4: Verstärkung der Behälterdämmung

Darüber hinaus wurden notwendige, bisher nicht vorhandene Komponenten wie eine Gasfackel, ein Gaskühler und eine externe Entschwefelung nachgerüstet. Der Feststoffdosierer wurde erneuert und in einer neu errichteten Halle zur kurzzeitigen Zwischenlagerung von Silage untergebracht (Abb. 5).



Abb. 5: Blick über die Anlage von Osten

Nach dem Umbau konnte die Rezirkulation zunächst um 80 % reduziert werden. Das Ziel, die Rezirkulation vollständig zu vermeiden, konnte jedoch zunächst nicht erreicht werden. Denn bauartbedingt kommen die Rührwerke der liegenden Fermenter bei hoher Belastung durch Mist und Silage an ihre Grenzen. Zur Verbesserung der Situation wurde nachträglich hinter die Propfenstrom-Fermenter eine Zerkleinerungseinrichtung in den Substratstrom eingebaut. Nun wird zur Reduzierung der Viskosität und der Verbesserung der Rührbarkeit ein Teil des stark zerkleinerten Substrats rezirkuliert. Dies erlaubt höhere Beladungen und sorgt gleichzeitig für bessere Gasausbeuten (Abb. 6).

Durch die insgesamt gesteigerte Gaserzeugung und die deutlich höheren Wirkungsgrade der beiden neuen BHKW stieg die Stromerzeugung von 3 600 MWh im Jahr 2007 auf nunmehr rund 6 000 MWh je Jahr.

Nach der Umstellung der Inputstoffe konnten sowohl der NawaRo-Bonus als auch der Güllebonus gesichert werden. Dadurch erhöhte sich die mittlere Einspeisevergütung beträchtlich.

Unter Berücksichtigung der zusätzlichen Wärmeerlöse an dem Standort des Satelliten-BHKW konnten die jährlichen Erlöse durch Stromeinspeisung und Wärmeverkauf von ca. 360.000 € auf rund 1.400.000 € je Jahr gesteigert werden. Das entspricht fast einer Vervierfachung der Erlöse.

ABO Wind will sich allerdings mit dem erreichten Stand nicht zufrieden geben. Insbesondere bei der Inputbereitstellung sollen ökologisch und ökonomisch vorteilhafte Alternativen zur Maissilage gefunden werden. Hierzu werden in den kommenden Jahren andere Pflanzen, wie Sorghum und Wildkräutermischungen, getestet. Ein weiteres Thema bleibt die weitere Verringerung des Hilfsstromverbrauchs.

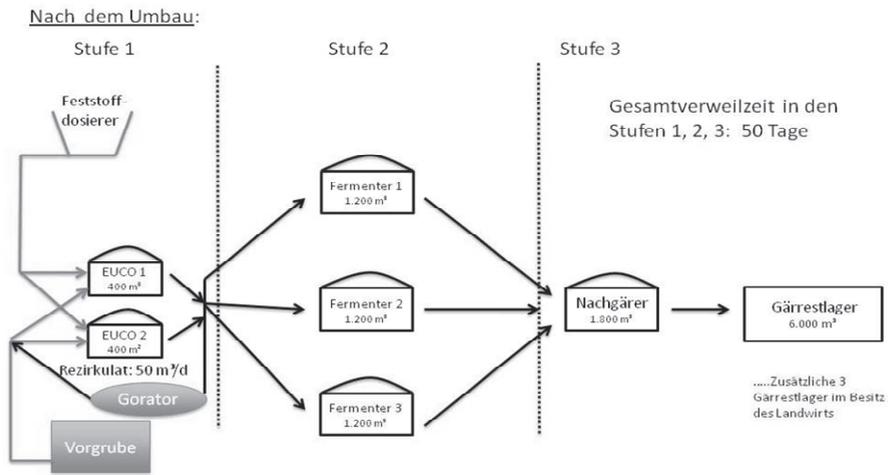


Abb. 6: Anlagenkonfiguration nach dem Umbau

Mit der Sanierung wurde die Biogasanlage auf den Stand der Technik gebracht, die weitere Optimierung ist jedoch noch nicht abgeschlossen – sie bleibt für eine engagierte Betriebsführung ein nie abgeschlossenes Kapitel.

Sorghumarten und -sorten – Anbaueignung auf Brandenburger Böden

MANUELA MÄRTIN, GERT BARTHELMES

Im Rahmen des Mehrländer-Verbundprojektes¹ „Anbautechnik Sorghumhirsen – Ein Beitrag zur Diversifizierung des Energiepflanzenpektrums“ wurden in einem dreijährigen Versuchszeitraum (2008–2010) verschiedene Themenbereiche zum Sorghumanbau untersucht. Das Ziel des Vorhabens war es, den Anbau von Sorghumhirsen zur Biogasgewinnung auf trockenen, leichten bis mittleren Böden unter anbautechnischen und ökologischen Gesichtspunkten zu optimieren. Das Vorhaben (Laufzeit 2008–2011) wurde durch das Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz (BMELV) über die Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. (FNR) gefördert.

Im Folgenden werden die Ergebnisse zur Anbaueignung von Sorghumarten und -sorten auf leichten Diluvial- und Rekultivierungsstandorten Brandenburgs vorgestellt. Die Federführung hierfür lag beim Landesamt für Ländliche Entwicklung, Landwirtschaft und Flurneuordnung des Landes Brandenburg.

In den Jahren 2008–2010 wurden dazu Feldversuche auf zwei Diluvialstandorten (Güterfelde, AZ 35 und Dröbzig, AZ 40) und zwei Rekultivierungsstandorten (Grünewalde und Welzow) in Kooperation mit dem Forschungsinstitut für Bergbaufolgelandschaften e.V. Finsterwalde angelegt. Im orthogonalen Kernsortiment standen den zwei Maisreferenzsorten NK Magitop S 240 und Atletico S 280 zwei Sudangrashybriden (*Sorghum bicolor* x *Sorghum sudanense*) (Lussi, Susu) und vier Futter- bzw. Zuckerhirsen (*Sorghum bicolor*) (Goliath, Sucrosorgo 506, Rona 1, Super Sile 20) gegenüber. Sowohl Aussaat als auch Ernte erfolgten artgerecht. Allgemein wird für Sorghum ein optimaler Saattermin ab Mitte Mai oder bei Bodentemperaturen von 14–16 °C empfohlen. Um eine gute Silierfähigkeit zu erreichen, sind die Trockensubstanzgehalte bei Sorghum von mind. 26–28 und bei Mais von 28–33 % einzuhalten.

Die Maisreferenzsorten erreichten im dreijährigen Mittel Trockenmasseerträge von 130 dt/ha (Rekultivierungsstandort Welzow) bis 154 dt/ha (Dröbzig, AZ 40) mit einem durchschnittlichen Trockensubstanzgehalt von rund 30 % und waren im Vergleich zum Sorghum die ertragsstärkere Kultur. Einige der geprüften Sorghumsorten erreichten in Abhängigkeit von Standort und Jahr das Maisertragsniveau oder übertrafen es etwas.

¹ Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie (Verbundkoordinator); Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft; Landesamt für Ländliche Entwicklung, Landwirtschaft und Flurneuordnung des Landes Brandenburg; Technologie- und Förderzentrum Nachwachsende Rohstoffe in Straubing und weitere Kooperationspartner.

Positiv bewertet wurden die Sudangrashybride Lussi mit Relativerträgen von 84–99, sowie die massebetonten Futterhirsesorten Goliath (relativ 97–117) und Sucrosorgo 506 (relativ 99–113) im Vergleich zur Bezugsbasis (Mittel der Maissorten). Innerhalb der Sorghumarten besaßen die massebetonten Futterhirsen ein höheres Ertragspotenzial als die Sudangrashybriden. Diese allerdings zeichneten sich durch eine zügigere Abreife und einen höheren Trockensubstanzgehalt aus. Bei der Eingliederung in die Fruchtfolge sollte daher das unterschiedliche Entwicklungsverhalten der beiden Sorghumarten beachtet und eine Sorte mit einem günstigen Verhältnis zwischen Ertragspotenzial und Abreife gewählt werden. Es hat sich gezeigt, dass die massebetonten und ertragsstarken Futterhirsen wegen ihrer späten Abreife eine längere Vegetationszeit benötigen (130 bis 160 Tage). Sie eignen sich daher eher für den Hauptfruchtanbau mit Aussaat bis Ende Mai. Zügig abreifende Sorten der Sudangrashybriden ermöglichen auch einen Einsatz im Zweitfruchtanbau mit Saattermin nach Ganzpflanzenge treide bis Ende Juni/Anfang Juli. Je nach Jahr, Standort und Sorte kann der Erntetermin bereits nach etwa 100 Tagen, aber auch erst nach 150 Tagen erreicht werden.

Die Wahl des Standortes beeinflusst die Ertragsbildung aller Arten. Mais und Sorghum konnten zwar auf allen Standorten problemlos angebaut werden, dennoch differierten die Erträge und Ertragsrelationen. Auf dem noch jungen Rekultivierungsstandort Welzow wurden in allen Jahren die niedrigsten Erträge ermittelt. Auch die Ertragsdifferenzen zwischen Sorghum und Mais waren sowohl auf dem Standort Welzow als auch auf dem ertragsstärkeren D-Standort Dröbig am größten. Ein günstigeres Verhältnis der Erträge zwischen Mais und Sorghum wurde auf dem trockenen, sandigen Diluvialstandort Güterfelde und dem älteren Rekultivierungsstandort Grünewalde festgestellt.

Biogas- und Methanerträge verschiedener Fruchtarten unter besonderer Berücksichtigung des Anbausystems und des Flächenertrages

FRANK HENGELHAUPT, KATJA GÖDEKE, CHRISTOPH STRAUSS

Bedingt durch eine veränderte Energiepolitik und der damit verbundenen günstigen Gesetzeslage, gibt es ein verstärktes Interesse an der Biogasproduktion, insbesondere im landwirtschaftlichen Bereich. Bisher kam als Kosubstrat hauptsächlich Mais zum Einsatz. Um Informationen zu pflanzenbaulichen Optionen für eine vielfältige Gestaltung von Fruchtfolgen zu bieten, wurden im Rahmen des Verbundprojektes „EVA“ und dessen Nachfolgeprojekts „EVA 2“ (gefördert vom BMELV über die FNR, Laufzeit 2005–2008 bzw. 2009–2012) am Standort Dornburg 8 verschiedene Fruchtfolgen mit insgesamt 12 unterschiedlichen Fruchtarten angebaut. Diese gelten dabei als mögliche Biogassubstrate.

Um Aussagen über das Biogas- und Methanpotenzial zu erhalten, wird das einsilierte Pflanzenmaterial mittels Hohenheimer Biogasertragstest untersucht (nach VDI-RL 4630). Besondere Berücksichtigung finden dabei das Anbausystem und die Fruchtfolgestellung (Hauptfrucht/Zweitfrucht) sowie die Inhaltsstoffe und die Ernteerträge der einzelnen Fruchtarten.

Die höchste spezifische Biogasausbeute liefert Topinambur (Knolle) mit ca. 755 l_N/kg oTS. Der Mais als Haupt- oder Zweitfrucht, die Zuckerhirse, eine Getreideartenmischung, der Winter-Roggen und Winter-Triticale erzielen in einem Bereich von ca. 635–655 l_N/kg oTS ebenfalls hohe Ausbeuten. Nachfolgend erreichen mit ca. 560–615 l_N/kg oTS die Sommergerste, der Hafer, das Luzernegras (1. Schnitt) sowie das Sudangras als Haupt- und Zweitfrucht die nächst höheren Biogasausbeuten. Die niedrigsten Biogasausbeuten liegen bei Luzernegras (3. Schnitt), Luzernegras (2. Schnitt) und Weidelgras mit ca. 525–546 l_N/kg oTS sowie bei Topinambur (Kraut) mit 462 l_N/kg oTS.

Der Topinambur (Knolle) und die ersten beiden Gruppen von Fruchtarten bilden auch die höchsten spezifischen Methanerträge mit ca. 395 l_N/kg oTS bzw. in einem Bereich von ca. 355–375 l_N/kg oTS und 330–350 l_N/kg oTS, wobei die zweite Gruppe um das Luzernegras (2. Schnitt) erweitert wird. Die Gruppe mit den niedrigsten spezifischen Methanausbeuten liegt in einem Bereich von ca. 310–322 l_N/kg oTS und 264 l_N/kg oTS (Abb. 1).

Weitere Ergebnisse und Erkenntnisse sind mit den laufenden Untersuchungen und Auswertungen im Rahmen von EVA II zu erwarten.

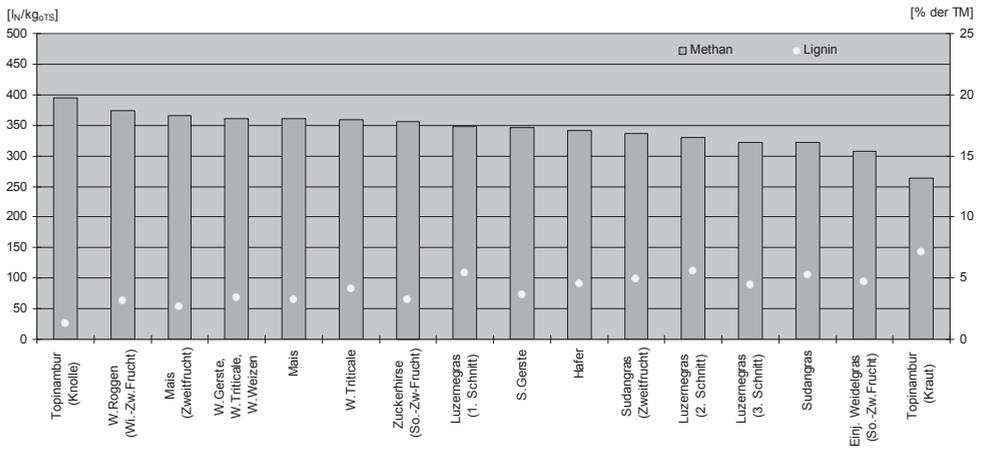


Abb. 1: spezifische Methanausbeuten sowie Ligningehalte der untersuchten Fruchtarten (EVA I)

Danksagung

Das Projekt EVA I wurde und EVA II wird mit Mitteln des BMELV über die FNR gefördert.

Sommergetreide im Zweitfruchtanbau für die Biogasnutzung

EGON JANSSEN, CHRISTINA SCHMIDT, ROLF RAUBER

Im Jahr 2010 wurden nach der Ernte von Ganzpflanzensilage bzw. Wintergerste jeweils zwei Sommersorten der Getreidearten Gerste, Hafer, Roggen, Weizen und Triticale sowie ein Wechselweizen und ein Hafer-Gersten-Gemenge mit dem Ziel ausgesät, ihre Eignung als Biogassubstrat zu untersuchen. Die Versuche wurden in drei Regionen auf Praxisflächen durchgeführt: Rheinland, Südniedersachsen und Schleswig-Holstein. Am Standort Göttingen wurde ein Exaktversuch mit vier Wiederholungen angelegt. Die Aussaat fand zwischen dem 25.06. und dem 05.08.2010 statt.

Die Trockenmasseerträge waren in den Regionen sehr unterschiedlich (24 bis 69 dt/ha). Zudem hatte die Jahreswitterung mit ausgeprägter Sommertrockenheit einen entscheidenden Einfluss auf die Ergebnisse. Im Rheinland lagen die Erträge am niedrigsten, in Schleswig-Holstein wurden trotz des späten Saattermins die höchsten Erträge erreicht. Hier muss jedoch die Silierfähigkeit des Getreides aufgrund niedriger TS-Gehalte als schlecht bewertet werden. Beim Methanhektarertrag wurden Werte von 650 bis 1920 Nm³ CH₄/ha erreicht. Den höchsten Methanhektarertrag erzielten in Südniedersachsen Triticale und im Rheinland sowie in Schleswig-Holstein Hafer.

Prinzipiell eignen sich alle Sommergetreidearten als Substrat für die Biogasanlage. Standort und Jahreswitterung haben jedoch einen entscheidenden Einfluss auf Entwicklung, Ertrag und Silierfähigkeit des Getreides.

Artenreiches Grünland für die Biogaserzeugung?

JOHANNES ISSELSTEIN, DOROTHEE EBELING, BJÖRN BUGDAHL, EGON JANSSEN

Für traditionell extensiv bewirtschaftetes und artenreiches Grünland sind in den letzten Jahren die Verwertungsoption über landwirtschaftliche Nutztiere schlechter geworden. Daher stellt sich die Frage, ob entsprechende Aufwüchse für die Erzeugung von Biogas genutzt werden können. In einer Untersuchung wurden extensiv bewirtschaftete Glatthaferwiesen und Weidelgrasweiden im Hinblick auf die Entwicklung des Ertrages und des Methanbildungsvermögens im ersten Aufwuchs untersucht. Dabei wurden die Bestandseigenschaften sowie einzelne wichtige Pflanzenarten berücksichtigt.

Die Untersuchungsflächen liegen im Institutsgarten des Departments für Nutzpflanzenwissenschaften der Universität Göttingen. Je zwei Glatthaferwiesenflächen werden dominiert von Glatthafer; weitere vorkommende Arten sind Knautgras, Rotschwingel, Wolliges Honiggras, Wiesenrispe und Goldhafer. Auf den zwei von Weidelgras dominierten Flächen kommen hauptsächlich Deutsches Weidelgras, Quecke, Rotschwingel und Gemeine Rispe vor. An drei verschiedenen Zeitpunkten (10. Mai, 27. Mai und 09. Juni 2010) wurden Proben der gesamten oberirdischen Biomasse sowie von 14 verschiedenen Arten im ersten Aufwuchs gewonnen. Die Flächen waren unterteilt in ungedüngte (N0) und gedüngte Teilflächen (N80, kg N/ha). Die Pflanzenproben wurden getrocknet, vermahlen und auf Futterqualitätseigenschaften sowie auf das Methanbildungsvermögen im Hohenheimer Biogastest untersucht.

Die Trockenmasseerträge der Glatthaferwiesen lagen je nach Erntezeit zwischen 1 775 und 4 789 kg TS/ha. Auf der weidelgrasdominierten Fläche variierte der Ertrag zwischen 3 183 und 9 859 kg TS/ha. Die Methanerträge der Glatthaferwiese lagen im Bereich von 961 und 2 773 Nm³ CH₄/ha, die der weidelgrasdominierten Fläche zwischen 496 und 1 338. Die N-Düngung hatte bei beiden Vegetationstypen einen positiven Effekt auf den Methanertrag (p = 0,01), was sich besonders zum frühen Schnitzeitpunkt zeigte. Der Methanertrag der Glatthaferwiese war etwa halb so hoch wie der des Weidelgrasbestandes. Bei den Methanerträgen der einzelnen Arten konnten signifikante Arteffekte festgestellt werden. Ebenso wurden deutliche Unterschiede zwischen den Erntezeitpunkten ermittelt. Die Ergebnisse zeigen, dass der Pflanzenbestandstyp und auch einzelne Arten von Bedeutung sind bei der Vergärung zu Biogas. Bei der Beurteilung der Verwertung von artenreichem Grünland in der Biogasanlage ist somit die botanische Zusammensetzung der Grasnarbe zu berücksichtigen.

Sorghum für Biogas – Ergebnisse des bayernweiten Sortenvergleichs 2010

KAREN ZEISE, MAENDY FRITZ

Versuchsfrage und Ergebnisse 2010

Sorghum gilt als aussichtsreicher Kandidat, den Silomais als Biogassubstrat, insbesondere in sommertrockenheitsgefährdeten Lagen und in Gebieten mit Anbaurestriktionen infolge Befalls durch den Westlichen Maiswurzelbohrer, sinnvoll zu ergänzen. Zur Prüfung der Anbaueignung von Sorghum unter bayerischen Bedingungen wurde 2010 das fünfte Jahr in Folge ein Sortenversuch an verschiedenen Standorten angelegt, die unterschiedliche Boden-Klima-Räume abdecken. Die Auswahl der Sorten war darauf abgestellt, möglichst alle Arten und Nutzungstypen einzubeziehen sowie Verfügbarkeit und Bekanntheitsgrad am Markt und den Anspruch des Versuches auf Mehrjährigkeit der Ergebnisse zu berücksichtigen.

Die Saison 2010 war an allen vier Standorten durch überdurchschnittlich hohe Niederschläge in Mai und August, eine extreme Trockenheit im Juli, wenig wüchsiges Wetter im September und geringe Strahlungsintensitäten geprägt. Ab August wurde überall sehr kräftiges Lager beobachtet, das zwischen den Wiederholungen der hochwüchsigen Futtersorten große Ertragsschwankungen bedingte. Über alle Standorte konnte die Beziehung zwischen der Wärmesumme und den erreichten Trockensubstanzgehalten zur Ernte dargestellt werden. So hatten am wärmsten Standort Euerhausen 8 der 10 Prüfsorten den Mindest-TS-Gehalt von 28 % erreicht oder überschritten. In Straubing waren es zwei Sorten und in Neuhof und in Almesbach, dem kühlfsten der bayerischen Versuchsstandorte, kam keine Sorte an die Zielmarke heran (Tab. 1). Die Ertragsstabilität wird dargestellt als relativer Trockenmasseertrag jeder Prüfsorte zum Sortenmittel an den Versuchsstandorten (= 100 %). Die im Jahr 2010 ertragsstärkste Sorte Biomass 150 lag an allen Standorten über dem Sortenmittel, allerdings mit einer großen Spannweite. Ihr folgte die Sorte Zerberus. Mit ihren Erträgen sehr dicht beieinander und nahe am Standortmittel lagen die Sorten Maja, Lussi, Green Grazer und Mithril. Sehr große Spannweiten und unterdurchschnittliche Ertragsleistungen infolge hoher lagerbedingter Ernteverluste zeigten die Futtersorten Goliath, Herkules und Sucrosorgo 405. Ebenfalls unterdurchschnittlich mit wenig Streuung im Ertrag war die Dualsorte Top Silo.

Tab. 1: Einzelergebnisse an den Versuchsstandorten 2010

Sorten	TM-Ertrag [dt/ha] und TS-Gehalt [%]							
	Euerhausen		Straubing		Neuhof		Almesbach	
	TM	TS	TM	TS	TM	TS	TM	TS
Biomass 150	140,7	28,4	219,3	24,3	143,6	18,9	141,2	17,9
Goliath	160,7	28,2	90,9	23,7	148,2	18,6	134,5	17,9
Green Grazer	118,7	28,9	152,5	22,7	142,1	19,3	145,7	18,2
Herkules	146,3	27,1	128,2	22,8	87,3	18,8	116,7	18,4
Lussi	141,9	39,5	162,6	30,6	118,2	26,1	139,9	25,7
Maja	139,6	33,8	168,3	28,0	131,5	21,4	155,9	21,6
Mithril	130,9	29,9	159,0	24,7	128,4	18,9	138,4	19,5
Sucrosorgo 405	124,0	25,0	90,1	21,8	92,1	17,5	147,3	16,2
Top Silo	99,7	23,0	129,2	19,5	90,8	17,9	125,0	18,0
Zerberus	154,6	31,0	137,2	25,3	165,1	20,8	151,4	19,4
Standortmittel	135,7	29,5	143,7	24,3	124,7	19,8	136,6	19,3

Mehrjährige Ergebnisse

Aus den mehrjährigen Ergebnissen können über das Merkmal TS-Gehalt zur Ernte klar differenzierbare Reifegruppen im Sorghumsortiment abgeleitet werden (Abb. 1). Über alle Standorte und Jahre hinweg erreichen nur die bislang wenigen verfügbaren frühen und mittelfrühen Sorten sicher die optimale Siloreife. An ausgesprochen warmen Standorten, wie Euerhausen, können darüber hinaus auch standfeste mittelspäte Sorten erfolgreich angebaut werden.

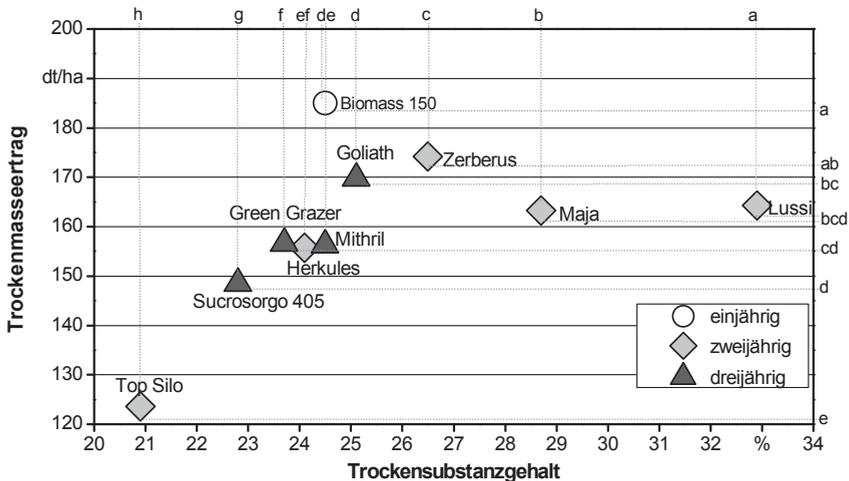


Abb. 1: Mehrjährige Mittelwerte (Sorten mit gleichem Buchstaben lassen sich auf dem Niveau von 5 % Irrtumswahrscheinlichkeit nicht unterscheiden)

Weidelgras-Untersaat in Wintergetreide zur Ganzpflanzensilagen-Nutzung für die Biogasproduktion

DOROTHEA HOFMANN, EWALD STICKSEL, ALOIS AIGNER, GEORG SALZEDER,
JOACHIM EDER

1 Einleitung

In einer nachhaltigen Biogasproduktion gilt es, maisbetonte Fruchtfolgen aufzulockern. Die Kombination Getreide-Ganzpflanzensilage (GPS) mit anschließender Zweitfrucht Weidelgras bietet ein bodenschonendes, erosionsminderndes und vor allem humusmehrendes Fruchtfolglied, welches insbesondere auf niederschlagsreichen Standorten gute Erträge liefern kann.

Um die Problematik der Etablierung von Weidelgras im Anschluss an die GPS-Ernte zu entschärfen und um unnötige Kosten für eine zusätzliche Saattbettbereitung zu umgehen, bietet sich das Verfahren der Untersaat im Wintergetreide an.

Die Untersaat Weidelgras kann im frühen Herbst (bis Ende Sept.) gleichzeitig mit der Deckfrucht Winterroggen ausgebracht werden. Für beide Kulturen muss die Saatstärke reduziert werden. Zum Zeitpunkt der Deckfruchternte Anfang Juni hat die Untersaat etwa das Stadium Ende Rispschieben/frühe Blüte erreicht. Nach Deckfruchternte und einer ausreichenden N-Düngung setzt bei guter Wasserversorgung rasch der Wiederaustritt und die Massenbildung der Gräser ein. So wird gegenüber einer Nachsaat ein deutlicher Entwicklungsvorsprung erreicht.

2 Erträge

Der Trockenmasseertrag der Deckfrucht Winterroggen lag im Mittel über vier Erntejahren und drei Orte bei gut 100 dt/ha Trockenmasse (Abb.1). Gegenüber einem Bestand ohne Untersaat und damit optimaler Bestandesdichte entspricht dies einem Minderertrag von ca. 20 dt/ha Trockenmasse (TM). Der erste Schnitt des Weidelgrases brachte mehr als 30 dt/ha TM ein. Insgesamt erzielte die Untersaat mit durchschnittlich drei Schnitten gute 85 dt/ha TM. Damit lag der Gesamtertrag aus Deckfrucht plus Grasertrag im Mittel bei knapp 80 % des Maisertrages.

3 Standortabhängigkeit

Die starke Abhängigkeit der Ertragsleistung des Weidelgrases von der Wasserversorgung spiegelt der Standortvergleich wider (Abb. 1). So erreichte am niederschlagsarmen Standort Ansbach die Untersaatvariante nur einen Ertrag von 147 dt/ha TM, während am feuchtkühlen Standort Freising 240 dt/ha TM geerntet werden konnten. Hier steuerten die vier Schnitte des Weidelgrases gut die Hälfte zum Gesamtertrag bei.

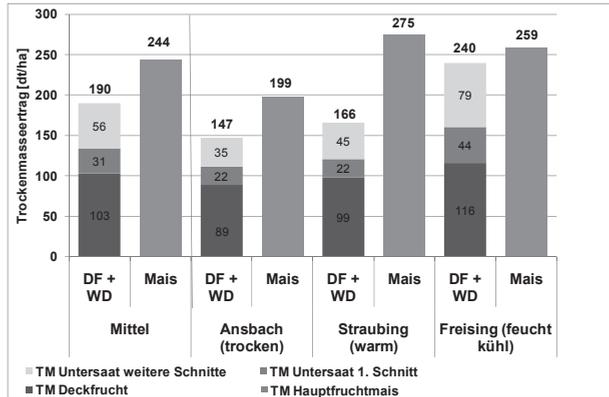


Abb. 1: Trockenmasseertrag von Deckfrucht (DF) Winterroggen und Untersaat Weidelgras (WD) im Vergleich zum Hauptfruchtmais in Abhängigkeit vom Standort (Mittel 2007–2010)

4 Jahreseinfluss

Am Beispiel des niederschlagsreichen Standortes Freising lässt sich der Einfluss der Jahreswitterung veranschaulichen (Tab. 1). Im Mittel der Jahre erreichte die Untersaatvariante hier 92 % des Maisertrages. Dabei war der Jahreseffekt auf den Ertrag der Untersaatvariante weniger stark ausgeprägt als beim Mais. Bedingt durch die Ertragsschwankungen von 200 bis 300 dt/ha TM beim Mais, erreichte die Untersaatvariante 80–110 % des Maisertrages.

Tab. 1: Trockenmasseertrag von Deckfrucht Winterroggen (DF) und Untersaat Weidelgras (WD) im Vergleich zum Hauptfruchtmais am niederschlagsreichen Standort Freising für die Jahre 2007 bis 2010

Jahr	DF	WD	Summe DF + WD	Mais	DF + WD
					% Mais
Trockenmasseertrag [dt/ha]					
2007	133	147	279	299	93
2008	105	118	224	251	89
2009	113	111	224	281	80
2010	109	119	228	204	111
Mittel	115	124	239	259	92

Wickroggen zur Biogasnutzung

KATHRIN DEIGLMAYR, FRANZ HEIMLER, MAENDY FRITZ

In der aktuellen Diskussion zum Ausbau der Biogasproduktion wird häufig der Rückgang der Artenvielfalt durch den zunehmenden Anbau von Energiemais beklagt. Deswegen wird intensiv nach Alternativen gesucht, die die Fruchtfolgen auflockern und gleichzeitig eine wirtschaftliche Substratproduktion erlauben. In einem Satellitenversuch des deutschlandweiten Verbundvorhabens „EVA II“ (Kurztitel: „Standortangepasste Anbausysteme für Energiepflanzen“) wurde geprüft, ob der Misanbau von Winterroggen (*Secale cereale*) und Zottelwicke (*Vicia villosa*), auch Wickroggen genannt, dafür geeignet ist.

In einem dreijährigen Versuch wurden neben einer Winterroggen-Reinsaat zwei verschiedene Wickroggen-Varianten mit unterschiedlichen Saatstärken der Zottelwicke geprüft. Der Versuchsstandort liegt in der Donauaue bei Straubing auf 325 m über NN und ist charakterisiert durch leichte Böden mit einer geringen Mächtigkeit. Die Aussaat erfolgte jeweils um den 20. September mit einer Saatstärke bei Winterroggen von 250 keimfähigen Körnern/m² in Reinsaat und 200 keimfähigen Körnern/m² in den Misanbauvarianten mit 50 bzw. 100 keimfähigen Körnern Zottelwicke/m². Die Stickstoffdüngung erfolgte im Frühjahr in zwei Gaben, wobei die zweite N-Gabe in den Wickroggen-Varianten um 20 kg/ha reduziert wurde, um den Mischungspartner Wicke und dessen Stickstofffixierung zu fördern.

Die Versuchsergebnisse zeigen, dass die Reinsaat von Winterroggen im Allgemeinen höhere Erträge erzielte als Wickroggen. Dabei hatten die unterschiedlichen Saatstärken der Zottelwicke keinen signifikanten Einfluss auf den Biomassertrag. Der Anteil der Zottelwicke am Gesamtertrag lag zwischen 4 und 11 % und war in erster Linie durch die Jahreswitterung beeinflusst, während die unterschiedliche Saatstärke der Zottelwicke den Wickenanteil nur in einzelnen Jahren beeinflusste. Der zur Ernte hin zunehmende Deckungsgrad der Zottelwicke führte zu einer im Vergleich zur Winterroggen-Reinsaat besseren Unkrautunterdrückung. Gleichzeitig nahmen die Trockensubstanzgehalte des Wickroggens aufgrund der verzögerten Abreife der Zottelwicke langsamer zu. Das bedeutet für die Praxis, dass sich das Erntefenster bei Wickroggen verlängert und mehr Flexibilität bei den Erntearbeiten gegeben ist. Als besonders wertvoll ist Wickroggen jedoch aus agrarökologischer Sicht zu bewerten, da die Blüte der Zottelwicke auch schon bei geringen Saatstärken ein reiches Angebot an Pollen und Nektar liefert und damit viele Insekten anlockt.

Das Verbundvorhaben „EVA II“ wird mit Mitteln des Bundesministeriums für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz (BMELV) über die Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR) gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor.

Arten- und Sortenwahl bei Wintergetreide zur GPS-Nutzung

CHRISTINE RIEDEL, DOROTHEA HOFMANN, EWALD STICKSEL, JOACHIM EDER

Ganzpflanzensilage (GPS) aus Wintergetreide kann zur Auflockerung maisbetonter Fruchtfolgen im Biogaspflanzenanbau beitragen. Vorteilhaft beim Anbau von Wintergetreide ist vor allem die winterliche Bodenbedeckung. Diese bewirkt eine verminderte Erosionsanfälligkeit und schnelle Nährstoffaufnahme im Frühjahr, was wiederum die sinnvolle Gärrestverwertung erleichtert, langfristig die Bodenfruchtbarkeit sichert und somit das Ertragspotenzial stabilisiert. Getreide-GPS liegt im Trockenmasseertrag deutlich unter Mais, die spezifische Methanausbeute ist hingegen vergleichbar.

Um Aussagen zum Ertragspotenzial der Getreidearten und gegebenenfalls zu Sortenunterschieden treffen zu können, wurden jeweils im Herbst 2008 bis 2010 an zwei Standorten in Oberbayern mit unterschiedlichen Bodenverhältnissen Feldversuche angelegt. Mittlerweile liegen zweijährige Ergebnisse der Trockenmasseerträge (TM), Trockenstoffgehalte (TS), Kornerträge und weiterer agronomischer Kennzahlen vor. Von den Arten Gerste (mehrzeilig/zweizeilig), Roggen, Weizen und Triticale wurden jeweils sechs Sorten zum Stadium der mittleren Milchreife bis zur beginnenden Teigreife aus dem Stand gehäckselt und zur Totreife gedroschen.

Zwischen den Getreidearten ergab sich im Trockenmasseertrag eine Abstufung, die mit späterer Erntereife (längerer Vegetationsdauer) anstieg (Tab. 1). Standort- und Jahreseffekte führten zu Unterschieden in den Einzelversuchen, wobei Triticale durchweg eine obere Position einnahm; danach folgten Roggen und die mehrzeiligen Gersten. Die zweizeiligen Gerstensorten und der Weizen wiesen in diesem Versuch das niedrigste Ertragsniveau auf. Dem hohen TM-Ertrag von Triticale steht die lange Standzeit entgegen, weshalb nicht immer der Anbau einer Zweitfrucht nach Triticale möglich ist wie bei der frühräumenden ertragsschwächeren Gerste.

Tab. 1: Mittlere Trockenmasseerträge (TM), Minimum- und Maximumwerte der Erträge (Min., Max.) sowie Korrelation zwischen Kornertrag und GPS-Ertrag (R^2)

Getreideart	TM [dt/ha]	Min.–Max.	R^2
Gerste, mehrzeilig	123,6	115–132	0,61
Gerste, zweizeilig	113,9	112–115	0,29
Roggen	138,8	127–145	0,37
Weizen	116,0	109–121	0,88
Triticale	146,0	128–163	0,38

Bei allen Arten, ausgenommen die Gruppe der zweizeiligen Gersten, gab es Sortenunterschiede im TM-Ertrag von mindestens 12 dt/ha. Am größten waren die Unterschiede zwischen den Sorten mit 35 dt/ha bei Triticale. Im Kornertrag und der Pflanzenlänge variierten die Triticale-Sorten ebenfalls am stärksten. Zudem war Triticale die einzige Art, bei der ein eindeutig positiver Zusammenhang zwischen Pflanzenlänge und TM-Ertrag bestand ($R^2 = 0,95$). Beim Merkmal Kornertrag zeigte sich bei den Weizensorten eine gute und bei den mehrzeiligen Gersten eine mäßige positive Korrelation zum TM-Ertrag (Tab. 1). Ein eindeutiger Zusammenhang über alle Arten konnte aber nicht festgestellt werden.

Energiepflanzen für warm-trockene, leichte D-Standorte

JANA GRUNEWALD, KERSTIN JÄKEL, ANNETTE SCHAERFF

1 Einleitung

Im Rahmen des Verbundprojektes „EVA“ wurden am Versuchsstandort Trossin (Sachsen, 120 m über NN, 8,7 °C, NS = 596 mm, Su3, AZ = 31) im Zeitraum 2005 bis 2009 verschiedene Energiepflanzen in acht Anbausystemen auf Ertragsniveau (Tab. 1), Gasleistung (Abb. 1) und Wirtschaftlichkeit (Tab. 2) untersucht. Das Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz durch die Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. Gülzow gefördert.

2 Biomasseleistung

Tab. 1: Ertragsdaten verschiedener Fruchtarten unter Berücksichtigung einer mindestens 4-jährigen Prüfung

Fruchtart	Anzahl (Prüfglieder/ Jahre)	Trockenmasseertrag		Trockensubstanzgehalt	
		dt/ha		%	
		Mittelwert	Spanne	Mittelwert	Spanne
Mais	18/5	152	90–240	31	24–38
Zuckerhirse	13/5	146	90–200	27	21–30
Hybrid-Sudangras	18/5	122	80–180	28	22–36
Wintergetreideganzpflanzen	9/4	72	55–100	39	33–45
Sommergetreideganzpflanzen	9/4	58	40–75	41	32–53
Luzerne-Kleegras-Mischung	5/4	93	61–129	21	19–24

Anmerkung: In der Praxis erzielbare Erträge liegen in etwa 20 % unter diesen Werten.

In Hauptfruchtstellung erzielte Mais Erträge zwischen 90 und 240 dt TM/ha. Das Ertragsniveau der Sorghumhirsen lag zwischen 80 und 200 dt TM/ha. Im Zweikultursystem erreichten Mais und das Hybrid-Sudangras in Kombination mit Grünschnittroggen als Vorfrucht Mehrerträge von durchschnittlich 15 % gegenüber dem Hauptfruchtanbau. Die als Zweitfrucht angebauten Zuckerhirsen konnten weniger überzeugen. Bei den Getreideganzpflanzen waren die Winterformen (Ø 70 dt TM/ha) um ca. 30 % ertragsstärker

als die Sommerarten. Mit Leguminosen-Gemengen konnten bei einer 4-schnittigen Nutzung pro Jahr Erträge bis zu 130 dt TM/ha im Mittel realisiert werden (ca. 85 % Relativvertrag zu Mais).

3 Gasausbeute

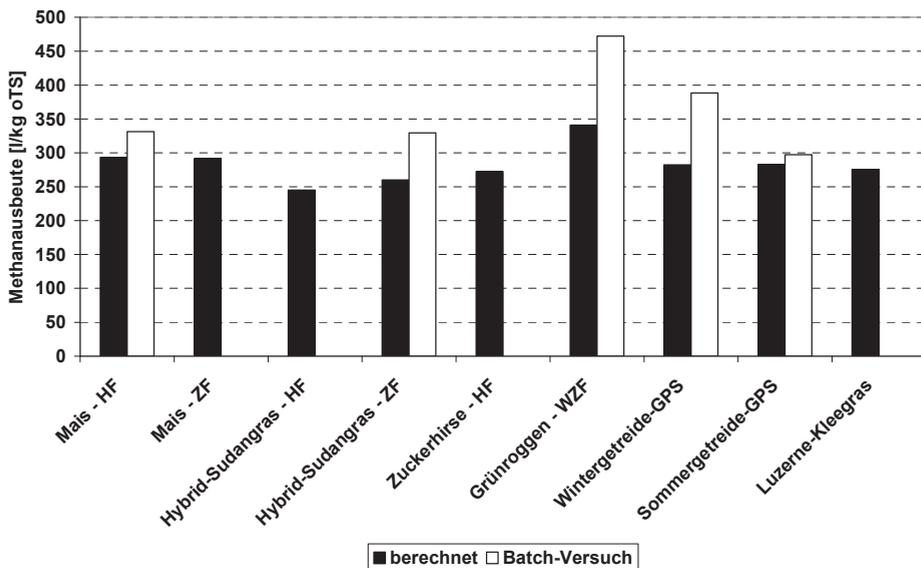


Abb. 1: Methanausbeuten in l/kg oTS verschiedener Energiepflanzen vom Standort Trossin (schwarz: berechnet mit der Formel nach BASERGA (SCHATTAUER und WEILAND 2006); weiß: vom ATB Potsdam-Bornim in Batch-Versuchen mit siliertem Erntegut ermittelt)
HF = Hauptfruchtnutzung, ZF = Zweitfruchtnutzung, WZF = Winterzwischenfrucht

Die spezifische Methangasausbeute in l/kg oTS einer Fruchtart ist in großem Maße von der biochemischen Zusammensetzung der Trockenmasse abhängig. Die Gasausbeute wird im Wesentlichen von den drei leicht verdaulichen Stoffgruppen Rohfett, Nicht-faserkohlenhydrate und Rohprotein bestimmt. Je höher der Gehalt an schwer abbaubarer Rohfaser im Erntegut ist, um so schlechter können Mikroorganismen die Biomasse im Fermenter umsetzen. Unter Verwendung der laboranalytisch ermittelten Gehalte dieser Inhaltsstoffklassen und der Verdaulichkeiten aus der DLG-Futterwerttabelle (UNIVERSITÄT HOHENHEIM 1997) wurde die Methangasausbeute verschiedener Fruchtarten nach BASERGA (SCHATTAUER und WEILAND 2006) berechnet. Die höchsten Methanausbeuten erreichte mit 340 l/kg oTS die Winterzwischenfrucht Grünschnittroggen aufgrund überdurchschnittlicher Rohprotein- und Zuckergehalte. Ein ebenfalls hohes Leistungsniveau

erzielte Mais mit 290 l/kg oTS, gefolgt von den Getreideganzpflanzensilagen mit durchschnittlich 280 l/kg oTS. Bei mittleren Rohprotein- und Rohfettwerten ist beim Mais insbesondere der Anteil leicht verdaulicher Kohlenhydrate, vor allem in Form von Stärke, von Bedeutung. Das Hybrid-Sudangras wies aufgrund hoher Gehalte an Rohfaser (> 30 % in der Trockenmasse) und unverdaulichem Lignin (> 5 % in der Trockenmasse) mit Werten zwischen 240 und 260 l/kg oTS das geringste Methanbildungspotenzial auf. Die vom ATB Potsdam-Bornim in Batch-Tests (siliertes Erntegut) ermittelten Ausbeuten lagen bei allen Fruchtarten um 5–40 % höher im Vergleich zu den berechneten Daten.

4 Ökonomische Wertung

Tab 2.: Ökonomische Bewertung des Energiepflanzenanbaus bei Gegenüberstellung von Ertrag und Kosten je Kubikmeter Methan (Ergebnis (rechnerisch) = Differenz aus Leistung über Strom-Wärmeerzeugung und Gesamtkosten für Anbau und Biogasanlage)

Kriterium	Einheit	Mais	Sorghumhybrid	Zuckerhirse	Getreide-GPS	Luzerne-Klee gras
Frischmasseertrag	dt/ha	628	459	372	143	430
Trockenmassegehalt	%	24	22	20	41	21
Trockenmasse, netto	dt/ha	136	91	66	52	82
Methan	m ³ /dt	32	28	31	31	29
Saat/Dünger/PSM	ct/m ³	11	15	13	16	16
Arbeit	ct/m ³	11	16	16	16	24
Lager	ct/m ³	10	13	13	6	13
Anbau gesamt	ct/m ³	39	57	58	59	70
Ergebnis	€/ha	312	-115	-61	13	-395
Gesamtwertung						

□ positiv □ mäßig □ noch Chancen □ negativ

Am Standort Trossin konnten mit Mais und Getreide-GPS bei Hauptfruchtanbau unter ökonomischer Betrachtungsweise positive Ergebnisse aufgrund guter Erträge und überschaubarer Kosten erzielt werden. Die Anbauwürdigkeit der Sorghumhirsens hängt stark von den jahresabhängigen Leistungen ab. Sorghumhirsens entfalten ihr volles Ertragsniveau bevorzugt auf wärmeren Standorten und in Jahren mit überdurchschnittlichen Temperaturen bei ausreichend Wasserangebot. Sie können aufgrund eines ausgedehnten Faserwurzel systems aber auch längere Phasen der Trockenheit ohne größere Ertragseinbußen überstehen. Trotz guter Trockenmasseerträge konnte das Leguminosengemenge Luzerne-Klee gras infolge hoher Erntekosten durch mehrschnittige Nutzung nicht erzeugen.

Literatur

Schattauer, A.; Weiland, P. (2006): Grundlagen der anaeroben Fermentation. In Handreichung Biogasgewinnung und -nutzung, Hg. FNR, S. 25-35

Universität Hohenheim (1997): DLG-Futterwerttabellen Wiederkäuer. 7. Auflage, DLG-Verlag

Fruchtfolgen mit Energiepflanzen zur Biogaserzeugung auf ostdeutschen Diluvialstandorten

GUNTER EBEL, GERT BARTHELMES

Das vom BMELV geförderte Fruchtfolgeprojekt „Entwicklung und Vergleich von optimierten Anbausystemen für die landwirtschaftliche Produktion von Energiepflanzen unter den verschiedenen Standortbedingungen Deutschlands“¹ (EVA) wurde am Standort Güterfelde fortgeführt. Im Folgenden werden ausgewählte Ergebnisse des Jahres 2010 dargestellt. Weitere Informationen sind der Internetseite <http://www.eva-verbund.de> zu entnehmen.

2010 lagen Mais und Sudangras (*Sorghum bicolor* x *sudanense*) mit 116 dt TM/ha auf gleichem Ertragsniveau (Tab. 1). Somit wurde das Ertragsmittel der Jahre nicht erreicht. Als Gründe sind die zögerliche Jugendentwicklung durch den kühlen, feuchten Mai und Wachstumsdepressionen in der anschließenden trocken-heißen Periode im Juni und Juli zu benennen. Wintergetreide wies 2010 mit 85 bis 93 dt TM/ha überdurchschnittliche Jahreserträge auf (Tab. 1).

Tab. 1: Ganzpflanzenerträge (dt TM/ha) der EVA Fruchtfolgeversuche, Güterfelde, 2010 im Vergleich mit bisherigem Gesamtzeitraum 2010 in dem 2005–2010

Ganzpflanzenertrag Hauptfrüchte	TM-Ertrag (2010)		Erntejahr	TM-Ertrag		Spanne dt/ha
	dt/ha	relativ %		dt/ha	relativ %	
Mais	116	100	2005/06/07/09/10	144	100	85–192
Sorghum (b. x s.)	116	100	2005/06/07/09/10	128	89	99–153
Wintertriticale	93	80	2006/07/08/10	76	53	64–93
Wintergerste	89	77	2009/10	79	55	68–89
Winterroggen	85	74	2007/08/09/10	84	59	68–108
Sonnenblumen	81	69	2005/06/09/10	83	57	55–123
Luzernegras	70	60	2007/08/10	94	65	70–114
Hafer	61	52	2005/06/09/10	63	44	40–89
Sommergerste	56	49	2009/10	58	41	56–60
Kleegras			2006/2007	64	44	46–82
Topinamburkraut			2005/06/07	80	56	50–104

¹ Projektträger: Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FKZ: 22002305 / 22013008).

Der im EVA-Versuch ermittelte Höchstertrag von Winterroggen mit 108 dt TM/ha (2008) wurde allerdings nicht erreicht. Durch den langen Winter und die zögernde Frühjahrsentwicklung (2010) erfolgte allgemein eine 2 bis 3 Wochen spätere Ganzpflanzenernte. Das bewirkte ebenfalls Mindererträge beim verspäteten ersten Luzernegrasschnitt. Durch den trockenen Frühsommer wurden 2010 nur zwei Schnitte realisiert mit deutlich unterdurchschnittlichen Gesamterträgen im Vergleich der Jahre. Aufgrund der beschriebenen Witterung konnte die 2010 für die Biomassenutzung gezüchtete Sonnenblumensorte 2010 mit 81 dt TM/ha den Vorjahresertrag (123 dt TM/ha) nicht erreichen. Auch das Sommergetreide erzielte mit ca. 60 dt TM/ha (= Mittel der Jahre) nicht das Niveau des Vorjahres.

2010 erzielte die Zweikulturnutzung in den Kombinationen Grünschnittroggen/Mais 128 dt TM/ha, Grünschnittroggen/Sorghum (b. x s.) 147 dt TM/ha und Wintergerste/Sorghum (b. x s.) 131 dt TM/ha ein höheres Ertragsniveau als der Hauptfruchtanbau (Tab. 1). Während für 2009 eine ähnliche Tendenz auftrat, konnten im Trockenjahr 2006 und auch im niederschlagsreichen Jahr 2007 keine Ertragsvorteile im Zweitfruchtanbau (Erst- plus Zweitfrucht) gegenüber dem Hauptfruchtanbau erzielt werden.

Empfehlungen aus den mehrjährigen Untersuchungen

Fruchtfolgen mit Mais, Sorghum und Getreide für die Ganzpflanzennutzung (besonders Winterroggen) sind in Kombination mit dem Marktfruchtanbau unter den Bedingungen ostdeutscher Diluvialstandorte empfehlenswert. Aus Sicht der Humusreproduktion sind die Fruchtfolgen mit Pflanzen für die Gärsubstratbereitstellung zu kombinieren mit mehrjährigen Leguminosen-Grasgemengen sowie dem Marktfruchtanbau, bei dem das Stroh für die Humusreproduktion im System verbleibt. Die Gärreste sind entsprechend auf den Flächen auszubringen.

Die Zweikulturnutzung sollte aus Sicht der Ertragsleistung und Ökonomie den Standorten mit besserer Bodenbonität ($AZ > 40$) und sichererer Wasserverfügbarkeit vorbehalten bleiben. Auch bei einem Mehrertrag besteht das Risiko, die höheren variablen Kosten dieses Anbausystems auszugleichen. Der Erfolg hängt dabei stark von der Wasserversorgung der Zweitfrucht ab. Unter den gegebenen Standortbedingungen kann es bei Trockenheit schwierig sein, erntewürdige Bestände zu erzielen oder bei feuchter Spätsommerwitterung die erforderlichen TM-Gehalte überhaupt oder rechtzeitig zu erreichen.

Bioenergetische Nutzungskonzepte für kontaminierte landwirtschaftliche Standorte

BENEDIKT SAUER, HANS RUPPERT

Potenziell kontaminierte Flächen nehmen etwa 8 % der Landesfläche Deutschlands ein, wobei 5 % unter Acker- und Grünlandnutzung stehen (KNAPPE et al. 2008). Betroffen sind vor allem die Auenbereiche der Flüsse, Rieselfelder und Gebiete mit starken Emissionen im Umkreis von Industrieansiedlungen. Zumindest die stärker belasteten Flächen sollten aus der Nahrungs- und Futtermittelproduktion herausgenommen und einer sinnvollen energetischen Nutzung zugeführt werden. Entgegengesetzt zum Wissenschaftszweig der Phytoremediation soll in diesem Forschungsprojekt nicht nach hyperakkumulierenden Pflanzen gesucht werden, sondern nach ertragreichen Energiepflanzen mit einem möglichst geringen Aufnahmevermögen an Schadelementen. Die Schadelemente verbleiben somit im Boden. Während der Biogasbildung in Fermentern konzentrieren sich in der Trockenmasse die Elemente, die im Gärrest verbleiben, etwa um einen Faktor 3. Würde man also schadelementbelastete NawaRos in eine Biogasanlage füttern, so dürfte man den Gärrest nach Düngemittelverordnung nicht mehr ausbringen.

In diesem Forschungsprojekt werden zehn unterschiedlich stark belastete Böden aus Niedersachsen im Hinblick auf ihre Schadelementaufnahme getestet. Dies geschieht in einem Freilandtopfversuch mit 130 Töpfen an der Universität Göttingen sowie einem Freilandversuchsfeld. Das geerntete oberirdische Pflanzenmaterial wird mittels Säuretotalaufschluss aufgeschlossen, und an einem ICP-MS und ICP-OES (ICP – inductively coupled plasma, MS – mass spectrometry, OES – optical emission spectrometry) werden Multielementanalysen im Haupt-, Spuren- und Ultraspurenbereich durchgeführt.

In Tabelle 1 sind die Pflanzengehalte der kritischen Schadelemente Cadmium, Molybdän, Kupfer und Zink für den mittel belasteten Standort Ohrum dargestellt. Ohrum steht stellvertretend für etwa 3 000 ha kontaminierten Auenbereich der Oker im Landkreis Wolfenbüttel. Das Konzept, dass unterschiedliche Pflanzen unterschiedlich stark Schadelemente aufnehmen und somit Energiepflanzen gefunden werden können, die unterhalb von zulässigen Grenzwerten liegen, geht voll auf.

Für Futtermittel gilt z.B. ein zulässiger Cadmiumgehalt von 1,1 mg/kg Trockensubstanz (105 °C). Zwischen den Cadmiumgehalten der Durchwachsenen Silphie (niedrigster Wert) und Amaranth spec. (höchster Wert) liegt bei diesem Standort der Faktor 91. Unter den bereits getesteten Sommerungen zeigt die Maissorte Padrino und unter den Winterungen die Roggensorte *Vitallo* die geringsten Schadelement-Transferfaktoren. Diese,

sowie die Silphie wären daher aus heutiger Sicht am ehesten für den Anbau auf ähnlich kontaminierten landwirtschaftlichen Flächen zu empfehlen.

Tab. 1: Elementgehalte aus dem Freilandtopfversuch mit Boden vom Standort Ohrum

		Cadmium	Molybdän	Kupfer	Zink
		mg/kg TS (105 °C)			
Boden	Boden (pH = 6,9)	12,8	1,5	350	2 760
	Geogener Wert	0,1	1,1	28	67
	Grenzwert Boden Klärschlammverordnung	1,5	-	60	200
Pflanzen	Durchwachsene Silphie	0,1	0,4	10,1	33
	Roggen Vitallo	0,2	3,3	4,7	102
	Mais Padrino	0,5	1,1	4,0	122
	Weizen Mulan	0,9	4,2	4,5	92
	Grenzwert Futtermittelverordnung	1,1	-	-	-
	Sonnenblume Salut	3,5	0,7	14,0	211
	Amaranth spec.	9,1	1,6	10,6	208

Das beschriebene Forschungsprojekt wird vom Ministerium für Wissenschaft und Kultur Hannover innerhalb des Forschungsverbundes „Nachhaltige Nutzung von Energie aus Biomasse im Spannungsfeld von Landschaft, Klimaschutz und Gesellschaft“ gefördert. Es startete 2009 und läuft bis 2012. Voraussichtlich wird es bis Anfang 2014 verlängert. In der zweiten Phase wird der Forschungsschwerpunkt vor allem auf dem unterschiedlichen Aufnahmevermögen auf der Sortenebene und der Ausdehnung der Versuche auf schnell wachsende Hölzer liegen. Ebenfalls wird untersucht, ob die Mobilität von Schadelementen durch Gärrestdüngung positiv oder negativ beeinflusst werden kann. Ein beispielhaftes Umsetzungsprojekt mit Bioenergie von kontaminierten landwirtschaftlichen Standorten soll 2012 angestoßen und auf dem Weg zur Realisierung begleitet werden.

Literatur

- Sauer, B. (2009): Elementgehalte und Stoffströme bei der Strom- und Wärmegewinnung im Bioenergieort Jühnde. Schriftenreihe Fortschritt neu denken, Heft 2, Göttingen
- Knappe, F.; Möhler, S.; Ostermayer, K.; Lazar, S.; Kaufmann, C. (2008): Vergleichende Auswertung von Stoffeinträgen in Böden über verschiedene Eintragspfade. Texte 36/08, Umweltbundesamt, Dessau

Konflikt und Konkurrenz zwischen der Produktion nachwachsender Rohstoffe für die Biogaserzeugung und den Produktionssystemen der Nutztierhaltung in der intensiven Veredelungsregion Weser-Ems

FELIX GARLIPP, CLAUD WÖSTE, PETER STYPEREK, HERMAN VAN DEN WEGHE

Bedingt durch die Förderung des Energiepflanzenanbaus durch das EEG hat die deutsche Landwirtschaft eine ganz neue Ausrichtung bekommen. Experten gehen davon aus, dass der ohnehin starke Anbau von Energiepflanzen insbesondere durch die jüngste Novellierung des EEG (2009) weiter forciert wird. Auffällig ist dabei, dass in der von Intensivtierhaltung geprägten Weser-Ems-Region besonders viele Biogasanlagen errichtet worden sind, obwohl sich die Pachtpreise für den Anbau von nachwachsenden Rohstoffen und die Kosten für die landwirtschaftliche Verwertung der Gärreste aus Biogasanlagen in dieser Region auf hohem Niveau bewegen. Demzufolge liegt die Vermutung nahe, dass sich die bestehende Flächenknappheit in dieser Region zukünftig weiter verschärfen wird.

Zielsetzung der vorliegenden Arbeit war es, über eine Befragung der Biogasproduzenten des exemplarisch ausgewählten Gebietes (Intensivtierhaltung, Landkreis Vechta) die Frage zu klären, inwieweit der Anbau nachwachsender Rohstoffe für die Biogaserzeugung in Konkurrenz zu den dort vorherrschenden Produktionssystemen der Nutztierhaltung tritt. Ein Schwerpunkt der Analyse sollte neben der Konkurrenzsituation bezüglich Ackerflächen, die Gegenüberstellung des wirtschaftlichen Erfolgs der Biogaserzeuger sowie ausgewählter Betriebszweige der Nutztierhaltung (Schweinemast, Milchvieh, Hähnchenmast) sein.

Die Ergebnisse zeigen, dass im Landkreis Vechta mit den ohnehin stark vertretenen landwirtschaftlichen Veredelungsbetrieben, dem Ausbau der Biogaserzeugung, den Kartoffelanbauern sowie mit dem vermehrten Anbau von Sonderkulturen wie Gemüse und Erdbeeren eine extrem große Gruppe landwirtschaftlicher Flächennutzer aufeinandertrifft. Folge dessen ist, dass gegenwärtig regionale Pachtpreise von bis zu 1.500 €/ha gezahlt werden müssen. Dabei zeigen die Befragungen der Biogaserzeuger, dass künftig mit weiteren Preissteigerungen zu rechnen ist. Die unterschiedlichen Betriebsergebnisse der Biogaserzeuger weisen darauf hin, dass der betriebswirtschaftliche Erfolg von ganz bestimmten Einflussgrößen abhängig ist. Zum einen sind die Substratkosten, speziell die Kosten des Hauptsubstrates Silomais, aufgrund der enormen Einsatzmengen von entscheidender Bedeutung. Da die reinen Anbaukosten für den Silomais bei den Anlagen relativ einheitlich sind, kommt dem Pachtpreis hinsichtlich der Substratkosten eine entscheidende Bedeutung zu. Zum anderen wird deutlich, dass die Biogaserzeuger, die über ein ausgereiftes Wärmenutzungskonzept verfügen und darüber hinaus eine hohe Laufzeit

des BHKW vorweisen können, deutlich unempfindlicher auf Preissteigerungen an den Agrarrohstoffmärkten reagieren. Ferner zeigt die Wirtschaftlichkeitsanalyse der Betriebe mit Gärrestaufbereitungsanlagen, dass die Gärresttrocknung eine sinnvolle Alternative zur Abwärmenutzung sein kann. Dabei wird deutlich, dass über die Vergütungen des KWK-Bonus im Zuge der Gärresttrocknung und die Erlöse aus dem Verkauf aufbereiteter Gärreste höhere Gewinne erwirtschaftet werden können. Die Wirtschaftlichkeitsberechnungen der Produktionssysteme der Tierhaltung offenbaren demgegenüber, dass die Verfügbarkeit landwirtschaftlicher Nachweisflächen aufgrund des steuerrechtlichen Vorteils der landwirtschaftlichen gegenüber der gewerblichen Tierhaltung von außerordentlicher Bedeutung für den wirtschaftlichen Erfolg ist. Dennoch zeigt die Gegenüberstellung der Betriebsergebnisse der Biogaserzeuger sowie der ausgewählten Formen der Nutztierhaltung, dass die Biogaserzeugung bei gutem Management ein deutlich höheres Wertschöpfungspotenzial als die Tierhaltung bietet.

Fruchtfolgen mit Energiepflanzen – Ökonomische Untersuchungen auf Schlagenebene

HAGEN HARTMANN, HORST-HENNING STEINMANN

Der Trend zu vereinfachten Fruchtfolgen kann durch den zunehmenden Anbau von Energiepflanzen verschärft werden. Als Grund wird die relative wirtschaftliche Vorzüglichkeit dieser Kulturarten gegenüber den meisten anderen Ackerbaufrüchten genannt. Als nachteilig muss diesbezüglich der erhöhte Schaderregerdruck gesehen werden.

Im Rahmen eines Forschungsprojektes zu Fruchtfolgen mit Energiepflanzen wurde ein Feldversuch aus den Jahren 2007/08 bis 2009/10 ökonomisch bewertet. An den Versuchsstandorten Rostock und Göttingen wird ein Fruchtfolgeversuch mit identischen Versuchsgliedern durchgeführt. Vier Fruchtfolgen sind etabliert worden, in denen die drei „großen“ Kulturarten Winterweizen, Raps und Mais (teilweise mit der Vorfrucht Grünroggen) kombiniert wurden. Vier unterschiedliche Pflanzenschutzstrategien wurden in den Fruchtfolgen angewendet. Dieser Versuch soll in den Folgejahren Aussagen über den phytomedizinischen Wert von Fruchtfolgen liefern.

Für die Kulturarten Mais und Grünroggen konnten signifikante Ertragsunterschiede zwischen den beiden Versuchsstandorten Rostock und Göttingen festgestellt werden. Bei den Kulturarten Raps und Weizen waren die Ertragsunterschiede zwischen Rostock und Göttingen geringer. Nach den ersten Versuchsjahren wurde festgestellt, dass die Kulturarten Weizen und Raps auf einen Fungizidverzicht an beiden Standorten mit einer signifikanten Ertragsabnahme reagieren. Die Einsaat von Unkräutern beeinflusste in den ersten Versuchsjahren in keiner der Kulturarten signifikant den Ertrag. Grünroggen, der als Vorfrucht vor Mais angebaut wurde, reagierte deutlich auf den Standort. So unterschieden sich die Trockenmasseerträge um den Faktor vier bis fünf. Darüber hinaus hatte der darauf folgende Mais als Zweitfrucht deutlich geringere Erträge erzielt, als die Monokultur Mais. Im Rahmen der ökonomischen Untersuchungen wurden für den Feldversuch Deckungsbeiträge für die Kulturen und Fruchtfolgen erstellt und verglichen. Beim Vergleich der Deckungsbeiträge der Fruchtfolgen an beiden Standorten konnte aufgrund der Ertragssituation für Grünroggen und Mais einen Vorteil der Fruchtfolgen mit diesen Kulturarten in Göttingen ausgemacht werden, während die Fruchtfolge mit Raps und Weizen an beiden Standorten monetär auf gleichem Niveau abschnitt. Die Ertragsinbußen der Raps- und Weizenversuchsglieder ohne Fungizideinsatz konnten bei der

ökonomischen Betrachtung durch die eingesparten Kosten für die Produktionsfaktoren teilweise abgedeckt werden.

Ziel soll sein, mithilfe der Versuchsergebnisse den phytomedizinischen Wert von Energiepflanzen für Fruchtfolgen zu bemessen und darauf aufbauend mögliche Umsetzungsstrategien für die Praxis zu erarbeiten.

Optimierung der Anbautechnik Ganzpflanzengetreide für die Biogaserzeugung

GUNTER EBEL, GERT BARTHELMES

1 Einleitung

Von September 2008 bis 2011 werden innerhalb des vom Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz über den Projektträger Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. geförderten Mehrländerprojekts „Optimierung des Anbauverfahrens Ganzpflanzengetreide, inklusive Arten- und Sortenmischungen für die Biogaserzeugung“ (FKZ: 22012908) drei Teilversuche am Standort Güterfelde durchgeführt. Damit sind weiterführende Untersuchungen nach den ersten Erfahrungen aus den Fruchtfolgeversuchen des Projektes EVA sowie den ergänzenden Anbauversuchen zur Ganzpflanzengetreideproduktion 2007 und 2008 möglich (EBEL et al. 2009).

Ziel ist es, für die Getreideganzpflanzenutzung den Einfluss verschiedener Arten und Sorten sowie den standortangepassten Herbizid- und Fungizideinsatz im Hinblick auf Trockenmasse- (TM) und Methanertrag auf einem sandigen und zur Vorsommertrockenheit neigenden Standort Nordost-Deutschlands (Güterfelde) zu ermitteln und daraus Anbauempfehlungen für Standorte mit entsprechenden Bedingungen abzuleiten. Im Folgenden werden die Ergebnisse der ersten beiden Versuchsjahre zusammengefasst.

2 Ergebnisse

Zwischen den Arten traten auch 2010 signifikante Ertragsunterschiede auf, allerdings mit veränderten Relationen zum Vorjahr und je nach Standortgüte auch zwischen den Teilversuchen. Die Artenmischung Winterroggen/Wintertriticale wies unter Trockenstress das höchste Ertragsniveau (geringster Ertragsrückgang) auf. Der Einfluss der geprüften Sorten auf den Ertrag war teilweise vorhanden. Die Wintertriticalesorte Massimo zeigte deutliche Ertragsvorteile gegenüber Trigold (2009 ca. 9 dt TM/ha; 2010 > 20 dt TM/ha). Die Wintergerstensorte Alinghi wies einen Mehrertrag von ca. 12 dt TM/ha (2010) und ca. 5 dt TM/ha (2009) gegenüber der Sorte Marilyn auf. Bei den Sortenmischungen waren bisher keine Ertragssteigerungen zu verzeichnen. Mehrjährig zeigte sich deutlich der Einfluss der Jahreswitterung auf den Ertrag und den TM-Gehalt. 2009 und 2010 konnte zum Zeitpunkt der Milchreife des Getreides der für die Silierung optimale TM-Gehalt von 30 bis 38 % eingehalten werden. Dies wurde ähnlich wie 2007 durch die häufigen

Niederschläge im Mai begünstigt. Zur Ganzpflanzengetreideernte 2009 war im Gegensatz zu 2006 und 2008 (Vorsommertrockenheit) kaum Trockenstress in den Beständen zu verzeichnen.

Ein Einfluss der Fungizidbehandlung (Vergleich unbehandelte Kontrolle mit den Varianten: 0,5 l/ha bzw. 1,0 l/ha Fandango) bzw. der Herbizidbehandlung (Vergleich unbehandelte Kontrolle mit den Varianten: 0,2 kg/ha bzw. 0,4 kg/ha Herold) auf den TM-Ertrag war in beiden Jahren nicht gesichert vorhanden.

Im Mittel aller Ergebnisse des Getreideganzpflanzenprojektes werden für 2010 insgesamt höhere Erträge als 2009 ausgewiesen (Tab. 1), vornehmlich bedingt durch die deutlich höheren Erträge bei Wintergerste und Winterroggen. Ein ähnliches Ertragsniveau erreichten Wintertriticale und die Artenmischung in beiden Jahren. Im Mittel der beiden Jahre ergibt sich folgende Ertragsrelation: Artenmischung > Wintertriticale > Winterroggen > Wintergerste.

Tab. 1: Zusammenfassung der Trockenmasseerträge (dt TM/ha); Mittel der Teilversuche des Getreideganzpflanzenprojektes 2009 und 2010 am Standort Güterfelde

	2009	2010	Mittel
Wintergerste	75,5	90,9	83,2
Wintertriticale	103,2	99,5	101,3
Winterroggen	87,9	97,8	92,9
Winterroggen/-triticale	103,0	105,9	104,4
Mittel	92,4	98,5	95,5

Werden allerdings die Erfahrungen der seit 2005 laufenden Getreideganzpflanzenversuche in Güterfelde herangezogen, ergaben insbesondere Jahre mit unzureichender Wasserversorgung während des Längenwachstums Ertragsvorteile bei Winterroggen gegenüber Wintertriticale. Aus allen in Güterfelde seit 2005 durchgeführten Versuchen wurden für die Getreidearten folgende durchschnittliche Ganzpflanzen-TM-Erträge ermittelt:

- Wintergerste: 82 dt TM/ha (Spanne: 62–120; 2009–2010)
- Winterroggen: 90 dt TM/ha (Spanne: 68–110; 2007–2010)
- Wintertriticale: 82 dt TM/ha (Spanne: 52–118; 2006–2010)
- Sommergetreide: 60 dt TM/ha (Spanne: 37–89; 2005/06; 09/10)

3 Empfehlungen für die Praxis

Das Ertragsniveau von Ganzpflanzengetreide liegt unter Praxisbedingungen auf sandigen Diluvialstandorten Ostdeutschlands zwischen 50–80 dt TM/ha. Bei anhaltender Trockenheit kann der TM-Gehalt in kürzester Zeit (3–5 Tage) den Optimalbereich (30–38 %) gravierend überschreiten, d. h. das Anbau-/Erntemanagement ist noch im höheren Maße als beim Mais entscheidend. Wintergetreide, insbesondere Winterroggen, ist aufgrund der Ertragshöhe und -stabilität dem Sommergetreide vorzuziehen. Bei ausreichendem Wasserangebot im Längenwachstum kann Wintertriticale ein höheres Ertragsniveau als Winterroggen erreichen. Fehlt Wasser in dieser Periode, weist hingegen Winterroggen deutliche Ertragsvorteile an diluvialen Standorten auf. Durch die frühere Ernte des Ganzpflanzengetreides können abweichende Bewirtschaftungsstrategien gegenüber dem Körnergetreideanbau zur Kostenersparnis beitragen. Je nach Standort und aktueller Witterungssituation kann auf Fungizidmaßnahmen und Wachstumsreglereinsatz verzichtet oder verminderte Aufwandmengen eingesetzt werden. Eine Herbizidbehandlung im Herbst ist dagegen in jedem Falle empfehlenswert.

Literatur

Ebel, G.; Barthelmes, G; Adam, L. (2009): Energie aus Getreide – Ganzpflanzenutzung zur Biogaserzeugung. Neue Landwirtschaft 7, S. 50–51

Fruchtfolgen aus Energiepflanzen – ein Beitrag zur Reduktion von Pflanzenschutzmitteleinsätzen und phytomedizinischen Risiken

BÄRBEL GEROWITT, HAGEN HARTMANN, HORST-HENNING STEINMANN, BECKE STREHLOW, CHRISTINE STRUCK, ANDREAS VON TIEDEMANN, MARK WINTER

In den letzten Jahren hat der Anbau von Energiepflanzen zugenommen. In Deutschland wurden 2008 auf etwa 2 Mio. Hektar nachwachsende Rohstoffe angebaut. Vorwiegend sind dies Mais, Raps und Wintergetreide zur Biogas-, Biodiesel- oder Bioethanol-Herstellung. Je nach Verwertungsrichtung vollziehen die Betriebe eine betriebliche und regionale Spezialisierung und die „großen“ Energiepflanzenkulturen werden in kurzen, phytomedizinisch problematischen Fruchtfolgen mit entsprechend hohem Pflanzenschutzmitteleinsatz angebaut. Aus phytomedizinischer Sicht sind bei der Fruchtfolgegestaltung Schadorganismen besonders problematisch, die sich über die Zeit im Boden anreichern. Das Vorhaben ist in drei Teilprojekte unterteilt, die folgende Aspekte bearbeiten:

1. Herbologische Aspekte (Höhe und Artenzusammensetzung; Problemunkräuter)
2. Phytopathologische Aspekte (fruchtfolgebedingte/bodenbürtige Schaderreger)
3. Betriebswirtschaftliche Analyse und Umsetzungskonzepte

Das Projekt soll einen Beitrag leisten, durch Fruchtfolgegestaltung standortgebundene Schaderreger zu vermeiden, den chemischen Pflanzenschutz zu reduzieren und die Agrarbiodiversität zu verbessern. Wissenschaftliches Ziel des Vorhabens ist es, Fruchtfolgewirkungen quantitativ über die gesamte Prozesskette der energetischen Verwertung pflanzlicher Biomasse zu erfassen. Deswegen erfolgen Untersuchungen zur Persistenz von Schaderregern im Gärprozess. Ein weiteres wissenschaftliches Arbeitsziel ist, den Einfluss von betrieblichen Strukturdaten auf Anpassungs- und Innovationsprozesse quantitativ zu erfassen und zu prüfen. Die Feldversuche werden in Rostock und Göttingen mit gleichem Versuchsdesign durchgeführt. Es werden vier Fruchtfolgen miteinander verglichen. Jede Frucht wird jedes Jahr in vier Wiederholungen angebaut. Vier Fruchtfolgen mit Energiepflanzen:

- Maisdaueranbau
- Raps-Winterweizen
- Raps-(Grünroggen)-Mais-Winterweizen
- Raps-Winterweizen-(Grünroggen)-Mais-Winterweizen

Vier Pflanzenschutzvarianten:

- Situationsbezogene Referenz (SR) (Befall bzw. Fruchtart, Fruchtfolge)
- SR ohne Fungizide
- SR mit eingesäten Unkräutern
- Eingesäte Unkräuter situationsbezogen bekämpft

Datenerfassung

- Unkräuter, Krankheiten, Schädlinge
- situationsbezogener Pflanzenschutzmitteleinsatz
- Bekämpfungserfolg
- Massenertrag, Inhaltsstoffe, Gärausbeute (Grünroggen, Mais)

Fruchtfolgen mit Energiepflanzen: Grünroggen und Mais im Zweitfruchtanbau – ein phytomedizinisches Risiko?

MARK WINTER, ANDREAS VON TIEDEMANN

Im Rahmen der Ausweitung der Anbaufläche von Mais als wichtigstes Biogassubstrat (ca. 0,5 Mio ha) hat auch die Anbaufläche von Grünroggen als Winterzwischenfrucht in Kombination mit Mais als Zweitfrucht in Deutschland stark an Bedeutung gewonnen. Ende der 90er-Jahre wurden auf ca. 800 000 ha Roggen angebaut. Mit dem Wegfall der Roggenintervention im Jahre 2004 ist der Anbauumfang stark zurückgegangen (unter 550 000 ha). Seit dem Jahr 2006 ist wieder eine Ausweitung der Anbaufläche in Deutschland zu verzeichnen (FAO 2010). So wurden im Herbst 2008 740 800 ha Roggen ausgesät. Die Anteile für eine energetische Nutzung sind in den letzten Jahren angestiegen (von 9 % im Jahr 2007/08 auf 14 % im Jahr 2008/09; RYEBELT 2009). Vor allem Mais aber auch Roggen gelten als gute Wirte der Gattung *Fusarium*. Eine Kombination dieser Feldfrüchte in einer engen Fruchtfolge kann somit zu einer erheblichen Zunahme dieser Pathogengruppe führen. Die Mykotoxinproblematik steht hierbei im Fokus. In Feld- und Gewächshausversuchen wurde die Ganzpflanzenkontamination mit dem Mykotoxin Deoxynivalenol (DON) und die Pathogenbelastung durch die beiden toxischen Erreger *F. culmorum* und *F. graminearum* in Grünroggen untersucht. Zusätzlich wurden in Mini-Batchversuchen die Auswirkungen von DON-hochkontaminiertem Pflanzenmaterial als Gärsubstrat auf den Biogasprozess untersucht. In Gewächshausversuchen wurden die beiden Winterroggenarten *Borfuro* (eine zur Grünroggennutzung ausgewiesene Art) und *Askari* (eine konventionelle Art) bodenbürtig über ein Stroh-Bodeninokulum jeweils mit den toxischen Fusariumarten *F. graminearum* und *F. culmorum* inokuliert. Durch einen quantitativen Enzymimmunoassay (ELISA) konnte zum Entwicklungsstadium (ES) 73 in der ganzen Pflanze das Leittoxin Deoxynivalenol (DON) nachgewiesen werden. Dabei ließen sich in den infizierten Varianten signifikant höhere Mengen feststellen als in den nicht infizierten Kontrollen. Ein Sortenvergleich machte deutlich, dass die Grünroggensorte *Borfuro* doppelt so stark mit DON verseucht war als die herkömmliche Roggensorte. Dieser Unterschied wurde weiterhin durch Untersuchungen mittels quantitativer Real Time PCR (qPCR) für beide Erreger bestätigt, wobei erheblich mehr DNA von *F. graminearum* im Vergleich zu *F. culmorum* quantifiziert wurde. So ist der DNA-Gehalt von *F. graminearum* im Halmbasisabschnitt der Sorte *Borfuro* mit 1236,4 pg/mg TM doppelt so hoch wie in der Sorte *Askari* (645,1 pg/mg TM). Der Nachweis von *F. culmorum* zeigte den gleichen Unterschied zwischen den beiden Sorten.

Durch Mini-Batchversuche mit hochgradig DON-verseuchtem Getreide konnte eine tendenzielle Hemmung der Biogasbildung gezeigt werden.

In Freilandversuchen mit künstlicher Infektion des Pilzes *F. culmorum* zeigte die Fusariuminfektion eine Reduktion der pflanzlichen Biomasse. Neben Qualitätsverlusten ist nach bodenbürtigem Fusariumbefall an der Halmbasis von Roggen mit Ertragsverlusten zu rechnen. Im Herbst 2008 wurde in einem Fruchtfolgeversuch mit Energiepflanzen, gefördert von der Fachagentur für Nachwachsende Rohstoffe (FNR), Grünroggen als Zwischenfrucht vor Mais angebaut und zum ES 55 Roggenpflanzen zur Bestimmung des Spektrums von *Fusarium* spp. an der Halmbasis gezogen. Für die Bestimmung des Fusariumerregerspektrums wurden Halmbasisabschnitte von Roggentrieben auf Potato Dextrose Agar ausgelegt und die ausgewachsenen Arten auf einen nährstoffarmen Agar (Strohextraktagar) vereinzelt. Die mikroskopische Bestimmung des Erregerspektrums zeigte, dass im Jahr 2010 nur in einzelnen Fällen *Fusarium spp.* gefunden wurden. Im zweiten Jahr dieser Untersuchung (2011) konnten deutlich mehr Erreger festgestellt werden. Hauptsächlich fanden sich die Erreger *F. tricinctum* und das toxische Pathogen *F. culmorum* an der Halmbasis. Im Laufe der nächsten Jahre wird sich in dem o.g. Fruchtfolgeversuch zeigen, inwieweit sich das Fusariuminokulum in Fruchtfolgen mit Energiepflanzen aufbaut und zu einer ernstzunehmenden Verseuchung und damit zu einer Ertrags- und Qualitätsminderung des Biogassubstrates in Hinblick auf die Biogasausbeute führen kann.

Literatur

FAO, <http://www.fao.org> (Zugriff am 07. Juni 2010)

Ryebelt, http://www.ryebelt.de/fileadmin/files/dummy/2009_1.Roggenmarkt_01.pdf (Zugriff am 07. Juni 2010)

Auswirkungen des Energiepflanzenanbaus auf das Fruchtfolge- und Pflanzenschutzmanagement in landwirtschaftlichen Betrieben – Ergebnisse einer empirischen Studie

HAGEN HARTMANN, CHRISTIAN SCHAPER, HORST-HENNING STEINMANN,
LUDWIG THEUVSEN

In Deutschland genießen die Energie- und Klimapolitik und damit die erneuerbaren Energien bereits seit längerer Zeit erhöhte Aufmerksamkeit. Zentraler Stützpfeiler des Ausbaus der Erzeugung erneuerbarer Energien ist das Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG). Landwirte profitieren unmittelbar vom politischen Rückenwind der im EEG festgeschriebenen Förderung sowie der steigenden Nachfrage nach regenerativen Energien. Wenn in diesem Zusammenhang vom „Landwirt als Energiewirt“ gesprochen wird, so ist damit die Produktion von Energiepflanzen für die innerbetriebliche Erzeugung erneuerbarer Energien, speziell in Biogasanlagen, oder die Bereitstellung von Biomasse, z. B. Energiemaïs oder Ölfrüchten, für die Erzeugung erneuerbarer Energien außerhalb des eigenen Betriebs gemeint. Die Produktion von Energiepflanzen ist zu einem wichtigen Standbein vieler landwirtschaftlicher Betriebe in Deutschland geworden. Deutlich wird dies bei der Betrachtung der mit nachwachsenden Rohstoffen (NawaRos) bebauten Fläche in den letzten zehn Jahren, die von 700 000 ha auf über 2,1 Mio. ha angestiegen ist. Vom Bioenergieboom profitierten vor allem die bewährten Kulturarten Weizen, Raps und Mais, deren Anbauanteile sich in den letzten zehn Jahren um 18 % (Weizen), 36 % (Raps) und 52 % (Mais) erhöhten und im Jahr 2010 flächenmäßig mehr als die Hälfte der landwirtschaftlichen Produktion in Deutschland ausmachen. Diese Entwicklungen schlagen sich auch in den tatsächlich angebauten Fruchtfolgen nieder, sodass von einem Trend zur Vereinfachung der traditionell etablierten Fruchtfolgen in Deutschland gesprochen werden kann. Diese Vereinfachung und der prognostizierte weitere Ausbau der Energiepflanzenproduktion werfen verstärkt phytosanitäre und ökologische Probleme auf.

Gestützt auf eine empirische Studie mit 90 Teilnehmern soll ein Einblick in die Fruchtfolgesituation und das Pflanzenschutzmanagement landwirtschaftlicher Betriebe mit Energiepflanzenanbau gegeben und daraus schwerwiegende Probleme des Pflanzenschutzes im Rahmen des Anbaus von Energiepflanzen aufgezeigt und Handlungsoptionen unter phytomedizinischen, ökologischen und ökonomischen Gesichtspunkten abgeleitet werden. Weiterhin wurden generelle Einstellungen der Landwirte zum Pflanzenschutz, zum Anbau von Energiepflanzen und zur Erzeugung von Bioenergie abgefragt. Somit kann ein Eindruck über Einstellungen und Wahrnehmungen von Landwirten zur derzeitigen Entwicklung des Energiepflanzenanbaus gegeben werden.

Grundwasserschonender Biomasseanbau nach den Anforderungen der EG-Wasserrahmenrichtlinie (EG-WRRL)

CHRISTINE VON BUTTLAR, BIRGIT KRÄLING, MATTHIAS WILLMS

1 Zielsetzung

Ziel des Vorhabens ist die Erprobung von Maßnahmen zum grundwasserschutzorientierten Energiepflanzenanbau. In drei Bundesländern werden grundwasserschonende Anbauverfahren für Energiepflanzen gemeinsam mit Praxisbetrieben entwickelt und in Demoversuchen überprüft. Nachhaltige Ansätze und Lösungen sollen erarbeitet werden, um den Anbau nachwachsender Rohstoffe mit den Ansprüchen des Gewässerschutzes zu vereinbaren. Ein weiterer Arbeitsschwerpunkt wird auf die Optimierung des Gärrestmanagements gelegt. Angesprochen mit diesem Vorhaben werden Bewirtschafter und Berater sowie Vertreter der Verwaltung.

Das Projekt ist in das Verbundvorhaben „Standortangepasste Anbausysteme für die Produktion von Energiepflanzen (EVA), Schwerpunkt Ökologische Begleitforschung“, eingebettet. Gefördert wird es durch die Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe (FNR) und hat eine Laufzeit von 7/2010 bis 2/2012. Die Umsetzung erfolgt durch die Ingenieurgemeinschaft für Landwirtschaft und Umwelt (IGLU-Göttingen) in Zusammenarbeit mit dem Zentrum für Agrarlandschaftsforschung (ZALF).

2 Hintergrund der EG-Wasserrahmenrichtlinie (EG-WRRL)

Stickstoffauswaschung und erhöhte Nitratkonzentration im Sickerwasser unter landwirtschaftlich genutzten Flächen war bisher ein Thema, das sich weitgehend auf Wasserschutzgebiete beschränkte. Seit in Kraft treten der EG-Wasserrahmenrichtlinie 2000/60/EG (EG-WRRL) besteht ein gemeinsamer Ordnungsrahmen für die europäische Wasserpolitik. Ziel der Richtlinie ist die Erreichung und der Erhalt eines guten Zustands des Grundwassers und der Oberflächengewässer (Flüsse, Bäche, Seen) einschließlich Küsten- und Übergangsgewässer bis Ende 2015. Dies bedeutet:

- für das Grundwasser einen guten mengenmäßigen und chemischen Zustand (Grenzwert 50 mg Nitrat/l)
- für die oberirdischen Gewässer einen guten ökologischen und chemischen Zustand

Eine grundwasserschutzorientierte Flächennutzung wird somit in Zukunft eine Herausforderung, der sich alle landwirtschaftlichen Betriebe die innerhalb der EG-WRRL Kulisse liegen, stellen müssen.

3 Untersuchungsprogramm und Ergebnisse

Durch Anlage von Feldversuchen auf drei Leitbetrieben in den Bundesländern Hessen (Wanfried), Sachsen-Anhalt (Petersberg) und Niedersachsen (Schneverdingen) erfolgt der Transfer von mehrjährigen Versuchsergebnissen aus Exaktversuchen in die Praxis (Abb. 1). Etablierte Kulturen wie Mais und Getreide sowie neue Kulturen wie Sorghum werden hinsichtlich ihrer Wasserschutzleistung bewertet. Es erfolgt die Prüfung der Reduktionspotenziale (N-Düngeoptimierung, Herbst N_{\min} , N-Bilanzen) und die Optimierung der organischen Düngung mit Gärresten im Hinblick auf eine Reduzierung von N-Austrägen sowie die gewässerschutzorientierte Anpassung bestehender Fruchtfolgen.

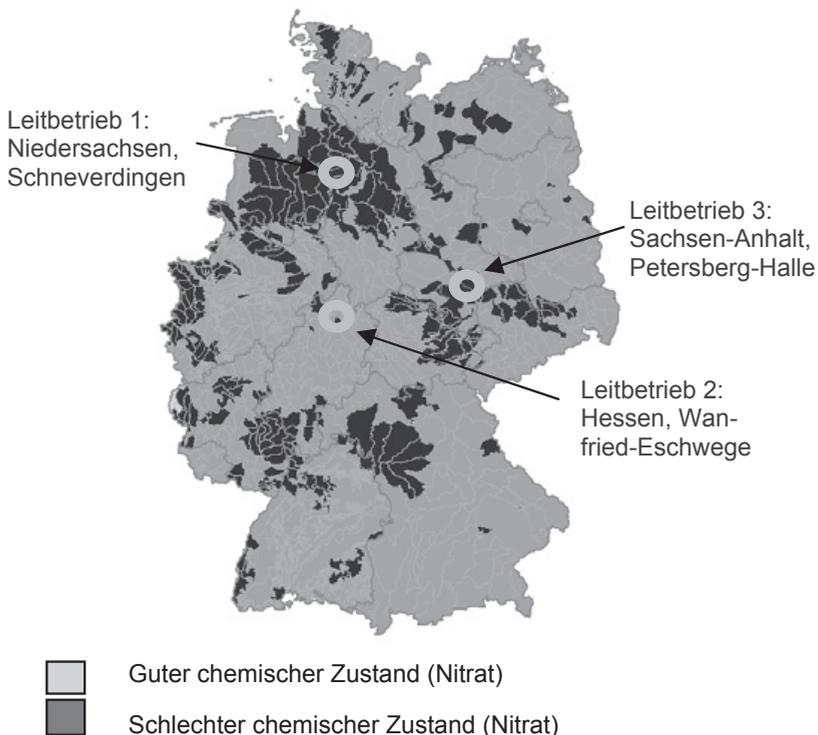


Abb. 1: Chemischer Zustand der Grundwasserkörper in Deutschland – Nitrat

Erste Ergebnisse werden vorgestellt. Feldbegehungen und Informationsaustausch erfolgen kontinuierlich.

4 Chancen und Perspektiven für den Wasserschutz

Durch gezielte Anbaukonzepte und Fruchtfolgegestaltungen bestehen weitreichende Möglichkeiten zum arten- und sortenreichen Anbau, zur nahezu ganzjährigen Flächenbegrünung, zur Einsparung oder Optimierung bei der Stickstoffdüngung und zur Minderung des Nitrat-Auswaschungsrisikos.

Optimierung der nachhaltigen Biomassebereitstellung von repräsentativen Dauergrünlandtypen für die Biogasproduktion (GNUT – Biogas)

FLORIAN SCHMIDT, KATJA GÖDEKE, HANS HOCHBERG

Das FNR-Projekt „GNUT-Biogas“ befasst sich mit der Optimierung der nachhaltigen Biomassebereitstellung von repräsentativen Dauergrünlandtypen für die Biogasproduktion. Grünland gewinnt aufgrund der immer stärker werdenden Flächenkonkurrenz des Nahrungsmittel-, Futter- und Energiepflanzenanbaus zunehmend an Bedeutung. Dieses Projekt soll zum Schutz und Erhalt des Dauergrünlandes beitragen, indem Strategien erarbeitet werden, wie und in welchen Mengen die Nutzung des Wirtschaftsgrünlandes für die Verwertungsrichtung Biogasproduktion genutzt werden kann. Die Bewirtschaftungs- und Verwertungsstrategien müssen dabei ökologischen und ökonomischen Anforderungen gerecht werden und werden mit entsprechenden Kriterien bewertet.

Die Forschungsschwerpunkte umfassen neben der Untersuchung von ausgewählten Grünlandstandorten, die große Grünlandregionen Deutschlands abbilden und unterschiedliche, natürliche Bedingungen und Bewirtschaftungsintensitäten repräsentieren, die systematische Ermittlung von Biomasseerträgen und -qualitäten einschließlich Biogasausbeuten, die umfassende ökonomische Bewertung der gesamten Biomassebereitstellungs- und Verwertungsketten, die Bewertung der Umweltwirkungen der Bereitstellungs- und Verwertungsstrategien (Öko-, Energie-, Treibhausgasbilanzierung) sowie die Ermittlung der energetischen Potenziale der untersuchten Grünlandtypen und die Hochrechnung des nationalen Grünlandpotenzials gemäß der optimalen Verwertungsrichtungen unter Mitarbeit der jeweiligen Landeseinrichtungen. Hinzu kommt die Ableitung praktischer Handlungsempfehlungen für die Grünlandregionen.

Um diese Forschungsschwerpunkte zu bearbeiten werden in den Bundesländern Niedersachsen, Brandenburg, Sachsen, Thüringen und Bayern an insgesamt acht Standorten mit repräsentativem Wirtschaftsgrünland Versuche durchgeführt. Die Versuchsanlage umfasst die vier Nutzungssysteme:

- standorttypische Intensität (Futter für Milchvieh) – nachhaltig optimal
- Qualitätsfutterbereitstellung mit reduzierter N-Düngung
- Ausnutzung des Standortpotenziales
- bestandespflegend

Dabei unterscheiden sich die vier Nutzungssysteme hinsichtlich Schnitthäufigkeit, Schnittzeitpunkt sowie N-Düngung. Alle Nutzungssysteme sind in einer randomisierten Blockanlage mit vier Wiederholungen angelegt. Bei den Grünlandtypen handelt es sich um:

- Weidelgrasweide (NI und BY)
- Wiesenrispengesellschaft (BB)
- Weidelgras-Kammgras-Weide (BB)
- Wiesenfuchsschwanz-Wiese (SN)
- typische Glatthaferwiese (TH)
- Goldhaferwiese (TH)
- trockene Glatthaferwiese (BY)

Zur Ernte werden neben der Ertragsermittlung und der Probennahme zusätzlich die Leitkulturen und deren Entwicklungsstadien zur Ernte bestimmt und die Bestandeshöhen sowie die Gutfeuchte erfasst. Die Grüngutproben werden nach der erweiterten Weender Futtermittelanalyse untersucht. Zusätzlich werden die Verdaulichkeit (ELOS) sowie die Gehalte an Makro- und Mikronährstoffen bestimmt. Dieses Analysespektrum wird bei den silierten Proben (Silagen im Labormaßstab) um das Gärsäurespektrum sowie Ammoniakgehalt und pH-Wert ergänzt. In Batchtests wird zusätzlich die substratspezifische Biogas- und Methanausbeute der Silagen bestimmt.

Die Ertragsermittlung und die Bestimmung der zusätzlichen Parameter werden je Wiederholung erfasst während die Probennahme für die Grüngutanalyse sowie die Erstellung von Silageproben prüfgliedweise erfolgt.

Gefördert durch das BMELV über die FNR (FKZ 22007509, Laufzeit 2010–2013).

Stoffströme – Möglichkeiten zur Reduktion von Bilanzüberschüssen in Hochverdichtungsräumen (Weser-Ems) der Nutztierhaltung in Verbindung mit der Biogasproduktion

FELIX GARLIPP, MATHIAS BEERMANN, PETER STYPEREK, HERMAN VAN DEN WEGHE

Die Region Weser-Ems und speziell die Landkreise Cloppenburg und Vechta (Region Süldoldenburg) sind als Hochverdichtungsräume der Nutztierhaltung bekannt. Mit der Novellierung des EEG und den damit einhergehenden finanziellen Anreizen erfuhr die Biogasproduktion in Deutschland, v. a. aber auch in der Weser-Ems-Region einen starken Aufschwung. Die enorme Präsenz von Anlageninstallateuren, aber auch ausgezeichnete Synergieeffekte mit der Veredelungswirtschaft (z. B. Nutzung der BHKW- Abwärme in den Stallungen) begünstigten diese Entwicklung. Neben diesen positiven Effekten entstanden mit dem Biogasaufschwung jedoch ebenso negative Folgen. Die zuvor bereits bestehende Nährstoffüberschussproblematik hat sich weiter verschärft. Angesichts unzureichender Flächenausstattungen der Betriebe werden für den Biogasbetrieb oftmals Gärsubstrate zugekauft, die nach Ablauf des Fermentationsprozesses zumeist überbetrieblich verwertet werden. Dieses geschieht zumeist in Form von Gärrestabgaben an den Lohnunternehmer, da die Düngemittelverordnung und die Cross-Compliance-Forderungen die Nährstoffzufuhr auf den Flächen reglementieren. Andere Strategien der Nährstoffreduktion (ackerbauliche Maßnahmen, Veränderungen des Produktionsmitteleinsatzes und Fütterungsumstellung) sind weniger geeignet, das immens hohe Nährstoffaufkommen der Biogasbetriebe zu verringern.

Das Ziel dieser Arbeit war es, zu analysieren, inwieweit durch die Biogasproduktion Nährstoffüberschüsse auf landwirtschaftlichen Betrieben entstehen. Des Weiteren sollen anhand der Ergebnisse Biogasanlagenbetreibern aus intensiven Viehhaltungsregionen verschiedene Möglichkeiten aufgezeigt werden, ihre erhöhten betrieblichen Nährstoffsalen zu reduzieren.

Die in der Arbeit untersuchten Veredelungs- und Biogasbetriebe (8) zeigen enorme Unterschiede in der Nährstoffsituation. Obwohl die untersuchten Biogasbetriebe deutlich höhere Wirtschaftsdüngermengen abgeben als die konventionellen Veredelungsbetriebe (4068 m³/a gegenüber 51 m³/a), weisen diese dennoch höhere Nährstoffbilanzen auf (N: 90 kg gegenüber 50 kg/(ha • a), P₂O₅ : 76 kg gegenüber 17 kg/(ha • a)). Da der Abtransport der Gärreste mit erheblichen Kosten verbunden ist, wurde in der Arbeit anhand zweier ausgewählter Biogasbetriebe untersucht, inwiefern die Gärrestaufbereitung eine mögliche Alternative für die Flächenbilanzreduktion bietet. Beide Betriebe

reduzieren mit dem Einsatz einer Gärrestseparierung und -trocknung ihre Nährstoffbilanzen (Betrieb 1: 51,4 kg N/(ha • a), 74,3 kg P₂O₅/(ha • a), 55,3 kg K₂O/(ha • a); Betrieb 2: 215,7 kg N/(ha • a), 105,3 kg P₂O₅/(ha • a), 202,8 kg K₂O/(ha • a)). Hierbei ist v. a. die Entstehung verkaufsfähiger Endprodukte ausschlaggebend. Mit dem durch das EEG vergüteten KWK-Bonus erzielen beide Betreiber Gewinne durch die Gärrestaufbereitung. Bei Betrieb 2 liegt dieser Gewinn deutlich höher als bei Betrieb 1, da dieser zum einen weniger Erlöse durch den KWK-Bonus realisiert und zum anderen keinen Verkauf der getrockneten Gärreste erzielt. Dieses zeigt, dass die Gärrestaufbereitung kein Allheilmittel für Biogasbetriebe darstellt. Damit ein nachhaltiger Erfolg realisiert werden kann, gilt es eine optimale Auslastung der Separierung (Maximierung des Feststoffanfalls) und der Gärresttrocknung (Maximierung der Erlöse durch den KWK-Bonus) anzustreben. Weiterhin sind sichere Vermarktungswege der Endprodukte in Zeiten schwankender Agrarmärkte für den Erfolg entscheidend.

Treibhausgasbilanz der Biogasproduktion unter den Anbaubedingungen Schleswig-Holsteins

**SANDRA CLAUS, BABETTE WIENFORTH, KLAUS SIELING, HENNING KAGE,
FRIEDHELM TAUBE, ANTJE HERRMANN**

Die Biogasproduktion in Schleswig-Holstein basiert hauptsächlich auf Co-Fermentation von Mais und Gülle und zeigt einen zunehmenden Trend zur Errichtung von größeren Anlagen, woraus längere Transportwege für Gärsubstrate und Gärreste folgen. Darüber hinaus ist die Energiepflanzenproduktion häufig durch einen hohen Einsatz an fossilen Brennstoffen gekennzeichnet, wodurch die Energie- und Treibhausgasbilanz negativ beeinflusst werden. Für Treibhausgasbilanzen zur Biogasproduktion in Norddeutschland liegen bislang nur wenige Daten vor, die zudem meist auf Literaturdaten basieren. Ziel der vorliegenden Studie war es daher, eine Treibhausgasbilanz für die Biogasproduktion aus Energiepflanzen, basierend auf den Daten eines 2-jährigen Feldversuchs in zwei typischen Landschaftsräumen Schleswig-Holsteins (Geest, Hügelland), durchzuführen und zu bewerten. Untersucht wurde der Einfluss unterschiedlicher Fruchtfolgen (Mais-Monokultur, Mais-Weizen-Fruchtfolge, Dauergrünland), N-Düngemengen und -formen (Mineraldünger KAS, Gärrest, Gülle). Im Rahmen einer Ökobilanzierung wurde eine Energiebilanz und daraus folgend eine Klimabilanz der Biogasproduktion erstellt, welche die gesamte Prozesskette von Pflanzenproduktion, Ernte, Transport und Konversion zu Biogas umfasst. Die Resultate der Klimabilanz werden präsentiert und diskutiert.

Energiepflanzenanbau und energetische Konversion im Klimawandel – Anpassungsstrategien und Bewertung der ökologischen und energetischen Effizienz am Beispiel der Metropolregion Hannover – Braunschweig – Göttingen – Wolfsburg

CHRISTINE VON BUTTLAR, DANIELA DRESSLER, ROLAND BAUBÖCK,
MARIANNE KARPENSTEIN-MACHAN, ACHIM LOEWEN

1 Zusammenfassung

Im Rahmen des vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) geförderten Verbundprojektes „Regionales Management von Klimafolgen in der Metropolregion Hannover-Braunschweig-Göttingen (Projektleitung Prof. Dr. Günter Groß, Universität Hannover) sind anhand von Klimamodellen für die Metropolregion Klimaszenarien bis zum Jahr 2100 berechnet worden. Auf dieser Basis wurden im Teilprojekt „Energiepflanzen“ Konzepte zur Sicherung einer nachhaltigen Biomasseproduktion und Bioenergieerzeugung unter veränderten Klimabedingungen entwickelt, um mittel- bis langfristige Auswirkungen des Klimawandels abzuwenden oder zu kompensieren. Die Ertragsentwicklung bekannter und neuer Kulturen wurde im Pflanzenwachstumsmodell berechnet und Maßnahmenvorschläge für einen klimaangepassten, wassereffizienten Ackerbau entwickelt. Weiter wurden Energie- und Ökobilanzen für verschiedene Bioenergie-Konversionsverfahren (z. B. Biogas, Biodiesel) auf Basis regionaltypischer Anbau- und Verfahrenstechniken erstellt. Daraus wurden unter anderem die Klimagaseffizienz und Energieeffizienz des jeweiligen regionaltypischen Bioenergieverfahrens abgeleitet.

2 Ergebnisse

Im Rahmen des Projektes wurden CLM-Klimadaten von einer Auflösung von 20×20 km auf eine Auflösung 1×1 km regionalisiert (Lokalmodell FITNAH). Der Vergleich der Klimaszenarien aus den Perioden 1961–1990 und 2071–2100 ergibt einen Anstieg der Temperatur im hydrologischen Sommerhalbjahr um etwa $3 \text{ }^\circ\text{C}$ und eine Abnahme der Sommerniederschläge zwischen 15–22 % bei nahezu gleichbleibenden Jahresniederschlägen (GROSS und KRAUSE 2011).

Pflanzenbauliche Auswirkungen des Klimawandels resultieren in einem früheren Vegetationsbeginn und einer insgesamt längeren Vegetationszeit. So verlängert sich für Kulturen mit Keimtemperaturen von $12 \text{ }^\circ\text{C}$ die Vegetationszeit bis zum Jahr 2100 vor-

aussichtlich um mehr als 6 Wochen. Auch steigende CO₂-Gehalte in der Atmosphäre können sich positiv auf das Pflanzenwachstum auswirken. Einschränkungen werden dagegen durch die zunehmende Sommertrockenheit bei gleichzeitig steigenden Temperaturen sowie durch die steigende Gefahr von Spätfrösten erwartet. Eine Zunahme an Extremniederschlägen konnte für die Metropolregion in diesem Zusammenhang nicht festgestellt werden.

Die Ertragsmodellierung von Biomassekulturen mit Ganzpflanzennutzung ergab für die nördliche Metropolregion mit gut wasserspeichernden Böden für die Kulturen Mais, Sorghum und Zuckerrübe positive Ertragseffekte für das Szenario 2070 - 2100 (ohne Annahme von Technik- oder Züchtungsfortschritt). Die Wintergetreidearten bleiben noch bis Mitte des Jahrhunderts recht stabil und zeigen dann negative klimabedingte Ertragsauswirkungen. Raps und Sommergetreide können die prognostizierten Klimaänderungen am schlechtesten ausgleichen. Anpassungsmöglichkeiten bestehen u. a. in der Kulturartenwahl, in der Fruchtfolgegestaltung, in der Sortenwahl und in der Wahl der Bodenbearbeitungssysteme sowie, insbesondere auf leichten Standorten, in der Zusatzbewässerung. Eine an den Erfordernissen des Klimawandels ausgerichtete Züchtung kann ebenfalls zur künftigen Ertragssicherheit beitragen. Fruchtfolgeszenarien weisen darauf hin, dass in Zukunft größere Anstrengungen zum Erhalt der Humusbilanz unternommen werden müssen. Ein Ausgleich könnte durch den verstärkten Verbleib von Stroh/Stängel auf der Fläche geschaffen werden, was jedoch ggf. zu Zielkonflikten mit der Ganzpflanzennutzung führen kann.

Auf Basis der modellierten Biomassekulturen wurden verschiedene Bioenergiekonzepte abgeleitet, wie beispielsweise die Produktion von Strom und Wärme aus Biogas oder die Erzeugung verschiedener Kraftstoffe (Biomethan, Biodiesel, Ethanol). Die Ergebnisse der energetischen und ökobilanziellen Bewertung dieser Bioenergien lassen sich in verschiedenen Aspekten zusammenfassen. Ein wichtiger Punkt dabei ist der Einfluss der regionaltypischen Anbau- und Verfahrenstechniken auf die Ergebnisse. So führen die Klimagas- und Energiebilanzen der Verstromung von Biogas in der nördlichen Metropolregion um den Landkreis Celle beispielsweise zu schlechteren Einsparpotenzialen im Vergleich zu fossilen Energieträgern als auf den besseren Standorten um die Landkreise Hildesheim und Göttingen. Dieser Aspekt liegt zum einen an der schwächeren Ertragslage auf den leichten Standorten als auch deren deutlich schlechtere Wärmenutzungsrate. Bezogen auf die Klimaszenarien bis zum Jahr 2100 wird dieser Effekt der regionalen Unterschiede aufgrund der zu erwartenden Ertragseinbußen noch weiter verstärkt. Bezogen auf das Gesamtergebnis spielt dieser Punkt allerdings eine untergeordnete Rolle, da die Ertragsveränderungen durch den zu erwartenden technologischen Fortschritt (z. B. Wirkungsgradsteigerung in der Gasausbeute der BHKWs) mehr als kompensiert werden können.

3 Fazit und Ausblick

Das Forschungsvorhaben hat erste Einblicke in die künftig zu erwartenden Klimaänderungen der Metropolregion und deren Auswirkungen auf den Energiepflanzenanbau ermöglicht. Mit Ertragsminderungen ist insbesondere auf den leichten Standorten der nördlichen Metropolregion, aber langfristig auch auf den gut wasserspeichernden Böden der südlichen Metropolregion zu rechnen. Diese sind durch Anbaumaßnahmen in unterschiedlichem Maße zu kompensieren. Die Ergebnisse der Bilanzierung zeigen den Einfluss der regionalen Unterschiede im Biomasseanbau und in der Bioenergiegewinnung, der teilweise durch die prognostizierten Klimaänderungen weiter verstärkt werden. Allerdings lassen sich diese durch den zu erwartenden technologischen Fortschritt mehr als kompensieren. Weiterer Forschungsbedarf ist sowohl hinsichtlich einer vertiefenden Untersuchung der Klimawirkungen auf die Kulturpflanzen als auch der Quantifizierung von Maßnahmeneffekten gegeben. Diese sollten dann auf ihre energetische, ökologische und ökonomisch Effizienz hin geprüft werden.

Eine Option für die Biogasanlage – die durchwachsene Silphie (*Silphium perfoliatum* L.)

MICHAEL CONRAD, ANDREA BIERTÜMPFEL

Die steigende Anzahl von Biogasanlagen und der in einigen Regionen Deutschlands stark ansteigende Maisanteil in der Fruchtfolge führen seitens der Landwirtschaft zu einer intensiven Suche nach Alternativen für den Einsatz als Koferment. Eine könnte die zur Familie der Korbblütengewächse gehörende Durchwachsene Silphie sein. Die aus Nordamerika stammende, ausdauernde Pflanze liefert sehr hohe Biomasseerträge, ist relativ anspruchslos hinsichtlich Boden und Witterung und lässt sich gut silieren. Außerdem ist die von Juli bis zur Ernte im September/Okttober gelb blühende Silphie eine gute Bienenweide, sorgt für die Bereicherung der Artenvielfalt und könnte wegen der guten Durchwurzelung auch für erosionsgefährdete Lagen interessant sein. Deutschlandweit stehen 2011 etwa 120 ha dieser neuen Kultur im Feld – mit steigender Tendenz. Etwas problematisch ist die Anlage der Bestände, die derzeit noch hauptsächlich durch Pflanzung erfolgt. Intensive Untersuchungen zur Entwicklung praxistauglicher Aussaatverfahren laufen gegenwärtig in einem von der Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. geförderten Projekt. Im ersten Anbaujahr, in dem die Silphie nur eine grundständige Rosette bildet, gilt es, den noch konkurrenzschwachen Jungpflanzen optimale Bedingungen zu schaffen. Ab dem zweiten Anbaujahr sind bei normaler Bestandesentwicklung keine Pflegemaßnahmen mehr erforderlich. Vergisst der Landwirt nicht, im Frühjahr zu düngen, kann er im September mit hohen Silphie-Erträgen rechnen. Die Erträge lagen dabei in den Exaktversuchen, aber auch in der Praxis meist mindestens auf Silomaisniveau, teilweise sogar bis zu 20 % darüber. Ein Rückgang der Erträge war dabei auch bei langjähriger Nutzung nicht zu verzeichnen. Geerntet wird bei TS-Gehalten um 28 bis 30 % zeitgleich mit dem Mais, sodass insbesondere bei kleineren Flächen eine gemeinsame Silierung möglich ist. Die Biogasausbeute der Silphie ist ca. 15 % niedriger als bei Mais und damit auf dem Niveau der Sorghumhirsen. Aufgrund des noch nicht vollständig ausgereiften Anbauverfahrens und der Saatgutverfügbarkeit bietet sich die Silphie momentan vor allem für die Nutzung von Rest- und Splitterflächen an. Zukünftig wird ihre Anbaubedeutung sicher weiter steigen.

Rüben als Zukunftssubstrat für Biogasanlagen – Ergebnisse aus der großtechnischen Nutzung in einer Biogasanlage zur Optimierung der Rohbiogasproduktion zur Gaseinspeisung in das Erdgasnetz

RALPH SUTTER, MICHAEL NELLES, JAN LIEBETRAU, FRANK SCHOLWIN

Es werden neue Erkenntnisse zur Wirkungsweise des Einsatzes von Rüben zur Optimierung der Rohbiogasproduktion in einer großtechnischen Biogasanlage dargestellt und analysiert. Parallele kontinuierliche Gärversuche im Labor zeigen die Richtigkeit der in der Praxis erkannten Zusammenhänge. Parameter zur Erhöhung der Biogasqualität und Menge werden abgeleitet.

Mit Laboruntersuchungen in einem kontinuierlich betriebenen Gärfermenter wurden über einen Versuchszeitraum von 286 Tagen die Prozessvariablen der Fermentation untersucht. Veränderungen sowohl der verfahrenstechnischen Prozessparameter der Fermentation als auch bei den Substraten, insbesondere Zuckerrüben, wurden im Zusammenhang mit Futtermittelanalysen und Gasbildungspotenziale ermittelt und beschrieben. Klare Korrelationen mit den in der großtechnischen Biogasanlage ermittelten Daten werden gezeigt.

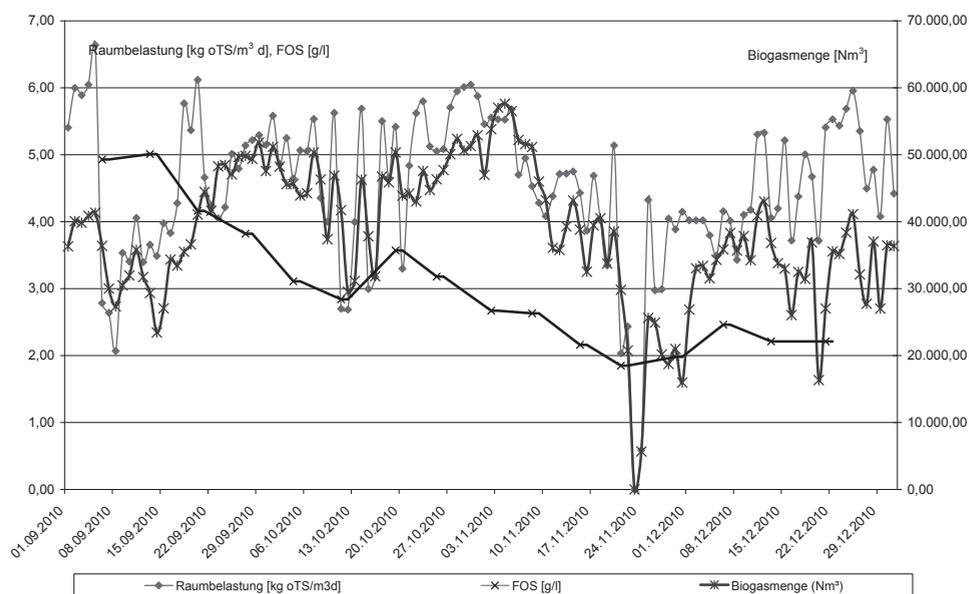


Abb. 1: Biogasmenge in Nm³/d, Raumbelastung in kg oTS/(m³ · d) und FOS in g/l über den Verarbeitungszeitraum Rübenverarbeitung

Die Ergebnisse der Substratumstellungen (Abb. 1) und die Verarbeitung von Zuckerrüben in der großtechnischen Biogasanlage ohne negative Auswirkungen auf die Fermenterbiologie wurden ermittelt und wissenschaftlich ausgewertet. Gasmenge und Gasqualität konnten eindeutig durch einen verbesserten Stoffaustausch gesteigert werden.

Durch die neuen Erkenntnisse der Untersuchung wurden Zusammenhänge zwischen Änderungsparametern und Biogasbildungsprozess abgeleitet. Um dem vermehrten Einsatz von Zuckerrüben als einem der vielversprechenden nachwachsenden Rohstoffen bei der Fermentation in Biogasanlagen Rechnung zu tragen, können die wissenschaftlichen Erkenntnisse auf viele in Diskussion und Planung befindliche Biogasprojekte übertragen sowie in der aktuell verstärkten Forschung verwendet werden.

Grünlandaufwüchse zur Biogasproduktion – Einfluss des Schnittzeitpunktes auf den Methanhektarertrag

BJÖRN BUGDAHL, JOBST VOLGER, JOHANNES ISSELSTEIN, EGON JANSSEN

Aufgrund der zunehmenden Flächenknappheit, steigenden Pachtpreisen und der immer stärkeren Ablehnung des intensiven Maisanbaus durch Teile der Bevölkerung rücken Alternativen zum Mais mehr in den Fokus der Biogaserzeugung. In den Milchviehregionen stellt Grünland eine Alternative dar. Genutzt werden können die für die Milchproduktion uninteressanten letzten Schnitte, aber auch die Verwendung des gesamten Jahresaufwuchses kann sinnvoll sein. Vor diesem Hintergrund wurde die Eignung der einzelnen Schnitte von Dauergrünland zur Biogasproduktion untersucht. Hierfür wurde 2010 ein Versuch in dreifacher Wiederholung auf einer Dauergrünlandfläche auf einem Mittelgebirgsstandort (Weserbergland) angelegt. Die Varianten: drei Schnitte früh (1), drei Schnitte spät (2) und zwei Schnitte sehr spät (3). Zusätzlich wurde zum Saisonabschluss in allen Varianten ein Schröpfschnitt durchgeführt.

Für die Nutzung von Grünlandaufwüchsen zur Biogaserzeugung kann ein anderes Schnittregime gefahren werden als zur Verwendung für die Milchproduktion. Den höchsten Trockenmasse-Jahresertrag erbrachte die Variante drei Schnitte spät (2).

Biogas aus Betarüben – Zucker- und Futterrüben im Vergleich

PHILIPP STARKE, CHRISTA HOFFMANN

In Biogasanlagen werden vorrangig Energiepflanzen eingesetzt, die einen hohen Trockenmasseertrag pro Hektar liefern, da lediglich die Trockenmasse zur Gasbildung beiträgt. Von Zucker- und Futterrüben sind zwar die Frischmasseerträge bekannt, oftmals aber nicht die Trockenmasseerträge. Auch ist nicht bekannt, wie sich die Trockenmasse der Rüben zusammensetzt und wie hoch die Biogas- und Methanerträge pro Hektar im Vergleich sind.

Um diese Fragen zu klären, wurden zwei Zuckerrübensorten (E- und Z-Typ) und eine Futterrübe in einem Versuch mit variiertem N-Düngung von 0 bis 300 kg N/ha verglichen. In Gärversuchen wurde die Gasbildung dieser Substrate ermittelt. Um Aussagen über die Zusammensetzung von Betarüben zu treffen, wurde weiterhin die Roh Nährstoffzusammensetzung mit der Weender Futtermittelanalyse untersucht.

Zuckerrüben erreichten Trockenmasseerträge von 18 t TM/ha. Die Trockenmasseerträge der Futterrüben lagen mit 15 t TM/ha signifikant darunter. Ein Einfluss durch die N-Düngung auf den Trockenmasseertrag lag nicht vor (Abb. 1). Somit ist bei Zuckerrüben, die als Biogassubstrat genutzt werden, keine erhöhte N-Düngung im Vergleich zu Futterrüben für die Zuckerproduktion erforderlich.

Die Zusammensetzung von Zuckerrüben war geprägt von einem hohen Gehalt an N-freien Extraktstoffen (ca. 90 % d. TM). Weitere Roh Nährstoffe hatten eine untergeordnete Bedeutung (STARKE und HOFFMANN 2011). Im Gegensatz dazu war bei Futterrüben der Gehalt an Rohasche, Rohfaser und Rohprotein erhöht, sodass die N-freien Extraktstoffe nur ca. 80 % der Trockenmasse ausmachten. Neben der Zusammensetzung der Trockenmasse ist auch der Gehalt an Trockenmasse von Bedeutung. Zuckerrüben haben mit 22 % einen deutlich höheren Trockenmassegehalt als Futterrüben (15 %). Die Unterschiede in der Zusammensetzung wirkten sich auch im Verlauf der Biogasbildung aus. Zuckerrüben erreichten bereits nach vier Tagen 90 % der gesamten Gasbildung, Futterrüben hingegen erst nach sechs Tagen (Abb. 2). Über den gesamten Prüfzeitraum von 21 Tagen waren keine Unterschiede im spezifischen Biogasertrag zwischen Zucker- und Futterrüben festzustellen. Im Vergleich zu anderen Biogassubstraten weisen Betarüben eine extrem schnelle Vergärung auf.

Im Biogas- und Methanertrag pro Hektar waren ebenfalls signifikante Unterschiede zwischen Zucker- und Futterrüben festzustellen, die auf Unterschiede im Trockenmasseertrag zurückzuführen sind. Mit über 14000 Nm³ Biogas/ha erreichten die Zuckerrüben 2000 Nm³ Biogas/ha mehr als die Futterrüben. Auch im Methanertrag zeigten sich signi-

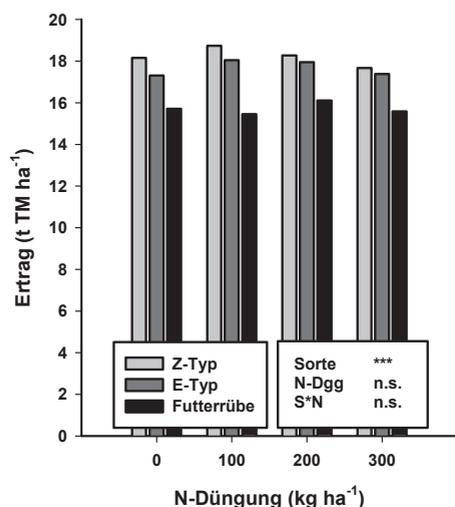


Abb. 1: Rüben trockenmasseertrag von zwei Zuckerrübensorten (E-Typ und Z-Typ) und einer Futterrübe in Abhängigkeit von der N-Düngung (Göttingen, Herbst 2010)

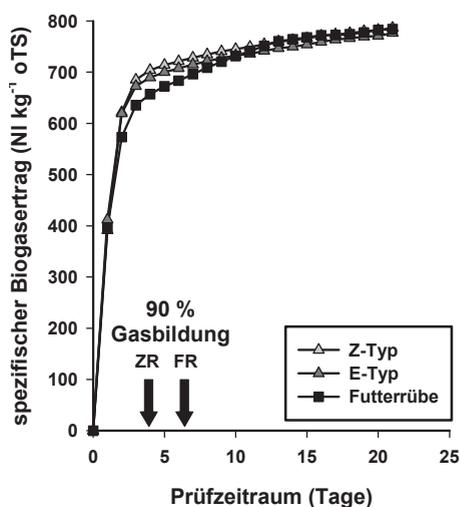


Abb. 2: Kumulierter spezifischer Biogasertrag von zwei Zuckerrübensorten (E-Typ und Z-Typ) und einer Futterrübe (Göttingen, Herbst 2010)

signifikant höhere Erträge bei den Zuckerrüben. Zwischen dem Trockenmasseertrag und dem Biogasertrag besteht eine sehr enge Korrelation (HOFFMANN et al. 2011), sodass die Rüben mit dem höchsten Trockenmasseertrag auch den höchsten Biogasertrag bilden und daher bevorzugt genutzt werden sollten.

Zusammenfassend haben Zuckerrüben beim Einsatz als Biogassubstrat Vorteile gegenüber Futterrüben und sind somit das vorzuziehendere Biogassubstrat.

Literatur

- Hoffmann, C.; Starke, P.; Märkländer, B. (2011): Trockenmasse- und damit Zuckerertrag als Kriterium für den Biogasertrag von Zuckerrüben. Zuckerindustrie (im Druck)
- Starke, P.; Hoffmann, C. (2011): Zuckerrüben als Substrat für die Biogaserzeugung, Zuckerindustrie 136, S. 242–250

Winterrüben für die Biogasanlage – Roh Nährstoffzusammensetzung schossender Zuckerrüben

JENS LOEL, CHRISTA HOFFMANN

Es wird vermutet, dass sich schossende Zuckerrüben gut für die Nutzung in einer Biogasanlage eignen, da sie hohe Trockenmasseerträge in Kombination mit einer guten technischen Qualität für die Biogasnutzung erreichen.

Um dies zu überprüfen, wurde ein Feldversuch mit drei verschiedenen Zuckerrübenhybriden in vier Wiederholungen angelegt. Es wurde erwartet, dass die drei Zuckerrübenhybriden sich in ihrem Schossverhalten unterscheiden. Die Aussaat erfolgte im August 2009. Ab Mai 2010 begannen die Zuckerrüben zu 100 Prozent zu schossen und wurden Mitte Juni geerntet. Es wurde die Trockenmasse erfasst sowie die Roh Nährstoffzusammensetzung von Rübe und Blatt/Schösser mit der Weender Futtermittelanalyse analysiert.

Zwischen den drei Zuckerrübenhybriden gab es keine signifikanten Unterschiede in der Roh Nährstoffzusammensetzung, außer im Rohfasergehalt der Schösser. Im Vergleich zu im Frühjahr gesäten Zuckerrüben haben die schossenden Zuckerrüben geringere Gehalte an N-freien Extraktstoffen (NfE) und höhere Gehalte an Rohasche und Rohfaser in den Rüben sowie geringere Gehalte an NfE und höhere Gehalte an Rohprotein und Rohfaser im Blatt/Schösser. Des Weiteren weisen schossende Zuckerrüben geringere Trockensubstanzgehalte in Rübe und Blatt/Schösser auf als im Frühjahr gesäte Zuckerrüben.

Schossende Winterrüben bestehen somit hauptsächlich aus leicht umsetzbaren Stoffen und sind daher sehr gut vergärbar. Allerdings haben schossende Zuckerrüben im Vergleich zu im Frühjahr gesäten Zuckerrüben eine etwas ungünstigere Qualität im Hinblick auf die Nutzung in der Biogasanlage aufgrund geringerer Trockensubstanzgehalte sowie geringerer Gehalte an leicht fermentierbaren NfE.

Wirtschaftlichkeit des Einsatzes von Grassilage in der Biogasproduktion: Analyse für einen Beispielbetrieb in Südniedersachsen

CARSTEN H. EMMANN, CHRISTOPH GELLERMANN, LUDWIG THEUVSEN

In den letzten Jahren ist die Produktion von Biogas für die Landwirtschaft durch entsprechende politische Rahmenbedingungen interessant geworden. So können Biogas produzierende Landwirte durch einen gesicherten zwanzigjährigen Stromabnahmepreis eine zusätzliche Einkommensquelle für den Betrieb generieren, sofern das Kostenmanagement stimmt. Vor allem steigende Substratkosten und steigende Landpachtpreise verschlechtern jedoch die Wettbewerbsfähigkeit der Biogasproduktion im Vergleich zu anderen Betriebszweigen nachhaltig, da die Biogasproduktion durch einen verhältnismäßig hohen Flächenanspruch und zugleich einen verhältnismäßig geringen Arbeitszeitbedarf gekennzeichnet ist. Aufgrund der regional zunehmenden Konkurrenz um Biomasse und landwirtschaftliche Nutzfläche (primär Ackerfläche), aber auch aufgrund der zunehmenden gesellschaftlichen Ablehnung gegenüber reinen Maismonokulturen scheint es sinnvoll, künftig vermehrt alternative und u. U. kostengünstigere Biomassen als Gärsubstrate in der Biogasproduktion energetisch zu nutzen. Eine Substratalternative stellt in vielen Regionen und auch auf Grünlandgrenzstandorten in Südniedersachsen die Grassilage dar, für die oftmals – u. a. aufgrund der zunehmenden Abwanderung der Rindviehhaltung und des eingeführten Dauergrünlandumbruchverbotes – eine ökonomisch sinnvolle Verwertung fehlt. Obwohl beispielsweise in Niedersachsen der Grünlandaufwuchs von über 10000 ha schon in die Biogasproduktion wandert, ist hier jedoch nach wie vor der Energiemais mit einem Anbauumfang von etwa 180000 ha das Hauptgärsubstrat.

Das Ziel des Posterbeitages ist es daher zu analysieren, inwieweit sich die Grasvergärung für eine Beispielanlage in Südniedersachsen rechnet. Dazu wird für die grasbetonte Biogasanlage die Wirtschaftlichkeit (Unternehmergewinn) in Abhängigkeit von der Vergütungshöhe aus dem Strom- und Wärmeverkauf, den Substratkosten, den Naturalerträgen, den Grünlandpachtpreisen, den Anschaffungskosten und der Grünlandbewirtschaftungsform (extensiv vs. intensiv) untersucht. Zudem wird die Wettbewerbsfähigkeit der Grassilage im direkten Vergleich mit der Maissilage analysiert, um so die maximale Zahlungsbereitschaft für Grünland am Landpachtmarkt in Abhängigkeit von den Silomaispreisen zu bestimmen. Erste vorliegende Ergebnisse deuten an, dass sich aus der Grasvergärung auf Grünlandgrenzstandorten mit Erträgen um 7 Tonnen Trockenmasse je Hektar und Jahr eine adäquate Entlohnung realisieren lässt, wenn relativ geringe Flächennutzungskosten (Differenz zwischen tatsächlicher Grünlandpacht und Flächenprämie) vorliegen.

Aufbereitung und Fermentation von Mais- und Getreidestroh für die Biogaserzeugung

LIANE MÜLLER

Mais- und auch Getreidestroh haben einen hohen Energiewert und einen niedrigen Wassergehalt. Sie sind jedoch für die Verwertung in Verbrennungsanlagen, aufgrund der damit verbundenen Feinstaubbelastung und des Verbrennungsverhaltens (insbesondere hinsichtlich des Ascheschmelzpunktes), weniger geeignet. Daher ist das Ziel des dargestellten Vorhabens, eine energetische Verwertung zu Biogas als interessante Alternative zu untersuchen.

Ausgangspunkt für das Projekt war die Preisentwicklung für Maissilage. Maissilage ist nach wie vor der am häufigsten verwendete nachwachsende Rohstoff für die Biogaserzeugung. Innerhalb der letzten Jahre kam es zu einem starken Anstieg der Maissilagepreise. Aufgrund dieser Entwicklung wurde bzw. ist es erforderlich, nach geeigneten alternativen Einsatzstoffen für die Biogaserzeugung zu suchen.

Ziel des vorliegenden Projekts war die Entwicklung eines neuartigen Verfahrens zur Aufbereitung und Fermentation von Mais- und Getreidestroh für die Biogaserzeugung.

Für die Lagerung und Qualitätssicherung der Einsatzstoffe erfolgten Silierversuche mit Mais- und Getreidestroh. Im Anschluss an die Silierung der Proben wurden diese im diskontinuierlichen Gärversuch untersucht.

Neben den Untersuchungen zur Silierfähigkeit von Mais- und Getreidestroh und deren Auswirkungen auf die Biogasbildung, war der Einfluss der thermomechanischen Substrataufbereitung zu betrachten. Dazu wurde thermomechanisch aufbereitetes Substrat in verschiedenen Gärversuchen untersucht. Im Anschluss an die Laboruntersuchungen kam thermomechanisch aufbereitetes Substrat in einer großtechnischen Biogasanlage zum Einsatz.

In Batch-Versuchen konnte ein Mehrertrag an Biogas durch die thermomechanische Aufbereitung des Mais- und Getreidestrohs gezeigt werden. Eine ausführliche Ergebnisdarstellung der am DBFZ durchgeführten Versuche wird im Poster zu sehen sein.

Das Vorhaben wurde im Rahmen eines Verbundvorhabens durch das „Zentrale Innovationsprogramm Mittelstand (ZIM)“ (FKZ KF2028001RH8) gefördert.

Thermischer Aufschluss von Biogassubstraten bei Temperaturen unter 100 °C

PETRA ZIGLDRUM, JÜRGEN SITZMANN, CAROLA BURKHARD

1 Einleitung

Nutzungskonflikte und steigende Rohstoffpreise fordern zunehmend eine effizientere Verwertung der Biomasse bei der Biogasgewinnung. Dafür scheint ein Aufschlussverfahren der Biomasse unumgänglich. Dieses zielt meist darauf ab, einen Aufschluss der Rohfaserfraktion, der Lignozellulose, zu bewirken und somit die Verfügbarkeit der Nährstoffe für den anaeroben Abbau zu verbessern [1,4,5]. Ein gut funktionierendes und wirtschaftlich sinnvolles Aufschlussverfahren könnte zudem die Auswahl der in Frage kommenden Substrate erweitern. Als mögliches Aufschlussverfahren für Energiepflanzen wurden Versuche zur thermischen Behandlung von Biogassubstraten bei Temperaturen unter 100 °C durchgeführt. Hinweise in der Literatur deuten an, dass der Lignin-Cellulose-Komplex in einem alkalischen Milieu bereits bei Temperaturen unter 100 °C aufgeschlossen werden kann [2,3]. Da Gärsubstrat selbst eine schwache Lauge darstellt, diente folgende Versuchsreihe dazu, den Aufschlusseffekt einer thermischen Behandlung unter 100 °C im alkalischen Milieu des Gärsubstrates zu untersuchen.

2 Material und Methoden

Die Versuche wurden mit den Substraten Weizenstroh, Maissilage und Gärsubstrat durchgeführt. Weizenstroh und Maissilage wurden für den Ansatz mit flüssigem, separiertem Gärsubstrat vermischt, das Gärsubstrat selbst wurde ebenfalls ohne weitere Flüssigkeitszugabe als drittes Substrat getestet. Es wurde nach der ersten Vergärungsstufe und 25 Tagen Verweilzeit einer NawaRo-Biogasanlage entnommen, die mit Gülle, Mist, Maissilage und Grassilage beschickt wurde. Die Substrate wurden in einem gerührten Druckreaktor auf 80 °C bis 95 °C erhitzt. Die Methanbildung wurde mittels Batch-Gärtests nach VDI-Richtlinie 4630 über einen Zeitraum von 28 Tagen ermittelt (Abb. 1).

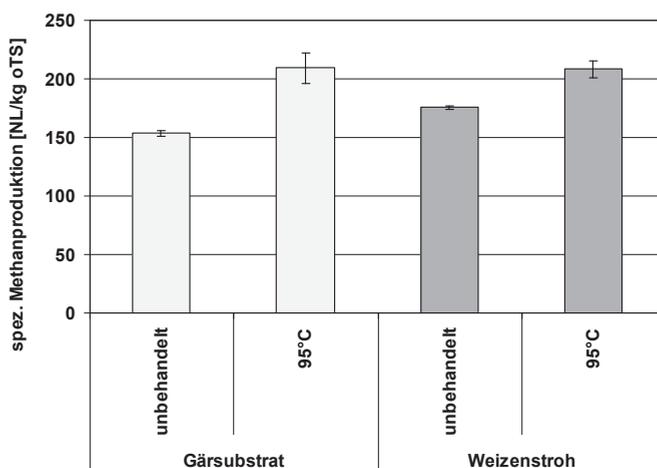


Abb. 1: Spezifische Methanerträge des unbehandelten und erhitzten Gärsubstrates und Weizenstroh nach 28 Tagen anaerober Vergärung in Batchversuchen

3 Ergebnisse

Die Gärversuche mit erhitzten Substraten ergaben eine Erhöhung des spezifischen Methanertrags um bis zu 36 % von 154 l_N/kg oTS auf 209 l_N/kg oTS für auf 95 °C erwärmtes Gärsubstrat und 19 % von 176 l_N/kg oTS auf 208 l_N/kg oTS für auf 95 °C erwärmtes Weizenstroh im Vergleich mit den unbehandelten Varianten. Bei Maissilage konnte keine Steigerung des Methanertrages verzeichnet werden.

Die Ergebnisse zeigen, dass die Erwärmung von Stroh in Biogasgülle und Gärsubstrat selbst im leicht alkalischen Gärmilieu auf unter 100 °C die spezifische Methanproduktion der Substrate wesentlich erhöhen kann und einen Aufschluss faserreicher Substrate wie Weizenstroh und Gärsubstrat bewirken kann. Die Anwendung dieses thermischen Aufschlusses scheint daher besonders für die faserreichen Substrate von NawaRo-Biogasanlagen geeignet. Um das Aufschlussverhalten zusätzlicher Substrate zu testen, müssten weitere Versuchsreihen durchgeführt werden.

Literatur

- [1] Amon, T., et al. (2006): Optimierung der Methanherzeugung aus Energiepflanzen mit dem Methanenergiewertsystem. Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie, Wien

- [2] Carrère, H., et al. (2009): Improving pig manure conversion into biogas by thermal and thermo-chemical pretreatments. *Bioresource Technology* 100, S. 3690–3694
- [3] Fernandes, T.V., et al. (2009): Effects of thermo-chemical pretreatment on anaerobic biodegradability and hydrolysis of lignocellulosic biomass. *Bioresource Technology* 100, S. 2575–2579
- [4] Hendriks, A.T.W.M.; Zeeman, G. (2009): Pretreatment to enhance the digestibility of lignocellulosic biomass. *Bioresource Technology* 100, S. 10–18
- [5] Mosier, N., et al. (2005): Features of promising technologies for pretreatment of lignocellulosic biomass. *Bioresource Technology* 96, S. 673–686

Methanertrag und Energiebilanz der Bioextrusionsvorbehandlung von Grünabfällen als Biogassubstrat

RAINER BOLDUAN, MATHIEU BRULÉ, TATIANA DEMEUSY, PASCAL SCHLAGERMANN, GEROLD GÖTTLICHER, STEFFEN EISSLER, HANS OECHSNER

1 Einleitung und Hintergrund

Eine Substratvorbehandlung zur Optimierung der Verdaulichkeit und folglich der Biogasproduktion schwer abbaubarer Substrate (mit hohem Faser- bzw. Ligninanteil) kann z. B. über eine Reduzierung der Partikelgröße erreicht werden, wie es die Bioextrusion® ermöglicht. Grünabfälle als schwer abbaubare Substrate können aufgrund ihrer geringen Substratkosten ein interessantes Biogassubstrat darstellen, wenn ihre Substrateignung erhöht werden kann.

In dieser Studie wurde daher der Einfluss der Bioextrusion® auf die Vergärbarkeit von Grünabfällen getestet. Um die energetische Effizienz dieser Methode zu beurteilen, wurden sowohl der Energiebedarf der Vorbehandlung als auch der zusätzliche Energiegewinn aufgrund der Steigerung der Biogasproduktion berücksichtigt.

Die Untersuchungen wurden im Rahmen einer Studie für EnBW Energie Baden-Württemberg AG und Erdgas Südwest GmbH durchgeführt.

2 Material und Methoden

Folgende Substrate wurden verwendet:

- Kommunales Straßenbegleitgrün: Intensivmähd, min. 4 Schnitte/Jahr; TS-Gehalt: 12,5 %; Ligninanteil: 5 %; angegoren
- Grünschnitt: Heckenschnitt und Laub der Landschaftspflege eines Campingplatzes; TS-Gehalt 55,5 %; Ligninanteil 13 %

Beide Substrate wurden mit einem Bioextrusion®-Modul mit 55 kW elektrischer Leistung behandelt. Nach der Extrusion wurden die Proben gekühlt zur Untersuchung in das Biogaslabor der Universität Hohenheim gebracht. Der substratspezifische Energiebedarf wurde gemessen und auf den Gehalt an organischer Trockensubstanz (oTS) der jeweiligen Substrate bezogen.

Batchgärversuche wurden bei 37 °C über eine Dauer von 35 Tagen in 2-L-Batch-Fermentern nach VDI 4630 durchgeführt, um die oTS-spezifischen Methanerträge zu ermitteln.

Aus der Differenz der spezifischen Methanerträge der extrudierten und nicht extrudierten Variante wurde die durch Extrusion erreichte Steigerung der Methanausbeute bestimmt (Abb. 1). Der zusätzliche Energiegewinn wurde bei Annahme eines durchschnittlichen elektrischen BHKW-Wirkungsgrads (38 %) ermittelt und dem Energiebedarf der Vorbehandlung gegenübergestellt. Die erzielten oTS-Werte wurden auf die Frischmasse (FM) der jeweiligen Substrate umgerechnet.

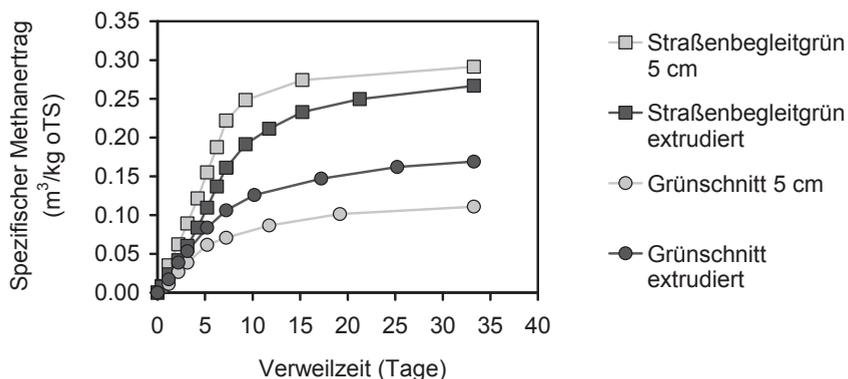


Abb. 1: Normierte Summenkurven der Methanproduktion von extrudiertem und nicht extrudiertem Straßenbegleitgrün und Grünabfall

Tab. 1: Energiebilanz der Bioextrusion von Straßenbegleitgrün und Grünabfall

Probe	Energiebedarf der Extrusion kWh _{el} /t FM	Zusätzlicher Energiegewinn nach BHKW-Verstromung kWh _{el} /t FM	Energiebilanz kWh _{el} /t FM
Straßenbegleitgrün	15	-8	-23
Grünschnitt	75	+124	+49

3 Fazit

Für Grünschnitt wurde trotz zusätzlichen Energiebedarfs eine positive Energiebilanz der Bioextrusion® festgestellt. Im Gegensatz dazu zeigte Straßenbegleitgrün trotz des deutlich geringeren Energieaufwands für die Extrusion einen negativen Einfluss auf den Methanertrag resultierend in einer negativen Energiebilanz (Tab. 1). Vermutlich traten insbesondere nach der Extrusion des nassen und angegorenen Substrats (Straßenbegleitgrün) verstärkte mikrobielle Atmungsverluste und höhere Verluste an flüchtigen Be-

standteilen auf, die sich während des Transports bis zum Untersuchungslabor verstärkt haben können (geringere Essigsäuregehalte bei Messung von extrudiertem Material). Um solche Verluste zu vermeiden und eine positive Energiebilanz durch die Bioextrusion zu erhalten, wird in der Praxis die Biogasanlage unmittelbar nach der Extrusion mit den behandelten Substraten beschickt.

Mögliche weitere positive Effekte für einen Biogasanlagenbetrieb, wie die Reduzierung von Schwimmschichten und Rührenergie, konnten nicht berücksichtigt werden.

Die Bioextrusion ist eine vielversprechende Methode zur Vorbehandlung von Grünabfällen für die direkte Beschickung des Fermenters.

Mehr Methan pro Hektar durch Bioextrusion®

THILO LEHMANN

1 Ziel

Die Anzahl der Biogasanlagen ist in Deutschland sehr stark angestiegen. Laut Biogas Fachverband e.V. gibt es momentan in Deutschland etwa 6000 Anlagen. Die Suche nach sinnvoll nutzbaren Substraten ist im vollen Gange. Der Einsatz von Hybridroggen-Ganzpflanzensilage ist in der Praxis weit verbreitet. Bisherige Untersuchungen zu Hybridroggen liegen in der Regel nur bis zu einem Trockensubstanzgehalt (TS) von 35 % als Zwischenfrüchte und Ganzpflanzensilage (GPS) vor. Durch das entwickelte Verfahren der Bioextrusion® besteht die Möglichkeit Hybridroggen-GPS bis 70 % TS zu ernten und zu verarbeiten. Auf mehrjährige Ergebnisse zur Verwertung von Hybridroggen-GPS bis 70 % TS unter Einsatz des Aufschlussverfahrens kann bereits verwiesen werden. Eine Biogasanlage, aktuell erweitert auf 320 kW_{el}, setzt seit 2008 Hybridroggensilage (70 % TS) mit einem Anteil größer 50 % der Eingangssubstrate erfolgreich ein.

2 Erntereifer Hybridroggen bringt Vorteile

Bedenken, dass 10 Tage vor der eigentlichen Ernte die eingefahrene Ganzpflanze aufgrund der hohen Trockensubstanz nicht siliert werden kann, haben sich nicht bestätigt. Dabei wurde der Hybridroggen für die Silage auf ca. 4 cm Länge grob zerkleinert und beim Häckseln bereits gequetscht. Mittels Bioextrusion® erfolgt dann vor Einbringung in den Fermenter der Aufschluss. Das strohähnliche Material schwimmt nicht auf und die Rührwerke beherrschen sicher den Biogasbildungsprozess. Der Betreiber mischt im Dosierer die Ganzpflanzensilage mit feuchten Silagen wie Mais, Grünschnittroggen-GPS, Gras u. a.

Neben dem Mais als Energiepflanze erzielt der Hybridroggen hohe Trockenmasseerträge und auch org. TS-Gehalte. Im konkreten Beispiel aus dem Vogtland (Vorgebirgsland 350–600 m Höhe, Plauener Trockenbecken; Durchschnittsbodenwerte: 35 Bodenpunkte) wird verdeutlicht, dass der Hybridroggen (extrudiert) gegenüber Mais (extrudiert) aufgrund des hohen TS-Gehaltes einen Mehrertrag von ca. 1.350 €/ha in Form von Stromertrag erwirtschaftet (Tab. 1). Der Hybridroggen als Winterfrucht nimmt für den Aufwuchs die winterliche Feuchte in Anspruch und liefert gesichert hohe Erträge. Dies ist aufgrund der Auswirkungen des Klimawandels äußerst relevant.

Ein reduzierter Logistikaufwand spart Kosten, da weniger Feuchte in die Anlage eingebracht wird bzw. aufs Feld auszubringen ist – kleinere Gärrestbecken sind die Folge. Der Bodenwert wird durch freie Fruchtfolge verbessert; die Humus- und Nährstoffbilanz des Bodens verbessert sich wesentlich. Darüber hinaus ist der Zwischenfruchtanbau aufgrund des Saat- und Erntetermins eine weitere Alternative.

Tab. 1: Mehrertrag Hybridroggen (70 % TS) gegenüber Mais

	Einheit	Hybridroggen	Mais	Mais	Vorteil Hybridroggen
		GP-Silage extrudiert	Silage unbehandelt	Silage extrudiert	
Ernteertrag	t FM/ha	20,3	40,0	40,0	
TS-Gehalt	%	70,0	30,0	30,0	
oTS-Gehalt	% von TS	94,0	94,7	94,7	
Ernteertrag	t oTS/ha	13,36	11,36	11,36	
Methanausbeute	Nm ³ /t oTS	366,0 ¹⁾	255,0 ²⁾	290,0 ²⁾	
Methanausbeute	Nm ³ /ha	4 888,80	2 897,82	3 295,56	+ 1 593,24
Bruttoenergie bei 9,97 kWh/m ³ Methan	kWh	48 741,42	28 891,27	32 856,73	+15 884,69
Elektr. Wirkungsgrad von 38,6 %	kWh	18 814,19	11 152,03	12 682,70	+ 6 131,49
Einspeisevergütung (0,22 €/kWh)	€/ha	4.139,12	2.453,45	2.790,19	+ 1.348,93

1) Mittelwert aus Laborberichten des Labors Oberfranken zur Biogasproduktivität v. Hybridroggen.

2) Brückner, C.; Weiss, D.; Mildner, U. (2007): Mundgerechtere Bakterienkost. Bauernzeitung 47/2007.

3 Hintergrund

Das im Hause LEHMANN entwickelte Verfahren der Bioextrusion® erfolgt durch hydrothermalen Aufschluss und ist für ligninhaltige, trockene strukturreiche Substrate wie Stroh, Heu, Miscanthus, Schwachholz geeignet. Dies unterscheidet die Technik von der üblichen Zerkleinerung. In einem Doppelschneckenextruder wird durch Druck und höhere Temperatur, bedingt durch wechselnde Belastung und mehrfache Druck-/Entspannungszyklen im Gerät, das Substrat nicht nur zerkleinert, sondern teilweise bis in die Zellstruktur aufgeschlossen. Durch die sehr vergrößerte Oberfläche erreicht man eine bessere biochemische Verfügbarkeit, der Biogasertrag wird gesteigert und es finden Prozesse der Grenzflächenmechanik statt. Es kommt zur Bildung neuer Bakterienstämme und zu einer Verbesserung des C/N-Verhältnisses, da auch Zellulose und Hemizellulose aufgeschlossen und von den einbindenden Ligninschichten freigesetzt wird. Der Ausfallgrad (Wirkungsgrad) verbessert sich auch bei Nachrüstung signifikant.

Literatur

Brückner, C.; Weiss, D.; Mildner, U. (2007): Mundgerechtere Bakterienkost. Bauernzeitung 47/2007

Lehmann, T.; Gläser, S., (2009): Innovative Biogaserzeugung mit gesteigertem Wirkungsgrad durch hydrothermale Aufbereitung – Bioextrusion – von NAWARO als Gärsubstrat und Verfahrensnachweis an einer Versuchsanlage in Containerform mit 1t/d Durchsatzleistung (ca. 20 kW_{el}). Abschlussbericht, gefördert von BMELV und FNR (Fördernummer 22029705)

Monofermentation von Maissilagen aus Standorten unterschiedlicher Bodenbeschaffenheit

GARNET WACHSMANN, ANDREAS KRIEG, GERD-RAINER VOLLMER

1 Ziel des Verbundvorhabens

Ziel des von der FNR geförderten Verbundvorhabens (2008–2011) (FKZ: 22002908/22014308) war, die Ursachen des in der Praxis beobachteten Rückganges der Biogasproduktion bei der Monofermentation von Maissilagen festzustellen. Dabei sollte am Beginn der technologischen Kette angesetzt werden und zwar der Mikronährstoffversorgung der Pflanze in Abhängigkeit der chemischen und biologischen Verfügbarkeit.



Abb. 1: Untersuchungsstandorte des Verbundvorhabens

2 Versuchsablauf

Transfer Boden-Pflanze

Mais ist ein Exkluder mit Ausnahme des Elementes Bor am Standort in Schleswig-Holstein (Tab. 1). Beim Exkluder liegen die Pflanzengehalte deutlich unter den Bodengehalten, weil der Substanzaufnahme wirksame Barrieren entgegenstehen.

Tab. 1: Transferfaktor¹⁾ Boden-Pflanze (Mais)

	Cobalt	Kupfer	Nickel	Bor	Zink	Mangan	Eisen
Schleswig-Holstein	0,48	0,54	0,083	1,19	0,6	0,1	0,004
Bayern	0,23	0,33	0,012	0,41	0,4	0,07	0,0016
NRW	0,18	0,29	0,028	0,63	0,3	0,03	0,003
Brandenburg	0,02	0,23	0,025	0,54	0,5	0,02	0,0187

¹⁾ Als Transferfaktor wird der Quotient aus dem Gesamtgehalt [mg/kg TS] eines Elementes in der Pflanze und dem Gesamtgehalt (Königswasserausug) im Boden bezeichnet (LÜBBEN und SAUERBECK 1991)

Biogasprozess

In quasikontinuierlichen Gärversuchen wurden Maissilagen hinsichtlich Biogaspotenzial und Spurenelementdynamik in Langzeituntersuchungen im Laborfermenter (8 Liter Nutzvolumen) untersucht.

3 Fazit

- Nicht Spurenelementmangel im Boden, sondern die Energiepflanze Mais ist die Ursache für den Spurenelementmangel bei der Monofermentation, da es sich um einen Exkluder handelt. Dieser Mangel kann daher auch nicht durch eine direkte Bodendüngung ausgeglichen werden. GRANSEE (2000) sieht die Ursache in der Wurzelabscheidung (Exudation) von Mais, da dieser nur in der Lage ist schwache Milchsäuren und z. B. keine Zitronensäure auszuscheiden.
- Die Laboruntersuchungen ergaben, dass es keinen Zusammenhang zwischen Spurennährstoffkonzentration der eingesetzten Maissilagen und der Fermenterkonzentration gab. Anlagenbetreiber müssen für jeden einzelnen Spurennährstoff die Minimalkonzentrationen ermitteln und Defizite spezifisch ausgleichen. Der Vergleich mit ersten Literaturangaben (PROBEHEIM, 2010) zeigt für alle untersuchten Standorte eine Unterversorgung von Cobalt. Eine Überversorgung der Fermenter ist aus umweltrelevanter Sicht kritisch zu sehen.

Literatur

Granse, A.; Jäger, R.; Fründ, H.-C.; Merbach, W. (2000): Mobilisierung von Cadmium im Boden durch Wurzelabscheidungen von Mais und Spinat. Fachhochschule Osnabrück, Inst. für Bodenkunde und Pflanzenernährung, Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg

- Lübben, S.; Sauerbeck, D. (1991): Transferfaktoren und Transferkoeffizienten für den Schwermetallübergang Boden-Pflanze. Forschungszentrum Jülich GmbH, Berichte aus der ökologischen Forschung 6, pp. 180–223
- Probeheim, H.; Munk, B.; Johannsson, J.; Guebitz, G.M. (2010): Influence of trace elements on methane formation from a synthetic model substrate for maize silage. *Bioresource Technology* 101, pp. 836–839

Praxisversuch zur Steigerung der Faulraumbelastung in landwirtschaftlichen Biogasanlagen bis 19,4 kg oTS/(m³ · d)

PETRA ZIGLDRUM

An einer landwirtschaftlichen Biogasanlage wurde ein Praxisversuch zur Steigerung der Faulraumbelastung in Fermenter 1 von anfänglich 10 kg oTS/(m³ · d) auf durchschnittlich 19,4 kg oTS/(m³ · d) durchgeführt. Die Biogasanlage mit einer installierten Leistung von 2 MW_{el.} besteht aus 2 Fermentern, mit je 1 275 m³ Faulraum, einem Nachgärer und einem Gärrestelager. Die Fütterungssteigerung fand in einem Zeitraum von 13 Wochen statt. Die Inputsubstrate waren Rinder- und Schweinegülle, Rindermist, Maissilage, Grassilage und Getreide. Des Weiteren wurden täglich anorganische Spurenelemente und Eisenadditive zugeführt. In wöchentlichem Abstand wurde das Gärsubstrat von Fermenter 1 zur prozessbiologischen Kontrolle auf die Konzentration an kurzkettigen Carbonsäuren und den Trockensubstanzgehalt untersucht (Abb. 1).

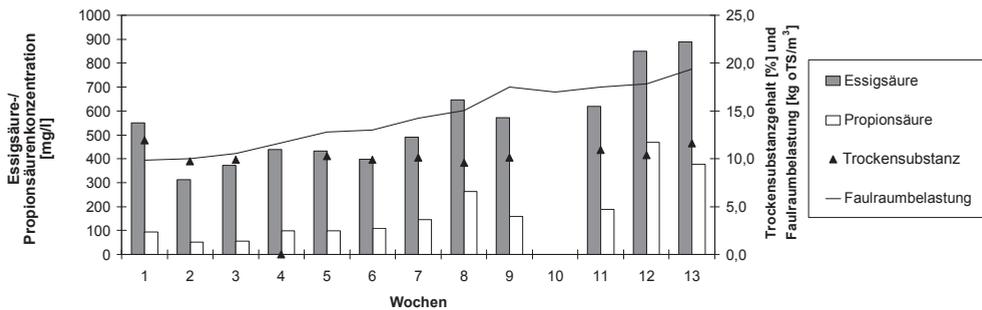


Abb. 1: Verlauf der Faulraumbelastung und der Konzentrationen an Essigsäure, Propionsäure und Trockensubstanz in Fermenter 1

Die Konzentrationen von Essig- und Propionsäure erreichten maximale Werte von 889 mg/l bzw. 469 mg/l. Die Gärversuche nach VDI 4630 mit Gärrest aus Fermenter 1 in KW 13 ergaben ein Methanbildungspotenzial, das bei 205 l_N CH₄/kg oTS um lediglich 3,5 % größer ist als das zu Versuchsbeginn mit 198 l_N CH₄/kg oTS, trotz einer Verkürzung der hydraulischen Verweilzeit von 22 auf 11 Tage. In der 13. Versuchswoche wurde das Experiment aufgrund technischer Störungen beendet. Die durchweg stabilen prozessbiologischen Analysewerte deuten auf ein bei landwirtschaftlichen Biogasanlagen meist noch ungenutztes Potenzial bezüglich hoher Faulraumbelastungen hin.

Biologische Aktivität und Spurenelementkonzentrationen in Biogasfermentern

NILS ENGLER, UTE MERRETTIG-BRUNS, ADAM FEHER, THOMAS FRITZ,
MICHAEL NELLES

1 Hintergrund und Projektziele

In einem durch die AIF geförderten gemeinsamen Forschungsvorhaben unter Leitung des Fraunhofer Instituts UMSICHT, Oberhausen mit der FH Göttingen, Fachgebiet NEUTec und der Universität Rostock, Lehrstuhl für Abfall- und Stoffstromwirtschaft, wurde ein Testverfahren entwickelt, welches eine vergleichende Quantifizierung der Abbauleistung der Fermenterbiologie ermöglicht. Nach den Standorten der drei Projektpartner wurde das Verfahren Oberhausen-Rostock-Göttinger Aktivitätstest – kurz ORGA-Test – genannt.

Im Rahmen des Vorhabens wurden 39 Biogasanlagen (BGA) in Mecklenburg-Vorpommern, Niedersachsen und Nordrhein-Westfalen beprobt und mit dem ORGA-Test untersucht. Parallel dazu wurden umfangreiche Analysen der Fermenterproben mit besonderem Schwerpunkt auf Spurenelementkonzentrationen durchgeführt.

2 Material und Methoden

Für den ORGA-Test wird das Gas Production System der Firma ANKOM eingesetzt. Das Verfahren beruht auf der Messung des Druckanstiegs in einem konstanten Volumen bei konstanter Temperatur.

Der Test ist als Batch-Test mit standardisierten Randbedingungen konzipiert. Abweichend von der üblichen Fragestellung ist in diesem Fall nicht das zugegebene Substrat, sondern die Fermenterprobe selbst der Untersuchungsgegenstand. Es wird die Biogasbildung aus einem standardisierten Substrat bei vorgegebenen Versuchsbedingungen (Anfangsbelastung, Temperatur, Rührintervalle usw.) in hoher zeitlicher Auflösung gemessen. Durch die Verwendung geeigneter, standardisierter Substrate ist eine selektive Untersuchung der einzelnen Phasen des anaeroben Abbaus möglich. Als Substrate kommen zum Einsatz:

- Acetat (zugegeben als Essigsäure): direkt für die methanbildenden Mikroorganismen verfügbar. Aus der Kinetik des Acetatumsatzes sind Rückschlüsse auf die Leistungsfähigkeit dieser Mikroorganismen möglich.

- Reine Maisstärke als gut abbaubares Substrat für hydrolysierende und säurebildende Mikroorganismen eignet sich zur Untersuchung der gesamten Reaktionskette.
- Für das Verbundvorhaben wurde eine Großcharge Maissilage getrocknet und gemahlen. Diese steht als praxisnahes Komplexsubstrat an den drei Forschungsstellen langfristig zur Verfügung.

Die typischen Verläufe der Biogasbildung aus den Standardsubstraten sowie die eingeführten Kriterien zur Quantifizierung der Versuchsergebnisse sind in Abbildung 1 dargestellt.

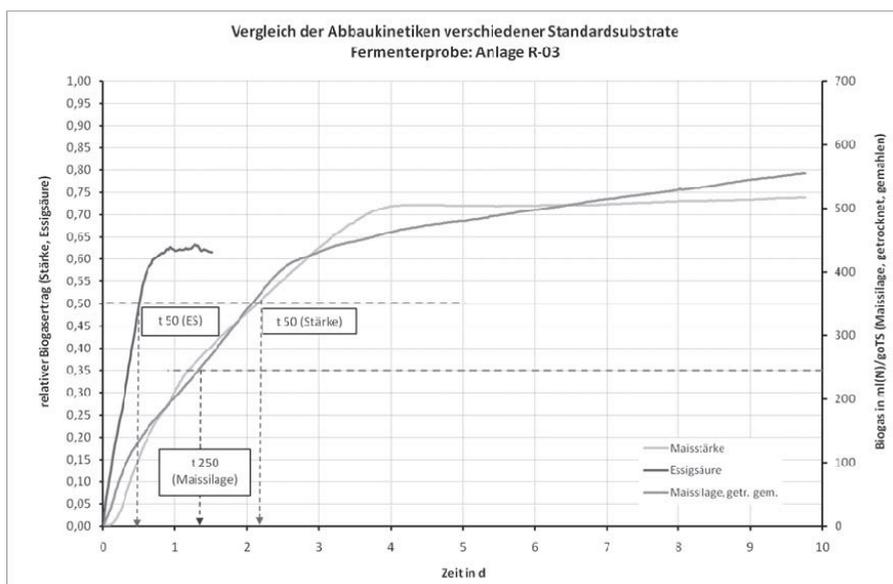


Abb. 1: Vergleich der Abbaukinetiken der verwendeten Standardsubstrate und Bewertungskriterien

3 Ergebnisse des Anlagenscreenings

Die begleitende Analytik der Fermenterproben lieferte umfangreiches Datenmaterial zu Makronährstoff- und Spurenelementkonzentrationen in den betreffenden Fermentern.

Die Auswertung der Abbaukinetik in Verbindung mit den parallel erfassten Spurenelementkonzentrationen ergab Hinweise auf Zusammenhänge zwischen Abbauaktivität und der Spurenelementversorgung. Die Abbauaktivitäten können jedoch nicht direkt mit dem Gehalt eines spezifischen Spurenelementes korreliert werden, da eine Verringerung der biologischen Aktivität oft durch mehrere, gleichzeitig auftretende Mangelfaktoren verursacht wird.

Die Untersuchung der Abbauaktivität mit den Substraten Maissilage und Essigsäure ergab einen Einfluss durch Mangel der Makroelemente Eisen und Natrium. Während Eisen als Nährstoffelement offenbar von der gesamten anaeroben Nahrungskette benötigt wird, scheint Natrium eher für die methanogenen Essigsäureverwerter am Ende der Nahrungskette von Bedeutung.

Innerhalb der Palette der untersuchten Spurenelemente erwiesen sich Nickel und Cobalt als wichtigste Mangelfaktoren in Zusammenhang mit der biologischen Abbauaktivität bei Maissilage und Essigsäure. Die Ergebnisse der ORGA-Tests mit Substrat Maissilage geben Hinweise auf eine Beeinträchtigung der Abbauaktivität der gesamten Nahrungskette bei einem Mangel an Nickel. Bei Cobalt wurde ein Einfluss auf die Essigsäure verwertenden Methanbildner festgestellt, deren Aktivität bei sinkenden Cobaltkonzentrationen verringert ist.

4 Ausblick

Das entwickelte Testverfahren hat sich als geeignete Methode für eine schnelle und praxisrelevante Beurteilung der biologischen Aktivität erwiesen. Derzeit sind Versuche an Praxisanlagen in Vorbereitung, bei denen eine Dosierung von Spurenelementpräparaten mit dem ORGA-Test vor Ort begleitend untersucht werden soll.

Das IGF-Vorhaben 16103 BG der Forschungsvereinigung Verein zur Förderung der Energie- und Umwelttechnik e.V. –VEU, Bliersheimer Straße 60, 47229 Duisburg wurde über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der industriellen Gemeinschaftsforschung und -entwicklung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

Spurenelemente in Biogasanlagen: Eine ausreichende Versorgung durch Zufuhr unterschiedlicher Energiepflanzenmischungen oder Gülle ist möglich

BENEDIKT SAUER, HANS RUPPERT

Im Zeitraum 2006/2007 wurden Elementdaten der Inputsubstrate des Fermentermaterials und des Gärrestes der Biogasanlage in Jühnde und in Obernjesa bei Göttingen (Niedersachsen) über zwei bzw. ein Jahr lang geochemisch untersucht (SAUER 2009). Die Biogasanlage in Obernjesa, die damals nur mit Pflanzensilage gefüttert wurde, zeigte in diesem Zeitraum deutlich geringere Biogasausbeuten als theoretisch möglich gewesen wären. Als Ursache wurden fehlende Spurenelemente vermutet, die im Fermenter Obernjesa deutlich geringere Konzentrationen gegenüber dem Fermenter in Jühnde aufwiesen. In Jühnde wurde der Fermenter mit Rindergülle, Maissilage, Ganzpflanzensilage und Graspilage gefüttert. Die Spurenelemente in Jühnde stammen zum überwiegenden Teil aus der Rindergülle. Tatsächlich konnte die Biogasausbeute in Obernjesa durch die kontinuierliche Zugabe eines Spurenelementcocktails verbessert und dann stabilisiert werden. Interpretationen der Elementdaten der Fermenter legen nahe, dass es zumindest an Cobalt und Nickel in Obernjesa mangelte. Weiter ergab sich, dass ab einer Konzentration von 0,07 g/m³ Cobalt und 0,33 g/m³ Nickel im feuchten Fermentermaterial eine optimale Biogasausbeute möglich sein sollte.

Die pauschale Zugabe von Spurenelementcocktails in Biogasanlagen birgt aber Risiken:

- Unterdosierung – kein positiver Effekt trotz Kosten und Aufwand
- Überdosierung – toxische Wirkung auf Bakterien und Archeen
- Belastung des Bodens durch Aufbringung belasteter Gärreste
- Gesundheitsgefahr bei Einatmen oder Verschlucken beim Hantieren durch den Anwender mit schwermetallreichen Pulvern oder Lösungen

Auf jeden Fall ist eine begleitende Analyse des Fermentermaterials nötig und das Minimierungsgebot (minimalster Einsatz bei größter Gasausbeute) sollte befolgt werden.

Aktuell läuft am IZNE ein Forschungsprojekt, in dem unterschiedliche potenzielle Energiepflanzen auf zehn unterschiedlichen Böden aus Niedersachsen im Hinblick auf ihre Elementaufnahme getestet werden. Gefördert wird das Projekt durch das Ministerium für Wissenschaft und Kultur Hannover. Diese Daten liefern wertvolle Erkenntnisse für eine bessere Spurenelementversorgung von Biogasanlagen durch verschiedene Energiepflanzen. Tabelle 1 gibt einen Auszug der Elementdaten des Standortes Trögen.

Tab. 1: Cobalt- und Nickelkonzentrationen im Boden und in ausgewählten untersuchten potenziellen Energiepflanzen in mg/kg bezogen auf die Trockensubstanz (Standort: Trögen)

	Cobalt	Nickel
	mg/kg TS	
Boden Trögen	7	30
Triticale Tulus	< 0,02	0,4
Roggen Vitallo	0,02	0,2
Zuckerhirse Maja	0,03	0,4
Mais Padrino	0,03	0,2
Mais Amadeo	0,03	0,7
Sommerweizen Duramar	0,04	0,6
Inkernatklée Heusers	0,06	1,2
Sonnenblume Salut	0,07	1,3
Gerste Christelle	0,09	0,2
Durchwachsene Silphie	0,10	1,3
Weidelgras Gisel	0,10	0,3
Zottelwicke Welta	0,37	0,4
Amaranth spec.	0,44	1,7

Es ist deutlich zu erkennen, dass die Maissorten Padrino und Amadeo mit 0,03 mg/kg TS zu den Kulturen gehören, die sehr wenig Cobalt aufnehmen. Gerste Christelle, Durchwachsene Silphie und Weidelgras Gisel nehmen das 3-Fache an

Cobalt auf (0,09–0,10 mg/kg TS). Zottelwicke Welta und Amaranth spec. bauen mehr als das 10-Fache an Cobalt (0,37 bzw. 0,44 mg/kg TS) in ihre oberirdischen Pflanzenteile ein.

Nach diesen Erkenntnissen bietet sich die Chance, eine ausreichende Spurenelementversorgung über eine angepasste Energiepflanzenzusammenstellung zu gewährleisten – ohne einen Einsatz von Spurenelementcocktails. Beispielhaft würde man die oben genannten Schwellenwerte für Cobalt und Nickel am Standort Trögen erreichen, wenn man eine Mischung aus 60 % Mais, 24 % Amaranth, 10 % Zottelwicke und 6 % Weidelgras füttern würde. Wollte man nur Mais und Gülle füttern, so wären 77 % Mais und 23 % Rindergülle (2,7 mg/kg Cobalt TS, 7,7 mg/kg Nickel TS) nötig, um ausreichend Cobalt und Nickel über die Gülle in den Fermenter zu bringen.

Literatur

Sauer, B. (2009): Elementgehalte und Stoffströme bei der Strom- und Wärme-gewinnung im Bioenergie-dorf Jühnde. Schriftenreihe Fortschritt neu denken, Heft 2, Göttingen

Biomasserückhaltung mithilfe magnetischer Aufwuchsträger

PATRICE RAMM, CARSTEN JOST, JAN MUMME, ELISABETH NEITMANN,
ULRICH SOHLING, FRIEDRICH RUF, KARL WEINBERGER, OLIVER MENHORN

1 Aufgabenstellung

Der Einsatz von Mikroorganismen ist sehr vielfältig. Prozesse, die auf dem Einsatz von Mikroorganismen basieren, sind wichtig für die Herstellung von Biokraftstoffen und Biogas sowie chemischer Grundstoffe und Feinchemikalien. Es ist attraktiv, Mikroorganismen, die lange Regenerationszeiten und damit einen hohen Wert besitzen, zu gewinnen, z. B. immobilisiert in einem Biofilm auf einem geeigneten Träger.

2 Verfahren

Eine Möglichkeit ist die Verwendung magnetischer Partikel als Träger für Mikroorganismen. Dadurch ist eine elegante Abtrennung und Rückgewinnung mithilfe magnetischer Felder möglich. Die Ausbildung stabiler Biofilme auf den Partikeln ist eine notwendige Voraussetzung für dieses Verfahren. Als neuartige Aufwuchsträger für Mikroorganismen wurden magnetische Schaumglaspartikel (MSGPs) mit Partikelgrößen im Bereich von 0,1 Millimeter bis zu einigen Millimetern entwickelt. Die Dichte der MFPGs kann durch entsprechende Modifikationen des Herstellungsprozesses eingestellt werden. Bei der Anwendung in Biogasreaktoren sollte die Dichte ungefähr 1 g/cm betragen, um eine gleichmäßige Verteilung zu erreichen.

3 Erprobung des Verfahrens

Die MFPGs wurden mithilfe von zwei identischen Laborfermentern untersucht; das Substrat Zuckerrübensilage wurde unter mesophilen Bedingungen vergoren. In einem Fermenter wurden MFPGs eingesetzt, der andere Fermenter diente als Referenz ohne MFPGs. Beide Fermenter wurden unter ansteigender Raumbelastung parallel betrieben. Die Ausbildung stabiler Biofilme auf den MFPGs bewirkte einen spürbaren Effekt auf die Fermentationsleistung (Daten werden im Poster dargestellt). Die Besiedlung der Partikel mit Biogas erzeugenden Organismen konnte mithilfe der Lichtmikroskopie bestätigt werden.

Betone für biogenen Säureangriff im Landwirtschaftsbau

ANDREAS KÖNIG, FRANK DEHN

Für die ansteigende Anzahl an Biogasanlagen (BGA) gibt es aufgrund der noch jungen Entwicklungsgeschichte und der meist fehlenden Zugangsmöglichkeit in die Bauwerke bisher keine umfassenden Erfahrungen zu den ablaufenden Schädigungsprozessen. Derzeit werden im Rahmen eines groß angelegten Forschungsvorhabens an der MFPA Leipzig GmbH/Universität Leipzig die Schädigungsprozesse in BGA an bereits geschädigten Stahlbetonbauwerken (Fahrsiloanlagen, Fermenter, Gärrestlager) quantifiziert. Zusätzlich werden durch die Einlagerung von Betonproben in vier Modellfermentern am DBFZ und in einem Fermenter, jeweils in der Gas- und in der Flüssigkeitsphase, die Schädigungspotenziale bekannter stofflicher Zusammensetzung analysiert und bewertet. Dabei werden die chemisch/mineralogischen sowie physikalisch/mechanischen Materialeigenschaften unter Verwendung verschiedener Methoden, Lichtmikroskopie, SEM+EDX, XRD, DTA/TG, sowie nasschemischer Nachweise und Festigkeitsprüfungen verifiziert. Die Untersuchungen geben Hinweise über ablaufende Schädigungsprozesse, den Schädigungsgrad und die Schädigungstiefe sowie die restliche Nutzungsdauer der Bauwerke.

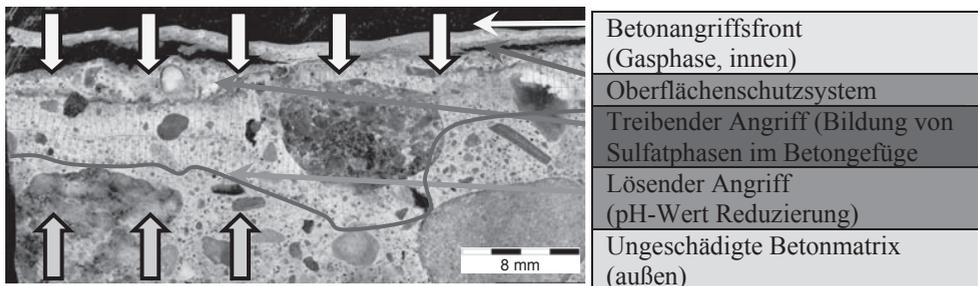


Abb. 1: Mikroskopische Aufnahme eines geschädigten Fermenterwandquerschnittes

Für die reproduzierbare Quantifizierung der Leistungsfähigkeit von Werkstoffen sind zeitraffende Prüfverfahren notwendig. Zur Prüfung sowie Entwicklung von dauerhafteren Betonen werden Materialproben in Säurebäder unter praxisähnlichen Bedingungen (Säureart, Säurekonzentration, Temperatur) eingelagert und nach der Beanspruchung hinsichtlich des Schädigungsgrads bzw. der Schädigungstiefe analysiert. Die leistungsbezogenen Materialkenndaten ermöglichen unmittelbare Rückschlüsse auf die Nutzungsdauer des zu errichtenden Bauwerks.

„METHANOS“ – Mikroorganismen zur signifikanten Erhöhung der Effizienz von Biogasanlagen

MONIKA REUTER, DORIS SCHMACK

1 Einleitung

Nach heutigem Stand der Technik werden Biogasanlagen in ihrer Startphase mit Impfschlamm aus bereits laufenden Anlagen oder mit Gülle beimpft. Daraus entwickelt sich weitgehend willkürlich eine nicht näher spezifizierte mikrobielle Lebensgemeinschaft, die im mehrstufigen Abbau Biogas erzeugt. Der Aufwuchs einer möglichst effizienten Biozönose wird lediglich durch Einstellung äußerer Parameter durch die Anlagentechnik oder durch chemische Zusätze gesteuert. Bisher konnte daher nicht direkt auf die Zusammensetzung der Mikroorganismenpopulation Einfluss genommen werden.

2 Vorgehensweise und Ergebnisse

Die Zusammensetzung der mikrobiellen Gemeinschaft im Fermenter ist weitgehend unerforscht, daher wurden die Bakterienpopulationen von zwölf Biogasanlagen mit unterschiedlicher Anlagenperformance (z.B. Abbaugrad, Stoffwechsel-Zwischenprodukte, Anlagenproduktivität) auf 16S rDNA-Ebene untersucht und mittels FISH (Fluoreszenz-in-situ-Hybridisierung)-Technologie charakterisiert. Vertreter einzelner Mikroorganismenspezies wurden isoliert und bis zur Reinkultur aufgereinigt. In Technikumsversuchen im Maßstab 150 l bis 30 m³ wurden Zellmassen dieser Reinkulturen der anaeroben Wildtyp-Biozönose zugesetzt. Nach Zugabe der identifizierten Mikroorganismen konnte die Raumbelastung bis 11 kg oTS/(m³ · d) gesteigert und über mehrere Verweilzeiten stabil bei 7,5 kg oTS/(m³ · d) gehalten werden. Es zeigte sich in reproduzierten Versuchen ein Rückgang der flüchtigen Fettsäuren bis unter die Nachweisgrenze und eine Stabilisierung des Systems. Außerdem wurde eine Erhöhung der spezifischen Gasausbeute resultierend aus einem gesteigerten Abbaugrad um bis zu 20 % beobachtet. Die Aktivität und Lebensfähigkeit der zugegebenen Mikroorganismen konnte mit eigens entwickelten FISH-Sonden nachgewiesen werden. Des Weiteren wurden die Mikroorganismen, inzwischen unter dem Produktnamen METHANOS zusammengefasst, in ersten Praxisanlagen getestet. So lief beispielsweise von April bis Dezember 2010 ein Feldversuch in einer Biogasanlage auf einem landwirtschaftlichen Milchviehbetrieb. Die Anlage, bestehend aus einem 260 m³ großen, liegenden Fermenter und einem Nachgärer mit 800 m³

Volumen, ging 1998 mit einer Leistung von 37 kW in Betrieb. Im Jahr 2008 wurde ein Blockheizkraftwerk mit 130 kW installiert, das aber lediglich auf Teillast bei ca. 80 kW betrieben werden konnte. Vor Versuchsbeginn lag die Raumbelastung der Biogasanlage bei ca. 1,5 kg oTS/(m³ · d) bezogen auf das gesamte Fermentervolumen von 1060 m³. Zu Beginn des Feldversuchs wurde das Gärvolumen der Anlage auf 260 m³ reduziert, indem der Nachgärbehälter entleert wurde. Gleichzeitig wurde das verbleibende Gärvolumen mit einer größeren „Kickstart“-Dosis METHANOS beimpft und die Raumbelastung innerhalb von 14 Tagen auf 7,5 kg oTS/(m³ · d) eingestellt. Bei diesem Feldtest konnte somit die Raumbelastung verfünffacht werden.

Im bundesdeutschen Durchschnitt laufen Biogasanlagen mit einer Raumbelastung von ca. 3,5 kg oTS/(m³ · d). Mit METHANOS kann zuverlässig eine Raumbelastung von 7 kg oTS/(m³ · d) erreicht und damit die durchschnittliche Belastung verdoppelt werden. Neben der Gülle von 30 Milchkühen setzt der Betreiber Grassilage, Maissilage und Getreide von seinen eigenen Ackerflächen ein. Die durchschnittliche Verweilzeit beträgt 28 bis 30 Tage.

Aktuell laufen bei fünf weiteren Biogasanlagen Feldversuche mit METHANOS.

3 Zusammenfassung

METHANOS sind Hochleistungsbakterien, durch deren Einsatz der Biogasprozess direkt auf bakterieller Ebene positiv beeinflusst wird. Die Zugabe von METHANOS erhöht den spezifischen Gasertrag aus den Einsatzstoffen um 10–20 % und die Belastbarkeit der Biogasanlage kann zuverlässig auf 7,5 kg oTS/(m³ · d) gesteigert werden. Das entspricht mehr als einer Verdreifachung gegenüber dem bundesdeutschen Durchschnitt von 2,2 kg oTS/(m³ · d) bei mehrstufigen Prozessen und einer Steigerung um ca. 70 % gegenüber dem bundesdeutschen Durchschnitt von 4,5 kg oTS/(m³ · d) bei einstufigen Prozessen. Die Wirksamkeit der Mikroorganismen wurde sowohl im Technikumsmaßstab (150 l bis 30 m³) als auch in ersten Feldversuchen nachgewiesen.

Die Wirtschaftlichkeit der Erzeugung von Biogasstrom bzw. der Bioerdgaserzeugung verbunden mit der Loslösung von Subventionsabhängigkeit rückt mit dieser Technologie in greifbare Nähe.

Literatur

Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe (2009): Biogasmessprogramm II

Untersuchungen zur Wirkung von Prozesshilfsstoffen auf die Abbaukinetik des Welschen Weidelgrases

CLAUDIA DEMMIG, FRANK HÖPPNER, MICHAEL NELLES

1 Einleitung

Aufgrund der großen Flächenkonkurrenz im Biogasbereich und im Hinblick auf den wachsenden Biomasseanbau spielt eine hohe Ausnutzung der Substrate im Biogasprozess eine wichtige Rolle. Durch das Repowering bestehender Anlagen und der damit verbundenen Verkürzung der Verweilzeit muss ein effektiver Abbau im Fermenter erfolgen.

2 Material und Methoden

Als Substrat der vorliegenden Untersuchung diente Welsches Weidelgrases (Sorte: Zarastro) als vierter Schnitt. Die Grassilage wurde als Laborsilage in Weckgläsern im 1,5-Liter-Maßstab siliert. Die Silierdauer betrug 90 Tage bei einer Lagertemperatur von 21 °C. Zur Untersuchung der Abbaukinetiken der Zellinhaltsstoffe und Gerüstsubstanzen der Grassilage wurde das aus der Tierernährung anerkannte Verfahren der In-Sacco-Methode genutzt. Dabei wird das zu vergärende Substrat in einem Nylonbeutel mit einer Maschenweite von 50 µm in den Fermenter gegeben, wodurch eine differenzierte Untersuchung des Gärrestes ohne Verunreinigungen durch das Inokulum möglich ist. Die Vergärung der Grassilage erfolgte in Anlehnung an die VDI 4630. Um den Abbauverlauf der Zellinhaltsstoffe und Gerüstsubstanzen darstellen zu können, wurden die Nylonbeutel nach 4, 7, 10, 15 und 42 Tagen aus dem Batch-Fermenter entnommen. Nach der Entnahme wurden die Nylonbeutel in Eiswasser gelegt, um alle Stoffwechselforgänge der Mikroorganismen zum Erliegen zu bringen. Anschließend wurden sie in einer handelsüblichen Waschmaschine im Kaltwaschgang gespült, wodurch Inokulumreste entfernt werden konnten. Als behandelte Variante erfolgte vor der Vergärung eine Enzymapplikation auf die Grassilage. Folgende Inhaltsstoffe des Gärrestes wurden nass-chemisch untersucht: Rohasche, Rohprotein, Rohfaser, ADF und NDF. Der Trockensubstanzgehalt wurde nach WEISSBACH (2008) korrigiert. Der Trockensubstanzabbau kann auf Grundlage der Rückwaagen der einzelnen Nylonbeutel berechnet werden (DEMMIG 2011).

3 Ergebnisse und Diskussion

Abbildung 1 zeigt den Abbau der korrigierten Trockenmasse der unbehandelten und behandelten Grassilage. In den ersten 15 Tagen ist bei der behandelten Variante ein beschleunigter Trockenmasseabbau zu erkennen. Auch beim Abbau der Rohfaserfraktion (Abb. 2) ist bei der behandelten Variante ein schnellerer Abbau bis Tag 15 festzustellen.

Mithilfe der In-Sacco-Methode kann die Wirkung von Prozesshilfsstoffen im Biogasbereich untersucht werden. Gerade im Hinblick auf kurze Verweilzeiten im Biogasfermenter ist eine Beschleunigung des Trockenmasse- und Rohfaserabbaus als positiv zu bewerten.

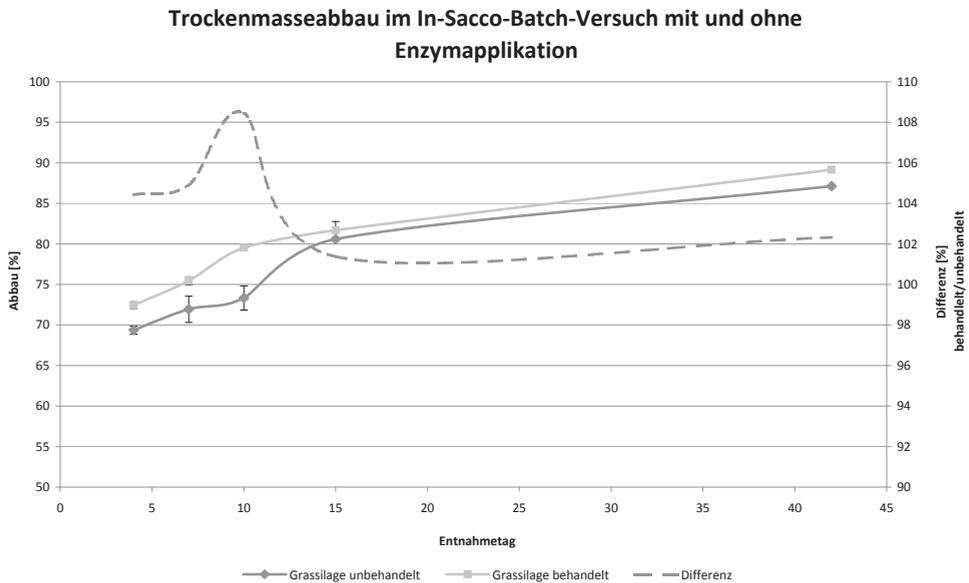


Abb. 1: Trockenmasseabbau im In-Sacco-Batch-Versuch mit und ohne Enzymapplikation (Trockenmasse korrigiert nach WEISSBACH 2008)

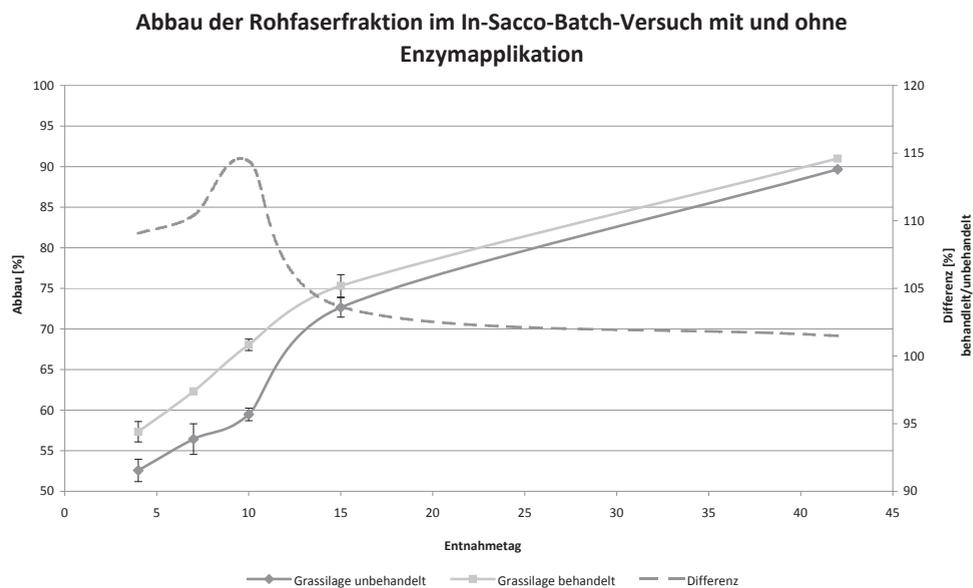


Abb. 2: Abbau der Rohfaserfraktion im In-Sacco-Batch-Versuch mit und ohne Enzymapplikation

Literatur

- Weissbach, F. (2008): Die Korrektur des Trockensubstanzgehaltes von Grassilagen als Substrat für Biogasanlagen. Landtechnik 4(63)
- Demmig, C. (2011): Ermittlung von Abbaukinetiken Nachwachsender Rohstoffe anhand der In-Sacco-Methode in Batch-Versuchen. Tagungsband Biogasinnovationskongress Osnabrück

Substratausnutzung in Biogasanlagen mit und ohne gasdichtem Gärrestbehälter

FRIEDRICH WEISSBACH, NILS ENGLER, STEFANIE WESSELING

1 Aufgabenstellung und Lösungsweg

Wenn Substrate bei der Biogaserzeugung unvollständig ausgenutzt werden, kann während der anschließenden Lagerung des Gärrestes das klimarelevante Gas Methan in die Atmosphäre freigesetzt werden. Neuere gesetzliche Vorschriften verlangen die gasdichte Abdeckung des gesamten Gärrestlagers. Hier wird über die Ergebnisse eines Projektes berichtet, bei dem der Effekt dieser Maßnahme bei professionellem Anlagenbetrieb in der Praxis untersucht worden ist.

Dazu wurden zwei baugleiche 500-kW-Biogasanlagen mit bzw. ohne gasdicht abgedecktem Gärrestbehälter 12 Wochen lang bilanziert. Die Substratmischung war identisch und bestand aus Maissilage und Rindergülle (65 % der FM). Die hydraulische Verweilzeit in den Fermentern (Anlage 1 und 2) betrug 40 Tage, die Faulraumbelastung 4 kg oTS/(m³ • d). Infolge der Einbeziehung des Gärrestbehälters in das System (Anlage 2) vergrößerte sich die Gesamtverweilzeit auf 107 Tage und verminderte die Belastung des Gesamtfaulraums auf 1,5 kg oTS/(m³ • d). Der Versuch wurde im Frühjahr 2010 bei zuvor entleertem Gärrestlager begonnen und in den sich anschließenden Sommermonaten, also bei hoher Außentemperatur, durchgeführt.

Das Gasbildungspotenzial des Substratinputs wurde in 24 Maissilage- und 12 Gülleproben untersucht, der Output an nicht verwerteter organischer Trockensubstanz (oTS) in 48 Gärrestproben. Zusätzlich wurden alle 2 Wochen von beiden Anlagen größere Gärrestproben entnommen und damit Batchversuche bei zwei Temperaturniveaus (bei 38 °C und 24 °C) in dreifacher Wiederholung durchgeführt.

Der TS-Gehalt der Maissilage ist auf flüchtige Stoffe korrigiert worden (WEISSBACH und STRUBELT 2008). Zur Berechnung des Gasbildungspotenzials diente der Gehalt an „fermentierbaren oTS“ (FoTS). Er wurde mit folgenden Gleichungen berechnet (WEISSBACH 2008):

für Maissilage

$$\text{FoTS [g/kg TS}_k\text{]} = 984 - (XA) - 0,47 (XF) - 0,00104 (XF)^2$$

für Rindergülle

$$\text{FoTS [g/kg TS]} = 0,60 (1000 - XA)$$

Darin ist XA der Rohasche- und XF der Rohfasergehalt, jeweils in g je kg TS.

2 Ergebnisse zur Energieausbeute

Tabelle 1 zeigt die erzeugten Gas- und Energiemengen. Neben dem Mittelwert ist die Standardabweichung (SD) angegeben. Beide Anlagen lieferten die gleiche Menge an Strom. Bei Anlage 2 ist zu Beginn der Versuchszeit Methan auch für eine Gewächshausheizung verwendet worden. Zusammen mit diesem zusätzlichen Gasverbrauch wurde in Anlage 2 rund 3 % mehr Methan erzeugt.

Tab. 1: Gas- und Energieerzeugung im Mittel der Versuchszeit

Gas- und Stromerzeugung	Einheit	Anlage 1 n = 84		Anlage 2 n = 84		Relativ (Anlage 1 = 100)
		Mittel	SD	Mittel	SD	
Gaserzeugung						
Biogas	m ³ N/d	6098	358	6300	254	103,3
Methan	m ³ N/d	3232	190	3339	135	103,3
Nutzung des Methans						
Verstromt	m ³ N/d	3217	178	3251	84	101,1
Heizung und Fackel	m ³ N/d	15	59	88	91	
Stromerzeugung						
Gemessen	kWh	12329	903	12429	385	100,8
Berechnet ¹⁾	kWh	12226	677	12354	321	101,1

¹⁾ kWh_{el} = verstromtes Methan × 3,8 kWh/m³.

3 Ergebnisse zur Substratausnutzung

Der Ausnutzungsgrad des Gasbildungspotenzials der Substratmischung wurde mit folgenden Gleichungen berechnet (WEISSBACH 2009):

$$NQ = \frac{1000}{FoTS} \left(1 - \frac{XA_S}{XA_R} \right) \text{ bzw. } NQ' = \frac{1000}{FoTS(1-BQ)} \left(1 - \frac{XA_S}{XA_R} \right)$$

XAS und XAR sind die Rohaschegehalte der Substratmischung bzw. des Gärrestes, bezogen auf die TS. Beim „scheinbaren Nutzungsquotienten“ (NQ) bleibt unberücksichtigt, dass ein Teil der von der Mikroflora umgesetzten FoTS in Bakterienbiomasse inkorporiert wird. Beim „wahren Nutzungsquotienten“ (NQ') ist diese Inkorporation berücksichtigt und wird mit der Größe BQ (Biomassebildungsquotient) quantifiziert. Tabelle 2 zeigt die Ergebnisse.

Tab. 2: FoTS- und Rohaschegehalte sowie Substratnutzung im Mittel der Versuchszeit

	Anlage 1		Anlage 2		Relativ (Anlage 1 = 100)
	Mittel	SD	Mittel	SD	
FoTS-Gehalt der Substratmischung (n = 12)					
FoTS [g/kg TS]	709,4		708,1		
Rohaschegehalt der Substratmischung (n = 12)					
XA _S [g/kg TS]	71,3				
Rohaschegehalt der Gärreste (n = 24)					
XA _R [g/kg TS]	229,5	13,0	240,8	19,6	
Scheinbare Substratausnutzung					
NQ	0,970	0,025	0,994	0,033	102,5
Wahre Substratausnutzung¹⁾					
NQ'	0,990	0,025	1,015	0,033	102,5

¹⁾ Bei Annahme von BQ = 0,02.

Durch den Abbau der organischen Substanz im Fermenter stieg der Rohaschegehalt in der TS an. Aus diesem Anstieg errechnet sich für beide Anlagen eine nahezu vollständige Ausnutzung der FoTS. Dennoch ergibt sich – und zwar unabhängig davon, ob die bakterielle Inkorporation berücksichtigt wird oder nicht – für Anlage 2 eine um 2,5 % bessere Ausnutzung der Substrate als für Anlage 1. Damit bestätigt sich die schon beim Vergleich der erzeugten Energiemengen gefundene höhere Effizienz der Anlage 2 mit dem gasdichten Gärrestlager.

4 Ergebnisse zu Restgaspotenzial und Restgasemission

Als Bewertungsmaßstab für die in den Batchtests gemessene Restgasbildung dient hier das Gasbildungspotenzial der Substratmischung. Zu diesem Zweck ist das im Batchtest gemessene und üblicherweise auf die oTS des Gärrestes (oTS_R) bezogene Methanvolumen auf die TS der Substratmischung (TS_S) umgerechnet worden. Dazu diente der „Gehalt an organischem Gärrest“ (oGR) je kg TS der Substratmischung. Dieser ist wie folgt definiert:

$$\text{oGR [g/kg TS}_S\text{]} = 1000 - \text{XA}_S \text{ [g/kg TS}_S\text{]} - \text{FoTS [g/kg TS}_S\text{]}$$

Der oGR ist mit der oTS des Gärrestes bei 100 % Ausnutzung der FoTS gleichzusetzen. Dementsprechend gilt für das aus dem Gärrest gebildete Methan:

$$\text{Methan [l/kg TS}_S\text{]} = \text{Methan [l/kg oTS}_R\text{]} \cdot \text{oGR [g/kg TS}_S\text{]}/1000$$

Die so berechnete Methanbildung kann in Prozent des Methanbildungspotenzials (MBP) der Substratmischung (g FoTS • 0,420 l) ausgedrückt werden und ist damit der Bewertung zugänglich. Tabelle 3 zeigt die Ergebnisse.

Tab. 3: Ergebnisse der Batchversuche mit Gärrest (Anzahl Batchversuche mit 3 Wiederholungen je Prüfglied: n = 7)

	Anlage 1		Anlage 2		Differenz	
	Mittel	SD	Mittel	SD	Mittel	SD
Methanbildung aus dem Gärrest bei 38 °C (Restgaspotenzial)						
l N/kg oTS _R	119,7	3,5	78,6	11,8		
l N/kg oTS _S	26,3	0,8	17,4	2,6	8,9	2,7
% des MBP des Substrats	8,1	0,2	5,5	0,8	2,6	0,8
Methanbildung aus dem Gärrest bei 24 °C (Restgasemission)						
l N/kg oTS _R	41,1	7,8	20,1	8,2		
l N/kg oTS _S	9,1	1,7	4,4	1,8	4,6	0,9
% des MBP des Substrats	3,0	0,5	1,5	0,6	1,5	0,3

Der Gärrest von Anlage 2 wies ein deutlich geringeres Restgaspotenzial als der von Anlage 1 auf. Bezogen auf das Gasbildungspotenzial der Substrate sank das Restgaspotenzial von 8,1 auf 5,5 %. Für die Bewertung des Effektes, den die gasdichte Abdeckung des Gärrestbehälters tatsächlich gebracht hat, zählt aber allein die Differenz zwischen beiden Anlagen. Sie beträgt 2,6 % und bestätigt damit sehr gut die festgestellten Effekte auf die Substratausnutzung (2,5 %) und die Methanproduktion (3,3 %).

Als Gesamtergebnis ist festzustellen, dass durch die gasdichte Abdeckung des Gärrestbehälters das Substratgemisch um etwa 3 % besser ausgenutzt werden kann. Diese Mehrausbeute gilt bei unbeheiztem Gärrestbehälter für den Sommer. Die Menge an Methan, die dadurch vor der Freisetzung in die Umwelt bewahrt wird, ist jedoch bedeutend geringer. Sie beträgt selbst im Sommer nur 1,5 %, auf das ganze Jahr, also unter Einschluss winterlicher Lagertemperaturen berechnet, dürfte sie weniger als 1 % des Gasbildungspotenzials der Substrate betragen.

Literatur

- Weißbach, F.; Strubelt, C. (2008): Die Korrektur des Trockensubstanzgehaltes von Silagen als Substrat für Biogasanlagen. In: 120. VDLUFA-Kongress, Jena, Kurzfassung der Referate, S. 29–31
- Weißbach, F. (2008): Zur Bewertung des Gasbildungspotenzials von nachwachsenden Rohstoffen. Landtechnik 63(6), S. 356–358
- Weißbach, F. (2009): Ausnutzungsgrad von Nawaros bei der Biogasgewinnung. Landtechnik 64(1), S. 18–21

Methanverluste von Gärresten unter Praxisbedingungen

SIMON BOLLI, ALINA SOLTERMANN, LUDO VAN CAENEGEM, MATTHIAS SCHICK

1 Einleitung

Landwirtschaftliche Biogasanlagen sehen sich vermehrt mit der Emissionsproblematik konfrontiert. Methanemissionen durch unerwünschte Gasverluste können entlang der gesamten Biogasproduktionskette auftreten. Im Hinblick auf die Problematiken (Treibhausgasemissionen, Gasertragsverluste, Anwendersicherheit) die Methanverluste mit sich bringen, sind Ansätze für Minderungsmaßnahmen von großer Bedeutung.

2 Problematik

Forschungsziele

1. Quantifizierung von Methanemissionen bei der Lagerung von Gärresten aus der landwirtschaftlichen Biogasproduktion in Abhängigkeit von:
 - Gesamtes Gärrestpotenzial (Restgaspotenzial)
 - Organischer Trockensubstanz (oTS)
 - Gärrest- und Umgebungstemperatur
 - Luftrate über dem Substrat
 - Gärrestbehandlung (Separierung)
2. Ableitung von Maßnahmen zur Minderung von Methanemissionen bei der Lagerung von Gärresten

Forschungsfragen

1. Welchen Einfluss haben die Lagerkonditionen auf die Methanemissionen bei der Lagerung?
2. Welchen Einfluss hat das Gärrestpotenzial der Gärreste auf die Methanemissionen bei der Lagerung?
3. Inwiefern beeinflusst die Separierung die Methanemissionen bei der Lagerung?

Methodik

Die Emissionsmessungen werden an drei landwirtschaftlichen Biogasanlagen während der vier Jahreszeiten durchgeführt. Die Probenahme der Gärreste erfolgt nach folgenden Vergärungs- bzw. Behandlungsstufen: Fermenter, Nachgärer, Separierung (Feststoff-

fe/Flüssigstoffe). Mit diesem Vorgehen kann aufgezeigt werden, inwiefern jede Stufe zur Reduktion der Methanemissionen im Gärrest beiträgt. Zur Bestimmung der Emissionsrate kommt eine Dynamische Durchflusskammer zum Einsatz. Hierbei strömt innerhalb eines definierten Volumens ein bekannter Luftstrom kontinuierlich über die Gärrestprobe. Aus dem bekannten Volumenstrom und der Differenz der Gaskonzentrationen der Zu- und Abluft kann die Emissionsrate berechnet werden. Der Vorteil einer Dynamischen Durchflusskammer liegt darin, dass Emissionen unter kontrollierten Bedingungen gemessen werden können. Als Begleitparameter werden nebst der Luftgeschwindigkeit die Temperatur der Außenluft und der Kammer sowie die relative Feuchtigkeit der Zu- und Abluft gemessen. Parallel zu den Windtunnelmessungen werden die Proben mithilfe des Hohenheimer Biogasertragstests auf ihr Restgaspotenzial hin untersucht. Ein anschließender Vergleich dieser beiden Größen soll Rückschlüsse über die Auswirkungen des Restgaspotenzials auf die Methanemissionen zulassen. Anhand der gewonnenen Erkenntnisse sollen bauliche, technische sowie organisatorische Ansätze zur Emissionsminderung bei der Lagerung von Gärresten in der Praxis abgeleitet werden.

Literatur

- Epp, C.; Rutz, D.; Köttner, M.; Finsterwalder T. (2008). Guidelines for Selecting Suitable Sites for Biogas Plants, Deliverable D 6.1; FITEC WIP Renewable Energies, Munich
- Hafermann, C.; Clemens, J.; Cuhls, C.; Friche, J.; Weiland, P.; Liebetrau, J.; Daniel, J. (2009). Untersuchungen zu Treibhausgasemissionen bei der Biogaserzeugung aus nachwachsenden Rohstoffen. In: Internationale Wissenschaftstagung Biogas Science 2009, Band 2
- Lehner, A.; Effenberger, M.; Gronauer, A. (2010): Optimierung der Verfahrenstechnik landwirtschaftlicher Biogasanlagen. Schriftenreihe der Bayerischen Landesanstalt für Landwirtschaft LfL, S. 27f.
- Reitberger F. (2002): Emissionsminderungsmöglichkeiten bei Biogasanlagen entlang der Prozesskette der Biogaserzeugung, von Biogasanlagen-Anforderungen zur Luftreinhaltung. Bayerisches Landesamt für Umweltschutz, Augsburg
- Wulf, S.; Brenner, A.; Clemens, J.; Döhler, H.; Jäger, P.; Krohmer, K.-H.; Maeting, M.; Rieger, C.; Schumacher, I.; Tschepe, M.; Vandr , R.; Weiland, P. (2003): Untersuchung der Emission direkt und indirekt klimawirksamer Spurengase (NH₃, N₂O und CH₄) w hrend der Lagerung und nach der Ausbringung von Kofermentationsr ckst nden sowie Entwicklung von Vermeidungsstrategien. Endbericht zum DBU-Forschungsvorhaben (AZ 08912)

Emissionen klimarelevanter Treibhausgase während der Biogas-Gärrestlagerung

JAN REENT KÖSTER, ANDREAS PACHOLSKI, O. TOM DENMEAD, DELI CHEN,
HENNING KAGE, KARL HERMANN MÜHLING, KLAUS DITTERT

Die Emissionen klimarelevanter Spurengase (N_2O , CH_4 , CO_2) und Ammoniak (NH_3) bei der Erzeugung und Nutzung von Bioenergiepflanzen werden besonders kritisch gesehen, weil sie einem Hauptziel der Bioenergieerzeugung, der Ressourcen- und Umweltschonung entgegenstehen. Berichte über Emissionen während der Lagerung von Biogas-Fermentationsrückständen weisen bisher noch erhebliche Streuungen auf und einige Studien ermittelten sehr hohe Spurengasflüsse (CLEMENS et al. 2006, AMON et al. 2006), sodass die Biogas-Klimabilanz noch mit erheblichen Unsicherheiten behaftet ist. Untersuchungen der Emissionen aus Gärrestlagern stehen vor dem Problem, dass die für Emissionsmessungen aus Böden verwendeten Messkammern auf Lagerstätten besonders schwierig zu installieren und zu handhaben sind. In der vorliegenden Untersuchung wurde ein ganz neuer Ansatz verfolgt, der auf der Open-Path Fourier-Transform-Infrarot-Spektroskopie (OP FTIR) beruht. Mit diesem Verfahren können die Konzentrationen dieser Gase simultan, direkt und berührungslos an Praxisanlagen erfasst werden, sodass mögliche Fehler durch manuelle Probennahmen, Kammersysteme oder Modellversuche vermieden werden. OP-FTIR liefert Konzentrationsangaben über eine optische Messstrecke. Mithilfe dieser Angaben und hochauflösenden Messungen der Luftbewegung werden die emittierten Gasmengen unter Verwendung des Backward-Time Lagrangian Stochastic Dispersion Models (FLESCH et al. 1995) berechnet.

In dem Beitrag werden erste Untersuchungen mit diesem Ansatz an Schleswig-Holsteinischen Gärrestlagern verschiedener Bauformen (Güllelager mit und ohne Abdeckung, Lagune) vorgestellt. Erste Ergebnisse dieser Messungen an einer Biogas-Gärrestlagune aus dem Frühjahr 2011 weisen sehr hohe Emissionsraten der vier betrachteten Spurengase auf. Es deutet sich an, dass auch unter norddeutschen Klimaverhältnissen zumindest bei nichtabgedeckten Gärrestlagern sehr hohe Spurengasemissionen auftreten können. Diese Daten werden für die Bewertung der Klimabilanz von Biogasstrom, z. B. in Lebenszyklusanalysen/Life Cycle Assessments, eine wichtige Rolle spielen.

Literatur

- Amon, B. et al. (2006): Agr. Ecosyst. Environ. 112, S. 153
Clemens, J. et al. (2006): Agr. Ecosyst. Environ. 112, S. 171
Flesch TK et al. (1995): J. Appl. Meteorol. 34, S. 1320

Geruchserhebungen bei Betrieben mit landwirtschaftlichen Biogasanlagen

KERSTIN MAGER, MARGRET KECK, SABINE SCHRADER

1 Projekthintergrund

Im Jahr 2010 produzierten schweizweit 83 landwirtschaftliche Biogasanlagen erneuerbare Energie in Form von Strom und/oder Wärme. Landwirtschaftliche Biogasanlagen werden dabei häufig an bestehenden Standorten mit Tierhaltung ergänzt und für eine effektive Wärmenutzung bevorzugt in der Nähe zur Wohnbebauung errichtet. Dies kann zu Klagen über Gerüche bei den Anwohnern führen.

Ziel der Untersuchung ist es, relevante Geruchsquellen zu identifizieren und Einzelquellen sowie die Geruchsausbreitung der Gesamtanlagen zu quantifizieren.

2 Anlagenvielfalt

Biogasanlagen umfassen eine Vielzahl von Geruchsquellen. Zu den häufigsten Quellen gehören offene Substrat- und Gärrestlager sowie Vorgruben. Weitere Geruchsquellen sind Vorlagesysteme für Feststoffe sowie Flüssigsubstratlager und Biogas aus Überdruckventilen oder defekten Gasspeicherfolien. Aus dem Bereich der Tierhaltung kommen als Geruchsquellen verschmutzte Laufhöfe, Stallabluft oder Silagelager hinzu.

Für eine genaue Situationsanalyse wurde eine systematische Befragung von 38 Biogasanlagenbetreibern durchgeführt. Diese ließ eine große Heterogenität der Anlagen- und Verfahrenstechnik bei den Betrieben erkennen.

Gemeinsam ist den Anlagen die große Substratvielfalt. Durchschnittlich werden auf einem Betrieb zwischen sechs und elf verschiedene Substrate fermentiert, wobei der Co-Substratanteil im Median bei 25 % liegt. Zu den häufigsten Substraten gehören, neben den Hofdüngern Rinder- und Schweinegülle, vorwiegend Gemüserüstabfälle, Grüngut, Rasenschnitt sowie Gastroabfälle. Eine Separierung der Gärreste wird auf 50 % der Betriebe durchgeführt. Auf 37 von 38 besuchten Betrieben ist die Biogasanlage mit Tierhaltung kombiniert. Die Bereiche Biogasanlage sowie die Tierhaltung weisen größtenteils Flächenquellen auf. Das Verhältnis der emittierenden Flächen von Biogasanlage und Tierhaltung variiert zwischen den Betrieben. Die nächsten Wohnzonen sind in 50 % der Fälle weniger als 500 m entfernt und weisen mit Blick auf die Geruchsausbreitung relevante Distanzen auf.

3 Konzept und Methoden

Um die Vielfalt der Anlagen zu erfassen, ist es notwendig, mehrere Betriebe zu untersuchen. Weiter muss beim Erhebungskonzept die Kombination von Biogasanlage mit Tierhaltung berücksichtigt werden.

Die Geruchserhebungen sind für die Monate Juli 2011 bis März 2012 geplant. Auf diese Weise ist es möglich, Erhebungen unter verschiedenen klimatischen Bedingungen durchzuführen. Betrachtet werden unterschiedliche Betriebssituationen, unter Einhaltung von Empfehlungen zur Vermeidung von Geruchsemissionen.

Zur Charakterisierung und anschließenden Rangierung der Einzelquellen, wie Laufhof, Stallabluft, Gärreste oder verschiedene Substrate, wird an den jeweiligen Geruchsquellen zusätzlich die Geruchsstoffkonzentration durch Olfaktometrie bestimmt.

Mithilfe einer optimierten Fahnenbegehung mit Testpersonen sollen die Geruchshäufigkeiten und -intensitäten der Gesamtanlage immissionsseitig erhoben werden. Aus den Ergebnissen der Fahnenbegehungen und den erfassten meteorologischen Verhältnissen während der Begehung ist es möglich, durch Rückwärtsmodellierung auf die Quellstärke der Gesamtanlage zu schließen.

4 Ausblick

Aus den erhobenen Daten sollen anschließend Minderungsansätze und Empfehlungen zu Mindestabständen abgeleitet werden.

NH₃-Emissionen nach Gärrestapplikation und Ertragspotenziale verschiedener Biogas-Anbausysteme in der Marschregion Schleswig-Holsteins

ROBERT QUAKERACK, ANNA TECHOW, ANTJE HERMANN, FRIEDHELM TAUBE, HENNING KAGE, ANDREAS PACHOLSKI

Unter Bedingungen eines Marschstandortes in Schleswig-Holstein wurde eine Untersuchung zur Leistungsfähigkeit verschiedener Biogas-Anbausysteme mit Biogasgärrestdüngung durchgeführt. Der Standort ist durch ein kühles Frühjahr, schwere Böden (schluffiger Ton), hohe Grundwasserstände und hohe Windgeschwindigkeiten gekennzeichnet.

Getestet wurden in den Jahren 2009–2010 die Monokulturen von Deutschem Weidelgras (*Lolium perenne*; 4 Schnitte) und Mais (*Zea mays*) sowie ein Fruchtfolgesystem, bestehend aus Mais, Weizen – 2009: Sommerweizen; 2010: Winterweizen – (*Triticum aestivum*) und Welschem Weidelgras (*Lolium multiflorum*), als genutzte Winterzwischenfrucht.

Neben einer Kontrolle wurde jede Kulturart in zwei N-Stufen (ortsüblich und hoch) gedüngt, jeweils ausschließlich organisch mit Biogasgärrest (BG) aus Co-Fermentation oder mineralisch mit Kalkammonsalpeter (KAS).

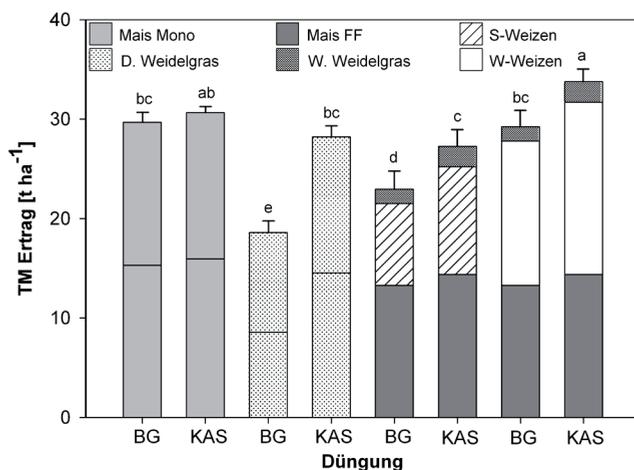


Abb.1: 2-jährige Trockenmasseerträge von Mais in Monokultur (Mais Mono), Deutschem Weidelgras (D. Weidelgras) und einer Fruchtfolge mit Mais (Mais FF), Sommerweizen (S-Weizen, 2009) bzw. Winterweizen (W-Weizen, 2010) und Welschem Weidelgras (W. Weidelgras); ortsübliche N-Düngungsmengen: mineralisch (KAS) und Gärrestdüngung (BG), an einem Marschstandort Schleswig-Holsteins.

Nach der Gärrestapplikation mit Schleppschläuchen auf Gras und Weizen wurden deutlich höhere relative N-Verluste gemessen, als nach der Applikation auf Mais. Durchschnittliche relative N-Verluste für alle Kulturarten lagen bei etwa 15 % des ausgebrachten NH₄-N.

Sowohl das Deutsche Weidelgras als auch das Fruchtfolgesystem waren unter KAS-Düngung ertraglich konkurrenzfähig zur Maismonokultur. Höchste Erträge erzielte die mineralisch gedüngte Fruchtfolge mit Mais, Winterweizen und Welschem Weidelgras. Größte Ertragsdifferenzen zeigte das Deutsche Weidelgras zwischen der BG- und der KAS-Variante (Abb. 1).

N-Verluste durch Ammoniakverflüchtigung nach BG-Applikation zeigten kulturspezifische Unterschiede. Besonders beim Deutschen Weidelgras können Ammoniakverluste potenziell zu einer Ertragsreduzierung, im Vergleich zu mineralischer Düngung, beitragen. Generell ist die Leistungsfähigkeit der Maismonokultur und des Fruchtfolgesystems auf dem relativ kühlen und schwer bearbeitbaren Standort in Abhängigkeit von dem jährlichen Witterungsverlauf starken Variationen unterworfen.

Quantifizierung der kurzfristigen N-Düngewirkung von Biogas-Gärresten aus verschiedenen Biogasproduktionssystemen auf einem Marschstandort

ANNA TECHOW, ROBERT QUAKERNACK, ANDREAS PACHOLSKI, HENNING KAGE, FRIEDHELM TAUBE, ANTJE HERRMANN

1 Einleitung

Die Expansion der Biogasproduktion erfordert eine möglichst effiziente pflanzenbauliche Verwertung der in großen Mengen anfallenden Gärreste. Während die Biomasseproduktion und das Methanbildungspotenzial von Biogasproduktionssystemen relativ gut dokumentiert sind, liegen zur N-Düngewirkung von Gärresten bislang nur wenige belastbare Untersuchungen vor. Ziel der vorliegenden Studie war es daher, die kurzfristige N-Wirkung von Gärresten hinsichtlich des Trockenmasse- und Methanertrags verschiedener Biogasproduktionssysteme zu quantifizieren.

2 Material und Methoden

Die Studie wurde auf einem Standort (Kalkmarsch, pH 7,5) an der Westküste Schleswig-Holsteins durchgeführt und basiert auf einem 2-jährigen Feldversuch. Abgesehen von dem Produktionssystem (Maismonokultur, Wechselgrünland aus Deutschem Weidelgras, Fruchtfolge: Mais-Winterweizen-Welsches Weidelgras) wurden die N-Düngewirkung (KAS, Gärrest) und die N-Menge in drei Stufen (Kontrolle, moderat, hoch) variiert. Die N-Wirksamkeit der Gärreste wurde über den „Relative N Fertilizer Value (RNFV)“ quantifiziert.

3 Ergebnisse und Diskussion

Die statistische Analyse des RNFV der mit Gärrest versorgten Varianten zeigte einen signifikanten Effekt des Produktionssystems, jedoch nicht der N-Menge, wobei die Maismonokultur (0,88) sich durch eine höhere Ausnutzung der N-Düngung auszeichnete als die Fruchtfolge Mais-Weizen-Welsches Weidelgras (0,51) und Ackergras (0,59). Eine kulturartenspezifische Analyse des RNFV ergab eine signifikante Interaktion mit dem Versuchsjahr, wohingegen die N-Menge keinen Effekt zeigte. Im Jahr 2010 lagen die RNFV-Werte hier mit 0,6 bis 0,9 in einem in der Literatur dokumentierten Bereich.

Literatur

- Schröder, J.J.; Jansen, A.G.; Hilhorst, G.J. (2005): Long-term nitrogen supply from cattle slurry. *Soil Use and Management* 21, pp. 196–204
- Wienforth, B.; Herrmann, A.; Sieling, K.; Ohl, S.; Hartung, E.; Taube, F.; Kage, H. (2010): Biogas-Expert: Grassland methane yield and short-term N-efficiency of biogas residues. *Grassl. Sci. Europe* 15, pp. 229–231

Effizienzsteigerung bei der Verwertung von Wirtschaftsdüngern

**HAUKE BRONSEMA, SYLVIA WARNECKE, MARKUS BIBERACHER,
HANS-JÖRG BRAUCKMANN, GABRIELE BROLL, LUDWIG THEUVSEN**

Die zunehmende Spezialisierung in der Landwirtschaft resultiert häufig in regional entkoppelten Nährstoffströmen. In Ackerbauregionen herrscht ein hoher Nährstoffbedarf, der fast ausschließlich über teure Mineraldünger gedeckt wird. Demgegenüber liegen in Veredelungsregionen die hohen Nährstoffanfälle in tierischen Exkrementen meist über dem, was sinnvoll auf den lokalen landwirtschaftlichen Flächen verwertbar ist. Wirtschaftsdüngerexporte dienen als Mittel des Abbaus von Nährstoffüberschüssen, werden jedoch aufgrund steigender Energiekosten immer teurer.

Ziel unserer Untersuchungen ist es, mittels eines neu konzipierten Modells die optimale regionale Verteilung von Wirtschaftsdüngernährstoffen unter minimalem Transportaufwand zu ermitteln (BIBERACHER et al. 2009, WARNECKE et al. 2010). Die Transportoptimierung erfolgt unter der Prämisse, Überanwendung von Wirtschaftsdüngernährstoffen in Veredelungsregionen zu vermeiden, während gleichzeitig die exportierten Wirtschaftsdüngernährstoffe in Ackerbauregionen nutzbar gemacht werden. Als Modellregion dient das Bundesland Niedersachsen, die Betrachtungsebene ist die der Gemeinden. Eine detaillierte, möglichst realitätsnahe Ermittlung des Anfalls an Wirtschaftsdünger und seiner Zusammensetzung sowie des Nährstoffbedarfs der landwirtschaftlichen Acker- und Grünlandkulturen ist im Vorfeld notwendig.

Nach Einstellung der gewünschten Maximalwerte, bis zu denen Wirtschaftsdüngernährstoffe auf die verschiedenen Acker- und Grünlandflächen ausgebracht werden dürfen, verfügt das Modell über zwei verschiedene Basiseinstellungen. Zum einen können die Transporte allein hinsichtlich der Zusammensetzung der Wirtschaftsdünger und der Distanzen zwischen den Gemeinden optimiert werden. Im Falle eines Überschusses von Wirtschaftsdüngernährstoffen bevorzugt das Modell die kleinste Transportdistanz zwischen den Gemeinden sowie Wirtschaftsdünger mit dem geringsten Masse : Nährstoff-Quotienten. Es ist jedoch auch möglich, Kosten für Mineraldünger sowie Transportkosten für überschüssige Wirtschaftsdünger anzunehmen. Unter den Kostenbedingungen für das Jahr 2009 zeigte sich jedoch, dass die Kosten für die Mineraldüngerbeschaffung deutlich günstiger waren als die Kosten des zur Einhaltung der gesetzlichen Vorgaben erforderlichen Nährstofftransfers.

Eine nutzenbedingte Kostendeckung der erforderlichen Transporte kann folglich nur durch steigende Preise für Mineraldünger als Substitut oder die Generierung eines Mehrwertes der zu transportierenden Wirtschaftsdünger erreicht werden. Eine Möglichkeit ist

eine energetische Nutzung. Ziel einer Modellerweiterung ist es daher, den energetischen Mehrwert von Wirtschaftsdüngern abzubilden, der in Abhängigkeit von vorhandener Biogasproduktion, Ertragsniveau und Marktpreisniveau regional unterschiedlich ist. Im ersten Schritt stehen hierbei Wirtschaftsdünger in unbearbeiteter Form im Fokus, im zweiten Schritt werden separierte Güllefeststoffe in die Betrachtung mit einbezogen.

Den Wirtschaftsdüngertransportkosten der abgebenden Betriebe könnte zukünftig bei steigenden Preisniveaus für Mineraldünger und Getreide und der Generierung eines Mehrwertes durch energetische Nutzung der Wirtschaftsdünger eine Zahlungsbereitschaft der aufnehmenden Betriebe gegenüberstehen. Weitere Synergieeffekte wie eine Verringerung von Flächenkonkurrenzen sind zu erwarten. Mit der in Bearbeitung befindlichen Modellerweiterung erfolgt eine ökonomische Bewertung der regionalen Wertsteigerungseffekte. Die Realitätsnähe der Ergebnisse und Praxistauglichkeit der Modellanwendung werden weiter verbessert.

Literatur

- Biberacher, M.; Warnecke, S.; Brauckmann, H.J.; Broll, G. (2009): A linear optimisation model for animal farm manure transports in regions with high intensity animal farming. In: 18th World IMACS Congress and MODSIM09 International Congress on Modelling and Simulation. Modelling and Simulation Society of Australia and New Zealand and International Association for Mathematics and Computers in Simulation, Editors Andersen, R. S.; Braddock, R. D.; Newham, L. T.H., pp. 470–476; http://www.mssanz.org.au/modsim09/B1/biberacher_B1.pdf
- Warnecke, S.; Biberacher, M.; Brauckmann, H.J.; Broll, G. (2010): Nutrient best management practices need regional material flow management for soil protection. In: Proceedings of the 19th World Congress of Soil Science, Soil Solutions for a Changing World, Editors Gilkes, R.J.; Prakongkep, N., Division Symposium 3.2, Nutrient best management practices, 1–6 August 2010, Brisbane, IUSS, 2010, pp. 168–171; <http://www.iuss.org>

Pflanzenbauliche Verwertung von Gärresten als organische Dünger innerhalb einer Energiepflanzen-Fruchtfolge

BEATE FORMOWITZ, MAENDY FRITZ

1 Problemstellung und Zielsetzung

Biogasgärreste gelten als nährstoffreiche Dünger, da ein großer Anteil der Nährstoffe aus den Ausgangsubstraten in pflanzenverfügbarer Form vorliegt. Nach der Umwandlung leicht abbaubarer Kohlenstoffverbindungen während der Fermentation – überwiegend zu CH_4 und CO_2 – verbleiben schwerer abbaubare organische Substanzen, wie Lignin, im Gärrest, aufgrund derer Gärresten eine hohe humusreproduzierende Wirkung unterstellt wird. Nährstoffschwankungen in Abhängigkeit der Input-Substrate und Prozessführung erschweren die genaue Berechnung auszubringender Nährstoffmengen. Hohe Ammoniumgehalte bei gleichzeitig hohen pH-Werten (oftmals ≥ 8) bergen ein gesteigertes Risiko an N-Verlusten.

In dem bundesweiten Verbundprojekt EVA II wird an 6 Standorten in Deutschland die pflanzenbauliche Verwertung von Gärresten als Ersatz für mineralische Dünger mit dem Ziel des Erhalts stabiler Erträge untersucht. Fokus des Versuchs ist die Klärung der ertraglichen, ökologischen und ökonomischen Unterschiede zwischen einer reinen Gärrestdüngung im Vergleich zu einer gemischten sowie einer rein mineralischen Variante.

2 Ergebnisse und Diskussion

Die Ertragsergebnisse der ersten beiden Versuchsjahre (Abb. 1) zeigen deutlich, dass Biogasgärreste eine gute Alternative zu mineralischen Düngern darstellen können, jedoch starke Nährstoffschwankungen in den Gärresten die Ausbringung gewünschter N-Mengen erschweren. In beiden Jahren kam es bei unterschiedlichen Kulturen aufgrund trockener Perioden zu verminderten Erträgen, da das generelle Pflanzenwachstum, aber auch die mikrobielle Aktivität und somit Nährstofffreisetzung reduziert wurden. Die Gärrestausrückführung im Frühjahr in einen schon etablierten Bestand, z. B. bei Winterweizen, scheint eine bessere N-Ausnutzung zu bewirken, obwohl die Gärreste nicht eingearbeitet werden können und somit ein erhöhtes Risiko gasförmiger N-Verluste besteht. Stickstoffsalden und N_{\min} -Gehalte im Boden deuten auf eine große Relevanz der Jahreseffekte bei der N-Mobilisierung im Boden hin. Die in Kooperation durch ein weiteres Verbundpro-

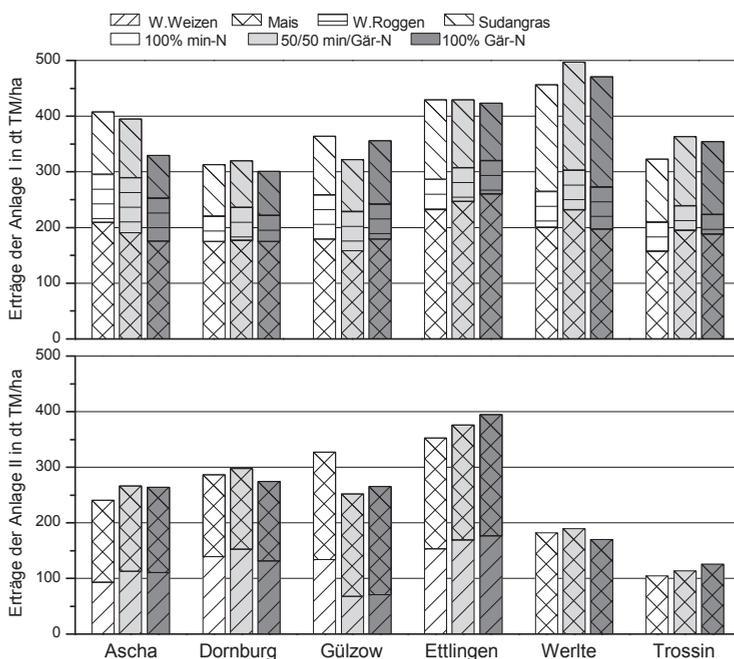


Abb. 1: Summierte Trockenmasseerträge der Anlage I und II je Standort, Kultur und Düngevariante der Versuchsjahre 2009 und 2010; für Winterweizen ist jeweils die Summe aus Stroh und Korn dargestellt

jekt 2011 begonnenen Messungen klimarelevanter Gase nach Gärrestaubsbringung werden mehr Informationen über gasförmige N-Verluste liefern.

Genauere Informationen zu diesem sowie weiterer umfangreicher Versuche im EVA-Verbund finden Sie auf der Website www.eva-verbund.de.

Danksagung

Unser Dank gilt unseren Projektpartnern: Arlett Nehring, Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft (TLL), Dornburg; Jana Peters und Andreas Gurgel, Landesforschungsanstalt für Landwirtschaft und Fischerei Mecklenburg-Vorpommern (LFA), Gülzow; Jana Grunewald, Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie (LfULG), Leipzig; Sandra Kruse, Landwirtschaftliches Technologiezentrum Augustenberg (LTZ), Rheinstetten; Frerich Wilken, Landwirtschaftskammer Niedersachsen (LWKNS), Oldenburg.

Darüber hinaus danken wir der Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR) und dem Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz (BMELV) für die Finanzierung.

Humusreproduktion von Gärprodukten aus Biogasanlagen

KAREN SENSEL, KERSTIN NIELSEN, VERENA WRAGGE

1 Einleitung

Um die Nachhaltigkeit des Energiepflanzenanbaus gewährleisten zu können, muss die Aufklärung und Sicherung der Humusreproduktion beim pflanzenbaulichen Einsatz von Gärprodukten vorrangiges Ziel sein.

Durch aerobe Langzeit-Inkubationsversuche wurde über die Messung der CO₂-Freisetzung von Boden-Dünger-Gemischen der Kohlenstoffabbau (C-Abbau) aus Gärprodukten der Nass- und Trockenfermentation im Vergleich zu Rindergülle und frischem Stallmist im Boden bestimmt. Die Versuche wurden in einem Respirometer (Respicond, Nordgren Innovations, Sweden), welches die CO₂-Emission nach dem Prinzip der Konduktometrie misst, durchgeführt. Je 50 g Boden wurden mit einer Düngermenge, die 0,11 mg N/g Boden entspricht, gemischt.

2 Ergebnisse

Die wichtigsten Stoffkennwerte der verwendeten Dünger sind in Tabelle 1 dargestellt.

Tab. 1: Stoffliche Zusammensetzung der Düngstoffe vor der Mineralisierung unter besonderer Berücksichtigung der Faserbestandteile

Zusammensetzung	Einheit	Gärprodukt (trocken)	Stallmist frisch	Rindergülle	Gärprodukt (nass)
Trockensubstanz (TS)	%	15,1	35,5	7,9	7,2
Org. Trockensubstanz (oTS)	% TS	87,5	87,4	79,3	71,4
C _{ges}	% TS	44,8	43,1	43,5	39,0
Lignin (L)	% TS	9,2	11,2	7,3	13,1
Hemizellulose (HZ)	% TS	21,0	19,9	17,3	5,2
Zellulose (Z)	% TS	20,7	32,7	16,3	8,8
Summe Z + HZ	% TS	41,7	52,6	33,6	14,0

Aus der CO₂-Exhalation der Boden-Dünger-Gemische im aeroben Inkubationsversuch wurden die umgesetzten Kohlenstoffmengen des durch die Dünger eingebrachten Kohlenstoffs berechnet (Abb. 1).

Mit 75 respektive 74 % weisen Rindergülle und das Gärprodukt (trocken) die höchste C-Mineralisierung auf (Z + HZ = 33,6 bzw. 41,7 % TS). Der geringste mineralisierte

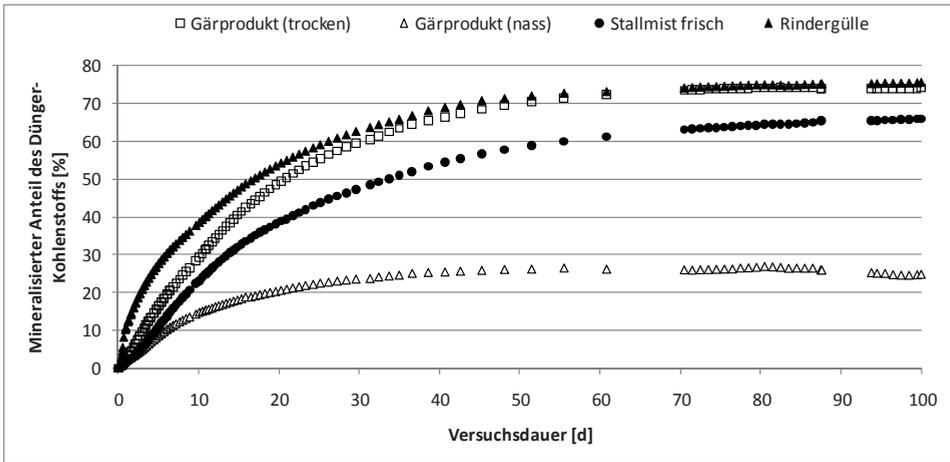


Abb. 1: C-Mineralisierungsverlauf der Düngestoffe im Inkubationsversuch (100 d, $T = 22 \pm 1$ °C im Sechsfachansatz)

C-Anteil von 25 % wurde für das Gärprodukt (nass) ermittelt ($Z + HZ = 14,0$ % TS). Nach 100 Tagen ist die C-Mineralisierung von frischem Stallmist noch nicht abgeschlossen. Sie lag zu Versuchsende bei 66 % ($Z+HZ = 52,6$ % TS). Nach den bisher vorliegenden Untersuchungen enthält das Gärprodukt (nass) weniger organische Substanz als Rindergülle, welche allerdings stabiler ist als die organische Substanz in Rindergülle und daher in höherem Maße zur Humusproduktion beiträgt. Die organische Substanz im Gärprodukt (trocken) ist dagegen deutlich weniger stabil als die von frischem Stallmist. Im durchgeführten Versuch eignete sich der Parameter $Z + HZ$ zur Vorhersage der C-Mineralisierung.

3 Fazit

Nach dem VDLUFA-Standpunkt Humusbilanzierung aus dem Jahr 2004 werden bisher das flüssige Gärprodukt der Rindergülle und das feste Gärprodukt dem Stallmist hinsichtlich ihrer Humusproduktion gleichgesetzt. Auf der Basis der dargestellten Ergebnisse bedürfen die Richtwerte der VDLUFA einer erneuten Prüfung und gegebenenfalls einer Überarbeitung und stärkeren Differenzierung.

Gefördert durch: Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz (BMELV)

Projektträger: Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. (FNR)

Potenzielle Wertschöpfung für Biogasanlagenbetreiber durch die Aufbereitung von Fermentierungsabfällen zu Brennstoff oder zu lagerfähigem Dünger

SWANTJE MIGNON SCHLEDERER

Die Universität der Bundeswehr in München betreut das florafuel-Verfahren zur Aufbereitung von Brennstoff aus feuchter Biomasse. Innerhalb dieses Forschungsvorhabens wurden zwei kontinuierlich laufende Niedertemperaturtrocknungssysteme entwickelt, die zum Patent angemeldet wurden und speziell für den Einsatz zur Nutzung der Abwärme von Industrie- oder Biogasanlagen konzipiert sind. Die Vorteile dieser Trocknungssysteme liegen in der energieeffizienten kontinuierlichen Trocknung und in der vergleichsweise günstigen Technik, die kurz vor der Marktreife steht. Durch diese Trocknungssysteme kann die Abwärme von Biogasanlagen einerseits für die Trocknung von Holzhackschnitzeln Verwendung finden, andererseits in Kombination mit dem florafuel-Verfahren zur Bereitstellung von Brennstoffen aus überschüssigen Fermentierungsabfällen als Monochargen oder Mischchargen eingesetzt werden. Zudem können die saisonal bedingt, nicht austragfähigen Fermentierungsabfälle getrocknet und als lagerfähiger Dünger vorgehalten werden. Dadurch kann sich die Wertschöpfung der Biogasanlagenbetreiber steigern und die Produktionswärme wird einer sinnvollen Nutzung zugeführt. Des Weiteren können klimarelevante Emissionen, die bei der Nachrotte entstehen können, durch eine zügige Überführung in den aeroben Prozess bzw. in den trockenen Zustand reduziert werden (Abb. 1).

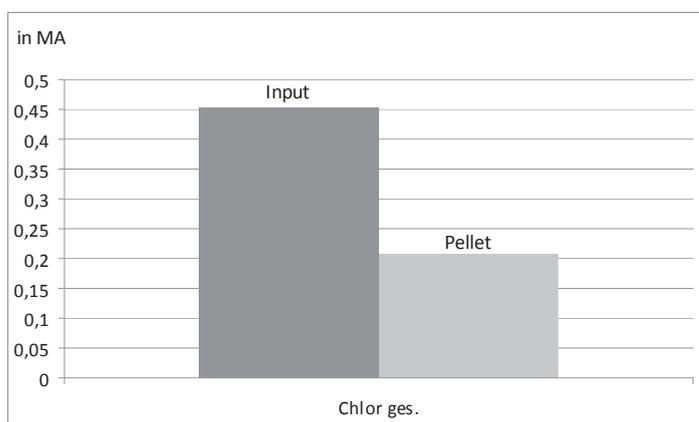


Abb. 1: Reduzierung der verbrennungstechnisch bedenklichen Inhaltsstoffe – Beispiel Chlor

Der positive Einfluss auf die Brennstoffqualität durch das florafuel-Verfahren beschränkt sich nicht nur auf die Reduzierung des Wassergehaltes der Biomassefraktionen, welcher alleine durch die mechanische Entwässerung mit sehr geringen Energieaufwand reduziert wird, sondern setzt sich in der Reduzierung der verbrennungstechnisch bedenklichen für Halmgut üblichen Inhaltsstoffe, wie Chlor, Stickstoff und Kalium fort. Der Heizwert von Pellets aus Fermentierungsabfällen liegt um 17,1 MJ/kg (wf), bei einer Ascheerweichungstemperatur von 1090 °C und einem Aschegehalt von rund 13 % (Abb. 2).

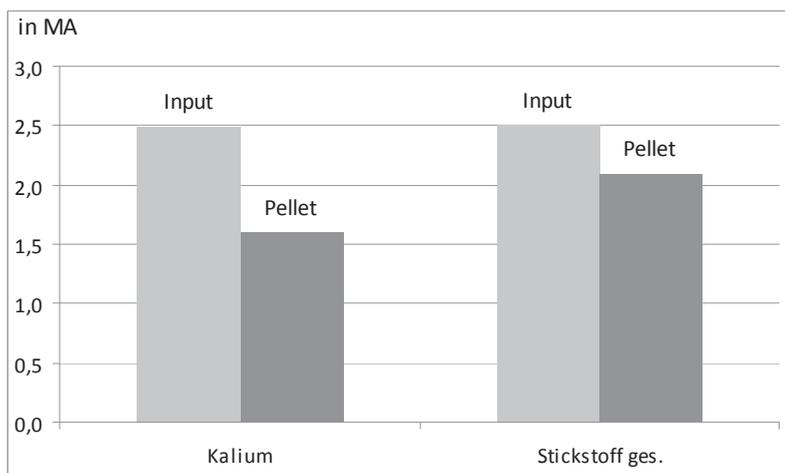


Abb. 2: Reduzierung der verbrennungstechnisch bedenklichen Inhaltsstoffe – Beispiel Kalium und Stickstoff (Quelle: SCHLEDERER, S. (2008): Das florafuel-Verfahren – Auszug aus Forschungsergebnissen)

Als Vorteile können genannt werden:

- Potenzielle Nutzung der Abwärme von Fermentationsanlagen
- Wahlmöglichkeit zwischen der Bereitstellung eines lagerfähigen Düngers oder eines alternativen CO₂-neutralen Brennstoffs
- Kostengünstige Technologie zur Trocknung der Gärreste und Holzhackschnitzel
- Kleinere Zwischenlager für die Vorhaltung der Fermentierungsabfälle
- Reduzierung der Lager- und Ausbringkosten für Fermentierungsabfälle
- Weitere Wertschöpfung durch die Bereitstellung von Brennstoffen aus überschüssigen Fermentierungsabfällen, wie getrockneten Holzhackschnitzeln
- Reduzierung von Umweltbelastungen (Klimagase, geruchsintensive Komponenten)

Ökonomische Beurteilung von Wärmenutzungskonzepten für Biogasanlagen

CLEMENS FUCHS, JOACHIM KASTEN, JOCHEN BLANKEN, ROBERT BELOW

1 Einleitung – Problemstellung

Die Forderung nach steigender Wärmenutzung ist Anlass für ein Forschungsprojekt der Hochschule Neubrandenburg, bei dem Wärmenutzungskonzepte für Biogasanlagen in Mecklenburg-Vorpommern (M-V) erfasst, ihre Potenziale ausgelotet und ökonomisch beurteilt werden. Zur Datenerhebung wurde eine Ist-Analyse in Form einer schriftlichen Befragung der Biogasanlagenbetreiber in M-V (n = 194 Biogasanlagen) durchgeführt. Der Fragebogen umfasste folgende Bereiche: (1) Allgemeine Angaben zur Biogasanlage (Größe, Baujahr, Substrate), (2) Wärmenutzung (Art, Menge, Zufriedenheit, Verbesserungsvorschläge) sowie (3) Zukünftige Pläne und Potenzial der Wärmenutzung. Es wurden 65 Fragebögen ausgewertet (33,5 % Rücklauf). Nachfolgend sind die Ergebnisse einer ersten Analyse dargestellt.

2 Ergebnisse der Befragung

Die ermittelte durchschnittliche Anlagengröße beträgt $870 \text{ kW}_{\text{el}}$, bei einer Spanne von $65 \text{ kW}_{\text{el}}$ bis $6500 \text{ kW}_{\text{el}}$ bzw. $888 \text{ kW}_{\text{th}}$. Drei Viertel dieser 65 Anlagen wurden in den Jahren 2005 bis 2008 gebaut. 22 Betreiber (35 %) planen in den nächsten Jahren den Ausbau der bestehenden Biogasanlage oder den Bau einer weiteren.

53 (83 %) von den 65 ausgewerteten Biogasanlagen nutzen zumindest Teile der auskoppelbaren Abwärme. 37 Betriebe (57 %) nutzen die Wärme selbst und von 31 Anlagen (48 %) wird Wärme verkauft. Die Art der Wärmenutzung ist vielfältig: 26 von 53 Betrieben (68 %) nutzen die anfallende Wärme zum Beheizen im Betrieb, 14 (26 %) zum Trocknen von Gärresten, Getreide oder Holz, 21 (40 %) betreiben ein Nah- oder Fernwärmenetz und ein Betrieb beheizt eine Aquakulturanlage. Die Auswertung über den KWK-Bonus (n = 23) ergab einen gewogenen Anteil von nur 15 % an Wärmenutzung.

Um die Wärme nutzen zu können, sind oftmals zusätzliche Investitionen erforderlich. Die Rentabilität hängt zum einen von den jährlichen Kosten dieser Investition (Nutzungsdauer 15 Jahre, Zinssatz 6 %) und den Erlösen (KWK-Bonus in Höhe von 3 Cent/kW_{th} und weitere Erlöse für ausgekoppelte Wärme) ab. Neben der Vergütung durch den KWK-Bonus gibt es für 40 (78 %) von 51 Biogasanlagen noch weitere Einnahmen oder

Einsparungen. So geben 21 (55 %) von 38 Betrieben an, Heizkosten zu sparen, 11 (29 %) erwirtschaften Erlöse durch Wärmeverkauf. Durchschnittlich werden 43.233 € an Erlösen bzw. Einsparungen erzielt.

In Abbildung 1 wird der Nutzen der ausgekoppelten Wärme in Abhängigkeit von den Investitionen dargestellt. Auf der y-Achse sind die MW_{th}^1 , für die der KWK-Bonus bzw. zusätzliche äquivalente Wärmeerlöse eingenommen werden, dargestellt und auf der x-Achse sind die Investitionskosten für die Wärmenutzung in €/installierte kW_{el} angegeben. Die eingezeichnete Diagonale gibt normativ den Break-even von Mindestwärmenutzung bzw. maximaler Investition bei ganzjähriger 70 %iger Wärmeauskoppelung an. Anlagen, die darunter liegen, sind nicht wirtschaftlich.

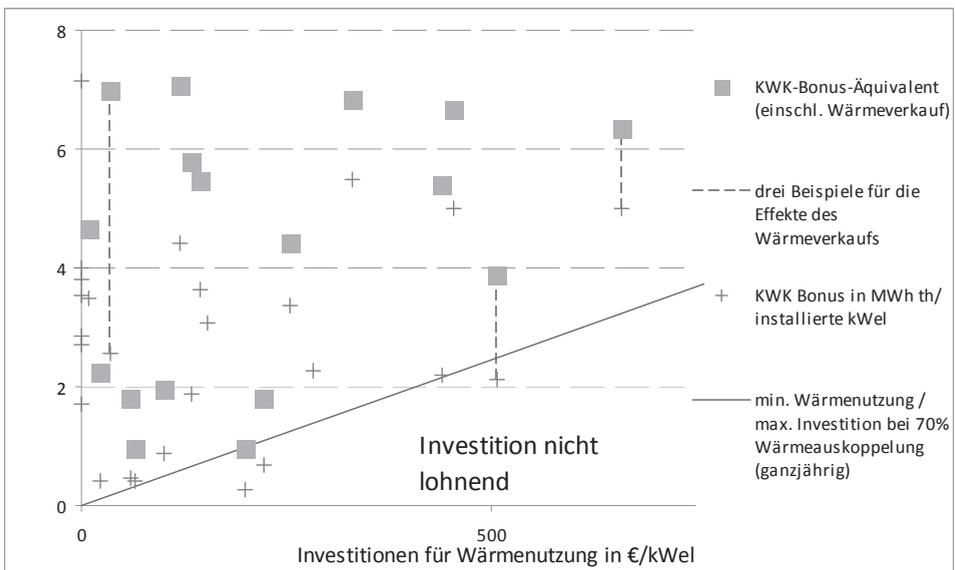


Abb. 1: Erzielter KWK-Bonus, zusätzliche Erlöse aus Wärmeverkauf oder aus eingesparten Kosten sowie der Break-even für die Mindestwärmenutzung bzw. die maximale Investitionssumme, jeweils bezogen auf die installierte Anlagengröße in kW_{el} ($n = 26$)

37 (73 %) von 51 Anlagenbetreibern sind mit ihrem Wärmekonzept zufrieden oder sehr zufrieden. Lediglich 3 (6 %) sind unzufrieden, 11 Betreiber (22 %) schätzen es als neutral ein. 11 (25 %) von 41 sehen die Gesamtwärmenutzung als nicht ausreichend an. Von 51 Biogasanlagen sehen 32 Betriebsleiter (63 %) Verbesserungsmöglichkeiten im

¹ Bei ganzjährigem Verbrauch können je installierter kW 8 670 kWh (24 h/Tag mal 365 Tage) bzw. 8,67 MWh entnommen werden.

jeweiligen Wärmekonzept. Für 9 (29 %) von 31 Anlagen bedarf es einer Vergrößerung, 5 (16 %) bemängeln saisonbedingte Schwankungen.

10 (17 %) von 60 Anlagenbetreibern sehen an ihrem Standort großes, 17 (28 %) mittleres, 26 (43 %) geringes und 11 (18 %) gar kein Potenzial für weitere Wärmenutzung. Für 25 (49 %) von 51 Anlagen gibt es weitere Möglichkeiten in der Einrichtung oder dem Ausbau eines Nah-/Fernwärmenetzes, bei 12 Anlagen (24 %) Möglichkeiten der Beheizung und 21 Anlagen (41 %) haben Potenzial in der Trocknung von Gärresten, Getreide oder Holz.

Einfluss der Biogasproduktion auf den Landpachtmarkt in Niedersachsen

CARSTEN H. EMMANN, CORD-HERWIG PLUMEYER, LUDWIG THEUVSEN

Bedingt durch den starken und immer noch anhaltenden Strukturwandel werden zunehmend mehr landwirtschaftliche Nutzflächen frei, die primär auf den Landpachtmarkt gelangen. So hat sich beispielsweise in Niedersachsen vor allem durch Betriebsaufgaben (z.B. 2005–2007: 4,4 Betriebsaufgaben pro Tag) der Pachtflächenanteil sukzessive auf ca. 54 % im Jahr 2007 erhöht. Aktuell herrscht aufgrund des agrarstrukturellen Wachstumsdrucks zwischen den Landwirten ein verhältnismäßig intensiver Wettbewerb um Pachtflächen, wobei neuere Entwicklungen, wie die Bioenergieproduktion, diesen weiter forcieren. So tangieren beispielsweise Biogasanlagen auf Grundlage von nachwachsenden Rohstoffen vermehrt die regionalen Bodenmärkte, da die flächenintensiven Anlagen regional am Landpachtmarkt mit anderen traditionellen landwirtschaftlichen Betriebszweigen (z.B. Veredelungswirtschaft, Ackerbau) um den knappen Produktionsfaktor Boden konkurrieren. Folglich sind zumindest regional bei hohen Biogasanlagendichten auch Pachtpreissteigerungen aufgrund einer erhöhten Flächennachfrage der Biogasanlagen nicht auszuschließen.

Vor diesem Hintergrund wurden in den Jahren 2009 und 2010 für Niedersachsen, dem Bundesland in Deutschland mit der höchsten installierten elektrischen Leistung an Biogasanlagen, zwei empirische Erhebungen durchgeführt, um regionale Unterschiede am niedersächsischen Landpachtmarkt zu analysieren und den Einfluss der Biogasproduktion auf den Pachtmarkt zu evaluieren. Die nachfolgenden, ausgewählten Ergebnisse basieren zum einen auf einer landesweiten Pächterbefragung (Rücklaufquote: 32,6 %) und zum anderen auf einer zweiten, kleinräumigeren Erhebung (Rücklaufquote: 36,0 %) in den biogasstarken Landkreisen Emsland, Oldenburg, Soltau-Fallingb.ostel, Celle und Rotenburg (Wümme).

Die Analysen zeigen, dass sowohl die Pachtpreise für Acker- und Grünland als auch die von den Probanden festgestellten Pachtpreisveränderungen in den Jahren 2005–2010 in Niedersachsen stark variieren. Der Einfluss der relativ jungen Biogasproduktion auf die Pachtpreisentwicklung wird von den Pächtern zudem deutlich unterschiedlich bewertet. In der viehreichen Veredelungs- und der Küstenregion werden die Biogasanlagen schon als Hauptgrund für den Pachtpreisanstieg angeführt, während in der Region Nord-Ost und der Ackerbauregion andere Gründe genannt werden. Folglich scheint die Inbetriebnahme von Biogasanlagen in der Ackerbauregion aus Sicht der regionalen Bodenmärkte bislang keine größeren Probleme hervorzurufen, sodass primär hier Potenziale

für einen weiteren Biogasausbau in Niedersachsen liegen. Des Weiteren kann gezeigt werden, dass bei einer regional hohen Biogasanlagendichte auch in viehschwächeren Gebieten die Biogasproduktion die Pachtmärkte gegenwärtig verstärkt tangiert und zu steigenden Ackerpachtpreisen führt. So haben in den fünf analysierten Landkreisen primär diejenigen Landwirte relativ hohe Pachtpreisanstiege festgestellt, die entweder viele Biogasanlagen in ihrer direkten Umgebung haben oder bei denen die nächste Anlage weniger als 2 km vom eigenen Betrieb entfernt ist.

Aus den Befragungsergebnissen geht weiter hervor, dass die Beratung und auch die Hersteller bei geplanten Investitionen in die Biogasproduktion vermehrt Gemeinschaftsanlagen und Lieferbeziehungen zur Substratabsicherung empfehlen sollten, da auf diesem Wege die angespannten Pachtmärkte weniger stark tangiert werden, Veredelungsgewinne aus der Biogasproduktion eher bei aktiven Landwirten verbleiben und die Förderung durch das EEG weniger stark auf die Landpachtpreise überwältigt wird.

Durchführung einer ökobilanziellen Bewertung von Biogasanlagen unter Berücksichtigung der niedersächsischen Verhältnisse

MEIKE SCHMEHL, MARTINA HESSE, JUTTA GELDERMANN

Der weitgehend geschlossene CO₂-Kreislauf, die Erneuerbarkeit der pflanzlichen Rohstoffe und der Aufbau regionaler Wertschöpfungsketten sind einige der zahlreichen Vorteile, welche die Bioenergieerzeugung aufweist (Landwirtschaftskammer Niedersachsen 2008). Die Biogasnutzung zeichnet sich in diesem Zusammenhang durch die vielseitigen Einsatzmöglichkeiten aus, die in Form der Strom-, Wärme- und Treibstoffherzeugung bestehen. Wirtschaftliche Anreize für die Biogaserzeugung bietet das EEG. Diese treiben in erster Linie den Ausbau der Biogasanlagen voran. Mit prognostizierten 1 300 Anlagen in 2011 wird sich die Zahl der Biogasanlagen in Niedersachsen mit Bezug auf 2004 nahezu verdreifachen (Landwirtschaftskammer Niedersachsen 2011).

Inwiefern die Biogasnutzung die Erwartungen bezüglich der ökologischen Vorteile (z.B. positive Treibhausgasbilanz) erfüllt, kann über das Bewertungsinstrument der Ökobilanz untersucht werden.

Ziel dieses Projektes ist die Durchführung von Ökobilanzstudien für Biogasanlagen unter Berücksichtigung der besonderen niedersächsischen Verhältnisse. Die konkrete Umsetzung erfolgt für vier existierende Anlagen aus typischen niedersächsischen Regionen (Ackerbauregion am Beispiel der Hildesheimer Börde, Grenzstandort, Veredelungs- und Milchviehregion).

Literatur

Landwirtschaftskammer Niedersachsen (2008): Nachwachsende Rohstoffe – Anbauhinweise für die energetische und stoffliche Verwertung, Hannover

Landwirtschaftskammer Niedersachsen (2011): 1 300 Anlagen liefern 7,5 Prozent des Stroms. Pressemitteilung vom 16.03.2011, Hannover

Danksagung

Wir danken dem Ministerium für Ernährung, Landwirtschaft, Verbraucherschutz und Landesentwicklung für die Initiierung und finanzielle Unterstützung des Forschungsprojektes. Des Weiteren möchten wir 3N (Kompetenzzentrum Niedersachsen Netzwerk Nachwachsende Rohstoffe e.V.) für die Unterstützung bei der Auswahl geeigneter Biogasanlagen und der Datenakquise danken.

Modellbasierte Optimierung der Biogasnutzung im deutschen Energiesystem

DAVID BALUSSOU, TOBIAS HEFFELS, RUSSELL MCKENNA, WOLF FICHTNER

Mit einem linearen Optimierungsmodell soll die Entwicklung ausgewählter Biomasse-nutzungspfade im deutschen Energiesystem bis zum Jahre 2040 analysiert werden. Hierzu wird das am Institut für industrielle Produktion und Industriebetriebslehre (IIP) entwickelte Modell PERSEUS (Program Package for Emission Reduction Strategies in Energy Use and Supply) auf den Ebenen der Energieerzeugung, -verteilung und -nachfrage genutzt und weiterentwickelt (Abb. 1).

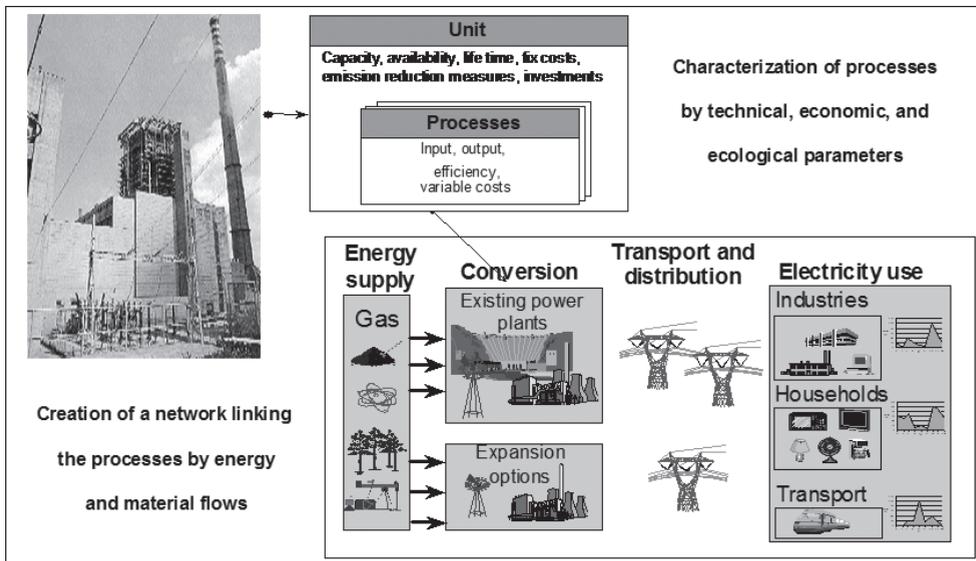


Abb. 1: Modellstruktur im PERSEUS

Ziel ist eine kostenminimale Energiesystemstruktur, die durch zahlreiche Nebenbedingungen, z. B. Zubaubeschränkungen von Kraftwerken, Emissionsrestriktionen (Emissionshandel), die Realität bestmöglich abbildet. Die Wettbewerbsfähigkeit von Biogas oder Biomethan im Vergleich mit anderen Bioenergieträgern soll analysiert werden für verschiedene Endnutzungsoptionen (Kraftstoffe, Wärme und Strom). Die räumliche Auflösung des Modells spielt hierbei eine wichtige Rolle, besonders bezüglich auf die Wärmenutzung in Nahwärmenetze sowie für den Einsatz von BtL-Prozessen (Stichwort: Transportkosten). In diesem Sinne sollen anlagenspezifische Daten auf regionaler Ebene

(Bundesland bzw. Landkreise) erfasst werden, um das gesamte deutsche „Biogassystem“ abzubilden (Abb. 2).

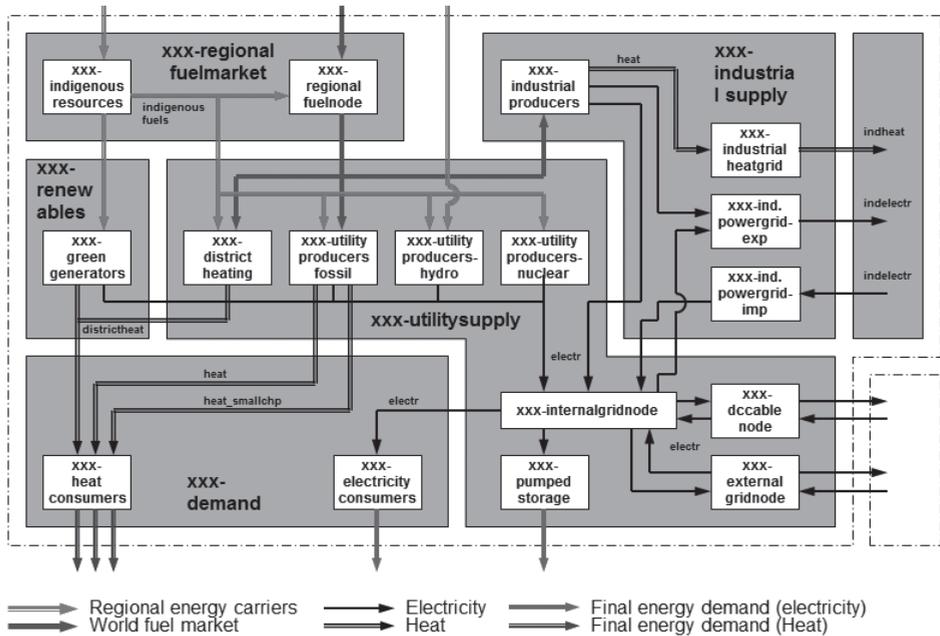


Abb. 2: Regionale Struktur des Modells

Anschließend soll die Integration der betrachteten Nutzungspfade in das deutsche Bioenergiesystem unter unterschiedlichen Szenarien (Business as usual, Biomasse im Wettbewerb mit anderen Bioenergieträgern, Nutzungskonkurrenzen, THG-Minderungsstrategien, GasNZV-Ziele für die Einspeisung von Biomethan ins Erdgasnetz bis 2020) gewährleistet werden sowie der Einfluss von unterschiedlichen Anreizsystemen (EEG-Einspeisevergütung, KWK-Gesetz, CO₂-Emissionshandel) analysiert werden.

Kernfragen:

- Welche Auswirkungen hat der Einsatz von Biogasanlagen bei den jeweiligen Rahmenbedingungen auf das gesamte Energiesystem?
- Wie verändert sich die Kraftwerkseinsatzplanung?
- Inwieweit werden sich die Technologien der energetischen Bioenergienutzung und dabei speziell die untersuchten Technologien der Co-Vergärung durchsetzen und welche anderen erneuerbaren Energien oder auch konventionellen Technologien werden dadurch verdrängt?
- Ableitung von Investitions- und Einsatzentscheidungen und Entwicklung einer nachhaltigen Biomassestrategie?

Steuerbare und bedarfsorientierte Stromerzeugung aus Biogas

WIEBKE BEYRICH, UWE HOLZHAMMER

Mit dem stetigen Ausbau der erneuerbaren Energien (EE) und dem damit gleichzeitig immer weiter steigenden Anteil an witterungsabhängigen Energieerzeugern, wie Windenergie- und PV-Anlagen, erhöhen sich auch die Anforderungen an die erneuerbaren sowie die konventionellen Stromerzeuger, den Bedarf der Stromverbraucher jederzeit zu decken. Vor diesem Hintergrund ist es zwingend notwendig, neben dem Aufbau eines leistungsfähigen Stromübertragungsnetzes, sowie der Erschließung neuer Speicherkapazitäten und Lastmanagementpotenziale auch Erzeugungsmanagement zu betreiben. In diesem Zusammenhang sollte die Möglichkeit der Steuerung der Stromerzeugung aus Biomasse, insbesondere aus Biogas und Biomethan (auf Erdgasqualität aufbereitetes Biogas), optimal ausgenutzt werden.

Biogasanlagen speisen derzeit aufgrund der fixen Vergütung durch das EEG relativ konstant und zeitunabhängig ins Stromnetz ein. Sie besitzen jedoch auch das Potenzial, Strom am Bedarf orientiert bereitzustellen und damit die fluktuierenden Einspeisungen witterungsabhängiger erneuerbarer Energieträger auszugleichen. So erlaubt die Speicherung und Nutzung des Biogases in/aus zusätzlichen Gasspeichern und der Nutzung des Erdgasnetzes durch Biomethan kombiniert mit höheren elektrischen Erzeugungskapazitäten die Reaktion auf kurzfristige Bedarfsschwankungen bei großer Stromnachfrage. Da die Speicher- und Erzeugungskapazitäten aufgrund von Investitions- und Betriebskosten sowie genehmigungsrechtlichen Einschränkungen jedoch nur in Grenzen erweiterbar sind, lässt sich eine Reduzierung des Gasspeicherbedarfs auch durch eine bedarfsorientierte Biogaserzeugung realisieren.

Eine Stromlieferung nach Fahrplan und Vermarktung am Spotmarkt, der European Power Exchange (EPEX Spot) durch Biogasanlagen ist rechtlich im Moment möglich, wenngleich ökonomisch nur im Einzelfall realisierbar. Die rechtliche Situation bei der Bereitstellung von Regelenergie durch EE weist im Moment noch Unsicherheiten auf, sodass hier kaum praktische Erfahrungen vorliegen.

Eine Vermarktung der Strommengen am Spotmarkt wird im Kabinettsentwurf der Bundesregierung zum EEG 2012 vom 6. Juni 2011 (BMU 2011) durch verschiedene Mechanismen zur Direktvermarktung beschrieben und möglicherweise am 8. Juli 2011 vom Parlament beschlossen. So wird über die optionale Marktprämie als Anreizinstrument zur Direktvermarktung nachgedacht. Bei einem Stromverkauf an Dritte über den Spotmarkt würde dann die Marktprämie zusätzlich zu den Markterlösen gezahlt. Darüber hinaus soll mit einer Flexibilitätsprämie eine bedarfsorientierte Stromproduktion aus Biogas

und Biomethan angereizt werden. Die Flexibilitätsprämie ist nach diesem Vorschlag mit der Direktvermarktung des produzierten Stroms verbunden. Sie vergütet die zusätzlich benötigten Kapazitäten und schafft damit einen Anreiz für die technische Ausstattung der Anlage zur steuerbaren Betriebsweise. Dadurch wäre zukünftig ein erster Schritt in ein besseres Zusammenspiel der erneuerbaren Energien mit stark wachsenden Anteilen von 16,8 % im Jahre 2010 (AGEEStat 2011) über 35 % im Jahre 2020 bis zu 50 % im Jahre 2030 (BMW/BMU 2010) zur bedarfsorientierten Stromproduktion getan.

Insgesamt wird bei den angestrebten Anteilen der erneuerbaren Energieerzeugung deutlich, dass neue Mechanismen eingeführt werden müssen, um das Potenzial der steuerbaren Stromproduktion durch Biogas und Biomethan optimal ausnutzen zu können. Nur in der Kombination der technischen Möglichkeiten von Lastmanagementpotenzialen, Speichertechnologien, Stromnetzausbau und Erzeugungsmanagement sind die Herausforderungen einer Energieversorgung mit hohen Anteilen EE lösbar.

Literatur

- Arbeitsgruppe Erneuerbare Energien Statistik AGEEStat (2011): Daten des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit zur Entwicklung der erneuerbaren Energien in Deutschland im Jahr 2010 auf der Grundlage der Angaben der Arbeitsgruppe Erneuerbare Energien Statistik, Berlin
- Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit BMU (2011): Gesetzesentwurf der Bundesregierung vom 06.06.2011; Entwurf eines Gesetzes zur Neuregelung des Rechtrahmens für die Förderung der Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien, Berlin
- Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie BMWi, Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit BMU (2010): Energiekonzept für eine umweltschonende, zuverlässige und bezahlbare Energieversorgung, Berlin

Anschriften der Autoren

Thomas Balling
Agrokraft Streutal GmbH
Berliner Straße 19 a
97616 Bad Neustadt

David Balussou
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
Institut für industrielle Produktion und
Industriebetriebslehre (IIP)
Hertzstraße 16
76187 Karlsruhe

Anton Baumann
Freier Biogas-Berater
Rätikonweg 43
88239 Wangen im Allgäu

Wiebke Beyrich
Fraunhofer IWES
Abteilung Bioenergie-Systemtechnik
Goethestraße 27
34119 Kassel

Andrea Biertümpfel
Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft
Ref. 430 Nachwachsende Rohstoffe
Apoldaer Straße 4
07774 Dornburg-Camburg

Rainer Bolduan
Europäisches Institut für Energieforschung
Emmy-Noether-Straße 11
76131 Karlsruhe

Simon Bolli
Forschungsanstalt Agroscope Reckenholz-
Tänikon ART
Agrarökonomie und Agrartechnik Tänikon
8356 Ettenhausen/Schweiz

Hauke Bronsema
Georg-August-Universität Göttingen
Department für Agrarökonomie und
Rurale Entwicklung
Platz der Göttinger Sieben 5
37073 Göttingen

Björn Bugdahl
Landwirtschaftliches Labor Dr. Janssen GmbH
Rotwiese 3
37191 Gillersheim

Sandra Claus
Christian-Albrechts-Universität zu Kiel
Institut für Pflanzenbau und Pflanzenzüchtung
Hermann-Rodewald-Straße 9
24118 Kiel

Dr. Kathrin Deiglmayr
Technologie- und Förderzentrum (TFZ) im
Kompetenzzentrum für Nachwachsende
Rohstoffe
Schulgasse 18
94315 Straubing

Claudia Demmig
Universität Rostock
Agrar- und Umweltwissenschaftliche Fakultät
Justus-von-Liebig-Weg 6
18059 Rostock

Dr. Stefan Dröge
Prüf- und Forschungsinstitut Pirmasens
Marie-Curie-Straße 19
66953 Pirmasens

Dr. Gunter Ebel
Landesamt für Ländliche Entwicklung, Land-
wirtschaft und Flurneuordnung
Referat Ackerbau und Grünland
Stahnsdorfer Damm 1
14532 Stahnsdorf/OT Güterfelde

Dr. Mathias Effenberger
Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft
Institut für Landtechnik und Tierhaltung
Vöttinger Straße 36
85354 Freising

Carsten H. Emmann
Georg-August-Universität Göttingen
Department für Agrarökonomie und Rurale
Entwicklung
Platz der Göttinger Sieben 5
37073 Göttingen

Nils Engler

Universität Rostock
Agrar- und Umweltwissenschaftliche Fakultät
Justus-von-Liebig-Weg 6
18059 Rostock

Marc Fleureck

Europäische Kommission
Generaldirektion Landwirtschaft und ländliche
Entwicklung
Rue de la Loi 130
1040 Brüssel/Belgien

Beate Formowitz

Technologie- und Förderzentrum (TFZ) im
Kompetenzzentrum für Nachwachsende
Rohstoffe
Schulgasse 18
94315 Straubing

Prof. Dr. Clemens Fuchs

Hochschule Neubrandenburg
Fachbereich Agrarwirtschaft und Lebensmittel-
wissenschaften
Postfach 11 01 21
17041 Neubrandenburg

Dr. Felix Garlipp

Georg-August-Universität Göttingen
Fakultät für Agrarwissenschaften
Universitätsstraße 7
49377 Vechta

Prof. Dr. Bärbel Gerowitt

Universität Rostock
Institut für Landnutzung
Satower Straße 48
18059 Rostock

Hans-Werner Greß

ABO Wind AG
Unter den Eichen 7
65195 Wiesbaden

Dr. Waldemar Gruber

Landwirtschaftskammer Nordrhein-Westfalen
Ref. 24 – Energie, Bauen und Technik
Siebengebirgsstraße 200
53229 Bonn

Jana Grunewald

Sächsisches Landesamt für Umwelt,
Landwirtschaft und Geologie
Referat 71 – Pflanzenbau und
Nachwachsende Rohstoffe
Gustav-Kühn-Straße 8
04159 Leipzig

Hagen Hartmann

Zentrum für Biodiversität und nachhaltige
Landnutzung
Georg-August-Universität Göttingen
Grisebachstraße 6
37077 Göttingen

Dr. Monika Heiermann

Leibniz-Institut für Agrartechnik Potsdam-
Bornim e.V. (ATB)
Abt. Technikbewertung und Stoffkreisläufe
Max-Eyth-Allee 100
14469 Potsdam

Frank Hengelhaupt

Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft
Naumburger Straße 98
07743 Jena

Prof. Dr. Christa Hoffmann

IfZ – Institut für Zuckerrübenforschung
Holtenser Landstraße 77
37079 Göttingen

Dorothea Hofmann

Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft
Institut für Pflanzenbau und Pflanzenzüchtung
Am Gereuth 4
85354 Freising

Michael Hub

Umweltgutachterbüro Michael Hub
Niedwiesenstraße 11a
60431 Frankfurt am Main

Prof. Dr. Johannes Isselstein

Georg-August-Universität Göttingen
Department für Nutzpflanzenwissenschaften
Von-Siebold-Straße 8
37075 Göttingen

Dr. Egon Janssen

Landwirtschaftliches Labor Dr. Janssen GmbH
Rotwiese 3
37191 Gillersheim

Ulrich Keymer

Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft
Institut für Ländliche Strukturentwicklung,
Betriebswirtschaft und Agrarinformatik
Menzingerstraße 54
80638 München

Andreas König
Gesellschaft für Materialforschung und
Prüfungsanstalt für das Bauwesen Leipzig mbH
Hans-Weigel-Straße 2 b
04319 Leipzig

Prof. Dr. Helmut König
Johannes Gutenberg-Universität
Institut für Mikrobiologie und Weinforschung
Johannes-Joachim-Becherweg 15
55128 Mainz

Jan Reent Köster
Christian-Albrechts-Universität zu Kiel
Institut für Pflanzenernährung und
Bodenkunde
Hermann-Rodewald-Straße 9
24118 Kiel

Dr. Jan Kuever
Amtliche Materialprüfungsanstalt
Bremen (MPA)
Paul-Feller-Straße 1
28199 Bremen

Thilo Lehmann
LEHMANN Maschinenbau GmbH
Jocketa-Bahnhofstraße 34
08543 Pöhl

Dr. Andreas Lemmer
Universität Hohenheim
Landesanstalt für Agrartechnik und
Bioenergie
Garbenstraße 9
70599 Stuttgart

Dr. Jan Liebetrau
Deutsches BiomasseForschungsZentrum
gemeinnützige GmbH
Bereich Biochemische Konversion
Torgauer Straße 116
04347 Leipzig

Jens Loel
IfZ – Institut für Zuckerrübenforschung
Holtenser Landstraße 77
37079 Göttingen

Kerstin Mager
Forschungsanstalt Agroscope Reckenholz-
Tänikon ART
Agrarökonomie und Agrartechnik Tänikon
8356 Ettenhausen/Schweiz

Manuela Martin
Landesamt für Ländliche Entwicklung, Land-
wirtschaft und Flurneuordnung
Ref. Ackerbau und Grünland
Stahnsdorfer Damm 1
14532 Stahnsdorf/OT Güterfelde

Dr. Kurt Möller
Universität Hohenheim
Institut für Kulturpflanzenwissenschaften
Frunwirthstr. 20
70599 Stuttgart

Liane Müller
Deutsches BiomasseForschungsZentrum
gemeinnützige GmbH
Bereich Biochemische Konversion
Torgauer Straße 116
04347 Leipzig

Dr. Jan Mumme
Leibniz-Institut für Agrartechnik Potsdam-
Bornim e.V. (ATB)
APECS-Nachwuchsgruppe
Max-Eyth-Allee 100
14469 Potsdam

Dr. Hans Oechsner
Universität Hohenheim
Landesanstalt für Agrartechnik und
Bioenergie
Garbenstraße 9
70599 Stuttgart

Robert Heinrich Quakernack
Christian-Albrechts-Universität zu Kiel
Institut für Pflanzenbau und Pflanzenzüchtung
Hermann-Rodewald-Straße 9
24118 Kiel

Patrice Ramm
Leibniz-Institut für Agrartechnik Potsdam-
Bornim e.V. (ATB)
Abt. Bioverfahrenstechnik
Max-Eyth-Allee 100
14469 Potsdam

Dr. Stefan Rauh
Fachverband Biogas e.V.
Angerbrunnenstraße 12
85356 Freising

Dr. Monika Reuter
Schmack Biogas GmbH
Bayernwerk 8
92421 Schwandorf

Christine Riedel
Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft
Institut für Pflanzenbau und Pflanzenzüchtung
Am Gereuth 4
85354 Freising

Ursula Roth
Kuratorium für Technik und Bauwesen in der
Landwirtschaft e.V. (KTBL)
Bartningstraße 49
64289 Darmstadt

Dr. Benedikt Sauer
Georg-August-Universität Göttingen
Goldschmidtstraße 1
37077 Göttingen

Dr. Swantje Mignon Schlederer
Universität der Bundeswehr München
Institut für Wasserwesen
Werner-Heisenberg-Weg 39
85577 Neubiberg

Meike Schmehl
Georg-August-Universität Göttingen
Professur für Produktion und Logistik
Platz der Göttinger Sieben 3
37073 Göttingen

Florian Schmidt
Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft
Referat Grünland und Futterbau
Naumburger Straße 98
07743 Jena

Dr. Holger Schneider
Fachhochschule Flensburg
Kanzleistraße 91-93
24943 Flensburg

Karen Sensel
Humboldt-Universität zu Berlin
Institut für Agrar- und Stadtökologische
Projekte (IASP)
Philippstraße 13
10115 Berlin

Wolfgang H. Stachowitz
DAS-IB GmbH
Preetzer Straße 207
24147 Kiel

Philipp Starke
IfZ – Institut für Zuckerrübenforschung
Holtenser Landstraße 77
37079 Göttingen

Johannes Steinhauer
Stadtwerke Neuss GmbH
Moselstr. 25-27
41464 Neuss

Ralph Sutter
R & S ENERGY GmbH
Lange Straße 65
32756 Detmold

Anna Techow
Christian-Albrechts-Universität zu Kiel
Institut für Pflanzenbau und Pflanzenzüchtung
Herrmann-Rodewald-Straße 9
24118 Kiel

Wolfgang Urban
Ecologic Institut GmbH
Pfalzburger Straße 43/44
10717 Berlin

Dr. Birgit Vollrath
Bayerische Landesanstalt für Weinbau und
Gartenbau
Abteilung Landespflege
An der Steige 15
97209 Veitshöchheim

Hartwig von Bredow
Schnutenhaus & Kollegen
Rechtsanwälte
Reinhardtstraße 29 B
10117 Berlin

Dr. Christine von Buttlar
Interdisziplinäres Zentrum für Nachhaltige
Entwicklung
Georg-August-Universität Göttingen
Goldschmidtstraße 1
37077 Göttingen

Dr. Andreas von Felde
KWS SAAT AG
Grimsehlstraße 31
37555 Einbeck

Garnet Wachsmann
Krieg + Fischer Ingenieure GmbH
Bertha-von-Suttner-Straße 9
37085 Göttingen

Dr. Dirk Weichgrebe
Leibniz Universität Hannover
Institut für Siedlungswasserwirtschaft
und Abfalltechnik
Welfengarten 1
30167 Hannover

Prof. Dr. Friedrich Weißbach
Gösselweg 12
18107 Elmenhorst

Mark Winter
Georg-August-Universität Göttingen
Fakultät für Agrarwissenschaften
Grisebachstraße 6
37077 Göttingen

Dr. Karen Zeise
Technologie- und Förderzentrum (TFZ) im
Kompetenzzentrum für Nachwachsende
Rohstoffe
Schulgasse 18
94315 Straubing

Petra Zigl drum
agriKomp GmbH
Energiepark 2
91732 Merkendorf

Schnell und einfach

**Kalkulationsdaten
online abrufen
und berechnen**



www.ktbl.de

**Testen Sie jetzt die
kostenlose Demoverision**

KTBL-Veröffentlichungen



Faustzahlen Biogas

2009, 2. Auflage, 240 S., 19 €, ISBN 978-3-941583-28-3
(Best.-Nr. 19497)

Das Nachschlagewerk enthält alle relevanten Daten und Fakten zu Biogas in der Landwirtschaft. Es erläutert die Entwicklung des Biogassektors und die technisch-biologischen Grundlagen ebenso wie Substratbereitstellung, Gasausbeute, Gärrestverwertung, Wirtschaftlichkeit und Umweltwirkungen.



Schwachstellen an Biogasanlagen verstehen und vermeiden

2009, 2. überarbeitete Auflage, 56 S., 9 €, ISBN 978-3-939371-81-6
(Best.-Nr. 40084)

Biogasanlagen laufen nicht immer optimal. Im Heft werden die wichtigsten Schwachstellen an Biogasanlagen beschrieben und ökonomisch bewertet. Es wird gezeigt, mit welchen Maßnahmen kostenintensive technische oder biologische Schwachstellen behoben und zukünftig vermieden werden können.



Gasausbeute in landwirtschaftlichen Biogasanlagen

2010, 2. überarbeitete Auflage, 36 S., 9 €, ISBN 978-3-941583-42-9
(Best.-Nr. 40088)

Dieses Heft bietet Richtwerte zur Abschätzung der Gasausbeute in landwirtschaftlichen Biogasanlagen, die Hersteller, Planer, Berater und Betreiber bei Planung und Konzeption unterstützen.



Häußermann, U.; Döhler, H.:

Bauern unter Sonnen-Strom Technik und Wirtschaftlichkeit von Fotovoltaikanlagen in der Landwirtschaft

2011, 3. überarbeitete Auflage., 60 S., 9 €, ISBN 978-3-941583-46-7
(Best.-Nr. 40093)

Dieses Heft erläutert die technischen Grundlagen der Solarstromerzeugung, bietet Hilfe bei der Vorplanung und Wirtschaftlichkeitsberechnung auf der Grundlage der jüngsten Änderungen des EEG vom 1. Oktober 2010. Es gibt Tipps für die Wartung und den Betrieb der Anlagen.



Produktion von Pappeln und Weiden auf landwirtschaftlichen Flächen

2008, 44 S., 9 €, ISBN 978-3-939371-64-9
(Best.-Nr. 40079)

Das Heft fasst den aktuellen Wissensstand zur Produktion von Pappeln und Weiden zusammen. Es enthält Informationen zu Anpflanzung, Pflege, Ernte, Transport und Lagerung der Kulturen sowie Kosten und Erträgen.



Die Landwirtschaft als Energieerzeuger

KTBL-Vortragstagung vom 4. bis 5. Mai 2009 in Osnabrück
2009, 316 S., 25 €, ISBN 978-3-939371-85-4
(Best.-Nr. 11476)

Das Erneuerbare-Energien-Gesetz stellt die Landwirtschaft vor neue Herausforderungen. Der Tagungsband informiert über die Nutzung von Biogas, Biokraftstoffen, Biobrennstoffen und der Sonnenenergie. Er liefert Entscheidungshilfe für den Einstieg in den Betriebszweig Energie.



Betriebsplanung Landwirtschaft 2010/11

Daten für die Betriebsplanung in der Landwirtschaft
2010, 22. Auflage, 784 S., 26 €, ISBN 978-3-941583-38-2
(Best.-Nr. 19503)

Maschinenkosten kalkulieren, Arbeitseinsätze planen oder Produktionsverfahren bewerten – das KTBL-Standardwerk bietet, ergänzt durch eine Online-Anwendung, zu jedem Anlass der betrieblichen Planung umfassende Informationen zu Tierhaltung, Pflanzenproduktion und Energiegewinnung.



Boden schonen und Kosten senken

2011, 64 S., 9 €, ISBN 978-3-941583-53-5
(Best.-Nr. 40089)

Große Maschinen mit hohen Radlasten und häufigen Überfahrten verursachen besonders bei feuchten Böden große Schädigungen. Schutz vor Schadverdichtungen, Erosionen und Schadstoffeinträgen kann ein entscheidender Produktionsfaktor sein. Das Heft zeigt, dass sich der Einsatz bodenschonender Technik rechnet. In vielen Fällen sind Kosteneinsparungen möglich.



Faustzahlen für die Landwirtschaft

2009, 14. Auflage, 1180 S., 30 €, ISBN 978-3-939371-91-5
(Best.-Nr. 19494)

Auf über 1000 Seiten beinhaltet das Buch die wichtigsten Daten und Fakten zu vielen Bereichen der landwirtschaftlichen Erzeugung, zum Freilandgartenbau, zu erneuerbaren Energien und zur Betriebswirtschaft. Es ist das Standardwerk für alle, die sich mit Landwirtschaft befassen.



Ökologische und ökonomische Bewertung nachwachsender Energieträger

KTBL-Tagung vom 8. bis 9. September 2008 in Aschaffenburg
2008, 230 S., 25 €, ISBN 978-3-939371-68-7
(Best.-Nr. 11468)

Dieser Tagungsband informiert in 18 Beiträgen über die ökologische und ökonomische Bewertung nachwachsender Energieträger. Verschiedene Bewertungsansätze werden kritisch hinterfragt, mit dem aktuellen wissenschaftlichen Stand abgeglichen und abgestimmt.

Bestellhinweise

Porto- und Verpackungskosten werden gesondert in Rechnung gestellt. Preisänderungen vorbehalten. Wir freuen uns auf Ihre Bestellung. Senden Sie diese bitte an

KTBL, Bartningstraße 49, D-64289 Darmstadt | Tel.: +49 6151 7001-189 |
Fax: +49 6151 7001-123 | E-Mail: vertrieb@ktbl.de | www.ktbl.de

Besuchen Sie auch unseren Internet-Shop www.ktbl.de



Biogasanlagen in der Landwirtschaft

Poster, 2 Seiten, Erstauflage, 2,50 € zuzügl. Versand
Bestell-Nr. aid 61-3294, ISBN/EAN 426 017 9080852

Biogasanlagen sind für über 6 000 landwirtschaftliche Betriebe zu einer wichtigen zusätzlichen Einkommensquelle geworden. Viele Anlagen sind im Bau, in der Planung. Das Poster zeigt in einer zentralen Grafik die Bauteile einer modernen landwirtschaftlichen Biogasanlage und erläutert deren Funktionsweise. Der künftige Betreiber kann aus einer Tabelle entnehmen, welche Substrate hohe Gausausbeuten, bzw. Stromerträge bringen. Interessierte Personen erhalten leicht verständliche Informationen über die Leistungsfähigkeit von Biomasse und speziell darüber, was Biogas alles kann.

Bestellungen an

aid infodienst e. V. – Vertrieb
Postfach 1627, 53006 Bonn

oder 0180 3 849900* (Tel.)
0228 84 99-200 (Fax)
bestellung@aid.de

Mehr Infos auf

www.aid.de
www.aid-medienshop.de

* Kosten 9 Cent pro Minute aus dem deutschen Festnetz. Für den Mobilfunk können abweichende Tarife gelten.

Veröffentlichungen der Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR)



Leitfaden Biogas – Von der Gewinnung zur Nutzung
5. überarbeitete Auflage, 2011, 274 Seiten, A4, ISBN 3-00-014333-5

Das umfassende Standardwerk für alle mit der Biogaserzeugung und -nutzung Befassten. Enthält u. a. Informationen aus den Bereichen Biochemie, Anlagentechnik und -betrieb, Substrate, Gärreste, Gasaufbereitung und -verwertung, Recht, Ökonomie und Anlagenbeispiele.



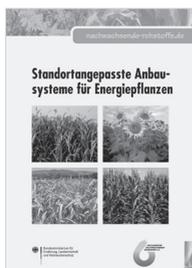
Biogas-Messprogramm II – 61 Biogasanlagen im Vergleich
1. Auflage, 2009, Buch mit CD-ROM, 168 Seiten, A4,
ISBN 978-3-9803927-8-5

Das Johann Heinrich von Thünen-Institut untersuchte zwischen 2006 und 2008 61 Biogasanlagen, die ausschließlich Energiepflanzen und Wirtschaftsdünger vergären. Die Veröffentlichung enthält alle Ergebnisse der Messkampagne und Schlussfolgerungen.



Gülzower Fachgespräche – Einsatz von Hilfsmitteln zur Steigerung der Effizienz und Stabilität des Biogasprozesses
1. Auflage, 2011, 119 Seiten, A5, ISBN 978-3-947-147-03-3

Im September 2010 tauschten sich Fachleute bei einem Gülzower Fachgespräch zum aktuellen Stand beim Thema Biogas-Hilfsmittel aus. Spurenelemente, Enzyme, Mikroorganismen und Ionenaustauscher könnten für eine effizientere Ausnutzung von Biogassubstraten sorgen. Alle Beiträge des Fachgesprächs sind in diesem Buch zusammengefasst.



Standortangepasste Anbausysteme für Energiepflanzen
3. veränderte und erweiterte Auflage, 2010, 116 Seiten, A5,
ISBN 978-3-942147-02-6

Welche Energiepflanzen können Mais im Biogasbereich ergänzen? Dies untersucht das umfangreiche, von der Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft (TLL) koordinierte Verbundvorhaben „Entwicklung und Vergleich von optimierten Anbausystemen für die landwirtschaftliche Produktion von Energiepflanzen unter den verschiedenen Standortbedingungen Deutschlands“, kurz EVA. Die Veröffentlichung enthält die Ergebnisse der ersten Projektphase von 2005–2008.

Bestellhinweise

Diese genannten FNR-Veröffentlichungen sind kostenlos bestell- oder downloadbar auf der Seite www.biogasportal.info, Mediathek.