

Biogas in der Landwirtschaft – Stand und Perspektiven

FNR/KTBL-Kongress
vom 22. bis 23. September 2015
in Potsdam





KTBL-Schrift 508

Biogas in der Landwirtschaft – Stand und Perspektiven

FNR/KTBL-Kongress
vom 22. bis 23. September 2015
in Potsdam

Herausgeber

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

Fachliche Begleitung

Programmausschuss FNR/KTBL-Biogaskongress 2015

Christoph Gers-Grapperhaus | Dr. Waldemar Gruber | Ulrich Keymer |
Dr.-Ing. Bernd Krautkremer | Dr.-Ing. Jan Liebetrau | Prof. Dr.-Ing. Bernd Linke (Vorsitzender) |
Dr. Hans Oechsner | Mark Paterson | Dr.-Ing. Gerd Reinhold | Detlef Riesel | Dr. Petra Schüsseler

Die Anschriften der Mitwirkenden sind im Anhang aufgeführt.

Ideeller Partner



Medienpartner



Die Informationen der vorliegenden Schrift wurden vom KTBL und den Autoren nach dem Stand des Wissens zusammengestellt. Das KTBL und die Autoren übernehmen keinerlei Haftung für die bereitgestellten Informationen, deren Aktualität, inhaltliche Richtigkeit, Vollständigkeit oder Qualität.

© 2015

Herausgeber und Vertrieb

Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V. (KTBL)
Bartningstraße 49 | 64289 Darmstadt
Telefon +49 6151 7001-0 | Fax +49 6151 7001-123 | E-Mail: ktbl@ktbl.de
vertrieb@ktbl.de | Telefon Vertrieb +49 6151 7001-189
www.ktbl.de

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

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.

Redaktion

Mark Paterson, Astrid Hauptmann, Bernd Wirth, Henning Eckel, Sven Grebe, Uwe Häussermann, Stefan Hartmann, Dr. Ulrike Wolf | KTBL, Darmstadt

Satz

Serviceteam Herstellung | KTBL, Darmstadt

Titelfoto

© fineart-collection

Druck und Bindung

Silber Druck oHG | Niestetal

Printed in Germany

ISBN 978-3-945088-07-4

Vorwort

Die Biogasbranche in Deutschland steht nach Jahren des Wachstums vor neuen Herausforderungen. Sich verändernde gesetzliche Rahmenbedingungen, zunehmende gesellschaftliche Ansprüche und vor allem die Anforderungen an ein zukunftsfähiges Energiesystem bedingen notwendige Anpassungen und neue Strategien für Betreiber, Anlagenbauer, Serviceunternehmen und den Forschungs- und Entwicklungsbereich. Im Mittelpunkt stehen insbesondere die rund 8.000 Bestandsanlagen, die bereits heute eine wichtige Rolle bei der Energiebereitstellung übernehmen und dies auch zukünftig tun sollen.

Vor diesem Hintergrund wird der Fachkongress „Biogas in der Landwirtschaft – Stand und Perspektiven“ am 22. und 23. September 2015 in Potsdam veranstaltet. Der Kongress wird zum vierten Mal gemeinsam von der Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR) und dem Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V. (KTBL) ausgerichtet, um sich mit den aktuellen Schwerpunktthemen zu befassen und neue Erkenntnisse aus Wissenschaft und Praxis zu präsentieren.

Das Programm des FNR/KTBL-Biogaskongresses 2015 wurde durch einen eigens hierfür einberufenen Programmausschuss, bestehend aus renommierten Fachleuten aus Wissenschaft und Beratung, erarbeitet.

Eine umfangreiche Ausstellung wissenschaftlicher Poster begleitet den Kongress, in der Forschungsansätze und interessante Projektergebnisse vorgestellt werden.

Der vorliegende Tagungsband bündelt die Fachbeiträge der Referentinnen und Referenten sowie die Kurzfassungen der ausgestellten Posterbeiträge. Somit liefert er einen umfassenden Überblick über die Chancen und die aktuellen Problemfelder der Biogastechnik in der Landwirtschaft.

Wir danken allen Referentinnen und Referenten, Moderatorinnen und Moderatoren, Autorinnen und Autoren der Posterbeiträge und dem Programmausschuss für die engagierte Mitarbeit. Unser Dank richtet sich auch an die Kolleginnen und Kollegen, die den vierten Biogaskongress geplant und durchgeführt haben.

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



DR. MARTIN KUNISCH
Hauptgeschäftsführer

Fachagentur Nachwachsende
Rohstoffe e.V. (FNR)



DR.-ING. ANDREAS SCHÜTTE
Geschäftsführer

Inhalt

Vorträge

Rolle des Biogases im zukünftigen Energieversorgungssystem FRANK BAUR, EVA HAUSER	15
Künftige Bedeutung der Bioenergie für die Landwirtschaft RAINER TIETBÖHL	25
Auswirkung der Biogastechnologie aus ökologischer Sicht JUTTA GELDERMANN, MARTINA HESSE, MATTHIAS GARBS, MEIKE SCHMEHL	30
Stand und zukünftige Chancen der steuerbaren Biogasanlagen UWE HOLZHAMMER, BERND KRAUTKREMER, MICHAEL NELLES, FRANK SCHOLWIN	42
Möglichkeiten der flexiblen Strombereitstellung bei Biogasanlagen JAN LIEBETRAU, MATHIAS STUR, ERIC MAUKY, MARTIN DOTZAUER, MARCUS TROMMLER, VELINA DENYSENKO	53
Bedarfsorientierte Stromerzeugung – ökonomisch betrachtet ULRICH KEYMER.....	68
Bewertung der Emissionssituation von Biogasanlagen JAQUELINE DANIEL-GROMKE, TORSTEN REINELT, JAN LIEBETRAU.....	78
Emissionen beim flexiblen Betrieb von Biogas-BHKW MAXIMILIAN PRAGER, BENJAMIN KORB, GEORG WACHTMEISTER.....	88
Ökobilanzielle Bewertung von Biogassystemen TORSTEN REHL, BÄRBEL HUNDT, SABINE DEIMLING	98
Anaerobe Pilze im Biogasprozess VERONIKA DOLLHOFER, MARIO NAST, ISABELLA KINKER, SAMART DORN-IN, VASILIS DANDIKAS, JOHANN BAUER, MICHAEL LEBUHN.....	108
Struktur und Funktion von methanogenen Biofilmen in Biogasreaktoren INGO BERGMANN, MICHAEL KLOCKE.....	119
Charakterisierung mikrobieller Gemeinschaften in kommerziellen Biogasanlagen – Ansätze zur Prozessoptimierung ULRICH KRAUSE, SABINE PETERS	129

Optimierter Betrieb von Rührsystemen in Biogasanlagen KARIN JOBST, ANNETT LOMTSCHER, ANNE DEUTSCHMANN, STEFAN FOGEL, KAY ROSTALSKI, SILKE STEMPIN, MANUEL BREHMER, MATTHIAS KRAUME.....	140
Langzeitstabile Inline-Messung organischer Säuren zur Beurteilung von Biogasprozessen JENS ZOSEL, MATTHIAS SCHELTER, PETER ZIMMERMANN, EMMA RITZI, BORIS HABERMANN, WOLFRAM OELSSNER, MICHAEL MERTIG.....	151
Repowering im Biogasanlagenbestand – Einführung des Nutzungs- grades zur Bewertung von effizienzsteigernden Maßnahmen ELMAR FISCHER, JAN POSTEL, FLORIAN EHRENDREICH.....	162
Abbauleistung von landwirtschaftlichen Biogasanlagen – Restgaspotenzialuntersuchung an 25 Anlagen HANS OECHSNER, STEPHAN RUILE, SABINE SCHMITZ	172
Modell zur Ermittlung von Methanausbeuten aus Biogasanlagen in der Prozesskette Fermenter-Nachgärer-Endlager BERND LINKE, IVO MUHA	182
Biogasgewinnung aus stickstoffreichen Substraten: Entwicklung und Optimierung von verfahrenstechnischen Lösungen zur Vermeidung von Ammoniak-Hemmungen in Biogasreaktoren KAY BEINERSDORF, STEFAN SEBÖK, NICLAS KRAKAT.....	195
Aktuelle sicherheitstechnische Anforderungen an Biogasanlagen JOSEF K. ZIEGLER	207
Sicherheitstechnische Anforderungen an Anlagenbetreiber – Erfahrungen einer im Schulungsverbund BIOGAS aktiven Bildungseinrichtung ACHIM KAISER.....	212
Aufbereitung und Lagerung von Zuckerrüben zur Vergärung in Biogasanlagen WALDEMAR GRUBER.....	224
Biomassebereitstellung vom Dauergrünland für die Biogasproduktion MATTHIAS PLÖCHL, ANNETTE PROCHNOW, CHRISTIANE MANTHEY, KATJA GÖDEKE, FLORIAN SCHMIDT, CHRISTIANE HERRMANN, MONIKA HEIERMANN, HANS HOCHBERG	231
Ansaat von artenreichen Wildpflanzenmischungen für die Biogasproduktion MARTIN DEGENBECK.....	248

Monitoring des Biomethanproduktionsprozesses – Vorstellung des Forschungsprojekts MONA MICHAEL BEIL, HANS-BENJAMIN BÖCKLER, JAQUELINE DANIEL-GROMKE, MARCUS TROMMLER	262
Biomethan – Perspektiven der Bereitstellung und Nutzung in Deutschland und Europa FRANK SCHOLWIN, JOHAN GROPE	270
Biogas als Kraftstoff – eine Option für den hiesigen Absatzmarkt? MATTHIAS EDEL, TONI REINHOLZ	280
Regionaler Nährstoffausgleich – Ergebnisse des Projekts „Bauernhof Niedersachsen“ LUDWIG THEUVSEN, WELF GUENTHER-LÜBBERS	287
Wirtschaftsdünger und Gärprodukte – Eigenschaften im Kontext der Biogaserzeugung und Düngung GERD REINHOLD, WILFRIED ZORN	298
Vermarktung von Gärprodukten an Privathaushalte JOHANNES DAHLIN, MICHAEL NELLES, CARSTEN HERBES.....	307

Poster

Fruchtfolgen mit Energiepflanzen und Marktfrüchten auf diluvialen Standorten Nordostdeutschlands GUNTER EBEL, VINCENT PLOGSTIES, CHRISTIANE HERRMANN, CHRISTINE IDLER, MONIKA HEIERMANN, GERT BARTHELMES, PETER KORNAZ, JANINE MÜLLER, JOACHIM AURBACHER.....	316
Analyse des Anbaus und der Nutzung von landwirtschaftlichen Biogassubstraten ECKART PETIG, SEBASTIAN AUBURGER, ELISABETH ANGENENDT, ENNO BAHRs	318
BioEnergy Farm 2 – Gülle, der nachhaltige Energieträger der Landwirtschaft KATRIN KAYSER, MARK PATERSON.....	320
Wirtschaftsdünger als Silomaissubstitut CHRISTOF WETTER, ELMAR BRÜGGING, MARIUS KERKERING	322
Entwicklung einer anorganisch synthetischen Gülle zur definierten Bilanzierung von Strohvergärungen SEBASTIAN ANTONCZYK, PAUL SCHERER	324

Nutzung von Geflügelkot für den Aufschluss von Getreidestroh CHRISTINA WARNKE-GURGEL, FRIEDRICH WEISSBACH, NILS ENGLER, HANNES KREMP	326
Körnermaisstroh für die Biogasproduktion MONIKA FLESCHHUT, JOHANNES OSTERTAG, STEFAN THURNER, JOACHIM EDER	328
INEMAD – Im- und Export von Wirtschaftsdüngern SONJA KAY, CLAUDIA ZIEGLER, JEROEN BUYSSE	330
Gräseruntersaaten und Zwischenfrüchte zur Steigerung der Gewässerschutzleistung im Energiepflanzenanbau CHRISTINE VON BUTTLAR, BIRGIT KRÄLING, MATTHIAS WILLMS	332
Zwischenfruchtanbau als ein Beitrag zum Gewässerschutz im Energiepflanzenanbau GUNTER EBEL, DANIELA ZANDER, ERNST WALTER, JENS ECKNER, CARSTEN RIECKMANN	334
Erfolge mit Mais-Untersaaten auch unter extremen Witterungseinflüssen DANIELA SCHUMANN, MICHAEL GRIEB, MAENDY FRITZ	336
Getreide-Ganzpflanzensilage mit Untersaat für die Biogasproduktion ANNA TECHOW, CHRISTINE RIEDEL, DOROTHEA HOFMANN	338
Das GR3-Projekt - Möglichkeiten einer alternativen Energie- gewinnung durch die Verwertung ungenutzter Grasressourcen ACHIM KAISER, MICHAEL KÖTTNER	340
Nachhaltige Ganzpflanzengetreideproduktion auf diluvialen Standorten Nordost-Deutschlands GUNTER EBEL, GERT BARTHELMES	342
Zuckerrüben als Biogassubstrat: Untersuchungen zur Reduzierung des Erdanteils durch Auswahl des Genotyps STEFAN DIRKS, PETER SCHULZE LAMMERS	344
FNR-Projekt: Aufbereitung und Konservierung von Zuckerrüben zur Verwendung in NawaRo-Biogasanlagen DOMINIK SCHAIPER, GERD-CHRISTIAN MAACK, WOLFGANG BÜSCHER	346

Zweiphasige Vergärung von Zuckerrüben zur Biomethanerzeugung – Verfahrenstechnische Optimierung der Konservierung und der Konversion zur Steigerung der Energieausbeute ELZBIETA KUMANOWSKA, SIMON ZIELONKA, HANS OECHSNER.....	348
Verbundvorhaben Durchwachsene Silphie – Anbauoptimierung, Sätechnik und Züchtung JOHANNES KÖHLER, ANDREA BIERTÜMPFEL, ANDREAS SCHÄFER, CLAUDIA REHSE.....	350
Methanertragspotenzial der Durchwachsenen Silphie (<i>Silphium perfoliatum</i>) NICOLA LEONARD HAAG, HANS-JOACHIM NÄGELE, KLAUS REISS, ANDREA BIERTÜMPFEL, HANS OECHSNER	352
Verbundvorhaben: Spurenelemente durch Energiepflanzen – Stoffströme und Handlungsempfehlungen für eine optimierte Prozessbiologie in Biogasanlagen BENEDIKT SAUER, HANS RUPPERT, ROLF RAUBER, HEIKE STRÄUBER, JÜRGEN PRÖTER, KATHARINA HEY, WIEBKE FAHLBUSCH, MICHAEL DITTRICH-ZECHENDORF, TINO PASOLD	354
Amarant als spurenelementreiches Biogassubstrat: Selektion zur Erarbeitung praxistauglicher Amarantlinien für bayerische Standortbedingungen BENEDIKT SAUER, ANDREAS TRAUNER, MAENDY FRITZ.....	356
Potenzial der Andenlupine (<i>Lupinus mutabilis</i>) und weiterer Lupinenarten für die Biogaserzeugung STEFFEN R. ROUX, DENNY WIEDOW, NORBERT KANSWOHL, MARGITTA BECK, FRANK HÖPPNER, MANUEL DEYERLER	358
Miscanthus als Biogassubstrat – Auswirkung von Erntezeitpunkt und Bestandesalter auf Biomassertrag und biochemisches Methanpotenzial AXEL SCHMIDT, THORSTEN RUF, PHILIPP DELFOSSE, CHRISTOPH EMMERLING.....	360
Kohlenstoffbilanz über einen zweistufigen/zweiphasigen Biogasprozess MANDY SCHÖNBERG, VOLKER SCHÖNBERG, JULIANE SCHNEIDER.....	362
Isolierung und Charakterisierung anaerober Mikroorganismen aus Biogasreaktoren SARAH HAHNKE, THOMAS LANGER, MICHAEL KLOCKE	364

Vergleichende Untersuchung der mikrobiellen Gemeinschaften bei der anaeroben Mono-Vergärung von Mais- und Zuckerrübensilage JOHANNA KLANG, SUSANNE THEUERL, MICHAEL KLOCKE	366
Anaerobe Batch-Fermentation mit Mais- und Amaranthsilagen: Biogasproduktion und molekulare Charakterisierung mikrobieller Gemeinschaften BRIGITTE KEMPTER-REGEL, CHRISTIAN GRUMAZ, FRANZISKA WIESE, KATHARINA SCHERGE, CAROLIN BIRK, URSULA SCHLISSMANN, PHILIP STEVENS, KAI SOHN, DIETER BRYNIOK.....	368
Entwicklung von molekularen Markern zur Überwachung von Biogasanlagen JAQUELINE DERENKÓ, ANTJE RADEMACHER, CARSTEN JOST, MICHAEL KLOCKE	370
Entwicklung konservierungsfähiger, adaptierter Inokula zur standardisierten Biogasbildungspotenzialbestimmung organischer Biomasse JÖRN HEERENKLAGE, KERSTIN SAHM, DOROTHEA RECHTENBACH, IMMO RÖSKE, THOMAS VOSS, GARABED ANTRANIKIAN, KERSTIN KUCHTA.....	372
Charakterisierung der methanogenen Gemeinschaft bei erhöhten N-Konzentrationen in Schwimmbettfermentern LISA ROTHE, KAY BEINERSDORF, NICLAS KRAKAT.....	374
Mechanische Vorbehandlung von organischen Reststoffen zur Optimierung der Gasausbeute CHRISTOF WETTER, ELMAR BRÜGGING, DANIEL BAUMKÖTTER	377
Prozesscharakteristik und lösliche Spurenelemente der Startup-Phase einer thermophilen Güllebiogasanlage SEBASTIAN ANTONCZYK, RICHARD ARTHUR, PAUL SCHERER	379
Entwicklung eines Verfahrens zur Gewinnung von Ammonium- carbamat aus der Vergärung stickstoffhaltiger Einsatzstoffe JEANNETTE BUSCHMANN, CHRISTIAN STRUTZ, GÜNTER BUSCH.....	381
Entwicklung eines Verfahrens zur fermentativen Konversion von Wasserstoff aus fluktuierenden Quellen zu Biomethan in Biogasanlagen (H ₂ -Transfer) BERNHARD LECKER, HANS OECHSNER.....	383
Biogene Methanisierung von Wasserstoff und Kohlenstoffdioxid CHRISTOF WETTER, ELMAR BRÜGGING, MATTHIAS GRUTTMANN, SARAH ABTMEYER ..	385

Biologische Konversion von Wasserstoff und Kohlendioxid in Methan zur Energiespeicherung SÖREN THIERING, REINHARD PÄTZ, MARION SEIDEL, REIK ELLMANN, ANDREAS WINKLER.....	387
Bedarfsorientierte Methansynthese auf Basis der Integration weiterer erneuerbarer Energieträger MARKO BURKHARDT, ISABEL JORDAN, SABRINA HEINRICH, JOHANNES BEHRENS, TOBIAS KOSCHACK	389
Hochdruckfermentation bis 100 bar: Einfluss auf Biogasproduktion und -aufbereitung WOLFGANG MERKLE, SIMON ZIELONKA, ANDREAS LEMMER.....	391
Thermophile Vergärung der Flüssigphase bei der Pelletierung von Landschaftspflegegrün MARK GOLDENTHAL, PER LIND, PAUL SCHERER	393
Optimierung des Rührprozesses in Biogasfermentern MICHAEL EHRENTAUT, SVEN ANNAS, SEBASTIAN BARTSCHER, TORSTEN KROHNER, HANS-ARNO JANTZEN, JÜRGEN SCHOLZ, CHRISTOF WETTER, PETER GLÖSEKÖTTER	395
Optimierung der fermenterinternen biologischen Biogaseschwefelung UTA BREUER, ANJA SCHREIBER, GERD-RAINER VOLLMER, NICOLE BÄGER	397
Untersuchungen zur Wirkung von Eisenhydroxid-basierten Produkten bei der Entschwefelung von Biogasanlagen SABINE RAHN, DETLEF GÜSSBACHER, EVGENIJ MARCENKO	399
Untersuchungen zur Beladungsrate mit Schwefelwasserstoff (H ₂ S) von Eisenhydroxid basierten Gasreinigungsmassen im Vergleich zu Aktivkohle in Abhängigkeit von der relativen Gasfeuchte CHRISTOPHER OTTO, SINA BALKE.....	401
Optimierung der selektiven, externen Entschwefelung des unbehandelten Rohbiogases mit neuem Filtermaterial WALTER HILGERT, HERBERT ZÖLSMANN.....	404
BIO-CO ₂ NCEPT – Eine kostengünstige Kleingasturbine zur dezentralen Stromerzeugung mittels Biogas JAN MIHALYOVICS, ALEXANDER HEINRICH, DIETER PEITSCH	406
Reduzierung der Stickstoffbelastung des Kreislaufwassers REINHARD PÄTZ, REIK ELLMANN, ANDREAS WINKLER	408

Repowering Biogasanlagen Baden-Württemberg – Erarbeitung eines anlagenspezifischen Repowering Maßnahmenkataloges JOSHUA GÜSEWELL, MARLIES HÄRDTEIN, LUDGER ELTROP	410
Flexible Biogasverstromung – Einfluss verschiedener Laststufen auf den elektrischen Wirkungsgrad und die Abgasemissionen SIMON JUAN TAPPEN, MATHIAS EFFENBERGER	412
Prozessstörungen in landwirtschaftlichen Biogasanlagen – Das Projekt BIOGAS-LIVE SUSANNE THEUERL, MICHAEL KLOCKE	414
Prozessinhibierungen bei der Monofermentation von Grassilage – Phenyllessigsäure als Indikatorsubstanz CAROLA GRIEHL, FRANK LANGGUTH, SIMONE BIELER, GERD-RAINER VOLLMER	416
Dynamische Simulation von Laborbiogasanlagen KAREN FRONK, RENÉ SIMON, ANDREA HEILMANN	418
Dynamische Simulation für den optimierten und flexiblen Betrieb von Biogasanlagen INGOLF SEICK, RALF TSCHPETZKI	420
Vorort-Zustandsbeurteilung des Prozesses von Biogasanlagen mithilfe miniaturisierter Mittel-Infrarot-Spektrometer (MIRS) MARCEL MAYER, GUNTHER PESTA	422
Mikroskopisches Bildverfahren zur Bestimmung der Gasbildungsrate von Biogasanlagen PAUL SCHERER, YONAS SHAIKH.....	424
Elektrooptische at-line Bestimmung der Zellvitalität in Biogasprozessen ERICH KIELHORN, JOHANNA KOSERSKE, ALEXANDER ANGERSBACH, EMMA RITZI, JÖRN BEHEIM-SCHWARZBACH, TORSTEN UNMACK, BORIS HABERMANN, PETER NEUBAUER, STEFAN JUNNE	426
Verbundvorhaben „BiogasEnzyme“ MONIKA HEIERMANN, JÖRN BUDDE, ARNO CORDES, STEFAN DRÖGE, SEBASTIAN ESCHENBACHER, ROBERT KAUSMANN, JÖRG KRETZSCHMAR, LIANE MÜLLER, NILS ROTTMANN, TERESA SUÁREZ QUIÑONES, MATTHIAS WAWRA	428
Wirkung von hydrolytischen Enzymen im Biogasprozess DOROTHEA TELSCHOW, SARA GATZ.....	430

Steigerung der Substratverwertung durch die Applikation von hydrolytischen Biogaszynmen TORSTEN UNMACK, JÖRN BEHEIM-SCHWARZBACH, CHRISTIAN LÖCHTE	432
Wie heiß ist nötig – Wie heiß ist möglich? Hygienisierende Vergärung mit thermophiler Biogasanlage SANDRA OFF, PAUL SCHERER	434
<i>Clostridium botulinum</i> – Vorkommen und Verhalten im Biogasprozess BIANCA FRÖSCHLE, MICHAEL LEBUHN	436
Überleben von Wildpflanzensamen aus Blümmischungen in der anaeroben Vergärung der Biogas-Prozesskette JULIANE HAHN, PAULA R. WESTERMAN, MONIKA HEIERMANN, BÄRBEL GEROWITT ...	438
Erarbeitung eines Standards für die wiederkehrende Prüfung von Biogasanlagen ALEXANDER LIEBENSTEIN, STEFAN SEIBEL, SANDER SCHWICK.....	440
Gärrestmanagement zur Effizienzsteigerung von Biogasanlagen MARKUS HEBERLEIN, ANDREAS WEGER, FABIAN STENZEL, ANDREAS HORNUNG.....	441
Mechanische und enzymatische Aufbereitung von Gärresten zur anschließenden Rückführung in den Prozess JONAS LINDNER, IRINA MIROSHNICHENKO, SIMON ZIELONKA, HANS OECHSNER, ANDREAS LEMMER	443
Wirkungen der Biogasgärrestdüngung in ökologischen Fruchtfolgen auf C _{org} -Gehalte und Bodenaggregatstabilität ANJA SIMON, KARIN LEVIN, KURT-JÜRGEN HÜLSBERGEN, HANS JÜRGEN REENTS.....	445
Stickstoffbilanzen von Weizen in ökologischen Energiepflanzen- Fruchtfolgen mit Gärrestdüngung KARIN LEVIN, ANJA SIMON, STEFAN KIMMELMANN, HANS JÜRGEN REENTS, KURT-JÜRGEN HÜLSBERGEN.....	447
Modellierung von bedarfsorientierten Biogasanlagen ENRIQUE KREMERS, RAINER BOLDUAN	449
Flexible Strombereitstellung von Kleinvergärungsanlagen – Potenzial und Grenzen im Pilotmaßstab LAURA WEITZE	451
GroenGas – InNet CHRISTOF WETTER, ELMAR BRÜGGING, JAN ORTMANN.....	453

Emissions- und Betriebsverhalten eines mit Biomethan betriebenen Traktors mit Zündstrahlmotor – Erste Ergebnisse SEBASTIAN MAUTNER, PETER EMBERGER, EDGAR REMMELE, KLAUS THUNEKE.....	455
Eigenenergieversorgung in der Lebensmittel- und Getränkeindustrie über die nachhaltige Biogasproduktion aus organischen Reststoffen KATHARINA HARTMANN	457
Einbindung von Güllebiogasanlagen in das Energiemanagementsystem von Milchviehställen MANFRED HÖLD, HEINZ BERNHARDT, JÖRN STUMPENHAUSEN	459
Wirtschaftliche Potenziale und rechtliche Rahmenbedingungen für Biogaskleinanlagen in der Großregion Saarland/ Frankreich/ Luxemburg und Belgien (Wallonie) KATHARINA LAUB, BERNHARD WERN	461
Humusgehalte und Bodenleben unter Energiepflanzenfruchtfolgen KATHARINA WINTER	463
„THG-Rechner Biogas“: Eine Web-Anwendung für die Analyse der Treibhausgasemissionen von Biogasbetrieben MATHIAS EFFENBERGER, ANDREAS BUSCHMANN, MONA MAZE, BIANCA ZERHUSEN	465
Einfluss der Fruchtfolgegestaltung auf die Treibhausgasemissionen im Energiepflanzenanbau – Ergebnisse aus dem EVA-Projekt am Standort Dornburg CHRISTIANE PETER, JENS ECKNER.....	467
Modellierung des Stickstoffaustrages bei der Verwendung von Gärrestdünger – Ergebnisse aus dem EVA-Projekt ANNE-KATRIN PRESCHER, MICHAEL GLEMNITZ.....	469
Was ist und was will Bioökonomie? – Perspektive der Ethik BIRGIT KRÖBER, NATALIA MATIZ, MARLIES HÄRDTLEIN, LUDGER ELTROP, THOMAS POTTHAST.....	471
Anhang Mitwirkende	473

Rolle des Biogases im zukünftigen Energieversorgungssystem

FRANK BAUR, EVA HAUSER

1 Ausgangsposition

Biogas hat sich in Deutschland innerhalb der letzten Dekade zu einem Leistungsträger im Konzert der regenerativen Energien entwickelt. Etwa 18,1 % der erneuerbaren Strom- und 10,7 % der Wärmeerzeugung basieren mittlerweile auf einer biogasbasierten Form der Energiebereitstellung. Im Kraftstoffsektor werden 1,6 % des regenerativen Kraftstoffanteils durch Biomethan repräsentiert (AGEE 2015). Während zu Beginn dieses Jahrhunderts der Ausbau von Biogaskapazitäten angesichts der verfügbaren Biomassepotenziale noch unproblematisch verlief und weitestgehend positive Effekte (z.B. Inwertsetzung von Flächen, Einkommenssicherung für Landwirte) erzeugte, werden mittlerweile – nicht immer berechtigt – in einem signifikanten Maße Konfliktpotenziale thematisiert. Diese resultieren insbesondere aus aufkommenden Nutzungskonkurrenzen im agrarwirtschaftlichen Bereich (Nahrungsmittel, Futter, biogene Rohstoffe für die stoffliche Nutzung), aus den Anforderungen des Naturschutzes (Biodiversität), aus den Aspekten der Landnutzung insgesamt (Landschaftsbild, Gewässerschutz, Erosion, Nährstoffmanagement etc.) sowie aus wirtschaftlichen Einschätzungen hinsichtlich der Energiegestehungskosten. Unter anderem hervorgerufen durch diese möglichen Konflikte haben (landwirtschaftliche) Biogasanlagen in der gesellschaftlichen Wahrnehmung mit zunehmender Tendenz ein Akzeptanzproblem.

Gleichzeitig haben Biogasanlagen (wie auch die Biomasse insgesamt) jedoch – zumindest in einer „Brückenfunktion“ – in den nächsten Dekaden noch eine wichtige Aufgabe im Rahmen der Transformation unseres Energiesystems. Im Stromsektor bildet die Biomasse, insbesondere in Form eines gasförmigen Konversionsproduktes, eine sinnvolle Flexibilitätsoption zum Ausgleich fluktuierender erneuerbarer Energien aus Wind und Sonne. Im Wärmemarkt kann – in begrenzter Form – die Zeit überbrückt werden, bis ein dann weitestgehend sanierter Gebäudebestand alternative, möglicherweise niederkalorische Wärmeversorgungssysteme (Solarthermie, Wärmepumpen, Umweltwärme) zulässt. Um den damit verbundenen Prozess nachhaltig zu gestalten, bedarf es dringend einer stimmigen Gesamtstrategie für Biomasse, welche die notwendigen „Leitplanken“ vorgibt, die Interessen der einzelnen Akteure moderiert und im Kontext einer nachvollziehbaren Gesamtausrichtung für die nötige Akzeptanz in der Öffentlichkeit wirbt. Insbesondere folgende Punkte erscheinen dabei – sowohl für den Biogasbereich als auch für die Biomasse insgesamt – wichtig:

- Die Bereitstellung von Biomasse aus dem agrar- und (forst-)wirtschaftlichen Bereich muss nachhaltig erfolgen (Anbausysteme, Biodiversität/Artenschutz, Gewässerschutz etc.). Die diesbezüglich erforderlichen Rahmenbedingungen sind zu definieren (ggf. Einführung einer generellen Zertifizierung).
- Der Ausbau der Biomassenutzung muss im Einklang mit den Anforderungen der Nahrungsmittelproduktion erfolgen. Dazu ist ein Diskurs hinsichtlich der aktuellen und zukünftigen Flächennutzungen im Kontext der angestrebten Selbstversorgungsgrade sowie der Beiträge zur Sicherung der Welternährung erforderlich.
- Die Biomassenutzung muss mit einer hohen Ressourceneffizienz erfolgen. Dies bezieht sich einerseits – soweit möglich – auf die Bevorzugung stofflicher Nutzungskonzepte im Sinne von Kaskadenprozessen, bei denen im Idealfall zunächst eine (multiple) stoffliche Nutzung erfolgt, bevor der letztendlich entstehende Reststoff energetisch verwertet wird (Bioökonomie), andererseits auf den Einsatz von Konversions- und Nutzungstechnologien mit hohen Wirkungsgraden.
- Die Nutzung von biogenen Reststoffen sowie von Biomassen, welche keine Flächenkonkurrenzen hervorrufen, ist zu bevorzugen. Insbesondere der Abfallsektor muss hier in gewisser Weise einen Paradigmenwechsel durchführen, indem er seine bisherigen Entsorgungsaufgaben in einen Versorgungsauftrag (Energie, Nährstoffe etc.) überführt. Dies bedarf einer transsektoralen Planung nicht nur auf Akteurebene, sondern auch auf administrativer Ebene.

Vor dem oben kurz skizzierten Hintergrund sowie unter zusätzlicher Berücksichtigung der vielfach propagierten Biomasseanwendung in spezifischen Kraftstoffsektoren, stellt sich die Frage, welche Rolle die Bioenergie – und hier insbesondere Biogas – in der künftigen Strom- und Wärmeversorgung langfristig einnehmen soll.

In diesem Zusammenhang ist hinsichtlich der Nutzung nachwachsender Rohstoffe ein hierarchisch strukturierter Zieldreiklang zu berücksichtigen. Danach genießt die Bereitstellung eines vielfältigen Angebots an gesunden Nahrungsmitteln absolute Priorität. Erst nach Sicherung dieses Grundbedürfnisses können Biomasserohstoffe für die Industrie (in Form hochwertiger Produkte) und letztlich zur Bereitstellung eines nachhaltigen Energiebeitrags dienen. Der Zieldreiklang wird hinsichtlich der letztendlich energetisch nutzbaren Potenziale neben der reinen Rohstoffverfügbarkeit zudem durch technische Machbarkeiten, energie- und gesamtwirtschaftliche Rahmenbedingungen sowie durch die gesellschaftliche Akzeptanz beeinflusst. Die daraus resultierenden Themenkomplexe werden im Hinblick auf eine erforderliche Systemanalyse nachfolgend kurz erläutert.

2 Determinanten einer nachhaltigen Biogasnutzung

2.1 Die stoffliche Dimension

Die stoffliche Dimension bezieht sich auf die Rohstoffverfügbarkeit, welche sich zu einem großen Teil aus den Flächenverfügbarkeiten der Agrarmärkte ableiten lässt. Hier hat sich durch einschlägige Positionen und Einschätzungen der jüngeren Zeit insbesondere für den Bereich der Anbaubiomassen (aber auch bei forstwirtschaftlichen Potenzialen) eine sehr kritische Haltung hinsichtlich der weiteren Ausbaumöglichkeiten der Bioenergie manifestiert. Die dabei zugrunde gelegten Argumentationslinien basieren im Wesentlichen auf der Sicherung der (globalen) Lebensmittelversorgung sowie auf den Biodiversitätszielen und den sich daraus ergebenden Restriktionen. Angesichts der aktuellen Selbstversorgungsgrade, welche für die relevanten Bereiche Getreide, Kartoffeln, Fleisch und Milchprodukte über 100 Prozent liegen (BLE und BMEL 2014) sowie unter Berücksichtigung der in Fachpublikationen vorzufindenden großen Streuung der Angaben hinsichtlich nutzbarer Biomasse-Anbauflächen ist allerdings eine große Unsicherheit hinsichtlich der real ansetzbaren Bioenergiepotenziale – insbesondere aus dem Agrarsektor – zu konstatieren. Eine weitere Unsicherheit ergibt sich aus dem derzeit – auch in der zeitlichen Perspektive – kaum einschätzbaren Einfluss stofflicher Nutzungsalternativen auf die Rohstoffnachfrage, wie sie sich aus dem Bereich der Bioökonomie ergeben können (biobasierte Kunststoffe etc.).

Zu großen Teilen unstrittig ist dagegen die Nutzung von biogenen Reststoffen zur Energieerzeugung. Hier stellt sich allerdings die Frage, welchen realen Beitrag der Reststoff-/Abfallsektor hinsichtlich der Transformation des Energiesystems leisten kann. Während die Abfälle aus dem öffentlichen Zuständigkeitsbereich (z.B. Bioabfall, Klärschlamm) lediglich ein geringes Potenzial bieten, sind die Reststoffe aus dem Agrarsektor (z.B. Gülle, Mist) insbesondere in kleinstrukturierten Gebieten oftmals nur sehr schwer zu mobilisieren.

Eine Lösung hinsichtlich des Dilemmas der Verfügbarkeit von Biomassen wird oftmals in der Kaskadennutzung gesehen. Diesbezüglich sind bislang jedoch nur wenige Kaskadenprozesse mit großen Durchsätzen etabliert (z.B. im Holzsektor: Spanplatte, Papierrecycling). Aktuelle Tendenzen zur verstärkten Produktion von biobasierten Kunststoffen stehen derzeit noch am Anfang und brauchen im Sinne der Kaskadennutzung getrennte Erfassungssysteme um sie einer „sortenreinen“ Nutzungskette zuführen zu können. Ansonsten fallen fossil/biobasierte Mischkunststoffe an, die entweder nicht gemeinsam recycelt werden können oder letztendlich im Rahmen einer thermischen Abfallbehandlungsanlage energetisch verwertet werden müssen.

2.2 Die technische Dimension

Die technische Dimension bezieht sich insbesondere auf technische Optimierungspotenziale im Sinne einer Effizienzsteigerung sowie auf technische Notwendigkeiten, die erforderlich sind, um die Bioenergie in die Lage zu versetzen, Systemdienstleistungen im Rahmen der Transformation des Energiesystems erbringen zu können. Neben den sich potenziell einstellenden Lernkurveneffekten technischer Systeme (u. a. der Konversionstechnologien Pyrolyse/Vergasung) stellt sich hier insbesondere die Frage nach der mittel- bis langfristigen Zuordnung bzw. Zuordenbarkeit von Biomassen zu spezifischen technischen Nutzungen. Insbesondere der mögliche (marktgetriebene) Einfluss des Treibstoffsektors sowie die – grundsätzlich wünschenswerte aber vergleichsweise schwerer umsetzbare – stärkere Verzahnung von Strom- und Wärmebereitstellung über Kraft-Wärme-Kopplungs(KWK)-Anwendungen in Verbindung mit Wärmenetzen stehen dabei im Fokus. Die bedarfsgerechte biogene Stromerzeugung im Hinblick auf eine sowohl saisonale (dynamische Prozessführung) als auch kurzfristig (Gas-/Wärmespeicher) ermöglichte Flexibilisierung scheint dagegen aus technischer Sicht wenig problematisch. Diskussionspunkte ergeben sich hier tendenziell eher auf der Basis ökonomischer sowie organisatorisch-administrativer Fragestellungen. Exemplarisch kann hier die Gewährleistung auch ökonomisch sinnvoller Durchsätze – z. B. im Zusammenhang mit einer Gasaufbereitungsstufe zur Biogaseinspeisung in das Erdgasnetz (Anlagen-Pooling) – genannt werden.

2.3 Die gesellschaftspolitische Dimension

Aktuelle Entwicklungen bei realen Projektumsetzungen zeigen, dass die Bioenergie insbesondere bei der Nutzung von Anbaubiomassen in zunehmendem Maße mit Akzeptanzproblemen konfrontiert wird. Diese sind ernst zu nehmen und im Rahmen angepasster Planungsabläufe mit integrierten partizipativen Prozessen unter Beteiligung vielfältiger Interessenträger zu berücksichtigen. Es erscheint dabei sinnvoll, eine ergänzende kommunale/regionale Planungsverantwortung zu installieren, welche im Kontext einer erhöhten Flächensensibilisierung wertschöpfungsorientierte Flächennutzungskonzepte unter Beteiligung der Öffentlichkeit entwickelt.

Die möglichen Akzeptanzprobleme können dabei sehr vielschichtig angelegt sein und – je nach Region – unter anderem Aspekte der Lebensmittelversorgung und Nutzungskonkurrenz, der Biodiversität, des Landschaftsbildes (z. B. Monokulturen), der Emissionen (z. B. Treibhausgase, Gerüche), des Transportaufkommens und der Nährstoffbilanzen im Zusammenhang mit Auswirkungen auf den Gewässerschutz enthalten. Die jeweiligen partizipativen Prozesse müssen diese potenziellen Probleme aufgreifen und die projektspezifischen Effekte erklären. Ein wichtiger Punkt im Rahmen der diesbezüglich zu führenden Diskussionen stellt zudem die projektspezifisch erzielbare regionale Wert-

schöpfung dar. Hier sollte gezeigt werden, dass Bioenergieprojekte in der Lage sind, regionale Werte zu erzeugen, indem z. B. Arbeitsplätze geschaffen oder erhalten und Flächen ökonomisch aufgewertet werden. Des Weiteren lassen sich durch die Nutzung regionaler biogener Ressourcen langfristig Kosten der Energieversorgung stabil halten bzw. senken und Netzwerkstrukturen – z. B. im Rahmen der Etablierung kommunaler Wärmenetze – aufbauen, die in der Region zu einer intensiveren Identifikation der Akteure mit den jeweiligen Kommunen bzw. Lebensräumen führen.

2.4 Die energiewirtschaftliche Dimension

Der angestrebte Umbau der Energieversorgung hat den Charakter eines energiewirtschaftlichen Paradigmenwechsels, da er die Rationalität zumindest des Stromsystems durch die – potenzialbedingt – absehbare Fokussierung auf die regenerativen „Pfeiler“ Wind und Sonne vollständig verändern wird. Diese werden zukünftig zu den prägenden Systemsäulen, welche von vielfältigen Flexibilitätsoptionen zur Überbrückung von möglichen Angebotslücken flankiert werden müssen (Abb. 1). Eine dieser Optionen kann dabei aufgrund ihrer Speicherbarkeit die Biomasse sein und hier insbesondere ihre gasförmigen Konversionsprodukte Biogas, Biomethan und Pyrolyse-/Synthesegas.

Die zukünftige Rolle der Bioenergie in diesem System ist in den damit verbundenen Kontext zu stellen und neu zu bewerten. Leider findet die diesbezüglich erforderliche ganzheitliche Betrachtung nicht statt, sondern lediglich eine eindimensionale (aber umso mehr plakative) Beschreibung von preislichen Entwicklungen. Die Kosten der Stromerzeugung aus Bioenergie waren dabei in jüngster Zeit im Vergleich zu den Benchmarks



Abb. 1: Technische Flexibilisierungsoptionen für einen Strommarkt zentriert auf fluktuierende erneuerbare Energien (FEE) (Quelle: IZES 2012)

Wind (on-shore) und Photovoltaik relativ hoch, was angesichts der Strompreisdiskussion in Deutschland bei den einschlägigen politischen Entscheidungsträgern zu teils sehr restriktiven Forderungen hinsichtlich der zukünftigen Ausgestaltung von Anreizinstrumenten zur Förderung der Bioenergie führt (siehe Novelle EEG 2014). Keine Berücksichtigung finden bislang allerdings bei diesen Diskussionen Argumente, die sich z. B. auf den „Wert“ einer bedarfsgerechten Einspeisung und auf die Zuordnung der damit verbundenen Kosten beziehen, bzw. eine „Einpreisung“ zusätzlich induzierter, optimierender Effekte fordern, u. a. in den Bereichen Klimaschutz, Abfall-/Kreislaufwirtschaft, Gewässerschutz, Entwicklung ländlicher Räume.

Der Stromsektor benötigt verschiedene Maßnahmen, die dazu geeignet sind, die zur Erreichung einer hohen Versorgungssicherheit geforderten Parameter einzuhalten. Dazu zählen beispielsweise steile Laständerungsgradienten ebenso wie die Spannungs- und Frequenzhaltung oder die Blindleistungskompensation. Die Sicherstellung einiger der geforderten Parameter ist teilweise zeit- und/oder systemkritisch. Das bedeutet, dass der nicht fluktuierende Kraftwerkspark und dessen Steigerung der Gesamtflexibilität mit dem Ausbau der fluktuierenden Energieerzeugung und den damit steigenden Anforderungen mithalten müssen. Auch ein korrigierendes Eingreifen in die Stromproduktion durch die Übertragungsnetzbetreiber (ÜNB) muss innerhalb sehr kurzer Zeit sehr sicher erfolgen, da sonst die Systemstabilität des gesamten Systems gefährdet sein kann. Diese Rolle können Biogas und Biomethan als speicherbare Energieträger gut übernehmen. Hier ist zum aktuellen Zeitpunkt insbesondere die Funktion der Regelenergiebereitstellung zur Frequenzhaltung von Bedeutung, da der Strom und die Wärme aus Bioenergie gegenwärtig im Energiesystem (fast immer) gebraucht werden und auch hocheffizient erzeugt werden können.

Wenig Beachtung findet zudem in der rein auf den Strompreis fixierten Diskussion die Wirkung der Bioenergie im Wärmemarkt im Kontext einer aus Effizienzsicht zu fordernden stärkeren Verzahnung der Strom- und Wärmebereitstellung. Insofern ist gerade bei der Bioenergie im Vergleich zu anderen erneuerbaren Energien in einem weitaus größeren Maße eine systemische Betrachtung einzufordern, welche das gesamte Wirkungsspektrum abdeckt und auf dieser Grundlage im Sinne einer gesamtökonomischen Betrachtung ergänzende Effekte (mit möglicherweise alternativen Finanzierungsmechanismen) aufzeigt.

Nach derzeitiger Einschätzung wird sich der Wärmemarkt durch den weiteren (gewünschten) Ausbau der Kraft-Wärme-Kopplung, die stärkere Verbreitung von elektrischen Wärmepumpen und die gemeinsame Optimierung von Strom-, Gas- und Wärmenetzen immer stärker mit dem Stromsektor verzahnen. Mit zunehmender Energieeffizienz wird der Wärmemarkt zugleich jedoch mittel- bis langfristig – zumindest im Gebäudesektor – in einer signifikanten Form schrumpfen. Zudem sind die sehr unter-

schiedlichen strukturellen Anforderungen hoch verdichteter städtischer Räume und dünn besiedelter ländlicher Regionen zu berücksichtigen, in denen Bioenergie unmittelbar zum Einsatz kommen kann. Des Weiteren besteht langfristig das Potenzial, Biomassen, die derzeit noch im Bereich der Gebäudeheizung (Wärmenetze, Einzelfeuerungen) eingesetzt werden, zukünftig einer industriellen Nutzung zur Erzeugung von Prozessenergie zuzuordnen.

2.5 Externe ökonomische Effekte

Die alleinige Reduzierung der Bioenergie auf ihre Wirkung im Bereich der Strompreisentwicklung berücksichtigt nicht alle ökonomischen Aspekte. Vielmehr hat der durch das Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG) (und andere Förderinstrumente) ausgelöste Impuls direkt oder indirekt zu relevanten ökonomischen Effekten in anderen Sektoren im Sinne einer Kostendämpfung geführt. Im Besonderen sind hier der Agrarsektor, der Entsorgungssektor sowie der Forstsektor zu benennen. Diese verfügen jeweils für sich über eigene Finanzierungsgrundlagen, welche – zumindest in Teilen und unter Berücksichtigung entsprechender Lesarten – durch energiewirtschaftliche Vergütungen insbesondere des EEG entlastet werden.

Den Kosten, die aus den EEG-Vergütungen resultieren und die in der EEG-Umlage kumuliert sind, stehen daher viele Positionen in der Landnutzung und der Ökologie gegenüber, die durch die Förderung der Stromerzeugung an anderen Stellen für die Öffentlichkeit entlastet werden, bzw. zu höheren Wertschöpfungseffekten führen.

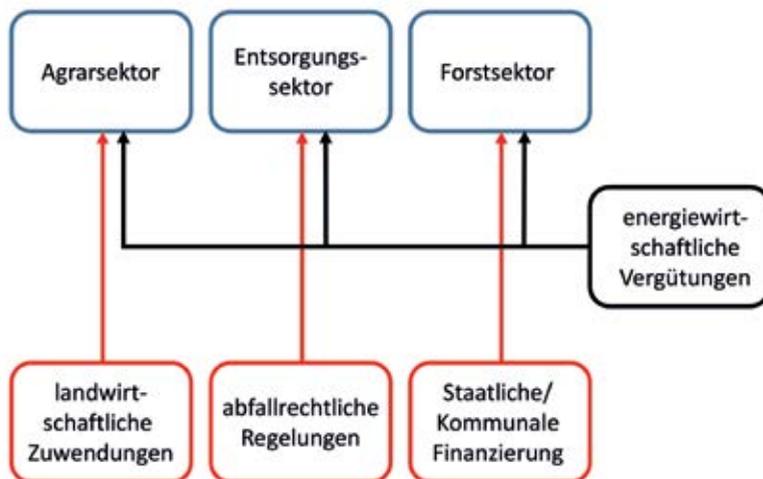


Abb. 2: Ökonomischer Einfluss der energetischen Nutzung von Biomasse auf weitere Wirtschaftssektoren (IZES 2013)

So trägt z.B. das EEG im Entsorgungssektor maßgeblich dazu bei, das gemäß § 8 Abs. 1 KrWG (Kreislaufwirtschafts-Gesetz) geforderte Hochwertigkeitsgebot – nach dem die Verwertungsmaßnahme umzusetzen ist, welche die beste Option zum Schutz für Mensch und Umwelt darstellt, z.B. für den Bereich der Bioabfälle im Zusammenhang mit einer stofflich/energetischen Verwertung auf der Basis von Biogasanlagen. Das EEG entlastet dabei den Gebührenhaushalt der öffentlich-rechtlichen Entsorgungsträger über den ansonsten die Umsetzung höherwertiger Verwertungsoptionen finanziert werden müsste.

Die Bioabfallbehandlungskosten einer Vergärungsanlage mit nachgeschalteter Kompostierung werden durch die energiewirtschaftlichen Vergütungen in diesem Zusammenhang um etwa ein Drittel reduziert. Demzufolge wird dieses Verfahren der Bioabfallbehandlung im Vergleich zur ausschließlichen Kompostierung konkurrenzfähiger.

Auch im Agrarsektor hat der durch das EEG im Biomassebereich gesetzte Impuls im Sinne einer Inwertsetzung von Agrarflächen zu Verschiebungen geführt. Die bisherige Entwicklung im Bereich der Stilllegungsflächen(-prämien) unterstreicht den damit verbundenen Trend (vTI 2012). Zwar hat sich diese Entwicklung nicht unmittelbar auf die Direktzahlungen der Landwirtschaft im Sinne einer Reduzierung ausgewirkt, aber die entsprechenden Zahlungen/Subsidien müssen hinsichtlich ihrer Begründung heute weit aus weniger zur Stützung von Einkommen und Verbraucherpreisen eingesetzt werden und können nunmehr wesentlich stärker Gemeinwohlleistungen sowie höhere (Biodiversitäts-)Standards fördern (TLL 2010).

Auch im Hinblick auf die Verminderung der durch die Landwirtschaft ausgelösten Treibhausgasemissionen leistet die Bioenergie (insbesondere im Güllesektor) über das EEG einen signifikanten Beitrag, der ansonsten über landwirtschaftliche Systeme zu finanzieren wäre. In diesem Zusammenhang ist insbesondere auf die durch Biogasanlagen umgesetzte Kapselung bei der Güllelagerung hinzuweisen.

Auch im Forstsektor lassen sich positive Effekte darstellen. In den 80er- und 90er-Jahren (bis hin zum Beginn dieses Jahrhunderts) waren die Reinerträge in der Forstwirtschaft oftmals negativ, was u. a. die Finanzen der Kommunen und der Länder belastete. Durch die Inwertsetzung „schwacher Sortimente“ auf Grund der Nachfrage nach Energieholz (induziert nicht nur, aber auch durch das EEG) konnten die Reinerträge ohne Förderungen auf ca. 150 €/ha gesteigert werden (BMELV 2012). Durch die so geschaffenen Freiräume wurde die Forstwirtschaft in den letzten Jahren mehr und mehr in die Lage versetzt auch Waldfunktionen zu bedienen, die keinen direkten Gewinn erzielen. Beispiele sind hier die Schutz- und Erholungsfunktionen: Errichtung von großen Schutzgebieten im Sinne einer Segregation, Nutzungsverzicht auf der Fläche ausgedrückt z.B. durch den Verzicht der Ernte von Holz unterhalb der Derbholzgrenze sowie Maßnahmen der Waldpädagogik.

Weitere potenzielle Effekte können wie folgt benannt werden:

- Erhöhung der generellen Werthaltigkeit von (Agrar-/Forst-)Flächen im Sinne eines marktwirtschaftlichen Impulses
- Förderungen für die Extensivierung von Agrarflächen, die (mangels Notwendigkeit zur Extensivierung) nicht gezahlt werden müssen (z. B. für die Beibehaltung von Intensivgrünland; Kulturlandschaftsprogramm(KULAP)-Flächen die aus KULAP ausgeschieden sind)
- Entlastung von allgemeinen Steuern sowie generelle energiewirtschaftliche Effekte
- Sonstige allgemeine, teilweise weiche Effekte z. B. hinsichtlich der Entwicklung ländlicher Räume, regionale Wertschöpfung, Arbeitsplätze etc.

Viele der dargestellten Entlastungen sind heute schon wirksam, andere könnten in Zukunft wirksam werden. Die oben ansatzweise geschilderten Wechselwirkungen sind daher dringend in einen – auch aus Sicht der Bundesregierung – ressortübergreifenden Diskurs zu stellen, indem aufgezeigt wird, wie sie – bei gleicher qualitativer Ausgestaltung – den Bürger belasten würden, wenn es heute kein EEG und keine entsprechend induzierte Stromproduktion aus Biomasse gäbe. Im Hinblick auf eine in diesem Zusammenhang erforderliche Darstellung der realen ökonomischen Effekte und Finanzflüsse bedarf es belastbarer wissenschaftlicher Grunddaten, die bislang nur eingeschränkt vorliegen.

3 Fazit

Das zunehmend regenerativ bediente Stromsystem in Deutschland hat mit Biomasse – insbesondere mit Biogas – aufgrund der vorhandenen Regelbarkeit eine systemisch wichtige Flexibilitätsoption zur Verfügung, die zeitnah systemrelevant weiterentwickelt werden sollte. Neben den möglichen Effekten in den Energiemärkten (notwendige Strombereitstellung in Kombination mit Systemdienstleistungen, insbesondere zur Frequenzhaltung sowie die KWK-basierte regenerative Wärmebereitstellung), ist die Bioenergie zudem in der Lage auch Systemdienstleistungen in anderen Sektoren zu bieten. Insbesondere die Klimaschutzeffekte im Agrarsektor, die Gewährleistung einer hochwertigen Abfallwirtschaft sowie die Inwertsetzung von Flächen (Entwicklung ländlicher Räume) sind in diesem Zusammenhang beispielhaft zu nennen. Eine alleinige Reduktion der Bioenergie (Biogas) auf die Stromgestehungskosten erscheint daher nicht zulässig. Vielmehr bedarf es unter Berücksichtigung der erbrachten bzw. erbringbaren Systemdienstleistungen einer gesamtökonomischen Betrachtung, welche – transsektoral – im Hinblick auf eine Vergleichbarkeit mit anderen Energiebereitstellungsformen alle ökonomischen Wirkungen der Bioenergie berücksichtigt.

Literatur

- AGEE (2015): Entwicklung der erneuerbaren Energien in Deutschland im Jahr 2014.
www.erneuerbare-energien.de
- BLE und BMEL (2014): 206 Selbstversorgungsgrad bei landwirtschaftlichen Erzeugnissen.
Bonn, <http://berichte.bmelv-statistik.de>
- BMELV (2012): Wirtschaftliche Lage der forstwirtschaftlichen Betriebe. Bonn
- IZES (2012): Kompassstudie Marktdesign – Leitideen für ein Design eines Stromsystems mit hohem Anteil fluktuierender Erneuerbarer Energien, im Auftrag von Bundesverband Erneuerbare Energien e.V. und Greenpeace Energy eG
- IZES (2013): Beitrag der Bioenergie zur Energiewende, im Auftrag von Fachverband Biogas e.V.
- TLL (2010): Direktzahlungen für Landwirtschaftsbetriebe – Stand und Perspektiven.
Präsentation im Rahmen eines Kolloquiums der Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft (TLL), Jena
- vTI (2012): Auswirkungen der GAP-Vorschläge auf die Wirtschaftlichkeit von Ackerbaubetrieben. Tagung „Naturschutz und Landwirtschaft im Dialog – GAP ab 2014 – Mehr Biodiversität im Ackerbau, Bundesamt für Naturschutz, Vilm

Künftige Bedeutung der Bioenergie für die Landwirtschaft

RAINER TIETBÖHL

1 Die Energiewende gelingt nur mit der Landwirtschaft

Die Energiewende und der Umstieg auf erneuerbare Energien ist eine Generationenaufgabe für Deutschland. Die Land- und Forstwirtschaft und der ländliche Raum haben dabei eine Schlüsselrolle, denn die Erzeugung von Wind-, Solar- und Bioenergie findet vor allem in ländlichen Räumen auf land- und forstwirtschaftlichen Flächen statt. Außerdem ist der zum Erfolg der Energiewende notwendige Netzausbau auf die Nutzung land- und forstwirtschaftlicher Flächen angewiesen.

Der Ausbau der erneuerbaren Energien hat den ländlichen Räumen einen Schub für Arbeitsplätze, Wertschöpfung und Wirtschaftskraft gebracht. Das Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG) hat den Landwirten nicht nur neue Betriebszweige und Einkommensmöglichkeiten eröffnet, sondern es hat sie auch zu Akteuren der Energiewende gemacht. In den Jahren 2009 bis 2013 haben die deutschen Landwirte knapp 20 Milliarden Euro in erneuerbare Energien investiert, vor allem in Fotovoltaik und Biogasanlagen. Von den Biogasanlagen befinden sich rund Dreiviertel aller Anlagen mit einer Gesamtleistung von ca. 3.800 Megawatt im Eigentum von Landwirten. Großes Potenzial liegt unverändert in dezentralen Energiekonzepten mit einer Beteiligung von Bürgern und Landwirten.

Die deutsche Landwirtschaft steht für eine Balance zwischen der unverzichtbaren Aufgabe der Nahrungsmittelerzeugung und der Produktion erneuerbarer Energien, besonders im Bereich der Bioenergie. Die Tatsache, dass zwei Drittel der Erneuerbaren Energien durch Biomasse bereitgestellt werden, zeigt, dass die Energiewende nur gemeinsam mit der Landwirtschaft gelingen kann. Andererseits ist die Bioenergie damit auch ein wichtiges, wirtschaftliches Standbein der deutschen Landwirtschaft. Ausgehend von der Förderung der Bioenergie in der Vergangenheit – siehe vor allem EEG – wird sich die Bioenergie schrittweise Richtung Markt entwickeln. Im Wärmebereich ist die Biomasse heute schon voll preislich wettbewerbsfähig.

2 Biomasse hat schon heute eine hohe Bedeutung

In Deutschland trugen die erneuerbaren Energien im Jahr 2014 zur Bruttostromerzeugung 160,6 Milliarden Kilowattstunden und damit 26,2 Prozent bei. Der größte Anteil der Erzeugung entfiel mit neun Prozent auf Windenergie. Die Biomasse, welche acht Pro-

zent zur Bruttostromerzeugung aus erneuerbaren Energien bereitstellte, folgt dicht hinter der Windenergie auf dem zweiten Platz. Auf der Grundlage von Biogas wurden im Jahr 2014 etwa 29 Milliarden Kilowattstunden produziert, was einem Anteil von fünf Prozent des Bruttostromverbrauchs in Deutschland entspricht. Der Anteil der erneuerbaren Energien am gesamten inländischen Stromverbrauch betrug sogar 27,6 Prozent. Zum Wärmeverbrauch trugen die erneuerbaren Energien im Jahr 2014 einen Anteil von 9,9 Prozent bei. Der überwiegende Teil der erneuerbaren Wärmebereitstellung stammt aus fester Biomasse (72,9 Prozent), auf dem zweiten Platz folgen Biogas, Klärgas und Deponiegas mit zusammen 12,1 Prozent.

3 Das Multitalent Biomasse für Landwirtschaft und ländliche Räume optimal nutzen

Der wichtigste Absatzmarkt für agrarische Rohstoffe wird für die Landwirtschaft stets die Nahrungs- und Futtermittelproduktion sein. Der Anbau nachwachsender Rohstoffe ist jedoch ein zweites und damit ergänzendes wirtschaftliches Standbein vieler landwirtschaftlicher Betriebe. Um die Ziele Ernährungssicherung und Ausbau der Bioenergie bzw. der stofflichen Nutzung bestmöglich zu verbinden, gehört zu einer nachhaltigen Bioenergieerzeugung vor allem der gezielte Aufbau neuer Koppelproduktionen und Nutzungskaskaden von Biomassen. Die Nutzungskette Raps-Biodiesel-Rapsschrot-Futtermittel ist ein beeindruckendes Beispiel für eine solche Nutzungskette, durch die der Rohstoff Raps vollständig genutzt wird. Im Rahmen einer effizienten und optimierten Nutzung der Biomassen muss es auch zu einer verstärkten Nutzung von Reststoffen und Nebenprodukten, wie z. B. Gülle/Mist, Stroh oder Restholz kommen.

3.1 Die Landwirtschaft steht für die Verbindung von Teller und Tank

Die Erzeugung nachwachsender Rohstoffe wird angesichts der wachsenden Weltbevölkerung schnell mit einer zunehmenden Flächenkonkurrenz in Verbindung gebracht. Diese gemeinhin als „Teller oder Tank“ bezeichnete Flächenkonkurrenz ist nicht zutreffend. In der Landwirtschaft gilt „Teller und Tank“, da die Koppelproduktion und die Kreislaufwirtschaft charakteristisch für die Landwirtschaft sind. Im Jahr 2014 nahmen landwirtschaftliche Nutzpflanzen zur Energiegewinnung und für die stoffliche Verwertung in Deutschland etwa 2,3 Millionen Hektar ein. Das entspricht knapp 20 Prozent der Ackerfläche bzw. 14 Prozent der gesamten landwirtschaftlichen Nutzfläche. Allein 2,1 Millionen Hektar entfallen auf Energiepflanzen wie Raps und Silomais. Der langjährige Aufwärtstrend des Energiepflanzenanbaus ist jedoch mittlerweile zum Stillstand gekommen und lässt in den kommenden Jahren auch keinen größeren Zuwachs erwarten. Die Grün-

de hierfür sind einfach: Immer wenn die Agrarpreise im Verhältnis zu den Energiepreisen hoch sind, bremst dies den Ausbau der Bioenergie. Zudem sind Biogasanlagenbetreiber in Zeiten hoher Agrarpreise und damit hoher Substratpreise beim Zukauf von Substraten nicht konkurrenzfähig. Die Substrate werden anderen Verwertungsrichtungen zugeführt oder der Anbau von z. B. Silomais für Biogasanlagen ist weniger attraktiv. Dies trifft angesichts der erfolgten Korrekturen bei der Förderung der erneuerbaren Energien heutzutage umso mehr zu.

3.2 Ausbaupotenzial von nachwachsenden Rohstoffe liegt in Ertragssteigerungen

Die Verwertung landwirtschaftlicher Rohstoffe in der Bioenergie stellt in Jahren mit Rekorderträgen, wie im Jahr 2014, einen wichtigen zusätzlichen Absatzmarkt dar und trägt somit in Zeiten niedriger Preise zur Marktentlastung bei. Gerade die wichtigsten Energie- und Industriepflanzen in Deutschland – Raps und Mais – haben in den vergangenen Jahren die höchsten Zucht- und damit Ertragsfortschritte erzielt. Das größte Potenzial liegt also nicht in der Flächenausweitung, sondern in der nachhaltigen Ertragssteigerung auf den genutzten Acker-, Grünland- und auch Waldflächen. Bei einer Erhöhung der Ernteerträge um ein Prozent jährlich würden rechnerisch in jedem Jahr rund 120.000 Hektar Ackerflächen zusätzlich für die Erzeugung von Bioenergie zur Verfügung stehen, ohne dass es zu Verdrängungseffekten zu Lasten der Nahrungsmittelerzeugung kommt. Vor diesem Hintergrund ist die Züchtung von Energiepflanzen einer der wichtigsten Hebel für den Ausbau der Bioenergie. Momentan erzielt Silomais an vielen Standorten die höchsten Erträge. Doch alternative Biogas-Kulturen wie die Zuckerrübe, die Durchwachsene Silphie oder auch Blühpflanzenmischungen bieten neben einem hohen Ertragspotenzial auch positive Effekte mit Blick auf die Fruchtfolge. Die Akzeptanz des Anbaus nachwachsender Rohstoffe innerhalb der Bevölkerung kann durch alternative Energiepflanzen allerdings nur zum Teil verbessert werden. Schließlich versperren die Durchwachsene Silphie oder Hirse ebenso den Blick in die Landschaft wie Mais. Der gesellschaftlich gewollte Umstieg auf erneuerbare Energien führt also zwangsläufig zu einer Veränderung des Landschaftsbildes. Gerade in vieharmen Ackerbauregionen sollte der Maisanbau für Biogas somit eher als eine Bereicherung der Fruchtfolge und, wegen des durch den Gärrest entstehenden organischen Düngers, als ein positiver Beitrag zum betrieblichen Nährstoff-Management angesehen werden. Die Düngebilanzierung und die Verbringensverordnung sorgen für eine ordnungsgemäße Verwendung der Wirtschaftsdünger und der Gärreste.

3.3 Bioenergie ist speicherbar und flexibel einsetzbar

Windenergie stellt mit neun Prozent an der Bruttostromerzeugung den größten Anteil der erneuerbaren Energien im Strommix Deutschlands dar. Die Erzeugung von Strom mithilfe von Fotovoltaik liegt mit 5,7 Prozent der Bruttostromerzeugung immerhin auf dem dritten Platz der erneuerbaren Energien. Der bereits erfolgte und vorgesehene weitere Ausbau der Stromproduktion durch Wind und Fotovoltaik wird zu einer anderen Energieversorgungsstruktur führen. Grundlastkraftwerke, vor allem Kern- und Kohlekraftwerke müssen durch flexible Kraftwerke ersetzt werden. Schließlich erfordert das wachsende und stark schwankende Angebot von Wind- und Solarstrom im Netz einen stärker bedarfsorientierten Betrieb. Diesen bedarfsorientierten Betrieb können Gas- und Pumpspeicherkraftwerke leisten. Aber auch Biogasanlagen, die bislang noch auf Dauerbetrieb unabhängig von der jeweiligen Stromnachfrage ausgelegt sind, können eine dezentrale Ergänzung in der flexiblen Strombereitstellung bilden.

3.4 Biomasse ist der wichtigste Energieträger im erneuerbaren Wärmemarkt

Biogas bedeutet nicht nur Stromerzeugung, sondern auch Wärmenutzung. Insgesamt werden in Deutschland 133 Milliarden Kilowattstunden, was im Jahr 2014 einem Anteil von 9,9 Prozent des Wärmeverbrauchs in Deutschland entspricht, durch erneuerbare Wärme zur Verfügung gestellt. Die Bioenergie ist hierbei wiederum die wichtigste Quelle erneuerbarer Wärme. Innerhalb der erneuerbaren Wärme ist die feste Biomasse (Holz, Abfall) mit 95 Milliarden Kilowattstunden bzw. 73 Prozent Spitzenreiter unter den erneuerbaren Energien zur Wärmebereitstellung. Aber auch Biogas (einschließlich Klärgas und Deponiegas) leistet mit 12 Prozent bzw. 16 Milliarden Kilowattstunden einen wichtigen Beitrag zur erneuerbaren Wärme. Gerade die Wärmenutzung bzw. Nutzung von Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) aus Biogas ist ein wichtiger Vorteil für den ländlichen Raum. Die Nutzung der Wärme z.B. über ein Nahwärmenetz im Dorf spart zusätzlich fossiles Öl und Gas ein. Die Wärmenutzung wird in der Energiewende immer noch massiv unterschätzt. Gerade in ländlichen Räumen bietet die Biowärme-Nutzung erhebliche zusätzliche Potenziale für eine günstige und verlässliche Wärmeversorgung und Wertschöpfungsmöglichkeiten für Landwirte.

3.5 Bioenergie verbessert die Klimabilanz der Landwirtschaft

Durch den Einsatz von Bioenergie für Strom, Wärme und Kraftstoffe wurden in Deutschland im Jahr 2014 knapp 64 Millionen Tonnen Treibhausgasemissionen vermieden. Dies entspricht fast der Menge an Klimagasen, die direkt in der Landwirtschaft durch Methan und Lachgas freigesetzt werden (72 Millionen Tonnen CO₂-Äquivalent). Allerdings werden die durch die Bioenergie erreichten Emissionsminderungen in der offiziellen Klimastatistik nicht der Land- und Forstwirtschaft, sondern dem Energie- und Verkehrssektor

zugeschrieben. Weitere Einsparungen von Treibhausgasemissionen wären durch den in Deutschland anfallenden Mist und die Gülle aus der Tierhaltung möglich. Denn bisher werden in Deutschland weniger als 25 Prozent des vorhandenen Potenzials an Gülle und Stallmist energetisch genutzt. Dabei spricht für die Güllevergärung, dass keine zusätzlichen Anbauflächen benötigt werden und dass der Garrückstand als organischer Dünger genutzt werden kann. Um diese Einsparpotenziale zu realisieren, müssten jedoch die rechtlichen Rahmenbedingungen so gestaltet werden, dass diese zur jeweiligen einzelbetrieblichen Situation passen. Beispielsweise verringert der geringe Energiegehalt der Gülle die Transportwürdigkeit des Substrates. In Süddeutschland sind die Tierbestände teilweise nicht groß genug, um den wirtschaftlichen Betrieb einer Güllekleinanlage gewährleisten zu können. In den östlichen Bundesländern sind die Tierbestände dagegen deutlich größer. Folglich unterbindet die Begrenzung der Anlagen zur Vergärung von Gülle auf eine installierte Leistung von 75 Kilowatt den Bau effizienter Motoren neben größeren Stallanlagen.

4 Fazit

Die Bioenergie ist wegen ihrer vielfältigen Einsatzmöglichkeiten, ihrer Verlässlichkeit und Flexibilität der Trumpf in der Energiewende. Der Anbau nachwachsender Rohstoffe macht sogar eine größere Kulturartenvielfalt möglich. Deswegen sollte die Energiepolitik die Vorteile der Biomasse als bedarfsgerecht verfügbare erneuerbare Energie verlässlich fördern. Hierüber kann der bestmögliche Beitrag der Biomasse zu einer kostengünstigen Stromerzeugung und zu mehr Netzstabilität geleistet werden. Gleichzeitig erfolgt hierüber eine einmalige und preislich wettbewerbsfähige Wärmeerzeugung. Auch in der stofflichen Nutzung kann in größerem Umfang auf nachwachsende Rohstoffe zurückgegriffen werden als bisher. Hier sind die industriellen Verwender gefragt. Die deutsche Land- und Forstwirtschaft steht als verlässlicher und nachhaltiger Erzeuger von Biomasse bereit.

Auswirkung der Biogastechnologie aus ökologischer Sicht

JUTTA GELDERMANN, MARTINA HESSE, MATTHIAS GARBS, MEIKE SCHMEHL

1 Einleitung

Die Biogasnutzung spielt in Niedersachsen eine bedeutende Rolle, doch ihr ökologischer Nutzen wird derzeit kontrovers diskutiert. Welche Umweltwirkungen der Betrieb einer Biogasanlage hat und wie sie im Vergleich zur konventionellen Stromerzeugung abschneidet, kann über das Bewertungsinstrument der Ökobilanz untersucht werden (SCHMEHL et al. 2012). Bei der Substitution von Energiepflanzen in Biogasanlagen durch Wirtschaftsdünger aus viehdichten Regionen sind zusätzlich Fragen der Transportlogistik bei der Beurteilung der ökologischen und ökonomischen Nachhaltigkeit des Gesamtprozesses zu berücksichtigen (GUENTHER-LÜBBERS et al. 2015).

2 Ökobilanzierung von fünf niedersächsischen Biogasanlagen

In einer Ökobilanz werden alle Stoffe und Energien, die in ein Produktionssystem ein- und ausgehen, genau erfasst, wobei alle Lebenswege inklusive ihrer Vorketten betrachtet werden (ISO 14040). Hinsichtlich der Biogasanlagen bedeutet dies: von der Bewirtschaftung der Flächen für den Substratanbau über die Materialaufwendungen für den Bau der Anlage, Transporte von Baustoffen, Biomasse, Gülle und Gärrest bis hin zum Betrieb der Anlage und der Konversion des Biogases im Blockheizkraftwerk (BHKW) werden alle Prozesse in die Betrachtung einbezogen. Anschließend werden Stoffe mit ähnlicher Wirkung auf die Umwelt in Wirkungskategorien zusammengefasst. Beispielsweise besitzen die Stoffe Kohlendioxid, Methan und Lachgas eine klimarelevante Wirkung, weshalb sie in der Kategorie Klimawandel zusammengeführt werden können. Hierzu werden die unterschiedlich hohen Treibhauswirkungen der einzelnen Stoffe in Form von CO₂-Äquivalenten ausgedrückt und zusammengerechnet. Auf diese Weise können auch andere Formen von Umweltwirkungen als Zahlenwert ausgedrückt werden, so zum Beispiel Überdüngung und Versauerung oder der Verbrauch fossiler Ressourcen.

Das Land Niedersachsen gliedert sich in höchst unterschiedliche Landschaftsräume, in denen sich auch die Anbaubedingungen für Biomasse sowie die Verfügbarkeit von Wirtschaftsdüngern erheblich unterscheiden. Für eine Studie der Georg-August-Universität Göttingen zur Untersuchung der Umweltwirkungen von Biogasanlagen wurden daher in Zusammenarbeit mit dem 3N Kompetenzzentrum im Auftrag des Niedersächsischen

Ministeriums für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz (ML) fünf Anlagen aus typischen niedersächsischen Regionen ausgewählt: die Ackerbauregion Südniedersachsen, die Ackerbauregion Lüneburger Heide, eine Veredelungs-, eine Milchvieh- und eine Mischregion.

Bei der Auswahl der zu untersuchenden Anlagen sind als gemeinsame Merkmale die Anlagenleistung und das Jahr der Inbetriebnahme (zwischen 2005 und 2006) festgelegt worden. Die Anlagenleistung sollte ca. 500 kW_{el} betragen. Die Anlagen sollten bereits einige Jahre in Betrieb sein, um zu gewährleisten, dass eventuelle Anlaufschwierigkeiten bezüglich der Technologie und der Fermenterbiologie behoben sind. Für die fünf ausgewählten Biogasanlagen wurde eine ökobilanzielle Bewertung durchgeführt, wobei erstmalig konkret die niedersächsischen Verhältnisse in einer solchen Untersuchung berücksichtigt wurden. In Tabelle 1 sind die wesentlichsten Charakteristika der untersuchten Anlagen zusammengestellt.

2.1 Ergebnisse der Wirkungsabschätzung

Die Ergebnisse der Wirkungsabschätzung werden pro erzeugte Kilowattstunde elektrischer Energie angegeben, was die einzelnen Anlagen untereinander sowie mit der konventionellen Stromerzeugung vergleichbar macht. Strom ist allerdings nicht der einzige Nutzen, der entlang der Biogaserzeugung und -nutzung entsteht. Gülle emittiert durch die Vergärung im Fermenter weniger klimarelevante Gase. Der Gärrest wird als Dünger auf landwirtschaftlichen Flächen eingesetzt und kann so energie- und ressourcenintensiv hergestellten Mineraldünger ersetzen. Die im BHKW entstehende Wärme kann zur Trocknung, Beheizung oder Desinfektion verwendet werden. Diese bereitgestellten Zusatznutzen werden mit den Ergebnissen der untersuchten Anlagen in Form von Gutschriften verrechnet.

Tab. 1: Charakteristik der fünf untersuchten Biogasanlagen

	BGA 1 Süd-niedersachsen	BGA 2 Lüneburger Heide	BGA 3 Veredelungsregion	BGA 4 Milchviehregion	BGA 5 Mischregion
Inbetriebnahme	Dezember 2005	Dezember 2006	Dezember 2006	Dezember 2005	2006
Fermentationsart	Trockenfermentation	Trockenfermentation	Nassfermentation	Nassfermentation	Nassfermentation
Wirtschaftsdünger Anteil [Gew.-%]	keine	Hühner-trockenkot: 9,3	Bullengülle: 16,4 Schweinegülle: 26,5	Rindergülle: 34,2	Rindergülle: 79,1 Rindermist: 2,3
Co-Substrate-Anteil [Gew.-%]	Silomais: 67,0 GPS: 15,0 Zuckerrübe: 15,0 Getreidekörner: 3,0	Silomais: 87,0 GPS: 2,4 Sudanhirse: 1,3	Silomais: 54,5 GPS: 0,4 Zuckerrüben: 2,2	Silomais: 3,9 Grassilage: 61,4 LKS: 0,5	Silomais: 18,2 Grassilage: 0,1 CCM: 0,3
Substrateinsatz [t/a]	12.000	10.560	14.975	19.030	30.225
Reaktortvolumen, gesamt [m ³]	4.400	4.570	4.900	4.520	4.570
Verweilzeit [d]	150	80–90	120	77	82
Entschwefelung			Aktivkohle	Eisen(III)hydroxid	
Gärrestlager	gasdicht	1 x gasdicht, 1 x offen	offen	gasdicht	1 x gasdicht, 1 x offen
BHKW-Leistung [kW _{el}]	2 x 300	1 x 537	1 x 526	190 + 347	2 x 265
Motortyp	Zündstrahlmotor	Gas-Otto-Motor	Gas-Otto-Motor	Gas-Otto-Motor	Zündstrahlmotor
Strom [MWh/a]	5.086	4.508	4.562	4.300	4.403
Wärme [MWh/a]	5.120	4.644	4.176	3.010	2.725
Wärmenutzung	Trocknung von Getreide, Körnermais sowie Scheitholz	Trocknung von Scheitholz, Holzhackschnitzeln und Getreide	Beheizung einer gewerbl. Freizeiteinrichtung und von Wohngebäuden, Trocknung von Holzhackschnitzeln	Nahwärmenetz zur Beheizung von Wohngebäuden, Trocknung von Holz	Beheizung von Wohngebäuden und Melkstand, Desinfektion

In Abbildung 1 sind die Ergebnisse der Wirkungskategorie Klimawandel grafisch dargestellt. Die ausgestoßenen Mengen der CO₂-Äquivalente befinden sich oberhalb, die Gutschriften für die Nutzung von Nebenprodukten unterhalb der Nulllinie. Die Nettoergebnisse sind jeweils als separate Säule dargestellt, hier wurde der untere Teil der Säule vom oberen Teil abgezogen. Die spezifische Treibhausgasemission, die bei der Stromerzeugung durch fossile Energieträger entsteht, ist im Diagramm als gestrichelte Linie angegeben und wird als Marginalstrom bezeichnet. Er beträgt 789 g CO₂-Äquivalente/kWh_{el}. Auffällig ist, dass in der Kategorie Klimawandel alle untersuchten Biogasanlagen besser abschneiden als die fossile Stromerzeugung. Am vorteilhaftesten ist BGA 5 in der Mischregion mit 25 g CO₂-Äquivalenten netto. Für die Erzeugung von 1 kWh_{el} werden im Vergleich zur fossilen Stromerzeugung an dieser Anlage 764 g CO₂-Äquivalente eingespart. Wo genau entstehen die meisten Treibhausgase? Im Diagramm fallen die großen Anteile der landwirtschaftlichen Produktion der Substrate (grün) und die sogenannten diffusen Verluste (hellblau) auf. In der Landwirtschaft entstehen im Zuge der Düngung Lachgas- und Ammoniakemissionen, die ein hohes Treibhausgaspotenzial besitzen. Vor allem BGA 4 sticht mit einem hohen Anteil klimarelevanter Emissionen hervor. Diese Anlage setzt überwiegend Grassilage ein, die relativ stickstoffintensiv angebaut wird und damit einhergehend viel Lachgas freisetzt.

Unter diffusen Verlusten versteht man Methanemissionen, die in jedem Prozessschritt entlang der Gärstrecke auftreten können: von der Silageplatte über Pump- und Förderleitungen, den Tragluftdächern der Fermenter und Nachgärer, bei denen häufig der Abschluss mit der Betonwand nicht zu 100 % gasdicht ist, bis hin zur Verbrennung im BHKW. Eine wichtige Rolle spielen in diesem Zusammenhang die Gärrestlager, deren Abdeckung einen wesentlichen Einfluss auf die Klimabilanz hat. Die Anlagen BGA 2 und BGA 3 besitzen offene Gärrestlager, deren erhöhte Methanverluste in der Grafik deutlich zu erkennen sind. Bei den Anlagen BGA 1 und BGA 5 fallen des Weiteren dunkelblaue Säulenabschnitte auf, deren Ursache im BHKW liegt. Diese Anlagen verwenden in Zündstrahlmotoren fossiles Zündöl. Das Zündöl brennt im Gegensatz zur reinen Biogasverbrennung in Gasmotoren nicht klimaneutral ab, sondern setzt fossiles CO₂ frei.

Nicht in allen Wirkungskategorien schneiden Biogasanlagen besser ab als das fossile Vergleichssystem. Abbildung 2 zeigt die Ergebnisse der Wirkungskategorie Eutrophierung. Alle untersuchten Biogasanlagen tragen für die Erzeugung 1 kWh_{el} stärker zur Überdüngung bei als die konventionelle Stromerzeugung. Hauptverantwortlich für die Emissionen sind landwirtschaftliche Prozesse sowie die Verbrennung des Biogases im BHKW, wobei hier Anlagen mit fossilem Zündöl erneut stärker hervortreten. BGA 4 sticht in dieser Grafik besonders stark heraus, was in der stickstoffintensiven Bewirtschaftung der Grasflächen in Verbindung mit einem relativ großen landwirtschaftlichen Flächenbedarf begründet liegt. Ganz ähnlich sehen die Ergebnisse der Kategorie Versauerung aus.

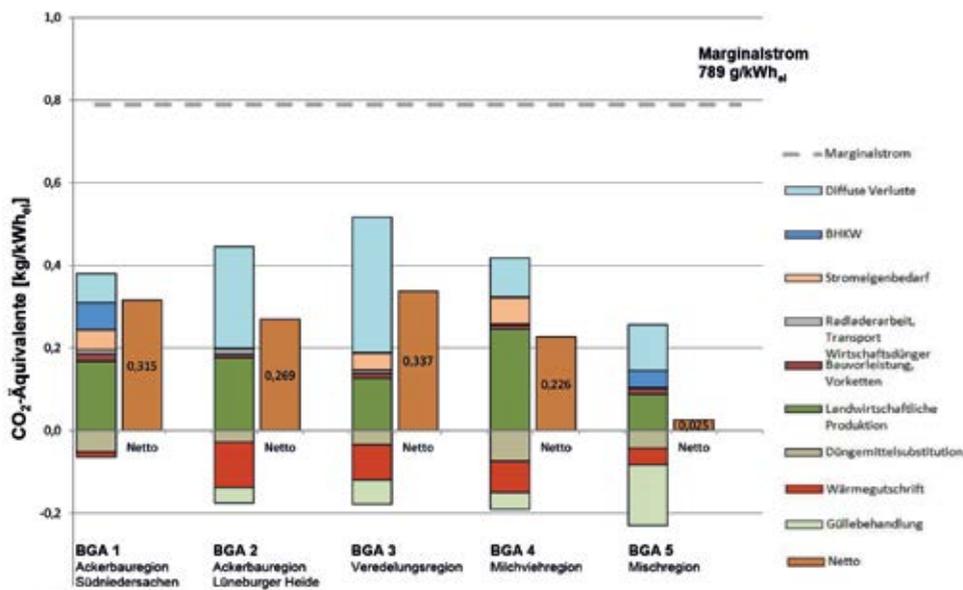


Abb. 1: Ergebnisse der Wirkungskategorie „Klimawandel“ für das Basisszenario (Treibhausgaspotenzial gemäß IPCC 2007, Marginalstrom nach Memmler et al. 2011)

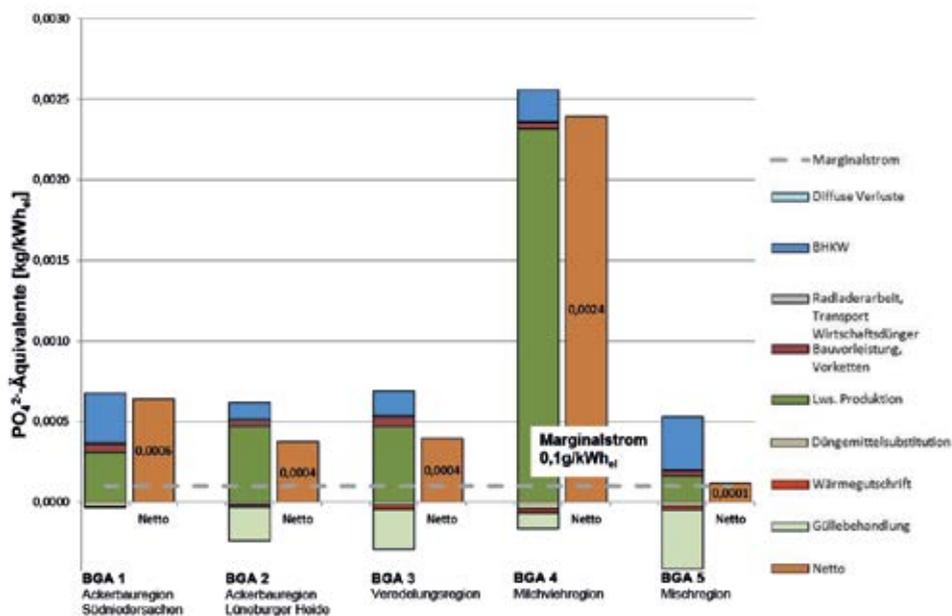


Abb. 2: Ergebnisse der Wirkungskategorie „Eutrophierung“ für das Basisszenario

2.2 Praxisempfehlungen

Folgende Praxisempfehlungen können aufgrund der Studienergebnisse in Bezug auf eine Verringerung der potenziellen Umweltwirkungen durch die Produktion von Strom aus Biogas gegeben werden:

- Für das landwirtschaftliche Produktionssystem gelten als Empfehlungen allgemein die Kriterien der guten landwirtschaftlichen Praxis. Insbesondere bei der Ausbringung organischer Dünger sind emissionsarme Techniken und eine zeitnahe Einarbeitung entscheidend, um Stickstoffemissionen zu vermeiden. Des Weiteren ist auf den effizienten Einsatz von Pflanzenschutzmitteln und Düngemitteln zu achten.
- Methanleckagen bedeuten neben Treibhausgasemissionen auch Ertragseinbußen. Beim Betrieb der Biogasanlage sind sie zu lokalisieren und zu beheben. Über spezielle Messgeräte sollten undichte Bereiche in den einzelnen Komponenten der Biogasanlage identifiziert werden.
- Die Gärrestlager sollten gasdicht abgedeckt werden.
- Das Koppelprodukt Wärme sollte so effektiv wie möglich eingesetzt werden. Durch den Einsatz der BHKW-Abwärme für die Gebäudebeheizung, für eine gut organisierte Getreide- und Holz Trocknung sowie zur Kochendwasserbereitung für die Melkstanddesinfektion können hohe CO₂-Einsparungen erzielt werden.
- Aus ökologischer Sicht sind Gas-Otto-Motoren den Zündstrahlmotoren vorzuziehen, vor allem wenn letztere noch mit fossilem Zündöl betrieben werden.

2.3 Fazit der Ökobilanzierung

Die Untersuchung zeigt, dass das regionsspezifische Substratangebot einen großen Einfluss auf die Ergebnisse hat. Anlagen mit einem hohen Wirtschaftsdüngerinput haben einen doppelten Vorteil, weil hier zum einen kaum Aufwendungen für die Substratbereitstellung anfallen. Zum anderen führt die Güllebehandlung zu hohen Klimagutschriften, da weniger Methan emittiert wird. Aber auch Anlagen, die keinen Wirtschaftsdünger einsetzen, produzieren umweltfreundlichen Strom. Denn neben den regionsabhängigen Gegebenheiten, die die Anlagenbetreiber nicht beeinflussen können, gibt es weitere bedeutende Stellschrauben. Wichtig für alle Biogasanlagen ist die Verfügbarkeit von geeigneten Wärmeabnehmern. Ein effizientes Wärmenutzungskonzept führt zu deutlichen Umweltentlastungen. Völlig unabhängig vom Standort, aber äußerst entscheidend für das Bilanzergebnis, ist die Gasdichtheit der Gärstrecke einschließlich der Gärrestlager. Die Ergebnisse dieser Studie legen nahe, dass Gärrestlager ohne Kuppeldach bald der Vergangenheit angehören sollten.

3 Untersuchung der Wirtschaftsdüngerpotenziale in Niedersachsen

Das Nährstoffmanagement von Wirtschaftsdüngern und Gärresten hat in der jüngeren Vergangenheit verstärkt Aufmerksamkeit gefunden, weil die zunehmende räumliche Konzentration der landwirtschaftlichen Nutztierhaltung zu erheblichen Nährstoffüberschüssen in viehdichten Regionen führt. Durch den vermehrten Anbau von Energiepflanzen für die Biogasproduktion in anderen Regionen stiegen die Futtermittel- und damit die Nährstoffimporte in die Regionen mit intensiver Viehhaltung. Ziel des Forschungsvorhabens „Bauernhof Niedersachsen“ ist daher die Untersuchung der Potenziale einer Nutzung von Wirtschaftsdüngern in Biogasanlagen vornehmlich in Ackerbauregionen. Dabei werden technisch-organisatorische Aspekte, vor allem Fragen der Transportlogistik, und die ökologische und ökonomische Nachhaltigkeit des Gesamtprozesses analysiert. Niedersachsen wird dabei gleichsam als ein großer Bauernhof betrachtet, auf dessen Flächen der erforderliche Nährstoffausgleich herbeigeführt wird.

3.1 Biogasanlagenpotenziale

Der aktuelle Nährstoffbericht von Niedersachsen weist in Bezug auf Wirtschaftsdünger in den Veredelungsregionen einen deutlichen Nährstoffüberhang von bis zu 54 kg P_2O_5 /ha LF aus tierischen Ausscheidungen und Gärresten auf, sodass jährlich ca. 33.000 t Phosphat aus diesen Regionen exportiert werden müssen. Andererseits liegen in den Ackerbauregionen im südlichen und östlichen Niedersachsen Phosphatdefizite vor, die bislang mit mineralischen Düngemitteln ausgeglichen werden.

Daher sollten aus den Überschusskreisen die Wirtschaftsdünger nach der Reihenfolge der Transportwürdigkeit bzw. Nährstoffgehalte verbraucht werden. In den Ackerbauregionen Niedersachsens produzieren knapp 500 Biogasanlagen mit einer installierten elektrischen Leistung von 272 MW_{el} Strom und Wärme. Davon setzen 149 Biogasanlagen ausschließlich Anbaubiomasse ein. Die übrigen Biogasanlagen (337 Anlagen) haben bereits zu einem bestimmten Anteil Wirtschaftsdünger in den Substratmix integriert. Vor diesem Hintergrund wird in mehreren Szenarien der erstmalige Einsatz verschiedener Wirtschaftsdüngerformen in Höhe von 33 % am Substratmix für die 149 NawaRo-Biogasanlagen und für die übrigen 337 Anlagen eine Substratanteilerhöhung von 33 auf 50 % modelliert. In allen Szenarien wird davon ausgegangen, dass die erzeugte jährliche Energiemenge jeder einzelnen Anlage gleich bleibt und der Biomasseanteile am Gesamtsubstratmix zurückgeht.

3.2 Logistische Betrachtung

Die Belieferung von Biogasanlagen in den Ackerbauregionen mit Wirtschaftsdünger von tierhaltenden Betrieben aus den Veredelungsregionen verursacht logistischen Aufwand,

da der Wirtschaftsdünger über große Distanzen transportiert werden muss. Je nach Lage des abgebenden Betriebes und der aufnehmenden Biogasanlage kann die Transportstrecke 150 bis über 300 Kilometer betragen.

Bei Entfernungen ab 150 km werden für den Transport von flüssiger Gülle Lkw mit Gülleauflieger verwendet, die bis zu 27 Tonnen Gülle laden können. Eine Alternative sind Kombiliner mit getrennten Ladekammern, die sowohl Flüssigfracht als auch Feststoffe transportieren können. Dies ermöglicht es, Gülle aus den Veredelungsregionen in die Ackerbauregionen zu transportieren und auf dem Rückweg Feststoffe (z. B. Futter für die Tierhaltung) zurück in die Veredelungsregionen zu liefern.

Zur Erhöhung der Nährstoffdichte und damit der transportierten Nährstoffmenge pro Fahrt dient die Gülleseparation, bei der die Gülle in eine feste und eine dünne Fraktion aufbereitet wird. Die feste Fraktion kann im Gegensatz zur flüssigen Gülle mit einem üblichen Kipp-Lkw transportiert werden.

Für Transport und ggf. Aufbereitung des Wirtschaftsdüngers entstehen verschiedene Kosten, wie Abbildung 3 verdeutlicht. Den Transportkosten stehen ein möglicher Ertrag

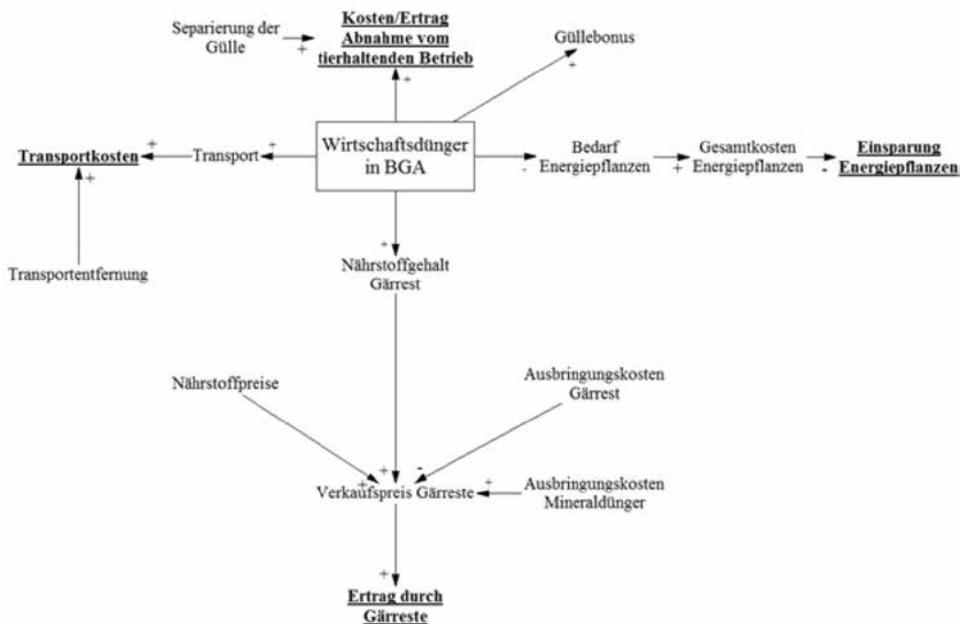


Abb. 3: Ökonomische Faktoren zum Einsatz von Wirtschaftsdünger in BGA; die Pfeile in der Abbildung zeigen die kausalen Zusammenhänge zwischen den Variablen und Parametern, während die Plus- und Minuszeichen angeben, ob der kausale Zusammenhang gleich- oder entgegengerichtet ist. Ist ein kausaler Zusammenhang gleichgerichtet, so führt eine Zunahme respektive Abnahme bei einer Variablen zu einer Zunahme respektive Abnahme bei der anderen Variablen. Bei einem entgegengerichteten Zusammenhang verhält es sich genau anders herum.

für die Abnahme der Gülle, die Einsparung durch die geringeren Gesamtkosten durch die Substitution von Energiepflanzen durch Wirtschaftsdünger und der erhöhte Ertrag aus dem Verkauf von Gärresten gegenüber.

3.3 Ökologische Betrachtung

Neben den finanziellen Auswirkungen hat die Substitution von Silomais durch Wirtschaftsdünger auch ökologische Auswirkungen. Da die Erstellung einer kompletten Ökobilanz für die Biogasanlagen sehr aufwendig ist, wurden nur die Wirkungskategorien „Klimawandel“ und „Versauerung“ für verschiedene Szenarien berechnet. Die Wirkungskategorie „Klimawandel“ wird durch die Berechnung des Treibhausgaspotenzials mittels der Einheit CO₂-Äquivalent quantifiziert (Abb. 5). Für die Versauerung ist hauptsächlich die Emission von Stickoxiden, Ammoniak und Schwefeldioxid ursächlich, und das Versauerungspotenzial wird in der Einheit SO₂-Äquivalent gemessen (Abb. 6).

Als Referenzsystem wurde die BGA 1 (Tab. 1, SCHMEHL et al. 2012) gewählt. Für diese Biogasanlage aus der Ackerbauregion in Südniedersachsen wird angenommen, dass Wirtschaftsdünger aus einer Veredelungsregion eingesetzt wird und damit einen Anteil der bisherigen Substratmischung der Biogasanlage substituiert (8.040 t Silomais, 1.800 t Zuckerrüben, 1.800 t GPS und 360 t Getreidekörner). Der Gärrest der Anlage wird zur Düngung in der näheren Umgebung eingesetzt.

Abbildung 4 gibt einen Überblick über die vielfältigen Änderungen durch die Substitution. Durch den Einsatz von Wirtschaftsdünger aus der Veredelungsregion in einer Biogasanlage der Ackerbauregion entstehen zusätzliche Emissionen durch den Transport

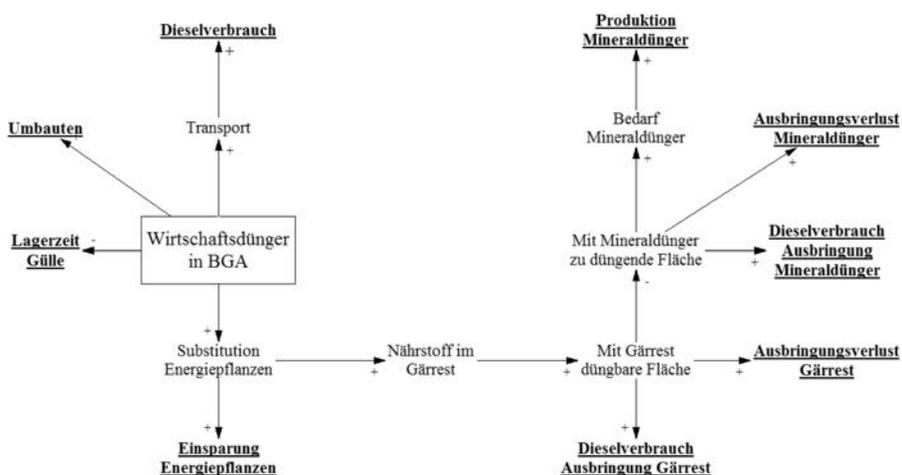


Abb. 4: Ökologische Faktoren beim Einsatz von Wirtschaftsdünger in der BGA

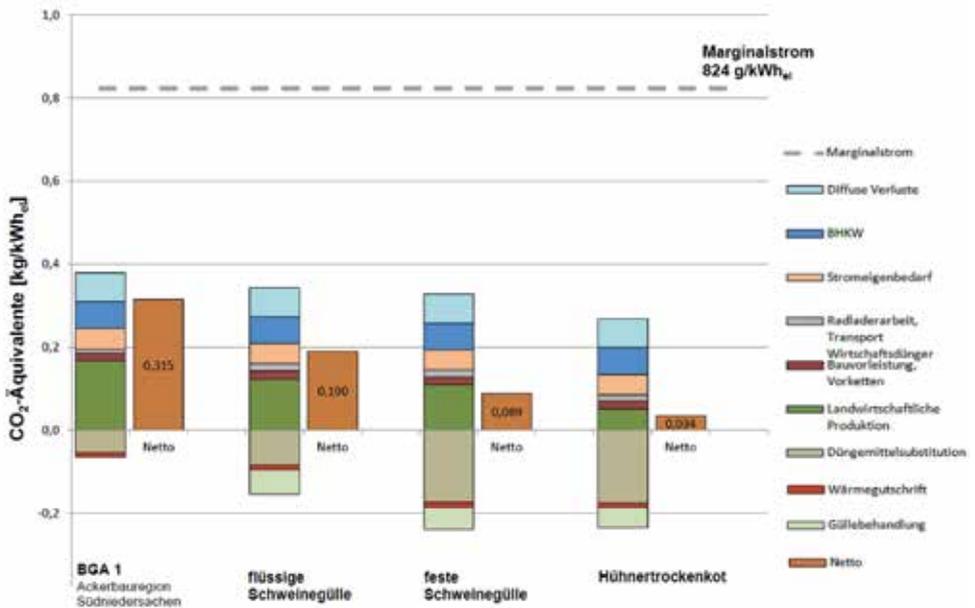


Abb. 5: Ergebnisse der Wirkungskategorie „Klimawandel“ für drei Szenarien mit 33 % Substitution der Energiepflanzen (Treibhausgaspotenzial gemäß IPCC 2007, Marginalstrom nach Memmler et al. 2013)

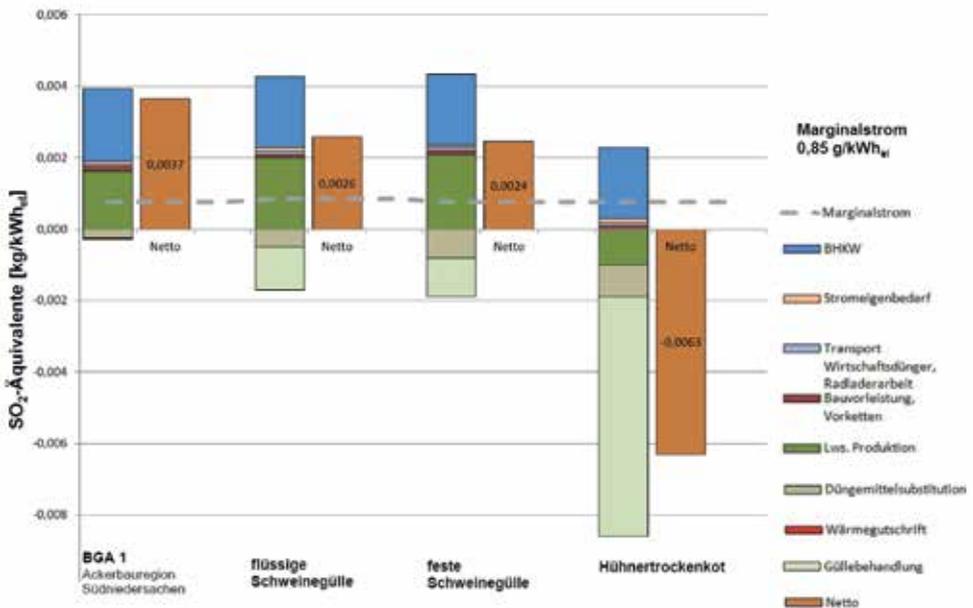


Abb. 6: Ergebnisse der Wirkungskategorie „Versauerung“ für drei Szenarien mit 33 % Substitution der Energiepflanzen (Marginalstrom nach Memmler et al. 2013)

des Wirtschaftsdüngers. In Relation zum Referenzsystem ändert sich unter anderem die Menge an benötigtem Mineraldünger. Durch die Verwendung des Wirtschaftsdüngers in der Biogasanlage erhöht sich der Nährstoffgehalt des Gärrests. Dies hat zur Folge, dass Mineraldünger eingespart werden kann. Für die Berechnung der zusätzlichen Emissionen ist zu berücksichtigen, welche Menge an Mineraldünger äquivalent zum Gärrest ist. So ersetzt der Stickstoff im Gärrest nur rund 60 % Stickstoff aus Mineraldünger (GUTSER et al. 2010). Phosphat und Kaliumoxid aus dem Gärrest hingegen ersetzen im gleichen Maße Phosphat und Kaliumoxid aus Mineraldüngern.

Durch Aufrechnen der Emissionen ergibt sich die Gesamtänderung der Emissionen, die durch den Einsatz von Wirtschaftsdünger in der Biogasanlage verursacht wird. Die Gesamtänderung lässt sich formal mit der Gleichung 1 beschreiben:

$$E = T - L - M + A - S + U + D \quad (\text{Gl. 1})$$

E für die Gesamtänderung der Emissionen,

T für die Emissionsänderungen durch die veränderten Transportentfernungen,

L für die Emissionsänderungen durch die Lagerzeitverkürzung,

M für die Emissionsänderung durch die Einsparung an Mineraldünger,

A für die Emissionsänderungen bei den Ausbringungsverlusten,

S für die Emissionsänderungen durch die Substitution von Energiepflanzen,

U für die Emissionsänderungen durch benötigte Umbauten und

D für die Emissionsänderungen durch die veränderte Düngung.

Für die Berechnung der Szenarien wird für den Transport des Wirtschaftsdüngers eine Entfernung von 150 km angenommen. Es ist allerdings auch möglich, die Emissionen als Funktion in Abhängigkeit von der Transportdistanz darzustellen. Die Berechnung der gesamten Emissionsänderung bezieht sich jeweils auf ein Jahr. Die Ergebnisse zeigen, dass der Einsatz von Wirtschaftsdünger aus Regionen mit intensiver Viehhaltung ökologische Vorteile bieten kann.

4 Schlussfolgerungen

Biogasanlagen, welche erstmalig Gülle als Substrat einsetzen möchten, haben zahlreiche zusätzliche Gesetze und Verordnungen aus den Bereichen Bau-, Veterinär- und Transportrecht zu beachten. Darüber hinaus müssen die baulichen, organisatorischen und prozesstechnischen Voraussetzungen geschaffen werden, um einen stapelbaren oder flüssigen Wirtschaftsdünger in den bereits vorhandenen Vergärungsprozess integrieren zu können. Die Belieferung von Biogasanlagen in den Ackerbauregionen mit Wirtschafts-

dünger von tierhaltenden Betrieben aus den Veredelungsregionen verursacht einerseits einen hohen logistischen Aufwand, da der relativ transportunwürdige Wirtschaftsdünger über große Distanzen transportiert werden muss. Die mit dem erhöhten Einsatz an Wirtschaftsdünger einhergehende Einsparung an Energiepflanzen hat aber andererseits den Vorteil, die Flächenabhängigkeit der Anlage zu reduzieren und Ackerflächen wieder für den Anbau alternativer landwirtschaftlicher Kulturpflanzen freizugeben.

Literatur

- Guenther-Lübbers, W.; Garbs, M.; Brauckmann, H.J.; Geldermann, J.; Broll, G.; Theuvsen, L. (2015): Nachhaltige Biomassenutzung in Biogasanlagen auf der Grundlage der Wirtschaftsdüngerpotenziale in Niedersachsen („Bauernhof Niedersachsen“) Im Auftrag des Ministeriums für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz, Hannover
- IPCC (2007): IPCC Fourth Assessment Report – Contribution of Working Group I: Technical Summary 2007. <http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar4/wg1/ar4-wg1-ts.pdf>, Zugriff am 15.03.2011
- Memmler, M.; Mohrbach, E.; Schneider, S.; Dreher, M.; Herbener, R. (2011): Emissionsbilanz erneuerbarer Energieträger – Durch Einsatz erneuerbarer Energien vermiedene Emissionen im Jahr 2010, Aktualisierte Anhänge 2 und 4 der Veröffentlichung „Climate Change 12/2009“, Umweltbundesamt (UBA), Dessau-Roßlau
- Memmler, M.; Merkel, K.; Pabst, J.; Rother, S.; Schneider, S.; Dreher, M. (2013): Emissionsbilanz erneuerbarer Energieträger. Bestimmung der vermiedenen Emissionen im Jahr 2012. Aktualisierte Anhänge 1, 2 und 3. Umweltbundesamt (UBA), Dessau-Roßlau
- Schmehl, M., Hesse, M., Geldermann, J. (2012): Ökobilanzielle Bewertung von Biogasanlagen unter Berücksichtigung der niedersächsischen Verhältnisse, Göttingen. www.ml.niedersachsen.de/download/67480

Stand und zukünftige Chancen der steuerbaren Biogasanlagen

UWE HOLZHAMMER, BERND KRAUTKREMER, MICHAEL NELLES, FRANK SCHOLWIN

1 Entwicklung von Strom aus erneuerbarer Energie, insbesondere aus Biogas

Seit der Einführung des Stromeinspeisungsgesetz (StromEinspG) 1990 spielt in Deutschland, neben der Versorgungssicherheit und der Steigerung der Kosteneffizienz, (seit 1998) auch der Umwelt- und Klimaschutz eine wachsende Rolle in der Stromerzeugung. Durch den Anspruch an die Energieversorgung, die CO₂-Emissionen der Stromproduktion weiter zu senken, erhielt und erhält die erneuerbare Stromerzeugung eine immer größere Bedeutung. Mit der Einführung des Erneuerbare-Energien-Gesetzes (EEG) im Jahre 2000 begann auch der Zubau von Biogasanlagenkapazitäten und wurde fester Bestandteil im Stromerzeugungsportfolio. Der Ausbau der erneuerbaren Energien (EE) insgesamt, insbesondere aber der fluktuierenden erneuerbaren Energien (fEE, Photovoltaik und Windenergie), erfolgt seither in einem rasanten Tempo. Die Energieversorgungsstruktur verändert sich durch die Bevorzugung der erneuerbaren Energien für die konventionellen Erzeugungskapazitäten stark. Die erneuerbare Stromproduktion ist laut Agentur für Erneuerbare Energien 2014 schon bei 27,8 % angelangt und wird laut den Zielen der Bundesregierung auf 40 bis 45 % im Jahre 2025, auf 55 bis 60 % im Jahre 2035 und auf über 80 % im Jahre 2050 ansteigen. Damit verbunden wird eine völlige Neuordnung der Stromerzeugungsstruktur sein, die von fEE geprägt sein wird (Agentur für erneuerbare Energien 2015, Gesetz für den Ausbau erneuerbarer Energien 2014).

Der restliche Strombedarf, der nicht durch fEE gedeckt werden kann, erfordert deshalb flexible Stromerzeugungskapazitäten, welche in der Lage sind, die sogenannte Residuallast zu bedienen. Die Residuallast beschreibt den verbleibenden Strombedarf, der nach der Lastbereitstellung durch fEE ungedeckt ist. Um diese Residuallast effizient zu decken, gilt es zukünftig unterschiedliche technische Maßnahmen zu kombinieren. Zum einen können über das Lastmanagement und die Stromspeicherung die Residuallastspitzen reduziert werden. Zum anderen muss die verbleibende Residuallast mittels steuerbarer Stromproduktion – die gezielte Stromproduktion zu Zeiten mit hohem Bedarf – mit hoher Verfügbarkeit, kosteneffizient und mit geringen CO₂-Emissionen gedeckt werden.

Die technische Ausstattung der installierten Biogasanlagen wurde bis 2012 so umgesetzt, dass die Stromerzeugung über den Tages-, Wochen- und Jahresverlauf kontinuierlich erfolgen kann. So wurden über 7.000 Anlagen installiert, die mit einer Gesamtleistung von circa 3,2 GW_{el} Grundlaststrom bereitstellten (Fachverband Biogas 2015). Bio-

gasanlagen speisten aufgrund der über diesen Zeitraum geltenden Vergütungsregelungen den produzierten Strom nahezu konstant und unabhängig vom (residualen) Strombedarf ins Stromnetz ein. Die erzeugten Strommengen wurden und werden gesetzlich geregelt vom Stromnetzbetreiber abgenommen. Eine betriebswirtschaftliche Alternative zu dieser Betriebsweise gab es im Grunde bis zum Jahr 2012 nicht. Biogasanlagen wären allerdings mithilfe zusätzlicher Gasspeicher und durch den Zubau elektrischer Erzeugungskapazitäten (und weiteren technischen Anpassungen) verhältnismäßig einfach in der Lage auf Lastschwankungen und auf die fluktuierende Stromerzeugung witterungsabhängiger erneuerbarer Energieträger, zumindest im Tagesverlauf, zu reagieren.

Die Instrumente „gleitende Marktprämie“ und „Flexibilitätsprämie“ des EEG 2012 gaben deshalb für die flexible Stromproduktion aus Biogas erste Impulse und griffen die technischen Möglichkeiten der Biogasanlagen auf. Der Strom kann seither mittels der Marktprämie direkt an der Strombörse vermarktet werden und muss nicht mehr über den Stromnetzbetreiber erfolgen. Dadurch haben die Strompreisschwankungen erstmals Einfluss auf das betriebswirtschaftliche Ergebnis der Anlagen erhalten. Gleichzeitig wurde ein Fördermechanismus eingeführt, der es den Betreibern der Biogasanlage betriebswirtschaftlich ermöglicht, die beschriebenen technischen Anpassungen vorzunehmen, um in relevantem Umfang auf die Preisschwankungen reagieren zu können. Die Rahmenbedingungen für die Flexibilisierung wurden so gestaltet, dass Anlagen ab einer Volllaststundenzahl (VLH) von 1.750 h/a eine Unterstützung durch die Flexibilitätsprämie erhalten. Die höchste spezifische Vergütung pro erzeugte Stromeinheit erhalten Anlagen bis knapp über 4.000 VLH im Jahr. Die unterschiedlichen Strompreise über den Tagesverlauf (und über den Wochen- sowie Jahresverlauf) können somit die Stromerzeugung mittels Biogas beeinflussen. Das Instrument der Flexibilitätsprämie wurde so entwickelt, dass eine flexible Stromerzeugung mittels Biogas zu einer Optimierung der Gesamterlöse führt. An technischen Lösungen, diese Betriebsweise kosteneffizient umzusetzen, wird seither intensiv gearbeitet.

Durch das am 1. August 2014 in Kraft getretene Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG) wird der weitere Ausbau, die Förderung und Weiterentwicklung der Technologien zur Erzeugung von Strom aus erneuerbaren Energien geregelt. Im Zuge dieser Neuregelung wurde festgelegt, dass neue Anlagen, die Biogas einsetzen, den Strom direkt vermarkten und flexibel mit maximal 4.380 VLH erzeugen sollen. Bestandsanlagen haben weiterhin die Möglichkeit, die beschriebene Flexibilitätsprämie zu nutzen und – angepasst an den Vor-Ort-Gegebenheiten – die Bestandsanlage entsprechend technisch auszurüsten, wobei allerdings die historische Höchstbemessungsleistung nicht überschritten werden darf. Der Weg der Flexibilisierung wird somit konsequent weitergegangen. Gleichzeitig wird allerdings auf einen relevanten Zubau im Bereich Biogas aus Energiepflanzen verzichtet.

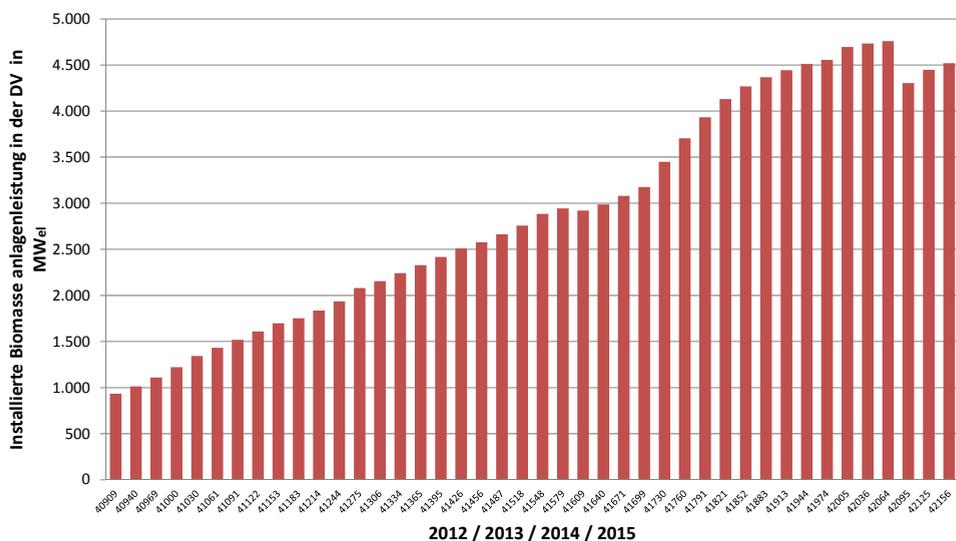
Nachfolgend wird aufgezeigt wie sich das energiewirtschaftliche Verhalten der Marktakteure bzw. Biogasanlagen in den letzten Jahren entwickelt hat. Dabei gilt es neben der Stromdirektvermarktung als Grundvoraussetzung zur Marktteilnahme, auch die Bereitstellung von Systemdienstleistungen (SDL), z. B. in Form von Regelleistung und die bedarfsorientierte Residuallastberücksichtigung zu beachten.

2 Flexible Strombereitstellung aus Biogas in Zahlen

2.1 Biomassestrom in der Direktvermarktung (DV)

Seit der Einführung der Direktvermarktung mittels der Marktprämie im Januar 2012 steigt die elektrische Leistung jener Anlagen, die den Strom direkt vermarkten, kontinuierlich an. Insgesamt werden in Deutschland derzeit (Stand Juni 2015) ca. 4,5 GW_{el} Strom aus Biomasse direkt vermarktet (Abb. 1) (Netztransparenz 2015).

Der erste Rückgang der Anlagenleistung von Biomasseanlagen in der DV seit Einführung ist mit der verpflichtenden Installation einer Fernwirktechnik zum 1. April 2015 verbunden. Seit Anfang April müssen alle Anlagen, die sich in der Direktvermarktung befinden, eine Fernwirktechnik vorweisen und dem Stromhändler die Möglichkeit eingeräumt haben, auf die Anlage jederzeit zuzugreifen. Circa 9,1 % der Anlageleistung



Quelle: www.netztransparenz.de, Stand Juni 2015

Abb. 1: Installierte Leistung von Biomasseanlagen, die den Strom direkt, meist an der Strombörse EPEX Spot SE, vermarkten (Entwicklung von Januar 2012 bis April 2015)

ist diese Aus- bzw. Umrüstung bis zum Stichtag scheinbar nicht gelungen. Es bleibt zu beobachten, ob diese Anlagen sich z. T. wieder in die DV zurückmelden (BMW_i 2015).

Die Anlagenbetreiber haben sich dem Thema Direktvermarktung kontinuierlich angenommen. Ebenso haben sich die Stromhändler den Herausforderungen, die mit der Stromerzeugung mittels Biomasse verbunden sind, gestellt und Lösungen gefunden, Biomasseanlagen in ihr virtuelles Kraftwerk einzubinden („Poolbildung“).

2.2 Aufteilung der Strommengen zwischen Biogas, fester und flüssiger Biomasse

Über 60 % der 4,5 GW_{el} Biomasseanlagenleistung sind Biogasanlagen die den Strom direkt vermarkten. An zweiter Stelle, mit circa 1,5 GW_{el} repräsentieren Biomasseheizkraftwerke, welche feste Brennstoffe einsetzen, ebenfalls einen relevanten Anteil der direkt vermarkteten Biomasseanlagenkapazität. Blockheizkraftwerk (BHKW)-Anlagen, die flüssige Biomasse einsetzen, sind mit einem geringen Anteil vertreten (Abb. 2, BMW_i 2015).

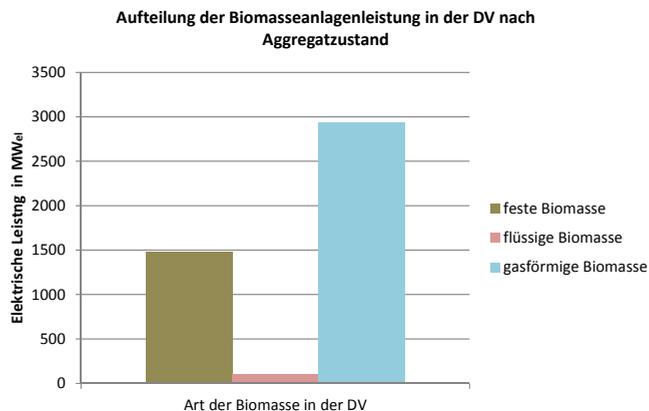


Abb. 2: Aufteilung der Biomasseanlagenleistung in der Direktvermarktung nach Aggregatzustand (Quelle: Fraunhofer IWES (BMW_i 2015))

Aktuell vermarkten leistungsbezogen über 70 % aller Biogasanlagen und Anlagen, welche Biomethan einsetzen, den produzierten Strom selbst. Tendenziell sind es eher kleinere Anlagen (< 250 kW_{el}) und Anlagen, die mit einer geringeren Verfügbarkeit betrieben werden, welche den Weg in die DV noch nicht beschritten haben (BMW_i 2015). Allerdings gibt es auch im Bereich kleinerer Biogasanlagen Bewegung, da vereinzelte Akteure, wie z.B. Stadtwerke aber auch überregionale Stromhändler, spezielle Produkte für diese Anlagen anbieten. Es gilt zu beobachten, welche Erfahrungen damit gemacht werden. Aktuell ist noch offen, welche Strommengen von welchen Anlagen zukünftig ökonomisch als nicht zu vermarkten gelten. Dies insbesondere deshalb, weil die zusätzlichen Einnahmen durch die Direktvermarktung (im Vergleich zur Festvergütung) des Stroms für den Anlagenbetreiber mit circa 0,1 bis 0,3 ct/kWh_{el} auf niedrigem Niveau liegen.

2.3 Biomasseanlagen stellen Regelleistung und andere Systemdienstleistungen (SDL) bereit

Die Direktvermarktung des Stroms ist aktuell die Voraussetzung für die Teilnahme und das Engagement am Regelleistungsmarkt. Dieser Markt mit seiner Aufteilung zwischen Minutenreserveleistung (MRL), Sekundärregelleistung (SRL) und Primärregelleistung (PRL) ermöglicht zusätzliche Einnahmen, wenngleich diese stark schwanken und schwer über einen längeren Zeitraum kalkulierbar sind. Darüber hinaus muss auch ein entsprechend zusätzlicher Aufwand betrieben werden, um erfolgreich am Regelleistungs (RL)-Markt agieren zu können (höhere Startanzahl, Steuerung von außen, Verschleiß, Controlling, Abrechnung usw.). Der Beitrag der Biogasanlagen (aber auch der restlichen Biomasseanlagen) zur Versorgungssicherheit schreitet dennoch enorm voran. 20 bis 30 % der Biogasanlagenleistung, die direkt vermarktet wird, ist für den Regelleistungsmarkt – aktuellen Schätzungen des Fraunhofer IWES zufolge – präqualifiziert. Die Bereitstellung der negativen Minutenreserveleistung spielt noch immer die größte Rolle. Gleichzeitig wächst die Präqualifikation für die negative Sekundärregelleistung stetig an. Die RL-Produkte für die positive Regelleistung durch Biogasanlagen haben sich ebenfalls weiterentwickelt. Diese basieren auf Anlagen, welche flexibel den Strom nach der Residuallast bzw. nach dem Strompreis ausrichten können. Die Bereitstellung von positiver Regelleistung kann nur dann erfolgen, wenn die Stromproduktion der Anlage niedrig ist oder eingestellt wurde – also in Phasen mit sehr niedrigen Strompreisen (und geringen Wärmebedarf). Es gibt erste Anlagen die sich dem Thema Primärregelung widmen. Die BHKW-Anlagen werden von einzelnen BHKW-Hersteller entsprechend vorbereitet (Schnell Motor 2015). Abbildung 3 basiert auf Auswertungen, die im Rahmen einer Befragung von Stromhändlern erfolgte und durch Fraunhofer IWES im Rahmen des Forschungsprojektes „Laufende Evaluierung der Direktvermarktung von Strom aus Erneuerbaren Energien“ durchgeführt wurde (BMW i 2015).

Ebenso stellen viele Biogasanlagen Blindleistung zur Spannungshaltung für den sicheren und effizienten Transport der Strommengen in den vorhandenen Netzen bereit. Ein Leistungsfaktor von 0,95 ist aktuell zunehmend üblich (GROTHOLT 2015, BDEW 2008), ein Leistungsfaktor von 0,9 wird z.T. diskutiert. Durch die regionale Bereitstellung von Blindleistung durch Biogasanlagen erhöhen diese die Stromtransportkapazitäten und senken somit die Transportverluste bei weiterhin hoher Versorgungssicherheit.

Darüber hinaus wird über die technischen Möglichkeiten von Biogasanlagen zum Netzwiederaufbau im Fehlerfall und über die positive Wirkung der dezentral bereitgestellten Kurzschlussleistung beraten.

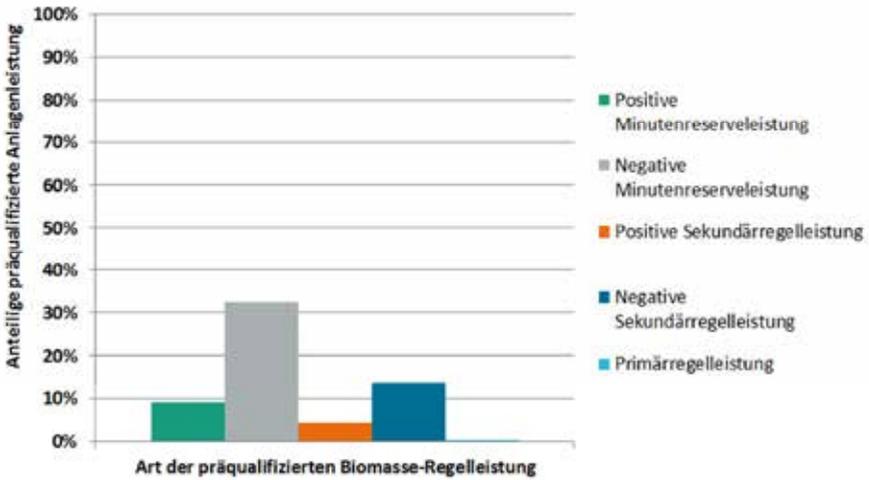


Abb. 3: Präqualifikation der Anlagenleistung für den Regelleistungsmarkt, bezogen auf die Anlagenleistung in der Direktvermarktung, differenziert nach den Arten der Regelleistung (BMW 2015, Stand Juni 2015)

2.4 Strom aus Biogas (und Biomethan) ist flexibel

Neben der Teilnahme am Regelleistungsmarkt haben sich immer mehr Biogasanlagenbetreiber dazu entschieden die Flexibilitätsprämie zu nutzen, um die Anlagen für einen flexiblen Betrieb auszustatten. Etwa 50 % der Biogasanlagen (inklusive Biomethan) die den produzierten Strom direkt vermarkten, bezogen im April 2015 die Flexibilitätsprämie und richten ihre Stromproduktion (in unterschiedlicher Ausprägung) nach dem Strombedarf aus. Abbildung 4 zeigt die Entwicklung der Anlagenleistung der Anlagen, welche die Flexibilitätsprämie nach § 33 i EEG 2012 und § 54 EEG 2014 bis einschließlich April

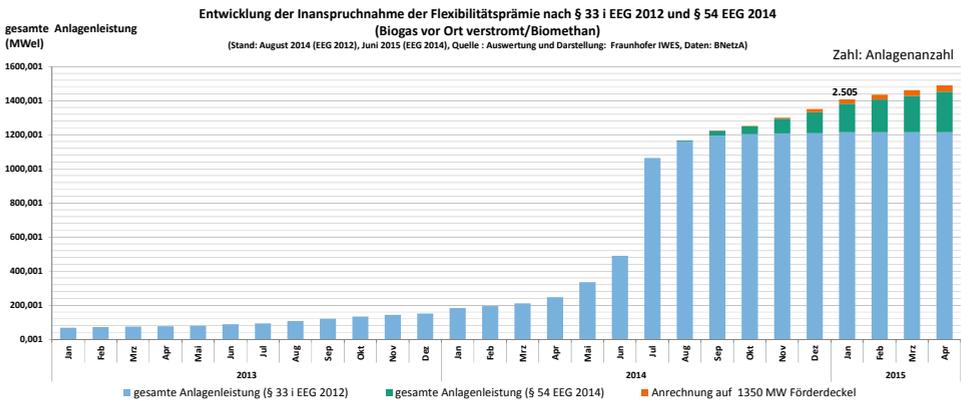


Abb. 4: Entwicklung der Anlagenleistung der Anlagen, welche die Flexibilitätsprämie nach § 33 i EEG 2012 und § 54 EEG 2014 in Anspruch genommen haben (Stand Juni 2015)

2015 in Anspruch genommen haben. Der große Anstieg seit Juli 2014 ist mit der anstehenden Novelle durch das EEG 2014 und mit damit einhergehenden Unsicherheiten im Markt verbunden. Es ist davon auszugehen, dass viele Anlagenbetreiber beabsichtigten, noch unter das bekannte Regime des EEG 2012 zu fallen. Auch nach diesem Schub zeichnet sich ein weiteres Wachstum ab. Das EEG 2014 sieht weiterhin für Bestandsanlagen ähnliche Rahmenbedingungen wie das EEG 2012 vor.

3 Blick in die Zukunft: Welche Beiträge können Biogasanlagen erreichen?

Die Biogastechnologie (bzw. z.T. Biomassetechnologie im Allgemeinen) weist das technische Potenzial auf, die Strommengen gezielt und flexibel zu produzieren. Die Anlagen werden innerhalb des Spannungsfeldes der Erlöspotenziale zwischen den verschiedenen Märkten (Strom, Wärme, Regelleistung) zunehmend optimiert, wobei das betriebswirtschaftliche Gesamtergebnisse entscheidet, welcher Markt in welchem Umfang bedient wird. Offen ist, inwieweit es zukünftig einen neuen Markt für SDL (Blindleistung, Netz-wiederaufbau usw.) geben wird. Auch bleibt es abzuwarten, ab wann die Strombörse in Zukunft stärker einen Flexibilitätsbedarf über den Preisspread aussendet, als das aktuell der Fall ist.

3.1 Deckung der Residuallast

Folgende Fragen stellen sich im Zusammenhang mit der steuerbaren und flexiblen Stromproduktion von Biogasanlagen: Wie sollen diese Strommengen in Zukunft im Energiesystem eingesetzt werden? Welche technischen Fähigkeiten soll der zukunfts-fähige BiogasPark aufweisen? Untersuchungen des Fraunhofer IWES zeigen, dass eine flexible Stromproduktion auch aus Gesamtkostensicht gegenüber der Grundlaststromproduktion geeignet ist, einen positiven Beitrag zur Integration der fEE in das Energiesystem zu leisten. Die in Zukunft (2030) dafür anzustrebende Flexibilität des gesamten BiogasParks setzt sich aus drei wesentlichen Komponenten zusammen:

- a) Die Reaktionsfähigkeit: Zum einen müssen die Stromerzeugungskapazitäten sehr geringe Reaktionszeiten realisieren können. Hier kommt den BHKW-Herstellern eine besondere Rolle zu, die BHKW-Anlagen so zu konzipieren und technisch auszustatten, dass ohne relevante Zusatzkosten verlässlich circa 1.000 Start- und Stoppvorgänge im Jahr aufgrund der Residuallast realisiert werden können. Ebenso müssen die Biogasanlagenbauer und Planer die Gesamtanlage auf diese Anforderung anpassen und entsprechend Biogasmanagement und -speicherung, Kommunikationstechnik und Visualisierung, Automatisierung und Controlling weiterentwickeln. Nur so

kann trotz des flexiblen Betriebs eine hohe Verfügbarkeit der Gesamtanlagen sichergestellt werden. Durch die Bereitstellung von Regelleistung kann sich die notwendige Start- und Stoppanzahl weiter erhöhen.

- b) Das Verhältnis zwischen produzierter Energie und installierter Leistung: Die jährliche Auslastung der installierten Leistung des gesamten BiogasParks sollte in Zukunft bei 4.000 h liegen, so das Ergebnis der Untersuchungen (Abb. 5). Diese 4.000 Volllaststunden zeigen die geringsten Gesamtkosten bzw. sogar eine Gesamtkosteneinsparung (schwarze Linie) gegenüber der Grundlastproduktion. Das Verhältnis zwischen Energie und Leistung liegt somit entsprechend höher, als das heute noch der Fall ist.

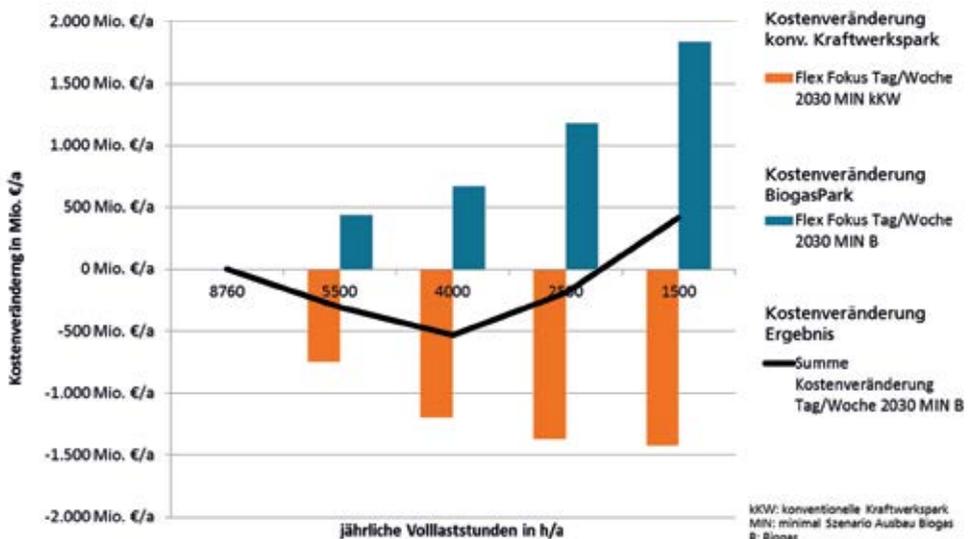


Abb. 5: Gesamtkostenveränderung in Abhängigkeit der Flexibilisierung des BiogasPark im Jahre 2030 (MinSZ, Tag/Woche, circa 60 % EE-Anteil, Stand: Dez2014, OptikoBi²)

- c) Bedarfsberücksichtigung: Die Berücksichtigung des Strombedarfs muss zukünftig neben den täglichen auch die wöchentlichen Strombedarfsschwankungen einbeziehen können. Im Ergebnis bedeutet dies, dass die Biogasanlagen zukünftig in der Lage sein müssen auch Bedarfsschwankungen über den Wochenverlauf und die damit verbundene längeren Stillstandzeiten am Stück zu beachten. Perspektivisch gilt es, somit neben einem „intelligenten“ Biogasspeicher- auch ein Fütterungsmanagement (oder ein angepasstes Fermenterkonzept) zu etablieren. Dadurch können die speziell erstellten Fahrpläne, die durch die Stromproduktion der Biogasanlagen berücksichtigt werden, die prognostizierte Bedarfsschwankungen besser integrieren. Untersuchungsergebnisse von Fraunhofer IWES sind dazu erfolversprechend. Ebenso wer-

den hierzu derzeit auch umfassende Untersuchungen am Deutschen Biomasseforschungszentrum (DBFZ) in Leipzig durchgeführt. Die bereits vorliegenden Ergebnisse zeigen, dass in diesem Bereich erhebliche Optimierungspotenziale liegen. Diese zu mobilisieren wird in den nächsten Jahren mit steigenden fEE immer wichtiger, da die residuale Stromnachfrage z. B. am Wochenende regelmäßig signifikant niedriger liegt als wochentags.

3.2 SDL-Bereitstellung

Weitere Untersuchungen des Fraunhofer IWES zeigen, dass das Regelleistungsangebot noch ausgebaut werden kann. Durch die Flexibilisierung der Anlagen und der damit verbundenen sinkenden Volllaststunden, erhalten diese verstärkt die Möglichkeit positive Regelleistung bereitzustellen. Ebenso ist zu erwarten, dass die Reaktionsfähigkeit weiter steigt, sodass die Biogasanlagen zukünftig zunehmend alle drei Regelleistungsprodukte anbieten können. Dadurch können sie die Aufgaben der Frequenzhaltung, die aktuell größtenteils durch zentrale Großkraftwerkskapazitäten bereitgestellt werden, in relevanten Umfang übernehmen.

Auch die Blindleistungsbereitstellung stellt aus technischer Sicht eine lösbare Herausforderung für Biogasanlagen dar. Viele Anlagen weisen ein Generator-Motor-Verhältnis auf, welches eine relevante Bereitstellung von Blindleistung zulässt (INDERTHAL 2015). Zukünftig ist es aus technischer Sicht vorstellbar, dass der Generator gegenüber dem Motor noch größer ausgelegt wird, um zusätzlichen regionalen Bedarf an Blindleistung zu decken. Allerdings wäre diese Auslegung mit zusätzlichen Investitionskosten verbunden, die ein etwaiger zukünftiger Blindleistungsmarkt abbilden müsste. Ebenso sollte bei einem Leistungsfaktor von unter 0,95 die zusätzlichen Betriebskosten durch Verlustleistung (die abrechenbaren Strommengen sinken) und den leicht steigenden Eigenstrombedarf der Erregerwicklung des Generators kompensiert werden. Die dezentrale Biogastechnologie kann so durch die Bereitstellung von Blindleistung ihre gute räumliche Verteilung vorteilhaft zur Effizienzsteigerung der Verteilnetze einbringen (technisches Potenzial).

Die Inselnetzversorgung und der Netzwiederaufbau stellen einen Teil des zukünftigen Bedarfs an SDL dar, welcher anteilig wiederum von der Biogasanlagentechnik übernommen werden könnte. Aus technischer Sicht sind die Anlagen dazu zukünftig in der Lage bzw. könnten zukünftig die dementsprechende technische Ausstattung aufweisen. Allerdings muss die gesamte technische Umgebung des Verteilnetzes mit den entsprechenden Schaltanlagen ausgestattet sein, um dezentral versorgte Netzbereiche wieder gezielt aufschalten zu können.

Die dynamische Netzstützung gilt ebenfalls als eine wichtige SDL, welche es ermöglicht, Netzfehler durchzufahren und großflächige Spannungseinbrüche zu verhindern.

Dadurch wird eine hohe Versorgungssicherheit gewährleistet. Biogasanlagen können mit der Bereitstellung von Kurzschlussleistung auch in diesen Zusammenhang die vorgelagerten Netzebenen entlasten, da diese dann die Kurzschlussleistung nicht mehr übertragen müssen. Die Biogasanlagen leisten so einen Beitrag zur Behebung eines Netzfehlers innerhalb von Millisekunden (150 ms) (BDEW 2008).

Die konventionellen Kraftwerkskapazitäten können bzw. müssen sich durch das Engagement der Biogasanlagen (aber auch der restlichen Biomassekraftwerke) am SDL-Markt stärker auf die Bedarfsschwankungen am Spotmarkt konzentrieren. Aktuell kann die Verpflichtung Regelleistung bereitzustellen zu einem unflexiblen Verhalten der konventionellen Anlagen am Spotmarkt führen, welches z. B. durch das Auftreten von negativen Preisen deutlich wird (MustRunUnit).

4 Fazit

Die Biogasanlagen integrieren durch das beschriebene energiewirtschaftliche Engagement die fluktuierenden erneuerbaren Energieträger Wind und Sonne in das Energiesystem. Wenngleich es in Zukunft auch darüber hinaus relevante flexible Kapazitäten (z. B. Erdgas-Kraft-Wärme-Kopplung (KWK)) geben muss.

Die Stromerzeugung des gesamten BiogasPark sollte aus Gesamtkostensicht im Durchschnitt bei circa 4.000 VLH liegen und in der Lage sein, auf Tages- und Wochenschwankungen zu reagieren. Darüber hinaus können Biogasanlagen zukünftig helfen, den Bedarf an SDL, die zur Spannungshaltung im Verteilnetz benötigt werden, mit zu decken und zusätzlich den Vorteil ihrer regionalen Verteilung zu nutzen. Aber auch die Bereitstellung von SDL ohne regionale Relevanz, wie die Regelleistung, kann durch Biogasanlagen erfolgen. Diese Aktivitäten vermindern den Bedarf von SDL, welche durch den konventionellen Kraftwerkspark geliefert und aufgrund dessen betrieben werden muss (MustRun-Kapazitäten). Der Anteil der konventionellen Kraftwerke die unflexibel sind, da sie SDL-Lieferverpflichtungen eingegangen sind, reduziert sich entsprechend. Ein Abbau von konventioneller MustRun-Kapazitäten führt letztlich zu einer besseren Integration von Windkraftanlagen und Photovoltaik in das Energiesystem.

Die aktuelle Entwicklung der Biogasanlagen im Zusammenhang der Direktvermarktung, der RL-Bereitstellung und der Flexibilisierung zeigen, dass sich die Anlagen seit 2012 verstärkt den energiewirtschaftlichen Herausforderungen der Energiewende stellen und sich auf dem Weg in eine sehr flexible Zukunft machen. Dennoch gilt es weitere Optimierungen bei der technischen Umsetzung vorzunehmen und die rechtlichen Rahmenbedingungen entsprechend weiterzuentwickeln.

Literatur

- Agentur für erneuerbare Energien (2015): <http://www.unendlich-viel-energie.de>, Zugriff Mai 2015
- BDEW (2008): Technische Richtlinie Erzeugungsanlagen am Mittelspannungsnetz, BDEW
- BMWi (2015): Laufende Evaluierung der Direktvermarktung von Strom aus Erneuerbaren Energien (Monitoring EE DV), Zwischenbericht 13, Simon Schäfer-Stradowsky et al., 5/2015 (unveröffentlicht)
- Fachverband Biogas (2015): www.biogas.org, Branchenzahlen, Stand Februar 2015
- Gesetz für den Ausbau erneuerbarer Energien (2014): Erneuerbare-Energien-Gesetz – EEG 2014, BGBl. I S. 1066
- Grotholt (2015): Persönliche Mitteilung, 2G Energy AG
- Inderthal (2015): Persönliche Mitteilung, Bosch KWK Systeme
- Netztransparenz (2015): www.netztransparenz.de/de/Monatsprognosen.htm, Zugriff April 2015
- Schnell Motor (2015): http://www.schnellmotor.de/sm-wAssets/docs/SCHNELL_Motoren_AG_Pressemeldung_EnergyDecentral.pdf, Zugriff März 2015

Möglichkeiten der flexiblen Strombereitstellung bei Biogasanlagen

JAN LIEBETRAU, MATHIAS STUR, ERIC MAUKY, MARTIN DOTZAUER,
MARCUS TROMMLER, VELINA DENYSENKO

1 Einleitung

Der zeitliche Verlauf und die Planbarkeit der Strombereitstellung in Deutschland unterliegen aufgrund der zunehmenden Anteile an fluktuierenden Quellen wie Wind- und Photovoltaikanlagen grundlegenden Veränderungen. Die auftretenden Schwankungen in der Bereitstellung müssen so ausgeglichen werden, dass der – ebenso nicht konstante – Bedarf der Verbraucher sicher gedeckt werden kann.

Zur Gewährleistung der Versorgungssicherheit im Hinblick auf die Bereitstellung der notwendigen Energiemengen und der Gewährleistung der Netzstabilität existieren verschiedene Möglichkeiten. Für den Betrieb von Biogasanlagen und biogas-basierten Kraft-Wärme-Kopplung (KWK)-Anlagen stellt sich die Frage, wie diese, bisher vornehmlich konstant Strom bereitstellenden Anlagen, den Systemerfordernissen entsprechend flexibel Strom bereitstellen können. Dies beinhaltet die Frage nach der technischen Leistungsfähigkeit von Biogasanlagen als Beitrag zur Versorgungssicherheit sowie nach der zukünftigen Entwicklung des Flexibilitätsbedarfs im Zeitverlauf, der für Versorgungssicherheit und die Sicherung des Netzbetriebs notwendig ist. In dem folgenden Beitrag liegt der Fokus vor allem auf den technischen Rahmenbedingungen für einen flexiblen Einsatz von Biogasanlagen.

2 Flexibilität von Biogasanlagen

Im fossil-atomkraft-dominierten Energiesystem erfolgte die Bereitstellung von Wirkleistung und Systemdienstleistungen im Wesentlichen durch Großkraftwerke. Der eingespeiste Strom wurde von der Hoch- und Höchstspannungsebene über die Verteilnetze an die Stromkunden transportiert. Diese Ausgangssituation hat sich im Rahmen der Entwicklung erneuerbarer Energiequellen und der resultierenden Energiesystemtransformation grundlegend geändert. Der Großteil der Anlagen, die nach dem Erneuerbaren-Energie-Gesetz (EEG) gefördert werden (über 90 %), ist in den Verteilnetzen installiert. Einige Netzgebiete sind bereits bilanziell keine Verteilnetze mehr, sondern Sammelschienen für den stark fluktuierenden Strom aus erneuerbaren Energien, der dann über die Übertragungsnetze abtransportiert werden muss. Vor diesem Hintergrund stellt sich die Frage

nach dem Bedarf an Flexibilität in einem zukünftig von erneuerbaren Energien dominierten Stromsystem. Hier existieren heute noch zahlreiche Unbekannte, beispielsweise der Rückbau von Kohlekraftwerkskapazitäten, die technische Entwicklung verschiedener Speichertechnologien und auch die Leistungsfähigkeit zum Stromaustausch im europäischen Verbundsystem. Nach vorhandenen Schätzungen bezüglich des Bedarfs für zusätzliche flexible Kraftwerkskapazitäten kann man jedoch davon ausgehen, dass Biogas mit einer insgesamt installierten und heute teilflexiblen Kapazität von 4,5 GW_{el} einen signifikanten Anteil des zukünftigen Flexibilitätsbedarfes leisten können.

Die Gewährleistung der Versorgungssicherheit und Netzstabilität wird durch verschiedene Instrumente, die für verschiedene Zeithorizonte Angebot und Nachfrage für elektrischen Strom in Einklang bringen, an den Märkten für Stromhandel und Systemdienstleistungen realisiert.

Biogasanlagen können aktuell im Rahmen der Direktvermarktung nach EEG § 34 ff. am Stromhandel in zwei Marktsegmenten eingesetzt werden. Durch die Vermarktung des Stromes über die Börse können durch Ausnutzung von Strompreisschwankungen Mehrerlöse gegenüber einer kontinuierlichen Fahrweise erzielt werden. Die gezielte Verstromung zu Zeiten hoher Preise ermöglicht somit höhere Einnahmen. Am Spotmarkt der Strombörse (European Power Exchange (EPEX) Spot) können Angebote zum einen im Rahmen des kurzfristigeren Intraday-Handels bis 45 Minuten vor Fälligkeit und zum anderen im Rahmen des Day-ahead-Handels für den Folgetag gehandelt werden. Langfristige Geschäfte, die im Terminmarkt (European Energy Exchange (EEX)) realisiert wer-

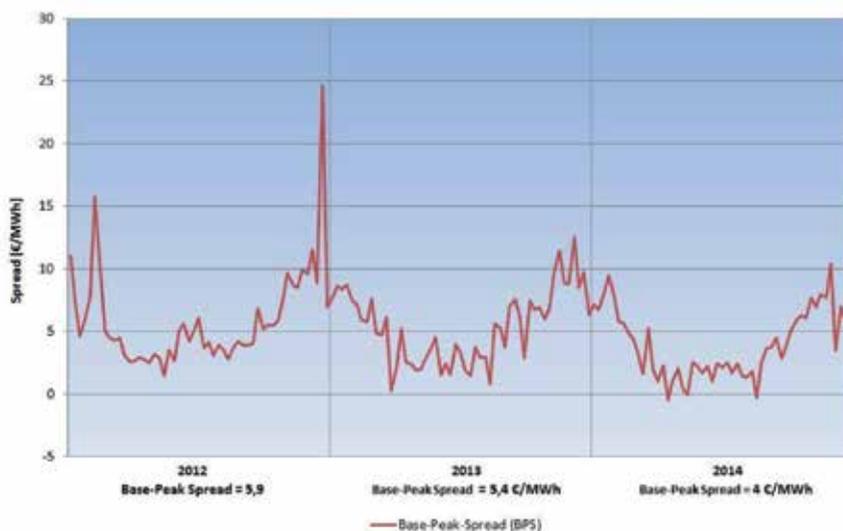


Abb. 1: Wochenmittel der EPEX-Preis-Spreads 2012 bis 2014

den, haben für den Biogasbereich aktuell keine Bedeutung. Je größer die Flexibilität von Anlagen, deren Strom über die Börse vermarktet wird ist, desto besser kann die Verstromung an die Preisentwicklung des Marktes angepasst werden. In Abbildung 1 sind die Preisunterschiede im Wochenmittel dargestellt.

Zur Absicherung von Versorgungssicherheit und Netzstabilität werden neben dem Handel mit Strommengen zusätzlich Systemdienstleistungen in verschiedenen Zeithorizonten mit klaren technischen Anforderungen durch die Übertragungsnetzbetreiber vereinbart. Biogasanlagen müssen im Rahmen einer Präqualifikation ihre technische Eignung für die Erbringung dieser Systemdienstleistungen (Regelenergie) nachweisen und können dann auch an dem Markt für Regeleistung Erlöse generieren. Abbildung 2 zeigt beispielhafte Verläufe für den Abruf von Primärregelleistung, Sekundärregelleistung und Minutenreserveleistung. Mit Blockheizkraftwerken (BHKW) auf Biogasanlagen werden Produkte ab der Sekundärregelleistung angeboten, ein Hochfahren des BHKW innerhalb von 5 Minuten ist realisierbar.

Wenn Biogasanlagen einen Beitrag zum Ausgleich der zunehmenden Angebotschwankungen erbringen sollen, dann indem ihre Leistung an den beschriebenen Märkten flexibel angeboten wird.

Die Fähigkeit flexibel Strom zu erzeugen, kann dabei unterschiedlich ausgeprägt sein. Es können beispielsweise täglich wiederkehrende Fahrpläne realisiert werden, in denen nach bestimmten Vorgaben zu festen Zeiten feste Strommengen in das Netz eingespeist werden. Diese einfache Fahrplangestaltung nutzt die täglich wiederkehrenden Muster von Strombedarf und -angebot, um Mehrerlöse zu generieren. Bisher ist dies in den

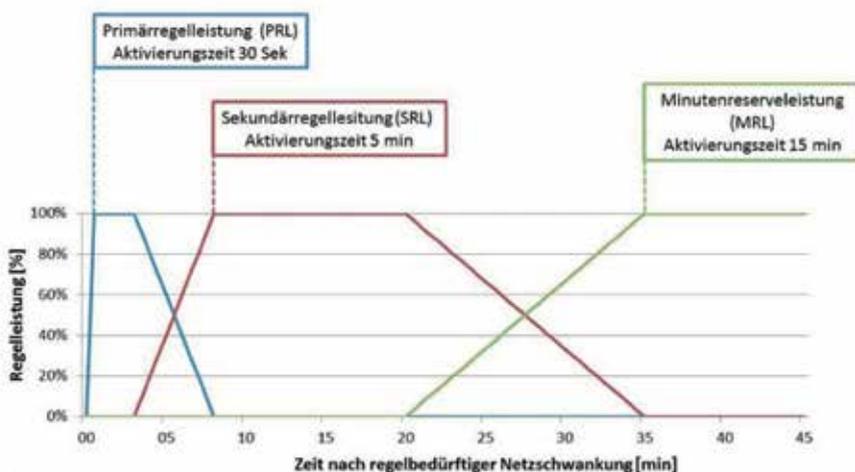


Abb. 2: Schema Regelleistungsarten (UCTE 2004)

meisten Fällen gängige Praxis. Abgesehen von den regelmäßigen Mustern im Strombedarf, die vergleichsweise einfach ausgeglichen werden können, müssen auch unregelmäßig auftretende Schwankungen in der Strombereitstellung ausgeregelt werden. Die dafür notwendige hohe Flexibilität zeichnet sich dadurch aus, dass zu jedem Zeitpunkt kurzfristige Anpassungen in der Energiebereitstellung entsprechend der Notwendigkeiten realisiert werden können. Hierzu müssen entsprechende Anlagen in der Lage sein, auch kurzfristig ihre Fahrpläne anzupassen, um zum Beispiel im Intraday-Handel auf unertägige Schwankungen reagieren zu können.

Da die installierten Leistungen von Biogasanlagen vergleichsweise klein sind, werden die Anlagen zur Vermarktung üblicherweise zu einem Pool gebündelt und gemeinsam vermarktet. Auf diesem Wege kann eine relevante und leistungsfähige Größe erzeugt werden und zugleich werden dadurch das Risiko und der Aufwand für den einzelnen Anlagenbetreiber minimiert.

Für Anlagen, die Biogas direkt mit einem BHKW verstromen, kann „Flexibilität“ im Unterschied zum konstanten Betrieb bedeuten:

- Verstromung in Intervallen mit erhöhter und nachfolgend entsprechend abgesenkter Leistung
- Realisierung von Verstromungsphasen und -pausen variabler Dauer
- In der Regel Beibehaltung der langfristig durchschnittlich bereitgestellten Energiemenge (Bemessungsleistung)
- Kurzfristige Leistungsänderungen als Reaktion auf externe Abfrage.

Die limitierenden Faktoren für die Flexibilisierung des Energieoutputs von Biogasanlagen sind zuerst die technischen Grenzen der installierten BHKW und die Bereitstellung des Biogases für die Verstromung.

Die dem BHKW vorgeschaltete Biogasproduktion ist normalerweise für einen konstanten Betrieb ausgelegt, verfügt aber durch vorhandene Gasspeicher über eine gewisse Flexibilität für den Fall, dass die Geschwindigkeit von Biogasbildung und -verwertung nicht gleich groß sind. Daher ist die Dimensionierung des Gasspeichers eine wesentliche Größe, da mittels des Speichers die Gasproduktion und die Verwertung teilweise entkoppelt werden können. Reicht das vorhandene Speichervolumen für die erwünschte Flexibilisierung nicht aus, dann kann die Geschwindigkeit der Biogasbildung angepasst werden. Dies kann durch ein Fütterungsmanagement oder die Speicherung von Zwischenprodukten erfolgen. Eine weitere Möglichkeit stellt die Aufbereitung des Biogases auf Erdgasqualität und nachfolgende Einspeisung dar. Die Kombination von Biogasanlagen mit sogenannten Power-to-Gas-Konzepten stellt ebenso eine Erweiterung der Flexibilitätsoptionen dar (Abb. 3).

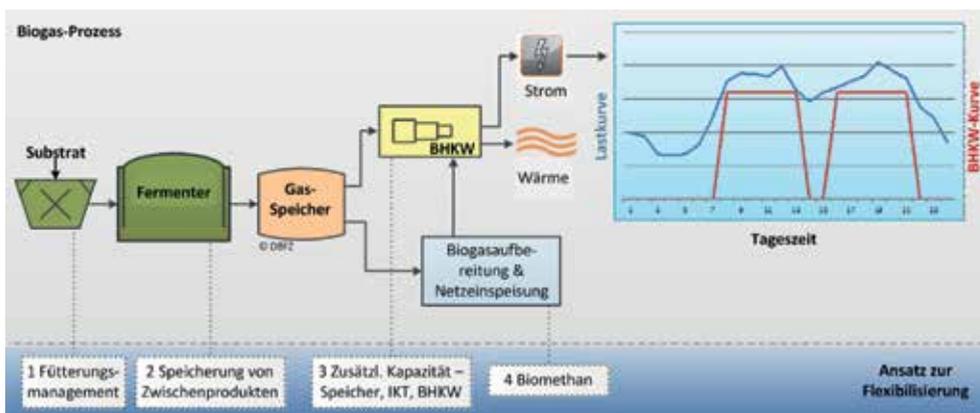


Abb. 3: Optionen für die Flexibilisierung von Biogasanlagen (Trommler et al. 2013)

Das verfügbare Gasspeichervolumen begrenzt die Dauer und Amplitude von Schwankungen in der Gasverwertung. Unregelmäßige und kurzfristige Änderungen sind im Betrieb anspruchsvoller in der Umsetzung als regelmäßige und langfristig planbare Schwankungen, da zyklische Fahrpläne an die Speicherkapazitäten einmalig angepasst werden können. Täglich wechselnde Fahrpläne setzen dagegen eine entsprechende Regeltechnik auf der Anlage voraus.

3 Stand der Technik

Landwirtschaftliche Biogasanlagen in Deutschland basieren überwiegend auf dem Prinzip des kontinuierlichen volldurchmischten Rührkesselfermenters (englisch: CSTR) und sind für einen gleichmäßig konstanten Energieoutput ausgelegt.

Seit Ende 2014 sind etwa 7.800 Biogasanlagen mit rund 4.500 MW_{el} (basierend auf Bundesnetzagentur (BNetzA)-Daten) in Betrieb. Nach Auswertung des Deutschen Biomasseforschungszentrum (DBFZ) stieg bis Juni 2014 die installierte elektrische Leistung der Biogasanlagen im Rahmen der Marktprämie auf rund 2.052 MW_{el}; etwa 1/3 der Biogasanlagen wurde dabei flexibel betrieben.

Die entscheidende Komponente für die Flexibilisierung ist das BHKW. Für den Einsatz auf Biogasanlagen sind BHKW bisher für den konstanten Betrieb entwickelt worden. Der flexible Betrieb ist Praxis auf vielen Anlagen, stellt allerdings neue Anforderungen und hat Grenzen. Folgende Punkte sind u. a. zu berücksichtigen:

- Die Steuerungs- und Regeltechnik muss ggf. angepasst werden, ein Fernzugriff muss ermöglicht werden und die Start- und Stoppzeiten müssen an die Vorgaben angepasst werden

- Vorwärmung des BHKW für Start-Stopp-Betrieb
- Gegebenenfalls ist ein Wärmespeicher vorzusehen, um Wärmeabnehmer versorgen zu können
- Maximale Startzyklen pro Tag: 3 bis 4 (Herstellerangaben)
- Mindestlaufzeit nach Start beachten
- Anforderung an Gasqualität erhöhen sich (Kondensation bei Stillstand, relevant sind Feuchte und H₂S)
- Teillastbetrieb hat eine geringere Effizienz und höhere Emissionen
- Startverhalten älterer Aggregate muss ggf. verbessert werden
- Generell entsteht höherer Wartungsbedarf.

Die BHKW-Hersteller bieten mittlerweile Aggregate und Komponenten für den flexiblen Betrieb an, die Entwicklung in diesem Bereich dürfte in den kommenden Jahren zu weiteren Verbesserungen führen. Der BHKW-Betrieb muss auf die Verfügbarkeit von Biogas abgestimmt sein. Daher ist das verfügbare Gasspeichervolumen neben den technischen Limitierungen des BHKW die entscheidende Größe für die Grenzen der Flexibilisierung.

Unter der Annahme, dass circa 60 % des Gesamtvolumens für eine flexible Füllung nutzbar sind, konnten aus den Antworten der Umfrage des DBFZ im Jahre 2013 die in Abbildung 4 dargestellten Gasspeicherkapazitäten ermittelt werden (742 ausgewertete Antworten).

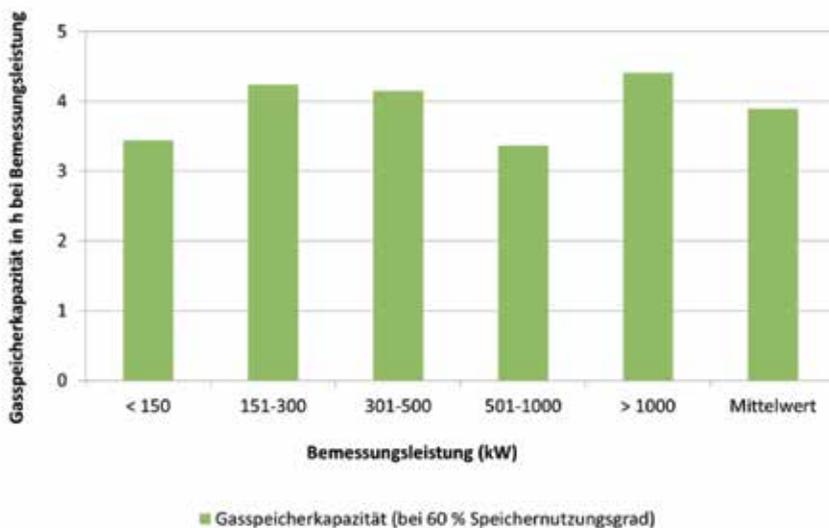


Abb. 4: Durchschnittlich verfügbare Gasspeicherkapazitäten bei Biogasanlagen

Die Anforderungen an Gasspeichersysteme sind bei einem flexiblen Anlagenbetrieb höher als bei konstanter Betriebsweise. Für den flexiblen Betrieb wird ein zuverlässiges Messsystem zur Bewertung des Gasspeicherfüllstands benötigt, welches eine ausreichende Genauigkeit und Möglichkeit zur Dokumentation aufweist. Der Gasspeicher muss innerhalb eines möglichst großen Bereichs seiner Speichkapazität flexibel nutzbar sein. Die Verbindung der einzelnen gasführenden Komponenten muss für größere Schwankungen hinsichtlich der Volumenströme ausgelegt sein; bei der Nutzung mehrerer Gasspeicher sollte eine Vereinheitlichung der Speicherstände sichergestellt werden, um Verluste zu minimieren und die gesamte Speicherkapazität zur Verfügung zu stellen. Für die Prognose von Betriebszuständen bietet sich der Einsatz einer Regelung an. Wird der Betrieb nicht den veränderten Gegebenheiten angepasst, besteht das Risiko, dass die Fahrpläne aufgrund von Gasmangel nicht realisiert werden können oder dass das Gas über die Überdrucksicherungen abgelassen wird. In beiden Fällen führt das zu wirtschaftlichen Verlusten, die im Falle des Ablassens mit der Freisetzung von Treibhausgasen verbunden sind, was unbedingt zu vermeiden ist.

Entsprechend der am DBFZ durchgeführten Umfragen werden in den kleineren Anlagenklassen vermehrt einschalige Gasspeicher eingesetzt, in den größeren Anlagenklassen dagegen vermehrt zweischalige Systeme (Abb. 5)

Aus 656 auswertbaren Antworten gaben zudem jeweils circa 1/3 der Befragten an, einen oder zwei Gasspeicher zu besitzen, 1/5 gab an, 3 Gasspeicher zu besitzen und 1/10 gab an, 4 oder mehr Gasspeicher zu besitzen.

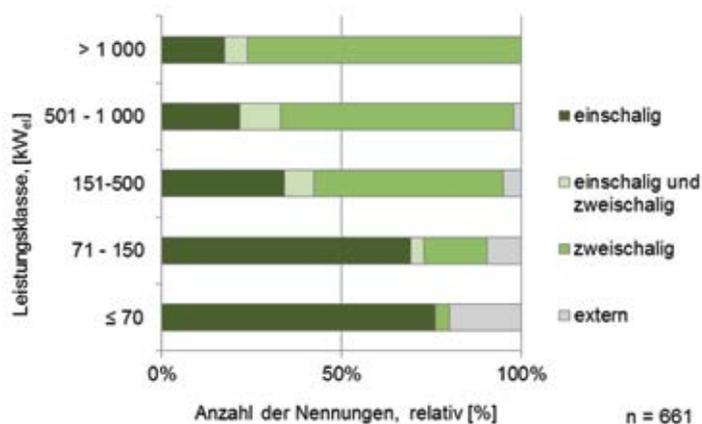


Abb. 5: Gasspeicherarten in Abhängigkeit von der installierten elektrischen Leistung (DBFZ-Betreiberbefragung 2014, Bezugsjahr 2013); vereinzelt sind Kombinationen von ein- bzw. zweischaligen mit externen Gasspeichern möglich (2 % der Befragten insgesamt), diese sind in der Abbildung entsprechend den ein- bzw. zweischaligen Gasspeichern zugeordnet (Quelle: DBFZ 2015)

Einschalige Speicherdächer, sogenannte Spannmembrangassspeicherdächer, sind mit einer dehnbaren und flexiblen Membran über den Fermenter gespannt. Je nach Füllstand hebt oder senkt sich die Folie geführt durch die Vorspannung.

Bei dem zweischaligen Aufbau werden zwei flexible, aber nicht dehnbare Folien verwendet. Hier können stützengetragene Systeme zum Einsatz kommen, die aufgrund eingeschränkten Lungenvolumens und schwer zu messenden Füllstands für den flexiblen Betrieb begrenzt geeignet sind (HÄRING et al. 2015).

Eine innere Gasspeichermembran sowie eine außenliegende Schutzmembran bilden in Kombination mit einem Stützluftgebläse das Doppelmembrangassspeicherdach. In Abbildung 6 ist der Aufbau in einer Schnittansicht dargestellt.

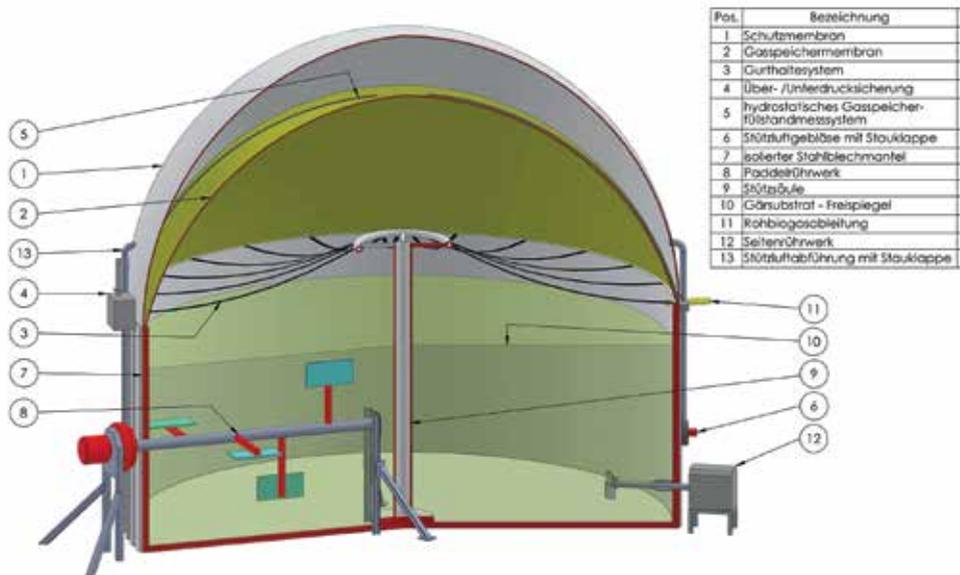


Abb. 6: Aufbau Rührkesselfermenter mit integriertem Doppelmembrangassspeicherdach (Quelle: DBFZ 2015)

Tab. 1: Gasspeicherarten und die Eignung für den flexiblen Betrieb

Einschaliges Gasspeicherdach	Zweischaliges Gasspeicherdach (Tragluftdach)	Folienkissenspeicher
+ Füllstand immer sichtbar	+ Regelung des Stützluftgebläses möglich Reduzierter Einfluss der Witterung Innendruckmessung möglich	+ Zugänglich, Überwachungs- systeme leicht zu installieren Kaum Limitierungen hinsichtlich nutzbaren Volumens Kaum Witterungseinflüsse (wenn eingehaust)
- Gasrauminnendruckmessung problematisch, großer Einfluss der Witterung, dadurch Einschrän- kung des nutzbaren Volumens Keine Regelmöglichkeiten	- Faltenbildung, undefiniertes Ausstülpen machen Füllstands- messung schwierig	- In der Praxis von untergeordneter Bedeutung
Gasspeichermanagement schwierig	Gasspeichermanagement möglich	Gasspeichermanagement möglich

Problematisch ist die präzise Füllstandsmessung bei allen hier angegebenen Speichereformen. Da die üblichen Messsysteme über die Form der Haube den Füllstand abschätzen, sind aufgrund der unregelmäßigen Wölbung teilgefüllter Gasspeicher diese Messungen hochgradig ungenau. In den Extrempunkten „fast leer“ und „fast voll“ arbeiten Seilzugverfahren oder Schlauchwaagen ausreichend zuverlässig, dazwischen ist eine präzise Bestimmung schwierig. Die Präzision von Schlauchwaagen kann durch die Installation mehrere Schläuche verbessert werden. Die Verwendung der Druckmessung im Gasspeicher zur Füllstandsbestimmung ist aufgrund geringer Änderungen und einem hohen Einfluss äußerer Gegebenheiten ebenso schwierig.

Zu aktuellen Entwicklungen und Forschung auf dem Gebiet der Gasspeicher ist festzustellen, dass am DBFZ in Kooperation mit der Firma Awite Bioenergie GmbH aktuell an der technische Verbesserung von Messsystemen für Gasspeicherfüllstände und deren Integration in Prozessleitsysteme gearbeitet wird (Entwicklung von technischen Maßnahmen zur Verbesserung des Gasmanagements von Biogasanlagen (FKZ-Nummer: 03KB094)). Die Firma Agrafarm Technologies AG hat ein Verfahren zum Betrieb von mehreren zusammengeschalteten Gasspeichern in einer Anlage patentieren lassen. Durch die Regelung von Stützluftgebläsen kann der Innendruck von Doppelmembrangasspeicherdächern bedarfsgerecht eingestellt werden. Das patentierte Verfahren ermöglicht somit eine bessere Verfügbarkeit der Gasspeicherkapazität für einen flexibilisierten Anlagenbetrieb.

3 Flexibilisierungskonzepte

Die oben genannten Anforderungen hinsichtlich der Flexibilisierung führen zu einer großen Bandbreite an Möglichkeiten hinsichtlich der technischen Umsetzung an bestehenden Vor-Ort-Verstromungsanlagen.

Prinzipiell sind folgende Stufen mit zunehmender Flexibilität denkbar, wobei eine entsprechende Überkapazität beim BHKW als gegeben vorausgesetzt wird:

- Flexibler Betrieb – BHKW ohne bauliche und mit geringen betrieblichen Veränderungen
- Erhöhung Gasspeichervolumen
- Flexibilisierung der Gasproduktion durch Fütterungsmanagement
- Alternative technische Verfahren (Speicherung von Zwischenprodukten, Hochlastfermenter, Power-to-Gas).

Für alle Varianten muss das BHKW an die geplante Betriebsweise angepasst, beziehungsweise ein neues BHKW installiert werden.

Flexibler Betrieb – BHKW ohne bauliche und geringe betriebliche Veränderungen

Ein flexibler Betrieb von Anlagen unter Beibehaltung der Gegebenheiten ist stark von dem Anlagendesign abhängig. Bei ausreichend großem Gasspeichervolumen können auf diesem Wege konstante Fahrpläne realisiert werden, die Verschiebungen der Verstromungszeiten und -mengen sind allerdings limitiert. Technische Voraussetzungen sind die Möglichkeit der Kontrolle des Gasspeicherfüllstandes und die ausreichende Dimensionierung aller gasführenden Anlagenteile hinsichtlich der resultierenden schwankenden Durchflussmengen.

Erhöhung Gasspeichervolumen

Durch die Erhöhung des Gasspeichervolumens kann die Flexibilität der Anlagen verbessert werden. Diese Maßnahme ist mit hohen Kosten verbunden und kann je nach Anlage konstruktiv schwierig umsetzbar sein. Die Abdeckung von offenen Gärrestlagern bietet sich hier als eine Möglichkeit an, die neben der Erhöhung des Gasspeichervolumens Emissionen reduziert und einen zusätzlichen Gasertrag erzielt. Es ist zu beachten, dass ab einer Menge von 10.000 kg brennbaren Gas die Störfallverordnung zu berücksichtigen ist.

Flexibilisierung der Gasproduktion durch Fütterungsmanagement

Eine Erweiterung der durch die Dimensionierung der Komponenten vorgegebenen Limitierungen lässt sich durch eine gezielte Beeinflussung der Geschwindigkeit der Gasbildung durch ein Fütterungsmanagement erreichen.

Anpassungen der Fütterungsmengen werden in vielen Anlagen aus verschiedenen Gründen bereits durchgeführt. Hier ist es oft das Ziel, eine gleichmäßige Gasproduktion zu erreichen und/oder eine Anpassung an verfügbare Substratmengen zu erreichen. Durch die Variation der Beschickung kann die Gasproduktion dem Bedarf der Verwertung so angepasst werden, dass der Bedarf an einem Zwischenspeicher für das Gas minimiert werden kann. Von MÜLLER et al. (2011) konnte in ersten Versuchen gezeigt werden, dass mittels Gasproduktion eines Laborfermenters ein Standardlastprofil (SLP) durch variable Fütterung nachgefahren werden kann. Die Wirkung unterschiedlicher Substrate auf den Verlauf der Gasbildung hängt hauptsächlich von deren Abbaueigenschaften ab. Dadurch besteht die Möglichkeit, die unterschiedlichen kinetischen Eigenschaften gezielt zu nutzen, um die maximal mögliche Dynamik des Prozesses zu realisieren. Die gezielte Variation der Substratmengen und der -zusammensetzung (Einteilung in schnell, mittel, langsam abbaubare Substrate) zur flexiblen Gasproduktion im Labormaßstab wurde von MAUKY et al. (2015) beschrieben. Dabei wurden landwirtschaftliche Substrate wie Rindergülle, Maissilage und Zuckerrübensilage eingesetzt. Es konnte ein hohes Maß an Dynamik und Stabilität im CSTR nachgewiesen werden.

Abbildung 7 zeigt den Verlauf der Gasproduktion eines Ausschnittes aus diesen Versuchen in einem Zeitraum von 4 Tagen (schwarze Linie) sowie die durchschnittliche Gasproduktion dieses Zeitraumes (grau gestrichelt), welche zu Vergleichszwecken als kontinuierliche Gasproduktion angenommen wird. Die kontinuierliche Gasproduktion wird dabei als 100 % angenommen. Diese Gasproduktion diente als Grundlage für die Berechnung des Gasspeicherbedarfes für drei Szenarien mit unterschiedlichen „Flexibilisierungsqualitäten“, nämlich 8, 12 und 16 Stunden Gasverwertung im BHKW (blau, rot, grün gepunktet) und entsprechenden 16, 12 und 8 Stunden BHKW-Auszeit. Die BHKW-Auszeit erzeugt eine entsprechende notwendige Speicherdauer. In Abbildung 7 b, c und d sind der Gasspeicherbedarf bei flexibler und kontinuierlicher Gasproduktion (gestrichelt) in Relation zueinander aufgetragen. Es zeigt sich, dass der Bedarf an Gasspeicherkapazität deutlich reduziert werden kann, wenn flexibel beschickt wird.

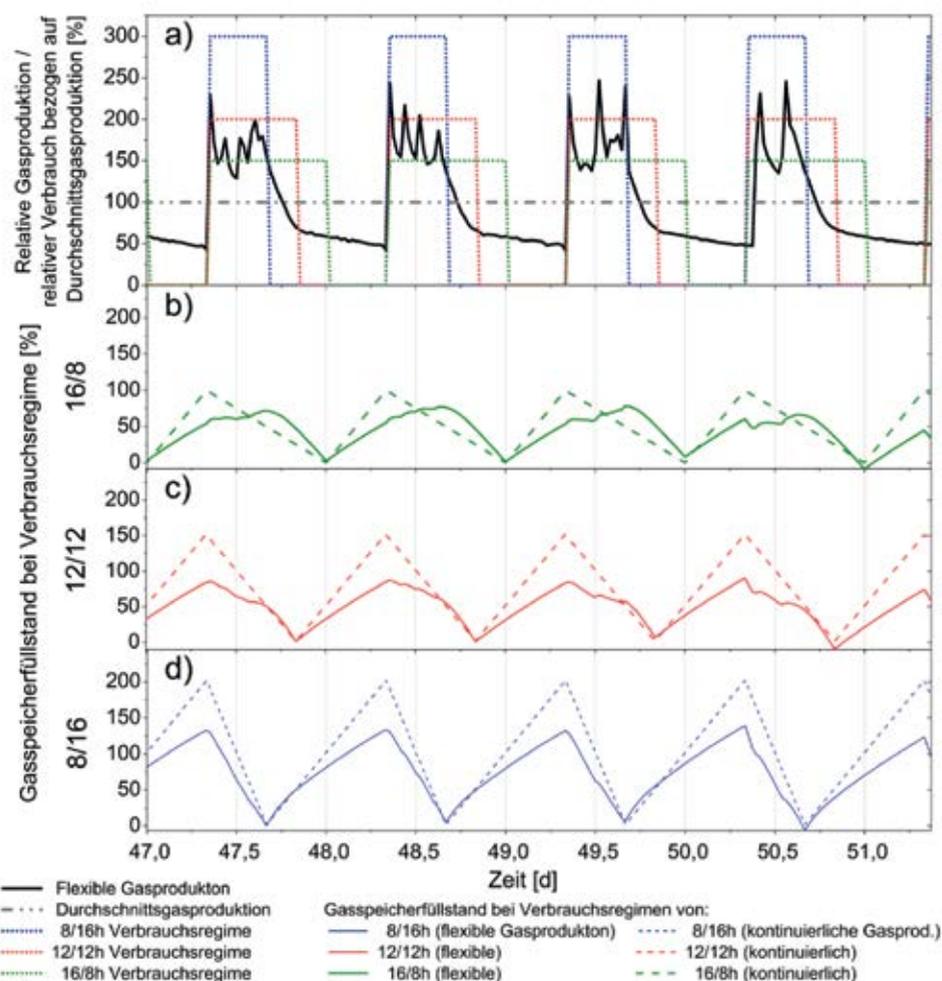


Abb. 7: Vergleich der Auswirkungen von flexibler Gasproduktion gegenüber konstanter Gasproduktion auf den Gasspeicherbedarf bei verschiedenen Gasverbrauchsprofilen im Labormaßstab (Quelle: Mauky et al. 2015)

Damit kann ein erheblich erweitertes Spektrum an Flexibilitätsoptionen angeboten werden, ohne dass zusätzliche Investitionen oder bauliche Veränderungen notwendig wären.

Um die Gasbildungsrate entsprechend des Bedarfes prognostizieren und manipulieren zu können, bedarf es einer Regelung. Dabei sollten unterschiedliche Abbaueigenschaften verschiedener Substrate in einem Modell berücksichtigt werden, um deren unterschiedliche Wirkung auf den Prozess maximal ausnutzen zu können. Eine solche Regelung wurde am DBFZ entwickelt und erfolgreich an der DBFZ-Forschungsbiogasanlage und an der Biogasanlage „Unterer Lindenhof“ der Uni Hohenheim getestet („Bedarfsgenaue

Regelung von Energie aus Biomasse“ (RegEnFlx), gefördert durch die Sächsische Aufbaubank – Förderbank –, Projektnummer 100143221) Dabei konnte ein ähnlich hohes Maß an Flexibilität wie bei MAUKY et al. (2015) bei gleichzeitig stabilem Prozess im Technikums- und Praxismaßstab nachgewiesen werden. Die Regelung beinhaltet einen Optimierungsalgorithmus, der in Abhängigkeit eines vorgegebenen Fahrplanes die optimale Fütterungsmenge sowie das Mischungsverhältnis der verfügbaren Substrate ermittelt. Insbesondere das gezielte Management des Gasspeichers trägt zu einer Verminderung der Verluste durch Abfackeln oder Abblasen potenzieller Gasüberproduktionen bei.

Regelungen zur Anpassung der Gasproduktion werden von verschiedenen Anlagenherstellern und Automatisierungsfirmen angeboten.

Alternative technische Verfahren (Speicherung von Zwischenprodukten, Hochlastfermenter, Power-to-Gas)

Eine weitere Möglichkeit stellt der Zubau von Komponenten oder gänzlich anderen Anlagenkonzepten dar. Diese Konzepte sind aufgrund des höheren technischen Aufwandes am besten an neuen Anlagen umsetzbar.

Als aktuelle Forschungsvorhaben ist hier z.B. das Projekt Procosys zu nennen (FASSAUER und SCHWARZ 2014). Hier ist das Ziel, leichtabbaubare Komponenten mittels Separation aus einer Vorhydrolyse zu gewinnen und nach Bedarf in einen bestehenden Rührkessel zu Nutzung zu geben.

Eine weitere Möglichkeit stellt das zweiphasige Batch/Festbett-Verfahren dar (z.B. Gicon-Verfahren siehe GROSSMANN und HILSE 2008). Die technische Umsetzung der Hydrolyse erfolgt beim Gicon-Verfahren in gasdichten Tunnelfermentern durch Perkolation. Die Tunnelfermenter werden diskontinuierlich mit schüttfähigen Substraten beschickt und mit Verweilzeiten zwischen 2 und 4 Wochen behandelt. Die in der Hydrolyse gebildeten organischen Säuren werden, im Perkolat gelöst, in einem Pufferspeicher gespeichert. Von dort kann das säurereiche Perkolat bedarfsgerecht einem Methanreaktor zugeführt werden. Der Festbettfermenter reagiert sehr schnell auf eine Substratzuführung und weist damit eine recht hohe Lastwechselfähigkeit auf. Durch die Trennung der Prozessschritte Hydrolyse und Methanbildung ergibt sich eine geringere Störungsanfälligkeit.

Ein anderer Ansatz wird beim ReBi-Verfahren (GANAGIN et al. 2014, HAHN et al. 2014) verfolgt. Hierbei soll die bereits in der Praxis vielfach eingesetzte zweiphasige Biogastechnologie (Hydrolyse + CSTR-Fermenter) mit einem Hochleistungsfestbettreaktor kombiniert werden und zur flexiblen Biogasproduktion dienen. In der Hydrolysestufe erfolgt die Erzeugung geeigneter Säuremuster für die nachfolgende Methanisierung. Laborversuche zu dieser Konfiguration zeigen eine hohe Lastwechselfähigkeit (GANAGIN et al. 2014). Als entscheidender Vorteil der vorgeschlagenen Konfiguration wird die Möglich-

keit einer Unterbrechung der Biogasproduktion für mehrere Tage und eines erneuten Anfahrens in wenigen Stunden genannt.

Zur Speicherung eines Energieüberangebots und dem Ausgleich von Lastschwankungen kann die Power-to-Gas-Technologie eingesetzt werden (AHERN et al. 2015). Als Power-to-Gas wird ein elektrochemischer Prozess bezeichnet, in dem mittels Wasserelektrolyse unter dem Einsatz von Überschussstrom aus erneuerbaren Energien Wasserstoff und Sauerstoff erzeugt wird. Der Wasserstoff kann dann unter Einbeziehung von Kohlendioxid zu Methan umgewandelt werden. Dabei kann die Methanisierung des in der Elektrolyse produzierten Wasserstoffs katalytisch oder mittels biologischer (mikrobieller) Methanisierung ablaufen. Bei der biologischen Art der Methanisierung wird der Wasserstoff zusammen mit Kohlenstoffdioxid zu Methan nach der gleichen Reaktionsgleichung wie bei der katalytischen Methanisierung umgewandelt, allerdings unter Nutzung von biologischen Stoffwechselprozessen. Die Verfahren zur biologischen Methanisierung befinden sich zurzeit noch im Forschungsstadium und sind bisher nur in Pilotmaßstab verfügbar.

All diese alternativen Prozesskonfigurationen implizieren einen entsprechend hohen apparativen und finanziellen Aufwand, wodurch eine Erweiterung von Bestandsanlagen erschwert wird.

4 Zusammenfassung

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass die Flexibilisierung von Biogasanlagen in einem breiten Bereich möglich ist und in der Praxis realisiert wird. Limitierungen hinsichtlich der „Qualität“ der Flexibilisierung liegen in den technischen Grenzen und der Dimensionierung der Gasverwertung und in den der Gasverwertung vorgeschalteten Anlagenkomponenten sowie den Möglichkeiten den Betrieb umzustellen. Regelungen für das Gasspeichermanagement und ein Fütterungsmanagement sind zu empfehlen, damit Optimierungen hinsichtlich Flexibilität, Betriebssicherheit und Effizienz möglich sind. Biogasanlagen können ein breites Spektrum an Leistungen zum Ausgleich von Bedarf und Produktion, aber auch zur Netzstabilisierung anbieten. Die zentralen Fragen sind, welche Produkte hier in Zukunft vom Markt abgefragt werden und wie sich in diesem Zusammenhang die Kosten- und Erlössituation für die Betreiber darstellen.

Literatur

- Ahern, E.P.; Deane, P.; Persson, T.; Ó Gallachóir, B.; Murphy, J.D. (2015): A perspective on the potential role of renewable gas in a smart energy island system. *Renew. Energy* 78, pp. 648–656
- Faßauer, B.; Schwarz, B. (2014): PROKOSYS: Prozesse, Komponenten und Systeme für den flexibilisierten Betrieb von Biogasanlagen unter Nutzung biogener Rest- und Abfallstoffe, DBFZ-Jahrestagung, Vol. 1., pp.173–177
- Ganagin, W.; Loewen, A.; Hahn, H.; Nelles, M. (2014): Flexible Biogasproduktion durch technische und prozessbiologische Verfahrensanpassung.http://www.energiesystemtechnik.iwes.fraunhofer.de/content/dam/iwes-neu/energiesystemtechnik/de/Dokumente/Veroeffentlichungen/Flexible_Biogaserzeugung_durch_technische_und_prozessbiologische_Verfahrensanpassung.pdf, Zugriff am 23.03.2015
- Großmann, J.; Hilde, H. (2008): Neue Systeme der Biogaserzeugung: Zweistufige Trocken-Nass-Vergärung mit getrennter Hydrolyse – das GICON-Verfahren. DGfZ-Schriftenreihe, Vol. 53
- Häring, G.; Sonnleitner, M.; Wiedemann, L.; Zörner, W.; Aschmann, V. (2015): Technische Anforderungen an Biogasanlagen für die flexible Stromerzeugung. www.biogas-forum-bayern.de, Zugriff am 15.5.2015
- Hahn, H.; Krautkremer, B.; Hartmann, K.; Wachendorf, M. (2014): Review of concepts for a demand-driven biogas supply for flexible power generation. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 29, pp. 383–393
- Mauky, E.; Jacobi, H. F.; Liebetrau, L.; Nelles, M. (2015): Flexible biogas production for demand-driven energy supply – Feeding strategies and types of substrates. *Bioresource Technology*, Vol. 178, pp. 262–269
- Müller, M.; Reinelt, T.; Pröter, J. (2011): Auswirkung einer flexiblen Fahrweise von Biogasanlagen zum Ausgleich von Nachfrageschwankungen. Vortrag und Tagungsband zur 20-ten Jahrestagung Biogas e.V., Nürnberg, pp. 179–185
- Trommler, M.; Barchmann, T.; Daniel-Gromke, J. (2013): Flexible Biogaskonzepte im wirtschaftlichen Vergleich, 5. Statuskonferenz des BMU-Förderprogramms „Energetische Biomassenutzung“, Leipzig, 14.11.2013
- UCTE (2004): A1 – Appendix 1: Load-Frequency Control and Performance, ENTSOE

Bedarfsorientierte Stromerzeugung – ökonomisch betrachtet

ULRICH KEYMER

1 Einleitung

Bei der bedarfsorientierten Stromerzeugung richtet der Anlagenbetreiber seinen Fokus auf die Gegebenheiten des Strommarktes. Ziel ist, Strom zu Zeiten hohen Strombedarfs und damit hoher Börsenstrompreise einzuspeisen.

Viele Bestandsanlagen könnten auf bedarfsorientierte Stromerzeugung umstellen; allerdings sind in der Regel erhebliche Erweiterungs- bzw. Umrüstinvestitionen erforderlich. Wie viel investiert werden muss, lässt sich pauschal nicht beantworten. In jedem Einzelfall ist zu prüfen, inwieweit der Einspeisepunkt, die vorhandene Anlagentechnik, der Gasspeicher und die Blockheizkraftwerke (BHKW) für einen flexiblen Anlagenbetrieb geeignet sind.

Steht eine große Ersatzbeschaffung an, ist der Zeitpunkt günstig, ernsthaft über bedarfsorientierte Stromerzeugung nachzudenken. Muss beispielsweise ein altes BHKW ausgetauscht werden, kann entweder ein modernes Aggregat ähnlicher Leistung angeschafft werden oder aber eine deutlich leistungsstärkere Maschine, die es erlaubt die gleiche Gasmenge in kürzerer Zeit zu verstromen. Nur die Differenz zwischen den Anschaffungskosten (A) dieser beiden Aggregate (einschließlich Peripherie) darf dem flexiblen Anlagenbetrieb angelastet werden.

Grundsätzlich sind zwei Varianten der Flexibilisierung einer Anlage möglich:

- Die Weiternutzung des/der vorhandenen BHKW und der Zubau eines neuen BHKW.
- Der Ersatz eines vorhandenen, abgeschrieben BHKW durch ein deutlich leistungsstärkeres, neues BHKW.

Wie viel Leistung zugebaut wird, hängt u. a. von den technischen Voraussetzungen ab. Mit zunehmender Leistung eines BHKW sinken die spezifischen Anschaffungskosten und steigt, zumindest im kleineren und mittleren Leistungssegment, der effektive Nutzungsgrad deutlich.

Gesicherte Mehrerlöse für eine Laufzeit von zehn Jahren ergeben sich aus dem Anspruch auf die Flexibilitätsprämie (FP):

$$FP = (P_{\text{inst}} - 1,1 \cdot P_{\text{Bem}}) \cdot 130 \text{ €/kW}_{\text{el}} \rightarrow \text{WENN } P_{\text{Bem}} \geq 0,2 \cdot P_{\text{inst}} \text{ UND } P_{\text{inst}} - 1,1 \cdot P_{\text{Bem}} \leq 0,5 \cdot P_{\text{inst}}$$

$$FP = 0 \rightarrow \text{WENN } P_{\text{Bem}} < 0,2 \cdot P_{\text{inst}}$$

$$FP = 0,5 \cdot P_{\text{inst}} \cdot 130 \text{ €/kW}_{\text{el}} \rightarrow \text{WENN } P_{\text{inst}} - 1,1 \cdot P_{\text{Bem}} > 0,5 \cdot P_{\text{inst}}$$

Mit zunehmendem Nutzungsgrad sinkt der Substratbedarf bei konstanter Bemesungsleistung und führt je nach Szenario zu erheblichen Substratkosteneinsparungen. Der bedarfsorientierte Anlagenbetrieb ermöglicht die Stromerzeugung bzw. -einspeisung zu Zeiten mit überdurchschnittlichen Börsenpreisen. Zusätzlich können, wenn die geplanten Betriebszeiten es zulassen, einzelne Vierstundenblöcke am Regelleistungsmarkt angeboten werden (negative Minutenreserveleistung (MRL)). Die derzeitigen Anforderungen für die Bereitstellung von Sekundärregelleistung sind bei flexiblem Betrieb nur in Ausnahmefällen zu erfüllen. Präzise vorhersagen lassen sich diese Mehrerlöse allerdings nicht. Die im Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG) festgelegte Managementprämie (die Managementprämie erhält eine Bestandsanlage für die Teilnahme an der Direktvermarktung; sie ist nicht an die bedarfsorientierte Stromerzeugung gebunden) kann der Gesetzgeber jederzeit ändern; die Zusatzerlöse am Spotmarkt oder am Regelleistungsmarkt richten sich hingegen nach Angebot und Nachfrage.

Den Mehrerlösen stehen erhebliche Kosten für die technische Ertüchtigung der Biogasanlage gegenüber. Die im Folgenden vorgestellten Kalkulationsergebnisse sollen das Potenzial der bedarfsorientierten Stromerzeugung aufzeigen. Die einzelnen Positionen, die Kosten verursachen können, und eine ausführliche Musterkalkulation sind im Anhang zusammengestellt. Die angegebenen Anschaffungskosten variieren in Abhängigkeit von der installierten (Zusatz-)Leistung. Das notwendige Gasspeichervolumen und dessen Kosten sind keine feste Größe, sondern ändern sich in Abhängigkeit von der Betriebsweise. Die kalkulierten Werte können im konkreten Fall deutlich über- aber auch unterschritten werden.

2 Flexibilisierung einer Anlage mit 190 kW_{e1}

Aus der Vielzahl der Möglichkeiten, eine Biogasanlage zu flexibilisieren, wurden drei typische Beispiele ausgewählt und in Tabelle 1 zusammengestellt.

Häufig wird neben einem vorhandenen BHKW ein zweites BHKW gestellt (ZIEL 1). Ökonomisch gesehen ist das in der Regel nicht sinnvoll. Grund dafür sind die Kosten des neuen BHKW, die in vollem Umfang der Flexibilisierung anzulasten sind. Die Höhe der Flexibilitätsprämie ist wegen des relativ geringen Leistungszubaus suboptimal. Die Weiternutzung des vorhandenen BHKW mit schlechtem Nutzungsgrad an sieben Stunden pro Tag schmälert das Substrateinsparpotenzial deutlich. Die angenommenen Betriebszeiten erlauben es der Beispielsanlage zwar am Regelleistungsmarkt teilzunehmen und damit etwas höhere Mehrerlöse zu generieren als in den anderen Beispielen, diese können aber die verminderte Substratkosteneinsparung und die geringere Flexprämie nicht ausgleichen.

Wird ein abgeschriebenes, altes BHKW ersetzt und die installierte Leistung mehr als verdoppelt (ZIEL 2), sind die Kosten der Flexibilisierung – auf den ersten Blick erstaunlicherweise – geringer als bei ZIEL 1. Da eine Ersatzbeschaffung des vorhandenen BHKW unumgänglich ist, gehen hier neben den sonstigen Kosten der Flexibilisierung (siehe Anlage) nur die Mehrkosten des leistungsstarken Aggregates auf das Konto des bedarfsorientierten Anlagenbetriebes. Durch die deutliche Überbauung steigen die Erlöse aus der Flexprämie gegenüber ZIEL 1 um knapp 4.000 €/a; die Substratkosteneinsparung erhöht sich, wegen des deutlich besseren Nutzungsgrades, um mehr als 10.000 €/a. Insgesamt reichen die beiden Positionen aus, die zusätzlichen Kosten zu decken und einen Überschuss von knapp 7.000 € zu generieren. Rechnet man die möglichen Mehrerlöse aus der Marktteilnahme dazu, liegt das Gewinnpotenzial in einer Größenordnung von 15.000 € bei einer Gesamtkapitalrendite von rund 12 Prozent (Vereinfachte Berechnung der Gesamtkapitalrendite: $GKR = (\text{Gewinn} + \text{Zinsen}) / (A/2)$).

Das Beispiel der „vorweggenommenen Ersatzbeschaffung“ (ZIEL 3) zeigt eine weitere Möglichkeit, die Chancen der bedarfsorientierten Stromerzeugung zu nutzen. Der Gesetzgeber fordert bisher lediglich, dass die technischen Voraussetzungen für einen flexiblen Anlagenbetrieb gegeben sein müssen. Kann im Probebetrieb für das erforderliche Umweltgutachten nachgewiesen werden, dass ein altes Aggregat die technischen Kriterien für die bedarfsgerechte Stromerzeugung erfüllt, geht dessen installierte Leistung in die Berechnung der Flexprämie ein, auch wenn es später, wie im Beispiel unterstellt, nicht mehr zum Einsatz kommt und damit keine Kosten verursacht. Die Flexprämie steigt dadurch nochmals um rund 12.000 € gegenüber ZIEL 2. Abzüglich der um 7.000 € höheren Kosten der Flexibilisierung, bleiben unter dem Strich ein zusätzlicher Betrag von circa 5.000 €. Allerdings kann der Gesetzgeber diese Regelungslücke jederzeit schließen.

Tab. 1: Kennzahlen zur Flexibilisierung einer 190-kW_{el}-Anlage (Start-Stopp-Betrieb)

	Einheit	IST	Weiternutzung des BHKW		Ersatz des abgeschriebenen BHKW	Vorweggenommene Ersatzbeschaffung ⁶⁾	
			ZIEL 1	ZIEL 2	ZIEL 3		
Installierte Leistung	kW _{el}	190	190	250	500	190	500
Auslastung	%	95	100	100	96	–	96
Betriebszeiten	h	0–24	17–24	6–10	6–11	–	6–11
		–	–	16–24	18–22	–	18–22
Vollbenutzungsstunden	Vbh/d	22,7	7	12	9	–	9
Ø Nutzungsgrad effektiv	%	34	34	38	39	–	39
Leitungs-/Umwandlungsverluste	%	1	1	1	1	–	1
Strombedarf der Anlage insgesamt	kWh _{el}	118.260	50.701	92.833	135.467	–	135.467
Stromeinspeisung	MWh _{el}	1.561,0	478,6	1.082,4	1.561,0	–	1.561,0
Bemessungsleistung	kW _{el}	180,0	55,2	124,8	180,0	–	180,0
Zusätzliche Anschaffungskosten	€	–	394.307		351.138		400.132
Zusaterlöse aus Flexprämie	€/a	–	28.600		32.500		44.850
Substratkosten-Einsparung ¹⁾	€/a	–	14.416		25.322		25.322
Zusätzliche Festkosten	€/a	–	-49.572		-44.124		-50.272
Zusätzliche Betriebskosten	€/a	–	-14.783		-6.935		-7.822
Saldo	€/a	–	-21.339		6.763		12.079
Mögliche Mehrerlöse²⁾							
Managementprämie (ab 2015)	€/a	–	3.122		3.122		3.122
EPEX SPOT Auktionshandel	€/a	–	6.900		8.883		8.883
Vermarktung negativer MRL ³⁾	€/a	–	2.535 ⁵⁾		–		–
Abzüglich Vermarktungskosten ⁴⁾	€/a	–	-4.424		-4.358		-4.358
Saldo	€/a	–	8.133		7.647		7.647

1) Substratmix: Ø Biogasausbeute 200 Nm³/t Substrat; Methangehalt 53 %; Substratkosten frei Feststoffeintrag einschließlich anteiliger Gärrestausringung 45 €/t.

2) Den Berechnungen liegen Marktdaten von Januar bis Dezember 2014 zugrunde; bei Minutenreserveleistung ist nur der Leistungspreis angesetzt.

3) MRL: Minutenreserveleistung.

4) Die Preise für die Dienstleistungen des Vermarktungspartners sind frei verhandelbar.

5) Teilnahme am MRL-Markt, jeweils ganzjährig an 7 Wochentagen:

- 190 kW_{el} in der Zeitscheibe „Off-Peak“ (20 bis 24 Uhr).
- 250 kW_{el} in den Zeitscheiben „Rush-Hour“ (16 bis 20 Uhr) und „Off-Peak“ (20 bis 24 Uhr).

6) Das abgeschriebene BHKW ist betriebsbereit installiert, für Flexbetrieb zugelassen, wird aber nicht weiter genutzt (keine Festkosten (FK) und variable Kosten (VK)).

3 Kennzahlen zur Flexibilisierung einer 500-kW_{el}-Anlage (Start-Stopp-Betrieb)

Die ausgewählten Beispiele zur Flexibilisierung einer Anlage mit 500 kW_{el} (Tab. 2) bestätigen im Prinzip die Aussagen der vorherigen Beispielskalkulationen.

Der Zubau eines BHKW zu einem vorhandenen BHKW, das weiterhin genutzt werden soll (ZIEL 1), ist auch in dieser Leistungsklasse zumindest unter den Modellannahmen wirtschaftlich nicht empfehlenswert. Der Austausch eines alten BHKW gegen eine neues mit knapp doppelter Leistung (ZIEL 2) ist eine lohnende Alternative. Flexprämie und Substratkosteneinsparungen decken die Zusatzkosten problemlos. Das Gewinnpotenzial der Flexibilisierungsmaßnahme liegt in einer Größenordnung von rund 14.000 €. Rechnet man das Marktpotenzial hinzu, beträgt der Saldo aus Mehreinnahmen und Zusatzausgaben unter den Modellannahmen knapp 40.000 €. Die Gesamtkapitalrendite – ohne Berücksichtigung der Managementprämie – erreicht knapp 20 Prozent. Die Vorwegnahme einer Ersatzbeschaffung (ZIEL 3) verbessert das monetäre Ergebnis trotz des erheblichen Investitionsbedarfs nochmals deutlich, wenn das vorhandene BHKW die technischen Anforderungen erfüllen kann.

Tab. 2: Kennzahlen zur Flexibilisierung einer 500 kW_{el}-Anlage (Start-Stopp-Betrieb)

	Einheit	Weiternutzung des BHKW			Ersatz des abgeschriebenen BHKW ZIEL 2	Vorweggenommene Ersatzbeschaffung ⁷⁾	
		IST	ZIEL 1			ZIEL 3	
Installierte Leistung	kW _{el}	500	500	495	960	500	960
Auslastung	%	95	95	96	99	-	99
Betriebszeiten	h	0–24	8–20	8–12	8–12	-	8–12
		-	-	16–24	16–24	-	16–24
Vollbenutzungsstunden	Vbh/d	22,8	12	12	12	-	12
Ø Nutzungsgrad effektiv	%	38	38	39	40	-	40
Leistungs-/Umwandlungsverluste	%	1	1	1	1	-	1
Strombedarf der Anlage insgesamt	kWh _{el}	312.075	169.557	169.512	328.135	-	328.135
Stromeinspeisung	MWh _{el}	4.119,4	2.059,7	2.059,7	4.119,4	-	4.119,4
Bemessungsleistung	kW _{el}	475,0	237,5	237,5	475,0	-	475,0
Zusätzliche Anschaffungskosten	€	-	585.603		438.766	542.519	
Zusatzerlöse aus Flexprämie	€/a	-	61.425		56.875	94.900	
Substratkosten-Einsparung ¹⁾	€/a	-	5.979		23.318	23.318	
Zusätzliche Festkosten	€/a	-	-73.642		-55.145	-68.163	
Zusätzliche Betriebskosten	€/a	-	-24.456		-10.953	-12.843	
Saldo	€/a	-	-30.694		14.095	37.212	
Mögliche Mehrerlöse²⁾							
Managementprämie (ab 2015)	€/a	-	8.239		8.239	8.239	
EPEX SPOT Auktionshandel	€/a	-	17.902		19.160	19.160	
Vermarktung negativer MRL ³⁾	€/a	-	12.120 ⁵⁾		11.207 ⁶⁾	11.207 ⁶⁾	
Abzüglich Vermarktungskosten ⁴⁾	€/a	-	-13.197		-13.363	-13.363	
Saldo	€/a	-	25.063		25.242	25.242	

1) Substratmix: Ø Biogasausbeute 200 Nm³/t Substrat; Methangehalt 53 %; Substratkosten frei Feststoffeintrag einschließlich anteiliger Gärrestausbringung 45 €/t.

2) Den Berechnungen liegen Marktdaten von Januar bis Dezember 2014 zugrunde; bei Minutenreserveleistung ist nur der Leistungspreis angesetzt.

3) MRL: Minutenreserveleistung.

4) Die Preise für die Dienstleistungen des Vermarktungspartners (Stromhändlers) sind frei verhandelbar.

5) Teilnahme am MRL-Markt, jeweils ganzjährig an 7 Wochentagen:

- 475 kW_{el} in den Zeitscheiben „Late Morning“ (8 bis 12 Uhr), „Early Afternoon“ (12 bis 16 Uhr) und „Rush Hour“ (16 bis 20 Uhr)

- 475 kW_{el} in den Zeitscheiben „Late Morning“ (8 bis 12 Uhr), „Rush-Hour“ (16 bis 20 Uhr) und „Off-Peak“ (20 bis 24 Uhr).

6) Teilnahme am MRL-Markt, jeweils ganzjährig an 7 Wochentagen:

- 950 kW_{el} in den Zeitscheiben „Late Morning“ (8 bis 12 Uhr), „Rush-Hour“ (16 bis 20 Uhr) und „Off-Peak“ (20 bis 24 Uhr).

7) Das abgeschriebene BHKW ist betriebsbereit installiert, für Flexbetrieb zugelassen, wird aber nicht weiter genutzt (keine FK und VK).

4 Fazit

Flexibilisierte Biogasanlagen können einen wichtigen Beitrag zum Gelingen der Energiewende leisten. Gleichzeitig eröffnen sich für Anlagenbetreiber neue Einkommensoptionen, die gerade vor dem Hintergrund der im EEG 2014 neu eingeführten Höchstbemessungsleistung eine der wenigen Möglichkeiten zur Anlagenoptimierung darstellen. Die bedarfsorientierte Stromerzeugung erfordert individuelle Anpassungen jeder einzelnen Biogasanlage. Vor dem Einstieg in den flexiblen Anlagenbetrieb muss deshalb der Betreiber sowohl die zusätzlichen technischen als auch organisatorischen Anforderungen an seine Anlage prüfen und die Machbarkeit der Umstellung beurteilen. Entscheidend für den erfolgreichen Einstieg in einen flexiblen Betrieb sind auf der einen Seite die erforderlichen Umrüstkosten und auf der anderen Seite die gewählte zukünftige Auslegung der Anlage, die das Erlöspotenzial bestimmt. Ein weiterer zu berücksichtigender Faktor ist der Wärmeabsatz der Anlage. Eine vollständige Betrachtung von Wärme Konzepten und Redundanzsystemen hätte den Umfang dieses Papiers bei Weitem überstiegen, sollte aber bei den Überlegungen in der Praxis einbezogen werden. Sehr große Anlagen sollten prüfen, ob die bedarfsorientierte Stromerzeugung mit einer reduzierten Bemessungsleistung – insbesondere bei hohen Substratpreisen – das Betriebsergebnis verbessert.

Die ökonomischen Berechnungen legen nahe, dass die in der Praxis sehr häufig umgesetzte Flexibilisierung durch Hinzustellen eines Motors in der gleichen Größe des Ausgangsmotors nicht die ökonomisch beste Lösung ist. Vielmehr zeigt sich, dass es sinnvoll ist, deutlich größere Leistungen bereitzustellen, also die Anlage mehrfach zu „überbauen“. Durch die Nutzung größerer Aggregate ergeben sich nicht nur Einsparungen bei den Kosten (Degression der spezifischen Anschaffungskosten, Einsparung Substratkosten), sondern auch höhere Erlöspotenziale (Flexprämie, Börsenerlöse).

Anlagenbetreiber sollten also bei der betriebsindividuellen Prüfung des Einstiegs in den flexiblen Anlagenbetrieb auch mutigere Konzepte in Erwägung ziehen.

Literatur

- Aschmann, V; Keymer, U.; Rauh, S.; Binder, S.; Schwertner, S. (2015): Direktvermarktung III – Bedarfsorientierte Stromerzeugung. In: Biogas Forum Bayern Nr. V – 22/2015, Hrsg. ALB Bayern e.V.
http://www.biogas-forum-bayern.de/publikationen/Direktvermarktung_III_Bedarfsorientierte_Stromerzeugung.pdf, Zugriff am 01.05.2015
- ASUE – Arbeitsgemeinschaft für sparsamen und umweltfreundlichen Energieverbrauch e.V. (2014): BHKW-Kenndaten 2014/2015, Essen

Anhang

Flexibilisierung einer Anlage mit 500 kW_{el} (Annahmen: BHKW ist abgeschrieben und wird durch ein neues, leistungsstärkeres BHKW ersetzt; Start-Stopp-Betrieb)

Bezeichnung	Einheit	IST	ZIEL
Installierte Leistung	kW _{el}	500	960
Auslastung	%	95,0	99
Vollbenutzungsstunden	Vbh/d	22,80	12
Vollbenutzung	Vbh/a	8.322	4.380
Ø Nutzungsgrad effektiv	%	38,0	40,0
Leitungs- und Transformationsverluste	%	1,00	1,00
Strombedarf Anlage	%	5,00	5,00
Strombedarf BHKW + Kühlung	%	2,50	2,50
Ø Leistungsaufnahme Motorheizung	kW _{el}	–	4,0
Heizwert (Hi)	kWh _{bto}	10.950.000	10.402.500
Stromerzeugung	kWh _{el}	4.161.000	4.161.000
Leitungs-/Transformationsverluste	kWh _{el}	41.610	41.610
Kontinuierlicher Strombedarf	kWh _{el}	208.050	208.050
davon maximal aus Eigenstrom zu decken	kWh _{el}	197.648	104.025
Strombedarf BHKW + Kühler (Eigenstrom möglich)	kWh _{el}	104.025	104.025
Vorwärmung (Fremdstrom)	kWh _{el}	0	16.060
Unvermeidlicher Fremdstromanteil	kWh _{el}	10.403	120.085
Maximal möglicher Eigenstromanteil	kWh _{el}	301.673	208.050
Strombedarf der Anlage insgesamt	kWh _{el}	312.075	328.135
davon aus eigener Stromerzeugung	kWh _{el}	0	0
Stromeinspeisung	kWh _{el}	4.119.390	4.119.390
Bemessungsleistung	kW _{el}	475,0	475,0

Zusätzliche Anschaffungskosten (Schätzung) – durch Flexibilisierung verursacht

Bezeichnung	Einheit	IST	ZIEL
Motorvorwärmung	€	-	9.300
BHKW (einschl. Transport, Aufstellen, Abnahme) ¹⁾	€	-316.376	501.417
BHKW-Anschaffungskosten	€	-	194.341
Verstärkung Netzanschluss	€	-	60.164
Steuereinrichtung (Pauschale 4.000 €/BHKW)	€	-	4.000
Zusätzlicher Stellflächenbedarf ²⁾ (77 m ² à 200 €/m ²)	€	-	15.321
Erweiterung Gasleitungen (25 €/kW _{el} Zusatzleistung)	€	-	11.490
Mess-, Steuerungs-, Regelungstechnik (MSR)-Gasspeicher bei Gasspeicher berücksichtigt	€	-	0
Anpassung Gaskühlstrecke ... (50 €/kW _{el} Zusatzleistung)	€	-	22.980
Erweiterung Notkühler ³⁾	€	-	13.633
Planungen ³⁾ (Erweiterung, Sicherheit, Notfallplan ...)	€	-	11.550
Genehmigungen ³⁾ , Umweltgutachten	€	-	11.706
Gaslagererweiterung ⁴⁾ – Zubau externer Speicher	€	-	93.582
Sonstige Anschaffungskosten	€	-	244.425
Summe der zusätzlichen Anschaffungskosten	€	-	438.766

¹⁾ Ersatzbeschaffung eines BHKW mit 500 kW_{el} entfällt (-316.376 €); Mehrkosten der Beschaffung eine BHKW mit 960 kW_{el} (501.417 – 316.376 € = 185.041 €).

²⁾ Stellflächenbedarf variiert in Abhängigkeit von der Leistung.

³⁾ Werte variieren in Abhängigkeit von der Leistung.

⁴⁾ Annahme: Vorhandenes Gaslager (1,5 m³/kW_{el} installierte Leistung) kann weiter genutzt werden; darüber hinausgehendes Speichervolumen muss zugebaut werden; Umrechnungsfaktor Normgas – reales Gas: 1,4.

Zusätzliche Festkosten – durch Flexibilisierung verursacht

Bezeichnung	Einheit	IST	ZIEL
BHKW ¹⁾ , 2), 3), 4)	€/a	-	24.487
Verstärkung Netzanschluss ¹⁾ , 3), 4)	€/a	-	7.581
Steuereinrichtung ¹⁾ , 3), 4)	€/a	-	504
Stellfläche BHKW ¹⁾ , 3), 4)	€/a	-	1.930
Gasleitungen, MSR-Gasspeicher ¹⁾ , 3), 4)	€/a	-	1.448
Gaskühlstrecke, Notkühler ... ¹⁾ , 3), 4)	€/a	-	4.613
Planungskosten ¹⁾ , 3)	€/a	-	1.386
Genehmigungen und Gutachten ¹⁾ , 3)	€/a	-	1.405
Gaslagererweiterung ¹⁾ , 3), 4)	€/a	-	11.791
Sonstige Festkosten	€/a	-	30.658
Summe der zusätzlichen Festkosten	€/a	-	55.145

¹⁾ Nutzungsdauer (Restlaufzeit der EEG-Vergütung bzw. Flexprämie): 10 Jahre.

²⁾ Vereinfachende Annahme: Auch ein kleineres BHKW im Dauerbetrieb hat eine Nutzungsdauer von 10 Jahren.

³⁾ Zins(an)satz 4 % v. A./2.

⁴⁾ Versicherungen 0,60 % v. A.

Zusätzliche Betriebs-/Instandhaltungskosten – durch Flexibilisierung verursacht

Bezeichnung	Einheit	IST	ZIEL
BHKW ¹⁾	€/a	-50.790	52.964
Stromkosten (23 ct/kWh _{el})	€/a	-71.777	75.471
BHKW	€/a	-	5.868
Steuereinrichtung (5 % v. A.)	€/a	-	200
Stellfläche BHKW (1 % v. A.)	€/a	-	153
Gasleitungen (2 % v. A.)	€/a	-	230
Gaskühlstrecke (5 % v. A.)	€/a	-	1.149
Notkühler (2 % v. A.)	€/a	-	273
Gaslagererweiterung (2 % v. A.)	€/a	-	1.872
Gaslager-Stromkosten-Gebläse (0,6 kW _{el} · 8.760 h)	€/a	-	1.209
Sonstige Betriebs-/Instandhaltungskosten	€/a	-	5.085
Summe zusätzliche Betriebs-/Instandhaltungskosten	€/a	-	10.953

¹⁾ BHKW-Instandhaltungsverträge nach ASUE 2014; im Ziel um 25 % erhöht wegen Intervallbetrieb.

Bewertung der Emissionssituation von Biogasanlagen

JAQUELINE DANIEL-GROMKE, TORSTEN REINELT, JAN LIEBETRAU

1 Hintergrund

Die Produktion von Biogas aus nachwachsenden Rohstoffen und organischen Abfällen und Reststoffen hat in Deutschland in den vergangenen Jahren vor allem aufgrund förderpolitischer Maßnahmen einen deutlichen Aufschwung erfahren. Derzeit werden in Deutschland mehr als 8.000 Biogasanlagen betrieben. Etwa 1/3 der Strombereitstellung aus erneuerbaren Energien wird derzeit aus Biomasse bereitgestellt – davon entfallen etwa 75 % auf Biogas. Vor dem Hintergrund der geänderten gesetzlichen Rahmenbedingungen (Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG) 2012 und 2014) ist davon auszugehen, dass der Leistungszubau im Biogasbereich überwiegend von Anlagenerweiterungen und Umstellungen auf den flexiblen Anlagenbetrieb bestimmt sein wird. Der Neubau von Biogasanlagen wird sich auf die Errichtung von Güllekleinstanlagen ($< 75 \text{ kW}_{\text{el}}$) und Anlagen zur Bioabfallvergärung beschränken (SCHEFTELOWITZ et al. 2014). Zum großen Teil wurden in den letzten vier Jahren Bestandsanlagen hinsichtlich der installierten Anlagenleistung erweitert. Zunehmend von Bedeutung ist daher die Optimierung der Bestandsanlagen. Der optimierte Betrieb von Biogasanlagen umfasst auch die Minderung der Anlagenemissionen, die neben der Verbesserung der Treibhausgasbilanz auch energetisch und somit wirtschaftlich für den Anlagenbetreiber von Bedeutung sein könnte.

2 Emissionen an Biogasanlagen

Im Rahmen verschiedener Forschungsvorhaben am Deutschen Biomasseforschungszentrum (DBFZ) wurde die Erfassung klimarelevanter Emissionen an Biogasanlagen untersucht (u. a. LIEBETRAU et al. 2011, LIEBETRAU et al. 2012, WESTERKAMP et al. 2014). Dabei wurden sowohl landwirtschaftliche Biogasanlagen als auch Anlagen zur Vergärung von Bioabfällen betrachtet. Die Ergebnisse der Emissionsmessungen erlauben eine ökologische Bewertung der untersuchten Biogasanlagen. Zudem können anhand der identifizierten Emissionsquellen effektive Minderungsmaßnahmen abgeleitet werden.

2.1 Emissionsmessungen an Biogasanlagen

Derzeit werden die Treibhausgasemissionen von Biogasanlagen durch zwei Messmethoden quantifiziert. Die erste Variante nutzt ein bildgebendes Gasvisualisierungssystem zur Leckagesuche an der Anlagentechnik. Die Quantifizierung erfolgt durch künstliche Einhausung der Emissionsquellen. Die Einzelquellen werden zur Gesamtemission der Anlage aufsummiert. Typisch sind u. a. Undichtigkeiten an den Foliendächern, Überdrucksicherungen, nicht gasdichte Gärrestlager sowie das Blockheizkraftwerk (BHKW). Die zweite Variante nutzt ein optisches Fernmesssystem, um die Treibhausgasemissionen der gesamten Biogasanlage zu ermitteln. Dazu werden Open-Path-Messstrecken mit einem TDLAS-Lasersystem aufgebaut, die eine pfadgemittelte Gaskonzentration ermitteln, aus denen mikrometeorologische Simulationsmodelle die Quellstärke berechnen. Daher werden alle Emissionsquellen in einem Messdurchgang erfasst, auch solche, die aus Betriebsstörungen resultieren. Vor dem Hintergrund, dass die Messung diffuser Emissionsquellen eine messtechnische Herausforderung bleibt, werden am DBFZ zur Validierung der Messmethodik Emissionsmessungen durchgeführt. Insbesondere in Hinblick auf Langzeitmessungen sowie nur temporär wirksamer Emissionsquellen besteht weiterer Forschungsbedarf. Am DBFZ werden gegenwärtig Emissionsmessungen mit dem Ziel durchgeführt, beide Messmethoden zu vergleichen. Weiterführende Informationen zur Methodik der Emissionsmessungen an Biogasanlagen können diesen Veröffentlichungen entnommen werden: REINELT et al. 2013, REINELT 2014, REINELT et al. 2014.

2.2 Ergebnisse von Emissionsmessungen an Biogasanlagen

Auf Basis der Messergebnisse der Forschungsvorhaben (LIEBETRAU et al. 2011, LIEBETRAU et al. 2012) werden im Folgenden die Ergebnisse der Emissionsmessungen als Treibhausgasbilanzen vorgestellt. Die Emissionsmessungen an den ausgewählten Biogasanlagen (landwirtschaftliche Biogasanlagen und Anlagen zur Vergärung von Bioabfällen), bei denen die klimarelevanten Gase Methan, Lachgas und Ammoniak während jeweils 2 Messwochen im Jahr untersucht wurden, erfolgte durch den Projektpartner gewitra GmbH. Die Messergebnisse beruhen dabei lediglich auf punktuelle Emissionsmessungen an verschiedenen Anlagenkomponenten ausgewählter Biogasanlagen. Die Ergebnisse sollen demnach in erster Linie die emissionsrelevanten Quellen der Anlagen und Optimierungspotenziale aufzeigen.

Detailliertere Informationen zu den verwendeten Messmethoden und -verfahren sowie zu den Annahmen der Treibhausgasbilanzen (THG-Bilanzen) sind in LIEBETRAU et al. 2011, LIEBETRAU et al. 2012 sowie DANIEL-GROMKE et al. 2012 ausführlich dargestellt.

2.2.1 Landwirtschaftliche Biogasanlagen

Die Ergebnisse der Treibhausgasbilanz – ausgewiesen als Treibhausgasemissionen in g CO₂-Äquivalente (CO₂-eq) je kWh_{el} – sind in Abbildung 1 grafisch dargestellt. Abgebildet sind die Treibhausgasemissionen der betrachteten Biogasanlagenkonzepte für die jeweiligen Prozessschritte und Anlagenkomponenten.

Die bei der Stromerzeugung im BHKW anfallende und genutzte Wärmemenge kann fossile Energieträger ersetzen und somit als Wärmegutschrift angerechnet werden. Die Höhe der Wärmegutschrift richtet sich dabei nach der Höhe der Wärmemenge und der Art der fossilen Wärme, die durch die Wärmenutzung ersetzt wird. Einbezogen sind zudem Güllegutschriften, die für die vermiedenen Methanemissionen im Vergleich zur konventionellen Güllelagerung angerechnet werden.

Unter Einbeziehung dieser Gutschriften können die dargestellten klimarelevanten Anlagenemissionen zum Teil deutlich kompensiert werden. Die Aufwendungen und Gutschriften für die Bereitstellung von Strom aus Biogas werden saldiert (Summenbalken) und weisen mit -9 bis 498 g CO₂-eq/kWh_{el} aufgrund der unterschiedlichen Konzepte und Emissionen eine große Bandbreite auf.

Die Ergebnisse zeigen, dass wesentliche klimarelevante Emissionen bei der Strombereitstellung der betrachteten Biogasanlagen aus der nicht gasdicht abgedeckten Gärrestlagerung und der Gasverwertung resultieren. Die Messergebnisse der Emissionen aus den

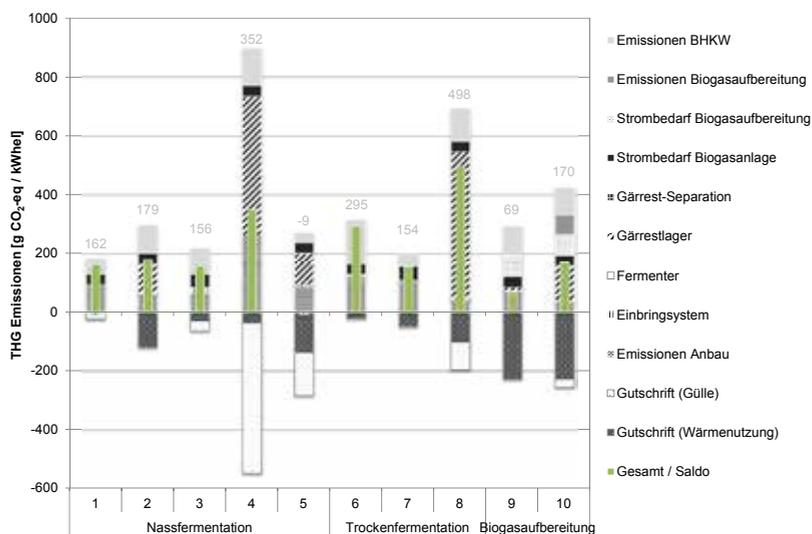


Abb. 1: THG-Bilanz der untersuchten landwirtschaftlichen Biogasanlagen zur Stromerzeugung aus Biogas in g CO₂-eq/kWh_{el} (Normalbetrieb); Anlage 3 ohne Darstellung der Gärrestlagerermissionen (Quelle: Liebetrau et al. 2011)

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.

Ferner können durch den Einsatz von Gülle zur Biogaserzeugung die bei der konventionellen Güllelagerung entstehenden THG-Emissionen vermieden werden. Diese „eingesparten“ Emissionen werden der THG-Bilanz des betrachteten Biogasprozesses gutgeschrieben (Güllelegutschrift), wenngleich hinsichtlich der Quantifizierung der Emissionen erhebliche Unsicherheiten bestehen. Anlage 4 weist vergleichsweise hohe Güllelegutschriften für die „vermiedenen Emissionen“ der Güllelagerung auf, da überwiegend Gülle und Festmist eingesetzt werden. Ebenso auffällig sind die hohen Emissionen, die auf die Gärrestlagerung (offene Lagunen) zurückzuführen sind. Die Bilanz der Anlage 8 (Batch-Betrieb) wird ebenfalls durch hohe Emissionswerte der Gärrestlagerung dominiert, da die Gärreste vor der Anlage bis zur Ausbringung zwischengelagert werden.

Bei Anlage 9 und 10 handelt es sich um Biogas-Aufbereitungsanlagen mit Druckwasserwäsche (DWW) bzw. Druckwechseladsorption (PSA), bei denen das Biogas zu Biomethan aufbereitet und in das Erdgasnetz eingespeist wird. Bei der Auswertung (Abbildung 1) wurde bezüglich der Emissionen aus der Aufbereitung der gesetzliche Grenzwert für den zulässigen Methanschlupf (2011: 0,5 %) zugrunde gelegt, da die Darstellung den Normalbetrieb (ohne Betriebsstörungen) abbilden sollte, aber bei beiden Anlagen ein höherer Methanschlupf (5,6 % (PSA) bzw. 1,5 % (DWW)) ermittelt wurde. Anzumerken ist, dass bei der PSA die nachgeschaltete Schwachgasverbrennung während der beiden Messperioden nicht funktionstüchtig war. Emissionsseitig ist der bereits einzuhaltende maximale Methanschlupf inzwischen sehr niedrig und mit der entsprechenden Technologie auch einhaltbar. Emissionsmessungen an zwei Biogas-Aufbereitungsanlagen mit dem Verfahren der Aminwäsche (REINELT et al. 2014) zeigten einen Methanverlust kleiner 0,1 % Methan.

2.2.2 Anlagen zur Vergärung von Bioabfällen

Anlagen zur Bioabfallvergärung dienen im Unterschied zu landwirtschaftlichen Biogasanlagen in erster Linie der Behandlung und Verwertung von Bioabfällen. Daher werden die THG-Emissionen in Bezug zur verwerteten Substratmenge (t Input) dargestellt.

Bei den Anlagen zur Vergärung von Bioabfällen wurden im Rahmen der Messphasen bei allen Anlagen mindestens die Probenahmestellen aller gefassten Emissionen vor und nach der Behandlung durch den Biofilter der Vergärung untersucht. In Abhängigkeit vom Anlagenkonzept wurden weitere gefasste sowie diffuse Emissionsquellen beprobt. Untersucht wurden verschiedene Vergärungsverfahren wie Nass-, Trocken- und Fest-

stoffvergärung (Batch-Betrieb). Die Ergebnisse der Emissionsmessungen an Bioabfallanlagen weisen hinsichtlich der THG-Bilanz in Abhängigkeit vom Anlagenkonzept und der Betriebsweise eine große Bandbreite auf (Abb. 2).

Bei den Anlagen zur Bioabfallvergärung fallen unzulängliche Aerobisierung bzw. schlecht durchlüftete nachgeschaltete Kompostierungsverfahren, offene Gärrestlager und fehlende saure Wäscher vor Biofiltern als wesentliche Emissionsquellen ins Gewicht.

Die Ergebnisse zeigen, dass die unzulängliche Aerobisierung der Gärreste und schlecht durchlüftete Nachrotten besonders hohe Emissionen verursachen können (Abb. 2: Anlage 1, 2, 12). Bei einigen der untersuchten Biogasanlagen sind die Emissionen der Nachrotte in den Emissionen nach Biofilter zusammengefasst (u. a. Anlage 10). Bei Anlage 7, 9 und 10 erfolgt die Nachkompostierung mit aktiver Belüftung oder in geschlossenen Kompostierungsanlagen, sodass diese Anlagen vergleichsweise geringe Gesamtemissionen aufweisen.

Anlage 6 zeigt aufgrund der Trocknung von Gärresten höhere Ammoniakemissionen, da in diesem Fall der vorhandene nachgeschaltete saure Wäscher außer Betrieb war. Insgesamt ist nur bei vier der zwölf Anlagen ein saurer Wäscher vor dem Biofilter installiert, wobei ein ordnungsgemäßer Betrieb nicht immer gewährleistet ist. Vier der sieben untersuchten Anlagen, die flüssige Gärreste oder Prozesswasser speichern, verwenden abgedeckte Gärrestlager (Anlage 4, 5, 8 und 9). Zwei Anlagen (5 und 8) sind mit gasdicht

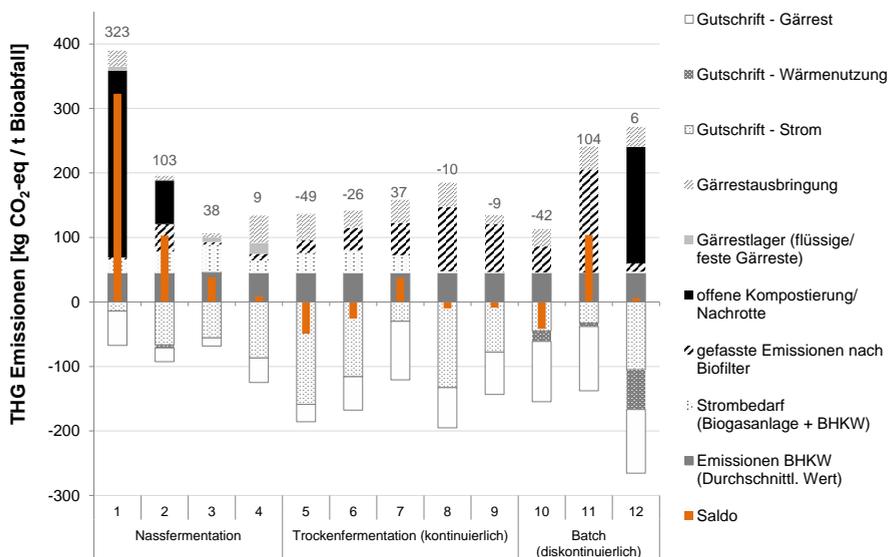


Abb. 2: THG-Bilanz der untersuchten Anlagen zur Vergärung von Bioabfällen (Quelle: Liebetrau et al. 2012)

abgedeckten Gärrestlagern ausgestattet und können das Abgas durch die Einbindung in das BHKW nutzen. Zu berücksichtigen ist, dass auch diffuse Emissionsquellen existieren, die nicht über den Biofilter erfasst werden (z. B. offene Annahmehalle bei Anlage 6 und 7; Nachrotte bei Anlage 8, 9, 11).

Die Gesamt-THG-Bilanz der Anlagenkonzepte hängt in vergleichbarem Maße einerseits von den anlagenseitigen Emissionen und andererseits von den Gutschriften für die erzeugten Produkte (Strom, Wärme, Gärreste) ab. Je nach Art der Gärreste (mit/ohne Separation; mit/ohne Nachrotte der separierten festen und flüssigen Gärreste) werden unterschiedliche Verwendungswege unterstellt. Entsprechend der Verwendung der Gärreste können unterschiedliche Treibhausgasemissionen eingespart werden, die bei der Bioabfallverwertung als Gutschriften berücksichtigt werden. Je nach Art der Gärreste (Fertigkompost, Frischkompost, flüssiger Gärrest) werden die THG-Gutschriften für die Substitution von Mineraldünger (N, P, K), Torfersatz (im Falle von Fertigkompost) und die Humusanreicherung und Humusreproduktion der Gärreste berücksichtigt. Die direkte landwirtschaftliche Verwendung der Gärreste bewirkt gegenüber der Erzeugung stabiler Komposte für Erdenwerke und Humusanreicherung geringere Gärrest-Gutschriften, vermeidet jedoch auch das Risiko hoher Emissionen bei der Gärrestnachbehandlung, v. a. bei der Kompostierung (LIEBETRAU et al. 2012, DANIEL-GROMKE et al. 2015).

2.3 Wesentliche Emissionsquellen

Die Ergebnisse zeigen, dass nicht unbedingt die Art des Vergärungsverfahrens für erhöhte Emissionen verantwortlich ist, sondern vielmehr die Betriebsweise der Anlage sowie der Umgang mit Gärrückständen (LIEBETRAU et al. 2013, DANIEL-GROMKE et al. 2015). Wesentliche Emissionsquellen liegen in der Rohgasbereitstellung bei offenen Anmischbehältern und nicht gasdicht geschlossenen Gärrestlagern sowie in der Verwertung des Biogases bzw. Biomethans im BHKW. Zudem können sich im Bereich der Foliendachkanten der Fermenter deutlich erhöhte Methankonzentrationen ergeben.

Wesentliche Emissionsquellen können auch betriebsbedingte Emissionen aus Über-/Unterdrucksicherungen (ÜUDS) sein, allerdings wurden diese bisher nur stichprobenhaft untersucht (REINELT 2014) (Abb. 3).

Dafür verantwortliche Betriebszustände liegen u. a. im Ausfall oder der Wartung der primären Gasverwertung (BHKW, Biogasaufbereitungsanlage), einem zu hohem Gasspeicherfüllstand im Normalbetrieb oder plötzlichen Wetterumschwüngen in Verbindung mit einem zu hohen Gasspeicherfüllstand (REINELT 2014).

ÜUDS sind prinzipiell als Sicherheitseinrichtung konzipiert, die unzulässige Betriebsdrücke infolge schwerer Betriebsstörungen vermeiden sollen. In der Praxis zeigt sich, dass sie z. T. aufgrund fehlerhafter Betriebsführungen zum Einsatz kommen (REINELT 2014), z. B.:



Abb. 3: Methanemissionen aus einer aktiven Überdrucksicherung an einer Biogasanlage
(Quelle: Torsten Reinelt, DBFZ)

- zum Abführen der Gasüberschussproduktion bei ungünstiger Betriebsweise (d. h. dauerhafter Betrieb der Anlage mit überfülltem Gasspeicher (Füllstand 100 %),
- als „Gasverbrauchseinrichtung“ bei Betriebsstörungen, z.B. im Falle verstärkter Schaumbildung infolgedessen die Gasleitungen blockiert sind, oder wenn keine stationäre Gasfackel (bzw. alternative Gasverbrauchseinrichtung) zur Verfügung steht bzw. diese nur manuell gestartet werden kann,
- Fehlfunktionen aufgrund ungenügender Wartung.

Methanemissionen aus ÜUDS hängen insbesondere von der Betriebsweise, der stationären Verfügbarkeit einer sekundären, automatisch startenden Gasverbrauchseinrichtung (i. d. R. Gasfackel) sowie der Wartungsintervalle ab. So zeigen erste Stichprobenuntersuchungen des DBFZ, dass im Falle eines BHKW-Ausfalls und fehlender stationärer Gasfackel erhebliche Methanemissionen über die ÜUDS auftreten können. Seit 01.01.2014 gilt daher für alle Bestandsanlagen die verpflichtende Installation einer solchen sekundären Gasverbrauchseinrichtung (EEG 2012). Aber auch bei stationärer Verfügbarkeit muss die Gasfackel sinnvoll in das Gassystem integriert und im Idealfall über den Betriebsdruck der Anlage geregelt werden. Weiterhin kann die Erfassung der ÜUDS-Auslösungen mittels explosionsgeschützter Sensoren (z. B. Temperatur-, Näherungs- und Strömungssensoren) zur besseren Detektion und Bewertung des Emissionsverhaltens von ÜUDS an Biogasanlagen beitragen. Darüber hinaus kann durch Kenntnis der Überdruckereignisse eine gezielte Optimierung der Betriebsweise durch den Anlagenbetreiber vorgenommen werden (REINELT 2014). Die Erfassung von Methanemissionen an ÜUDS ist derzeit Gegenstand eines aktuellen Emissionsmessprojektes am DBFZ (Betriebsbedingte Emissionen an Biogasanlagen (BetEmBGA), FKZ 22020313, Projektträger FNR e.V., Laufzeit 2015-2017).

3 Maßnahmen zur Emissionsminderungen und optimierten Anlagenbetrieb

Anhand der identifizierten Emissionsquellen konnten effektive Minderungsmaßnahmen abgeleitet werden, die nach DANIEL-GROMKE et al. 2012, LIEBETRAU et al. 2013, REINELT et al. 2013, DANIEL-GROMKE et al. 2015 wie folgt zusammengefasst werden:

3.1 Emissionsminderungen bei landwirtschaftlichen Anlagen

Die Reduzierung der Emissionen aus Gärrestlagern sowie die Nachbehandlung der BHKW-Abgase stellen im Fall der landwirtschaftlichen Biogasanlagen die wesentlichen Minderungsmaßnahmen dar. Die sicherste Variante ist die gasdichte Abdeckung der Gärrestlager. Weitere Optionen der Emissionsminderungen können durch Optimierung des Substratabbaus realisiert werden. Durch Verlängerung der Verweilzeiten im gasdichten System, thermophiler Betriebsweise oder/und Einsatz von Substrat-Aufschlussverfahren kann infolge des gesteigerten Substratabbaus das Emissionspotenzial der Gärreste reduziert werden. Zudem bietet die Separation der Gärreste vor offener Lagerung des festen Gärrestmaterials die Möglichkeit, Emissionen zu reduzieren, wenngleich hierzu weiterer Forschungsbedarf besteht. Die offene Lagerung von Prozesswässern bzw. flüssigen Gärrückständen ist zu vermeiden und sollte in Lagern mit gasdichten Abdeckungen erfolgen. Die Beschickung aus offenen Lagern, in denen Gülle, Gärreste und Substratmischungen verarbeitet werden, sollte auf ein Minimum reduziert werden.

3.2 Emissionsminderung bei Anlagen zur Bioabfallvergärung

Bei der Vergärung von Bioabfällen ist im Falle einer Nachbehandlung der Gärreste durch den Rotteprozess sicherzustellen, dass im Sinne der guten fachlichen Kompostierung u. a. eine intensive, schnelle und ausreichende Belüftung der Mieten gewährleistet wird. Einem Biofilter sollte generell ein saurer Wäscher vorgeschaltet werden, um Ammoniak abzuscheiden und damit die Lachgasbildung in dem Biofilter weitestgehend zu unterbinden.

3.3 Emissionsminderungen durch Wartung und optimierte Betriebsweise

Viele technische Maßnahmen zu Minderung von Methanemissionen müssen bereits während der Planung berücksichtigt werden. Neben den baulich-konstruktiven Maßnahmen (u. a. gasdichte Abdeckung von Gärrestlagern, geschlossene Substrateinbringung) und regelmäßiger Wartung der Anlagenkomponenten, dient maßgeblich ein der Technik angepasstes Betriebsregime der Emissionsminderung. Klimaschädliche Emissionen können bereits durch eine Optimierung der Betriebsweisen (z. B. optimiertes Gasmanagement) reduziert werden. So trägt das regelmäßige Kontrollieren des Füllstandes der

Überdrucksicherung nicht nur zur Anlagensicherheit bei, sondern stellt auch sicher, dass Biogas nicht ungenutzt entweicht. Das tägliche Abgehen der Anlage und die Kontrolle der Bauteile auf mögliche Undichtigkeiten ist eine weitere betriebliche Aufgabe. So sind beispielsweise Seildurchführungen der Rührwerke regelmäßig „abzuschmieren“ (abzudichten) und unzureichend abgedichtete Serviceöffnungen und Mannlöcher, die sich z. T. als große Einzelemittenten dargestellt haben, durch eine Betreiber- oder Herstellerwartung fachgerecht zu reparieren/montieren (POSTEL et al. 2012).

Der sichere und emissionsarme Anlagenbetrieb liegt in erster Linie in der Verantwortung des Betreibers. Als besonders wichtig wird erachtet (CUHLS et al. 2012):

- die intelligente Nutzung des zur Verfügung stehenden Gasspeichervolumens, d. h. Füllstand der Gasspeicher im Normalbetrieb < 50 % und Regelung der Substratzufuhr in Abhängigkeit des Gasspeicherfüllstandes,
- die Substratzuführung in mäßigen Dosen und relativ kurzen Intervallen (idealerweise ergänzt durch die Messung der TS-/oTS-Gehalte),
- die messtechnische Überwachung der ÜUDS, um dem Betreiber für die dort entstehenden diffusen Emissionen zu sensibilisieren sowie
- die Vermeidung des Ansprechens von ÜUDS während des Normalbetriebes durch sicheres Ansprechen der sekundären Gasverbrauchseinrichtung, die Biogas – im Notfall – verwerten kann, bevor es aus den ÜUDS entweicht (automatischer Betrieb der Fackel, Regelung durch Drucküberwachung im Gasspeicher).

Zur Begrenzung diffuser Methanemissionen aus der Biogasanlage empfehlen sich zudem regelmäßige Kontrollgänge des Betreibers oder einer beauftragten Person nach Leckagen im gasführenden System, d. h. aller geschlossenen Behälter sowie der gasführenden Leitungen.

Literatur

- Cuhls, C.; Mähl, B.; Otte, M.; Clemens, J.; Daniel-Gromke, J.; Reinelt, R.; Krebs, C.; Liebetrau, J. (2012): Sachverständigengutachten zur „Emissionsbegrenzung bei Biogasanlagen und Bioabfallvergärungsanlagen“, Förderkennzeichen: 363 01 424, im Auftrag des Umweltbundesamtes (unveröffentlicht)
- Daniel-Gromke, J.; Denysenko, V.; Barchmann, T.; Reinelt, T.; Trommler, M. (2014): Aufbereitung von Biogas zu Biomethan und dessen Nutzung – Status quo und Perspektiven. In: Immissionsschutz. Recht – Anlagenbetrieb und -optimierung, TK-Verlag, S. 133–149
- Daniel-Gromke, J.; Liebetrau, L.; Denysenko, V.; Krebs, C. (2015): Digestion of bio-waste – GHG emissions and mitigation potential. *Energy, Sustainability and Society* 5:3; doi:10.1186/s13705-014-0032-6

- Daniel-Gromke, J.; Oehmichen, K.; Liebetrau, J.; Krebs, C. (2012): Emissionen klimarelevanter Gase bei der Biogasgewinnung. Treihausgasbilanz der Biogasproduktion auf der Basis von Emissionsmessungen an realen Biogasanlagen. In: KRdL-Expertenforum „Biogasanlagen“. Vol. 46. KRdL-Schriftenreihe, Bonn
- Liebetrau, J.; Daniel-Gromke, J.; Oehmichen, K.; Weiland, P.; Friehe, J., Clemens, J.; Hafermann, C. (2011): Emissionsanalyse und Quantifizierung von Stoffströmen durch Biogasanlagen im Hinblick auf die ökologische Bewertung der landwirtschaftlichen Biogasgewinnung und Inventarisierung der Deutschen Landwirtschaft. FNR e.V., FKZ: 22023606
- Liebetrau, J.; Krebs, C.; Daniel-Gromke, J.; Denysenko, V.; Stinner, W.; Nebel, E.; Cuhls, C.; Mühl, B.; Reinhold, J. (2012): Analyse von Emissionen klimarelevanter Gase durch Biogasanlagen im Hinblick auf die ökologische Bewertung der Biogasgewinnung aus Abfällen. BMU, FKZ: 03KB027
- Liebetrau, J.; Reinelt, T.; Clemens, J.; Hafermann, C.; Friehe, J.; Weiland, P. (2013): Analysis of greenhouse gas emissions from 10 biogas plants within the agricultural sector. In: *Water Science and Technology* 67(6), pp. 1370–1379
- Postel, J.; Liebetrau, J.; Clemens, J.; Hafermann, C.; Weiland, P.; Friehe, J. (2010): Emissionsreduzierung von Biogasanlagen durch Anwendung des Standes der Technik. In: Internationale Bio- und Deponiegas Fachtagung „Synergien nutzen und voneinander lernen IV“, 4./5. Mai 2010
- Reinelt, T. (2014): Betriebsbedingte Methanemissionen aus Über-/Unterdrucksicherungen. *Biogas Journal* 5
- Reinelt, T.; Westerkamp, T.; Daniel-Gromke, J. (2013): Quantifizierung diffuser Emissionen an Biogasanlagen und Maßnahmen zur Emissionsminderung. In: Tagungsband 7. Rostocker Bioenergieforum, Schriftenreihe Umweltingenieurwesen der Agrar- und Umweltwissenschaftlichen Fakultät der Universität Rostock. Bd. 36. Rostock, S. 387–397
- Reinelt, T.; Westerkamp, T.; Liebetrau, J. (2014): Klimarelevante Emissionen aus Biogasanlagen mit Biogasaufbereitung und Einspeisung in das Erdgasnetz. In: Emissionsminderung 2014. Stand – Konzepte – Fortschritte. VDI Berichte 2214, Düsseldorf, VDI-Verlag GmbH, S. 203–214
- Scheffelowitz, M.; Daniel-Gromke, J.; Rensberg, N.; Denysenko, V.; Hillebrand, K.; Naumann, K.; Ziegler, D.; Witt, J.; Beil, M.; Beyrich, W. (2014): Stromerzeugung aus Biomasse. FZK 03MAP250. Zwischenbericht Juni 2014. Projekt gefördert vom Projektträger Jülich, Forschungszentrum Jülich GmbH im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie (BMWi), Leipzig
- Westerkamp, T.; Reinelt, T.; Oehmichen, K.; Ponitka, J.; Naumann, K. (2014): KlimaCH₄ – Klimateffekte von Biomethan, DBFZ Report Nr. 20, DBFZ, Leipzig

Emissionen beim flexiblen Betrieb von Biogas-BHKW

MAXIMILIAN PRAGER, BENJAMIN KORB, GEORG WACHTMEISTER

1 Einleitung

Moderne Gasmotoren spielen eine große Rolle für die dezentrale Energieversorgung der Zukunft. Sie sind gekennzeichnet durch deutlich geringere CO₂-Emissionen bezogen auf die gelieferte Strommenge im Vergleich zu kohle- oder ölbetriebenen Kraftwerken. Neben dem geringeren CO₂-Ausstoß gelten sie auch hinsichtlich der Schadstoffemissionen als umweltverträglicher, besonders in Bezug auf Partikel- und Rußemission. Weiterhin ist die Reichweite der weltweiten Erdgas-Vorräte deutlich größer als diejenige von Öl. Zusätzlich können Gasmotoren auch ganz oder teilweise durch regenerativ erzeugte Brenngase (Biogas, Power-to-Gas) betrieben werden. Als Folge werden Gasmotoren absehbar einen steigenden Beitrag zur Sicherstellung der Energieversorgung darstellen. Trotz der genannten Vorteile hat unverbranntes Methan potenziell einen großen negativen Einfluss auf die globale Erderwärmung. Das Global Warming Potential (GWP) beträgt das 21-Fache von Kohlendioxid (nach Kyoto-Protokoll). Die Rohemissionen von unverbranntem Methan (Methanschluß) sind bei derzeitigen Gasmotoren teilweise sehr hoch, womit der spezifische CO₂-Vorteil nahezu wieder aufgehoben wird. In verschiedenen Ländern werden hier absehbar neue Emissionsvorschriften erwartet, die deutlich unter den typischen Werten liegen. Vor allem Low-Tech- und Retrofit-Aggregate, die für den Gaseinsatz zweckmäßig umgerüstet wurden, stoßen dann an ihre Grenzen. Ziel ist deshalb, Motoren zu entwickeln, die innermotorisch deutlich geringere Anteile an unverbranntem Methan emittieren. Eine Abgasnachbehandlung mit Oxi-Kat oder regenerativen thermischen Oxidatoren stellt aufgrund der begrenzten Langzeitstabilität und u. a. der zusätzlichen Investitions- und Betriebskosten für stationäre Gasmotoren nur eine wenig wirtschaftliche Option dar.

Da gerade bei stationär betriebenen Gasmotoren eine Abgasnachbehandlung aufgrund der hohen System- und Wartungskosten nachteilig wäre, wird in dem Forschungsprojekt „Ursachen und Reduzierung der CH₄-Emissionen in Biogasmotoren“ angestrebt, mehr über die Quellen der unverbrannten Kohlenwasserstoffe im Brennraum zu lernen, um damit die Möglichkeit zu haben, die Primäremissionen der gesamten Kohlenwasserstoffe (THC) durch bessere Brennraum- und Betriebsbedingungen zu vermindern. Dieses Verständnis wird im Forschungsvorhaben durch systematische Untersuchungen einzelner Einflüsse entwickelt, die an einem 4,77 l Einzylinder-Versuchsmotor am Lehrstuhl für Verbrennungskraftmaschinen (LVK) der Technischen Universität München (TUM) expe-

perimentell ermittelt werden. Parallel dazu wird ein Simulationsverfahren am Institut für Technische Verbrennung (ITV) der Leibniz-Universität Hannover (LUH) entwickelt, bei dem einerseits mittels 3D-CFD und gekoppelter Reaktions- und Verbrennungsrechnung das Verständnis der THC-Quellen vertieft wird, andererseits auch ein für die Entwicklung neuer Motoren nutzbarer Ansatz zur Vorausberechnung mittels 3D-CFD-Methoden entstehen soll. Am Ende der Projektlaufzeit soll eine Bewertungsmatrix entstehen, die es der Motorenentwicklung ermöglicht, einzelne THC-Quellen hinsichtlich ihrer Signifikanz einschätzen zu können, um dies für zukünftige Motorenkonzepte zu nutzen. Außerdem soll das Berechnungsmodell zur Vorausberechnung von THC-Bildung auch in anderen Motoren einsetzbar sein.

Im Folgenden wird hauptsächlich auf die Arbeiten am LVK eingegangen und von der THC-Emission (total hydrocarbon) gesprochen, da dieser Begriff in der Motorenwelt üblich ist, obwohl bei Erd- und Biogas vor allem das unverbrannte Methan und der Formaldehyd-Ausstoß wichtig ist.

2 Ausgangssituation und Lösungsansatz

In der Literatur finden sich viele Untersuchungen unterschiedlichster Art, die sich mit den Quellen der THC-Emissionen beschäftigen. Dabei lassen sich kaum Zusammenhänge hinsichtlich der Signifikanz einzelner Quellen ableiten. Auch bleiben verschiedene Randbedingungen (unterschiedliche Brennverfahren, Motorgrößen, Brennstoffe usw.) und Zusammenhänge ungeachtet. Untersuchungen zu Methanschluß im speziellen sind

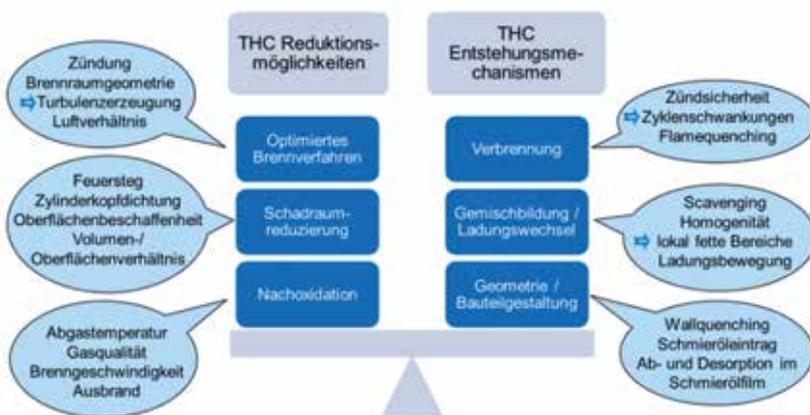


Abb. 1: Mögliche THC-Entstehungszonen und mögliche Reduktionsmaßnahmen



Abb. 2: LVK-Einzylinder-Forschungsgasmotor und Prüfstand, rechts: Aufbau optischer Brennraumzugang (Quelle: LVK)

ebenfalls kaum vorhanden, wobei davon auszugehen ist, dass Grundeffekte gleich sind. Beachtet werden muss die hohe thermische Stabilität von Methan gegenüber langkettigen Kohlenwasserstoffen. Die Bewertung einzelner Quellen fällt somit schwer. Abbildung 1 zeigt die bekannten THC-Entstehungsmechanismen und die daraus abzuleitenden Reduktionsmöglichkeiten.

Einigen der aufgeführten Möglichkeiten kann ein hoher Stellenwert aufgrund der in der Literatur gefundenen Ergebnisse zugesprochen werden. Auf diese konzentrieren sich die Untersuchungen in diesem Projekt. Dazu wird auch der Einfluss wichtiger Motorparameter (Verbrennungsluftverhältnis, Medientemperaturen usw.) untersucht. Die einzelnen Reduktionsmöglichkeiten werden experimentell und mittels Simulationsansatz analysiert.

3 Experimentelle Untersuchungen am LVK

Der LVK-Forschungsgasmotor (Abb. 2 und Tab. 1) ist modular einsetzbar mit verschiedenen Zündsystemen, Nockenwellen und einer Gasmischstation zur Darstellung verschiedener Gaszusammensetzungen. Im laufenden Projekt wurde der Versuchsmotor mit einer optischen Zugänglichkeit durch den Kolben versehen, um die Verbrennung mittels Hochgeschwindigkeitskamera beobachten und damit Verbrennungsmodelle validieren zu können.

Das Magergasbrennverfahren reagiert stark auf äußere Einflüsse, da z. B. die Ladungstemperatur den Zündverzug und damit den Verbrennungsschwerpunkt stark beeinflusst. Weitere Einflüsse sind die Gasbeschaffenheit und Luftfeuchte. Die Gasbeschaffenheit wird mittels Gaschromatografie während der Prüfläufe erfasst und zur Berechnung des

aktuellen Mindestluftbedarfs und des Heizwertes herangezogen. Es zeigte sich, dass der Einfluss der sich ändernden Gasbeschaffenheit des Erdgases und damit des Brenngases beachtet werden muss.

Tab. 1: Kenndaten des LVK-Einzylinder-Forschungsgasmotors

Kenndaten des LVK-Einzylindergasmotors			
Bohrung	170 mm	Massenausgleich	1. und 2. Ordnung (Lancaster)
Hub	210 mm	Zündsystem	Woodward IC922 (360 mJ / 30++kV) / Zündstrahl/LVK-Multisparc
Hubvolumen	4,77 l	Luftversorgung	Schraubenkompressoren (6 bar abs. / 8 bar abs.)
Spitzendruck	300 bar	Abgasmesstechnik	Anysco FT-IR/O ₂ -Analystor/FID
Epsilon (anpassbar)	12,7	Turboladeremulation	Abgasdrosselklappe und Turboladerwirkungsgadregelung
Ventiltrieb	4 Ventile/ 2 Nockenwellen	Drehzahl	maximal 2.000 1/min
Variable Steuerzeiten	Miller/ Atkinson	Variable Gasgemische	Propan, CO ₂ , H ₂ , N ₂ in Erdgas (Analyse mit Gaschromatograf)

3.1 Grundlegendes zu den Untersuchungen

Bei den Untersuchungen, die im Folgenden beschrieben werden, wird ein Parameter verändert und dabei ein Kennfeld vermessen, bei dem das Verbrennungsluftverhältnis (λ) und der Verbrennungsschwerpunkt (EU50 %) variiert werden. Alle weiteren Größen werden bei der Kennfeldvermessung konstant gehalten. Diese beiden Größen beeinflussen das Betriebsverhalten, Emissionen und Wirkungsgrad des Magergasmotors neben den o. g. Einflussgrößen am meisten. Der große Vorteil der Kennfelder liegt im zusätzlichen Erkenntnisgewinn gegenüber Messungen, die hinsichtlich einer konstant gehaltenen Größe (Verbrennungsschwerpunkt, λ oder NO_x) gemessen werden. Dabei werden auch die λ - und verbrennungsschwerpunktabhängigen Betriebsgrenzen sowie das Verhalten z. B. auf unterschiedlichen NO_x-Niveaus ersichtlich. Die Kennfelder können hinsichtlich verschiedener Zielgrößen (Wirkungsgrad, THC usw.) bei konstanten Kenngrößen (NO_x, λ , EU50 % usw.) interpoliert werden, um Kennlinien zu gewinnen, die eine kompakte Darstellung ermöglichen. Für die Vorstellung der Ergebnisse und für die Bewertung des Reduktionspotenzials der THC-Emissionen werden die Kennfelder der Zielgrößen bei konstanten NO_x-Emissionen interpoliert, da diese gesetzlich reglementiert sind und bei dieser Motorenklasse in aller Regel durch innermotorische Maßnahmen eingehalten werden. Da diese Klasse von Motoren im Allgemeinen über eine Aufladung verfügt, wird der Turbolader durch eine Abgasdrossel am Prüfstand emuliert. Dabei wird über die Turboladerhauptgleichung (Funktion von Ladedruck und Abgastemperatur) ein Abgasgegendruck für einen konstanten Turboladerwirkungsgrad berechnet

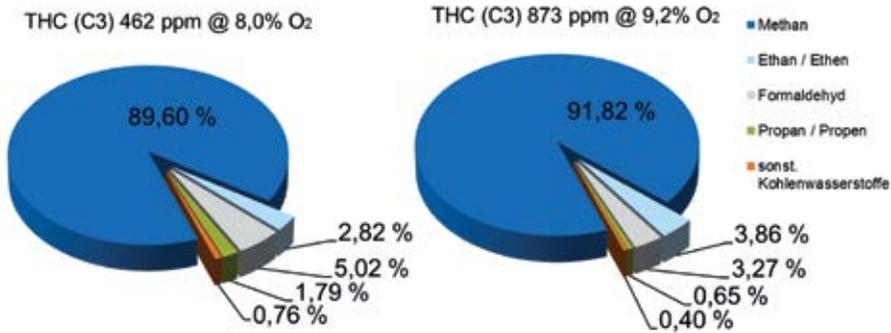


Abb. 3: Aufteilung der THC-Rohemission in die einzelnen Spezies, beispielhaft an zwei Betriebspunkten des Versuchsmotors, Unterschied bei Lambda 0,15 (1,7 zu 1,85)

und über die Drossel eingeregelt. Die Abgasemissionen werden mittels FT-IR gemessen, welches die einzelnen Spezies der Kohlenwasserstoffe darstellen kann. Die Aufteilung bei verschiedenen Verbrennungsluftverhältnissen ist in Abbildung 3 dargestellt. Dabei ist der Hauptanteil Methan, wobei es sich um schlupfenden Brennstoff handelt. Einen relativ großen Anteil hat Formaldehyd, welches durch abgebrochene Verbrennungsreaktionen z. B. durch Ablöschen der Flamme an den Brennraumwänden entsteht.

3.2 Gaseinfluss

Biogase variieren je nach Gärsubstrat und Fermentertechnik in ihrer Zusammensetzung. Gemäß der Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR) werden zwei verschiedene Biogasbeschaffenheiten referenziert, welche bei den motorischen Untersuchungen vereinfacht durch Erdgas aus dem städtischen Netz und Zumischung von CO₂ dargestellt werden (Abb. 4).

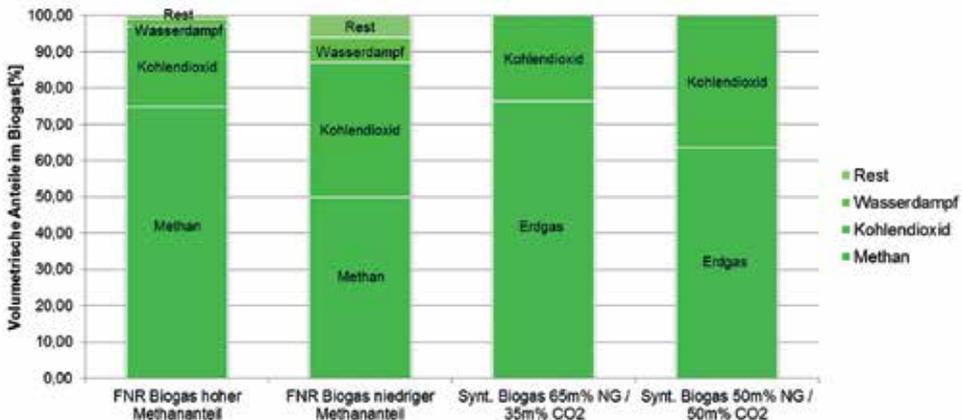


Abb. 4: Gaszusammensetzung untersuchter Betriebspunkte

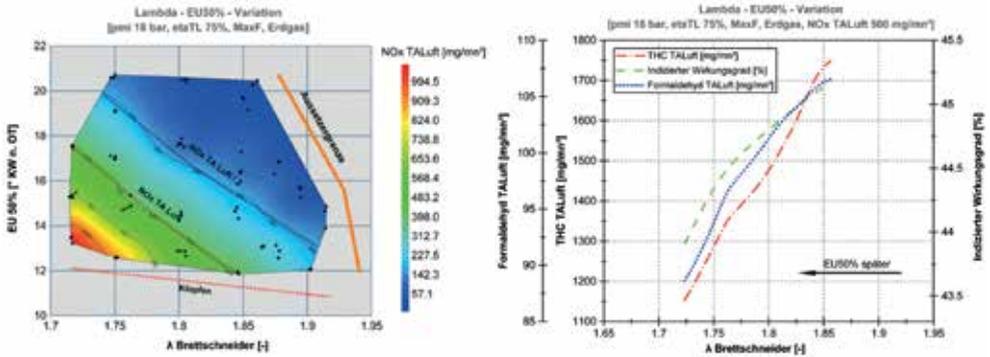


Abb. 5: Vergleich der Betriebsfenster des Forschungsmotors bei Betrieb mit Erdgas sowie die THC- und HCHO-Emissionen beim jeweils wirkungsgradoptimalen Betriebspunkt über Lambda

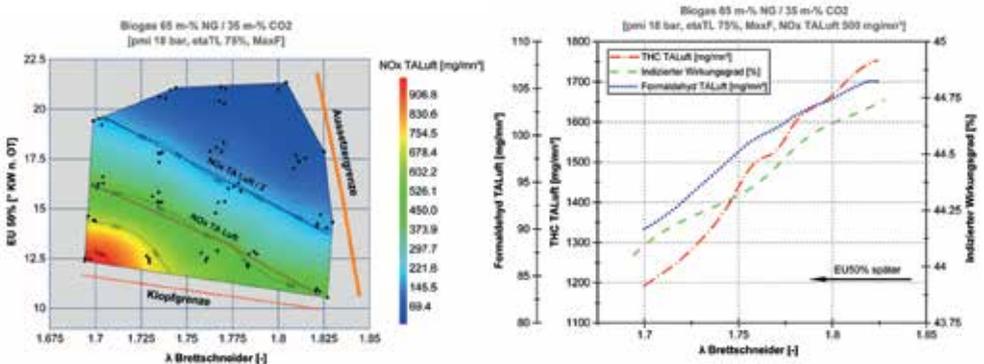


Abb. 6: Vergleich der Betriebsfenster des Forschungsmotors bei Betrieb mit Biogas1 (65 m-% EG/35 m-% CO₂) sowie die THC- und HCHO-Emissionen beim jeweils wirkungsgradoptimalen Betriebspunkt über Lambda

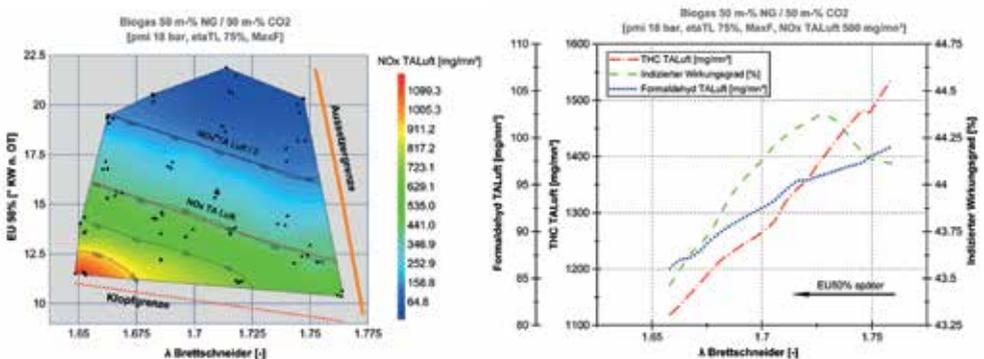


Abb. 7: Vergleich der Betriebsfenster des Forschungsmotors bei Betrieb mit Biogas2 (50 m-% EG/50 m-% CO₂) sowie die THC- und HCHO-Emissionen beim jeweils wirkungsgradoptimalen Betriebspunkt über Lambda

Beim Vergleich der Betriebsfelder des Motors erkennt man, dass mit steigendem CO_2 -Anteil die Klopfempfindlichkeit sinkt und frühere Verbrennungsschwerpunkte möglich werden (Abb. 5, Abb. 6 und Abb. 7). Insgesamt können am Motor wirkungsgradgünstige Verbrennungsschwerpunktlagen bei gleichen NO_x -Emissionen eingestellt werden. Die Aussetzergrenze wandert aber bei zunehmendem CO_2 -Anteil in Richtung fetterer Gemische. Die durch den steigenden CO_2 -Anteil eigentlich langsamere Verbrennung wird durch das geringere Verbrennungsluftverhältnis kompensiert, da dies die Brenngeschwindigkeit erhöht. Die Emissionen von THC und Formaldehyd sind bei Verbrennung der verschiedenen Brenngasen Erdgas, Biogas1 und Biogas2 auf vergleichbarem Niveau. Werden die Emissionen bei gleichem Verbrennungsluftverhältnis gegenübergestellt, sind die THC- und HCHO-Emissionen mit steigendem CO_2 -Anteil erhöht und der Wirkungsgrad sinkt.

Bei Biogas sinkt der Wirkungsgrad des Motors gegenüber Erdgas vor allem durch den niedrigeren thermodynamischen Wirkungsgrad. Weder THC noch Formaldehyd steigen bei gleichen NO_x -Emissionen. Dabei bleibt das Niveau konstant bzw. sinkt sogar, da fettere Verbrennungsluftverhältnisse darstellbar sind.

3.3 Steuerzeiten (Miller/Standard)

Sogenannte Miller-Steuerzeiten (Abb. 8) werden bei Verbrennungsmotoren eingesetzt, um eine geringere Verbrennungstemperatur des Gemisches zu erreichen, was innermotorisch reduzierte NO_x -Emissionen ermöglicht. Dabei wird die Öffnungsdauer des Einlassventils reduziert, sodass für die gleiche Leistung mit höheren Ladedrücken die geringere Einströmzeit kompensiert werden muss.

Bei der Miller-Steuerzeit schließen die Einlassventile deutlich vor dem unteren Totpunkt, wodurch das Gas im Brennraum expandiert und abgekühlt wird. Die dadurch deutlich niedrigeren Ladungstemperaturen verschieben den Betriebsbereich in Richtung kleinere Verbrennungsluftverhältnisse (Abb. 9). Durch das fettere Gemisch und daher heißeren Verbrennung in der Flammenfront liegt der Verbrennungsschwerpunkt etwas später, um die NO_x -Emissionen konstant zu halten. Das gesamte Temperaturniveau liegt niedriger, was die Wandwärmeverluste reduziert. Ein interessanter Aspekt sind die gegenüber der MaxF-Nockenwelle (maximale Zylinderfüllung) möglichen früheren Verbrennungsschwerpunkte, die trotz fetterem Gemisch noch außerhalb des Klopfbereichs liegen. Dies lässt sich durch das niedrigere Temperaturniveau in der unverbrannten Zone erklären, die den Zündverzug stark erhöht und damit die Klopfgefahr dort senkt. Außerdem sinken die Bauteiltemperaturen mit der Ladungstemperatur ab, was die Gefahr der Bildung von Klopfnestern mindert.

Wird das Brennverfahren für beide Nockenwellen hinsichtlich konstanter NO_x -Emissionen bei TA-Luft-Niveau verglichen, zeigt die Miller-Nockenwelle durchgehend höhere

Wirkungsgrade (Abb. 10). Das Verhalten bzgl. der THC-Emission ist jedoch sehr ähnlich. Dies bedeutet je nach Fokus der Applikation, dass sich ohne Wirkungsgradverlust durch die Miller-Steuerzeiten deutliche THC-Reduktionsmöglichkeiten ergeben.

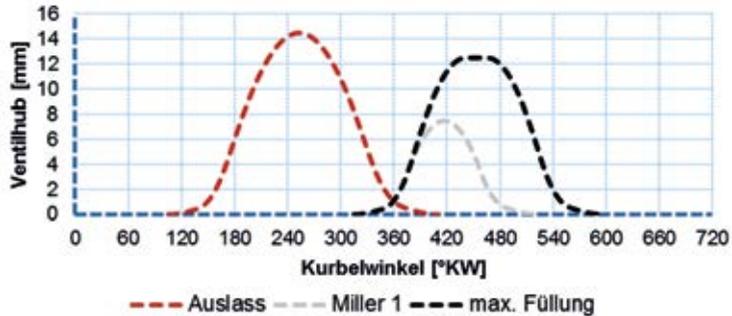


Abb. 8: Ventilhubkurven für Miller (Miller1) und Standardsteuerzeiten (MaxF)

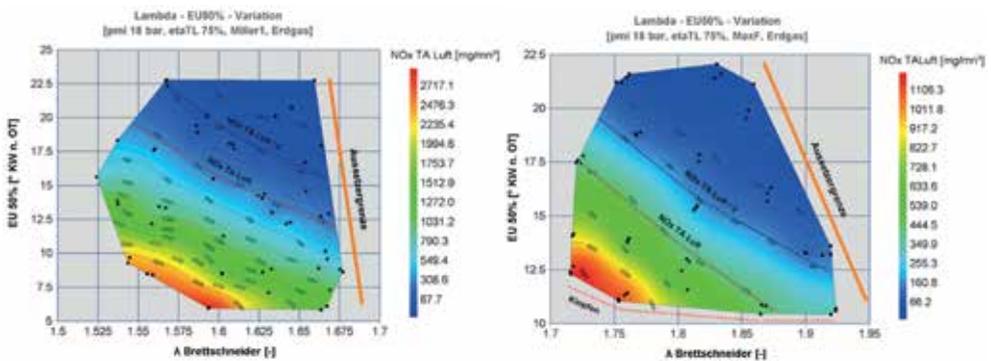


Abb. 9: Betriebsbereiche Miller1 (links) und MaxF (rechts) Nockenwellen über Lambda und Verbrennungsschwerpunkt, Kraftstoff Erdgas

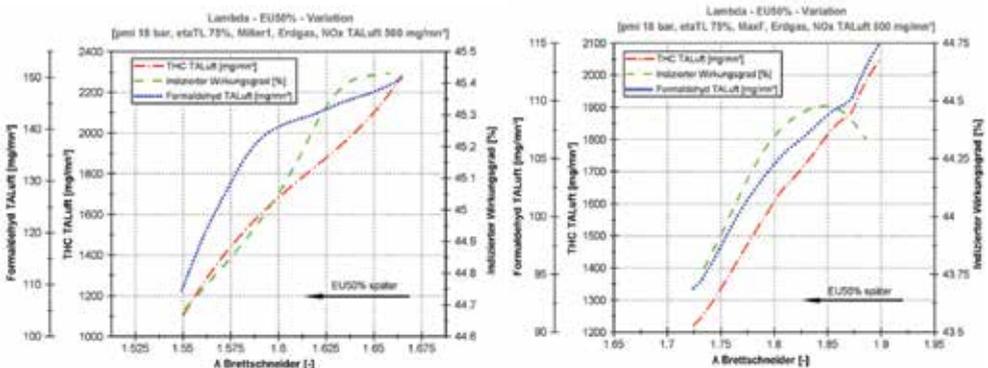


Abb. 10: Vergleich von Wirkungsgrad, THC und Formaldehyd über Lambda bei Miller1 (links) und MaxF (rechts) Nockenwellen, Kraftstoff Erdgas

Dabei offenbart sich bei gleichem Wirkungsgrad ein THC-Reduktionspotenzial bei der Miller-Steuerzeit von über 50 %, was vor allem einem relativ gesehen fetteren Gemisch und damit besseren Durchbrand geschuldet ist. Die NO_x-Emissionen werden dabei durch das geringere Temperaturniveau bei gleichzeitig späterer Verbrennung auf konstantem Niveau gehalten. Das niedrigere Druckniveau trägt ebenfalls dazu bei, dass die Masse an Brenngas, welche in die Schadräume gedrückt wird, geringer ist.

3.4 Optische Analyse

Zur Validierung des zu erstellenden Verbrennungsmodells wurde der Motor auch mit einer optischen Zugänglichkeit über den Kolben ausgestattet. Damit ist eine Beobachtung der Verbrennung, u. a. aber der Entflammung des Kraftstoffluftgemisches, möglich (Abb. 11 und 12). So können zum einen die tatsächlichen zyklischen Variationen der verschiedenen Arbeitsspiele des Motors, aber auch der Flammenfortschritt und damit der Ausbrand sowie die Bildung der THC-Emissionen mittels des daraus abgeleiteten 3D-CFD-Simulationsmodells beurteilt werden.

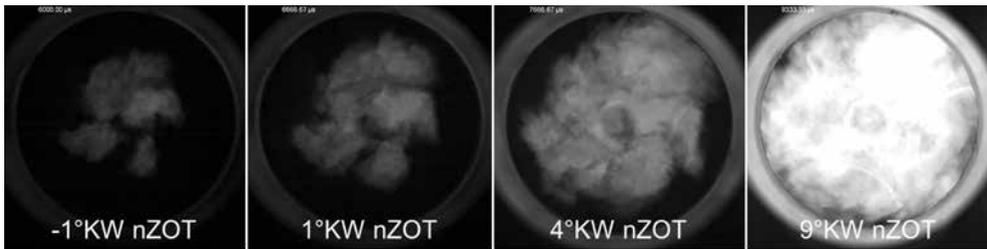


Abb. 11: Verbrennungsfortschritt der Flamme (Quelle: LVK)

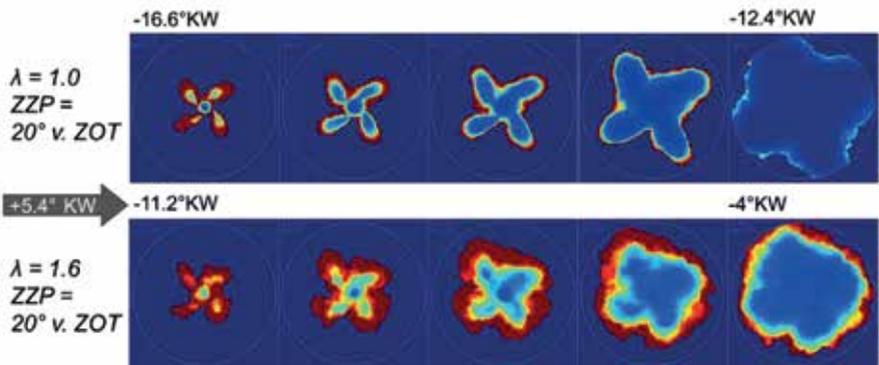


Abb. 12: Optische Analyse der Verbrennung bei unterschiedlichem Verbrennungsluftverhältnis und ansonsten gleichen Betriebsbedingungen (Quelle: LVK)

Bei geringsten NO_x-Emissionen bewegt sich das Brennverfahren an der Aussetzergrenze, welche eine zuverlässige Entflammung und damit eine stabile Verbrennung notwendig macht, um die THC-Emissionen gering zu halten. Hier gibt es den typischen Trade-Off zwischen geringen NO_x-Emissionen und minimiertem Kraftstoffschlupf.

4 Zusammenfassung und Ausblick

Die Quellen der unverbrannten Kohlenwasserstoffemissionen werden in diesem Forschungsprojekt beurteilt und sollen in einer Bewertungsmatrix am Projektende zusammengestellt werden. Dabei kann bekräftigt werden, dass Gasmotoren auf den tatsächlichen CO₂-Gehalt des Brenngases angepasst werden müssen, um geringe Emissionen (NO_x, THC) bei hohem Wirkungsgrad darstellen zu können.

Die weiteren Arbeiten im Forschungsprojekt werden das Zusammenwirken verschiedener Maßnahmen am Forschungsmotor zeigen und die Aufstellung einer Bewertungsmatrix zur Reduktion der THC-Emissionen ermöglichen. Der Reduzierung von Schadvolumen und konsequenter Abstimmung des Verbrennungsmotors auf den Kraftstoff kommt hohe Bedeutung zu. Je größer die Variabilität in der Kraftstoffzusammensetzung, desto schwieriger ist es auch den Motor optimal darauf abzustimmen.

Literatur

Korb, B.; Kuppa, K.; Dinkelacker, F.; Wachtmeister, G.: Zwischenbericht - Ursachen und Reduktionsmaßnahmen der THC-Emissionen in Gasmotoren, FVV Herbsttagung 2014, Dortmund, Informationstagung Motoren Heft R568-2014

Danksagung

Dieses Vorhaben wird durch das Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL) über die Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FKZ 22407512) und durch Eigenmittel der Forschungsvereinigung Verbrennungskraftmaschinen, FVV e.V., (Vorhaben 1127) finanziell gefördert.

Die Autoren danken für die finanzielle Unterstützung zur Durchführung des Projektes.



Ökobilanzielle Bewertung von Biogassystemen

TORSTEN REHL, BÄRBEL HUNDT, SABINE DEIMLING

1 Einleitung

Der kontinuierlich steigende globale Energieverbrauch, die begrenzten fossilen Energieressourcen auf der einen Seite und die mit ihrer Nutzung verbundenen negativen Auswirkungen auf die Umwelt auf der anderen Seite haben das Interesse an der Nutzung erneuerbarer Energieressourcen in den letzten Jahren global stark ansteigen lassen. Aufgrund ihres biogenen Ursprungs gilt die Biogasproduktion mittels anaerober Fermentation als eine vielversprechende Technologie zur Reduktion dieser Auswirkungen. Sie ist darüber hinaus aber auch eine effektive Technologie zur Entsorgung organischer Abfälle und zum Recycling von Nährstoffen. Die Biogastechnik ist durch eine große Bandbreite an Rohstoffen, Fermentationstechnologien und Anwendungsfelder gekennzeichnet. Um eine strategische Auswahl zur ökologisch optimalen Nutzung der Biogastechnologie zu treffen, sind zusätzliche Informationen über die Umweltauswirkungen der kombinierten Energie- und Abfallsysteme notwendig.

2 Ökologische Bewertung

Deutschland muss seine Treibhausgasemissionen bis 2020 – bezogen auf das Jahr 1990 – um 40 % senken. Die Erhöhung des Anteils der erneuerbaren Energien an der Endenergieerzeugung ist ein Teil der Strategie zur Senkung der Treibhausgasemissionen, da erneuerbare Energieträger im Vergleich zu ihren fossilen Pendanten weniger Treibhausgase verursachen. Um beurteilen zu können, wie viele Treibhausgase tatsächlich eingespart werden bzw. wie effizient die Technologien aus energetischer Sicht sind, müssen sie einer ökologischen Bewertung unterzogen werden, die sich methodisch meist ökobilanzieller Ansätze bedient. Eine Ökobilanz oder Lebenszyklusanalyse (LCA) ist eine Methode aus dem Bereich des Umweltmanagements. Sie dient dazu, Transparenz in die Umweltauswirkungen von Produkten und Dienstleistungen zu bringen und damit fundierte Datengrundlagen für Entscheidungsträger zur Verfügung zu stellen. Im Rahmen einer Ökobilanz werden die Umweltauswirkungen eines Produktes oder einer Dienstleistung über den gesamten Lebensweg – von der Wiege (Rohstoffgewinnung) bis zur Bahre (Entsorgung, Recycling) – betrachtet. Dabei durchläuft die Ökobilanzstudie die Phasen der Definition von Ziel und Untersuchungsrahmen, der Sachbilanz, der Wirkungsabschätzung und der Auswertung (Abb. 1).

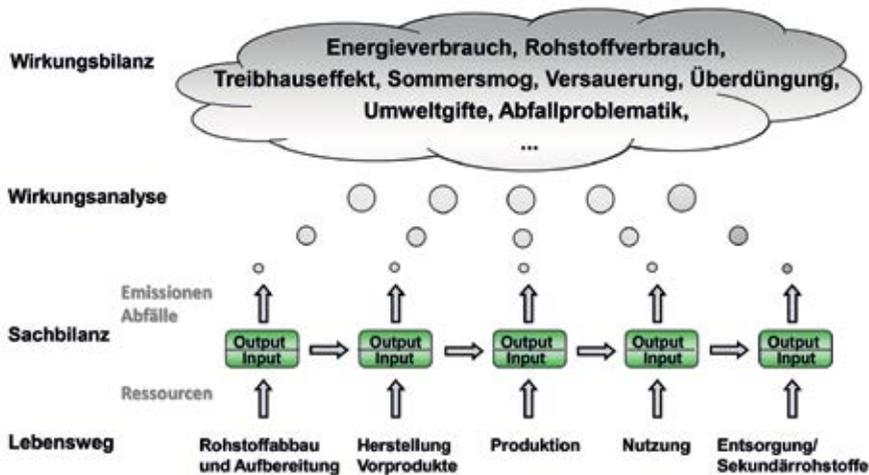


Abb. 1: Lebenszyklusgedanke und Phasen der Ökobilanz

Nachdem Ziel und Untersuchungsrahmen einer Ökobilanzstudie abgesteckt sind, müssen die entsprechenden Input- und Output-Daten der betrachteten Lebenszyklusphasen gesammelt und in einer Sachbilanz (engl.: Life Cycle Inventory, LCI) strukturiert werden. Die anschließende Wirkungsabschätzung dient dazu, die Umweltwirkungen eines Produktes auf verschiedene Wirkungskategorien zu quantifizieren. Abschließend werden in der Auswertungsphase die Ergebnisse der Sachbilanz und der Wirkungsabschätzung zusammenfassend in Bezug auf das Studienziel bewertet und diskutiert, um darauf basierend Empfehlungen abzuleiten (DIN EN ISO 14040 2006). Üblicherweise werden Wirkungskategorien wie Ressourcenverbrauch, Treibhauseffekt, Versauerung, Eutrophierung, Photochemische Ozonbildung, Ozonabbau, Ökotoxizität, Humantoxizität untersucht. Charakterisierungsgröße für den Treibhauseffekt ist die Menge an emittierten Treibhausgasen (CO_2 , CH_4 , N_2O usw.), die in CO_2 -Äquivalenten angegeben und auf eine bestimmte funktionelle Einheit (z. B. kg oder kWh) bezogen wird. Dabei wird berücksichtigt, dass Methan – betrachtet über einen Zeitraum von 100 Jahren – ein 25-mal höheres und Lachgas ein 298-mal höheres Treibhausgaspotenzial aufweisen als CO_2 (IPCC 2006).

3 Ökologische Bewertung von Biogassystemen

3.1 Literaturüberblick zu den ökologischen Auswirkungen der Biogasproduktion

Die ökologische Bewertung von Biogassystemen ist kein Neuland, erste Berechnungen gibt es bereits seit 1999 (EDELMAUN und SCHLEISS 1999, EDELMAUN et al. 2001). Seitdem sind zahlreiche weitere Studien durchgeführt worden.

Die Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL 2006) untersuchte die Energie- und Treibhausgasbilanz einer 30-kW_{el}-Pilotbiogasanlage zum Einsatz in Wasserschutzgebieten. Diese Anlage zeichnet sich durch drei verschiedene Fermentationsstufen aus, die in unterschiedlichen Behältern untergebracht sind. Die erste und dritte Stufe fahren im mesophilen Bereich, die zweite Stufe arbeitet hingegen im thermophilen Bereich. Aufgrund der kleinen Skalierung erreichte diese Anlage lediglich einen Erntefaktor von 0,31 (der Erntefaktor beschreibt das Verhältnis von der Nutzenergie zur investierten Energie. Je höher der Erntefaktor, desto effizienter die Biogasanlage). Die Verbrennung des fossilen Zündöls im Blockheizkraftwerk (BHKW) und der Methanschluß trugen wesentlich zu den CO₂-Emissionen der Anlage bei.

BERGLUND (2006) bewertete die Biogaserzeugung aus verschiedenen Substraten unter schwedischen Bedingungen. Dort wird Biogas häufig auf Erdgasqualität aufbereitet, um das gewonnene Biomethan als Kraftstoff zu nutzen. Sie nutzte den Quotient aus Energieinput und Energieoutput (Kehrwert des Erntefaktors) als Maß für die energetische Bewertung. Auch hier schnitt die Biogaserzeugung aus Abfällen – vor allem aus jenen mit einem hohen Lipidgehalt – besser ab als die Biogaserzeugung aus Energiepflanzen. Sie berechnete zudem die aus energetischer Sicht maximal mögliche Transportdistanz für verschiedene Substrate. Demnach können Gülle bis zu 200 km und Schlachtabfälle bis zu 700 km weit transportiert werden, ohne dass die Energiebilanz negativ wird. Den größten Einfluss auf die Gesamtenergiebilanz hat der Eigenenergieverbrauch der Anlage.

HARTMANN (2006) bewertete im Rahmen seiner Dissertation industriell skalierte Biogasanlagen der Größenordnung 1 MW_{el} mithilfe des ECO-INDICATORS 99 (Der Eco-Indicator 99 ist eine Methodik, die der schadensorientierten Wirkungsabschätzung von Umwelteinflüssen über den gesamten Lebenszyklus eines Produktes dient. Der Eco-Indicator 99 drückt die Umweltrelevanz eines Produktes oder Systems in einer Punktzahl in Form einer aggregierten Kennzahl aus). Zunächst untersuchte er die Umweltwirkungen des Anbaus verschiedener Energiepflanzen. Speziell gezüchteter Energiemais mit hohen Trockenmasseerträgen zeigte dabei insgesamt die geringsten Umweltwirkungen. Grassilage und Roggen-GPS schnitten aufgrund ihrer niedrigen Flächeneffizienz (niedriges Ertragsniveau) am schlechtesten ab. Wenn möglich, sollten Bioabfälle in den Substratmix integriert werden, da diesen keine Anbauvorkette angerechnet werden muss. Auf Anlagenebene tragen Emissionen des BHKW und der Eigenstromverbrauch hauptsächlich zu den Umweltwir-

kungen bei. Die negativen Auswirkungen in der Kategorie Versauerung, die von den NH_3 -Emissionen bei der Gärrestausrückführung verursacht werden, können durch entsprechende Applikationstechniken (Einarbeitung der Gärreste) weitgehend minimiert werden.

KOCH (2009) untersuchte vier verschiedene Biogasanlagentypen sowohl aus dem landwirtschaftlichen als auch aus dem abfallwirtschaftlichen Bereich. Neben den Wirkungskategorien Treibhauseffekt und Energieaufwand (KEA) untersuchte er auch die Kategorie Versauerung. Er stellte fest, dass die abfallwirtschaftlichen Anlagen in allen drei Kategorien besser abschneiden als die landwirtschaftlichen Anlagen, da die Substrate als Abfälle keine ökologischen Auswirkungen aus der Vorkette aufweisen. Bei der Bereitstellung der Substrate (z. B. Mais) haben die Stickstoffdüngung und die mit der Stickstoffdüngung in Zusammenhang stehenden Lachgasemissionen einen großen Einfluss auf die Treibhausgasbilanz. Auf Anlagenebene werden die Methanemissionen aus dem Gärrestlager, der Grad der Wärmenutzung und die Verwertung der Gärreste (stofflich oder energetisch) als wesentliche Treiber identifiziert.

Viele bisherige Studien betonen die positive Auswirkung der Güllevergärung auf die Treibhausgasbilanz (GÄRTNER et al. 2008, HISHINUMA et al. 2008, SCHOLWIN et al. 2006). Dieser Effekt entsteht dadurch, dass Methanemissionen, die normalerweise bei der Güllelagerung entstehen, durch die Nutzung der Gülle als Gärsubstrat vermieden werden.

FRICTHE und WIEGMANN (2008) analysierten den Einfluss von direkten und indirekten Landnutzungsänderungen auf die Treibhausgasbilanz. Vor allem im Fall von Palmöl können die Landnutzungsänderungen gravierende Auswirkungen auf die Treibhausgasbilanz haben. Damit die Auswirkungen direkter und indirekter Landnutzungsänderungen in Zukunft in die Bilanzen mit aufgenommen werden können, wurden Emissionsfaktoren für verschiedene Landnutzungsänderungsszenarien entwickelt.

HÜLSBERGEN und SCHMID (2008) beschäftigten sich intensiv mit den Humusbilanzen von Anbausystemen für nachwachsende Energieträger. Durch Landnutzungsänderungen oder durch Änderungen in der Bewirtschaftung u. Ä. wird die Humusbilanz des Bodens verändert, was sich positiv (z. B. Humusmehrung in der Fruchtfolge) oder negativ (z. B. Grünlandumbruch) auf die Treibhausgasbilanz von biogenen Energieträgern auswirken kann.

JURY et al. (2010) erstellten eine umfassende Ökobilanz für die Monofermentation von Energiepflanzen und die Aufbereitung und Einspeisung des Biogases in ein Erdgasnetz. Im Gegensatz zu anderen Studien fanden sie heraus, dass Methanemissionen während der Fermentation und Aufbereitung nur geringe Auswirkungen auf die Treibhausgasbilanz haben (3 %). Den Haupteinfluss haben der Anbau der Energiepflanzen sowie die aus der Stickstoffdüngung resultierenden Lachgasemissionen (52 %). Generell schnitt Biomethan bezogen auf die Wirkungskategorie Treibhauseffekt jedoch stets besser ab als Erdgas. Des Weiteren wurden die Auswirkungen von Erdgas und Biomethan mithilfe der „Eco-Indikator-99-Methode“ hinsichtlich der Kategorien Ökosystemqualität,

Ressourcenverbrauch und menschliche Gesundheit verglichen. Biomethan schnitt in den Kategorien Ökosystemqualität und menschliche Gesundheit deutlich schlechter ab als Erdgas. Lediglich in der Kategorie Ressourcenverbrauch, die üblicherweise nur zu 20 % in die Endgewichtung eingeht, schnitt Biomethan besser ab als Erdgas. Das schlechte Abschneiden von Biomethan ist vor allem auf das hohe Versauerungs- und Eutrophierungspotenzial des Energiepflanzenanbaus zurückzuführen. Zudem wirkt sich der Flächenverbrauch negativ auf die Ökosystemqualität aus. Biomethan reduziert demnach im Vergleich zu Erdgas die Wirkung auf den Treibhauseffekt um 10–20 %, schneidet allerdings bei der Punktebewertung nach der Ecoindikator-99-Methode 1,7- bis 2-mal schlechter ab als Erdgas.

Den Einsatz von Biomethan als Kraftstoff untersuchten DANIEL et al. (2008). Sie stellen fest, dass Biomethan aus Mais im Vergleich zu anderen derzeit zur Verfügung stehenden biogenen Kraftstoffoptionen (z. B. Bioethanol aus Weizen, Biomethan aus Roggen-GPS usw.) in Bezug auf die Klima- und Energiebilanz am besten abschneidet. Allerdings wurden Wirkungskategorien wie Versauerung oder Eutrophierung in dieser Studie nicht berücksichtigt.

3.2 Einfluss des Gärrestmanagements auf die Ökobilanzergebnisse

Wie in dem Literaturüberblick deutlich wird, besitzt das Gärrestmanagement einen großen Einfluss auf die Gesamtökobilanz einer Biogasanlage, dies fällt noch stärker ins Gewicht, wenn betriebliche Nährstoffüberschüsse mit dem Gärrest in andere Regionen transportiert werden müssen. Nachfolgend werden kurz Ergebnisse aus REHL et al. (2012) zu den ökologischen Auswirkungen unterschiedlicher Gärrestmanagementsysteme dargestellt. Nährstoffüberschüsse fallen dann auf Biogasbetrieben an, wenn viele Exkremente aus der Tierhaltung oder organische Abfälle aus Industrie und Haushalten verwertet werden. Um die Nährstoffüberschüsse zu reduzieren, steht eine zunehmende Zahl von Technologien zur Gärrestaufbereitung zur Verfügung. Es wurde ein Vergleich von sieben Gärrestaufbereitungssystemen durchgeführt, um das energetische und ökologische Verbesserungspotenzial des Gärrestmanagements aufzuzeigen. Die Gärrestsysteme Kompostierung (CO), solare (SD) und mechanische Trocknung (Trommeltrockner (DD) und Bandtrockner (BD)), thermische Aufkonzentration durch Verdampfung (TC) und physikalisch-chemische Behandlung mittels Separation, Ultrafiltration, Umkehrosmose und Ionenaustauscher (PT) wurden mit konventionellem Gärrestmanagement (CM) verglichen (Abb. 2). Generell zeigten die solare Trocknung, die Kompostierung und die physikalisch-chemische Behandlung bei der Ressourcennutzung (hier nicht dargestellt) und den Umwelteinflüssen (Treibhausgas- und Versauerungspotenzial) im Vergleich zum konventionellen Gärrestmanagement die höchsten Reduktionspotenziale.

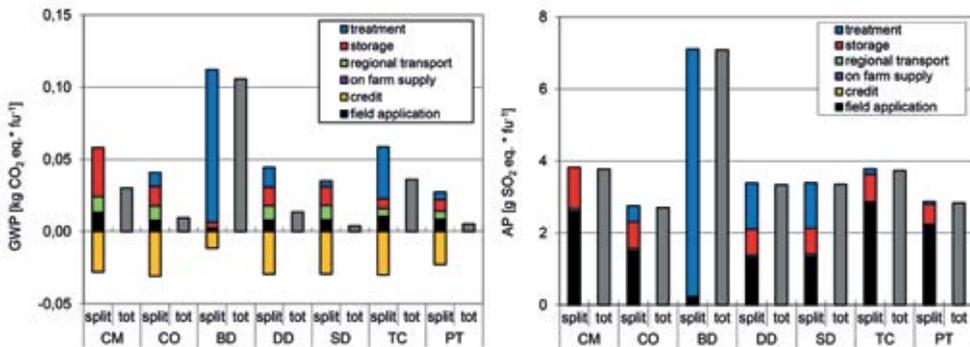


Abb. 2: Treibhausgaspotenzial (GWP) in CO_2 -Äquivalenten (links) und Versauerung in SO_2 -Äquivalenten (rechts) pro Funktioneller Einheit (fu) für die einzelnen Lebenszyklusschritte („split“) und die Summe aus negativen und positiven Werten („tot“)

Darüber hinaus wurde in Sensitivitätsanalysen der Einfluss unterschiedlich konzentrierter Gärreste, Emissionsreduktionstechnologien, Energiebereitstellungen und Logistikvariationen überprüft. Dabei beeinflussten die getroffenen Logistikkannahmen wie Transportdistanz und die Menge des zu transportierenden Substrats tendenziell das Ergebnis stärker als Emissionsreduktionstechnologien, wie z. B. die innerhalb des Prozesses genutzten Filtertechnologien (biologische oder chemische Filter), die Nutzung von luftdichten Lagerabdeckungen oder die Form der Gärrestausrückführung (Injektion oder Einarbeitung).

3.3 Einfluss der Biogasnutzung auf die Ökobilanzergebnisse

Ein weiterer Faktor für die ökologische Effizienz eines Biogassystems stellt die Art der Biogasnutzung dar. In REHL und MÜLLER (2011) wurden unterschiedliche Nutzungspfade für Biogas in Bezug auf ihre Treibhausgaseffizienz, Vermeidungsleistung und -kosten hin untersucht. Acht Biogasanlagenkonzepte wurden basierend auf Direktdatenerhebungen über die potenziell verfügbare Menge an organischen Materialien aus Landwirtschaft, Gewerbe, Haushalten und der Nahrungsmittelindustrie für einen Landkreis in Süddeutschland modelliert (Abb. 3).

Die Konzepte sind ein Stromkraftwerk (E1), ein Stromkraftwerk mit optimierter Anlageneinführung (E2) ein Blockheizkraftwerk mit vor-Ort- (EH1/HE1) und entfernter Wärmenutzung (EH2/HE2), ein reines Heizkraftwerk mit Einspeisung ins Nahwärmenetz (H) und Einspeisung als Zusatzgas zur Wärmeerzeugung (G1) oder Austauschgas zur Substitution von Erdgas zur Wärmeerzeugung (G2) und Autokraftstoff (F).

Die Ergebnisse zeigen, dass das Potenzial einer Biogasanlage basierend auf organischen Reststoffen zur Treibhausgasreduzierung hauptsächlich von der Gesamtsystemeffizienz, der bereitgestellten Energiequelle und dem damit substituierten fossilen Energiemix abhängt. Diese Parameter beeinflussen nicht nur die Treibhausgasbilanz, sondern

4 Zusammenfassung

Die Energieproduktion basierend auf Biogas kann bei guter Planung und Management im Vergleich zur Energieproduktion basierend auf fossilen und nuklearen Rohstoffen eine Reduktion der Umweltauswirkungen mit sich bringen. Umweltverbesserungen werden zweifelsohne für das Treibhausgaspotenzial und den Energieverbrauch, negative jedoch für Eutrophierung, Versauerung und den Sommersmog festgestellt. Die große Anzahl an Technologien und Maßnahmen deuten auf ein großes Potenzial zur Minderung der Umweltwirkungen hin. Eine weitere Erkenntnis ist, dass alle Lebenszyklusphasen und Untersysteme sorgfältig berücksichtigt werden müssen, da kein einzelner Aspekt im Lebenszyklus alle Umweltkategorien dominiert. Als die besonders umweltrelevanten Phasen werden, aufgrund von Ammoniak-, Lachgas- und Nitratemissionen, die Lagerung und die Behandlung von Gülle und Gärrest ausgemacht. Aus der Lebenszyklusperspektive ergibt sich, dass zukünftig Überwachung und Vermeidung von stickstoffbasierten Emissionen die größte Bedeutung besitzen, um die Umweltperformance von Biogassystemen zu verbessern. Bedeutende Emissionsreduktionspotenziale können realisiert werden wenn geeignete technologische Modifizierungen wie Lagerabdeckungen, Filtertechnologien, Gärrestbehandlungsverfahren, Ausbringungsverfahren oder angepasste Managementverfahren wie zum Beispiel die frühe Einarbeitung von Gärresten in den Boden eingesetzt werden. Die Umweltanalyse zeigt auch, dass der Fokus der Biogasnutzung auf der anaeroben Vergärung organischer Reststoffe aus Haushalten, Landwirtschaft oder Industrie liegen sollte. In diesem Fall werden konventionelle Abfallmanagementsysteme ersetzt und es können die vielfältigen positiven Effekte der anaeroben Vergärung wie Abfallstabilisierung, Nährstoffrecycling und Energieproduktion genutzt werden.

5 Fazit

Für eine zunehmende Biogasnutzung sprechen viele Gründe: u. a. die zunehmende Weltbevölkerung, der damit einhergehende steigender Energiebedarf, aber auch die Verknappung fossiler Ressourcen; aus technischer Sicht die flexible Anpassbarkeit an unterschiedliche Systembedingungen, die Speicherbarkeit und damit die Möglichkeit zum Ausgleich von Netzschwankungen im Stromnetz sowie die Möglichkeit zur Einspeisung in das bestehende Erdgasnetz. Nimmt man noch die positiven Auswirkungen auf Energie- und Abfallmanagementsysteme hinzu, dann liegt die Schlussfolgerung nahe, dass die anaerobe Vergärung global eine zunehmende Bedeutung erlangen wird. Zur Deckung der steigenden Nachfrage werden organische Abfälle jedoch nur einen kleinen Beitrag leisten können, während der größte Teil durch Energiepflanzen gedeckt werden muss.

Die Nachfrage nach Energiepflanzen wird den Bedarf nach neuer Anbaufläche erhöhen und damit indirekt die Nahrungsmittelmärkte beeinflussen bzw. es nötig machen, natürliche Flächen in Agrarflächen umzuwandeln. Diese Landnutzungsänderungen haben jedoch einen negativen Einfluss auf Biodiversität, Frischwasserverfügbarkeit und die Kohlenstofffreisetzung aus Böden und Biomasse. Sie führen damit indirekt zu einer Erhöhung der Treibhausgasemissionen von Biogassystemen. Diese zusätzlichen Umweltauswirkungen müssen in der Zukunft generell von Umweltbewertungsmethoden berücksichtigt werden, wenn ein umfassendes Bild der Umweltwirkungen gezeichnet werden soll. Obwohl sich die Lebenszyklusanalyse als die bereits geeignetste Methode zur Bewertung der Umweltauswirkungen von Energie- und Abfallsystemen bewährt hat, gibt es auch hier noch dringenden Handlungsbedarf zur Verbesserung der in ihr verankerten methodischen Ansätze. Dazu gehört die Berechnung der stickstoffbasierten Emissionen, die Quantifizierung von Biodiversität, Wasserverknappung sowie von biogenem Kohlenstoff aus Landnutzungsänderungen. In der Zukunft wird es von größter Wichtigkeit sein, sektorspezifische Berechnungsstandards für Ökobilanzen im Biogassektor zu entwickeln, um Einheitlichkeit, Vergleichbarkeit, Transparenz und Qualität der Lebenszyklusstudien für alle Entscheidungsebenen zu garantieren.

Literatur

- Berglund, M. (2006): Biogas Production from a Systems Analytical Perspective. Doctoral thesis, Faculty of Engineering Department of Technology and Society Environmental and Energy Systems Studies, Lund University, Lund, Sweden
- Daniel, J. et al. (2008): Energie- und Klimateffizienz ausgewählter Biomassekonversionspfade zur Kraftstoffproduktion. Endbericht des IE in Zusammenarbeit mit KWS, Leipzig
- DIN EN ISO 14040 (2006): Umweltmanagement – Ökobilanz – Grundsätze und Rahmenbedingungen. Beuth-Verlag, Berlin
- Eco-Indicator 99 – eine schadensorientierte Bewertungsmethode – Nachbearbeitung zum 12. Diskussionsforum Ökobilanzen vom 30. Juni 2000 an der ETH Zürich, S. 11–16
- Edelmann, W.; Schleiss, K. (1999): Ökologischer, energetischer und ökonomischer Vergleich von Vergärung, Kompostierung und Verbrennung fester biogener Abfallstoffe, Schlussbericht zu Händen von BFE/BUWAL, Bern
- Edelmann, W. et al. (2001): Ökobilanz der Stromgewinnung aus landwirtschaftlichem Biogas. Bundesamt für Energie, Bern
- Fritsche, U.R.; Wiegmann, K. (2008): Treibhausgasbilanzen und kumulierter Primärenergieverbrauch von Bioenergie-Konversionspfaden unter Berücksichtigung möglicher Landnutzungsänderungen, Berlin
- Gärtner, S. et al. (2008): Optimierungen für einen nachhaltigen Ausbau der Biogaserzeugung und -nutzung in Deutschland: Materialband E-Ökobilanzen. IFEU. BMU-Forschungsvorhaben Heidelberg, Berlin, Darmstadt, Leipzig

- Hartmann, K.J. (2006): Life-cycle-assessment of industrial scale biogas plants. Dissertation, Göttingen
- Hishinuma, T. et al. (2008): Using a life cycle assessment method to determine the environmental impacts of manure utilisation: biogas plant and composting systems. *Australian Journal of Experimental Agriculture* 48, pp. 89–92
- Hülsbergen, K.J.; Schmid, H. (2008): Humusbilanzen und C-Kreisläufe in Betriebssystemen mit Bioenergieerzeugung. Ökologische und ökonomische Bewertung nachwachsender Energieträger. KTBL, Darmstadt
- IPCC (2006): IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Chapter 11: N₂O Emissions from Managed Soils and CO₂ Emissions from Lime and Urea Application
- Jury, C. et al. (2010): Life Cycle Assessment of biogas production by monofermentation of energy crops and injection into the natural gas grid. *Biomass & Bioenergy* 34, pp. 54–66
- Koch, M. (2009): Ökologische und ökonomische Bewertung von Co-Vergärungsanlagen und deren Standortwahl. Universitätsverlag Karlsruhe
- LfL (2006): Biogastechnologie zur umweltverträglichen Flüssigmistverwertung und Energiegewinnung in Wasserschutzgebieten. Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft, Freising-Weihenstephan
- Rehl, T. et al. (2012): Life Cycle Assessment of energy generation from biogas – attributional vs. consequential approach. *Renewable and sustainable energy reviews* 16(6), pp. 3766–3775
- Rehl, T.; Müller, J. (2011): Life Cycle Assessment of biogas digestate processing technologies. *Resources, Conservation and Recycling* 56(1), pp. 92–104
- Scholwin, F. et al. (2006): Ökologische Analyse einer Biogasnutzung aus nachwachsenden Rohstoffen. Endbericht FKZ: 22014303 (03NR143), Institut für Energetik und Umwelt, Leipzig

Anaerobe Pilze im Biogasprozess

VERONIKA DOLLHOFER, MARIO NAST, ISABELLA KINKER, SAMART DORN-IN,
VASILIS DANDIKAS, JOHANN BAUER, MICHAEL LEBUHN

1 Zusammenfassung

Ein Einsatz anaerober Pilze könnte helfen, den hydrolytischen Aufschluss von Lignocellulose im Biogasprozess zu verbessern und so hartnäckige pflanzliche Biomasse wie z.B. Landschaftspflegematerial für die Energiegewinnung zu erschließen. Anaerobe Pilze sind im Verdauungstrakt von Pflanzenfressern wesentlich an der primären mechanischen und enzymatischen Zersetzung pflanzlichen Materials beteiligt. Ziel des vorliegenden Projektes war es, die aktuelle Rolle anaerober Pilze im Biogasprozess zu erfassen und Einsatzmöglichkeiten für anaerobe Pilze zu ergründen. Dazu wurden drei PCR-basierte Nachweissysteme entwickelt, mit denen die Biomasse anaerober Pilze, ihre cellulolytische Aktivität und ihre phylogenetische Positionierung bestimmt werden kann. Zwölf landwirtschaftliche Biogasanlagen wurden damit auf anaerobe Pilze hin untersucht, wobei anaerobe Pilze in sieben Anlagen nachgewiesen werden konnten. Cellulolytisch aktive anaerobe Pilze wurden bisher in zwei Anlagen detektiert. In Batchversuchen mit Kulturen anaerober Pilze zur hydrolytischen Vorbehandlung zeigte sich keine Steigerung des kumulierten Biogas- und Methanertrags durch den Einsatz der Pilze, es konnte aber eine schnellere initiale Gasbildung beobachtet werden. Durch eine Vorbehandlung mit anaeroben Pilzen könnte somit eine Verringerung der Verweilzeit erreicht werden. Für einen gezielten Einsatz anaerober Pilze sind aber noch eingehendere Untersuchungen notwendig.

2 Hintergrund und Ziele

Die Verwertung von lignocellulosereichen Reststoffen in Biogasanlagen wird durch das EEG bereits seit 2012 stark forciert. Unter anderem wird der Einsatz von „... Reststoffen aus der Landwirtschaft (Gülle, Einstreu), von Landschaftspflegematerial und Waldrestholz sowie schnellwüchsigen Gehölzen aus Kurzumtriebsplantagen“ gefordert (BMELV 2012). Im Biogasprozess bringt der Einsatz verholzter Substratarten Probleme mit sich. Die Mikroorganismen sind nicht in der Lage, die widerstandsfähige Struktur der Lignocellulose zu knacken, was geringe Abbauraten und entsprechend geringe Gasausbeuten nach sich zieht. Auch bleiben die pflanzlichen Bestandteile größten Teils intakt, was häu-

fig zu mechanische Prozessstörungen führt. Für Anlagenbetreiber waren diese Schwierigkeiten bisher Anlass genug, Abstand vom Einsatz lignocellulosereicher Biomasse zu nehmen. Mit der Einführung des EEG 2014, der damit verbundenen Absenkung der Förderungen für Strom aus Biomasse, der Begrenzung des Zubaus und der noch eindeutigeren Verlagerung des Schwerpunktes beim Substrateinsatz in die Richtung Bioabfälle und Reststoffe (BMJV 2014), wird es für Betreiber aber attraktiver, lignocellulosereiche Reststoffe effizient verwerten zu können (BMW 2014).

Einen Lösungsansatz hierfür stellt ein Voraufschluss der Biomasse dar. Chemische, thermische und mechanische Verfahren sind jedoch häufig energieaufwändig und unrentabel. Eine kostengünstigere Alternative kann eine Vorbehandlung mit Mikroorganismen darstellen, wenn diese auch lignocellulosereiche Stoffe verwerten können. Anaerobe Pilze aus dem Phylum Neocallimastigomycota sind bisher vor allem aus dem Verdauungstrakt von Herbivoren bekannt. Sie sind dort für einen Großteil des Faserabbaus verantwortlich und können Lignocellulose anaerob abbauen.

2.1 Verwertung von Lignocellulose im Biogasprozess

Im Biogasprozess stellt besonders der hydrolytische Aufschluss der Lignocellulose, die als Gerüstsubstanz bis zu 80 % der pflanzlichen Trockenmasse ausmacht, eine Engstelle dar, es bleiben 40 bis 60 % des pflanzlichen Kohlenstoffs unverwertet (PROCHÁZKA et al. 2012). Die initiale Hydrolyse bestimmt die maximal mögliche Geschwindigkeit des gesamten Biogasprozesses sowie die maximal erzielbare Gasausbeute. Grund für die unvollständige Hydrolyse ist die komplexe Struktur aus Lignin, Cellulose und Hemicellulose. Lignin ummantelt die enthaltene Hemicellulose und Cellulose, schützt diese vor mikrobiellem Angriff und erschwert so den Abbau der pflanzlichen Zucker.

Da Lignin anaerob kaum abbaubar ist, können die Mikroorganismen im Biogasprozess und ihre Enzyme meist nur an Schwachstellen angreifen. Die Anzahl solcher Stellen kann durch ein Aufbrechen der pflanzlichen Struktur mit einer entsprechenden Zerkleinerung vergrößert werden. Gängig ist hier die mechanische Zerkleinerung. Alternative Verfahren zur Desintegration der Lignocellulosestruktur wie Steam-Explosion-Verfahren oder eine thermische Hydrolysestufe sind i. d. R. sehr energieintensiv. Auch anaerobe Pilze sind in der Lage, pflanzliches Material mechanisch zu zerkleinern. Während ihres Wachstums bilden sie je nach Gattung filamentöses Rhizoid oder knollenförmige Anheftungskörper aus, mit welchen sie die Lignin-Schicht durchstoßen und aufbrechen. Sie legen Hemicellulose und Cellulose frei, die dann für ihren weiteren mikrobiellen Abbau zur Verfügung stehen. Ein Einsatz anaerober Pilze in Form einer hydrolytischen Vorbehandlung erscheint demnach als sinnvoll.

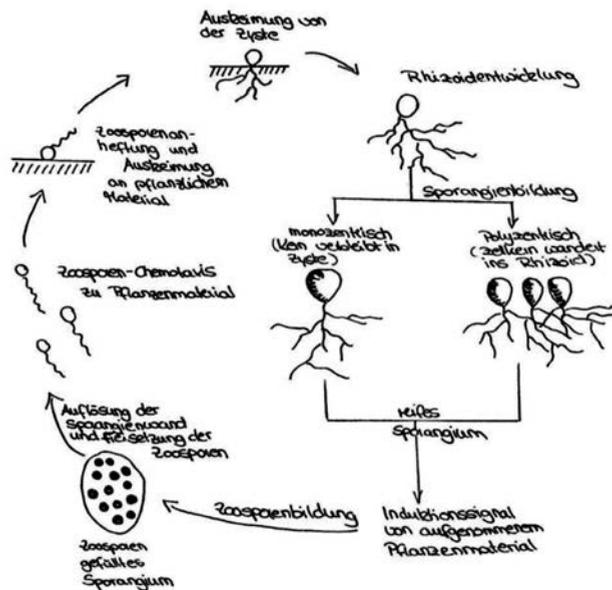


Abb. 1: Lebenszyklus anaerober Pansenpilze (Quelle: Gruninger et al. 2014)

2.2 Anaerobe Pilze

Anaerobe Pilze sind überwiegend aus dem Verdauungstrakt von Pflanzenfressern beschrieben. Sie gehören dem Phylum der Neocallimastigomycota an, das sich aktuell aus 8 Gattungen zusammensetzt. Sie werden unterteilt in die monozentrischen Gattungen *Neocallimastix*, *Piromyces*, *Caecomyces*, *Buwchfawromyces* und *Ontomyces* sowie die polyzentrischen Gattungen *Anaeromyces*, *Orpinomyces* und *Cyllamyces* (GRUNINGER et al. 2014, CALLAGHAN et al. 2015, DAGAR et al. 2015). Molekulargenetische Untersuchungen lassen aber vermuten, dass mit einer weit größeren Vielzahl an anaeroben Pilzen zurechnen ist (LIGGENSTOFFER et al. 2010), (Abb. 2).

Die Entwicklung anaerober Pilze folgt einem Lebenszyklus (Abb. 1), der zwischen motilen Ausbreitungsformen, den sogenannten Zoosporen, und einer vegetativen thallusbildenden Form wechselt.

Die Zoosporen schwimmen mittels ihrer Flagellen in Richtung des aufgenommenen Pflanzenmaterials, das sie chemotaktisch lokalisieren. Sie heften sich an die pflanzlichen Zellen an, werfen ihre Flagellen ab und keimen aus. Bei der Keimung bilden sie eine Zyste, die je nach Gattung ein filamentöses Rhizoid oder knollenförmige Anheftungskörper ausbildet. Mit diesen durchdringen sie die pflanzliche Zellwand und brechen die Zellen auf (HAITJEMA et al. 2014). Zusätzlich verfügen anaerobe Pilze über ein ausgeklügeltes Enzymarsenal zur Zersetzung pflanzlicher Biomasse. Neben freien Enzymen sind eine Vielzahl der cellulolytischen und hemicellulolytischen Enzyme synergistisch in Multi-

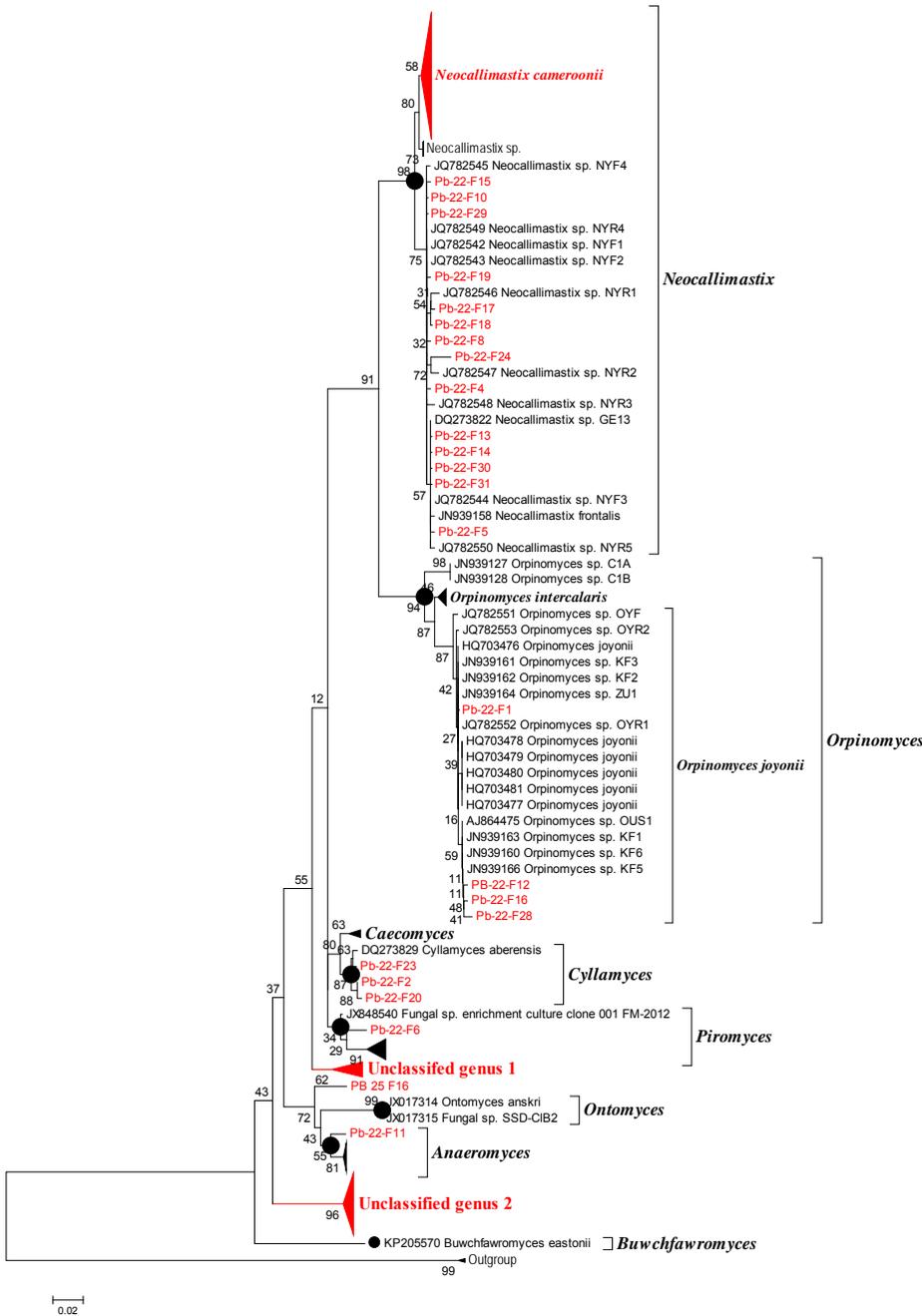


Abb. 2: Ausschnitt aus einem phylogenetischen Stammbaum basierend auf dem LSU-Gen anaerober Pilze; Sequenzen aus Biogasanlagen sind rot markiert

enzymkomplexen gebündelt, den bereits aus Clostridien bekannten Cellulosomen (DOLLHOFER et al. 2015c). Über den Abbau der pflanzlichen Biomasse, zu den Produkten H_2 , CO_2 , Ethanol, Acetat, Laktat und Formiat, gewinnen die Pilze die nötige Energie für ihr Wachstum. Sie entwickeln Thalli, an denen sich ein oder mehrere Sporangien ausbilden. Darin reifen wieder neue begeißelte Zoosporen heran, werden freigesetzt und der Zyklus beginnt von neuem.

3 Material und Methoden

3.1 PCR basierender Nachweis anaerober Pilze aus landwirtschaftlichen Biogasanlagen

Zur Quantifizierung von anaeroben Pilzen aus Umweltproben mittels quantitativer Real-Time PCR (qPCR) (DOLLHOFER et al. 2015a in Vorbereitung) diente das Gen der kleinen ribosomalen Untereinheit (18S rRNA bzw. *SSU*). Es ist innerhalb der verschiedenen anaeroben Pilzarten stark konserviert und eignet sich daher gut zur Quantifizierung. Um eine Aussage über die Biomasse anaerober Pilze treffen zu können, wurde ein Standard aus einer *Neocallimastix* sp. Kultur erstellt: Aus der gewogenen Pilz-Frischmasse wurde eine Verdünnungsreihe erstellt und für diese mit qPCR die gemessene Anzahl der 18S rRNA Genkopien auf die Biomasse anaerober Pilze bezogen. Mit der Annahme, dass sich die Genkopienzahl in den verschiedenen anaeroben Pilzarten nicht drastisch unterscheidet, kann die Biomasse anaerober Pilze aus der ermittelten Anzahl der Genkopien zumindest grob abgeschätzt werden.

Zur molekulargenetischen Quantifizierung der Aktivität anaerober Pilze gibt es bisher keine anerkannten Messsysteme. Um diese Lücke zu schließen, wurde in der vorliegenden Studie ein solches entwickelt. Das System hat das Gen einer in anaeroben Pilzen weit verbreiteten Endoglucanase aus der Glycosylhydrolase Familie fünf (GH5) als Ziel. Sind anaerobe Pilze aktiv dabei, pflanzliches Material zu zersetzen, benötigen sie Endoglucanase. Die Produktion des Enzyms erfordert die Bildung der entsprechenden Boten-RNA (mRNA). Diese mRNA wird im Labor extrahiert und über reverse Transkription in cDNA umgeschrieben. Mittels spezifischer qPCR kann die cDNA dann quantifiziert und als Indikator für die transkriptionelle cellulolytische Aktivität anaerober Pilze verwendet werden.

Zur Bestimmung der Populationszusammensetzung anaerober Pilze wurde das Gen der großen ribosomalen Untereinheit genutzt (28S rRNA bzw. *LSU*). Dieses ist innerhalb der anaeroben Pilze konserviert, ermöglicht aber noch eine gute Trennung der einzelnen Gattungen und den ersten Analysen zufolge auch von anaeroben Pilz-Spezies.

Die beschriebenen Systeme wurden genutzt um zwölf Biogasanlagen aus bestehenden Monitoringprojekten am Institut für Landtechnik und Tierhaltung (LfL) (KISSEL et al. 2012, KISSEL et al. 2013) auf das Vorkommen anaerober Pilze zu untersuchen.

3.2 Vorbehandlung mit anaeroben Pilzen in Batchprozessen

Um herauszufinden ob eine Hydrolysestufe mit anaeroben Pilzen einen positiven Effekt auf den Biogasprozess hat, wurden Batchexperimente durchgeführt. Die Versuche waren in zwei Abschnitte unterteilt: Eine einwöchige Hydrolysephase und danach eine Batch-Vergärungsphase. In der Hydrolysephase wurden lediglich Substrat und das jeweilige Pilz-Inokulum, aktiv sowie inaktiv (autoklaviert), eingesetzt. Ein zusätzliches Replikat der Varianten wurde für chemische, mikrobiologische und molekulargenetische Analysen genutzt. Zu Beginn der Batch-Vergärung wurde eine methanogene Standardbiozönose aus einem Durchflussfermenter zugesetzt. Die Biozönose war zuvor eine Woche „ausgehungert“ worden um eine Gasproduktion aus dem enthaltenen Substrat zu vermeiden. Die produzierte Gasmenge wurde mit Milligascountern gemessen und dann der Gasanalyse im AWITE Gerät zur Bestimmung der Gehalte an CH₄, CO₂ und O₂ zugeführt.

4 Ergebnisse und Diskussion

4.1 Anaerobe Pilze in landwirtschaftlichen Biogasanlagen

In sieben der untersuchten Pilot-Biogasanlagen (siehe 3.1) wurden 18S rRNA Genkopien anaerober Pilze nachgewiesen deren Anzahl einer Pilzbiomasse von 0,8 bis 4,3 µg · mL⁻¹ entsprach. In Gärgemischen von zwei Anlagen wurden 4,18 · 10⁴ bzw. 1,9 · 10⁴ mRNA-Transkripte des Endoglucanase Gens (GH5) anaerober Pilze pro mL Frischmasse gemessen, was darauf schließen lässt, dass die anaeroben Pilze auch cellulolytisch aktiv waren (DOLLHOFER et al. 2015b in Vorbereitung).

Zusätzlich zu den quantitativen Analysen wurde die Populationszusammensetzung anaerober Pilze in den Anlagen mit cellulolytischer Pilz-Aktivität sowie in einer weiteren Anlage bestimmt. Zum Vergleich wurde die Diversität in einer Pansensaftprobe vom Rind erfasst. In den untersuchten Anlagen wurden unterschiedliche Pilzpopulationen gefunden. Es konnten Vertreter der Gattungen *Cyllamyces*, *Anaeromyces*, *Orpinomyces* und *Neocallimastix* nachgewiesen werden (Abbildung 2. Zusätzlich konnten zwei neue Kladen (Unclassified 1 und Unclassified 2) definiert werden, die keiner bisher bekannten Gattung zugeordnet werden konnten, sich aber von allen anderen Sequenzen klar abgrenzten.

Bisher wurden anaerobe Pilze nur zweimal außerhalb ihres natürlichen Habitats beschrieben. LOCKHART et al. (2006) detektierte anaerobe Pilz-DNA in zwei Müllhalden in

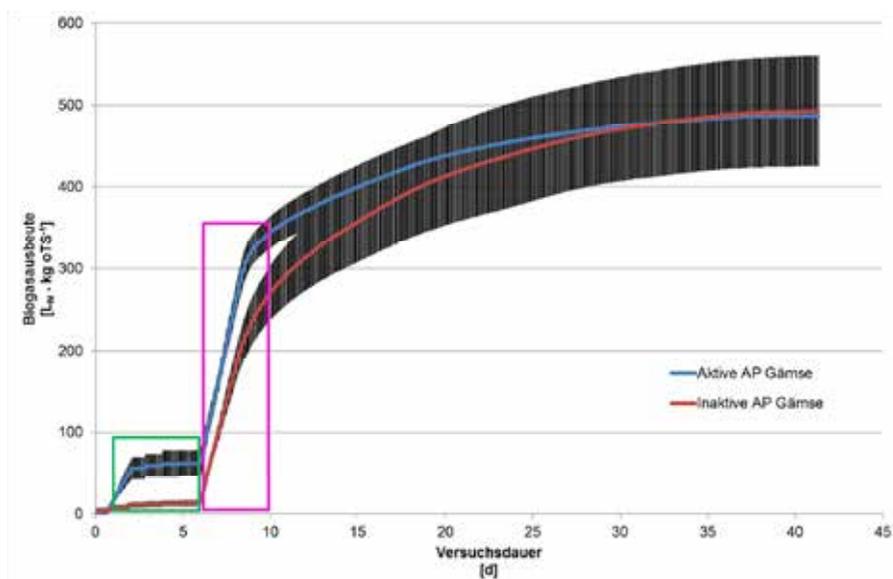


Abb. 3: Gasausbeute aus einem Batchversuch, Vergleich aktive und inaktive anaerobe Pilze aus der Gämse

Großbritannien und KAZDA et al. (2014) konnte anaerobe Pilze in zwei deutschen Biogasanlagen molekularbiologisch identifizieren. Beide Arbeiten zeigten, dass anaerobe Pilze an Orten, an denen hohe Mengen an cellulosehaltigem Material behandelt werden, eine Rolle spielen können. Die in der vorliegenden Studie positiv getesteten Biogasanlagen nutzten Rindermist und Rindergülle als tierische Einsatzstoffe. Um schlechte Umweltbedingungen zu überstehen und um von Wirt zu Wirt weitergegeben werden zu können, bilden anaerobe Pilze Überdauerungsformen. Dies befähigt sie, in Tierkot zu überleben, und bis zu ein Jahr zu überdauern (DAVIES et al. 1993). Der Eintrag von anaeroben Pilzen in die Biogasanlage kann somit über die kontinuierliche Zufuhr an tierischen Einsatzstoffen erklärt werden.

Die Ergebnisse zeigen, dass anaerobe Pilze bereits Bestandteil der Biozönose in landwirtschaftlichen Biogasanlagen sein können, vor allem, wenn sie mit tierischen Einsatzstoffen betrieben werden. Ob anaerobe Pilze in Biogasanlagen dauerhaft lebensfähig und aktiv sein können, ist zu prüfen.

4.2 Effekte einer hydrolytischen Vorbehandlung mit anaeroben Pilzen im Batchmaßstab

Die Batchversuche (Abbildung 3) ergaben zu Versuchende keine signifikante Verbesserung der Biogasausbeute oder des Methangehalts. Allerdings konnte in der Hydrolysephase (grün umrandet) und in den ersten Tagen der Batchphase (pink umrandet) bei den Ansätzen mit lebenden anaeroben Pilzen (hier gezeigt aus der Gämse) eine höhere Gasbildung als bei den Kontrollen beobachtet werden. Über insgesamt drei Batchversuche mit verschiedenen Pilz-Inokula hinweg zeigte sich ein signifikanter, positiver Effekt der anaeroben Pilze auf die Biogasproduktion in der initialen Phase ($p < 0.05$).

Eine Studie zur zweistufigen Vergärung von Maissilage und Rohrkolben, in der anaerobe Pilze in die Hydrolysephase eingebracht wurden, lieferten ähnliche Ergebnisse (NKEMKA et al. 2015). Die Enderträge waren zwischen der Hydrolyse mit und ohne anaerobe Pilze nicht signifikant verschieden, die initiale Produktion von Methan und Wasserstoff sowie der Fettsäureabbau konnte aber durch den Einsatz der anaeroben Pilze für beide Substrate gesteigert werden.

Die eingesetzten anaeroben Pilze waren nach der einwöchigen Hydrolyse noch auf molekularer und mikrobiologischer Ebene nachweisbar. Am Ende der Batchphase waren die Pilze abgestorben. Offenbar wirkten sich die Bedingungen im Biogas-Gärgemisch negativ auf die anaeroben Pilze aus. Auch in einer früheren Untersuchungen starben die eingesetzten Pilze nach 8 bis 10 Tagen im Gärgemisch ab (PROCHÁZKA et al. 2012).

Wegen der schnelleren initialen Gasbildung mit aktiver Pilzkultur ist mit einem erhöhten Substratabbau in den ersten Tagen zu rechnen. Durch den Einsatz von anaeroben Pilzen in einer entsprechend angepassten Vorbehandlungsstufe könnte somit eine Verringerung der gesamten Verweilzeit erzielt werden. Dadurch könnte z.B. mehr Substrat in einem entsprechenden Zeitraum umgesetzt oder das BHKW mit einer geringeren Volllaststundenzahl gefahren werden. Am wichtigsten jedoch ist, dass durch eine Hydrolyse mit anaeroben Pilzen der Einsatz lignocellulosereicher Reststoffe ermöglicht werden könnte.

Das Einsatzpotenzial anaerober Pilze erstreckt sich auch über den Biogasbereich hinaus. Beispielsweise wurden von anaeroben Pilzen produzierte Xylanasen bei der Papierherstellung im Prozess des sogenannten „biobleaching“ getestet (SHAH et al. 2000). In der Tierernährung wurden anaerobe Pilze bereits als Probiotika untersucht (z.B. SEHGAL et al. 2008). Interessante Ergebnisse lieferten auch die chemische Analysen der Batchversuche. Bei den mit aktiven anaeroben Pilzen aus der Gämse vorbehandelten Proben wurde eine erhöhte Capronsäurekonzentration (im Mittel 1.256 mg pro kg FM) gemessen. Mittelkettige Fettsäuren wie Capronsäure finden als antimikrobielle Futterzusätze (BRUGGEMAN and MOLLY 2010) Einsatz in der Landwirtschaft. Auch ist Capronsäure ein gefragtes Interme-

diat für die Industrie zur Herstellung von Duftstoffen und Pharmazeutika und erzielt auf dem freiem Markt einen Preis von 1.900–3.700 € pro Tonne (VOULIS 2012).

5 Ausblick

Für die Biogas-Praxis ist derzeit die Entwicklung einer biologischen Vorbehandlungsstufe für einen Einsatz anaerober Pilze am Erfolgs versprechendsten. Die Versuche haben allerdings gezeigt, dass es dafür notwendig ist, den Kenntnisstand zur Ökologie der anaeroben Pilze auszuweiten. Vor allem müssen essentielle Wachstumsfaktoren, aber auch potentielle im Biogas-Gärgemisch vorhandene Hemmstoffe, für anaerobe Pilze identifiziert werden. Erst dann können die Bedingungen in einer Vorbehandlungsstufe so gewählt werden, dass eingesetzte anaerobe Pilze langfristig aktiv bleiben und rohfaserreiche Substrate optimal für den Biogasprozess vorbereiten können. Momentan erscheint eine Vorbehandlungsstufe ähnlich bisher gängiger Hydrolysestufen in der Praxis sinnvoll. Ein Kostenrahmen lässt sich bei dem frühen Forschungsstand noch nicht abschätzen. Es ist anzunehmen, dass sich durch eine solche Vorbehandlungsstufe Einsparungen beim Energieverbrauch besonders gegenüber energieaufwendigen Vorbehandlungs-Verfahren, sowie eine Verkürzung der gesamt Verweilzeit erzielen ließen. Dies könnte die Biogasgewinnung aus schwer abbaubaren lignocellulosereichen Reststoffen auch ökonomisch rentabel machen.

Für einen gezielten Einsatz sind aber noch eingehendere Untersuchungen und Versuche im Labor- sowie im Technikumsmaßstab notwendig. Liese sich eine solche Vorbehandlungsstufe realisieren und momentan eher unübliche Substratarten wie Landschaftspflegematerial effizient im Biogasprozess einsetzen, könnte Biogas auch ohne Energiepflanzen wieder gegenüber anderen Energiequellen konkurrenzfähiger werden. Dies wäre ein weiterer Schritt weg von Energiepflanzen wieder hin zu Biogasanlagen als Reststoffverwerter und in Richtung der Vorgaben durch das EEG 2014.

Literatur

BMELV (2012): Das Erneuerbare-Energien-Gesetz. Daten und Fakten zur Biomasse – Die Novelle 2012. Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz (BMELV), Berlin

BMJV (2014): Gesetz für den Ausbau erneuerbarer Energien-Erneuerbare-Energien-Gesetz – EEG 2014. Bundesministeriums der Justiz und für Verbraucherschutz. http://www.gesetze-im-internet.de/bundesrecht/eeg_2014/gesamt.pdf.

- BMWi (2014): Faktenblatt Biomasse. http://www.erneuerbare-energien.de/EE/Redaktion/DE/Downloads/EEG/faktenblatt_biomasse.pdf?__blob=publicationFile&tv=3
- Bruggeman, G.; Molly, K. (2003): Mittelkettige Fettsäuren und deren Verwendung als antimikrobielles Mittel, European Patent 1294371 A1, 26. Mar 2003
- Callaghan, T.M.; Podmirseg, S.M.; Hohlweck, D.; Edwards, J.E.; Puniya, A.K.; Dagar, S.S.; Griffith, G.W. (2015): *Buwchfawromyces eastonii* gen. nov., sp. nov.: a new anaerobic fungus (Neocallimastigomycota) isolated from buffalo faeces. *MycKeys* 9:11-28. doi:10.3897/mycokeys.9.9032
- Dagar, S.S.; Kumar, S.; Griffith, G.W.; Edwards, J.E.; Callaghan, T.M.; Singh, R.; Nagpal, A.K.; Puniya, A.K. (2015): A new anaerobic fungus (*Oontomyces ankari* gen. nov., sp. nov.) from the digestive tract of the Indian camel (*Camelus dromedarius*). *Fungal Biology*. doi:10.1016/j.funbio.2015.04.005
- Davies, D.R.; Theodorou, M.K.; Lawrence, M.I.; Trinci, A.P. (1993): Distribution of anaerobic fungi in the digestive tract of cattle and their survival in faeces. *Journal of General Microbiology* 139(6):1395-1400
- Dollhofer, V.; Dorn-In, S.; Bauer, J.; Lebuhn, M. (2015a): Anaerobic fungi – a novel PCR-based approach to assess their quantity, their cellulolytic transcriptional activity and phylogeny. In Vorbereitung
- Dollhofer, V.; Griffith, G.W.; Callaghan, T.M.; Dorn-In, S.; Bauer, J.; Lebuhn, M. (2015b): Anaerobic fungi in production scale biogas plants. In Vorbereitung
- Dollhofer, V.; Podmirseg, S.M.; Callaghan, T.M.; Griffith, G.W.; Fliegerová, K. (2015c): Anaerobic fungi and their potential for biogas production. In: Guebitz G (ed) *Biogas Science and Technology. Advances in Biochemical Engineering/Biotechnology*. Springer International Publishing. doi:10.1007/978-3-319-21993-6, im Druck
- Gruninger, R.J.; Puniya, A.K.; Callaghan, T.M.; Edwards, J.E.; Youssef, N.; Dagar, S.S.; Fliegerova, K.; Griffith, G.W.; Forster, R.; Tsang, A.; McAllister, T.; Elshahed, M.S. (2014): Anaerobic fungi (phylum Neocallimastigomycota): advances in understanding their taxonomy, life cycle, ecology, role and biotechnological potential. *FEMS microbiology ecology* 90 (1):1-17. doi:10.1111/1574-6941.12383
- Haitjema, C.H.; Solomon, K.V.; Henske, J.K.; Theodorou, M.K.; O'Malley M.A. (2014): Anaerobic gut fungi: Advances in isolation, culture, and cellulolytic enzyme discovery for biofuel production. *Biotechnology and bioengineering* 111 (8):1471-1482. doi:10.1002/bit.25264
- Kazda M.; Langer S.; Bengelsdorf FR (2014): Fungi open new possibilities for anaerobic fermentation of organic residues. *Energy, Sustainability and Society* 4 (1):6. doi: 10.1186/2192-0567-4-6
- Kissel R.; Pohl, A.; Rivera Gracia, E.; Effenberger M (2013): Nutzung von Grünland zur Biogaserzeugung – Betriebs-Monitoring – 2. Zwischenbericht. Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft (Hrsg.), Institut für Landtechnik und Tierhaltung, Freising
- Kissel, R.; Rivera Gracia, E.; Effenberger, M. (2012): Nutzung von Grünland zur Biogaserzeugung – Betriebs-Monitoring – 1. Zwischenbericht. Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft, Institut für Landtechnik und Tierhaltung, Freising
- Liggenstoffer, A.S.; Youssef, N.H.; Couger, M.B.; Elshahed, M.S. (2010): Phylogenetic diversity and community structure of anaerobic gut fungi (phylum Neocallimastigomycota) in ruminant and non-ruminant herbivores. *The ISME journal* 4 (10):1225-1235. doi:10.1038/ismej.2010.49

- Lockhart, R.J.; Van Dyke, M.I.; Beadle, I.R.; Humphreys, P.; McCarthy, A.J. (2006): Molecular biological detection of anaerobic gut fungi (Neocallimastigales) from landfill sites. *Applied and environmental microbiology* 72 (8):5659-5661. doi:10.1128/AEM.01057-06
- Nkemka, V.N.; Gilroyed, B.; Yanke, J.; Gruninger, R.; Vedres, D.; McAllister, T.; Hao, X. (2015): Bioaugmentation with an anaerobic fungus in a two-stage process for biohydrogen and biogas production using corn silage and cattail. *Bioresource Technology* 185:79-88. doi:10.1016/j.biortech.2015.02.100
- Procházka, J.; Mrázek, J.; Štrosová, L.; Fliegerová, K.; Záborská, J.; Dohányos, M. (2012): Enhanced biogas yield from energy crops with rumen anaerobic fungi. *Engineering in Life Sciences* 12 (3):343-351
- Sehgal, J.; Jit, D.; Puniya, A.; Singh, K. (2008): Influence of anaerobic fungal administration on growth, rumen fermentation and nutrient digestion in female buffalo calves. *J Anim Feed Sci* 17:510-518
- Shah, A.K.; Cooper, A.; Adolphson, R.B.; Li, X.-L.; Chen, H.; Ljungdahl, L.G.; Eriksson, K.-E.L. (2000): Use of an extremely high specific activity xylanase in ecf and tcf pulp bleaching. *TAPPI JOURNAL* 83 (8)
- Voulis, N. (2012): Bioelectrochemical upgrading of volatile fatty acids, <http://lib.ugent.be/en/catalog/rug01:001894492>

Danksagung

Wir danken dem Bayerischen Staatsministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten sowie dem Bayerischen Staatsministerium für Wirtschaft und Medien, Energie und Technologie für die finanzielle Unterstützung des Verbundvorhabens BW/14/22 - EW/12/17

Struktur und Funktion von methanogenen Biofilmen in Biogasreaktoren

INGO BERGMANN, MICHAEL KLOCKE

1 Mikrobielle Lebensgemeinschaften im Biogasreaktor

Am anaeroben Abbau von Biomasse und organischen Reststoffen zu methanhaltigem Biogas sind eine Reihe unterschiedlicher Mikroorganismen beteiligt. Hydrolytisch aktive *Bacteria* spalten hochmolekulare Verbindungen, wie z. B. Cellulose, zu energetisch hochwertigen Oligo- und Monosacchariden, welche wiederum die Lebensgrundlage für eine Vielzahl anderer gärender, säurebildender (acidogener) *Bacteria* ist (Primärgärer). Deren Gärungsendprodukte wiederum bilden die Lebensgrundlage von sekundär gärenden *Bacteria*. Zentrale Endprodukte vieler Primär- und Sekundärgärer sind Essigsäure, Kohlendioxid (CO₂) und molekularer Wasserstoff (H₂). Diese Substanzen sind zugleich die Ausgangsstoffe, aus denen methanogene *Archaea* die wesentliche energetische Komponente im Biogas, das Methan (CH₄), bilden.

Für die verschiedenen Abbauwege typische Mikroorganismen sind schon seit Langem bekannt und gut untersucht. So wurde zum Beispiel das Cellulose abbauende Bakterium *Clostridium thermocellum* bereits in den zwanziger Jahren des vorigen Jahrhunderts von US-amerikanischen Wissenschaftlern isoliert und hinsichtlich seines Stoffwechsels charakterisiert (McBEE 1954). Moderne molekulare Verfahren, basierend auf der Charakterisierung der mikrobiellen DNA, haben jedoch wiederholt gezeigt, dass ein Großteil (~ 70 %) der aus Biogasreaktoren isolierten mikrobiellen DNA keinem bekannten Mikroorganismus zugeordnet werden kann, d. h. von unbekanntem Mikroorganismen mit bis dato unbekanntem Stoffwechseleigenschaften stammen muss (RADEMACHER et al. 2012).

Inbesondere sekundär gärende Mikroorganismen leben häufig am thermodynamischen Limit. Unter den in einem Biogasreaktor vorherrschenden Umweltbedingungen lässt sich aus bestimmten Stoffwechselprozessen nur dann ein Energiegewinn erzielen, wenn eine räumliche Nähe zu einem Partner besteht, der kontinuierlich die Endprodukte des jeweiligen Stoffwechselwegs entfernt (Syntrophie) (SCHINK 1997).

Die Ausbildung syntropher Partnerschaften kann durch die Konstruktion eines Biogasreaktors unterstützt werden. Bekanntestes Beispiel ist der von LETTINGA et al. (1980) entwickelte Upflow-anaerobic-sludge-blanket(UASB)-Reaktor, welcher die Bildung von Granula mit syntrophen Gemeinschaften aus fermentativen *Bacteria* und methanogenen *Archaea* fördert (SCHMIDT und AHRING 1996).

UASB-Reaktoren sind vorrangig für die Vergärung dünnflüssiger Gärsubstrate geeignet. Zur Vergärung von festen Gärsubstraten, wie z.B. Silagen, sind dagegen andere Reaktorkonstruktionen erforderlich, wie z.B. Rührkesselreaktoren oder Bioleaching-Systeme. Nichtsdestotrotz sind auch in solchen Reaktorsystemen zumindest lokal auftretende Assemblierungen von unterschiedlichen Arten von Mikroorganismen zu beobachten, welche im Folgenden näher betrachtet werden sollen.

2 Verteilung der methanbildenden Archaea in Rührkesselreaktoren

Innerhalb eines Biogasreaktores sind die methanbildenden *Archaea* nicht gleichmäßig verteilt, sondern siedeln sich entsprechend ihrer artspezifischen Eigenschaften in bestimmten Bereichen bevorzugt an (Abb. 1).

In dem untersuchten Rührkesselreaktor (*completely stirred tank reactor*, CSTR) fanden sich unter mesophilen Bedingungen (37 °C) in der Prozessflüssigkeit überwiegend hydrogenotrophe Vertreter der *Methanobacteriales*, insbesondere der Gattungen *Methanobrevibacter*, *Methanobacterium* und *Methanosphaera*. Entsprechendes war ebenfalls bei einem thermophilen Temperaturregime (55 °C) zu beobachten, nur das in diesem Falle vorrangig Vertreter der Gattung *Methanothermobacter* nachgewiesen wurden.

Acetoklastische oder mixotrophe Methanbildner waren in der Prozessflüssigkeit des CSTR bei beiden Temperaturregimen nur in vergleichsweise geringer Anzahl zu finden (mesophil: 27–29 % der mittels quantitativer Polymerase-Kettenreaktion (qPCR) nachgewiesenen Kopien für das archaelle 16S-rRNA-Gen, thermophil: 11–14 %). Unter mesophilen Bedingungen stammten diese hauptsächlich aus der Gattung *Methanosaeta*, mixotrophe *Methanosarcinaceae* waren nur vergleichsweise wenig zu finden (< 1 %). Unter thermophilen Bedingungen bot sich dagegen ein umgekehrtes Bild. Hier war als acetoklastischer bzw. mixotropher Methanbildner nahezu ausschließlich *Methanosarcina* spp. nachweisbar.

Eine von der Prozessflüssigkeit deutlich unterscheidbare Struktur wies der Biofilm auf der Reaktorwandung des mesophilen CSTR auf. In diesem Biofilm war der Anteil an acetoklastischen Methanbildnern der Gattung *Methanosaeta* wesentlich höher als in der Prozessflüssigkeit (67–69 %). Hydrogenotrophe Methanbildner traten dagegen seltener auf. Insbesondere die Vertreter der Gattung *Methanobrevibacter*, aber auch anderer *Methanobacteriales* wurden in dem Biofilm in deutlich reduzierter Anzahl nachgewiesen. Interessanterweise scheint aber die Lebensweise in dem Biofilm vorteilhaft für die ebenfalls hydrogenotrophen Methanbildner der Gattung *Methanospirillum* aus der Ordnung *Methanomicrobiales*, zu sein, die in der Prozessflüssigkeit selten, in dem Biofilm jedoch wesentlich häufiger nachgewiesen wurden.

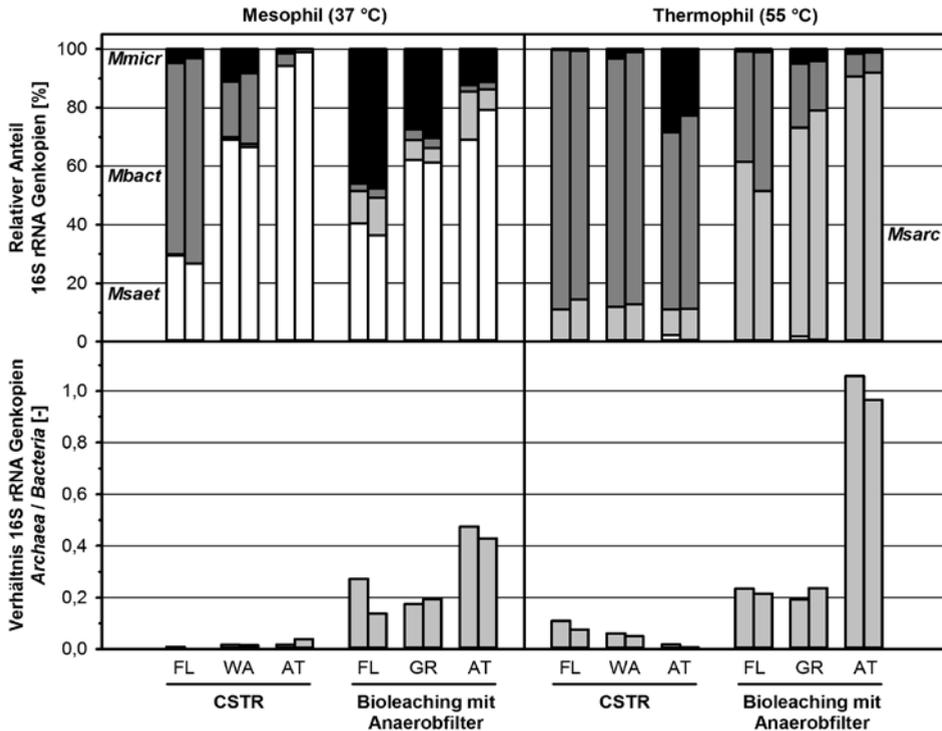


Abb. 1: Methanbildende *Archaea* in der Prozessflüssigkeit (FL) und den Biofilmen auf Reaktorwandung (WA), Aufwuchsträgern (AT) und Substrat (i.e. Gärrest, GR) in Rührkesselreaktoren (*completely stirred tank reactor*, CSTR) und zweistufigen Reaktorsystemen mit *Bioleaching* und Anaerobfilter unter mesophilen (37 °C) und thermophilen (55 °C) Bedingungen. Der Nachweis der taxonomischen Gruppen *Methanosarcinaceae* (*Msaet*), *Methanosarcinaceae* (*Msarc*), *Methanobacteriales* (*Mbact*) und *Methanobacteriales* (*Mmicr*) sowie aller methanogener *Archaea* und fermentativer *Bacteria* erfolgte kultivierungsunabhängig mittels quantitativer Polymerase-Kettenreaktion (qPCR) auf Basis der mikrobiellen DNA (BERGMANN et al. 2010). Dargestellt sind die Mittelwerte von drei technischen Replikaten für jeweils zwei biologische Replikate (BERGMANN und KLOCKE 2015).

Unter thermophilen Bedingungen waren keine vergleichbaren Verschiebungen zwischen Prozessflüssigkeit und Biofilm in den Anteilen innerhalb der einzelnen taxonomischen Gruppen der methanogenen *Archaea* zu beobachten. Sowohl in der Prozessflüssigkeit als auch in dem Biofilm auf der Reaktorwandung wurden überwiegend Vertreter der hydrogenotrophen Gattung *Methanothermobacter* (84–86 %) gefunden.

Bei der Zugabe von frei beweglichen Aufwuchsträgern in den Reaktorraum bewachsen diese je nach Material bzw. Oberflächenbeschaffenheit in relativ kurzer Zeit mit einem methanogenen Biofilm. Mittels konfokaler Laserscanningmikroskopie konnte innerhalb von 24 h die Bildung eines Biofilms von durchschnittlich 4–6 µm beobachtet werden. Interessanterweise ermöglichten diese Aufwuchsträger unter mesophilen Bedin-

gungen eine deutliche Anreicherung von acetoklastischen Methanbildner aus der Gattung *Methanosaeta*. Hydrogenotrophe Methanbildner konnten sich in diesem Biofilm dagegen nur in Spuren (1–6 %) ansiedeln.

Bei thermophilen Temperaturen wurden die Aufwuchsträger ebenso wie die Reaktorwandung vorrangig von Vertretern der Gattung *Methanothermobacter* (*Methanobacteriales*) besiedelt. Im Unterschied zu dem Biofilm auf der Reaktorwandung traten im Biofilm auf dem Aufwuchsträger jedoch auch noch hydrogenotrophe Methanbildner anderer taxonomischer Gruppen auf. Insbesondere konnte in diesem Biofilm eine gewisse Anreicherung (22–28 %) der Gattung *Methanoculleus* (*Methanomicrobiales*) festgestellt werden.

In allen untersuchten CSTR war das Verhältnis zwischen methanogenen *Archaea* und hydrolytisch/acidogenen *Bacteria*, ermittelt auf Basis der Häufigkeit der jeweiligen 16S-rRNA-Gene, relativ niedrig (Abb. 1). Die entsprechenden Werte bewegten sich zwischen 0,01 und 0,1, wobei unter mesophilen Bedingungen keine Unterschiede zwischen Prozessflüssigkeit und Biofilmen auftraten. Unter thermophilen Bedingungen war dagegen die Prozessflüssigkeit im Verhältnis zu den Biofilmen mit methanogenen *Archaea* angereichert.

3 Verteilung der methanogenen Archaea in zweistufigen Reaktorsystemen

Zur ausschließlichen Vergärung von pflanzlicher Biomasse wurden in jüngerer Zeit zweistufige, phasengetrennte Fermentersysteme entwickelt (vgl. KLOCKE et al. 2013). Hierbei wird das pflanzliche Gärsubstrat in einer ersten Fermenterstufe einem *Bioleaching* unterzogen. Die Gärungsprodukte der ersten Abbauphasen, kurzkettige Carbonsäuren und Alkohole aber auch gelöste Gase wie CO₂ und H₂, werden mit der Prozessflüssigkeit in eine zweite Fermenterstufe überführt, wo sie vorrangig zu Methan umgewandelt werden. Typischerweise ist daher diese zweite Fermenterstufe als Festbettreaktor (Anaerobfilter) konstruiert. Durch die Füllung dieser Fermenterstufe mit Aufwuchsträgern erfolgt eine effiziente Besiedlung einer methanogenen mikrobiellen Biozönose. Gleichzeitig wird damit eine effiziente Rückhaltung der mikrobiellen Biomasse bewirkt.

Im Unterschied zu den zuvor untersuchten CSTR war in der Prozessflüssigkeit eines mesophil betriebenen zweistufigen Laborreaktors eine Anreicherung von Vertretern der *Methanomicrobiales* zu beobachten (Abb. 1). In erster Linie handelte es sich dabei um *Methanospirillum* spp., einem hydrogenotrophen Methanbildner. Gegenüber einem CSTR ebenfalls deutlich häufiger vertreten waren acetoclastische Methanbildner der Gattung *Methanosaeta* (36–40 % der mittels qPCR nachgewiesenen Kopien für das archaelle 16S-rRNA-Gen). Bei thermophilen Betriebstemperaturen reicherten sich in der Prozess-

flüssigkeit neben hydrogenotrophen *Methanothermobacter* spp. auch mixotrophe *Methanosarcina* sp. an (51–61 %). Insbesondere unter thermophilen Bedingungen scheint sich in der Prozessflüssigkeit von zweistufigen Reaktorsystemen eine wesentlich flexiblere Methanogenengemeinschaft zu etablieren als in einem CSTR.

Die in der Prozessflüssigkeit gefundene Zusammensetzung der methanogenen *Archaea*-Gemeinschaft fand sich in vergleichbarer Form auch in den Biofilmen in der zweistufigen Anlage wieder, sowohl in dem Biofilm auf dem pflanzlichen Gärsubstrat bzw. -rest in der *Bioleaching*-Stufe als auch in dem Biofilm auf den Aufwuchsträgern im Anaerobfilter. Hierbei war jedoch generell eine Verschiebung hin zu deutlich erhöhten Anteilen an acetoklastischen (unter mesophilen Bedingungen) bzw. mixotrophen Methanbildnern (unter thermophilen Bedingungen) zu beobachten. Insbesondere der Biofilm im Anaerobfilter bestand bei mesophilen Temperaturen (69–79 %) aus strikt acetoklastischen Methanbildnern der Gattung *Methanosaeta*. Bei thermophilen Temperaturen wurde diese ökologische Nische offensichtlich durch mixotrophe Vertreter aus der Gattung *Methanosarcina* übernommen, mit Anteilen zwischen 91–92 %.

Das Verhältnis zwischen methanogenen *Archaea* und hydrolytisch/acidogenen *Bacteria*, ermittelt auf Basis der Häufigkeit der jeweiligen 16S-rRNA-Gene, war in dem zweistufigen System gegenüber dem CSTR und unabhängig von der Temperatur deutlich erhöht (Abb. 1). Insbesondere in dem Biofilm auf den Aufwuchsträgern des Anaerobfilters kam es zu einer massiven Anreicherung methanogener *Archaea* bis hin zu einer Gleichverteilung mit den hydrolytisch/acidogenen *Bacteria*. Diese Ergebnisse unterstreichen deutlich den Vorteil der Einbindung von biofilm-basierten Komponenten in einen Biogasreaktor hinsichtlich der gewünschten Anreicherung methanogener Mikroorganismen.

4 Zusammensetzung der hydrolytisch/acidogenen *Bacteria*-Begleitflora im methanogenen Biofilm

Insbesondere der Biofilm auf den Aufwuchsträgern in einem Anaerobfilter besitzt eine zur Biomethanisierung von Gärsäuren und -alkoholen spezialisierte mikrobielle Gemeinschaft. Neben entsprechend spezialisierten Vertretern der methanbildenden *Archaea* muss hierzu auch eine ebenso spezialisierte bakterielle Begleitflora gehören.

Die Isolierung und Kultivierung der mit den methanbildenden *Archaea* assoziierten *Bacteria* im Labor ist aufgrund der symbiotischen Interaktionen sowie der speziellen Lebensbedingungen nur selten erfolgreich. Moderne Hochdurchsatzverfahren ermöglichen jedoch eine Ermittlung und Analyse der gesamten in dem System enthaltenen mikrobiellen DNA (= Metagenom) in vergleichsweise kurzer Zeit und mit vergleichsweise geringem systematischem Fehler.

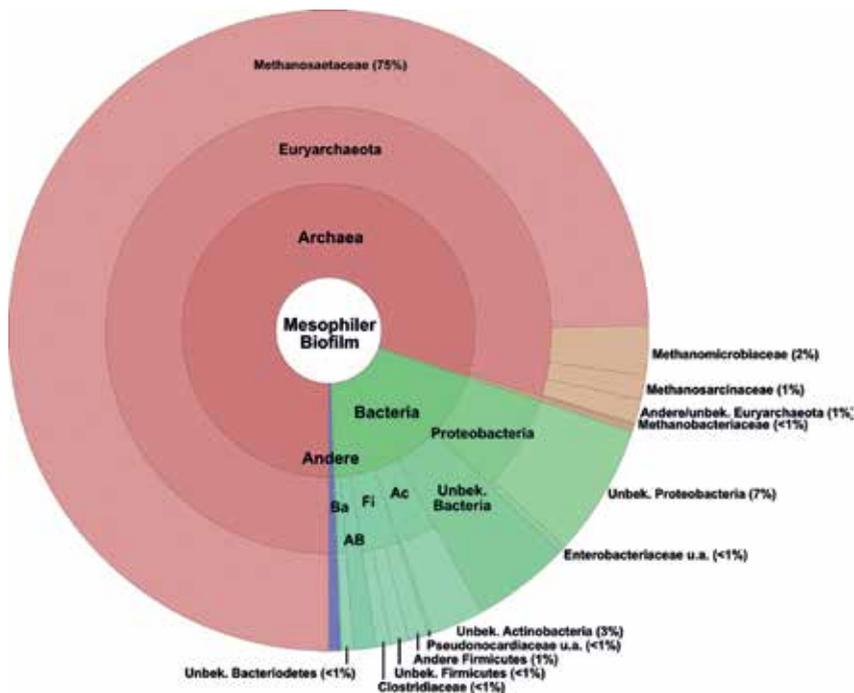


Abb. 2: Struktur des Biofilms auf den Aufwuchsträgern eines Anaerobfilters eines zweistufigen Biogasreaktorsystems mit Bioleaching unter mesophilen (37 °C) Bedingungen. Dargestellt ist die taxonomische Zuordnung (Lowest-common-ancestor-Analyse) der identifizierbaren mikrobiellen DNA-Sequenzen (> 2,5 Mio. = 100 %) erhalten aus einer Hochdurchsatzsequenzierung der gesamten mikrobiellen DNA (BERGMANN und KLOCKE 2015). Ba: *Bacteroides*, Fi: *Firmicutes*, Ac: *Actinobacteria*, UB: unbekannte *Bacteria*, AB: andere *Bacteria*.

Zur Erfassung des mikrobiellen Metagenoms einer Biofilm-Probe aus einem mesophilen (37 °C) und einem thermophilen (55 °C) Anaerobfilters eines zweistufigen Biogasreaktor-Systems wurden über 11 (37 °C) bzw. 8 Mio. (55 °C) DNA-Sequenzen ermittelt. Mittels Lowest-common-ancestor(LCA)-Analyse (RADEMACHER et al. 2012) konnten zwischen 22 (37 °C) und 25 % (55 °C) dieser DNA-Sequenzen bekannten Referenzen zugeordnet werden. Dieser auf den ersten Blick geringe Anteil an identifizierbaren DNA-Sequenzen deckt sich mit den bisher veröffentlichten Metagenomstudien von Biogasreaktoren und vergleichbaren Habitaten und ist ein Indiz für einen hohen Anteil unbekannter Mikroorganismen in dem System.

Wie erwartet, zeigte das Metagenom des mesophilen Biofilms eine deutliche Dominanz von acetoklastischen *Methanosaeta* sp. (> 1,8 Mio. DNA-Sequenzen, >72 % der identifizierbaren DNA-Sequenzen), während im thermophilen Biofilm vermutlich mixotrophe Vertreter der Gattung *Methanosarcina* überwogen (> 1,3 Mio. DNA-Sequenzen,

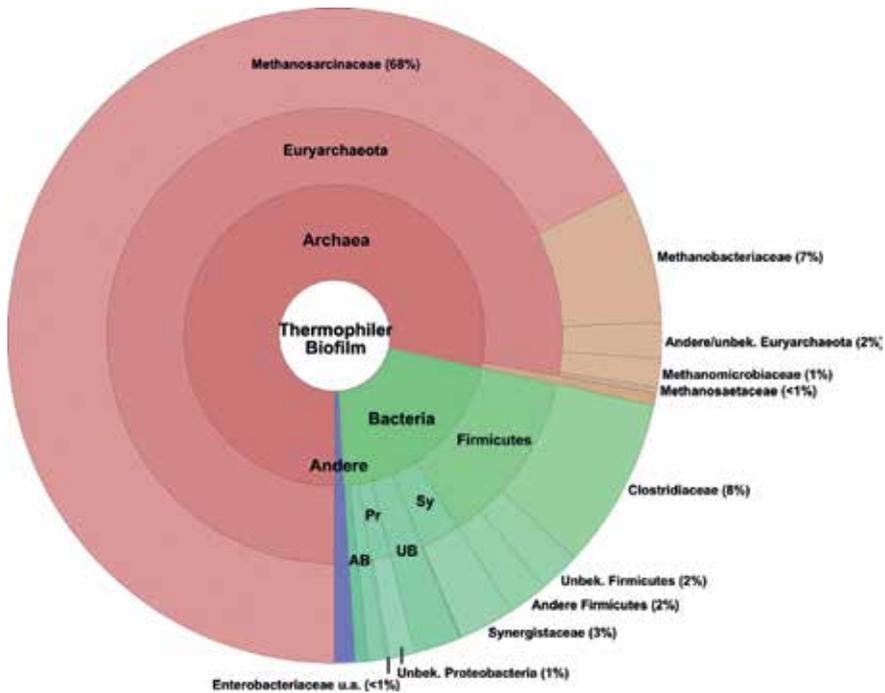


Abb. 3: Struktur des Biofilms auf den Aufwuchsträgern eines Anaerobfilters eines zweistufigen Biogasreaktorsystems mit *Bioleaching* unter thermophilen (55 °C) Bedingungen. Dargestellt ist die taxonomische Zuordnung (Lowest-common-ancestor-Analyse) der identifizierbaren mikrobiellen DNA-Sequenzen (>2,1 Mio. = 100 %) erhalten aus einer Hochdurchsatzsequenzierung der gesamten mikrobiellen DNA (BERGMANN und KLOCKE 2015). Sy: *Synergistetes*, Pr: *Proteobacteria*, UB: unbekannte *Bacteria*, AB: andere *Bacteria*.

> 65 % der identifizierbaren DNA-Sequenzen). Die relative Zusammensetzung der Metagenome ist in den Abbildungen 2 und 3 dargestellt.

In der bakteriellen Begleitflora dominierten im mesophilen Biofilm Vertreter aus der Klasse *Delta-Proteobacteria*, insbesondere aus der Gattung *Syntrophus*. Bisher bekannte Vertreter dieser Gattung sind an dem Abbau von aromatischen Carbonsäuren (z.B. Benzoesäure) und kurzkettigen Fettsäuren (z.B. Krotonsäure) zu Essigsäure beteiligt, wobei das Substratverwertungsspektrum jedoch größer ist, wenn eine syntrophe Beziehung zu einem Wasserstoff und/oder Essigsäure verbrauchenden Mikroorganismus ausgebildet werden kann (AUBURGER und WINTER 1995, SCHOCKE und SCHINK 1997, JACKSON et al. 1999).

Obwohl weder *Methanosaeta* als acetoklastischer Methanbildner noch *Syntrophus* als fermentatives Bakterium zwingend auf einen syntrophen Partner angewiesen sind, scheint die Verbindung in dem Biofilm vorteilhaft zu sein, da das Spektrum vergärbare Kohlenstoffverbindungen erweitert wird. DNA-Sequenzen für *Syntrophus* wur-

den jedoch nur mit einem Anteil von 2,3 % aller identifizierbaren DNA-Sequenzen gefunden, was verglichen mit der Häufigkeit von DNA-Sequenzen für *Methanosaeta* vergleichsweise wenig ist. Dieses spricht dafür, dass der Aromat-Abbau durch *Syntrophus* nur einen Seitenweg in der Abbauroute darstellt. Nichtsdestotrotz werden ähnliche Beziehungen auch zu den meisten der bislang noch unbekanntem Bakterien in dem Biofilm bestehen.

In dem thermophilen Biofilm fanden sich nur extrem wenige (*i.e.* 255) DNA-Sequenzen, die der Gattung *Syntrophus* zugeordnet werden konnten. Deutlich angereichert gegenüber dem mesophilen Biofilm waren dagegen Vertreter der Gattung *Clostridium* (Stamm *Firmicutes*, Klasse *Clostridia*) mit ca. 10-mal mehr identifizierbaren DNA-Sequenzen im thermophilen als im mesophilen Biofilm (>8 % der identifizierbaren DNA-Sequenzen). Wie im Falle von *Syntrophus* sind auch aus dieser Gattung Arten bekannt, die syntrophe Beziehungen zu Methanbildnern aufnehmen können. Bekanntestes Beispiel dafür ist *C. ultunense*, das in Verbindung mit einem Wasserstoff zehrenden Methanbildner zur Oxidation von Essigsäure befähigt ist (SCHNÜRER et al. 1996). Alle bisher beschriebenen Vertreter von *C. ultunense* sind jedoch an mesophile Temperaturen angepasst, wohingegen der untersuchte Biofilm sich in einem thermophilen Fermenter entwickelt hat.

Mit 2,7 % der identifizierbaren DNA-Sequenzen ebenfalls im thermophilen Biofilm häufig vertreten waren Vertreter der Gattung *Anaerobaculum* (Stamm *Synergistetes*, Klasse *Synergistia*). Im Unterschied zur Gattung *Clostridium* mit über 130 beschriebenen Arten sind für *Anaerobaculum* bislang erst drei Arten beschrieben. Alle diese Arten zeigen optimales Wachstum bei moderat thermophilen Bedingungen um 55 °C und neutralem pH. Bei allen Arten handelt es sich um fermentative Abbauer von Kohlenhydraten, Proteinen und kurzkettigen Fettsäuren mit Essigsäure, Kohlendioxid und molekularem Wasserstoff als vorrangige Endprodukte der Gärung (MENES und MUXI 2002, REES et al. 1997, MAUNE und TANNER 2012). Syntrophe Beziehungen wurden für die Gattung *Anaerobaculum* noch nicht berichtet. Es ist aber zu vermuten, dass die räumliche Nähe zu einem mixotrophen Methanbildner wie *Methanosarcina*, der in der Lage ist, sowohl Essigsäure als auch Kohlendioxid in Verbindung mit Wasserstoff zu konsumieren, grundsätzlich den Substratumsatz von *Anaerobaculum* fördert.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Biofilme sind komplexe und dynamische mikrobielle Gemeinschaften aus unterschiedlichen Arten von Mikroorganismen, welche in der Lage sind, die zur Verfügung stehenden Nährstoffe optimal auszunutzen. In Biogasreaktoren bilden sich je nach Konstruktion und Betriebsweise unterschiedliche methanogene Biofilme aus, deren Zusammensetzung sich deutlich von der planktonischen Gemeinschaft in der Prozessflüssigkeit unterscheidet. Durch die Bereitstellung geeigneter Oberflächen wird eine verstärkte Ansiedlung insbesondere solcher methanogener Archaea ermöglicht, die in der Prozessflüssigkeit durch schnellwachsende (hydrogenotrophe) Methanbildner verdrängt werden. Dieses führt zu einer Diversifizierung nicht nur innerhalb der mikrobiellen Lebensgemeinschaft, sondern auch innerhalb der Stoffwechselwege zur Biomethanisierung. Ebenso wird die Ausbildung von kooperativen syntrophischen Gemeinschaften aus fermentativen *Bacteria* und methanogenen *Archaea* gefördert, wodurch eine vollständigere Ausnutzung der Gärungsprodukte ermöglicht wird.

Die Einbindung von Biofilm-Trägern bzw. -Reaktoren in Biogasreaktorkonzepte wirkt sich positiv auf die mikrobielle und metabolische Vielfalt in einem Biogasreaktor aus. Es ist zu vermuten, dass dadurch sowohl die Prozessstabilität als auch die Anpassungsfähigkeit auf veränderte Prozessbedingungen positiv beeinflusst werden. Zur Aufklärung der Funktion von methanogenen Biofilmen und deren Einfluss auf die Abbaueffizienz sind jedoch weitere Arbeiten, insbesondere auch zur Identifizierung und Charakterisierung der weitgehend unbekanntenen bakteriellen Begleitflora, erforderlich.

Literatur

- Auburger, G.; Winter, J. (1995): Isolation and physiological characterization of *Syntrophus buswellii* strain GA from a syntrophic benzoate degrading strictly anaerobic coculture. Appl. Microbiol. Biotechnol. 44, pp. 241–248
- Bergmann, I.; Klocke, M. (2015): Biofilme in Biogasanlagen – Struktur, Einfluss auf die Biogasausbeute und Optimierung technischer Systeme zur Rückhaltung der mikrobiellen Biomasse. Bornimer Agrartechnische Berichte 87, S. 1–164
- Bergmann, I.; Mundt, K.; Sontag, M.; Baumstark, I.; Nettmann, E.; Klocke, M. (2010): Influence of DNA isolation on Q-PCR based quantification of methanogenic Archaea in biogas fermenters. Syst. Appl. Microbiol. 33, pp. 78–84
- Jackson, B.E.; Bhupathiraju, V.K.; Tanner, R.S.; Woese, C.R.; McInerney, M.J.: *Syntrophus aciditrophicus* sp. nov., a new anaerobic bacterium that degrades fatty acids and benzoate in syntrophic association with hydrogen-using microorganisms. Arch. Microbiol. 171, pp. 107–114

- Klocke, M.; Rademacher, A.; Bergmann, I. (2013): Mikrobielles Leben im Biogasfermenter. In: Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft (Hg.): Biogas in der Landwirtschaft – Stand und Perspektiven, S. 71–80
- Lettinga, G.; Van Velsen, A.F.M.; Hobma, S.W.; De Zeeuw, W.; Klapwijk, A. (1980): Use of the upflow sludge blanket (USB) reactor concept for biological wastewater treatment, especially for anaerobic treatment. *Biotechnol. Bioeng.* 22, pp. 699–734
- Maune, M.W.; Tanner, R.S. (2012): Description of *Anaerobaculum hydrogeniformans* sp nov., an anaerobe that produces hydrogen from glucose, and emended description of the genus *Anaerobaculum*. *Int. J. Syst. Evol. Microbiol.* 62, pp. 832–838
- McBee, R.H. (1954). The characteristics of *Clostridium thermocellum*. *J. Bacteriol.* 67, pp. 505–506
- Menes, R.J.; Muxi, L. (2002): *Anaerobaculum mobile* sp nov., a novel anaerobic, moderately thermophilic, peptide-fermenting bacterium that uses crotonate as an electron acceptor, and emended description of the genus *Anaerobaculum*. *Int. J. Syst. Evol. Microbiol.* 52, pp. 157–164
- Rademacher, A.; Zakrzewski, M.; Schlüter, A.; Schönberg, M.; Szczepanowski, R.; Goesmann, A.; Pühler, A.; Klocke, M. (2012): Characterization of microbial biofilms in a thermophilic biogas system by high-throughput metagenome sequencing. *FEMS Microbiol. Ecol.* 79, pp. 785–799
- Rees, G.N.; Patel, B.K.C.; Grassia, G.S.; Sheehy, A.J. (1997): *Anaerobaculum thermoterrenum* gen nov, sp nov, a novel, thermophilic bacterium which ferments citrate. *Int. J. Syst. Bacteriol.* 47, pp. 150–154
- Schink, B. (1997): Energetics of syntrophic cooperation in methanogenic degradation. *Microbiol. Mol. Biol. Rev.* 61, pp. 262–280
- Schmidt, J. E.; Ahring, B. K. (1996): Granular sludge formation in upflow anaerobic sledge blanket (UASB) reactors. *Biotechnol. Bioeng.* 49, pp. 229–246
- Schnürer, A.; Schink, B.; Svensson, B.H. (1996): *Clostridium ultunense* sp nov, a mesophilic bacterium oxidizing acetate in syntrophic association with a hydrogenotrophic methanogenic bacterium. *Int. J. Syst. Bacteriol.* 46, pp. 1145–1152
- Schocke, L.; Schink, B. (1997): Energetics of methanogenic benzoate degradation by *Syntrophus gentianae* in syntrophic coculture. *Microbiology* 143, pp. 2345–2351

Danksagung

Die Autoren danken dem Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL) und der Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR) als Projektträger für die finanzielle Unterstützung dieser Studie (Förderkennzeichen 22016308). Ebenfalls danken die Autoren der AG Pühler vom Centrum für Biotechnologie der Universität Bielefeld für die freundliche und konstruktive Zusammenarbeit im Rahmen dieses Forschungsvorhabens.

Charakterisierung mikrobieller Gemeinschaften in kommerziellen Biogasanlagen – Ansätze zur Prozessoptimierung

ULRICH KRAUSE, SABINE PETERS

1 Einleitung

Die AMODIA Bioservice GmbH wurde 2000 gegründet und bietet Produkte und Dienstleistungen im Bereich der Angewandten MOlekularen DIAgnostik an.

Grundlage des Beitrags ist ein FNR-Vorhaben (FKZ: 22005812) mit dem Titel „Analyse der mikrobiellen Besiedlung in kommerziellen Biogasanlagen als Basis einer Entwicklung von Schnelltests auf Leitkeime“.

2 Grundlagen

2.1 Das FNR-Projekt

Unter dem Projekttitel „Analyse der mikrobiellen Besiedlung in kommerziellen Biogasanlagen als Basis einer Entwicklung von Schnelltests auf Leitkeime“ wurden mikrobielle Gemeinschaften in kommerziell genutzten Fermentern untersucht. Es sollte geklärt werden, ob sich in diesen Anlagen sogenannte „Leitkeime“ finden lassen; also Mikroorganismen, deren Vorkommen anzeigt, ob der Prozess stabil läuft oder gestört ist. Weitere Projektziele waren ein verbessertes Verständnis der Prozesse während der Fermentation in unterschiedlichen Biogasfermentern sowie eine daraus abgeleitete verbesserte Steuerung dieser Prozesse.

Die kommerziellen Biogasanlagen wurden anhand folgender Kriterien ausgewählt:

- Fermentervolumina oberhalb von 1.000 m³
- Fütterung überwiegend mit Nachwachsenden Rohstoffen (NawaRo)
- Biogasanlagen mit einem und zwei Fermentern
- Stabile und weniger stabile Anlagen
- Spezialfälle zum Vergleich (Versuchs-, „Bio-Biogas“- und Abfallanlagen).

Es konnten vier Firmen, die Biogasanlagen betreuen, dafür gewonnen werden, Proben und Daten von Fermentern zur Verfügung zu stellen.

2.2 Mikroorganismen im Fermentationsprozess

Im Fermentationsprozess setzen unterschiedlich spezialisierte Mikroorganismen das Substrat in Zwischenprodukte um, die wiederum in Methan, Kohlenstoffdioxid und Wasser umgewandelt werden. Abbildung 1 zeigt die Stoffströme, die chemischen Reaktionen und die dafür verantwortlichen Mikroorganismen.

Das Substrat, das aus polymeren Biomolekülen wie Polysacchariden, Proteinen und Fetten besteht, wird zunächst per Hydrolyse in seine Oligo- bzw. Monomere zerlegt. Dies erfolgt durch hydrolytische Bakterien. Der weitere Abbau der Oligo- und Monomere führt über die Acidogenese zu einer Versäuerung des Fermenters, da hierbei organische Säuren entstehen. Diese chemischen Prozesse, die mit kurzkettigen organischen Säuren als Produkt enden, werden ebenso von Bakterien katalysiert wie die Acetogenese, bei der z. B. Glucose zu Essigsäure, Wasserstoff und Kohlenstoffdioxid umgesetzt wird.

Wenn die gebildeten Säuren nicht abgebaut werden, beeinträchtigt dies die Bedingungen für das Überleben der Bakterien. Dem muss durch Abbau der entstandenen Säuren, vor allem der Essigsäure, entgegengewirkt werden. Ein Prozess ist dabei die Acetatoxidation, bei der die Essigsäure mit Wasser zu Kohlenstoffdioxid und Wasserstoff reagiert. Dieser Prozess wird von Bakterien katalysiert, die auch als „Syntrophe“ bezeichnet werden.

Nach dem Abbau der langkettigen Biomoleküle erfolgt die Methanbildung auf zwei chemischen Wegen: bei der acetoklastischen Methanogenese wird Essigsäure zusam-

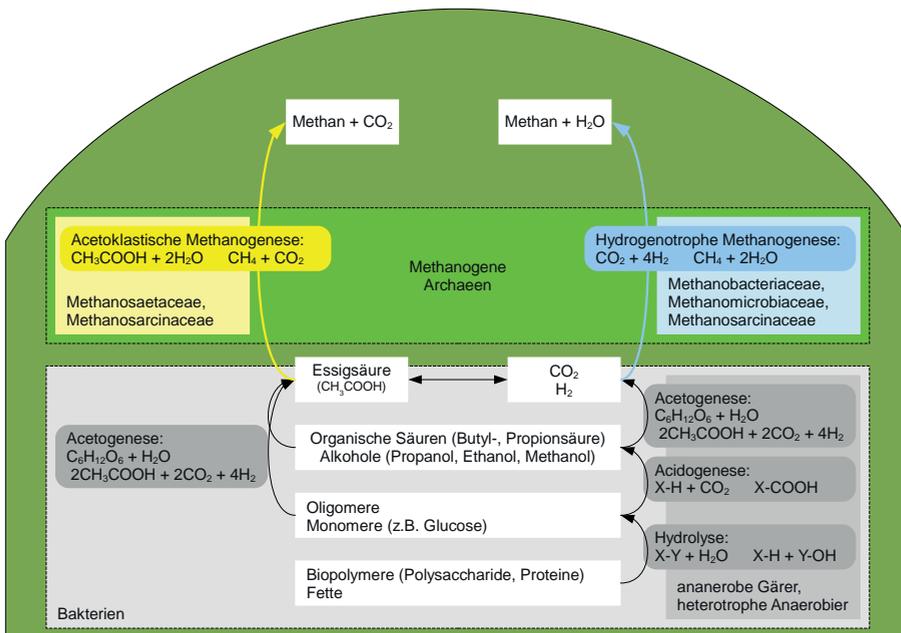


Abb. 1: Stoffströme, chemische Reaktionen (Auszug) zur Umsetzung und beteiligte Mikroorganismen in einer Biogasanlage

men mit Wasser direkt zu Methan und Kohlenstoffdioxid umgesetzt. Bei der hydrogenotrophen Methanogenese reagieren Wasserstoff und Kohlenstoffdioxid unter Abspaltung von Wasser zu Methan. Beide Prozesse der Methanogenese werden durch methanogene Archaeen katalysiert.

Für jeden der o. g. Reaktionsschritte sind jeweils andere, spezialisierte Mikroorganismen zuständig. Kenntnisse über die im Fermenter vorhandenen Mikroorganismen erlauben daher Rückschlüsse auf die möglichen Reaktionswege und damit den Fermentationsprozess.

2.3 Molekulare Analyse mikrobieller Gemeinschaften

Die Identifizierung der Mikroorganismen erfolgt anhand des in Abbildung 2 gezeigten Ablaufschemas für die DNA sämtlicher in einer Probe enthaltenen Bacteria bzw. Archaeen. Damit ist die Methode unabhängig von der Kultivierbarkeit der Mikroorganismen.

Zunächst wird aus der Probe die gesamte genomische DNA extrahiert, von der anschließend ein variabler Abschnitt der 16S rRNA der Mikroorganismen vervielfältigt wird. Diese mit universellen Primern gewonnenen DNA-Fragmente sind zwar gleich lang, haben jedoch je nach Spezies unterschiedliche Sequenzen. Mit Hilfe der SSCP-Technik (s. u.) werden diese DNA-Fragmente anhand ihrer Sequenz aufgetrennt: Jede Probe entspricht einer Spur, und jede Bande in der Spur enthält DNA gleicher Sequenz. Dabei entsprechen unterschiedliche Banden auf dem Gel in der Regel auch unterschiedlichen Spezies.

In einem zweiten Schritt wird die Sequenz der DNA in jeder dieser Banden ermittelt. Schließlich werden diese Sequenzen mittels einer Datenbankabfrage mit Sequenzen bekannter Mikroorganismen verglichen („closest described relative“) und so identifiziert.

SSCP steht für „single-strand conformation polymorphism“. Die Technik nutzt die Tatsache, dass einzelsträngige DNA mit sich selbst hybridisiert. Dabei bilden sich bei

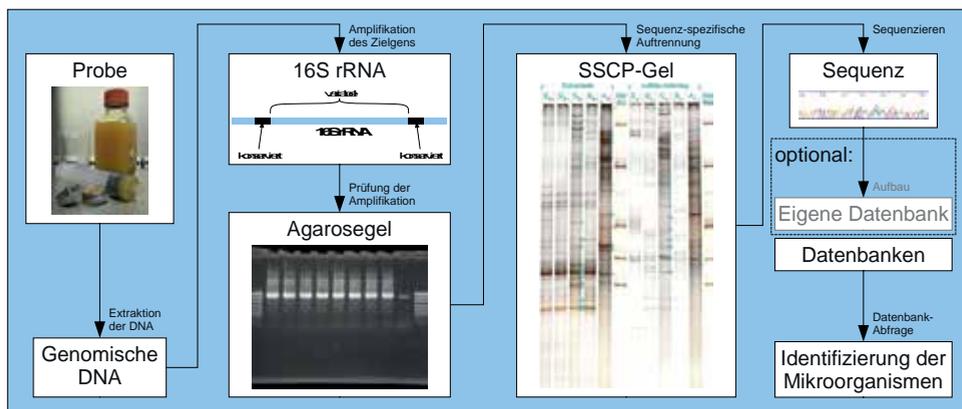


Abb. 2: Ablaufschema der molekularbiologischen Analyse mikrobieller Gemeinschaften

unterschiedlichen Sequenzen unterschiedliche, aber definierte räumliche Konformationen des einzelsträngigen DNA-Moleküls aus. Diese Unterschiede führen zur Auftrennung im Gel.

3 Ergebnisse des FNR-Projektes

Nach vorbereitenden Arbeiten zur Anpassung der molekularen Methode an das Probenmaterial konnte gezeigt werden, dass die untersuchten Volumina für die molekulare Methode (≈ 1 ml) repräsentativ für die Proben aus den Fermentern (Volumina von 200 bis 500 ml) sind.

In einem ersten Screening wurden insgesamt 72 Biogasfermenter einmalig beprobt, darunter Anlagen von über 5 Herstellern mit einem bzw. zwei Fermentern. Daraus wurden 28 Fermenter in das Monitoring über 12 Monate aufgenommen. Andere einmalige Beprobungen, aus einer Versuchsanlage, einer Anlage für Bio-Biogas (Substrat aus ökologischer Landwirtschaft) sowie drei Abfallanlagen, wurden zu Vergleichszwecken untersucht.

3.1 Identifizierte Mikroorganismen und deren Stoffwechseleigenschaften

Tabelle 1 zeigt eine kleine Auswahl der identifizierten Mikroorganismen, von denen die Stoffwechseleigenschaften bekannt sind:

Tab. 1: Stoffwechsel identifizierter Mikroorganismen aus Biogasanlagen

Identifizierte Spezies	Stoffwechseleigenschaft
<i>Methanosaeta concilii</i>	Nur acetoklastische Methanogenese: $\text{CH}_3\text{COOH} \rightarrow \text{CH}_4 + \text{CO}_2$
<i>Methanosarcina barkeri</i>	Acetoklastische und hydrogenotrophe Methanogenese: $\text{CH}_3\text{COOH} \rightarrow \text{CH}_4 + \text{CO}_2$ und $\text{CO}_2 + \text{H}_2 \rightarrow \text{CH}_4$
<i>Methanoculleus bourgensis</i>	Nur hydrogenotrophe Methanogenese: $\text{CO}_2 + \text{H}_2 \rightarrow \text{CH}_4$
<i>Clostridium thermocellum</i>	Hydrolyse: allg.: $\text{X-Y} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{X-H} + \text{Y-OH}$
<i>Sporotomaculum syntrophicus</i>	Acetatoxidation bzw. Wasserstoffsynthese: $\text{CH}_3\text{COOH} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow 4 \text{H}_2 + 2 \text{CO}_2$

Für die hydrogenotrophe Methanogenese benötigen die methanogenen Archaeen Bakterien, die ihnen den notwendigen Wasserstoff liefern. Diese werden häufig auch als „syntrophe Bakterien“ bezeichnet, da sie mit den Methanogenen in räumlicher Nähe leben und nur in dieser engen Beziehung den Wasserstoff bereitstellen. Daher sollten hohe Anteile hydrogenotropher Methanogener mit hohen Anteilen Wasserstoff produzierender Bakterien korrelieren.

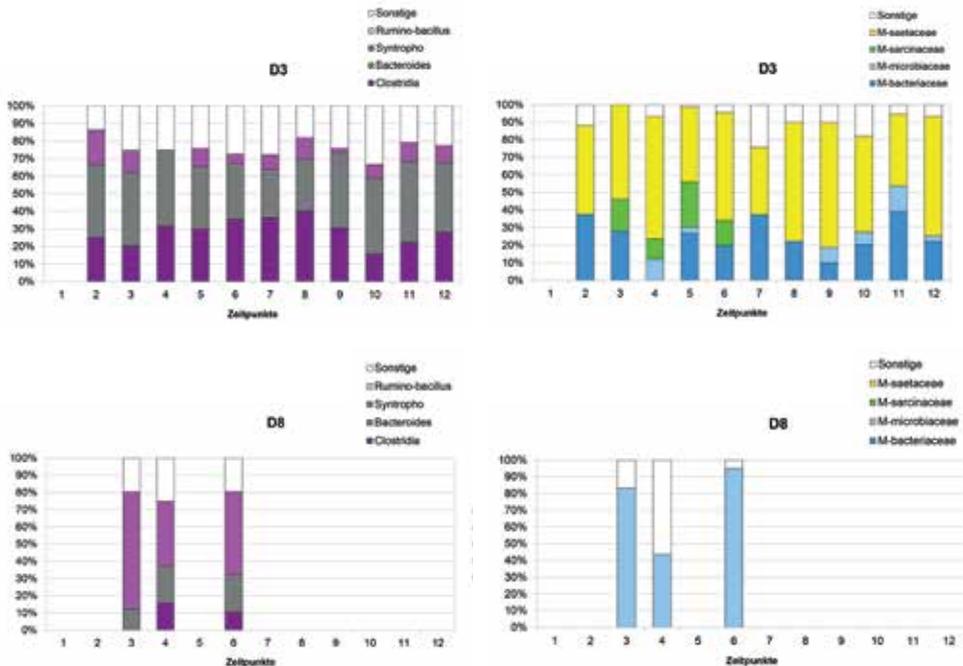


Abb. 3: Korrelationen zwischen dem Anteil der Wasserstoff produzierenden (syntrophen) Bakterien (linke Grafik, Balken ■) und darauf angewiesenen Methanogenen (rechte Grafik, Balken ■ und ■) für die Anlagen D3 (oben) mit geringem und D8 (unten) mit hohem Anteil Syntrophe

Leider sind in der Literatur nicht viele Bakterien als „Wasserstoff produzierend“ bzw. syntroph beschrieben. Jedoch zeigen die Grafiken in Abbildung 3, dass für einige Anlagen dieser Zusammenhang tatsächlich gezeigt werden kann:

3.2 Kategorisierung von Biogasanlagen

Die Analyse der methanogenen Archaeen zeigte, dass sämtliche nachgewiesenen Vertreter lediglich aus vier Familien stammen: Methanosaetaceae, Methanosarcinaceae, Methanomicrobiaceae und Methanobacteriaceae (Tab. 2).

Tab. 2: Stoffwechseleigenschaften nachgewiesener methanogener Archaeen

Familie	Identifizierte Spezies	Methanogenese
Methanosaetaceae	<i>Methanosaeta concilii</i>	nur acetoklastisch: $\text{CH}_3\text{COOH} \rightarrow \text{CH}_4 + \text{CO}_2$
Methanosarcinaceae	<i>Methanosarcina siciliae</i> <i>Methanosarcina barkeri</i> <i>Methanosarcina thermophila</i>	beide Wege: $\text{CH}_3\text{COOH} \rightarrow \text{CH}_4 + \text{CO}_2$ $\text{CO}_2 + \text{H}_2 \rightarrow \text{CH}_4$
Methanomicrobiaceae	<i>Methanoculleus bourgensis</i> <i>Methanoculleus receptaculi</i>	nur hydrogenotroph: $\text{CO}_2 + \text{H}_2 \rightarrow \text{CH}_4$
Methanobacteriaceae	<i>Methanobacterium formicum</i> <i>Methanobacterium subterraneum</i> <i>Methanobrevibacter millerae</i>	nur hydrogenotroph: $\text{CO}_2 + \text{H}_2 \rightarrow \text{CH}_4$

Weiterhin treten diese Familien in den untersuchten kommerziellen Biogasanlagen lediglich in vier unterschiedlichen Konstellationen auf:

- Nahezu 100 % Methanobacteriaceae und Methanomicrobiaceae
- Methanosaetaceae, Methanobacteriaceae und Methanomicrobiaceae
- Vertreter aus allen vier gefundenen Familien
- Methanosarcinaceae, Methanobacteriaceae und Methanomicrobiaceae.

Die Grafiken in Abbildung 4 zeigen entsprechende Beispiele.

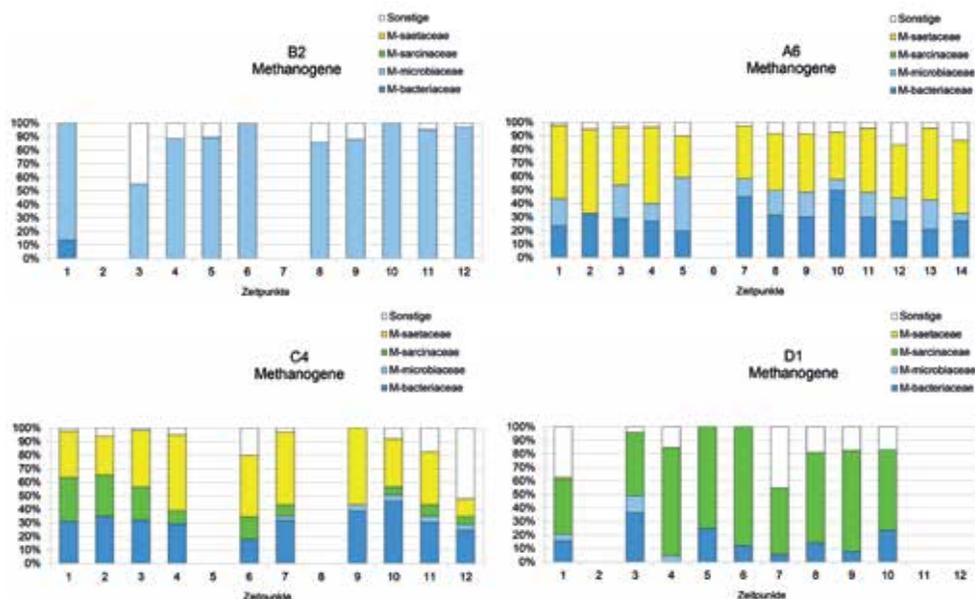


Abb. 4: Typische Konstellationen der methanogenen Familien in Biogasanlagen: links oben: nahezu 100 % Methanobacteriaceae und Methanomicrobiaceae; rechts oben: Methanosaetaceae, Methanobacteriaceae und Methanomicrobiaceae; links unten: alle 4 Familien, rechts unten: Methanosarcinaceae, Methanobacteriaceae und Methanomicrobiaceae

Diese vier Konstellationen konnten mit physikalisch-chemischen Eigenschaften verknüpft werden (Tabelle 3), sodass eine vorläufige Einteilung in vier Biogasanlagen-Kategorien (BAK) vorgenommen wurde.

Tab. 3: Biogasanlagen-Kategorien (BAK) aufgrund der vorhandenen Methanogenen

Kategorie	Merkmal	Physikalisch-chemische Eigenschaften
BAK1	Nahezu 100 % hydrogenotrophe Methanogene	Hohe Raumbelastung Thermophile Anlagen
BAK2	Methanosaetaceae und hydrogenotrophe Methanogene	Niedrige Stickstoffkonzentration (< 2 g/kg) Niedriger Trockensubstanzanteil (TS: 4–8 %)
BAK3	Methanosaetaceae, Methanosarcinaceae und hydrogenotrophe Methanogene	Mittlere Stickstoffkonzentration (3–4 g/kg), Mittlerer Trockensubstanzanteil (TS: 7–10 %)
BAK4	Methanosarcinaceae und hydrogenotrophe Methanogene	Hohe Stickstoffkonzentration (> 4 g/kg), Hoher Trockensubstanzanteil (TS: 8–21 %)

Andere Konstellationen der methanogenen Familien (z. B. Kombinationen ohne obligat hydrogenotrophe Methanogene) wurden nicht gefunden. Diese Einteilung ist nur als vorläufig anzusehen. Weitere bzw. detailliertere Kategorisierungen sind möglich.

Die Anzahl der von uns untersuchten 28 Anlagen pro Kategorie zeigt Abbildung 5.

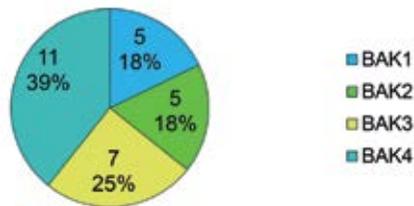


Abb. 5: Verteilung der 28 untersuchten Biogasanlagen auf die Kategorien

In den meisten der untersuchten Biogasanlagen dominiert also eine Kombination aus Methanosarcinaceae und obligat hydrogenotrophen Archaeen (BAK4).

3.3 Veränderungen mikrobieller Gemeinschaften

Die meisten Fermenter veränderten ihre BAK über den Beobachtungszeitraum nicht. Einige Fermenter zeigten hingegen, dass die mikrobiellen Gemeinschaften geändert werden können. Abbildung 6 zeigt zwei Beispiele.

Für die BAK4 konnte diese Änderung mit einem Wechsel hin zu stickstoffreicherem Substrat korreliert werden.

Jede untersuchte Biogasanlage im Projekt wies ein individuelles Profil von Mikroorganismen auf. Die Zusammensetzung der Bacteria (hydrolytische, acidogene, acetogene,

syntrophe) ist in jeder Anlage vergleichsweise heterogen (Shannon-Indices von 2 bis 3,5 bei jeweils mehr als 10 verschiedenen Bacteria). Hingegen sind die Methanogenen deutlich weniger divers (Shannon-Indices von 1 bis 2 bei typischerweise 3 bis 4 verschiedenen Methanogenen).

Die Anteile einzelner methanogener Spezies schwanken über die Dauer von 12 Monaten. Gleiches gilt für das Verhältnis von Bacteria zu Methanogenen.

Es ist offensichtlich möglich, die Anteile methanogener Spezies gezielt zu beeinflussen und diese Veränderung dauerhaft aufrecht zu erhalten.

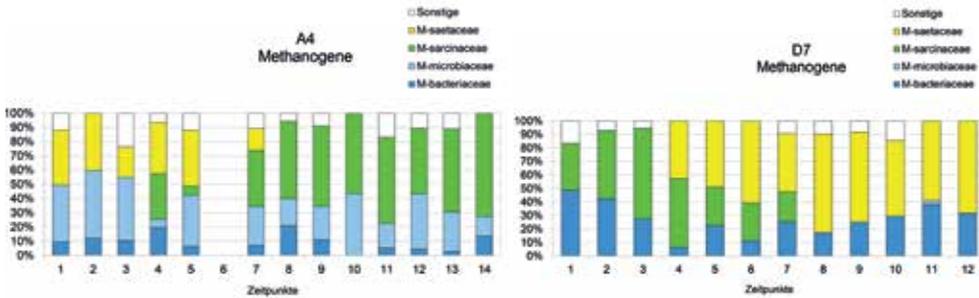


Abb. 6: Fermenter mit Veränderungen in der BAK-Zuordnung: von BAK2 zu BAK4 (links) bzw. von BAK4 zu BAK2 (rechts)

4 Ansätze zur Optimierung

Die allgemeinen Ziele einer Optimierung des Betriebs einer Biogasanlage sind die Optimierung von Kosten und Ertrag. Dabei gilt es einerseits, externe Kosten zu vermeiden bzw. zu minimieren. Ersteres kann z. B. durch einen Selbsterhaltenden Fermentationsprozess, der ohne die ständige Zugabe von Mikroorganismen oder Enzymen läuft, erreicht werden. Zu Letzterem zählen z. B. ein kostengünstiger Substratmix, möglichst seltene Analysekosten usw.

Andererseits soll der Gesamtertrag maximiert werden, was durch Maximierung der Ausbeute und durch die Vermeidung von Störungen erreicht werden kann. Um die Auswirkungen einer Störung so gering wie möglich zu halten, müssen möglichst schnell die richtigen Maßnahmen ergriffen werden, um Stillstandszeiten mit entsprechenden Ertragsausfällen zu vermeiden.

Im Folgenden sind Möglichkeiten dargestellt, wie die mikrobiologische Analyse von Proben aus Biogasfermentern bei der Optimierung des Betriebs einer Biogasanlage helfen kann.

4.1 Optimierung eines stabilen Prozesses

Die mikrobiologische Analyse eines stabil laufenden Biogasfermenters kann wichtige Fragen zum Prozesszustand beantworten:

- Welche Mikroorganismen sind in welcher Zahl vertreten?
- Welche Wege des Substratabbaus bzw. der Methanbildung sind möglich?
- Wo im Prozess befindet sich der „Flaschenhals“? (Engpass-Analyse).

Wie sich Veränderungen bei den Betriebsparametern auf die mikrobiologische Gemeinschaft auswirken, kann mithilfe der mikrobiologischen Analyse unmittelbar sichtbar gemacht werden. Ob Maßnahmen zur Optimierung den gewünschten Erfolg haben, kann dadurch direkt kontrolliert werden.

Als Beispiel soll ein Fall angenommen werden, in dem die mikrobiologische Analyse eines Fermenters einen hohen Anteil an Methanosaetaceen ergibt. Da die hydrogenotrophe Methanogenese energetisch gegenüber der acetoklastischen Methanogenese bevorzugt ist, sollte sich durch eine Verschiebung zugunsten der hydrogenotrophen Mikroorganismen die Ausbeute der Anlage steigern lassen. Die Verschiebung kann durch stickstoffreiche Substrate erzielt werden. Ein Monitoring kann dabei sowohl die Änderungen der Anteile hydrogenotropher und acetoklastischer Mikroorganismen überwachen als auch die Korrelation zwischen hydrogenotrophen Methanogenen und „Wasserstoff-Erzeugern“ kontrollieren.

4.2 Optimierung im Störfall

Das wichtigste Ziel im Fall einer Störung ist, den Prozess schnellstmöglich wieder in den ursprünglichen, also stabilen Zustand zu bekommen. Dazu ist es hilfreich, sowohl den aktuellen Status (Start) als auch den ursprünglichen Zustand (Ziel) zu kennen. Dies kann mithilfe der mikrobiologischen Analyse für die aktuell gezogene Probe sowie einer Rückstellprobe von der letzten Probenahme vor der Störung erfolgen. Notwendig ist nur ein entsprechendes Probenmanagement.

Durch den Vergleich der beiden Proben kann nun ermittelt werden, worin sich die beiden Zustände unterscheiden. Unterscheiden sich z. B. die Anzahl der Mikroorganismen, die jeweils für die Teilprozesse Hydrolyse, Acidogenese oder eine der Methanogenesen verantwortlich sind, zwischen dem aktuellen und dem Zielzustand, kann schnell eingegrenzt werden, wo genau die Prozesskette gestört ist. Weitere Hinweise auf die Störungsursache liefern Abweichungen im Verhältnis von hydrolytischen zu methanogenen Mikroorganismen.

Als Beispiel sollen die in Abbildung 7 gezeigten Prozesse zum Abbau von Essigsäure als Ursache einer Versäuerung des Fermenters betrachtet werden.

Um die im Fermenter entstehende Essigsäure abzubauen, müssen entweder methanogene Archaeen vorhanden sein, die die Essigsäure direkt acetoklastisch zu Methan und

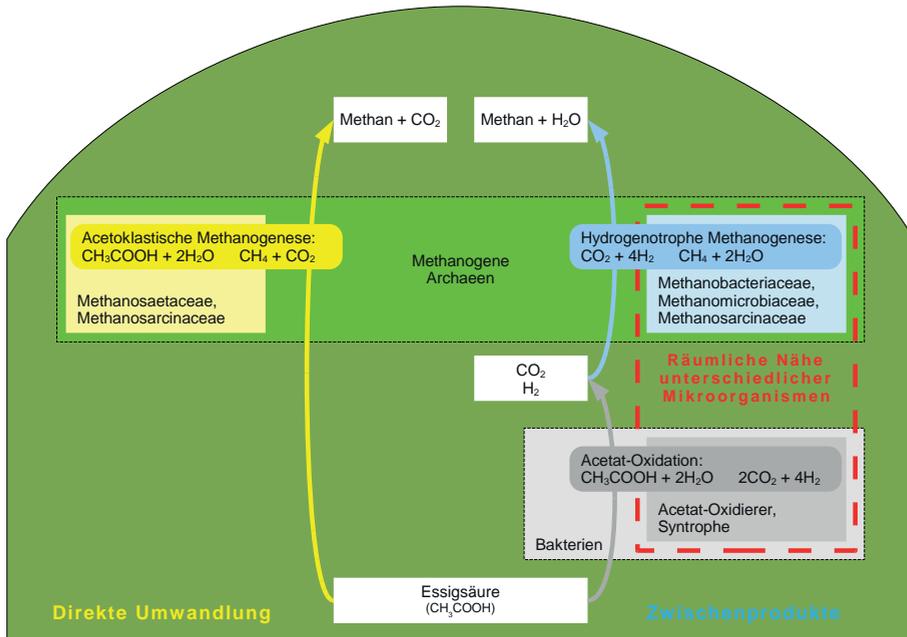


Abb. 7: Prozesse zum Abbau von Essigsäure

Kohlenstoffdioxid umsetzen (acetoklastische Methanogenese). Oder es muss eine syntrophe Assoziation zwischen Acetatoxidierenden Bakterien und zur hydrogenotrophen Methanogenese fähigen Archaeen bestehen, in der die Essigsäure in zwei auch räumlich getrennten Schritten zu Methan umgesetzt wird. Hier wird deutlich, dass nicht nur die Anzahl an Mikroorganismen, sondern auch die Störung der syntrophen Assoziation zwischen „Wasserstoff-Erzeugern“ und hydrogenotrophen Methanogenen als Ursache für eine Versäuerung infrage kommen kann. Der Vergleich der beiden Proben mithilfe der mikrobiologischen Analyse kann zeigen, ob sich das Verhältnis von „Wasserstoff-Erzeugern“ und hydrogenotrophen Methanogenen verändert hat.

4.3 Optimierung mikrobieller Gemeinschaften

Eine Biogasanlage soll meist mehrere Ziele gleichzeitig erreichen: sie soll so stabil wie möglich laufen, so effizient wie möglich sein und/oder mit unterschiedlichen Substraten gefüttert werden können. Nicht immer lassen sich diese Ziele miteinander vereinbaren. Je nach Betreiber und Anwendungsfall werden diese Ziele auch unterschiedlich gewichtet: Für einen Landwirt, der seine Biogasanlage zur Verwertung von Abfällen aus der Tierhaltung wie Gülle oder Hühnertrockenkot nutzt, ist das Ziel einer maximalen Effizienz nicht so wichtig wie für eine Betreibergesellschaft, die von ihren Biogasanlagen

die größtmögliche Rendite erwartet. Beide haben das Ziel, ihre Biogasanlagen möglichst ohne Ausfallzeiten zu betreiben.

Dem entsprechend gibt es unterschiedliche Zielstellungen, auf die mikrobielle Gemeinschaften hin optimiert werden können. Auch gibt es diverse Ansätze, wie der Fermentationsprozess beeinflusst werden kann. Die mikrobiologische Analyse liefert die nötigen Informationen, um eine zielgerichtete Optimierung mikrobieller Gemeinschaften erfolgreich steuern zu können.

5 Fazit und Ausblick

Die Analyse der mikrobiellen Gemeinschaft in kommerziellen Biogasanlagen konnte zeigen, welche Mikroorganismen am Fermentationsprozess beteiligt sind. Diese Kenntnis ließ Rückschlüsse darauf zu, welche Maßnahmen sich wie auf den Prozess auswirken. Je nach den vorhandenen Methanogenen kann der Zustand einer Biogasanlage einer von (derzeit) vier Kategorien zugeordnet werden. Die Zusammensetzung der mikrobiellen Gemeinschaften kann gezielt beeinflusst werden.

Zukünftig wird ein Monitoring der mikrobiellen Zusammensetzung die Ausbeute steigern, Störungen minimieren und so Ausfallzeiten verhindern können. An der Verfeinerung der Zustandskategorien von Biogasanlagen wird weiter gearbeitet. Und für unterschiedliche Typen von Biogasanlagen werden sich für die jeweilige Zielstellung optimale mikrobielle Gemeinschaften erzeugen lassen.

Literatur

Bauer, C.; Lebuhn, M.; Gronauer, A. (2009): Mikrobiologische Prozesse in landwirtschaftlichen Biogasanlagen. Schriftenreihe der Bayerischen Landesanstalt für Landwirtschaft, Freising

Schwieger, F.; Tebbe, C.C. (1998): A new approach to utilize PCR-single-strand-conformation polymorphism for 16S rRNA gene-based microbial community analysis. *Appl. Environ. Microbiol.* 64, pp. 4870–4876

Optimierter Betrieb von Rührsystemen in Biogasanlagen

**KARIN JOBST, ANNETT LOMTSCHER, ANNE DEUTSCHMANN, STEFAN FOGEL,
KAY ROSTALSKI, SILKE STEMPIN, MANUEL BREHMER, MATTHIAS KRAUME**

1 Einleitung

Die Effizienz der Biogaserzeugung wird wesentlich durch die im Fermenter ablaufenden Mischprozesse bestimmt. Trotz hoher energetischer Aufwendungen für den Betrieb der Rührtechnik wird die verfahrenstechnische Zielstellung, das heißt ein homogen durchmischter Reaktor, oftmals nur begrenzt erreicht. Toträume und die Ausbildung von Sink- und Schwimmschichten verhindern in vielen Anlagen eine optimale Biogaserzeugung. Eigene Untersuchungen (FRAUNHOFER IKTS 2011) haben gezeigt, dass das aktiv durchmischte Reaktorvolumen in Biogasreaktoren zwischen 60 und 80 % beträgt. Das heißt, es werden nur etwa 75 % des Reaktors zur Biogaserzeugung genutzt. Erhöhte effektive Raumbelastungen und Bereiche mit einer möglichen Phasenübersättigung wirken einer optimierten Biogasbildung entgegen.

Auch die verstärkte Einbeziehung der numerischen Strömungssimulation bei der Bemessung von Rührsystemen für Biogasreaktoren führte zu keiner befriedigenden Lösung. Numerische Modelle zur Beschreibung von Mehrphasensystemen, wie sie in Biogasanlagen vorliegen, sind noch nicht Stand der Technik. Zum einen werden die granulometrischen Eigenschaften der eingesetzten biogenen Substrate nur unzureichend beachtet, zum anderen gestaltet sich die messtechnische Ermittlung der rheologischen Zustandsgrößen problematisch. Des Weiteren gibt es bisher kaum Möglichkeiten für eine umfassende experimentelle Bewertung des Mischzustandes dieser opaken, faserigen Mehrphasensysteme.

Im Rahmen eines vom Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft sowie der Fachagentur für Nachwachsende Rohstoffe geförderten Verbundprojektes wurden Untersuchungen zur Bewertung des Mischprozesses opaker Mehrphasensysteme vorgenommen. Unter Beachtung der real vorliegenden Stoffeigenschaften von Gärsubstraten wurden für praxisrelevante Rührsysteme optimale Strömungsverhältnisse für den Biogasprozess abgeleitet und Kennziffern für eine bestmögliche Auslegung und einen effizienten Betrieb von Rührsystemen für Biogasanlagen quantifiziert. Als Gesamtziel des noch bis 2016 laufenden Projektes wird eine Maximierung der Biogasausbeute bei minimalem energetischem Aufwand zum Mischen verfolgt, wobei der Einfluss der Substrateigenschaften auf den Biogasprozess infolge einer individuellen Anpassung der Betriebsparameter minimiert wird.

2 Grundlagen zur Auslegung von Rührsystemen

Anaerobe Fermenter werden, wie in der biologischen Reaktionstechnik üblich, für eine mittlere Raumbelastung ausgelegt. Es wird davon ausgegangen, dass unabhängig von der Größe des Reaktors an jedem diskreten Punkt eine vergleichbare Fracht vorliegt, die dann in einer festgelegten theoretischen Aufenthaltszeit in die Reaktionsprodukte umgewandelt wird. Voraussetzung dafür ist, dass das in der Regel punktuell eingebrachte frische Substrat gleichmäßig im gesamten Reaktor verteilt wird. Zur Realisierung des dazu erforderlichen Stofftransportes ist eine geeignete Rührtechnik einzusetzen.

Durch die Übertragung der Drehbewegung auf die zu mischenden Substrate erzeugt jeder Rührer ein dreidimensionales Strömungsfeld. Die Größe und die Richtung der erzeugten Strömung werden dabei stark durch die Geometrie der eingesetzten Rührer, die gewählten Rührparameter und die vorliegenden Substrateigenschaften bestimmt. Entscheidend für die Beurteilung der Rührwirkung der im Projekt eingesetzten horizontalen Propellertauchmotorrührwerke ist nicht die Bemessungsleistung der Antriebseinheit, sondern die als Axialschub F_{Sch} bezeichnete Kraft (Gleichung 1), die mithilfe des Antriebes durch die Hydraulikeinheit erzeugt wird, um das Medium in horizontaler Richtung nach vorn zu beschleunigen. Der Massenstrom \dot{m} kann dabei aus der Propellerfläche A_P , der Fluidichte ρ und der in der Propellerebene wirkenden Geschwindigkeit v_P gebildet werden. Die den Propeller anströmende Geschwindigkeit wird mit v_1 , die Abströmgeschwindigkeit mit v_2 bezeichnet.

$$F_{Sch} = \dot{m} \cdot (v_2 - v_1) = A_P \cdot \rho \cdot v_P \cdot (v_2 - v_1) \quad (\text{Gl. 1})$$

Für die Erfüllung der Mischaufgabe ist die durch den Propeller angefachte Globalströmung entscheidend. Somit sind die Reichweite und das Entrainment des Propellers, welche durch die Abströmgeschwindigkeit v_2 und den Rührwerksdurchmesser d maßgeblich bestimmt werden, ausschlaggebend. Unter Ansatz einer reibungsfreien Strömung und der Voraussetzung, dass die Anströmgeschwindigkeit $v_1 = 0$ ist, kann die Abströmgeschwindigkeit v_2 wie in Gleichung 2 berechnet werden:

$$v_2 = \sqrt{\frac{2}{\rho} \cdot \frac{F_{Sch}}{A_P}} \quad (\text{Gl. 2})$$

Zu beachten ist, dass reale Stoffsysteme reibungsbehaftet sind und die Viskosität des zu rührenden Mediums maßgeblich das Förderverhalten beeinflusst. Gärsubstrate weisen ein nicht-Newtonsches Fließverhalten auf, das heißt, die sich im Reaktor lokal ausbildende Viskosität η wird durch die lokal wirkenden Deformationsgeschwindigkeiten bzw. Scherraten $\dot{\gamma}$ bestimmt.

Das meist nach dem Potenzansatz nach Ostwald-de-Waele (Gleichung 3)

$$\eta = K \cdot \dot{\gamma}^{m-1} \quad (\text{Gl. 3})$$

zu beschreibende Fließverhalten des Fermenterinhalt zeigt, dass höhere Scherraten zu einer Verringerung der Viskosität führen. Der in der Gleichung dargestellte Konsistenzfaktor K bezeichnet die Viskosität bei einer Scherrate von 1 s^{-1} , der Fließindex m bestimmt die Art des Fließverhaltens (Newtonsches, strukturviskos oder dilatant). In unmittelbarer Nähe des rotierenden Propellers wird das Medium stark verdünnt. In weiter entfernten Bereichen nimmt die Deformationsgeschwindigkeit ab und damit die Viskosität zu. Das führt dazu, dass der Propeller vorverdünntes Medium radial ansaugt und axial beschleunigt. In ausgeprägt strukturviskosen Medien hat der sich ausbildende Freistrah nur eine sehr geringe Reichweite (Abb. 1).

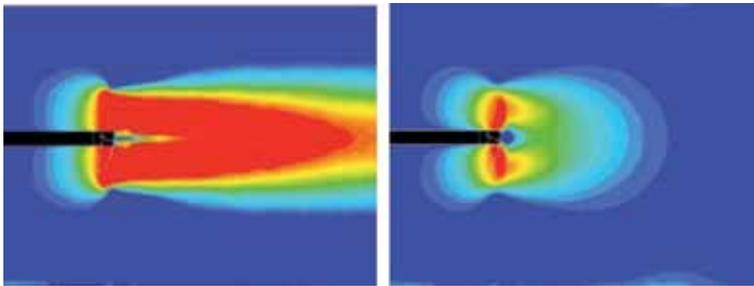


Abb. 1: Propellerfreistrah in Wasser (links) und in einem strukturviskosen Medium (Quelle: Springer 2010)

Zur Gewährleistung des Stofftransportes im Fermenter wird es erforderlich, die als Kavernen bezeichneten Strömungsgebiete über den gesamten Behälter auszuweiten. Im Idealfall korrespondieren die Tauchmotorrührwerke miteinander (Abb. 2).

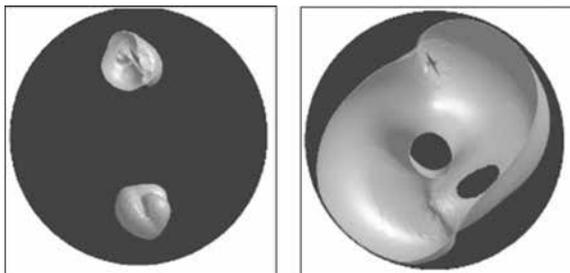


Abb. 2: Bereiche mit Strömungsgeschwindigkeiten größer $0,1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$; links: Kavernenbildung in Rührwerksnähe; rechts: Rührwerkskorrespondenz (Quelle: Springer 2010)

3 Zielgrößen für Rühraufgaben in Biogasanlagen

Rührsysteme in der Biogastechnik müssen so konzipiert werden, dass folgende Aufgaben erfüllt werden:

- Vermischen von frischem Substrat mit dem bereits gärenden Material, um frisches Substrat mit aktiver Bakterienmasse zu verbinden.
- Verringerung von Temperaturgradienten zur Realisierung konstanter Milieubedingungen.
- Vermeiden oder gegebenenfalls Zerstören von Schwimm- und Sinkschichten als Voraussetzung für einen ungehinderten Austritt des Gases aus der Flüssigphase.
- Verbesserung des Stoffwechsels der Bakterien durch das Austreiben von Biogasblasen und das Heranführen frischer Nährstoffe.

Zur Ableitung quantitativer Aussagen wurden am Fraunhofer IKTS (2013) Untersuchungen zum Zusammenhang zwischen der Aktivität der Mikroorganismen, der Mischgüte und dem sich ausbildenden Strömungsprofil vorgenommen. Auf der Basis von Fermentationsversuchen und Berechnungen mittels numerischer Strömungssimulation wurden im Fermenter erforderliche Grenzgeschwindigkeiten zur Maximierung der Biogasausbeute abgeleitet. Zusammenfassend sind folgende Aussagen hervorzuheben:

- Die im Fermenter ablaufenden Prozessschritte Hydrolyse und Versäuerung benötigen eine ausreichende Durchmischung. Strömungsgeschwindigkeiten von circa $5 \cdot 10^{-2} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ wirken sich positiv auf Stofftransport- und Stoffaustauschprozesse aus.
- Zur Unterstützung des Aufsteigens von gebildetem Biogas ist die Strömung so auszubilden, dass abwärts gerichtete Geschwindigkeiten größer als $2 \cdot 10^{-3} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ möglichst vermieden werden.
- Zur Realisierung dieser Forderungen ist ein intervallmäßiges Betreiben der Rührer sinnvoll. Voraussetzung dafür ist, dass die zur Fermentation eingesetzten Substrate nicht oder nur gering zur Flotation neigen.
- Unter Beachtung des intervallmäßigen Rührerbetriebes wurden die Anforderungen an die zu erreichende Mischgüte abgeleitet. Nach einer Mischzeit von 20 min sollte eine stochastisch homogene Substratverteilung im Reaktor vorliegen und die Mischgüte im Reaktor mindestens 0,9 betragen.

4 Bewertung des Strömungsprofils in Praxisanlagen

Zur Überprüfung des Strömungsverhaltens in Biogasfermentern wurden Untersuchungen auf großtechnischen Biogasanlagen mit einem magnetisch-induktiven Strömungsmessgerät vorgenommen (Abb. 3).

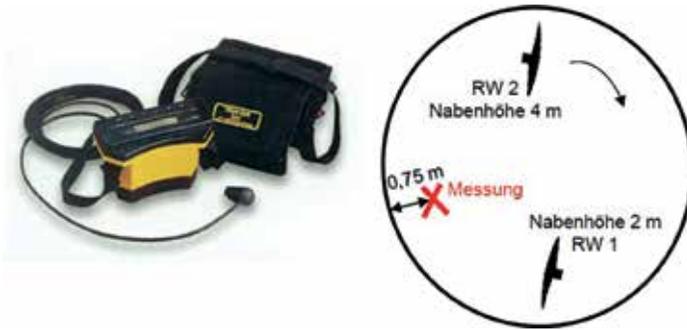


Abb. 3: Strömungsmessgerät Flow Mate 2000 (Marsch-Mc-Birney, Inc.) und Messpunkt (Quelle: ITKS)

Nachteil des nach dem Faraday'schen Messprinzip arbeitenden Messgerätes ist der lokal begrenzte Einsatz im Fermenter unter Nutzung vorhandener Fermenteröffnungen. In dem in Abbildung 3 schematisch dargestellten Biogasfermenter (Nettovolumen 2090 m³; Füllhöhe 5,5 m) wurden zwei Propellerrührwerke (Propellerdurchmesser 2,5 m) betrieben. Der Fermenterinhalt wies einen Feststoffgehalt von $TR = 7,6 \%$ auf. Das Fließverhalten bei 40 °C konnte mit den Parametern $K = 12,1 \text{ Pa} \cdot \text{s}^m$ und $m = 0,35$ beschrieben werden. In Abhängigkeit der Reaktorhöhe und des gewählten Leistungsbereichs der Rührwerke betragen die Geschwindigkeiten 0,2–35,6 cm·s⁻¹ (Abb. 4).

Unter Beachtung der im Abschnitt 3 formulierten Ziele ist es in dieser Biogasanlage ausreichend, die Rührwerke mit 75 % der Nennleistung zu betreiben. Die für den Stofftransport erforderlichen Geschwindigkeiten konnten auch in entfernten Bereichen vom Rührer nachgewiesen werden.

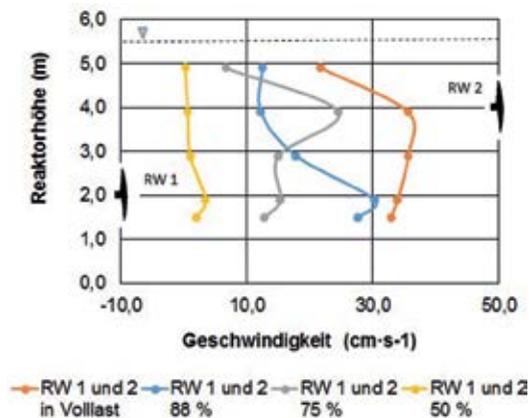


Abb. 4: Strömungsgeschwindigkeiten in einem großtechnischen Biogasfermenter

Dagegen wurden auf einer weiteren Biogasanlage mit zwei Rührwerken (RW 1: Voll- last; RW 2: 60 % Leistung) Geschwindigkeiten im Bereich zwischen $1,0 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ und $13,0 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ gemessen, obwohl die Messstelle im unmittelbaren Abströmbereich von Rührwerk 1 lag. Als Ursache dafür ist das stark strukturviskose Fließverhalten des Fermenterinhalt anzugeben. Die Messungen wurden in Reaktorhöhen zwischen 0,5 m und 3,0 m durchgeführt.

Auf dieser Biogasanlage konnte weiterhin der Einfluss einer Substratvorzerkleinerung auf die Ausbildung des Fließverhaltens und dem daraus resultierenden Strömungsprofil erfasst werden. Die Beschickung der hier vorhandenen zwei baugleichen Fermenter variierte dahingehend, dass in Fermenter 1 unbehandelte Silagen und in Fermenter 2 hingegen zerkleinerte Substrate zugegeben wurden. Die daraus resultierenden Substrateigenschaften und die jeweils gemessenen Strömungsgeschwindigkeiten zeigt Tabelle 1.

Tab. 1: Einfluss der Substratvorbehandlung auf das Strömungsprofil

	Ohne Vorbehandlung	Mit Vorbehandlung
Feststoffgehalt	10,1 %	11,1 %
Maximale Faserlänge	38,5 mm	26,1 mm
Fließverhalten bei 40 °C	$K = 91,1 \text{ Pa} \cdot \text{s}^m; m = 0,11$	$K = 24,6 \text{ Pa} \cdot \text{s}^m; m = 0,31$
Viskosität bei $\dot{\gamma} = 10 \text{ s}^{-1}$	11,7 Pa·s	5,0 Pa·s
Strömungsgeschwindigkeit	1–3 $\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$	3–13 $\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$

5 Quantifizierung des Mischprozesses im Pilotmaßstab

Zur Quantifizierung des sich im gesamten Reaktor ausbildenden Strömungsprofils wurden umfangreiche Untersuchungen im Technikums- und Pilotmaßstab durchgeführt, auf deren Grundlage derzeit ein Regelkonzept für Mischprozesse erstellt wird.

Mit der an der TU Berlin eingesetzten Particle Image Velocimetry (PIV) und der am Fraunhofer IKTS vorhandenen Prozess-Tomographie konnte der Einfluss vorliegender Substrateigenschaften und definierter Prozessparameter (z.B. Rührerdrehzahl und Rührerpositionierung) auf das sich im Reaktor ausbildende Strömungsprofil ermittelt werden. Parallel dazu wurden unter gleichen Prozessbedingungen Fermentationsversuche zur Quantifizierung des Biogasanfalls in Abhängigkeit des vorliegenden Strömungsprofils durchgeführt.

Im Rahmen der PIV-Messung als optisches Messverfahren (Abb. 5, links) werden in das zu untersuchende Fluid kleinste Partikel zugegeben und deren Strömungsverhalten mit einer hoch auflösenden Kamera verfolgt. Das vorliegende Tomographie-System (Abb. 5, rechts) basiert auf der Erfassung von Widerstandsänderungen infolge unter-

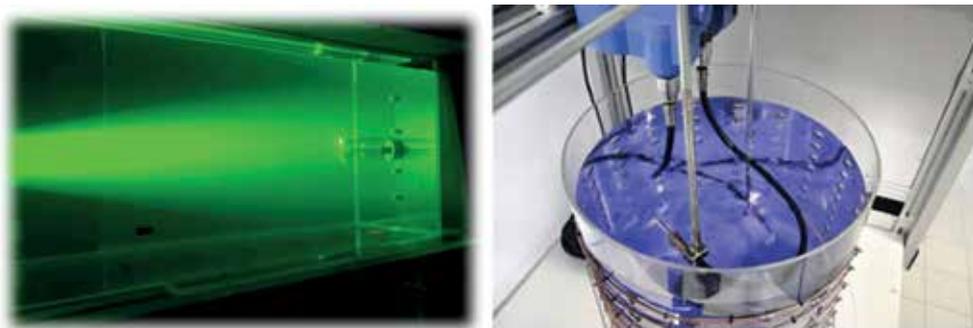


Abb. 5: Links: Technikumsanlage zur Bestimmung des Propellerfreistrahls unter Einsatz der PIV; rechts: Tomographie-Reaktor mit eingesetzter Rührtechnik (Quelle: ITKS)

schiedlicher elektrischer Leitfähigkeiten der zu mischenden Systeme. Im Ergebnis der Messung wird die Verteilung der dispersen Phase im Reaktorsystem ermittelt und die Mischgüte berechnet. Mittels Kreuzkorrelation kann die Geschwindigkeitsverteilung im Reaktor bestimmt werden.

Die Auslegung und der Betrieb der eingesetzten Technikumsanlagen folgten einer maßstabgetreuen Nachbildung großtechnischer Fermenter. Neben der geometrischen Skalierung der eingesetzten Rühr- und Reaktortechnik (Abb. 6) basierten die Betrachtungen auf der Anwendung fluiddynamischer Ähnlichkeitsgesetze. Unter Nachweis vergleichbarer Strömungsverhältnisse und Geschwindigkeitsverteilungen im Technikums- und Pilotreaktor konnten erweiterte Skalierungskriterien für Mischprozesse in Biogasanlagen abgeleitet werden. Neben dem bekannten Kriterium einer konstanten Rührerumfangsgeschwindigkeit v_{tip} in Modell- und Hauptausführung erfolgte eine Skalierung der vorhandenen Partikel und Fasern analog der geometrischen Skalierung der Reaktortechnik unter zusätzlicher Beachtung gleicher Fließeigenschaften in Modell und Hauptausführung.



Abb. 6: Skalierung großtechnischer KSB-Rührtechnik in den Technikums- und Pilotmaßstab (Quelle: ITKS)

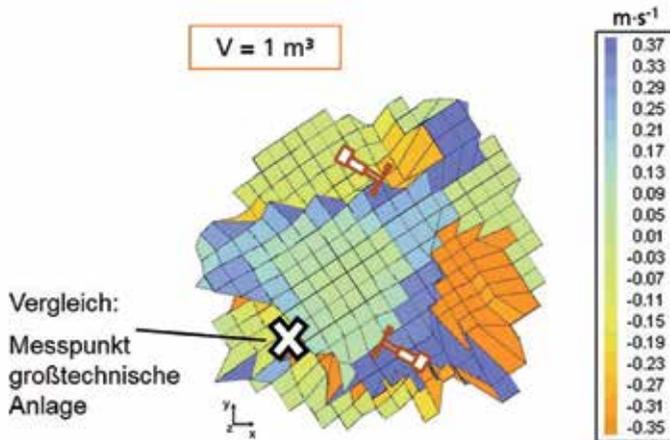


Abb. 7: Geschwindigkeitsprofil des in den Pilotmaßstab skalierten Praxisbetriebes

Zur Überprüfung der gewählten Skalierungsbedingungen wurden die in Abschnitt 4 vorgestellten Mischprozesse im Pilotmaßstab nachgestellt. Abbildung 7 zeigt beispielsweise das Ergebnis für den Fall, dass beide Rührer in Vollast, also mit einer Umfangsgeschwindigkeit, $v_{tip} = 5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ mit betrieben werden (LOMTSCHER 2015). Sowohl auf der großtechnischen Anlage als auch im Pilotmaßstab wurden an dem zu vergleichenden Messpunkt Geschwindigkeiten von $0,32 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ erfasst.

Eine Erhöhung des Fließverhaltens des Reaktorinhaltes (Gärsubstrat) führt zu einer Verringerung der sich im Reaktor ausbildenden Strömungsgeschwindigkeiten und somit zu einer schlechteren Durchmischung. Beispielsweise führte die in Tabelle 2 dargestellte Erhöhung der Viskosität zu einer um 60 % verringerten Abströmgeschwindigkeit des in diesem Fall vertikal eingesetzten Rührwerkes (LOMTSCHER 2015a).

Tab. 2: Einfluss des Fließverhaltens und der Rührerdrehzahl (Freistahlversuche)

	Versuch 1 $K = 0,44 \text{ Pa} \cdot \text{s}^{0,7}$ $n = 300 \text{ min}^{-1}$	Versuch 2 $K = 12 \text{ Pa} \cdot \text{s}^{0,4}$ $n = 300 \text{ min}^{-1}$	Versuch 3 $K = 12 \text{ Pa} \cdot \text{s}^{0,4}$ $n = 500 \text{ min}^{-1}$	Versuch 4 $K = 12 \text{ Pa} \cdot \text{s}^{0,4}$ $n = 1000 \text{ min}^{-1}$
Rührerumfangsgeschwindigkeit	$1,1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$	$1,1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$	$1,8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$	$3,7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$
Viskosität bei $\dot{\gamma} = 10 \text{ s}^{-1}$	$0,22 \text{ Pa} \cdot \text{s}$	$3,3 \text{ Pa} \cdot \text{s}$	$3,3 \text{ Pa} \cdot \text{s}$	$3,3 \text{ Pa} \cdot \text{s}$
Maximale Abströmgeschwindigkeit	$0,20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$	$0,07 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$	$0,14 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$	$0,18\text{--}0,20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$

Um dem erhöhten Fließverhalten entgegen zu wirken, ist eine Vergrößerung des Rührerschubes sinnvoll. Erreicht wird diese Schuberrhöhung beispielsweise durch Anhebung der Rührerdrehzahl (Tab. 2) oder der Wahl eines Rührers mit größerem Durchmesser. Zu

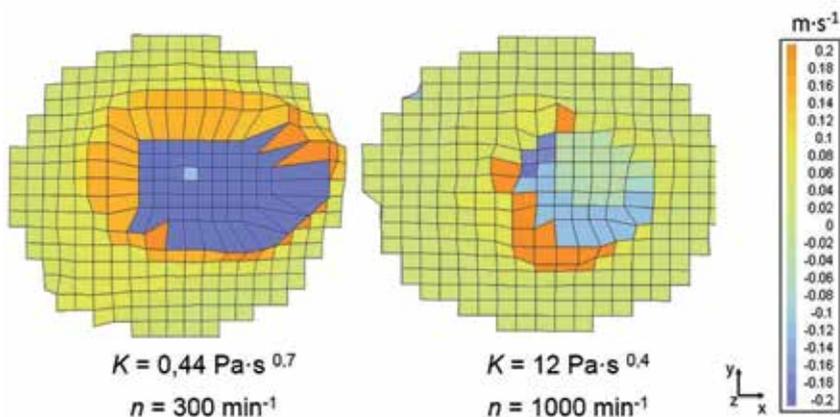


Abb. 8: Einfluss der Prozessbedingungen auf die Ausbildung des Geschwindigkeitsprofiles

beachten ist, dass ein Anstieg des Rührerschubes nicht in jedem Fall eine Verbesserung des Mischprozesses bewirkt. Vor allem bei einem stark ausgeprägten strukturviskosen Fließverhalten führt eine Erhöhung der Rührerdrehzahl zu einer ausgeprägten lokalen Scherverdünnung mit der in Abschnitt 2 gezeigten Kavernenbildung um den Rührer. Abbildung 8 stellt die Strömungsprofile für die in Tabelle 2 gezeigten Versuche 1 (Abb. 8, links) und 4 (Abb. 8, rechts) gegenüber. Im Unterschied zu Versuch 1 wird die maximale Abströmgeschwindigkeit für das höherviskose Substrat nur in einem lokal begrenzten Bereich des Freistrahles erreicht.

Mittels PIV-Messungen konnte die Abhängigkeit zwischen Rührerdrehzahl und Abstrahlwinkel des Flüssigkeitsstrahles quantifiziert werden (BREHMER 2015). Gemäß Abbildung 9 bildet sich mit steigender Rührerdrehzahl n ein Rückstromgebiet in der axialen Ebene aus, wodurch ein größer werdender Abstrahlwinkel bedingt wird. Die Reichweite des erzeugten Propellerfreistrahls ist daher massiv reduziert. Auf Basis der jeweils am Rührer mit der Drehzahl n und dem Durchmesser d vorliegenden effektiven Reynoldszahl (Gleichung 4)

$$Re_{eff} = \frac{\rho \cdot n \cdot d^2}{K \cdot \dot{\gamma}^{(m-1)}} \quad (\text{Gl. 4})$$

konnten folgende Bereiche zur Einteilung des Strömungsverhaltens klassifiziert werden

- $Re_{eff} < 50$: primär axiale Strömungsrichtung
- $250 < Re_{eff} < 3500$: Übergangsbereiche und Strömungsumkehr
- $Re_{eff} > 3500$: primär axiale Strömung.

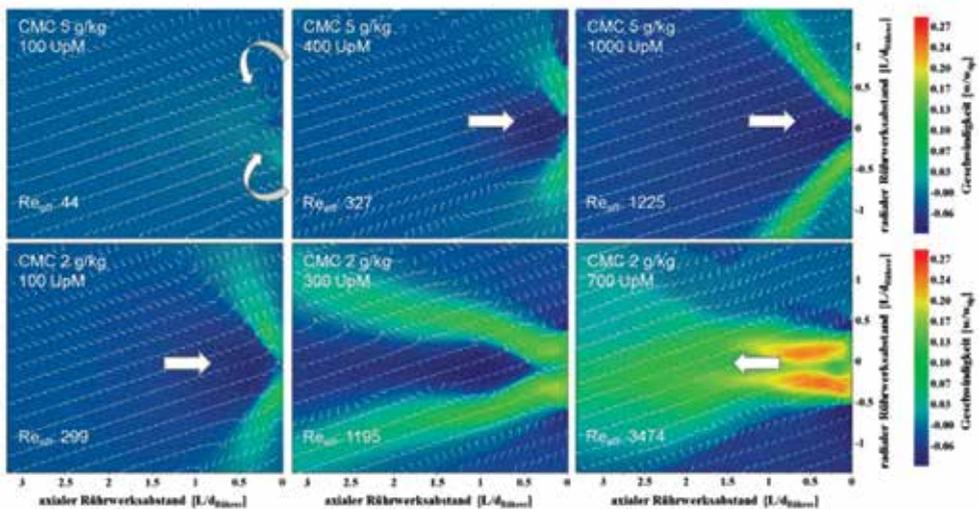


Abb. 9: Darstellung des Propellerfreistrahles in Abhängigkeit der effektiven Reynolds-Zahl

Bei Vorliegen hochviskoser Gärsubstrate sollte zur Vermeidung der Strömungsumkehr vielmehr das Fließverhalten des Fermenterinhalt durch Nutzung einer Substratvorzerkleinerung reduziert werden. In Verbindung mit praxisrelevanten Rührerumfangsgeschwindigkeiten von circa $5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ können so effektive Reynoldszahlen $Re_{eff} > 3500$ erreicht werden, was primär zu einer axialen Strahlausbreitung im Reaktor führt. Tomographische Untersuchungen haben gezeigt, dass durch Einsatz einer Substratvorzerkleinerung die Mischgüte im Fermenter bis zu 10%-Punkte verbessert wird.

Literatur

- Brehmer, M. (2015): Experimentelle Untersuchungen zur Entwicklung eines Steuerkonzeptes für Tauchmotorrührwerke in Biogasanlagen. ProcessNet-Jahrestreffen der Fachgruppen Extraktion und Mischprozesse, Heidelberg
- Fraunhofer IKTS (Institut für Keramische Technologien und Systeme) (2011): SMWA-Verbundprojekt Entwicklung der Biogaserzeugung als Zukunftstechnologie. Fördernummer SAB: 12641/2094, Dresden
- Fraunhofer IKTS (Institut für Keramische Technologien und Systeme) (2013): Bewertung des Einflusses der Schergeschwindigkeit/Rührerdrehzahl auf den Biogasertrag. Abschlussbericht, Dresden
- Lomtscher, A. et al. (2015): Skalierung von Mischprozessen konzentrierter faseriger Suspensionen. ProcessNet-Jahrestreffen der Fachgruppen Extraktion und Mischprozesse, Heidelberg

Lomtscher, A. (2015a): Einfluss der Prozessparameter auf den Strömungsprozess.
Fraunhofer IKTS, Interner Arbeitsbericht, Dresden

Springer, P. (2010): Theoretische Ansätze für die Berechnung des Mischvolumens von
Biogasreaktoren. KSB-Rührer-Kolloquium, Halle, November 2010

Danksagung

Wir bedanken uns beim BMEL und der FNR für die finanzielle Unterstützung.

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages



Langzeitstabile Inline-Messung organischer Säuren zur Beurteilung von Biogasprozessen

JENS ZOSEL, MATTHIAS SCHELTER, PETER ZIMMERMANN, EMMA RITZI,
BORIS HABERMANN, WOLFRAM OELSSNER, MICHAEL MERTIG

1 Einleitung

1.1 Zielsetzung

Die im Gärprozess entstehenden organischen Säuren (VFA, volatile fatty acids), vor allem Essig-, Propion- und Buttersäure, gehören zu den wichtigsten Intermediaten im Biogasprozess, deren Überwachung eine sichere Beurteilung des Gärprozesses ermöglicht (FNR 2013, AHRING et al. 1995). Eine Akkumulation von VFA im Reaktor führt zu einer Versäuerung des Reaktorinhalts, auf die eine Hemmung der Methanisierungsstufe und im schlimmsten Fall der Abbruch des gesamten Abbauprozesses folgen kann. Zu hohe Konzentrationen an Essigsäure hemmen die Methanogenese, während Propionsäure die Aceto- und Acidogenese beeinflusst. Die VFA werden als Essigsäure-Äquivalent summarisch zu einem Wert zusammengefasst. Der für einen effizienten Gärprozess zulässige Bereich an Werten ist von einer Reihe von Randbedingungen abhängig. Es wurden beispielsweise Prozesse beschrieben, bei denen sich die Biologie im Fermenter bei Werten zwischen 500 und 3.000 mg/l Essigsäure-Äquivalent im Gleichgewicht befindet und die gebildete Essigsäure vollständig durch die Methanisierung abgebaut wird (WIESE und KÖNIG 2007). Andere Ergebnisse belegen, dass bei pH-Werten um 7 bereits Essigsäurekonzentrationen von 3.000 mg/l zu einer 50 %igen Hemmung führen können (BISCHOFBERGER 2005). Grenzwerte organischer Säuren sind unter anderem von der Pufferkapazität des Substrates abhängig und für jede Anlage individuell zu ermitteln. Die im Verlauf des Gärprozesses gebildeten organischen Säuren können bislang noch nicht vor Ort online gemessen werden (FNR 2013), da es an einer einsatzfähigen Online-Sensorik fehlt. Deshalb wird die Konzentration der Säuren in speziell ausgestatteten Untersuchungslaboren (GC, IC oder HPLC) bestimmt, was mit erheblichen Kosten, einem entsprechenden Zeitversatz zwischen Probenahme und Ergebnisübermittlung sowie verschiedenen Fehlerquellen verbunden ist (WIESE und KÖNIG 2008).

Ziel des vom Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL) über die Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe (FNR) geförderten Vorhabens „Langzeitstabile Inline-Messung organischer Säuren zur Beurteilung von Biogasprozessen“ (LIMOS) war deshalb die Entwicklung eines Messsystems zur Inline-Bestimmung der Konzentrationen von Essig-, Propion- und Buttersäure im Biogasprozess.

1.2 Stand der Technik

Die Ausrüstung von Biogasanlagen mit Messtechnik ist uneinheitlich und beschränkt sich z.T. auf wenige ausgewählte Parameter. In einer größeren Versuchsreihe wurden 60 Anlagen mit Messtechnik zur Substratcharakterisierung und zum Gasmonitoring nachgerüstet, dabei wurden die Substratzusammensetzung in diskontinuierlich entnommenen Proben im Labor und die Zusammensetzung des Biogases online durch entsprechende Analysatoren für CO₂, CH₄, O₂ und H₂S untersucht (WEILAND et al. 2004, FNR 2004). Bei größeren Biogasanlagen werden zur Steuerung neben der Gaszusammensetzung und -ausbeute auch der pH-Wert, das Redoxpotenzial und die Temperatur bestimmt (PÄTZ 1998). Der Praxisbetrieb zeigt jedoch, dass diese Parameter nicht ausreichend sind, um die Milieubedingungen so zu charakterisieren, dass Instabilitäten, die zum Zusammenbruch des Biogasprozesses führen, rechtzeitig erkannt und die erforderlichen Gegenmaßnahmen eingeleitet werden können (OTT 2002).

Eine kontinuierliche Messung der bei der anaeroben Vergärung gebildeten organischen Säuren wird in bestehenden Biogasanlagen bislang nur in wenigen Einzelfällen praktiziert, wobei z.B. die Nah-Infrarot-Reflexionsspektroskopie (NIRS) (STOCKL 2013) zum Einsatz kommt. Zurzeit wird vor allem die periodische Offline-Messung der Konzentration organischer Säuren in Kombination mit der Bestimmung der Pufferkapazität des Fermenterinhalt (FOS/TAC-Wert) angewendet. Diese stellt zwar ein nützliches Hilfsmittel dar, ist aber verknüpft mit einer zeitlichen Verzögerung und mit gewissen Schwierigkeiten bei der Aufbereitung der Proben und der anschließenden Titration, was zu hohen Fehlern beim Messergebnis führen kann (LÜTZHÖFT 2014). Die in der Literatur beschriebenen Offline-Methoden zur Einzelbestimmung der organischen Säuren sind vielfältig und werden hier nicht im Einzelnen besprochen (WIESE und KÖNIG 2007, GÖRZ und MEISSBAUER 2001, BROTSACK et al. 2001, BANEL 1010).

In-situ-Messsysteme für VFA wurden als Prototypen bereits entwickelt und erprobt, befinden sich zurzeit jedoch noch nicht im kontinuierlichen Praxiseinsatz. Das von PIND (2003) beschriebene Filtrationssystem ermöglicht auch in komplexen Biogasmedien die separate Bestimmung von Essig-, Propion- und Buttersäure im Bereich 6–3.000 mg/l mittels GC. Ein von PALACIO-BARCO et al. (2010) aufgeführtes spektrofluorimetrisches Online-System kann VFA nach einer Derivatisierung mit EDAN (N-(1-Naphthyl)ethylen-diamin) in drei automatisierten Schritten erfassen, scheint jedoch für unaufbereitete Proben direkt aus einem Biogasreaktor nicht geeignet zu sein.

Das von WOLF (2010) vorgeschlagene Verfahren nutzt die UV/vis-Spektroskopie in Verbindung mit Mustererkennungsmethoden und erfordert ein besonderes Verdünnungssystem direkt am Biogasreaktor. In einem von der FNR geförderten Projekt (FKZ 22016705) wurde eine Sensorik zur Bestimmung von Propionsäure im Biogas entwickelt, die auf einem Metalloxidsensor-Array beruht (WALTE 2008). Im FNR-Projekt (FKZ 22003606) wur-

den Informationen über VFA-Konzentrationen aus NIR-Spektren zeitnah erhalten, wobei deren Validierung durch Vergleiche mit laboranalytisch ermittelten und aus anderen Biogasanlagen gewonnenen Daten erfolgte (ANDREE 2008). Die von BOE (2007) vorgeschlagene Online-Einzelsäureanalyse beruht auf der Analyse von kontinuierlich entnommenem Gärsubstrat und anschließender Extraktion mittels Headspace-Gaschromatographie.

In Flüssigkeiten gelöste Bestandteile mit höherem Dampfdruck als die VFA lassen sich kontinuierlich auch dadurch bestimmen, dass sie in eine definierte Gasatmosphäre extrahiert werden, was bisher fast ausschließlich durch gaspermeable Membranen in der Messlösung erfolgte (KEMPE 1986, Rototherm Canongate Technology 2012). Für die anschließende Gasanalyse steht nach der Extraktion das gesamte Spektrum an Gassensoren und Messtechniken zur Verfügung. Da membranbedeckte Extraktoren in Biogasmedien verschiedene gravierende Nachteile aufweisen, wurde in diesem Vorhaben der in SCHELTER (2014) beschriebene membranfreie Gelöstgas-Extraktor verwendet.

2 Experimentelles

2.1 Biogas-Laboranlage

Zur Untersuchung des Messsystems für gelöste flüchtige Fettsäuren sowie zur Durchführung von umfangreichen Versuchsreihen mit verschiedenen Modellmedien mit hohem Feststoffanteil zur Erzeugung von Biogas wurde die in Abbildung 1 gezeigte Biogas-

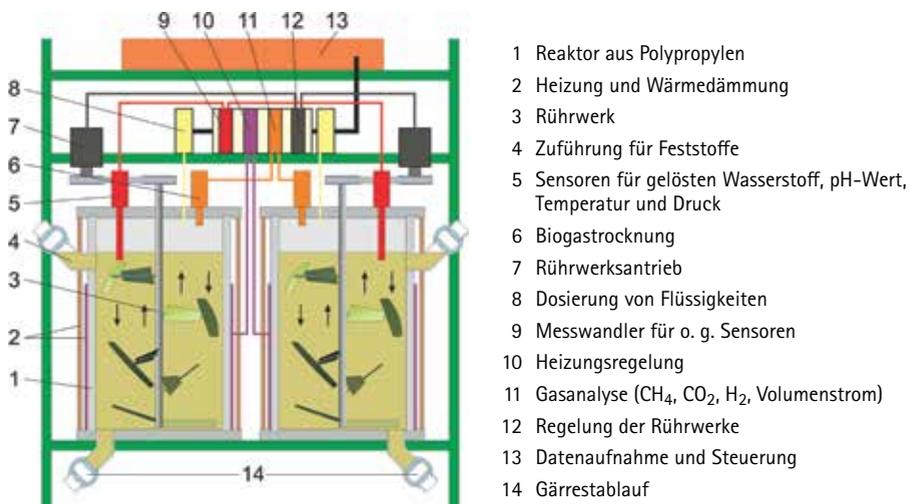


Abb. 1: Prinzipieller Aufbau und Funktion der Biogas-Laboranlage (Quelle: M. Schelter, KSI-Meinsberg)

Laboranlage aufgebaut und erprobt. Diese enthält zwei zylindrische Reaktoren aus Polypropylen mit je 50 l Fassungsvermögen für das Biogasmedium und je 15 l Headspace für die Gassammlung.

Die in Abbildung 1 beschriebene Anlage verfügt über ein dreistufiges Sicherheitskonzept zur Schaumerkennung und -bekämpfung (SCHELTER 2014).

2.2 Neu entwickeltes Säure-Messsystem

Abbildung 2 stellt schematisch ein neu entwickeltes Messsystem zur Erfassung der organischen Säuren und weiterer Komponenten in Biogasmedien dar. Es beruht auf dem Grundprinzip der membranfreien Inertgasextraktion gelöster und flüchtiger Komponenten aus dem zu untersuchenden wässrigen Biogasmedium mit anschließender chromatographischer Auftrennung der einzelnen zu detektierenden Bestandteile. Diese werden in einem nachgeschalteten Detektor analysiert, wobei ein kommerziell erhältlicher Flammenionisationsdetektor (FID) und der in SCHELTER (2013) beschriebene coulometrische Festelektrolyt-Detektor (CFD) erprobt wurden. Als optimale chromatographische Trennsäule wurde eine Polyethylenglykol-2-nitroterephthalsäureester (FFAP)-Kapillarsäule – Länge 30 m, Innendurchmesser 0,25 mm, Schichtdicke 0,25 μm – für die Trennung aller hier betrachteten flüchtigen organischen Säuren ausgewählt.

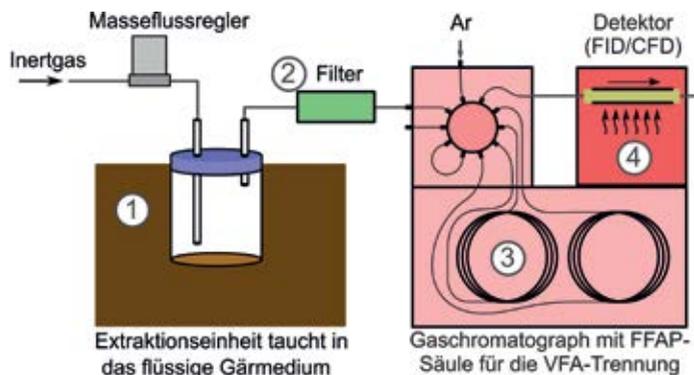


Abb. 2: Schematische Darstellung des neu entwickelten Messsystems für flüchtige organische Säuren in Biogasmedien (Quelle: M. Schelter, KSI-Meinsberg)

(1) Extraktion, (2) Gasaufbereitung, (3) Gastrennung und (4) Detektion

3 Ergebnisse

3.1 Optimierung der gaschromatographischen Trennung

Das in Abbildung 3 als Beispiel gezeigte Chromatogramm wurde nach Einspritzen von etwa 0,5 μl eines nahezu wasserfreien flüssigen Gemisches von sechs verschiedenen VFA mit gleichen Volumenkonzentrationen in einen Argon-Trägergasstrom und anschließende Trennung in der in Abschnitt 2 aufgeführten Säule mit einem FID aufgenommen. Es belegt, dass die einzelnen VFA unter Einsatz dieses Detektors auch bei sehr hohen Konzentrationen mit optimaler Güte getrennt und präzise quantitativ ausgewertet werden können. Im Gegensatz dazu wurde bei Einsatz des CFD eine deutliche Peakverbreiterung gefunden, wie in Abbildung 4 dargestellt ist.

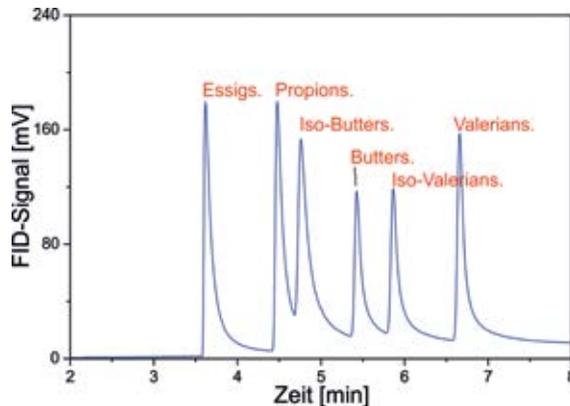


Abb. 3: Chromatogramm eines flüssigen Gemisches aus sechs VFA mit dem in Abbildung 2 gezeigten Messsystem und dem Flammenionisationsdetektor aufgenommen

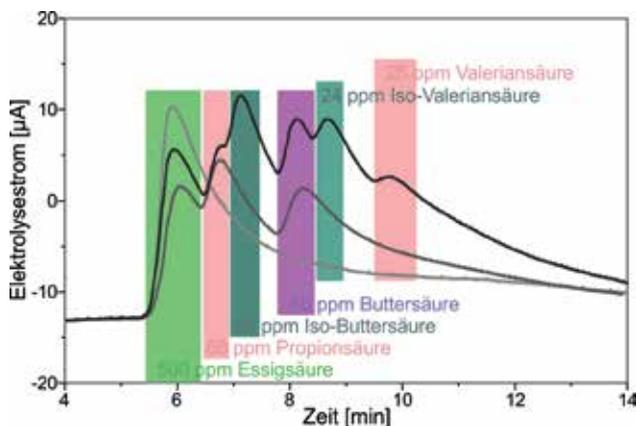


Abb. 4: Chromatogramme von 1, 3 und 6 VFA mit dem in Abbildung 2 gezeigten Messsystem und dem coulometrischen Detektor aufgenommen

Diese Peakverbreiterung wird durch eine Ablagerung von Kohlenstoff auf der Messelektrode des CFD verursacht, was die Genauigkeit der quantitativen Auswertung der Peaks deutlich einschränkt. Für den Praxiseinsatz des Messsystems wurde deshalb der FID eingesetzt.

3.2 Extraktion von Essigsäure

Bei Untersuchungen zum Verhalten der Kombination aus membranfreiem Extraktor und dem in Abbildung 2 gezeigten Chromatographen stellte sich heraus, dass VFA wie Essigsäure auf dem Weg vom Messmedium bis zum Detektor an mehreren Stellen in so hohem Maß adsorbieren, dass ihre präzise Messung unmöglich wird. Diese Adsorption findet vor allem an Kunststoffoberflächen statt, wird jedoch auch an unbeheizten rauen Edelstahloberflächen beobachtet. Deshalb wurde ein neuer Extraktor aus Edelstahl mit entsprechenden Oberflächen entwickelt und alle gasberührten Oberflächen auf etwa 70 °C geheizt.

Mit einem solchen System konnte die in Abbildung 5 dargestellte Langzeitmessung der Extraktion von Essigsäure aus einem ungepufferten Modellmedium, bestehend aus destilliertem Wasser und Essigsäure, bei unterschiedlichen Konzentrationen und Medientemperaturen aufgenommen werden. Begünstigt durch den niedrigen pH-Wert von etwa 3 werden bereits bei 25 °C merkliche Mengen an Essigsäure extrahiert und detektiert. Konzentrations- und Temperaturänderungen machen sich erst nach einer

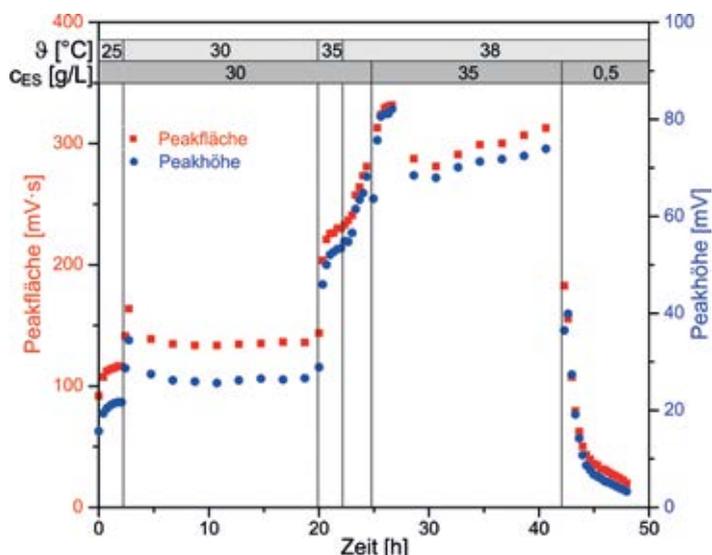


Abb. 5: Extraktionsergebnisse aus ungepuffertem Essigsäurelösung bei unterschiedlichen Essigsäurekonzentrationen und Medientemperaturen

t_{90} -Zeit von etwa einer Stunde in den Messwerten bemerkbar, was im Wesentlichen an der langsamen Gleichgewichtseinstellung der adsorbierten Spezies liegt. Da der verwendete FID einen linearen Messbereich über etwa 6 Zehnerpotenzen bietet, ließ sich auch aus Modellmedien, die bei $\text{pH} = 7$ gepuffert waren, Essigsäure in solcher Menge extrahieren, dass bei etwa der Konzentration von 1 g/l noch Peakflächen von etwa $10 \text{ mV} \cdot \text{s}$ gefunden wurden.

3.3 Erprobung des Messverfahrens in den Laborreaktoren

Das neue Online-Messsystem wurde wie in Abbildung 6 dargestellt an die in Abbildung 1 gezeigte thermophil betriebene Labor-Biogasanlage adaptiert. Abbildung 7 zeigt einen typischen Essigsäureverlauf im Vergleich zu Werten für das FOS/TAC-Verhältnis und für die Essigsäurekonzentration, die parallel an entnommenen Proben bestimmt wurden. Weiterhin sind der pH-Verlauf des Gärmediums und die Fütterungszeitpunkte und Fütterungsmengen gekennzeichnet. Die hohe Pufferkapazität von Biogasmedien bewirkt eine verzögerte pH-Wert-Änderung bei kritischen Zuständen, wie der Verlauf dieses Parameters an den Tagen 13–15 belegt. Andererseits führt diese Pufferkapazität bei normalem Prozessverlauf zu einem hochkonstanten pH-Wert, was für die konstante Extraktion von VFA von Vorteil ist.



Abb. 6: Fotografien des in die Biogas-Laboranlage integrierten Messsystems sowie des Edelstahl-extraktors nach Beendigung der Messkampagne (Quelle: KSI-Meinzberg)

Der mit dem Online-Messsystem aufgezeichnete Verlauf des Essigsäuregehaltes (schwarze Linie) zeigt erwartungsgemäß nach der Fütterung Spitzen, die innerhalb eines Tages wieder abklingen, wie insbesondere zu Beginn und in der Mitte des in Abbildung 7 gezeigten Abschnitts deutlich wird.

An fütterungsfreien Tagen sinkt der Essigsäuregehalt wieder ab und erreicht bei weiterer Fütterung von 1.400 g Maissilage pro Tag nach etwa 50 Stunden den Durch-

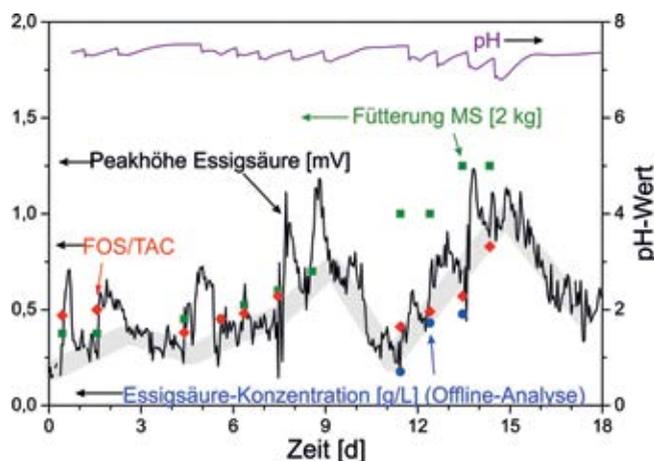


Abb. 7: Während eines Abschnitts der Messkampagne mit dem Online-Messsystem aufgezeichneter Essigsäureverlauf im Vergleich zu FOS/TAC- und Essigsäuredaten, die parallel über Offline-Methoden bestimmt wurden. Außerdem sind der pH-Verlauf des Gärmediums sowie die Fütterungszeitpunkte und -mengen von Maissilage (MS) dargestellt.

schnittswert vom Versuchsbeginn (Bereich 8–11 d in Abb. 7). Der durch die gesteigerte Fütterung eingeleitete Übersäuerungsprozess war folglich reversibel. Mit erneuter, weiter gesteigerter Fütterung von bis zu 2.500 g Maissilage pro Tag stieg der Essigsäuregehalt schneller und höher an. Die damit verbundene pH-Wert-Absenkung signalisiert den kritischen Zustand des Gärmediums. Der Essigsäuregehalt sank in den darauffolgenden 4 fütterungsfreien Tagen (14–18 d) fast auf den ursprünglichen Durchschnittswert ab und zeigt, dass der kritische Zustand ohne weitere Eingriffe überwunden werden konnte.

Die mit dem Online-Messsystem aufgezeichneten Konzentrationsverläufe der Essigsäure stimmen sehr gut mit den offline bestimmten Verläufen von FOS/TAC und der Essigsäurekonzentration überein. Die Anzahl der Datenpunkte der offline bestimmten Essigsäurekonzentration reicht nicht aus, um damit das Online-Messsystem kalibrieren zu können. Als Abschätzung kann jedoch für die Umrechnung von Peakhöhe (mV) in die Essigsäurekonzentration (mg/l) bei den aktuell verwendeten Randbedingungen des Online-Messsystems (Volumenstrom des Extraktionsgases, Extraktorgeometrie, Medientemperatur) ein Faktor von 700 mg/(l·mV) angenommen werden.

3.4 Erprobung des Messsystems an einer Praxisanlage

Das entwickelte Online-Messsystem wurde nach den Laboruntersuchungen in eine mesophil betriebene Biogas-Großanlage integriert und dort über 4 Wochen zur Messung der Essigsäurekonzentration kontinuierlich betrieben. Die Extraktion erfolgte mit dem in Abbildung 8 dargestellten Extraktor in einem Pumpengehäuse für die externe Umwälzung des Gärmediums. Im Zeitraum der Messung wurde die Biogasanlage mit einer



Abb. 8: Gasextraktor aus Edelstahl (Quelle: KSI-Meinzberg)

täglich konstanten Menge Rindergülle gefüttert, wochentags wurden außerdem in wechselnden Anteilen Grassilage, Festmist und Maissilage sowie an einigen Tagen Getreideschrot zugesetzt.

Die aufgezeichneten Essigsäuregehalte sind in Abbildung 9 vergleichend mit den Raumbelastungen, den Methanvolumenströmen und den offline bestimmten Essigsäurekonzentrationen abgebildet. Die vom Messsystem aufgezeichneten Essigsäurepeakhöhen zeigen nach einer Einlaufphase, in der Betriebsparameter optimiert wurden, im Vergleich zu denen in der Biogas-Laboranlage niedrigere Werte. Dafür gibt es zwei Ursachen: Zum einen sind die Extraktionsraten bei 38 °C (Biogas-Großanlage) nicht so hoch wie bei 55 °C (Biogas-Laboranlage), zum anderen wurde die Biogas-Großanlage mit viel geringeren Raumbelastungen als die Biogas-Laboranlage betrieben. Dadurch resultieren deutlich niedrigere Säurekonzentrationen. Das zeigen insbesondere auch die vergleichsweise niedrigen offline bestimmten Essigsäurekonzentrationen um 20 mg/l in zwei Gärrestproben.

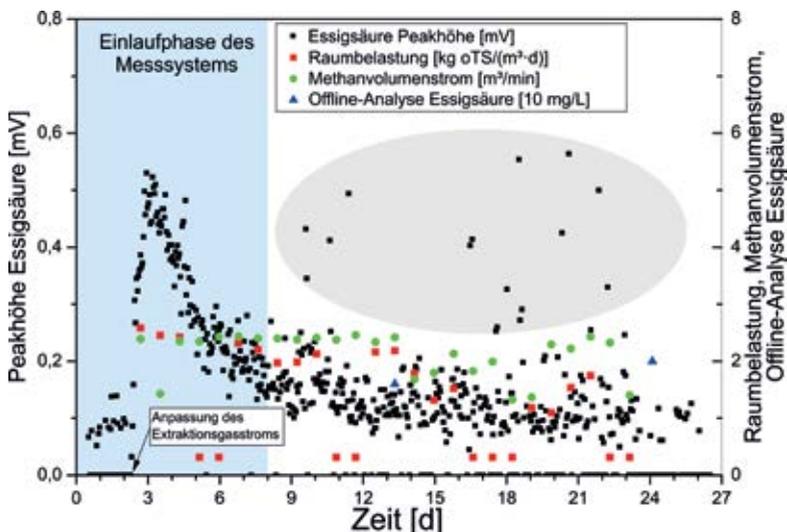


Abb. 9: Verlauf der Essigsäurekonzentration im Gärmedium einer Biogas-Großanlage: Zum Vergleich sind die Raumbelastungen, Methanvolumenströme und die an Proben bestimmten Essigsäurekonzentrationen aufgeführt. Die im grau hinterlegten Bereich enthaltenen erhöhten Messwerte für die extrahierte Essigsäure werden vermutlich durch Substratinhomogenitäten verursacht.

4 Zusammenfassung

Im Beitrag wird ein neuentwickeltes, robustes und kostengünstiges Messsystem für flüchtige Fettsäuren in Biogasmedien vorgestellt, das aus einem membranfreien Extraktor und einem feldtauglichen Gaschromatographen besteht. Die Erprobung des Systems im Labor bestätigt, dass mit hoher Langzeitkonstanz geringe Essigsäurekonzentrationen auch in gepufferten Modellmedien mit ausreichender Auflösung bestimmt werden können. Messkampagnen in einer Biogas-Laboranlage und in einer Großanlage belegen, dass die Essigsäurekonzentration als sensitiver Parameter für Komplikationen dienen und bei der Prozessoptimierung helfen kann. Das neu entwickelte Messsystem ist in der Lage, sowohl in meso- als auch in thermophilen Biogasmedien Essigsäurekonzentrationen zwischen 5 und 10.000 mg/l langzeitstabil aufzuzeichnen.

Literatur

- Ahring, B.K.; Sandberg, M.; Angelidaki, I. (1995): Volatile fatty acids as indicators of process imbalance in anaerobic digestors. *Appl. Microbiol. Biotechnol.* 43, pp. 559-565
- Andree, H.; Jacobi, F.; Hartung, E. (2008): Online-NIRS-Messung an Biogasanlagen. In: *Gülzower Fachgespräche, Band 27: Messen, Steuern, Regeln bei der Biogaserzeugung*, S. 84-99
- Banel, A.; Wasielewska, M.; Zygmunt, B. (2010): Application of headspace solid-phase microextraction followed by gas chromatography-mass spectrometry to determine short-chain alkane monocarboxylic acids in aqueous samples. *Anal. Bioanal. Chem.* 299, pp. 3299-3303
- Bischofsberger, W.; Dichtl, N.; Rosenwinkel, K.-H.; Seyfried, C.F. (2005): *Anaerobtechnik*. 2. Aufl., Springer Verlag, Berlin
- Boe, K.; Batstone, D.J.; Angelidaki, I. (2007): An Innovative Online VFA Monitoring System for the Anerobic Process, Based on Headspace Gas Chromatography. *Biotechnology and Bioengineering* 96, pp. 712-721
- Brotsack, R.; Maier, G.; Nusko, R. (2001): *Mobile Analytik zur VFA Bestimmung*. DE 000010134656 B4
- Rototherm Canongate Technology (2012): *Embra CarboCheck System 2000*. Leaflet CarboCK211004, Edinburgh
- FNR (2013): *Leitfaden Biogas - Von der Gewinnung zur Nutzung*. 6. überarbeitete Auflage, Gülzow, S. 80-81
- FNR (2004): *Biogasanlagen*. 12 Datenblätter
- Görz, G.; Meißbauer, G. (2001): *Verfahren zur Bestimmung flüchtiger Fettsäuren (VFA) in anaeroben Fermentaten*. DE 000010134658 C2
- Kempe, E. (1986): *Probe for sampling volatile components in liquids or gases*. EP 174417 B1

- Lützhøft, H.-C.H.; Boe, K.; Fang, C.; Angelidaki, I. (2014): Comparison of VFA titration procedures used for monitoring the biogas process. *Water Research* 54, pp. 262-272
- Ott, M. (2002): Biogasanalyse - der Nutzen für den Betreiber ist vielseitig. In: Erneuerbare Energien, Septemberausgabe, SunMedia Verlags GmbH, Hannover
- Pätz, R.; Berthold, C.; Schirmer, E. (1998): Verfahren und Anordnung zur Ermittlung der anaeroben Abbaubarkeit von organischen Stoffen. DE 19844315
- Palacio-Barco, E. et al. (2010): On-line analysis of volatile fatty acids in anaerobic treatment processes. *Analytica Chimica Acta* 668, pp. 74-79
- Pind, P.; Angelidaki, I.; Ahring, B.K. (2003): A new VFA sensor technique for anaerobic reactor systems. *Biotechnology and Bioengineering* 82, pp. 54-61
- Schelter, M.; Zosel, J.; Oelßner, W.; Guth, U.; Mertig, M. (2013): A solid electrolyte sensor for trace gas analysis. *Sensors and Actuators B: Chemical* 187, pp. 209-214
- Schelter, M.; Zosel, J.; Oelßner, W.; Zimmermann, P. (2014): Langzeitstabile Inline-Messung organischer Säuren zur Beurteilung von Biogasprozessen (LIMOS). Schlussbericht zum FNR-Vorhaben 10NR111
- Schelter, M.; Zosel, J.; Oelßner, W.; Mertig, M. (2014): A novel method for measuring dissolved gases in liquids. *Sensors and Actuators B: Chemical* 192, pp. 113-120
- Stockl, A. (2013): Entwicklung und Erprobung eines Online-Messsystems für Biogasanlagen auf Basis der Nah-Infrarot-Reflexionsspektroskopie (NIRS). Dissertation, Universität Hohenheim
- Walte, A.; Münchmeyer, W.; Linke, B.; Härtge, I.; Becker, B.; Wehrhan, A.; Buchholz, A. (2008): Verwendung eines Propionsäure erkennenden Gas-Sensor-Arrays zur Regelung von Vergärungsprozessen. In: Gülzower Fachgespräche, Band 27: Messen, Steuern, Regeln bei der Biogaserzeugung. S. 72-83
- Weiland, P.; Rieger, Ch.; Ehrmann, Th.; Helffrich, D.; Kissel, R.; Melcher, F. (2004): Evaluierung von Biogasanlagen der neuen Generation. Tagungsband 5. Bio-Solar-Fachtagung, Heiden, S. 6-15
- Wiese, J.; König, R. (2007): Prozessbegleitende Fermenterüberwachung auf Biogasanlagen. Praxisbericht Laboranalytik & Prozessmesstechnik. Hach-Lange GmbH, DOC 040.72.00447.May07
- Wiese J.; König R. (2008): Einsatz von Mess- und Automatisierungstechnik auf modernen Biogasanlagen – Ergebnisse großtechnischer Anwendungen. *Energie Wasser-Praxis* 11, S. 16-21
- Wolf, C.; Gaida, D.; Stuhlsatz, A.; McLoone, S; Bongards, M. (2010): Organic Acid Prediction in Biogas Plants Using UV/vis Spectroscopic Online-Measurements. In: Li, K. et al. (Eds.): LSMS/ICSEE 2010, Part I, CCIS 97, Springer Verlag, Berlin, pp. 200-206

Repowering im Biogasanlagenbestand – Einführung des Nutzungsgrades zur Bewertung von effizienzsteigernden Maßnahmen

ELMAR FISCHER, JAN POSTEL, FLORIAN EHRENDREICH

1 Einleitung

Biogasanlagen unterliegen fortlaufend technischen Modifikationen, welche den Betriebsablauf optimieren und Betriebsmittel einsparen sollen. Hierfür hat sich in den letzten Jahren die Bezeichnung Repowering als Sammelbegriff etabliert. Eine exakte begriffliche Definition von Repoweringmaßnahmen wie bei anderen konventionellen und erneuerbaren Kraftwerksprozessen gibt es bisher nicht; vielmehr können auch turnusmäßige Wartungs- und Instandhaltungsmaßnahmen als Repowering bezeichnet werden. Um Maßnahmen im Sinne eines Repowering beurteilen und den Erfolg bewerten zu können, braucht es eine differenziertere Betrachtung von Effizienz und Effektivität.

2 Repowering im Biogassektor

In sehr vielen konventionellen und erneuerbaren Sektoren der Energiebereitstellung wird der Begriff Repowering für Maßnahmen verwendet, die zur Steigerung der Ausbeute und vereinzelt zur Leistungssteigerung, teils durch Ergänzung mit solar betriebenen Kraftwerkskomponenten, dienen (POPOV 2011, ZEKI et al. 2012, ESCOSA und ROMEO 2009). Eine etablierte und eindeutige Definition wurde bis dato nur für den Windenergiesektor vorgenommen (Bundesverband WindEnergie e.V. 2012), welche zusätzlich durch § 30 EEG 2012 konkretisiert wurde (EEG 2012). Eine direkte Übertragung dieser Definition auf Biogasanlagen ist mit Blick auf den Anlagenstandort, den Zwangsrückbau und der bereitstellbaren Zielenergie von Windenergieanlagen allerdings nicht möglich. Im Biogassektor kann jede biologische, organisatorische, technische oder betriebliche Änderung, die an einer bestehenden Anlage durchgeführt wird, als Repowering bezeichnet werden. Dabei ist eine Unterscheidung zwischen notwendigen Maßnahmen zur Sicherstellung der Betriebsfähigkeit und Eingriffen zur gezielten Verbesserung der Anlagenperformance nicht gegeben. Solide Kriterien, insbesondere Kennzahlen, zur Identifizierung von Repowering sind nicht definiert. Trotz der völlig undifferenzierten Verwendung des Begriffes Repowering, lässt er sich generalisierend als Optimierung bestehender Anlagen mit der Motivation die Effizienz zu steigern, zusammenfassen. Der Begriff der Effizienz wird ebenso häufig zur Beurteilung von Optimierungsmaßnahmen im Sinne einer Er-

tragssteigerung herangezogen. Im Unterschied zur Effektivität, die nur den Grad einer Zielerreichung angibt, stellt die Effizienz das Verhältnis des Erreichten zum Aufwand dar. Eine fundierte Beurteilung der Effizienz kann demnach nicht ohne Berücksichtigung der Inputstoffe (verwendete Substrate) und der Prozessenergie erfolgen. Für die Beschreibung im quasi-stationären Zustand wird so der Wirkungsgrad ermittelt, der einen theoretischen Zielwert darstellt. Bei Betrachtung eines endlichen Betriebszeitraums, wird der Wirkungsgrad um den Grad der Auslastung verringert und als Nutzungsgrad (der Nutzungsgrad im energietechnischen Sinne nimmt die Perspektive des Kraftwerksprozesses ein und stellt keine Information über die tatsächliche Nutzung der bereitgestellten Energie dar) bezeichnet. Die behauptete Wirkungsgradsteigerung einer Repoweringmaßnahme kann infolge geringer Auslastung egalisiert werden, sodass die Maßnahme als nicht erfolgreich zu werten ist. Derartige Beispiele werden von EFFENBERGER (2008, 2013) im Zusammenhang mit einer Erhöhung der Blockheizkraftwerksleistung gezeigt, was die Bedeutung des Nutzungsgrades gegenüber dem Wirkungsgrad hervorhebt.

Repowering bezeichnet demnach mittel- bis langfristig geplante technische Modifikationen zur gezielten Steigerung des Nutzungsgrades. Hierbei sind 3 Kategorien zu unterscheiden (Abb. 1).

I - gezielte technische Maßnahmen Austausch funktionsfähiger tech. Komponenten zusätzliche Gärbehälter & Substrataufschluss Erschließung neuer Nutzungspfade
II - Maßnahmen im Betriebsablauf Verringerung der Stillstandszeiten Prozesskontrolle, Logistikkonzept Vorhalten von Ersatzteilen
III - Wiederherstellung der Betriebsbereitschaft Ersatz defekter Komponenten Gegenwirken gegen akute Probleme Wartungen

Abb. 1: Kategorisierung von Repoweringmaßnahmen anhand eines planvollen Vorgehens und der beabsichtigten Steigerung des Nutzungsgrades

Kategorie I bezeichnet das „Repowering im engeren Sinne“. Es zielt auf geplante technische Modifikationen zur Steigerung des Wirkungsgrades. Beispiele sind der Austausch von Komponenten und Anlagenteilen vor Ablauf der Lebensdauer, der Neubau zusätzlicher Baugruppen wie Gärbehälter, Aggregate zur Verbesserung des Substrataufschlusses

sowie die Erhöhung der Arbeitsausnutzung durch Erschließung neuer Nutzungspfade (Abwärmenutzung, Biomethanbereitstellung).

Kategorie II bezeichnet das „Repowering im weiteren Sinne“. Es umfasst organisatorische Maßnahmen zur Verbesserung des Betriebsablaufs mit dem Ziel, die Arbeitsausnutzung zu steigern. Hierunter können Maßnahmen zur Verringerung von Stillstandszeiten, wie zum Beispiel gezielte Prozesskontrolle und das Vorhalten von Ersatzteilen störungsanfälliger Komponenten, subsummiert werden.

Unter Kategorie III fallen Reparatur- und Instandhaltungsmaßnahmen, welche nicht als Repowering verstanden werden können. Dazu zählen beispielsweise der Ersatz von Komponenten (Alter, Verschleiß oder Defekt) oder das akute Handeln gegen Probleme bei der Fermentation durch Zugabe biologischer Hilfsmittel.

Während die Maßnahmen der ersten Kategorie eine bessere Ausschöpfung des Substrats als auch eine höhere Arbeitsausnutzung anstreben, zielen Maßnahmen der zweiten Kategorie hauptsächlich auf eine möglichst hohe Arbeitsausnutzung ab. Maßnahmen der dritten Kategorie dienen primär der Aufrechterhaltung der technischen Betriebsfähigkeit der Anlage.

3 Motivation der Anlagenbetreiber

Es werden drei Hauptgründe unterstellt, welche Auslöser für ein Repowering sein können:

- (1) Der Betreiber ist grundsätzlich bestrebt die Wirtschaftlichkeit seiner Anlage zu maximieren, was über die Erhöhung des Outputs und Senkung der Betriebskosten realisiert werden kann. Als Beispiele sind hier der Austausch des Blockheizkraftwerk (BHKW), die Erhöhung des Substratdurchsatzes und Verwendung kostengünstiger Substrate zu nennen.
- (2) Umweltschutzrechtliche Anforderungen (Novellierungen von EEG, Anlagenverordnung (AwSV) und Bundes-Immisionsschutzgesetz (BImSchG)) ziehen technische Modifikationen der Anlage nach sich.
- (3) Veränderte Rahmenbedingungen im Umfeld, welche die Biogasanlage nur indirekt betreffen, können ebenso Auslöser für Umbaumaßnahmen sein. Insbesondere sind hiervon Anlagen betroffen, die eng in einen landwirtschaftlichen Betrieb eingebunden sind. Zur Ermittlung der konkreten Motive wurde eine bundesweite Befragung von 845 Anlagenbetreibern durchgeführt, die bereits Repoweringmaßnahmen durchgeführt hatten (DBFZ 2013, 2014). Das durchschnittliche Alter der Biogasanlagen lag 2014 bei 8,2 Jahren; durchschnittlich wurden 3,3 Repoweringmaßnahmen durchgeführt; Austausch und Leistungserhöhung des BHKW sowie die Abwärmenutzung waren die bei weitem am häufigsten praktizierten Maßnahmen (Abb. 2).

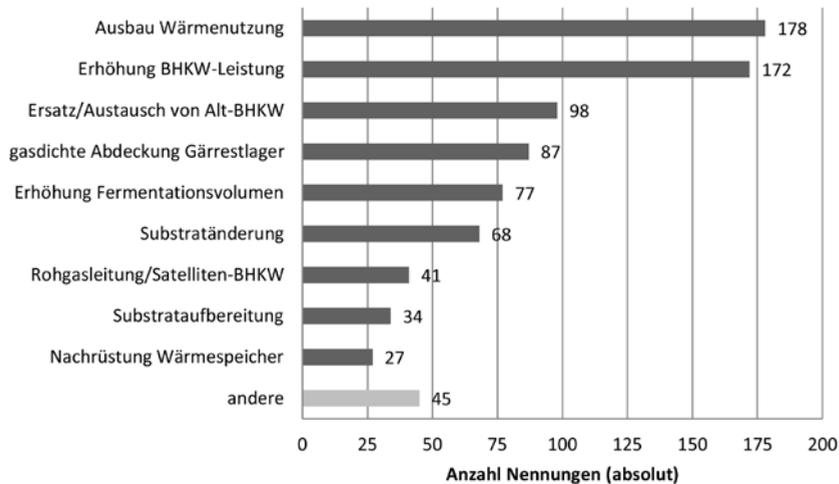


Abb. 2: Durchgeführte Repoweringmaßnahmen

Die Erhöhung des Fermentationsvolumens, die Abdeckung von Gärrestlagern und Substratanpassungen sind weitere, häufig genannte Maßnahmen. Seltener werden Satelliten-BHKW und Vorbehandlungsaggregate benannt, sonstige Maßnahmen werden nur bei einer kleinen Anzahl von Betreibern aufgeführt. Die Erhebung verdeutlicht, dass die Branche sehr auf die Maximierung der Konversions- und der Abnahmeseite fokussiert ist, während produktionsseitige Maßnahmen eine deutlich geringere Rolle einnehmen. Ob eine Maßnahme darüber hinaus im Nachhinein auch als erfolgreich zu werten ist, scheint nicht allen Befragten klar zu sein. Die Bandbreite der Antworten legt nahe, dass hier sehr unterschiedliche Auffassungen bestehen (Abb. 3). Die Subjektivität der Erfolgseinschätzung begründet sich aus dem bewussten Verzicht einer klaren Definition des Repoweringbegriffs und Kategorisierung durchgeführter Maßnahmen.

Festzuhalten ist, dass sich eine Mehrheit der Anlagenbetreiber in der Lage sieht, Auswirkungen von Umbaumaßnahmen hinsichtlich ihrer ökonomischen und technischen Effizienz zu bewerten. Hierbei werten nahezu alle Betreiber die durchgeführten Maßnahmen positiv. Offensichtlich fällt es den Betreibern leicht Aussagen zur wirtschaftlichen und technischen Vorteilhaftigkeit anhand von Ausgaben, Erlösen, Datenblättern und Messungen zu machen. Sichtbar wird die relativ enge Verknüpfung von ökonomischer und technischer Effizienz dadurch, dass eine Erhöhung des Nutzungsgrades immer mit einer Verbesserung der Erlössituation verbunden ist. Eine bessere Ausnutzung der im Substrat enthaltenen Energie stellt eine Steigerung der energetischen Effizienz dar, der Anreiz liegt aber meist in der Substratkosteneinsparung beziehungsweise den zusätzlichen Erlösen, die durch eine größere Stromausbeute erzielt werden können. Nur ein

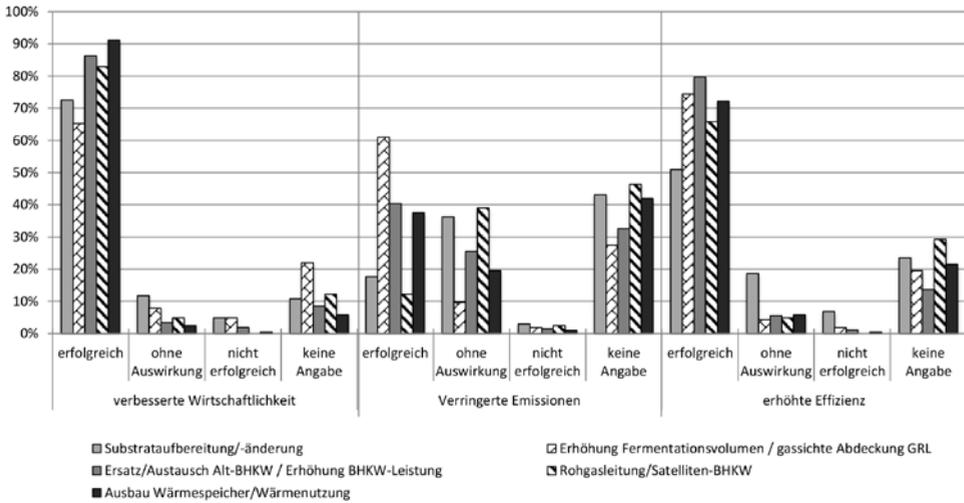


Abb. 3: Bewertung des Erfolgs von Repoweringmaßnahmen

geringer Anteil konstatierte keine Auswirkungen der durchgeführten Maßnahmen auf die Wirtschaftlichkeit und technische Effizienz oder machte diesbezüglich keine Angaben. Ein entgegengesetztes Bild lieferte die Einschätzung, ob eine Verringerung von Emissionen mit den Umbaumaßnahmen einherging. Hier konnte eine qualifizierte Mehrheit keine Angaben machen oder schätzte diese weder positiv noch negativ ein (ohne Auswirkungen). Dies verdeutlicht, dass der maßgebliche Anteil der Betreiber sich nicht in der Lage sieht, den Effekt einer Maßnahme bezüglich ihrer Umweltwirkung konkret zu fassen. Das könnte zum einen damit zusammenhängen, dass entsprechende Überwachungs- und Monitoringsysteme an den Biogasanlagen fehlen, zum anderen, dass die Verringerung von Emissionen nicht immer direkt mit der jeweiligen Maßnahme verknüpft und somit nur schwierig nachzuvollziehen ist.

4 Brennstoffausnutzungsgrad

Es existiert zwar eine große Zahl von Ansätzen, die zur Bilanzierung von Energieflüssen des Systems Biogasanlage verwendet werden können (HAVUKAINEN et al. 2014), eine zielgerichtete Optimierung des Systems im Sinne eines Kraftwerksprozesses ist mit bisher präsentierten Methoden nicht möglich, da keine belastbaren Angaben zur Ausnutzung des Brennstoffpotenzials gewonnen werden. Betrachtet man das produzierte Biogas als sekundären und die Inputstoffe als primären Energieträger, muss die Berechnung des Brennstoffausnutzungsgrades auf Basis der zugeführten Energie des Prozesses – also

den Substraten der Biogaserzeugung – erfolgen. Der mittlere Brennstoffausnutzungsgrad lässt sich anhand der Gleichung (1) folgendermaßen definieren:

$$\bar{\omega} = \frac{W_{el,netto} + Q_{nutz}}{m * H_S} \quad \text{Gl. 1}$$

$\bar{\omega}$ mittlerer Brennstoffausnutzungsgrad
 $W_{el,netto}$ Netto-/Nutz-Stromerzeugung
 Q_{nutz} Nutz-Wärmemenge
 m Masse/Menge des Einsatzstoffes
 H_S Brennwert des Einsatzstoffes

Die Anwendung des mittleren Brennstoffausnutzungsgrades ist bei Kraft-Wärme-Kopplungs(KWK)-Anlagen etabliert und eignet sich daher auch für den Vergleich von Biogasanlagen. Zu beachten ist, dass die in Gleichung (1) angegebenen Zielenergiemengen die nutzbar abgegebenen Energiemengen darstellen. Vorteil ist, dass die im Biogasanlagenbetrieb relevanten Faktoren Eigenenergiebedarf und externe Wärmenutzung berücksichtigt werden können. Hierbei wird unterstellt, dass die ins Stromnetz eingespeiste Nettostrommenge gleich der verfügbaren Nutzstrommenge ist. In Abbildung 4 ist dies durch die zahlengleiche Nummerierung der Netto- und Nutzstrommengen gekennzeichnet.

Zur Berechnung des Brennstoffausnutzungsgrades sind neben den Brennstoffmengen Daten für die Strom- und Wärmeauskopplung sowie ein Bezugswert zur Charakterisierung des Brennwertes erforderlich. Eigene Untersuchungen zeigen mittlere Brennwerte für Energiepflanzen von $18,2 \pm 0,7 \text{ MJ/kg}^{-1}_{TS}$ und für Exkremente von $17,0 \pm 1,6 \text{ MJ/kg}^{-1}_{TS}$.

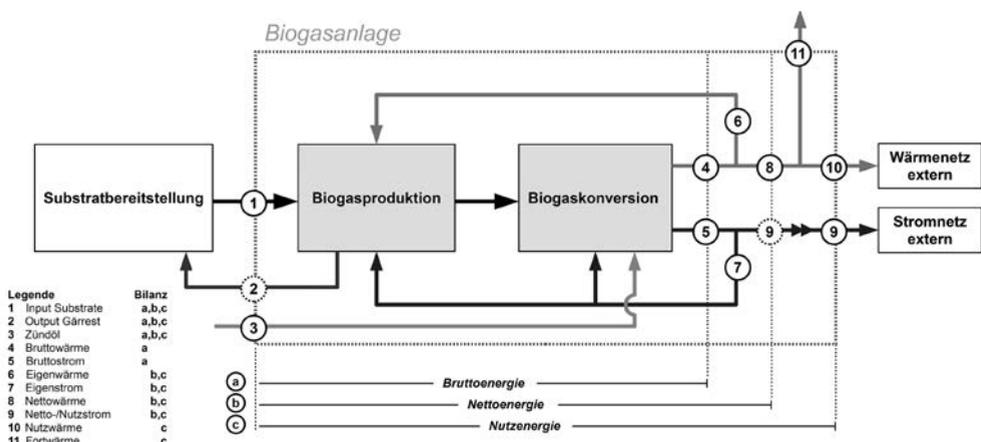


Abb. 4: Grenzen für Nutz-, Netto- und Bruttoenergiebilanzen

Weitere in der Literatur dokumentierte Untersuchungen an unterschiedlichen pflanzlichen Biomassen deuten auf einen mittleren Brennwert von $18,0 \pm 1,0 \text{ MJ/kg}^{-1}_{\text{TS}}$ hin (PFEIFER und OBERNBERGER 2007, SUTTER 2013, OECHSNER und HELFFRICH 2005, EROL et al. 2010, RAVEENDRAN und GANESH 1996, YIN 2011). Der Fehler bei einer Abweichung von $1 \text{ MJ/kg}^{-1}_{\text{TS}}$ ist mit 5,6 % im Vergleich zu den branchenüblichen Gasertragsrichtwerten deutlich geringer und generiert gegenüber Batch-Tests mit ähnlicher Abweichung (OHL 2011) belastbare Ergebnisse in sehr kurzer Zeit. Die Standardabweichung des mittleren Brennwertes der Exkremente fällt etwas höher aus und ist mit der Heterogenität der stofflichen Zusammensetzung, auf Basis der Tierart, der Art der Entmistung, dem Einspülen von Oberflächenwasser und Futtermittelresten zu erklären.

Mithilfe dieser Bezugswerte wurde unter Verwendung der Gleichung (1) der mittlere Brennstoffausnutzungsgrad für eine landwirtschaftliche Biogasanlage (Tab. 1) bestimmt, die im Betrachtungszeitraum (2010–2013) umfassend modifiziert wurde. Die technischen Änderungen und Ergänzungen umfassen:

- Ersatz des Alt-BHKW durch ein leistungsstärkeres mit erhöhtem elektrischen Wirkungsgrad (2011)
- Erhöhung des Substratdurchsatzes (2011)
- Einbau eines Substrataufschlussverfahrens (2011)
- Erneuerung der gasdichten Abdeckung des Nachgärbehälters (2012)
- Leistungserhöhung des Neu-BHKW (2012)
- Anschluss zusätzlicher Wärmeabnehmer (2012, 2013).

Tab. 1: Übersicht relevanter Eingangsdaten und des resultierenden mittleren Brennstoffausnutzungsgrades verschiedener Betriebsjahre

	Einheit	2010	2011	2012	2013
Elektrische Nennleistung	kW	330	(330) 499	(499) 526	526
Thermische Nennleistung	kW	392	(392) 500	(500) 519	519
Substrateleistung	kW	1.681	1.957	2.374	2.269
Anteil Gülle/Festmist	%	83	79	73	77
Anteil NawaRo	%	17	21	27	23
Nettostrommenge	kWh	2.397.662	3.049.111	3.940.484	3.750.678
Nutzwärmemenge	kWh	577.190	528.130	715.870	842.120
Theoretische elektrische und thermische Arbeit (8.760 h/a) (Schaltjahr 2012: 8.784 h/a)	kWh	6.324.720	7.789.914	9.145.056	9.154.200
Mittlerer Brennstoffausnutzungsgrad der Nutzenergieproduktion	[-]	0,20	0,21	0,22	0,23

Der Brennstoffausnutzungsgrad nimmt über einen Zeitraum von 4 Jahren steigende Werte zwischen 20 und 23 % an. Frühere Untersuchungen der Energieflüsse landwirtschaftlicher Biogasanlagen sind mit der hier angewandten Methode des mittleren

Brennstoffausnutzungsgrades vergleichbar, sie zeigen Nutzungsgrade zwischen 19,1 und 39,7 %, abhängig von der Substratausschöpfung und dem Grad der Wärmenutzung (FISCHER et al. (2015)). Im Falle einer vollständigen Wärmenutzung würden die Werte der hier bewerteten Anlage auf etwa 36 bis 38 % steigen. Die Modellrechnungen werden maßgeblich durch die Faktoren Biogasertrag und Eigenenergiebedarf beeinflusst. Die unterschiedlichen Abbaubarkeiten von Substraten können bei der Ermittlung des Energiegehaltes des Substrates nicht berücksichtigt werden. Daher können die brennstoffbezogenen mittleren Ausnutzungsgrade nur zwischen Anlagen und Betriebsjahren verglichen werden, wenn diese ein ähnliches Einsatzstoffspektrum aufweisen. Durch den sehr hohen Gülleanteil mit einem zum Mais vergleichsweise schlechteren Abbau der organischen Substanz, fällt der Brennstoffausnutzungsgrad relativ gering aus. Unterstellt man ungeachtet der baulichen Voraussetzungen und notwendigen Eigenbedarfe einen hundertprozentigen Maiseinsatz, so belief sich der Brennstoffausnutzungsgrad der in Tabelle 1 dargestellten Biogasanlage auf 33 bis 34 %. Um diesen Substrateinfluss zu berücksichtigen, kann ein Bezug des energetischen Potenzials der Einsatzstoffe auf den Anteil der fermentierbaren organischen Trockensubstanz nach WEISSBACH (2008, 2011, 2012) erfolgen. Hierbei sind spezifische Brennwerte der fermentierbaren und nicht fermentierbaren organischen Trockensubstanz anzuwenden.

5 Fazit

Maßnahmen zur Optimierung von Biogasanlagen lassen sich hinsichtlich einer strukturierten Vorgehensweise und der erreichten Leistungs- bzw. Outputsteigerung in drei Kategorien einteilen. Eine Erhebung zeigt, dass der Anlagenbetrieb klar in Richtung der Effektivität – also der Maximierung des Energieertrags – optimiert wird. Der effiziente Einsatz der Mittel wird dabei entweder gar nicht betrachtet oder weitestgehend auf eine ökonomische Betrachtung reduziert. Die Bewertung einer Biogasanlage sollte Produktions- und Konversionsprozess gleichermaßen beinhalten. Der Brennstoffausnutzungsgrad ist dafür geeignet und kann für Biogasanlagen angewendet werden. Er ist primär abhängig von der Qualität der Inputmaterialien, dem Anlagenbetrieb und der Grad der Wärmenutzung. Für eine großtechnische Anlage wurde ein Ausnutzungsgrad von 20 bis 23 % über mehrere Betriebsjahre bestimmt. Im Vergleich zu den Nutzungsgraden anderer güllebasierter Biogasanlagen lässt dieser Wert ein erhebliches ungenutztes Potenzial erwarten. Die Vorgehensweise eignet sich für eine vergleichende Bewertung ähnlicher Anlagen ebenso wie zur Definition von Leistungszielen für den Neubau oder das Repowering landwirtschaftlicher Biogasanlagen.

Literatur

- Bundesverband WindEnergie e. V. (Hg.) (2012): Repowering von Windenergieanlagen. Effizienz, Klimaschutz, regionale Wertschöpfung, Berlin
- DBFZ (2013): Stromerzeugung aus Biomasse O3MAP250 – Zwischenbericht. Deutsches Biomasseforschungszentrum gGmbH, Leipzig
- DBFZ (2014): Stromerzeugung aus Biomasse O3MAP250 – Zwischenbericht. Deutsches Biomasseforschungszentrum gGmbH, Leipzig
- EEG (2012): Gesetz für den Vorrang Erneuerbarer Energien vom 25. Oktober 2008. Bundesgesetzblatt I S. 2074, geändert durch Artikel 1 des Gesetzes vom 17. August 2012; Bundesgesetzblatt I S. 1754
- Erol, M.; Haykiri-Acma, H.; Küçükbayrak, S. (2010): Calorific value estimation of biomass from their proximate analyses data. *Renewable Energy* 35(1), pp. 170–173
- Escosa, J.; Romeo, L. (2009): Optimizing CO₂ avoided cost by means of repowering. *Applied Energy* 86, pp. 2351–2358
- Effenberger, M. et al. (2008): Verfahrenstechnische Bewertung landwirtschaftlicher Biogasanlagen, *Landtechnik* 63(5) S. 290–292
- Effenberger, M. (2013): Handlungsempfehlungen zur Effizienzsteigerung an Biogasanlagen. Leipziger Biogasfachgespräche am 06. November 2013, Leipzig
- Fischer, E. et al. (2015): Wirkungs- und Nutzungsgrade der landwirtschaftlichen Biogas-erzeugung aus nachwachsenden Rohstoffen und Gülle; *VGB PowerTech* 01/02, S. 68–73
- Havukainen, J. et al. (2014): Evaluation for estimating energy performance of biogas production. *Renewable Energy* 66, pp. 232–240
- Pfeifer, J.; Obernberger, I. (2007): Technological Evaluation of an agricultural biogas CHP plant as well as definition of guiding values for the improves design and operation, pp. 1864–68
- Sutter, R. (2013): Analyse und Bewertung der Einflussgrößen auf die Optimierung der Rohbiogasproduktion hinsichtlich der Konstanz von Biogasqualität und-menge. Agrar- und Umweltwissenschaftliche Fakultät, Rostock
- Oechsner, H.; Helffrich, D. (2005): Technische Anforderungen an Biogasanlagen bei der Vergärung nachwachsender Rohstoffe. *Biogas Energieträger der Zukunft*, 12./13. April 2005, Osnabrück
- Ohl, S. (2011): Ermittlung der Biogas- und Methanausbeute ausgewählter Nawaro. Dissertation. Christian-Albrechts-Universität, Kiel
- Popov, D. (2011): An option for solar thermal repowering of fossil fuel fired power plants. *Solar Energy* 85, pp. 344–349
- Raveendran, K.; Ganesh, A. (1996): Heating value of biomass and biomass pyrolysis products. *Fuel* 75(15), pp. 1715–1720
- Weißbach, F. (2008): Zur Bewertung des Gasbildungspotentials von nachwachsenden Rohstoffen, *Landtechnik* 6, S. 356–358a
- Weißbach, F. (2011): Das Gasbildungspotentials von Schweinegülle bei der Biogasgewinnung, *Landtechnik* 6, S. 460–464

- Weißbach, F. (2012): Das Gasbildungspotentials von Hühnertrockenkot bei der Biogasgewinnung; Landtechnik 4; S. 299–304
- Yin, C.-Y. (2011): Prediction of higher heating values of biomass from proximate and ultimate analyses. Fuel 90, pp. 1128–1132
- Zeki, M. et al. (2012): Solar repowering of Soma-A thermal power plant. Energy Conversion and Management 64, pp. 232–237

Danksagung

Die Arbeiten wurden durch eine Zuwendung der Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. gefördert (FKZ: 22400912).

Abbauleistung von landwirtschaftlichen Biogasanlagen – Restgaspotenzialuntersuchung an 25 Anlagen

HANS OECHSNER, STEPHAN RUILE, SABINE SCHMITZ

1 Einleitung

Die Erzeugung und Verwertung von Biogas als Energieträger hat in Deutschland in den vergangenen Jahren eine beachtliche Steigerung erfahren, was insbesondere auf landwirtschaftliche Biogasanlagen zurückzuführen ist. Die Anzahl der Anlagen ist nach Angaben des Fachverbandes Biogas im Jahr 2014 auf ca. 8.000 gestiegen. Zwar ist der weitere Ausbau der Biogasanlagen durch die deutlich veränderten Vorgaben des Erneuerbaren Energien Gesetzes (EEG) 2014 klar abgeblockt, die gesteigerten Anforderungen an eine flexible Stromproduktion stellen allerdings weitere Herausforderungen für die Optimierung der bestehenden Anlagen und Verfahren.

Die derzeit neu errichteten Biogasanlagen sind im Wesentlichen der Gruppe der Kleinanlagen mit einer Leistung unter 75 kW zuzuordnen, welche mindestens einen Anteil von 80 % an tierischen Exkrementen wie Flüssigmist vielfach aber auch Festmist vergären. Solche Biogasanlagen werden in der Regel als besonders förderungsfähig eingestuft, da in ihnen ein Substrat vergoren wird, das ohnehin an den landwirtschaftlichen Betrieben anfällt. Durch die anaerobe Vergärung erfährt das Substrat positive Veränderungen (Geruchsabbau, höheren Ammoniumanteil, bessere Fließigenschaften, Tauglichkeit als Kopfdünger), die die Anwendung des Gärrestes als Dünger erheblich verbessern können. Generell ist davon auszugehen, dass beim Einsatz dieser Substrate im Biogasprozess eine Reduzierung von negativen Umweltauswirkungen von Flüssig- und Festmist erreicht wird, da das in der Biogasanlage gesammelte und verwertete Methan nicht mehr unkontrolliert aus einem Festmiststapel bzw. einem Flüssigmistlagerbehälter entweichen kann.

Die meisten der landwirtschaftlichen Biogasanlagen nutzen nachwachsende Rohstoffe als Gärsubstrat. Nach Angaben der Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe (FNR 2015) werden derzeit 1,268 Mio. ha Ackerland für die Produktion von Energiepflanzen für Biogasanlagen genutzt. Das sind ca. 10 % der verfügbaren Ackerfläche. Allein vom Ackerland fällt eine Biomassemenge von ca. 60 Mio. t an, die in den Biogasanlagen vergoren wird. Vor allem für diese Art der Biomasse, die durch intensiven Anbau erzeugt werden muss und dadurch hohe Anbaukosten verursacht, ist eine hohe Umsetzungseffizienz in der Biogasanlage Voraussetzung, um einerseits die Kosten durch hohen Energieaufwand zu kompensieren und andererseits keine unkontrollierten Methanemissionen aus dem Gärrest zu riskieren. Besonders bei der Verwendung von nachwachsenden Rohstoffen muss die

Verfahrenstechnik der Biogasanlagen gut an die Substratmenge und -art angepasst sein. Raumbelastung und hydraulische Verweilzeit müssen optimal abgestimmt sein, um möglichst viel der in der Biomasse enthaltenen Energie auch tatsächlich gewinnen zu können.

Eine weitere Substratgruppe ist von großer Bedeutung und wird zunehmend interessanter für die Vergärung in Biogasanlagen. In den Haushalten aber auch in den Betrieben zur Erzeugung von Lebensmitteln werden Abfallstoffe und Nebenprodukte erzeugt, deren Verwertung in Biogasanlagen möglich und äußerst sinnvoll ist. Nach verschiedenen Studien werden derzeit in Deutschland ca. 8,9 Mio. t Bio- und Grünabfälle gesammelt und verwertet (KERN et al. 2012, DANIEL-GROMKE 2011). Hinzu kommen ca. 2,5 Mio. t industrielle Abfälle, die sich gut für die Biogasvergärung eignen (KERN et al 2012). Bei Bio- und Grünabfällen ist zu beachten, dass nur 60 bzw. 25 % aufgrund ihres zum Teil hohen Ligningehaltes für eine anaerobe Umsetzung geeignet sind. Leider wird von dieser Biomasse derzeit nur ein sehr geringer Anteil von ca. 10 bis 15 % in rund 100 großen kommunalen Anaerobanlagen eingebracht, um dort energetisch und stofflich verwertet zu werden. Der größte Anteil des organischen Abfalls wird in etwa 1.000 großen Kompostanlagen mit ausschließlicher stofflicher Nutzung verwertet. Es besteht erheblicher Steigerungsbedarf für den anaeroben Verwertungspfad. In den 1990er-Jahren war es weit verbreitet, dass Abfallstoffe, vorwiegend energiereiche Abfälle der Lebensmittelerzeugung, in landwirtschaftlichen Kofermentationsanlagen vergoren wurden. Mehr als 50 % der damaligen Anlagen nutzten diese Stoffe sehr erfolgreich. Heute sind es nur noch relativ wenige, stark spezialisierte Anlagen. Im Jahre 2012 gab es in Baden-Württemberg nur noch 38 Anlagen, was etwa 6,5 % der existierenden Betriebe entspricht.

2 Rechtliche Vorgaben

Für NawaRo-Biogasanlagen wird in der VDI-Richtlinie 3475, Blatt 4 von 2010 gefordert, dass neu zu errichtende Gärrestlagerbehälter am Standort der Biogaserzeugung gasdicht auszuführen sind. Außerdem wird eine durchschnittliche hydraulische Verweilzeit von 150 Tagen im gasdichten System gefordert. Bei bestehenden Anlagen muss eine Mindestverweilzeit von 110 Tagen im Fermentersystem eingehalten werden. Andernfalls ist ein Emissionspotenzial von kleiner als 1,5 % einzuhalten. Letzteres ist bei einer Gärtemperatur von 20 °C und einer Vergärungsdauer von 60 Tagen zu ermitteln.

Im EEG 2012 gilt weiterhin: Bei Neuanlagen ist jedes Gärrestlager gasdicht abzudecken und es muss eine hydraulische Verweilzeit von mindestens 150 Tagen im Fermentersystem vorliegen. Bei Bestandsanlagen wird eine 110-tägige hydraulische Verweilzeit akzeptiert. Sobald an einer Bestandsanlage aber eine Erweiterung oder genehmigungspflichtige Änderung vorgenommen wird, wird sie wie eine Neuanlage behandelt.

Nur kleine Biogasanlagen (< 75 kW) mit ausschließlicher Flüssigmistvergärung sind von der Regelung zur gasdichten Abdeckung ausgenommen, da man davon ausgehen kann, dass sich durch die anaerobe Behandlung die Bedingung der Flüssigmistlagerung gegenüber der konventionellen Lagerung verbessert. Seit dem EEG 2014 wird Festmist wie Flüssigmist eingestuft.

Für Abfallvergärungsanlagen gibt es derzeit keine derartigen Vorgaben.

3 Bestimmung des Restmethan- und Emissionspotenzials von Gärresten

Bereits in den Bundesmessprogrammen I und II (FNR 2009) wurde das Restmethanpotenzial von Biogasanlagen untersucht. Dabei wurde von den beteiligten Instituten eine Methode zur Bestimmung des Restmethan- und des Emissionspotenzials entwickelt (VOGTHERR und OECHSNER 2008, OECHSNER et al. 2006). In der Novellierung der VDI-Richtlinie 4630 (2015), die derzeit im Gründruck vorliegt, wurde eine Definition für die Messung der beiden Parameter festgelegt. Siehe hierzu auch die Ausführungen im Methodenbuch des Deutschen Biomasse Forschungszentrums (DBFZ) von 2013 (OECHSNER 2013).

Für die Ermittlung des Restmethanpotenzials, welches im Substrat noch energetisch nutzbar ist, bietet sich die Vergärung des Gärrestes bei mesophiler Temperatur (37 ± 2 °C) bzw. thermophiler Temperatur (55 ± 1 °C) an. Es sollte dabei möglichst der Temperaturbereich des beprobten Behälters gewählt werden. Der Gärtest simuliert dabei die Ausgasung des Substrates in einem nachgeschalteten, beheizten Behälter (Nachgärer). Für die Untersuchung der Umweltrelevanz und der potenziellen Emissionsgefahr von Methan im unbeheizten, nicht gasdicht abgedeckten Gärrestlager bietet sich bevorzugt eine Bestimmung des Emissionspotenzials bei Raumtemperatur, also psychrophilen Bedingungen (20 ± 2 °C) an (siehe VDI-Richtlinie 3475). Für die Untersuchung wird das Substrat aus dem letzten, gasdicht geschlossenen Fermenter/Lager entnommen. Diese Probe muss repräsentativ für den Behälterinhalt sein. Es bietet sich eine mehrmalige Entnahme und Mischung der Proben an. Die Proben sind bis zur Untersuchung bei 4 °C zu kühlen, um vorzeitigen Abbau und Ausgasung zu verhindern. Die Probe wird dann bei mesophiler und bei psychrophiler Temperatur in je 3 Wiederholungsansätzen vergoren.

Der im Batchtest ermittelte spezifische Methanertrag wird mit der täglich anfallenden Menge an Gärresten verrechnet. Eine genaue Bilanzierung der Gärrestmenge ist dabei besonders wichtig. Die ermittelte Menge an Methan wird auf die täglich in der Biogasanlage erzeugte Methanmenge bezogen. (Bei Fehlen eines Gaszählers an der Anlage bietet es sich an, die Methanmenge über die erzeugte Energiemenge der Anlage abzuschätzen.) Dies ergibt dann den prozentualen Wert des Restmethan- bzw. Emissionspotenzials.

4 Untersuchung an 25 Praxisbiogasanlagen

Praxisbiogasanlagen sind je nach verwendetem Gärsubstrat, gewähltem Gärverfahren und nach Planer bzw. Hersteller sehr unterschiedlich aufgebaut, wodurch sich verschiedene Ausnutzungsgrade des Gärsubstrates ergeben. Daher wurden im Rahmen eines vom Umweltministerium Baden-Württemberg finanzierten Forschungsprojektes an 25 Biogasanlagen Untersuchungen zum Restmethanpotenzial durchgeführt. Diese Biogasanlagen unterscheiden sich in ihrem Aufbau, der Anzahl an Fermentationsstufen und in ihren Inputsubstraten. Es wurden 3 größere Abfallvergärungsanlagen und 22 landwirtschaftliche Biogasanlagen betrachtet. Bei den landwirtschaftlichen Biogasanlagen handelt es sich um 4 Gülleanlagen, die ausschließlich Flüssig- und Festmist vergären und eine Leistung von unter 75 kW aufweisen, 6 reine NawaRo-Anlagen und 12 NawaRo-Anlagen, die auch tierische Exkremente mitvergären (eine davon auch Abfallstoffe). Die elektrische Leistung der Anlagen befindet sich im Bereich zwischen 18 bis 2.000 kW, wobei eine der untersuchten Anlagen Biogas aufbereitet und ins Erdgasnetz einspeist.

Die Biogasanlagen sind unterschiedlich zusammengestellt, sodass bei 5 Biogasanlagen nur 1 Fermenterstufe vorliegt, 17 Biogasanlagen mit 2 Fermenterstufen ausgestattet sind und 11 der Biogasanlagen zusätzlich ein gasdicht abgedecktes Gärrestlager aufweisen. 14 Biogasanlagen werden bei einer mesophilen Gärtemperatur zwischen 38 und 45 °C betrieben und 11 Anlagen auf thermophilen Temperaturniveau zwischen 45 und 53 °C.

Auch bei der Raumbelastung der betrachteten Biogasanlagen gab es erhebliche Unterschiede. Sie lag zwischen 0,44 und 7,64 kg oTS/(m³ · d) (Abb.1).

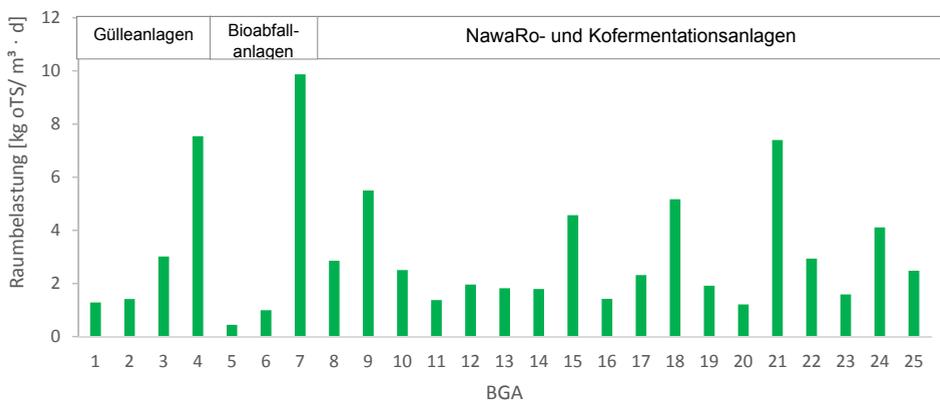


Abb. 1: Raumbelastung der Biogasanlagen: BGA-Nrn.: 1–4 sind Gülleanlagen, 5–7 Abfallvergärungsanlagen, 8–10, 18, 24, 25 reine NawaRo-Vergärung, Rest NawaRo mit Flüssigmist

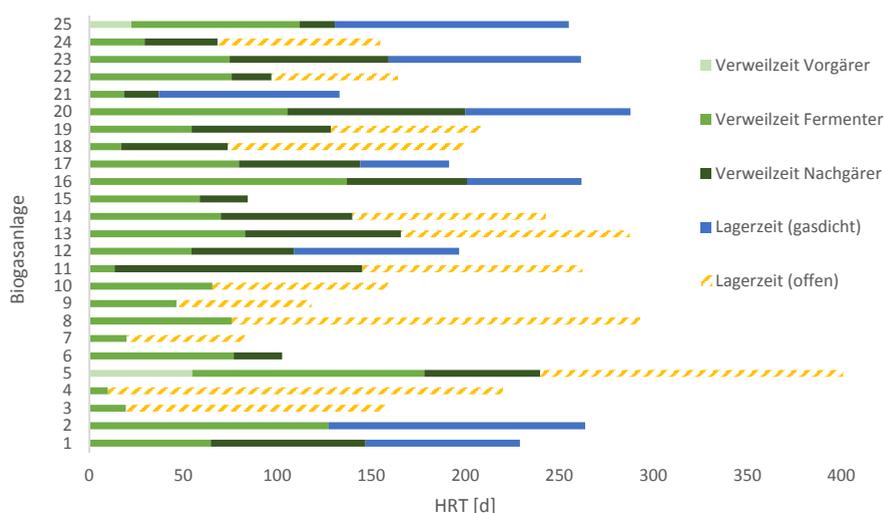


Abb. 2: Theoretische hydraulische Verweilzeiten (HRT) in Tagen entlang der Kaskadenstufen der 25 untersuchten Biogasanlagen

Wie in Abbildung 2 erkennbar ist, liegt bei den meisten der untersuchten Betriebe eine hydraulische Verweilzeit von 150 Tagen oder mehr im gasdichten System vor. Bei einigen der Anlagen beträgt die hydraulische Verweilzeit unter Berücksichtigung der Lagerdauer im Gärrestlager sogar über 250 Tagen. Bei 10 der untersuchten Anlagen werden die Gärreste in nicht gasdicht abgedeckten oder gänzlich offenen Lagerbehältern gelagert, obwohl die hydraulische Verweilzeit teils deutlich unter 150 Tagen lag. Speziell dieses Fermentersystem lässt ein erhöhtes Restmethanpotenzial erwarten, wie durch die Ergebnisse belegt wurde.

5 Emissionspotenzial

Die Untersuchung der einzelnen Anlagenkategorien zeigt, dass die Biogasanlagen bezüglich Emissionspotenzial nicht nur innerhalb der jeweiligen Substratgruppe weit divergieren können, sondern, dass die einzelnen Referenzgruppen auch zueinander deutliche Unterschiede aufweisen (Abb. 3), welche auf die unterschiedlichen Zielstellungen der Anlagenkonzepte zurückgeführt werden können.

Die Güllekleinanlagen, deren Zielstellung die Verminderung der Emissionen aus Exkrementen der Tierhaltung ist, sind aufgrund der niedrigen Energiedichte der eingesetzten Substrate stark an ökonomische Zwänge gebunden, was eine vollständige Substratausnutzung in vielen Fällen nicht möglich macht. Bei den Güllekleinanlagen lag das Methanemissionspotenzial zwischen 2,6 und 47,5 %. Für diese Anlagen gibt es keine

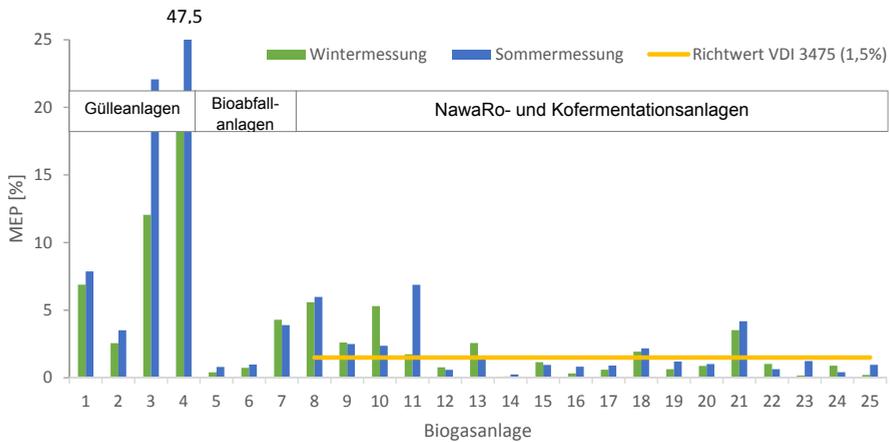


Abb. 3: Emissionspotenzial (20 °C) der 25 untersuchten Biogasanlagen in Sommer- und Wintermessung
MEP = mittleres Emissionspotenzial

Anforderungen nach VDI-Richtlinie 3475, da bei der Vergärung der Gülle immer eine Verbesserung der Ausgangssituation „Tierhaltung ohne Biogasanlage“ eintritt. Vor allem die sehr hohen Emissionspotenziale der Anlagen 3 und 4 zeigen, dass es nicht sinnvoll ist, für die Vergärung von Flüssigmist extrem kleine Fermenter mit sehr kurzen Verweilzeiten von 10 bzw. 20 Tagen mit anschließender offener Lagerung zu bauen. Bei diesen Systemen wird nur ein sehr geringer Abbau der organischen Substanz erreicht und es ergibt sich kein stabiles Anlagenkonzept. Der geringe Abbaugrad an organischer Trockensubstanz bei diesen Systemen belegt, dass noch sehr viel Methanpotenzial ungenutzt bleibt (Abb. 4).

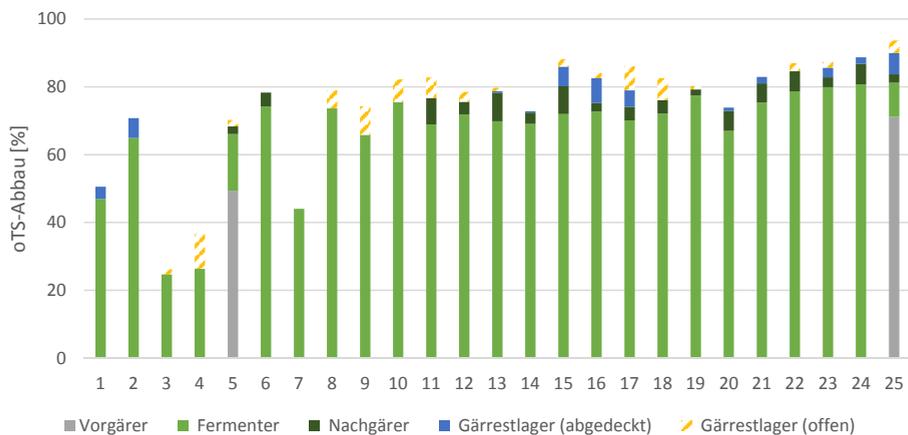


Abb. 4: Abbau organischer Trockensubstanz (oTS) entlang der Fermenterkaskade der 25 untersuchten Biogasanlagen

Bei den Bioabfall vergärenden Anlagen – 3 von den 25 untersuchten Anlagen – zeigen sich sehr unterschiedliche Konzepte. Zwei der untersuchten Anlagen zeigten ein Emissionspotenzial von weniger als 1 %. Diese Anlagen nutzen Flüssigvergärungssysteme und setzen gut abbaubare Substrate wie Speiseabfälle, verdorbene Lebensmittel und Fettabfälle ein. Es liegt außerdem eine relativ lange hydraulische Verweilzeit von 90 bzw. 260 Tagen vor. Bei der dritten betrachteten Anlage wurde ein Emissionspotenzial von bis zu 4 % gemessen. Diese Anlage nutzt schwerer abbaubare Substrate wie Grünschnitt und Biotonneninhalt mit hohen Anteilen an Strukturmaterial. Trotz thermophiler Fermentierung konnte bei sehr kurzer HRT von ca. 20 Tagen kein vollständiger Abbau erzielt werden. Da das Gärrestlager für die flüssige Phase nach der Separation der Feststoffe nicht gasdicht abgedeckt ist, kann das im Gärrest verbleibende Methanpotenzial nicht weiter genutzt werden. Hier könnte eine technische Anpassung der Biogasanlage und beispielsweise eine Erweiterung der Lagerdauer des Gärrestes in einem gasdichten Systems deutliche Verbesserungen bringen. Bei Systemen, bei denen der separierte Feststoff einer Kompostierung unterzogen werden soll, ist zu berücksichtigen, dass dort noch eine gewisse Menge an organischer Substanz erforderlich ist, um die mikrobielle Kompostierung mit Selbsterwärmung zu ermöglichen.

Beim Einsatz von nachwachsenden Rohstoffen bestehen bei unzureichender Substratausnutzung zusätzlich Emissionsrisiken durch den Gärrest, sodass hier eine möglichst vollständige Substratausnutzung unbedingt angestrebt werden muss. Allerdings fallen auch in dieser Gruppe einzelne Anlagen durch relativ hohes Methanemissionspotenzial auf. Die Anlagen 8, 10, 11 und 21 überschreiten den in der VDI-Richtlinie 3475 genannten Grenzwert von 1,5 % zum Teil deutlich, die Anlagen 9, 13 und 18 geringfügig. Bei den letztgenannten Anlagen konnten die Gründe für hohe Emissionspotenzialwerte klar ermittelt werden. Bei den BGA 8, 9, 10, 18 und 21 kann aufgrund unzureichender hydraulischer Verweilzeit des Substrates im Fermenter (zwischen 36 und 75 Tagen im gasdichten System), ein vollständiger Abbau der eingesetzten Substrate nicht erfolgen. Dieser Effekt wird durch den Einsatz von langsam abbaubaren Substraten wie Fest- und Pferdemist gegebenenfalls verstärkt (BGA 8 und 21); Pferdemist wird auch in erheblichem Umfang (35 %) in Anlage 13 eingesetzt. Anlage 11 zeigt in der Sommermessung ein erhöhtes Emissionspotenzial aufgrund von vorübergehender Prozessinstabilität (hoher Gehalt an organischen Säuren).

Bei der Betrachtung der Kaskadenstufen über alle Anlagenkonzepte hinweg zeigt sich, dass die Verweilzeit der entscheidende Faktor für eine gute Substratausnutzung im Biogasprozess ist. Die in Abbildung 5 über die Verweilzeit abgetragenen spezifischen Methanerträge der Fermentersubstrate bei mesophiler Vergärung zeigen, dass das Fermentersubstrat ab einer Verweilzeit von 80 Tagen unabhängig von der Vielfalt an eingesetzten Einsatzstoffen auf weniger als 150 Nm^3 Methan je kg oTS reduziert werden

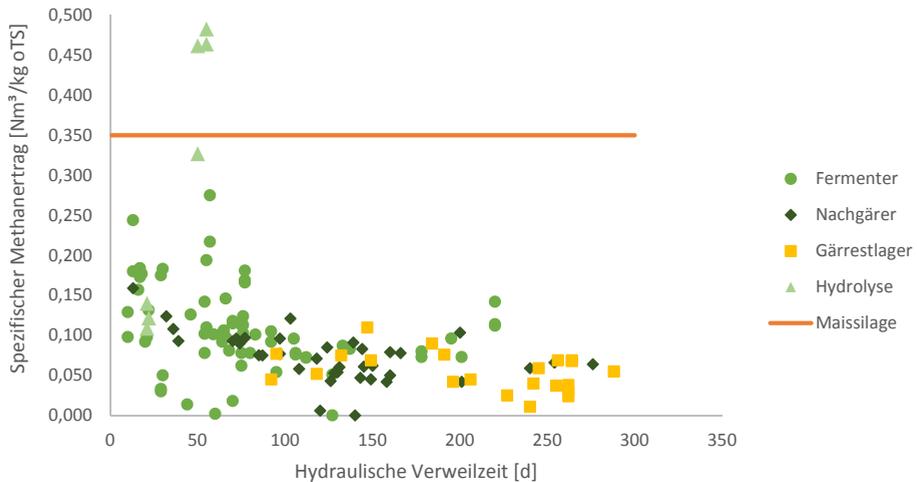


Abb. 5: Spezifische Methanerträge des Gärrestes der 25 untersuchten Biogasanlagen entlang der kumulierten Verweilzeit für Wintermessung und Sommermessung bei mesophilen Gärtemperaturen (37 °C)

kann, was etwa 43 % des spezifischen Methanertrags von Maissilage entspricht. Eine Erweiterung der Fermenterkaskade ist dabei einem einstufigen System vorzuziehen, da die Kaskade bei gleicher Verweilzeit Kurzschlussströmungen verhindert und einen besseren oTS-Abbau erzielt. Der weitere Abbau des Fermentersubstrates wird von anderen Prozessparametern wie der Art und Zusammensetzung der Einsatzstoffe sowie der Substratvorbehandlung beeinflusst.

Bei vielen der untersuchten Biogasanlagen wird über die Fermenterkaskade hinweg ein Abbau der organischen Trockensubstanz von mehr als 80 % erreicht. Bei der Betrachtung von Abbildung 4 wird deutlich, dass dabei jeweils die erste Fermenterstufe die höchste Effizienz zeigt. In den ersten Fermenterstufen wird meist mehr als 60 % der in das System eingebrachten oTS abgebaut. Der Abbau in den folgenden Fermenterstufen ist meist deutlich geringer. Dies ist durchaus erklärbar, da die zweite Fermenterkaskade mit bereits weitgehend abgebautem Substrat beschickt wird, in dem die leicht abbaubaren Bestandteile bereits zu Methan umgesetzt sind, die schwer abbaubaren Komponente wie die Faserfraktion ist dagegen noch enthalten und wirkt sich auf die Abbaugeschwindigkeit aus. Dennoch wirkt sich die Nutzung einer Kaskade erheblich auf die Verbesserung der Effizienz der gesamten Biogasanlage aus.

6 Zusammenfassung

Vor allem beim Einsatz von nachwachsenden Rohstoffen als Gärsubstrat in Biogasanlagen ist es unerlässlich, einen hohen Abbaugrad der organischen Substanz zu erzielen und damit ein möglichst geringes Restmethanpotenzial zu erreichen. Für die Vermeidung von umweltrelevanten Effekten ist ein geringes Emissionspotenzial des Gärrestes von Bedeutung. In dem hier vorgestellten Projekt wurden 25 repräsentative Biogasanlagen auf das Restmethanpotenzial und das Emissionspotenzial des Gärrestes untersucht. Als Besonderheit wurden auch die einzelnen Kaskadenstufen der betrachteten Biogasanlagen beprobt und der Abbaugrad organischer Trockensubstanz und das Restmethanpotenzial bestimmt. Damit wurde ein relativ umfangreicher Datensatz verfügbar, der das Restmethanpotenzial bei unterschiedlichen Verweilzeiten zeigt. Vier der betrachteten Biogasanlagen waren kleine Anlagen mit reiner Güllevergärung, 3 kommunale Abfallvergärungsanlagen und 18 NawaRo-Biogasanlagen mit bzw. ohne Gülle-/Festmisteinsatz. Es wurden 1 bis 3 Kaskadenstufen, zum Teil mit zusätzlichen gasdicht abgedeckten Gärrestlagern genutzt. Die meisten der Anlagen haben eine lange hydraulische Verweilzeit zwischen 150 und 240 Tagen. Bei einigen der betrachteten Anlagen liegt eine kürzere Verweilzeit vor. Besonders niedrige Verweilzeiten von 21 bzw. 10 Tagen waren bei zwei Güllekleinanlagen und ca. 20 Tagen bei einer Abfallvergärungsanlage vorhanden. Die Betrachtung der Fermenterkaskaden zeigt meist eine hohe Korrelation zwischen hydraulischer Verweilzeit und Restmethanpotenzial. Das Emissionspotenzial liegt meist unter dem in der VDI-Richtlinie 3475 festgelegten Wert von 1,5 %. Bei Anlagen, welche die Grenzwerte der VDI-Richtlinie überschreiten, ist meist eine klare Ursache dieser hohen Emissionspotenziale zu erkennen. Dies liegt in der Regel an zu kurzen hydraulischen Verweilzeiten oder an großen Anteilen schwer abbaubaren Substrats. Auch Prozessstörungen aufgrund einer zu hoher Raumbelastung können hierfür eine Ursache sein. Mit Hilfe der Messung von Restmethan- und Emissionspotenzial ist es gut möglich, den Betriebszustand einer Biogasanlage zu erfassen und suboptimale Betriebsweisen zu verbessern bzw. abzustellen. Dies ermöglicht eine Verringerung unerwünschter Methanemissionen als auch die Verbesserung der Wirtschaftlichkeit der Biogasanlage.

Literatur

- Daniel-Gromke, J. (2011): Ökologische Analyse der Bioabfallvergärung – Bioabfall als Wertstoff. T.R.E.N.D., Hamburg, 2. Februar 2011
- FNR (2015): Anbaufläche für nachwachsende Rohstoffe. www.fnr.de/grafiken
- FNR (2009): Biogas-Messprogramm II. 61 Biogasanlagen im Vergleich. http://www.fnr-server.de/ftp/pdf/literatur/pdf_385-messprogramm_ii.html
- Kern, M.; Raussen, T.; Graven, T.; Bergs, C.-G.; Hermann, T. (2012): Ökologisch sinnvolle Verwertung von Bioabfällen - Anregungen für kommunale Entscheidungsträger. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU)
- Oechsner, H.; Helffrich, D.; Schmidt, M. (2006): Bestimmung des Restgaspotentials im Substratauslauf landwirtschaftlicher Biogasanlagen. In: Emissionen der Tierhaltung KTBL, Darmstadt
- Oechsner, H. (2013): Bestimmung des Restgas-/ Restmethanpotenzials von Gärrest aus Biogasanlagen. In: Messmethodensammlung Biogas. Programmbegleitung des BMU-Förderprogramms „Energetische Biomassenutzung“ Schriftenreihe des BMU-Förderprogramms „Energetische Biomassenutzung“ Hrsg: DBFZ S. 173-177
- Ruile, S.; Schmitz, S.; Mönch-Tegeder, M.; Oechsner, H. (2015): Degradation efficiency of agricultural biogas plants - A full-scale study. *Bioresource Technology* 178, pp. 341-349, <http://www.scopus.com>
- VDI-Richtlinie (2010): VDI 3475 Blatt 4 (2010): Emissionsminderung – Biogasanlagen in der Landwirtschaft - Vergärung von Energiepflanzen und Wirtschaftsdünger. Beuth-Verlag, Berlin
- VDI-Richtlinie (2014): VDI 4630: Vergärung organischer Stoffe, Substratcharakterisierung, Probenahme, Stoffdatenerhebung, Gärversuche. Gründruck der 2. Auflage, Beuth-Verlag, Berlin
- Vogtherr, J.; Oechsner, H. (2008): Endlager gasdicht verschließen. *BIOGAS Journal* 1(08), S. 40-43

Modell zur Ermittlung von Methanausbeuten aus Biogasanlagen in der Prozesskette Fermenter-Nachgärer-Endlager

BERND LINKE, IVO MUHA

Zusammenfassung

Ziel des vorgestellten Modells ist die Bereitstellung von Berechnungsgrundlagen hinsichtlich der Frage, welche Anteile von der maximalen Methanausbeute ($y_{max}^{VS_{CH_4}}{}^{Imp}$) eines beliebigen Gärsubstrates im beheizten Fermenter/Nachgärer ($y_{CH_4}^{D,VS_{Imp}}$) und im meist unbeheizten Endlager ($y_{CH_4}^{S,VS_{Imp}}$) gebildet werden. Als Bezugsgröße für die Methanausbeute wird die im Gärsubstrat enthaltene organische Substanz (VS_{Imp}) verwendet und die maximal mögliche Methanausbeute des Gärsubstrates in Ergänzung zur VDI-Richtlinie 4630 durch eine geeignete Kurvenanpassung ermittelt. Ein Langzeitversuch im Rührfermenter bei einer vorgegebenen mittleren hydraulischen Verweilzeit (HTR) liefert nach Erreichen des Gleichgewichtszustandes die Reaktionsgeschwindigkeitskonstante für den Fermenter/Nachgärer (k^D) mit deren Hilfe auch bei anderen Verweilzeiten die Methanausbeute aus dem Fermenter/Nachgärer berechnet werden kann. Aus der Differenz zwischen maximaler Methanausbeute und der Methanausbeute aus dem Fermenter/Nachgärer ergibt sich die maximale, im Gärrest noch vorhandene Methanausbeute ($y_{max}^{S,VS_{Imp}}{}^{CH_4}$). Welcher Anteil hiervon im Endlager entsteht, hängt hauptsächlich von der Temperatur und der Lagerzeit im Endlager ab. Aus der Methanbildung während eines Lagerungsversuches bei zwei verschiedenen Temperaturen mit frischem Gärrest ergibt sich ein Temperaturterm (f_T), der die Berechnung der Methanfreisetzung aus dem Endlager ($y_{CH_4}^{S,VS_{Imp}}$) ermöglicht. Mithilfe eines dynamischen Modells können darüber hinaus auch Temperatur- und Füllstandsschwankungen im Endlager berücksichtigt werden. Unter Verwendung von Daten aus dem Biogas-Messprogramm II wurde mit diesem Modell für Rindergülle bei einer mittleren hydraulischen Verweilzeit (HRT) von 60 Tagen, innerhalb eines Jahres, eine Methanfreisetzung aus dem Endlager von 20 l kg^{-1} berechnet. Das sind etwa 10 % der maximal möglichen Methanausbeute.

Symbolverzeichnis

BG	Biogas
c_{VS}^{Inp}	Konzentration organische Substanz Input-Frischmasse [kg kg ⁻¹ FM]
D	Fermenter
f_T	Temperaturterm [-]
FM	Frischmasse
HRT	Mittlere hydraulische Verweilzeit Fermenter [d]
i	Anzahl Intervalle der Methanfreisetzung im Endlager
k^D	Reaktionsgeschwindigkeitskonstante Fermenter/Nachgärer [d ⁻¹]
k^S	Reaktionsgeschwindigkeitskonstante Endlager [d ⁻¹]
m	Masse
m_{BG}^D	Masse Biogas im Fermenter je kg Input Gärsubstrat [kg kg ⁻¹ FM]
m_{BG}^S	Masse Biogas im Endlager je kg Input Gärsubstrat [kg kg ⁻¹ FM]
m^S	Masse Gärrest im Endlager [kg kg ⁻¹ FM]
OLR	Raumbelastung bezogen auf organische Substanz Input [g l ⁻¹ d ⁻¹]
S	Endlager
t	Zeit [d]
T	Temperatur [°C]
VS_{Inp}	Organische Substanz (oS) im Gärsubstrat
$y_{BG}^{m,S}$	Masse Biogasausbeute Endlager [kg kg ⁻¹ FM]
$y_{BG}^{m,D}$	Masse Biogasausbeute Fermenter [kg kg ⁻¹ FM]
$y_{CH_4}^{D,VS_{Inp}}$	Methanausbeute Fermenter bezogen auf Input oS [l kg ⁻¹]
$y_{CH_4}^{m,S}$	Methanausbeute Endlager [l kg ⁻¹ FM]
$y_{CH_4}^{S,VS_{Inp}}$	Methanfreisetzung Endlager bezogen auf Input oS [l kg ⁻¹]
$y_{max}^{VS_{Inp} CH_4}$	Maximale Methanausbeute Gärsubstrate bezogen auf Input oS [l kg ⁻¹]
$y_{max}^{S,VS_{Inp} CH_4}$	Maximale Methanausbeute Gärrest bezogen auf Input oTS [l kg ⁻¹]
$\alpha_{CH_4}^S$	Methananteil Biogas im Gärrestlager [vol vol ⁻¹]
ρ_{BG}^D	Dichte Biogas Fermenter [g l ⁻¹]
ρ_{BG}^S	Dichte Biogas Endlager [g l ⁻¹]

1 Einleitung

Schutz des Klimas, Bereitstellung von Strom, Wärme und Kraftstoff als regenerative Energieträger, Rückführung von Nährstoffen und humusbildenden organischen Substanzen in den natürlichen Stoffkreislauf sowie Stärkung der Wirtschaft lassen sich nachweisbar mit der Produktion von Biogas verbinden und machen diese Technologie zu einem wichtigen Baustein einer zukunftsorientierten nachhaltigen Stoff- und Energiewirtschaft. So zum Beispiel durch Nutzung von Biogas mit zahlreichen innovativen Ansätzen in den 21 Bioenergieregionen Deutschlands (BMEL 2015, FNR 2015).

Als Gärsubstrate für die derzeit nach Angaben des Fachverbandes Biogas etwa 8.000 Biogasanlagen in Deutschland kommen überwiegend Wirtschaftsdünger, nachwachsende Rohstoffe sowie Reststoffe aus der weiterverarbeitenden Industrie und aus Kommunen zum Einsatz. Das große Einsatzspektrum der zu Biogas abbaubaren Gärsubstrate stellt besondere Anforderungen an die Planer und Betreiber von Biogasanlagen. Dabei ist der vom KTBL bereitgestellte „Wirtschaftlichkeitsrechner Biogas“ ein geeignetes Vorplanungsinstrument, mit dessen Hilfe für nahezu alle in der Praxis vorkommenden Gärsubstrate die wesentlichen Kennzahlen einer Biogasanlage und der Gasverwertung abgeschätzt werden können (KTBL 2015). Grundlage hierfür bilden u. a. auch die vom KTBL veröffentlichten Werte zur Gasausbeute von Biogasanlagen (KTBL 2010).

Ob diese Werte in der Praxis erreicht oder sogar übertroffen werden, hängt wesentlich von den Bedingungen der Biogaserzeugung im Fermenter ab (GEMMECKE et al. 2009). Neben der Verweilzeit der Gärsubstrate im Fermenter wird auch die Faulraumbelastung als Bemessungsparameter herangezogen. Beide Kenngrößen sind über die Konzentration an organischer Substanz im Gärsubstrat verbunden und haben einen Einfluss auf die Größe der Biogausbeute. Mit Blick auf den Energiegehalt des Biogases ist es sinnvoll, den Begriff Methanausbeute zu verwenden. Wie hoch die Methanausbeute eines Gärsubstrates ist, wird üblicherweise durch einen einfachen Gärtest nach VDI 4630 (2006) bestimmt. Die im Fermenter und Nachgärer erzielte Methanausbeute ist dabei geringer als der Wert aus dem Gärtest. Je nach gewählter Verweilzeit oder Faulraumbelastung ist deshalb im Gärrest noch ein Methanpotenzial vorhanden, das im Endlager weiter zu Methan abgebaut wird.

Mit dem nachfolgend beschriebenen Modell, das die übliche Prozesskette Fermenter-Nachgärer-Endlager betrachtet, werden beispielhaft Berechnungsgrundlagen vorgestellt, um a) die maximal mögliche Methanausbeute eines Gärsubstrates, b) die Methanausbeute im Fermenter/Nachgärer und c) die Methanausbeute des Gärrestes im Endlager bestimmen zu können.

2 Modellansatz

2.1 Bilanzierung der Methanausbeuten in der Prozesskette

Die in den Gärsubstraten vorhandene und auf die zugeführte organische Substanz (VS_{Imp}) bezogene maximale Methanausbeute ($y_{max\ CH_4}^{VS_{Imp}}$), kann durch eine einfache Bilanzgleichung (1) dargestellt werden und entspricht der Summe aus Methanausbeute im Fermenter/Nachgärer ($y_{CH_4}^{D,VS_{Imp}}$) und der verbliebenen Methanausbeute im Zulauf zum Endlager ($y_{max\ CH_4}^{S,VS_{Imp}}$). Um die jeweils erzielten Methanausbeuten aus den Gleichungen (1), (2) und (3) vergleichen zu können, ist es notwendig, alle ermittelten Werte auf die organische Substanz des Gärsubstrates zu beziehen (Abb. 1).

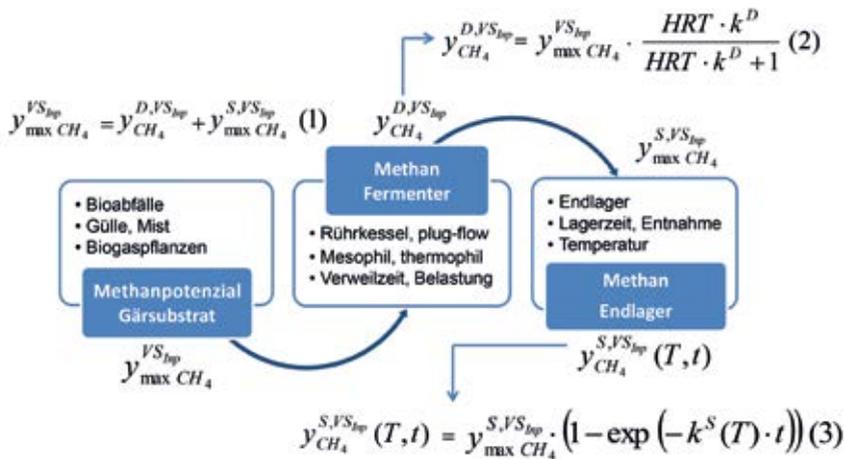


Abb. 1: Methanpotential in der Prozesskette Fermenter-Nachgärer-Endlager

2.2 Maximale Methanausbeute im Gärsubstrat

Die maximale Methanausbeute eines Gärsubstrates wird üblicherweise mithilfe des Gärtests nach VDI 4630 bestimmt. Als Abbruchkriterium für die Methanbildung gilt die 1-Prozent-Regel, d. h., die tägliche Zunahme der Methanbildung beträgt nicht mehr als 1 % der bis zu diesem Zeitpunkt gebildeten Methanmenge. Versuche haben jedoch gezeigt, dass die bei Einhaltung der 1-Prozent-Regel gebildete Gasmenge noch nicht dem Methanbildungspotenzial entspricht und die Methanbildung noch nicht abgeschlossen ist (MÄHNERT 2007). Um die maximale, im Gärsubstrat vorhandene Methanausbeute bestimmen zu können, wird deshalb empfohlen, die gemessenen Werte aus der Methansumme nach VDI 4630 einer Kurvenanpassung nach HILL oder CHAPMAN zu unterziehen, aus der sich der Maximalwert der Methanausbeute ergibt. Verläuft die Methansummenkurve anfangs mit einer gewissen Verzögerung wird die Anpassung nach HILL emp-

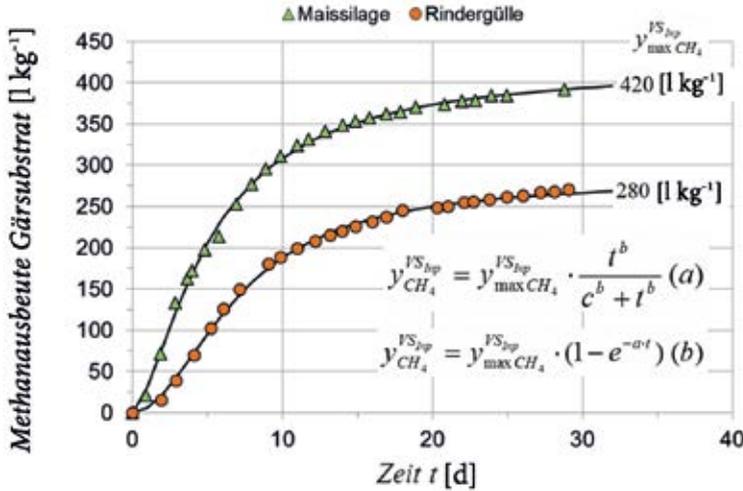


Abb. 2: Methansummenkurven nach VDI 4630 und maximale Methanausbeute der Gärsubstrate am Beispiel von Rindergülle und Maissilage, (a) HILL, (b) CHAPMAN

fohlen. Für eine Methanbildung ohne anfängliche Verzögerung ist die Anpassung nach CHAPMAN günstiger (Abb. 2).

2.3 Methanausbeute im Fermenter/Nachgärer

In der Praxis ist neben dem Fermenter häufig ein sogenannter Nachgärer anzutreffen, der über den Ablauf des Fermenters beschickt wird und meist mit der gleichen Temperatur wie der Fermenter betrieben wird. Beide Behälter arbeiten als Rührfermenter und bilden als Fermentersystem eine Einheit. Grundlage für die Bestimmung der Methanausbeute beim Betrieb eines Fermenters bzw. Nachgärers, der bei einer bestimmten mittleren hydraulischen Verweilzeit betrieben wird, ist eine einfache Formel (Gl. 2), in der die Reaktionsgeschwindigkeitskonstante des Fermenters bzw. Nachgärers für eine Reaktion 1. Ordnung und die vorher ermittelte maximale Methanausbeute des Gärsubstrates eingehen (LINKE 2006).

$$y_{CH_4}^{D,VS_{Inp}} = \frac{HRT \cdot k^D \cdot y_{max CH_4}^{VS_{Inp}}}{HRT \cdot k + 1} \tag{Gl. 2}$$

Die Auflösung von Gl. 2 liefert die Reaktionsgeschwindigkeitskonstante Fermenter/Nachgärer (k^D)

$$k^D = \frac{1}{HRT} \cdot \frac{y_{CH_4}^{D,VS_{Inp}}}{y_{max CH_4}^{VS_{Inp}} - y_{CH_4}^{D,VS_{Inp}}} \tag{Gl. 2a}$$

Für die Bestimmung der Größe der Reaktionsgeschwindigkeitskonstante Fermenter/Nachgärer ist ein Langzeitversuch z. B. im Labormaßstab notwendig, bei dem sichergestellt ist, dass sich ein stabiler Gleichgewichtszustand (steady state) bei täglicher Beschickung mit Gärsubstrat eingestellt hat. Dieser Zustand ist in der Regel dann erreicht, wenn die Versuchsdauer etwa das 3-Fache der gewählten mittleren hydraulischen Verweilzeit entspricht. Aus den gemessenen Werten von Methanausbeute Fermenter/Nachgärer nach Erreichen des „steady state“ und dem Wert der maximalen Methanausbeute der Gärsubstrate, kann dann entsprechend Gleichung 2a der Wert für die Reaktionsgeschwindigkeitskonstante Fermenter/Nachgärer berechnet werden. In Tabelle 1 sind beispielhaft für Rindergülle und Maissilage für eine Verweilzeit von 25 d bzw. 100 d die Werte für die Reaktionsgeschwindigkeitskonstante Fermenter/Nachgärer dargestellt.

Tab. 1: Prozess- und kinetische Parameter (Mähnert 2007)

Parameter	Einheit	Rindergülle	Maissilage
c_{VS}^{Inp}	g kg ⁻¹	72	292
$y_{maxCH_4}^{VS,Inp}$	l kg ⁻¹	280	420
HRT	d	25	100
ORL	g l ⁻¹ d ⁻¹	3	3
$y_{CH_4}^{D,VS,Inp}$	l kg ⁻¹	170	320
kD	d ⁻¹	0,046	0,033
$y_{maxCH_4}^{S,VS,Inp}$	l kg ⁻¹	110	100

Die Ermittlung der Werte der Reaktionsgeschwindigkeitskonstanten Fermenter/Nachgärer ist dabei unabhängig von der mittleren hydraulischen Verweilzeit. Die Darstellung der Gleichung 2a als Geradengleichung mit der mittleren hydraulischen Verweilzeit als x-Achse und $y_{CH_4}^{D,VS,Inp} / (y_{maxCH_4}^{VS,Inp} - y_{CH_4}^{D,VS,Inp})$ als y-Achse liefert den Wert der Reaktionsgeschwindigkeitskonstanten Fermenter/Nachgärer als Anstieg einer Geraden, welche die x- und y-Achse bei Null schneidet. Damit sind alle Parameter bekannt, um mithilfe von Gl. 2 die Methanausbeute aus dem Fermenter/Nachgärer in Abhängigkeit der Verweilzeit darstellen zu können (Abb. 3).

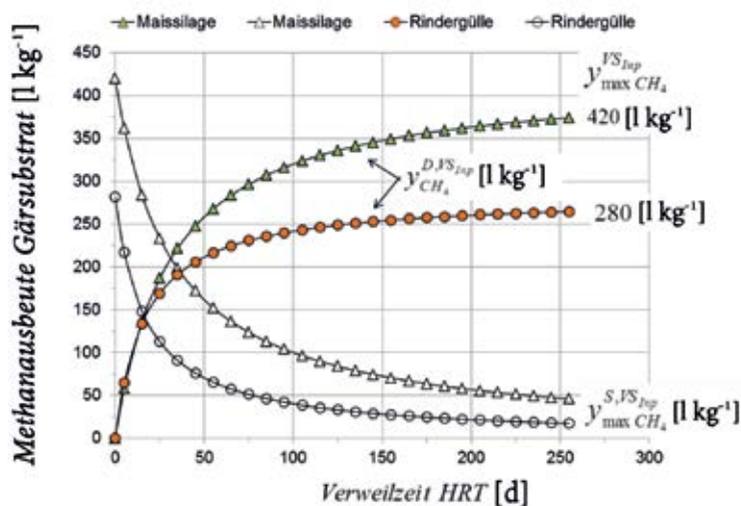


Abb. 3: Einfluss der Verweilzeit auf die Methanausbeute im Fermenter/Nachgärer am Beispiel von Rindergülle und Maissilage

Mit steigender Verweilzeit erhöht sich die Methanausbeute im Fermenter/Nachgärer, wobei die Geschwindigkeit des Abbaus der organischen Substanz zu Methan durch den Wert der Reaktionsgeschwindigkeitskonstanten Fermenter/Nachgärer bestimmt wird. Um z.B. im Fermenter/Nachgärer 70 % der maximalen Methanausbeute des Gärsubstrates zu erhalten, werden für Rindergülle und Maissilage Verweilzeiten von etwa 35 d bzw. 75 d benötigt. Die entsprechenden Verweilzeiten für 80 % des Methanpotenzials liegen bei 65 d bzw. 125 d. Aus der Differenz zwischen der maximalen Methanausbeute der Gärsubstrate und der im Fermenter/Nachgärer gemessenen Methanausbeute ergibt sich die maximale im Gärrest noch vorhandene Methanausbeute. Welcher Anteil davon im Endlager noch zu Methan umgesetzt wird, hängt von der Temperatur, der Lagerzeit und vom Betrieb des Endlagers ab.

2.4 Methanausbeute im Endlager

Zur Ermittlung der Methanausbeute im Endlager, bezogen auf den Input von organischer Substanz im Gärsubstrat (Gl. 3), ist ein Lagerungsversuch mit frischem Gärrest aus dem Ablauf vom Fermenter/Nachgärer durchzuführen. Die Methanfreisetzung sollte dabei bei zwei verschiedenen Temperaturen im Verlauf von 60 Tagen Lagerzeit gemessen werden, um mithilfe eines Temperaturterms (f_T) den Einfluss der Temperatur berücksichtigen zu können.

Tab. 2: Gleichungen zur Berechnung der Methanausbeute aus dem Endlager nach 60 Tagen Lagerzeit, der Reaktionsgeschwindigkeitskonstanten vom Endlager und des Temperaturterms (Linke et al. 2013)

Parameter	Gleichungen
Methanausbeute Endlager (i)	$y_{CH_4}^{S,VS_{Inp}}(T, t) = y_{\max CH_4}^{S,VS_{Inp}} \cdot (1 - \exp(-k^S(T) \cdot t)) \quad (Gl. 3)$
Massenbilanz	$m^{Inp} = m^S + m_{BG}^D + m_{BG}^S \quad (Gl. 4)$
Masse Biogasausbeute	$y_{BG}^{m,S} = \frac{m_{BG}^S}{m^S} = \frac{y_{CH_4}^{m,S} \cdot \rho_{BG}^S}{\alpha_{CH_4}^S \cdot 1000} \quad (Gl. 5)$
Masse Biogas Fermenter	$m_{BG}^D = y_{BG}^{m,D} \cdot \rho_{BG}^D \quad (Gl. 6)$
Masse Biogas Endlager	$m_{BG}^S = y_{BG}^{m,S} \cdot \rho_{BG}^S \quad (Gl. 6a)$
Masse Gärrest Endlager aus (4) und (5)	$m^S = \frac{m^{Inp} - m_{BG}^D}{1 + y_{BG}^{m,S}} \quad (Gl. 7)$
Methanausbeute Endlager (ii)	$y_{CH_4}^{VS_{Inp},S} = \frac{y_{CH_4}^{m,S} \cdot m^S}{m^{Inp} \cdot c_{VS}^{Inp}} \quad (Gl. 8)$
Reaktionsgeschwindigkeitskonstante Endlager (i)	$k^S = \frac{1}{t} \cdot \left[-LN \left(\frac{y_{\max CH_4}^{S,VS_{Inp}} - y_{CH_4}^{S,VS_{Inp}}}{y_{\max CH_4}^{S,VS_{Inp}}} \right) \right] \quad (Gl. 9)$
Temperaturterm	$f_T = \left(\frac{k^S(T_2)}{k^S(T_1)} \right)^{\frac{1}{T_2 - T_1}} \quad (Gl. 10)$
Reaktionsgeschwindigkeitskonstante Endlager (ii)	$k^S(T \leq 37^\circ C) = \frac{k^S(37^\circ C)}{f_T^{37-T}} \quad (Gl. 11)$

Bevor die Methanausbeute aus dem Endlager nach Gl. 3 erfolgen kann, müssen die bei der Lagerung gemessenen Methanmengen auf die im Gärsubstrat vorhandene organische Substanz umgerechnet werden. Hierfür dienen Gl. 4 bis 8 (Tab. 2). Stellt man Gl. 3 als Geradengleichung dar (Gl. 9), erhält man, in Abhängigkeit von der Temperatur, die Reaktionsgeschwindigkeitskonstanten des Endlagers aus dem Neigungswinkel der linearen Trends (Abb. 4).

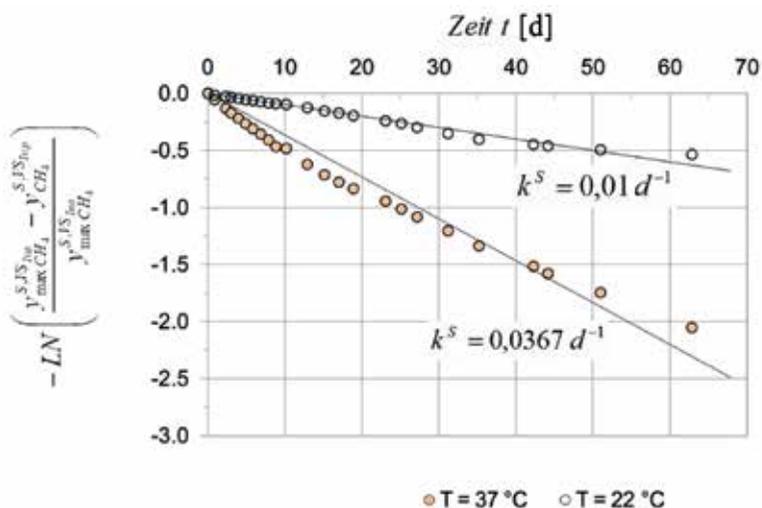


Abb. 4: Grafische Ermittlung der Reaktionsgeschwindigkeitskonstanten Endlager bei der Lagerung von Gärrest aus Rindergülle, die maximale Methanausbeute des Gärrestes, bezogen auf Input oTS beträgt 110 l kg^{-1}

Für die Bestimmung der Methanausbeute in Abhängigkeit von der Temperatur im Endlager ist ein dimensionsloser Temperaturterm hilfreich, der entsprechend Gl. 10 für $T_2 = 37 \text{ °C}$ und $T_1 = 22 \text{ °C}$ berechnet werden kann. Für den betrachteten Gärrest aus Rindergülle ergibt sich ein Temperaturterm von 1,0905. Damit können mithilfe von Gl. 11 die Werte für die Reaktionsgeschwindigkeitskonstanten des Endlagers in beliebigen Temperaturbereichen z.B. $4 \text{ °C} \leq T \leq 37 \text{ °C}$, bestimmt werden.

Die Methanfreisetzung aus dem Endlager bei 37 °C und einer Lagerzeit von 100 Tagen entspräche der gestrichelten Linie aus Abbildung 5, wenn der gesamte Gärrest aus den 100 Tagen zu Beginn der Lagerung zur Verfügung stünde. In der Praxis fällt jedoch Gärrest an, der täglich dem Endlager zugeführt wird. Das bedeutet, dass die Gärrestmasse, die z.B. am ersten Tag aus dem Fermenter/Nachgärer in das Endlager gelangt, wesentlich mehr zur gesamten Methanfreisetzung beiträgt als der Gärrest, der erst nach 99 Tagen anfällt.

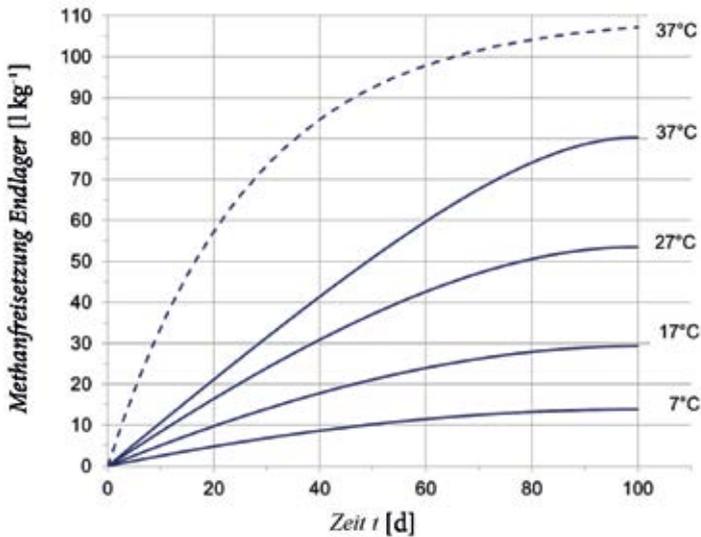


Abb. 5: Methanfreisetzung aus dem Endlager von Gärrest aus Rindergülle bei verschiedenen Temperaturen und täglicher Beschickung aus dem Fermenter/Nachgärer ohne Gärrestentnahme

Um praktischen Bedingungen Rechnung zu tragen, ist es zweckmäßig, die Lagerzeit z.B. von 100 Tagen in i Beschickungsintervalle von jeweils einem Tag aufzuteilen. Die zeitliche Verzögerung der Methanfreisetzung durch tägliche Beschickung des Endlagers wird durch Gleichung 12 berücksichtigt und liefert die in Abbildung 5 dargestellten Kurven der Methanfreisetzung aus dem Endlager.

$$y_{CH_4}^{S,VS_{inp}}(T, t) = \sum_{i=0}^{100} \frac{y_{\max CH_4}^{S,VS_{inp}}}{100} \cdot \left(1 - \exp\left(-k^S(T) \cdot (100 - i)\right)\right) \quad (\text{Gl. 12})$$

Der in Abbildung 5 gewählte Zeitraum von 100 Tagen kann durch Verwendung eines anderen Zeitraumes beliebig verkürzt oder erweitert werden. Besonders deutlich wird der Einfluss der Temperatur auf die Methanfreisetzung aus dem Endlager. Nach 100 Tagen Lagerzeit und kontinuierlicher Beschickung mit Gärrest aus dem Fermenter/Nachgärer werden bei 37 °C, 27 °C, 17 °C und 7 °C im Endlager 28 %, 19 %, 10 % bzw. 5 % der maximalen Methanausbeute von Rindergülle mit 280 l kg⁻¹ freigesetzt. Bezogen auf die im Fermenter/Nachgärer bei einer mittleren hydraulischen Verweilzeit von 25 Tagen erzielte Methanausbeute von 170 l kg⁻¹ sind das sogar 47 %, 32 %, 17 % bzw. 8 %. Bei dieser zum Teil erheblichen Methanausbeute ist eine gasdichte Endlagerung mit Nutzung des Methans zu empfehlen.

3 Dynamische Simulation der Methanausbeute im Endlager

Der in Kapitel 2 beschriebene statische Modellansatz basiert auf funktionalen Zusammenhängen und ist geeignet, z.B. den Einfluss der mittleren hydraulischen Verweilzeit auf die Methanausbeute im Fermenter/Nachgärer im Gleichgewichtszustand auch für beliebige Mischungen aus Rindergülle und nachwachsenden Rohstoffen (NawaRo) zu bestimmen (LINKE et al. 2013). Um die in der Praxis vorherrschenden und sich ständig ändernden Bedingungen besser beschreiben zu können, wurde ein dynamisches Modell entwickelt, das neben Temperatur- und Füllstandsschwankungen im Endlager auch Änderungen im Gärsubstrat berücksichtigt. Für die Anwendung der im Modell verwendeten algebraischen Gleichungen und Differentialgleichungen wurden Daten aus dem Biogas-Messprogramm II herangezogen, die aus der Kofermentation von Rindergülle und NawaRo stammen (MUHA et al. 2015).

Mithilfe dieses dynamischen Modells können auch praxisrelevante Temperatur- und Füllstandsschwankungen im Endlager berücksichtigt werden. Für die aus dem Biogas-Messprogramm II verwendeten Daten wurden für NawaRo (hauptsächlich Mais) und Rindergülle Werte für die maximale Methanausbeute der Gärsubstrate von 448 l kg^{-1} bzw. 222 l kg^{-1} ermittelt. Legt man für Rindergülle eine mittlere hydraulische Verweilzeit im Fermenter/Nachgärer von 60 Tagen zugrunde, dann sind innerhalb eines Jahres Methanfreisetzungen von 20 l kg^{-1} zu erwarten. Das sind etwa 10 % der maximal möglichen Methanausbeute (Abb. 6). Bei einer Reduzierung oder Erhöhung der Werte für die mittlere hydraulische Verweilzeit resultieren entsprechend höhere oder geringere Werte für die Methanfreisetzung aus dem Endlager. Ein interessantes Ergebnis der Modellrechnungen war, dass bei gleicher Verweilzeit im Fermenter/Nachgärer von 60 Tagen der Wert für die Methanfreisetzung im Endlager innerhalb eines Jahres bei Monovergärung von NawaRo (hauptsächlich Mais) nur 10 l kg^{-1} betrug. Ursache hierfür ist die deutlich höhere Reaktionsgeschwindigkeitskonstante für NawaRo von $0,102 \text{ d}^{-1}$ im Vergleich zu Rindergülle von $0,0213 \text{ d}^{-1}$. Diese unterschiedlichen Abbaugeschwindigkeiten führen dazu, dass bei NawaRo im Ablauf Fermenter/Nachgärer die Methanfreisetzung im Endlager 48 l kg^{-1} beträgt, während für Rindergülle noch ein maximales Methanbildungspotenzial von 100 l kg^{-1} vorhanden ist.

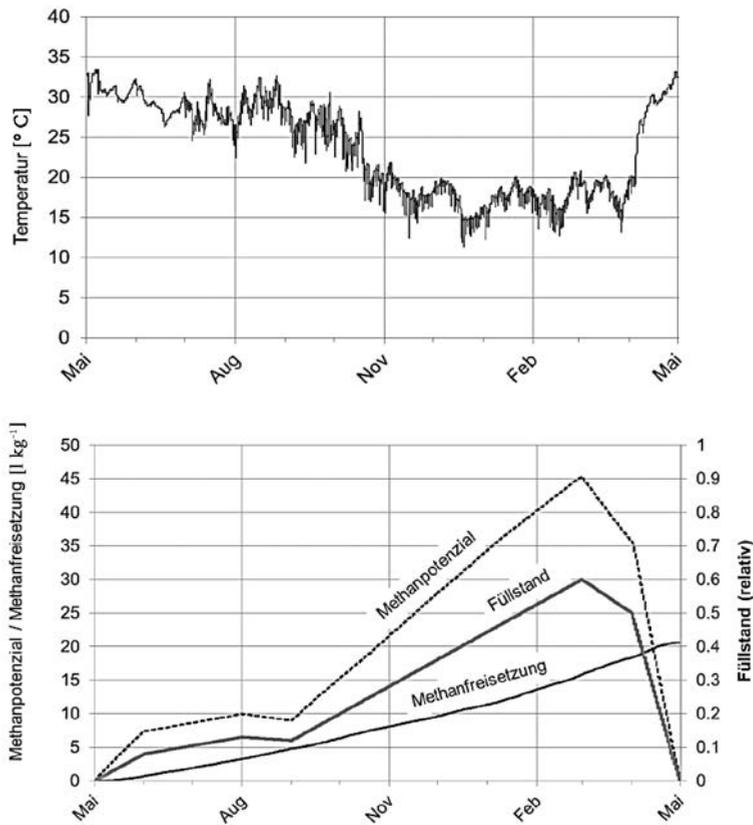


Abb. 6: Temperaturverlauf, Füllstand und Methanfreisetzung im Endlager; Gärsubstrat Rindergülle, HRT = 60 d (Gärrestaubsbringung nach Loch (2010); Temperaturverlauf nach Effenberger et al. (2010))

Literatur

- BMEL (2015): Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft. <http://www.bioenergie-regionen.de/>, Zugriff am 09.07.2015
- Effenberger, M.; Bachmaier, H.; Kransel, E.; Lehner, A.; Gronauer, A.: Wissenschaftliche Begleitung der Pilotbetriebe zur Biogasproduktion in Bayern. Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL) (Hrsg.), Schriftenreihe der LfL, Nr. 1/2010, Freising: 2010, 166 S.
- FNR (2015): Themenbrief BIOENERGIE-REGIONEN 01/2015. <http://mediathek.fnr.de/themenbrief-bioenergie-regionen-1-2015.html>, Zugriff am 09.07.2015
- Gemmeke, B.; Rieger, C.; Weiland, P. (2009): Biogas-Messprogramm II 61 Biogasanlagen im Vergleich. Fachagentur für Nachwachsende Rohstoffe e. V., Gülzow
- KTBL (Hg.) (2010): Gasausbeute in landwirtschaftlichen Biogasanlagen. Darmstadt

- KTBL (2015): Wirtschaftlichkeitsrechner Biogas. <http://daten.ktbl.de/biogas/startseite.do;jsessionid=A6F0C16202B5B02CA4B645812CE35963>
- Linke, B. (2006): Kinetic study of thermophilic anaerobic digestion of solid wastes from potato processing. *Biomass and Bioenergy* 30, pp. 892-896
- Linke, B.; Muha, I.; Wittum, G.; Plogsties, V. (2013): Kofermentation von Rindergülle und NawaRo-Modellierung der Methanausbeute aus dem Fermenter und dem Endlager. In: *Biogas in der Landwirtschaft - Stand und Perspektiven Fachkongress, Biogas in der Landwirtschaft - Stand und Perspektiven, KTBL-Schrift 501, KTBL, Darmstadt, S. 93-103*
- Loch, V. (2010): Optimierung des Einsatzes von Gärresten aus Biogasanlagen und Hinweise zur Verordnung über das Inverkehrbringen von Wirtschaftsdüngen. Amt für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten Bayreuth, www.aelf-mn.bayern.de/erwerbsskombination/44274/linkurl_13.pdf
- Mähnert, P. (2007): Kinetik der Biogasproduktion aus nachwachsenden Rohstoffen und Gülle. Dissertation, Humboldt-Universität zu Berlin, Landwirtschaftlich-Gärtnerische Fakultät
- Muha, I.; Linke, B.; Wittum, G. (2015): A dynamic model for calculating methane emissions from digestate based on co-digestion of animal manure and biogas crops in full scale German biogas plants. *Bioresour. Technol.* 178, pp. 350-358
- VDI-Richtlinie (2006): VDI 4630 Vergärung organischer Stoffe - Substratcharakterisierung, Probenahme, Stoffdatenerhebung, Gärversuche

Biogasgewinnung aus stickstoffreichen Substraten: Entwicklung und Optimierung von verfahrenstechnischen Lösungen zur Vermeidung von Ammoniak-Hemmungen in Biogasreaktoren

KAY BEINERSDORF, STEFAN SEBÖK, NICLAS KRAKAT

1 Einleitung

Die Novellierung des Erneuerbaren-Energien-Gesetzes (EEG) von 2012 sieht überwiegend die Förderung landwirtschaftlicher biogener Abfall- und Reststoffe vor. Insbesondere stickstoffreiche Reststoffe wie Geflügelkot und proteinreiche Pflanzen werden von Anlagenbetreibern mehrheitlich im Rahmen einer Co-Vergärung eingesetzt – trotz ihres hohen Biogasbildungspotenzials: So liegt der weltweit geschätzte Geflügelbestand bei ca. 23 Mrd. Tieren, die annähernd 587 Mrd. Tonnen biogene Reststoffe produzieren (FAO 2014), aus denen jährlich 800 Mio. MWh elektrische Energie generiert werden können. In Deutschland produzieren ca. 178 Mio. Geflügeltiere 1,4 Mrd. Tonnen Reststoffe, aus denen 2 Mio. MWh generiert werden könnten (DESTATIS 2014). Der Ernteertrag von stickstoffreichen NawaRos (z. B. Luzerne und Klee gras) beträgt ca. 2 Mio. Tonnen Frischmasse pro Jahr (DESTATIS 2014), welche die Erzeugung von zusätzlich 0,5 Mio. MWh Strom zulassen.

Der Grund für die Vermeidung stickstoffreicher Substrate liegen in der Freisetzung des beim Gärprozess entstehenden Ammoniaks (NH_3), welches insbesondere unter thermophilen Prozessbedingungen sowie bei einem für die Biogasbildung typischen, leicht basischen Milieu in hohen zytotoxischen Konzentrationen vorliegt. Dem entgegen laufen bei höheren Temperaturen biochemische Stoffwechselprozesse der mikrobiellen Lebensgemeinschaften beschleunigt ab, sodass durch Temperatursteigerung die Verweilzeiten der Biomasse reduziert und gleichzeitig die Beladungsraten erhöht werden können.

Für die stabile Fermentation stickstoffreicher Substrate ist die Elimination des inhibierend wirkenden Ammoniaks aus dem Fermentationsprozess notwendig. Aber auch das Verständnis mikrobieller Vorgänge im Biogasreaktor ist für die Gewährleistung einer effizienten Biogasgewinnung unerlässlich. Unter Berücksichtigung bioökonomischer Aspekte konnten für die stabile Monovergärung der genannten kritischen Substrate innerhalb des Forschungsvorhabens entsprechende Lösungsansätze aufgezeigt und erfolgreich umgesetzt werden.

2 Zielstellung

Zentraler Forschungsschwerpunkt der Arbeitsgruppe „Stickstoffumsatz“ ist die thermophile und hyperthermophile Vergärung von Biomassen, die aufgrund eines hohen Stickstoffgehalts leicht zur Akkumulation des den Biogasprozess hemmenden Ammoniums/Ammoniaks neigen. Beispiele hierfür sind Substrate wie proteinreiche Pflanzensilagen (Klee gras, Luzerne) sowie biogene landwirtschaftliche Reststoffe aus der Geflügelhaltung.

Hinsichtlich der Verfahrenstechnik liegt der Schwerpunkt der Untersuchungen in der Etablierung einer stabilen Fermentation mittels Entwicklung und Optimierung von Methoden zur Stickstoffeliminierung. Hierbei wird neben der NH_3 -Strippung mit verschiedenen Trägergasen (Luft, Biogas, Dampf), der Magnesiumammoniumphosphat (MAP)-Fällung auch der Anammox-Ansatz verfolgt, bei dem *Planctomyceten* die Edukte Nitrit mit Ammonium katalytisch zu elementaren gasförmigen Stickstoff umsetzen.

Die genannten Verfahren sollen bestmögliche Stickstoff-Eliminationsraten erzielen und den Erfordernissen nach Wirtschaftlichkeit Rechnung tragen. Besonderes Augenmerk liegt dabei in der verfahrenstechnischen Optimierung leistungsfähiger zweiphasiger (Trennung von Fest- und Flüssigphase) und zweistufiger (Separation von Hydrolyse und Methanogenese) Fermentationssysteme, welche speziell zur Vergärung rohfasriger Biomasse entwickelt wurden.

3 Material und Methoden

3.1 Prozessanalytik

Zur Charakterisierung der verwendeten Einsatzstoffe wurden TS, oTS, pH-Wert, Leitfähigkeit, GC-Säuren, NH_4^+ , TKN (Kjedahl Stickstoff) und das Biogaspotenzial bestimmt. Als prozessrelevante Fermentationsparameter wurden die NH_4^+ -Konzentrationen mittels einer Online-Analytik (Pronova Analystechnik GmbH & Co. KG, Berlin) automatisiert erfasst und zusätzlich im zweitägigen Rhythmus in ATB-eigenen Laboren (nach DIN- und VDLUFA-Richtlinien) durch die Parameter NH_4^+ , TKN, FOS/TAC, EC und GC-Säuren ergänzt. Zudem wurden die Gasquantität und -qualität, die Prozesstemperatur, der pH-Wert und das Redoxpotenzial der Reaktorkompartimente (Hydrolysereaktor und Anaerobfilter) täglich erfasst. Die Entnahme von Probematerial für molekularbiologische Untersuchungen erfolgte ebenfalls versuchstäglich aus jedem Reaktorkompartiment.

3.2 Zweistufige und zweiphasige Leach-Bed-Fermentation (LBF)

In den satzweise (batch) betriebenen Leach-Bed-Fermentationssystemen (Abb. 1) kam ein Gemisch aus Hühnertrockenkot (HTK) und zur Inokulierung Gärrest einer thermophilen Biogasanlage zum Einsatz. Das Substrathaufwerk wurde im Hydrolysereaktor (Arbeitsvolumen bis 100 l) eingebracht, periodisch durch Berieselung mit Prozessflüssigkeit inokuliert (2,6 l alle 2 Stunden) und bei thermophilen Temperaturen (55 °C) vergoren. Im nachgeschalteten, ebenfalls thermophil (55 °C) betriebenen Anaerobfilter (30 l) wurden die von den Primärvergärem gebildeten Säuren durch eine auf Füllkörpern gewachsene leistungsfähige Biofilmpopulation zu Biogas mit Methananteilen bis 70 % umgesetzt. Nach Passage des Anaerobfilters gelangte die Prozessflüssigkeit in ei-

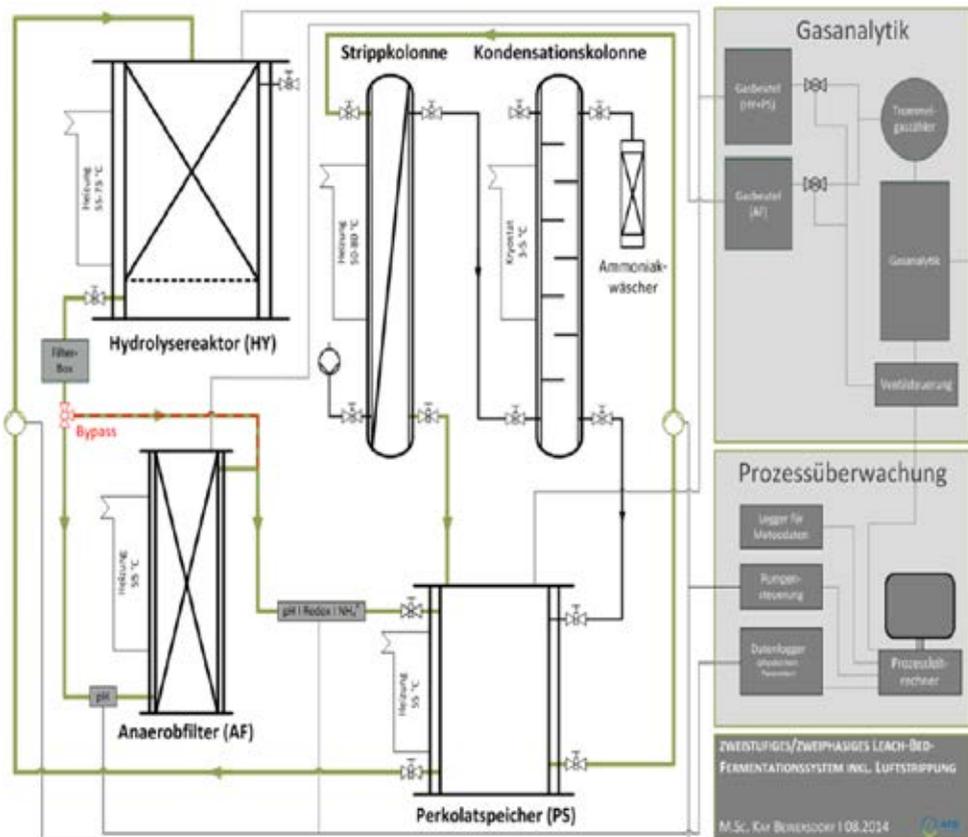


Abb. 1: Verfahrensfliessbild des satzweise betriebenen Leach-Bed-Fermentationssystem mit Hydrolysereaktor (100 l), Anaerobfilter (30 l) und Perkolatspeicher (60 l), ergänzt um ein System zur Luftstrippung. Grün: Perkolatstrom, grau: Gasstrom/Gasanalytik, rot: nachträglich installierter Bypass zur Entkopplung des Anaerobfilters. Das Strippungssystem setzte sich aus Strippkolonne (85 °C Arbeitstemperatur) und nachgeschalteter Kühlkolonne (5 °C Arbeitstemperatur) zusammen (Quelle: Beinersdorf)

nen Perkolatspeicher (60 l), welcher als Reservoir für die zyklische Inokulierung und zugleich als Schnittstelle zwischen Fermentations- und Strippungssystem diene.

3.3 Zweistufige und zweiphasige Schwimmbettfermentation (SBF)

Ergänzend zum batch-betriebenen LBF-System (Abb. 1) wurde der am ATB entwickelte Schwimmbettfermenter (SBF, Abb. 2) weiterentwickelt und zur kontinuierlichen Trockenfermentation von halmgutartiger Biomasse verwendet. Als Einsatzstoff im 240-tägigen Versuchszeitraum erfolgte die arbeitstägliche Beschickung mit Kleegrassilage. Das Verfahren stellt eine Weiterentwicklung der im Chargenbetrieb arbeitenden Systeme dar, wobei stickstoffreiche Biomasse mithilfe einer Prozessflüssigkeit als Pfropfenstrom horizontal durch den Hydrolysefermenter (Arbeitsvolumen 35 l) geführt wird. Innerhalb des thermophil (55 °C) bzw. hyperthermophil (65 °C) betriebenen Hydrolysefermenters kommt es zur Ausbildung einer Schwimmschicht, welche durch die darunter befindliche Prozessflüssigkeit durch zyklische Beaufschlagung inokuliert wird. Entsprechend dem

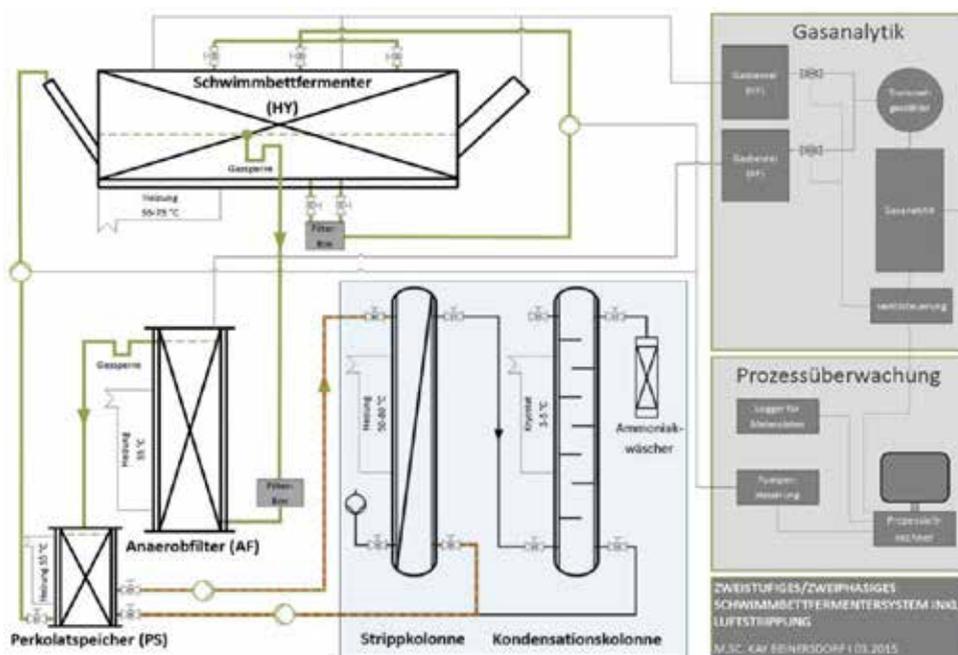


Abb. 2: Verfahrensfließbild des kontinuierlichen (hyper)thermophil betriebenen SBF-Systems mit Horizontalfermenter als Hydrolysestufe (Arbeitsvolumen 35 l) und Anaerofilter als Methanogenesestufe (Arbeitsvolumen 22 l), ergänzt um ein System zur Luftstrippung (blau hinterlegt), welches aus einer Strippungs- und Kühlkolonne (5 bzw. 85 °C Betriebstemperatur) besteht. Grün: Perkolatstrom, grau: Gasstrom, rot: zu strippende/gestrippte Prozessflüssigkeit, schwarz: Prozessüberwachung (Quelle: Beinersdorf)

LBF wird auch der SBF als zweiphasiges und zweistufiges System betrieben. Demnach ist dem Hydrolysereaktor zur zusätzlichen Entfrachtung gegenüber organischen Säuren ein Anaerobfilter (22 l, 55 °C) im Aufstromprinzip nachgeschaltet, wobei die gewählte Pumprhythmik eine hydraulische Verweilzeit (HRT) im Anaerobfilter von 1 Tag gewährleistet. Der nachgeschaltete Perkolatspeicher (20 l, 55 °C) stellt analog zum LBF die Schnittstelle zwischen Fermentations- und Strippungssystem dar.

3.4 Stickstoffelimination mittels Strippung

Grundlage für die Dimensionierung der Strippungskolonnen war eine möglichst hohe Strippungseffizienz unter Berücksichtigung der verfügbaren Mengen und Temperatur der Prozessflüssigkeit (20 l/h, 69 °C) sowie des notwendigen Luftstromes (21 m³/h, 21 °C). Die Packungshöhe der Füllkörperkolonne betrug 810 mm, wobei 20 l Prozessflüssigkeit pro Stunde die Kolonne passierten und einen Flutfaktor von 12,5 % erreichten, bei einer mittleren Reaktionstemperatur von 77 bis 80 °C. Den Strippungskolonnen waren Kühlkolonnen (5 °C) nachgeschaltet, um das Kondensat aus dem NH₃-angereicherten Abgasstrom zurückzugewinnen. Dieses wurde dem Perkolatspeicher erneut zugeführt.

4 Ergebnisse und Diskussion

4.1 Zweistufige und zweiphasige Leach-Bed-Fermentation

Es zeigte sich, dass der Einsatz einer zweistufigen und zweiphasigen Trockenfermentation in Verbindung mit einer optimierten, dynamischen Strippungsstrategie konstant hohe Biogasmengen erzielte, welche ca. 12 % unterhalb der theoretisch möglichen Biogasmenge (Referenztest nach VDI 4630) lagen. Gleichzeitig führte der Einsatz eines Anaerobfilters zu frühzeitig hohen Methankonzentrationen sowie durch die Entfrachtung der organischen Säuren aus dem Hydrolysereaktor zu einer schnelleren Stabilisierung des Gesamtsystems (Abb. 3). Ferner konnte versuchstechnisch abgeleitet werden, dass die Stickstoffelimination mittels Luftstrippung mit konstant hohen Effizienzen (> 70 %) keinen signifikanten Einfluss auf die Biogaszusammensetzung im Hydrolysereaktor oder Anaerobfilter hatte. Jedoch brach die Biogasbildung infolge der Strippung kurzfristig ein. Diese Erkenntnis wird derzeit näher untersucht, wobei ein geringfügiger Eintrag von Luftsauerstoff in die Prozessflüssigkeit als möglicher Erklärungsansatz dient.

In Abbildung 4 ist u. a. ein typischer pH- und FOS/TAC-Verlauf einer Batch-Fermentation dargestellt. Mit sinkendem pH-Wert innerhalb der ersten 2 Versuchstage, hervorgerufen durch die Freisetzung leicht verfügbarer organischer Säuren, konnte ein leicht verzögerter Anstieg des FOS/TAC-Wertes im Anaerobfilter beobachtet werden.

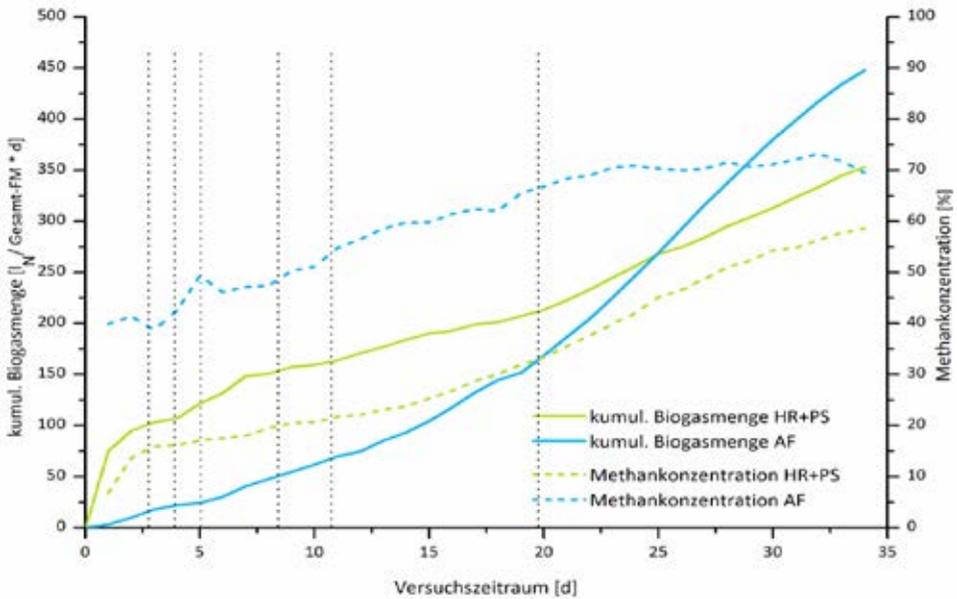


Abb. 3: Beispielhafte Darstellung der Verläufe der kumulativen Biogasmenge sowie der gemessenen Methankonzentration der Versuchsreihe LBF VIII. HR: Hydrolysereaktors, PS: Perkolatspeichers, AF: Anaerobfilter, gestrichelte Linie: Strippungszeitpunkt

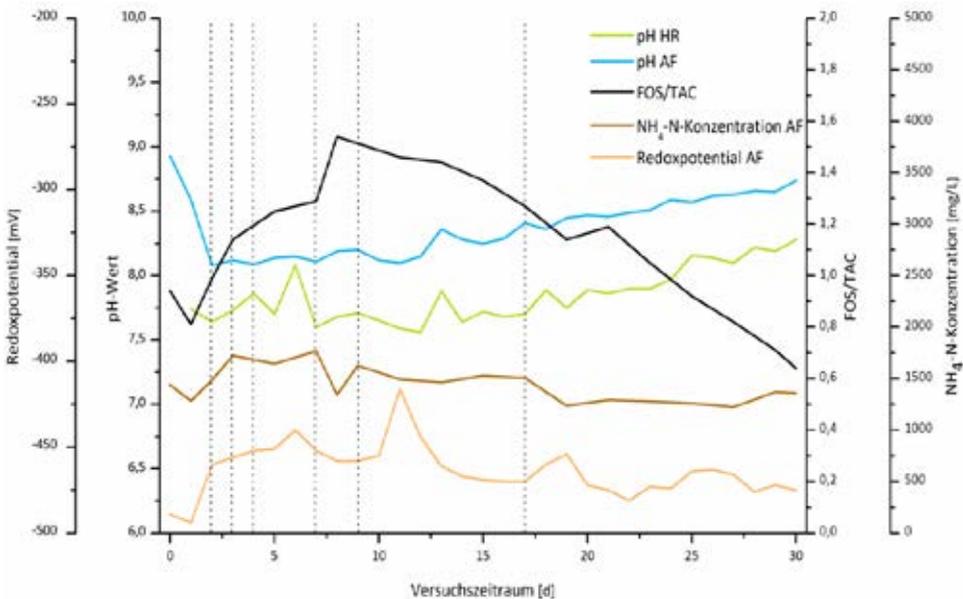


Abb. 4: pH-Wert-, NH₄-N- und FOS/TAC-Wertverläufe sowie Redoxpotenzial im LBF-Versuch VIII. Gestrichelte Linie: Strippungszeitpunkt

Der Verlauf des FOS/TAC-Wertes im Anaerobfilter (maximal 1,58, bis Tag 7) spiegelt die anfängliche Akkumulation der organischen Säuren wider. Die Kapazität des Ammoniumpuffersystems war in dieser Phase vermindert und konnte nur begrenzt die freigesetzten Reduktionäquivalente neutralisieren. Fraglich bleibt, ob in diesem Zustand die leicht verfügbaren organischen Säuren größtenteils vollständig freigesetzt wurden oder ob eine selbstinduzierte Säurehemmung die weitere Freisetzung organischer Säuren durch mikrobielle Prozesse beeinflusste. Das Redoxpotenzial wies stets negative Werte auf, was auf ein ausreichend reduzierendes anaerobes Milieu schließen lässt. Die Anwendung der entwickelten Strippungsmethodik führte zu einer Reduzierung der Ammoniumkonzentration auf durchschnittlich 1.142 mg $\text{NH}_4\text{-N/l}$ (maximal 1.543 mg $\text{NH}_4\text{-N/l}$).

Basierend auf diesen Erkenntnissen kann abgeleitet werden, dass die Monovergärung prozesskritischer Substrate, wie z.B. Hühnertrockenkot, im LBF, ergänzt durch das implementierte Strippungssystem, trotz grenzwertüberschreitender Ammoniumkonzentrationen und auftretender kurzfristiger Hemmungen durch Übersäuerung, ein robustes System mit hoher Regenerationsfähigkeit darstellt. In weiterführenden Versuchen soll durch die Erwärmung und Variation des NH_3 -entfrachtenden Trägergases (Biogas, Dampf) eine zusätzliche Effizienzsteigerung und Verkürzung der Reaktionszeiten erreicht werden, sodass in kürzeren Zeiträumen höhere Strippungseffizienzen erzielt werden können.

Stickstoffelimination mittels Strippung

Im Rahmen der Untersuchungen zur NH_4^+ -Elimination mittels Luftstrippung konnten, bei Variation von Reaktionstemperatur und pH-Wert sowie Strippungshäufigkeit und -dauer, Eliminationsraten von bis zu 82 % und dadurch eine Absenkung der $\text{NH}_4\text{-N}$ Konzentration von 3.821 mg/l auf 726 mg/l erzielt werden (Abb. 5). Folglich kann abgeleitet werden, dass für eine hohe Ammoniumreduktion das im System befindliche Perkolat entweder mehrfach die Kolonnen passieren oder einer pH-Wertanpassung unterzogen werden muss. Dieser Schlussfolgerung standen jedoch Bedenken entgegen, dass ein mehrstündiger Strippungsprozess oder die für eine effiziente Entfrachtung erforderliche Einstellung eines stark basischen Milieus, die etablierte Biozönose des Anaerobfilters und Hydrolysereaktors einem hohen Stress aussetzen könnte. Zudem bergen die anschließend notwendige Absenkung des pH-Wertes sowie die aufgrund der Strippung schnell sinkende NH_4^+ -Konzentration die Gefahr, die effizienzbestimmende Mikrobiozönose des Fermentationsprozesses empfindlich und irreversibel zu stören. Diese Bedenken führten dazu, dass lediglich in der Versuchsreihe LBF III eine pH-Wertanpassung umgesetzt wurde.

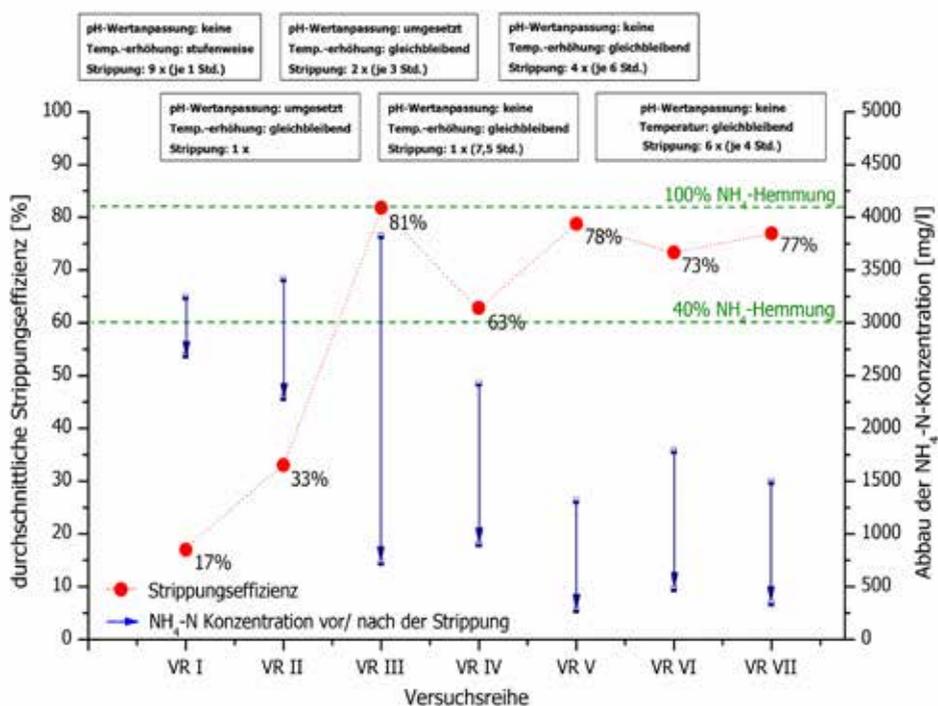


Abb. 5: Effizienzen der in Versuchsreihe LBF I bis LBF VII durchgeführten Luftstrippung zur Eliminierung von NH_4^+ . Rot: maximale Effizienz jeweiliger Strippungen, blaue Pfeile: Anfangs- und Endkonzentration an NH_4^+ vor bzw. nach der Strippung. Grüne Linien: Hemmgrenzen der anaeroben Fermentation für die jeweilige NH_4^+ -Konzentration (Quelle: Braun 1982)

4.2 Zweistufige und zweiphasige Schwimmbettfermentation (SBF)

Die Untersuchungsergebnisse zeigen für das thermophile System, dass bereits nach der Hälfte der rund 100-tägigen Einfahrzeit (Steigerung bis $B_R = 5 \text{ kg}_{\text{OTS}}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$), Gasausbeuten über den im Vorfeld ermittelten substratspezifischen Referenzwerten von $223,1 \text{ l}_N/(\text{kg FM})$ bzw. $632,1 \text{ l}_N/(\text{kg oTS})$ nach VDI 4630 erzielt werden konnten. Trotz der Schwankungen der wöchentlichen Gasausbeuten, welche u. a. aus dem kurzfristig inhibierenden Einfluss der Gärrestentnahme resultierte, lag die Gasausbeute mehrheitlich über den Referenzwerten. Während des gesamten Versuchszeitraumes wurden mittlere Gasausbeuten erzielt, welche die Referenzwerte um rund 5 % überstiegen. Kurzzeitig stark gesteigerte Gaserträge (bis $767 \text{ l}_N/(\text{kg oTS})$) resultierten aus der Akkumulation organischer Säuren infolge einer vorhergehenden Prozessstörung (Abb. 6). Diese Erkenntnis führt zur Annahme, dass das SBF-System potenziell geeignet ist, kurzfristige Säurepeaks und somit kurzzeitig erhöhte Raumbelastungen infolge einer Akkumulation effizient auszugleichen.

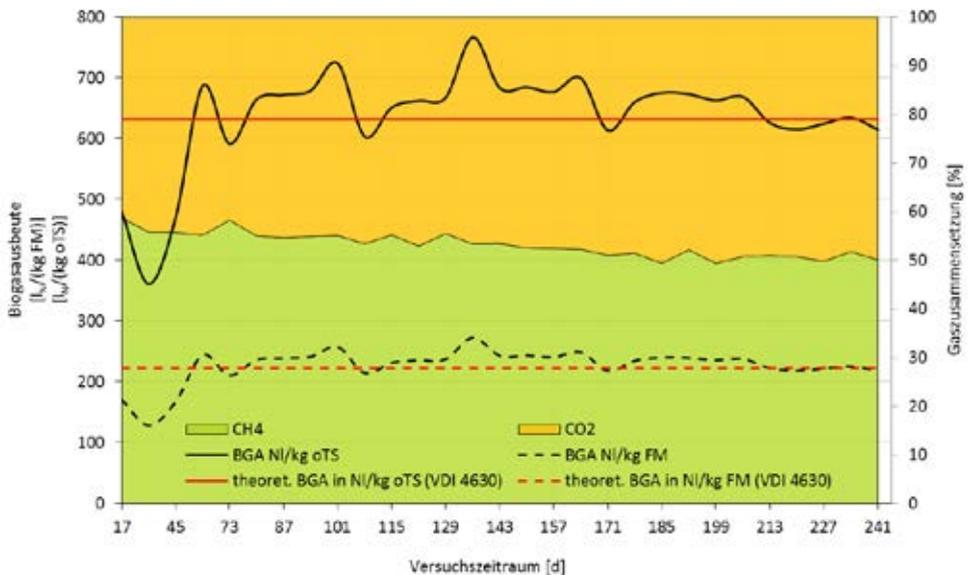


Abb. 6: Darstellung der Biogasausbeute und der Gaszusammensetzung der kontinuierlich betriebenen SBF-Versuchsreihe (thermophil) im Versuchszeitraum von 241 Tagen (Tag 17 – erster Bilanzierungstag). Erfasst wurde das Gesamtsystem, bestehend aus Schwimmbettfermenter (SBF) sowie nachgeschaltetem Anaerobfilter (AF). Gestrichelte Linie: ermittelte Gasausbeute von Kleegrassilage nach VDI 4630

Sowohl das thermophile (Abb. 7) als auch das hyperthermophile Reaktorsystem wiesen in Bezug auf die im Versuchszeitraum erfassten Stickstoffspezies vergleichbare NH_4^+ -Konzentration auf (über 4.800 mg/kg). Die kalkulatorisch ermittelte Konzentration des zytotoxischen NH_3 betrug im Maximum ca. 1.500 mg/kg NH_3 . Diese Konzentrationen übersteigen die in der Literatur aufgeführten Spannweiten der Hemmgrenzen an NH_3 um das 3- bis 10-fache (FNR 2013, BRAUN 1982).

Dieser Umstand führte dazu, dass sich insbesondere nach dem ersten Drittel des Versuchszeitraums eine leichte, jedoch kontinuierlich anhaltende Inhibierung der Prozessmikrobiologie einstellte. Auch die dargestellten Verläufe der Säurespezies (Abb. 8), insbesondere die Akkumulation an Gesamtfettsäuren (hyperthermophil bis 14 g/l), weisen auf eine sich zunehmend verstärkende NH_4^+/NH_3 -induzierte Prozesshemmung hin.

Es wurden zunehmende Anteile an C3-C5-Fettsäuren (mehrheitlich Propionsäure) detektiert, was zu einem Essigsäure-Propionsäure-Verhältnisses von 0,83 : 1 und somit zu einer deutlichen Abweichung von dem als optimal anzusehenden Quotienten von 3 : 1 in Richtung der Propionsäure führte (KAISER 2007). Dieser Umstand, aber auch die Zunahme der Gesamtsäurenkonzentration und der FOS/TAC-Werte können als Indikator für eine beginnende und nachhaltige Prozessstörung betrachtet werden.

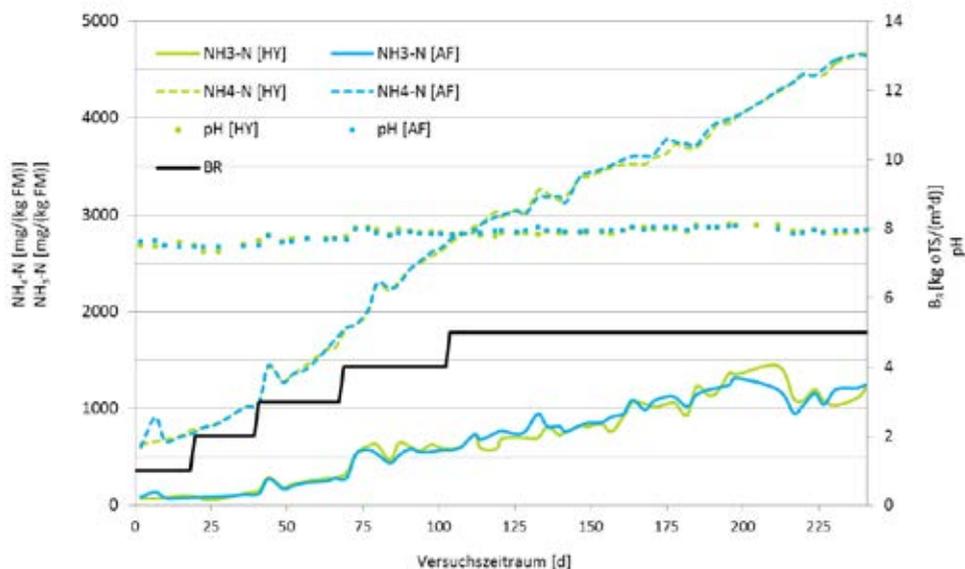


Abb. 7: Konzentrationsverläufe der Stickstoffspezies sowie pH-Wert der kontinuierlich betriebenen thermophilen SBF-Versuchsreihe (thermophil) im Versuchszeitraum von 241 Tagen. Hy: Hydrolysereaktor; AF: Anaerobfilter; B_R : Raumbelastung

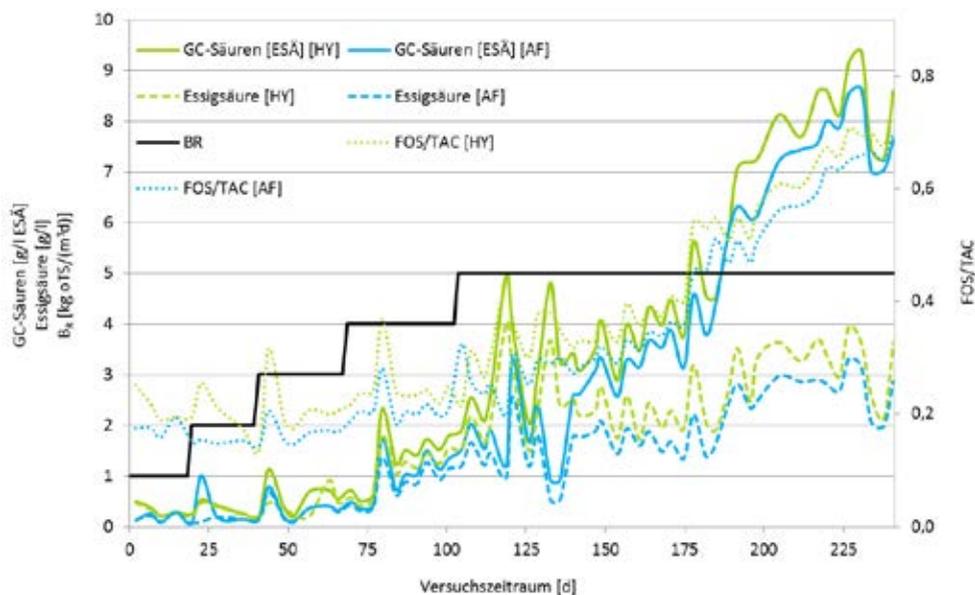


Abb. 8: Konzentrationsverläufe organischer Säuren und FOS/TAC-Werte der kontinuierlich betriebenen SBF-Versuchsreihe (thermophil) im Versuchszeitraum von 241 Tagen. HY: Hydrolysereaktor; AF: Anaerobfilter, ESÄ: Essigsäureäquivalent, B_R : Raumbelastung

5 Fazit

5.1 Zweistufige und zweiphasige Leach-Bed-Fermentation

Bei der Verwendung des biogenen Abfallproduktes Hühner trockenkot (HTK) als stickstoffreiches Substrat zur anaeroben Fermentation konnte das verwendete LBF-System entscheidend zur Erhöhung der Prozessstabilität beitragen. Insbesondere die Kopplung mit einer Strippungseinheit zur Eliminierung des toxischen $\text{NH}_4^+/\text{NH}_3$ führte – durch Verminderung der Stickstofffracht um mehr als 80 % und der daraus resultierenden abnehmenden Säurehemmung – zu einer für den Biogasprozess entscheidenden Prozessstabilisierung. Verfahrenstechnisch kann abgeleitet werden, dass die Integration einer Strippungsanlage in das Fermentationssystem die Aufrechterhaltung einer stabilen Prozessbiozönose protegert. Eine möglichst frühzeitige und mehrfache Strippung der Prozessflüssigkeit zeigte sich als optimale Verfahrensstrategie, da hierdurch bereits anfängliche Hemmungen durch erhöhte NH_4^+ -Konzentrationen und eine nachfolgende Säureakkumulation vermieden werden können. Erarbeitete Erkenntnisse zum potenziell negativen Einfluss der für eine erhöhte Strippleistung erforderlichen pH-Wertanhebung auf die Mikrobiologie führten dazu, dass weiterführende Strippversuche innerhalb aktueller Versuchsreihen ohne Einstellung eines im Perkolatspeicher stark basischen Milieus durchgeführt wurden. Ziel des Ansatzes ohne pH-Wertanpassung war es, einen Kompromiss zwischen biologischer Verträglichkeit und einer hohen Strippungseffizienz zu erreichen. Eine leichte Minderung der Strippungseffizienz um ca. 5 % ist hierbei vertretbar.

5.2 Zweistufige und zweiphasige Schwimmbettfermentation

Durch die kontinuierliche Erhöhung der Raumbelastung ($B_R = 5 \text{ kg}_{\text{OTS}}/\text{m}^3 \cdot \text{d}$) stellten sich im Versuchszeitraum deutlich grenzwertüberschreitenden Ammoniakkonzentrationen (ca. 1.500 mg $\text{NH}_3\text{-N}/\text{kg FM}$) ein, welche das SBF-System zunehmend an die Leistungsgrenzen führte. Die Gefahr einer irreversiblen Inhibierung wurde zudem durch eine Anreicherung organischer Säuren (14 g/l Essigsäureäquivalent) verstärkt. Daher, und aufbauend auf einer fortschreitenden Verschlechterung von Biogasquantität und -qualität, kann dem thermophilen Fermentationssystem unterstellt werden, dass das mikrobielle Adaptionsvermögen und somit die Stressresistenz gegen Ende des Versuchszeitraumes nahezu ausgereizt war. Auf Basis der ermittelten Biogasmengen sowie der Zusammensetzung erwies sich der hyperthermophile Versuchsansatz als deutlich sensibler (Daten hier nicht dargestellt). Sowohl die Dauer bis zum Erreichen von Gasausbeuten auf Referenzniveau (ca. 150 Tage) als auch ein stärker ausgeprägter, nachhaltiger Einbruch der Gaserträge im Zeitraum der letzten 50 Tage können als Indiz für eine weniger tolerante Prozessbiologie herangezogen werden. Im Vergleich zum thermophilen Ansatz lagen beim hyperthermophilen Ansatz höhere Ammoniakkonzentrationen (ca. 30 %) so-

wie höhere Gesamtsäurekonzentration (51 %) vor. Die verminderte Biogasausbeute des thermophilen Systems (ca. 7 % geringer als bei hyperthermophiler Betriebsweise) ist unter Berücksichtigung von Stabilitätsaspekten als vertretbar einzustufen. Somit kann der hyperthermophilen Betriebsweise trotz nachweislich erhöhter Sensitivität eine außerordentliche Stressresistenz unterstellt werden.

5.3 Stickstoffelimination mittels Strippung

Um vorangegangenen Überlegungen zum potenziell negativen Einfluss des für eine effiziente Strippung erforderlichen starken pH-Wertwechsels auf die Mikrobiologie aufzugreifen, wurden die Strippungen innerhalb aktueller Versuchsreihen ohne Einstellung eines stark basischen Milieus durchgeführt. In weiterführenden Versuchen soll durch die Erzeugung eines Kolonnenunterdrucks sowie durch die Erwärmung des Trägergases zusätzlich eine Effizienzsteigerung und Verkürzung der Reaktionszeiten erreicht werden. Eine Variation des NH_3 -entfrachtenden Trägergases (Biogas, Dampf) soll die Strippungseffizienz weiter steigern.

Literatur

- Braun, R. (1982): Biogas – Methangärung organischer Abfallstoffe. Grundlagen und Anwendungsbeispiele, Springer, Wien/New York
- DESTATIS (2014): Landwirtschaftliche Bodennutzung – Anbau auf dem Ackerland; Reihe 3.1.2, Wiesbaden
- FAO (2014): UN-Agrarorganisation- Food and agriculture organization of the United Nations (FAO)
- FNR (2013): Leitfaden Biogas: Von der Gewinnung zur Nutzung, Fachagentur nachwachsende Rohstoffe, Gülzow
- Kaiser, F. (2007): Sicherung der Prozessstabilität in landwirtschaftlichen Biogasanlagen. LfL-Information. Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL)

Aktuelle sicherheitstechnische Anforderungen an Biogasanlagen

JOSEF K. ZIEGLER

In der Vergangenheit wurde mangels anderer spezifischer Festlegungen meist in Genehmigungen und bei Prüfungen zur Festlegung der sicherheitstechnischen Anforderungen die Technische Information (TI) 4 der landwirtschaftlichen Berufsgenossenschaft zugrunde gelegt. Seit ca. 2008 hat sich in der Biogasbranche die Einsicht durchgesetzt, dass parallel dazu auch das existierende gesetzliche Regelwerk zu beachten ist, insbesondere:

- die Maschinenrichtlinie,
- die Betriebssicherheitsverordnung,
- die Gefahrstoffverordnung,
- die Arbeitsstättenverordnung,
- die Biostoffverordnung,
- die Brandschutzordnungen der Bundesländer,
- die Störfallverordnung und
- das Wasserhaushaltsgesetz (inkl. Verordnung über Anlagen zum Umgang mit wassergefährdenden Stoffen (AwSV)).

Aufgrund diverser Schadensereignisse und der offensichtlichen Komplexität des biogasübergreifenden Regelwerkes wurde von verschiedenen Seiten eine Präzisierung der Anforderungen speziell für Biogasanlagen für notwendig erachtet.

Dies hatte und hat eine Fülle von weiteren Verordnungen, Erlässen, technischen Regeln und Merkblättern zur Folge.

Kommentar:

Es existiert meist kein zusätzlicher Regelungsbedarf, sondern eine mangelnde Umsetzung im Vollzug.

Wenn

a) die Gefährdungsbeurteilung vom Betreiber mit der gebotenen Sorgfalt (vom Fachverband Biogas e. V. wurde ein qualitativ hochwertiges Schulungskonzept formuliert und es wurden zwischenzeitlich etliche Merk- und Arbeitsblätter zur Unterstützung erarbeitet, siehe unten) erstellt werden würde,

b) sich die Hersteller mit derselben Sorgfalt an die Maschinenrichtlinie halten würden und

c) die sicherheitstechnische Überprüfung durch kompetente, befähigte Personen flächendeckend von den Behörden eingefordert werden würde, dann wären die nachfolgend aufgelisteten neuen Verordnungen, Technischen Regeln, Erlässe etc. nur bedingt notwendig.

1 Aktuelle Anforderungen auf rechtlicher Ebene

- Biogasverordnung (BiogasV)
Die BiogasV soll vor allem Anforderungen zur Emissionsminderung und zur Erhöhung der Qualität der sicherheitstechnischen Bauteile festlegen.
Bisher liegt noch kein Entwurf vor.
- Technische Regel zur Anlagensicherheit (TRAS) Biogas
Die TRAS von Biogasanlagen soll die Biogasverordnung konkretisieren und ergänzen. Bisher liegt noch kein Entwurf vor.
- Verordnung über Anlagen zum Umgang mit wassergefährdenden Stoffen (AwSV)
Die AwSV regelt umfänglich wasserrechtliche Belange (Lagerkapazität, Umwallung, Bauartzulassung u. a.). Sie wurde am 25.02.2014 vom Bundestag verabschiedet und wird derzeit vom Bundesrat nicht ratifiziert; das Erscheinen ist ungewiss.

1.1 Änderungen von allgemeinen Verordnungen mit Auswirkungen auf Biogasanlagen

- Betriebssicherheitsverordnung (BetrSichV)
Die BetrSichV ist in der neuen Fassung gültig ab dem 1. Juni 2015.
Sie ist bedeutsam in Bezug auf:
 - Festlegung der Notwendigkeit der schriftlichen Erstellung einer Gefährdungsbeurteilung für Instandhaltungsarbeiten
 - Konkretisierung von Prüffristen
 - Rechtliche Gleichstellung von Arbeitgeber und Anlagenbetreiber
 - Wegfall der Anforderungen bzgl. Explosionsschutz (dieses Thema wird zukünftig in der Gefahrstoffverordnung behandelt)

- Gefahrstoffverordnung (GefStoffV)

Die GefStoffV ist ebenfalls in der neuen Fassung gültig ab 01.06.2015 und beinhaltet nun das Thema Explosionsschutz.

1.2 Berufsgenossenschaftliche technische Regeln

- Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung (DGUV) R113-001
Die „Explosionsschutz-Regeln“ beinhalten eine Sammlung technischer Regeln für das Vermeiden der Gefahren durch explosionsfähige Atmosphäre mit Beispielsammlung zur Einteilung explosionsgefährdeter Bereiche in Zonen. Speziell für Biogas gibt es unter Punkt 4.8 eine differenzierte Betrachtung der Ausweisung von Ex-Schutzzonen.
- Technische Regel für Gefahrstoffe (TRGS) 529
Die TRGS „Tätigkeiten bei der Herstellung von Biogas“ überträgt industrielle Anforderungen zu Arbeitsschutz und Hygiene auf Biogasanlagen.

- Technischen Regel wassergefährdender Stoffe (TRwS) 792 und 793
Mit der TRwS für Anlagen zum Lagern und Abfüllen von Jauche, Gülle und Silage-sickersaft „JGS-Anlagen“ (TRwS 792) sollen bundesweit wasserrechtlich einheitliche, grundlegende technische und betriebliche Regelungen für die Errichtung und den Betrieb für JGS-Anlagen sowie die Fremdüberwachung entstehen.
Die technische Regel liegt im Gelbdruck vor; vom Änderungsbedarf abhängig wird dann der Entwurf der TRwS 793 „Biogas“ veröffentlicht.
- Technische Information (TI) 4
Die TI 4 „Sicherheitsregeln für Biogasanlagen“ soll von der landwirtschaftlichen Berufsgenossenschaft überarbeitet werden. Aufgrund der Vielzahl und der zeitlichen Ungewissheit anderer Publikationen ist dies bis auf weiteres zurückgestellt worden.

2 Aktuelle Anforderungen im Bereich der Verbände

Dem gesetzlichen Regelwerk stehen praxisbezogene Merkblätter gegenüber, welche keine zusätzlichen Auflagen formulieren, sondern die gesetzlichen Anforderungen konkretisieren wollen.

Der Deutsche Verein des Gas- und Wasserfaches (DVGW), die Deutsche Vereinigung für Wasser, Abwasser und Abfall (DWA) und der Fachverband Biogas arbeiten seit einigen Jahren zusammen, um als Fachgremien branchenspezifische Lösungen zu formulieren.

2.1 Aktuelle gemeinsame Publikationen

- M 377
Biogasspeichersysteme – Sicherstellung der Gebrauchstauglichkeit und Tragfähigkeit von Membranabdeckungssystemen (Gasspeicher auf Biogasanlagen). Erscheinen im Gelbdruck Herbst 2015.
- A 305
Alternative Gasverbrauchseinrichtungen für Biogasanlagen (Gasfackeln).
Erscheinen im Gelbdruck Herbst 2015.
- A 306
Technische Dichtheit von Membranspeichersystemen (Nachweis der Gasdichtigkeit).
In Vorbereitung.
- TSM
Technisches Sicherheitsmanagement für Biogasanlagen TSM.

2.2 Verbandsinterne Publikationen der DWA

- Merkblatt M 361
 - „Aufbereitung von Biogas“ (10.2011).
- Merkblatt M 363
 - „Herkunft, Aufbereitung und Verwertung von Biogasen“
 - (01.2011 korrigierte Fassung).
- Merkblatt M 376
 - „Sicherheitsregeln für Biogasbehälter mit Membrandichtung“ (10.2006).
- Merkblatt M 380
 - „Co-Vergärung in kommunalen Klärschlammfaulbehältern, Abfallvergärungsanlagen und landwirtschaftlichen Biogasanlagen“ (08.2009 korrigierte Fassung).

2.3 Verbandsinterne Publikationen des DVGW

- Arbeitsblatt G 265-1
 - Anlagen für die Aufbereitung und Einspeisung von Biogas in Gasversorgungsnetze – Teil 1 (03.2014).
- Merkblatt G 265-2
 - Anlagen für die Aufbereitung und Einspeisung von Biogas in Erdgasnetze – Teil 2 (01.2012).
- Merkblatt G 415
 - Leitfaden für Planung, Bau und Betrieb von Biogasleitungen (06.2011).
- Arbeitsblatt G 493-1
 - Qualifikationskriterien für Planer und Hersteller von Gas-Druckregel- und Messanlagen sowie Biogas-Einspeiseanlagen (09.2012).
- Arbeitsblatt G 1030
 - Anforderungen an die Qualifikation und die Organisation von Betreibern von Anlagen zur Erzeugung, Fortleitung, Aufbereitung, Konditionierung oder Einspeisung von Biogas (12.2010).

3 Arbeitshilfen im Fachverband Biogas e. V.

Als Hilfe bei der praktischen Umsetzung hat der Fachverband Biogas e.V. begleitende Arbeits- und Merkblätter herausgegeben:

- A 001 Sicheres Arbeiten in Fermentern
- A 002 Einweisungsprotokoll für Nachunternehmer und Mitarbeiter
- A 003 Checkliste für den sicheren Betrieb für Betreiber und Sachverständige
- A 004 Anforderungen an die betriebliche Organisation
- A 005 Sicherer Umgang mit Zuschlagsstoffen (Ergänzung zur TRGS 529, in Vorbereitung, Erscheinen voraussichtlich Ende 2015)
- A 006 Gefahrenabwehr bei Stromausfall „Notstromkonzept“
- Kommentar zur DGUV R 113-001 Explosionsschutzregeln-Beispielsammlung.

4 Zusätzliche Veröffentlichungen als Erkenntnisquellen

Damit sind Veröffentlichungen bezeichnet, welche ohne Öffentlichkeitsbeteiligung erstellt wurden. Die jeweilige Organisation fühlt sich berufen, Anforderungen zu einem Thema zu formulieren, ohne sie mit anderen relevanten Fachgremien zu diskutieren. Erst durch einen behördlichen Erlass oder durch die Anwendung in der fachlichen Praxis erlangt das Papier eine Relevanz für die Beschreibung des Standes der Technik. Ein Abweichen davon ist möglich, im Schadensfalle wird gegebenenfalls gerichtlich über die Relevanz entschieden.

- Kommission für Anlagensicherheit (KAS) 28
Merkblatt „Anforderungen an die zusätzliche Gasverbrauchseinrichtung – insbesondere Fackel – von Biogasanlagen (11.2013).
- KAS-32
Die Arbeitshilfe „Szenarienspezifische Fragestellungen zum Leitfaden KAS-18“ greift die im Zuge der Anwendung des Leitfadens KAS-18 aufgeworfenen Fragestellungen auf. Im Zusammenhang mit den im Rahmen der Ermittlung angemessener Abstände zu betrachtenden Szenarien werden unter Punkt 1 für Biogasanlagen entsprechende Lösungsvorschläge formuliert, z.B. Mindestabstand in der Bauleitplanung 200 m (11.2014).
- Gesamtverband der Deutschen Versicherungswirtschaft e.V. (GDV)
Publikation der deutschen Versicherer zur Schadenverhütung „Biogasanlagen“. In Vorbereitung, Erscheinen voraussichtlich Ende 2015.

Sicherheitstechnische Anforderungen an Anlagenbetreiber – Erfahrungen einer im Schulungsverbund BIOGAS aktiven Bildungseinrichtung

ACHIM KAISER

1 Pionierarbeit für die Biogasbranche – die Anfänge der Erwachsenenbildung ab den frühen 80er-Jahren

Seit mehr als 30 Jahren gibt die Biogasgruppe in Weckelweiler bei Kirchberg an der Jagst Impulse zur Umsetzung von Biogasprojekten. Zunächst strahlten diese nur in die Region, dann aber auch in alle Welt. In jener Zeit wurde die Motivation der landwirtschaftlichen Pionierbetriebe nach dem Motto gestärkt, mit Biogas den Bauernhof möglichst unabhängig von Fremdenergie und teuren Zukäufen zu machen.

Die Bauernschule Hohenlohe und insbesondere ihr Gründer Fritz Strepfer hatten schon damals die Vision, biologisch wirtschaftende Höfe durch die Biogastechnik energieautark zu machen. In Zusammenarbeit mit der Biogasgruppe im Bundschuh-Verband wurden seit Anfang der 80er-Jahre Lehrfahrten zu funktionierenden Biogasanlagen nach Österreich, Dänemark und in die Schweiz organisiert und gleichzeitig der Bau und die Umsetzung solcher Anlagen unterstützt. Das Entwickeln und Tüfteln stand dabei im Vordergrund. Das Thema Anlagensicherheit hatte damals kaum Bedeutung. Landwirtschaftliche Biogasanlagen galten bis dahin als eine eher unbedeutende Alternative der Energieerzeugung, die völlig unwirtschaftlich und nur für Bastler und Individualisten geeignet sei. Dem Düngewert und den positiven Umweltwirkungen der Biogasgülle wurden nur geringe Bedeutungen beigemessen. Bald darauf trat die Fachgruppe Biogas, als bundesweit erste bäuerliche Unterrichtsinitiative, den auf Unwissen und Unsicherheit basierenden Vorurteilen bewusst entgegen. Thematisiert wurde die Nachhaltigkeit, dessen Urgedanke es ist, Nährstoffe in geschlossenen Kreisläufen zu führen. Zur gleichen Zeit entstand eine in Deutschland noch nie geleistete Initiative für den Selbstbau von Biogasanlagen, deren Fundament intensive Informations-, Beratungs- und Bildungsarbeit war. Zudem begann man die vielfältigen Biogasaktivitäten in der Bundesrepublik zu koordinieren und einen regelmäßigen Erfahrungsaustausch unter Betreibern einzurichten.

Diese Aktivitäten mündeten in den frühen 90er-Jahren in der Gründung des Fachverband Biogas (FvB e.V.), der seine Geschäftsstelle anfangs in den Räumen der Bauernschule in Weckelweiler einrichtete und seit 2000 in Freising ansässig ist. Die jährlichen Biogastagungen, die in Weckelweiler von 1991 bis 1999 stattfanden, wurden zu einer

festen Größe mit rasch wachsender Besucherzahl und gaben wichtige Impulse für Wirtschaft und Politik. Mittlerweile hat sich die alljährlich Ende Januar stattfindende Jahrestagung des Fachverband Biogas e.V. mit einer begleitenden Fachmesse als wichtigster Branchentreff in Deutschland etabliert. Nahezu alle heutigen und mit Langzeiterfahrung ausgestatteten Anlagenbetreiber, -planer und -hersteller besuchten damals die Veranstaltungen der Fachgruppe Biogas in Weckelweiler und auch zahlreiche Wissenschaftler und Politiker nutzten das seinerzeit bundesweit einmalige Informationsangebot. Viele Studenten und Praktikanten wurden im praktischen Anlagenbau geschult und unterwiesen. Einige von ihnen konnten die erworbenen Kenntnisse in die Gründung heute bedeutender Herstellerfirmen auf dem deutschen und internationalen Markt einbringen.

Vor über einem Jahrzehnt gingen aus der Fachgruppe Biogas zwei neue Organisationen hervor: Im Jahr 2000 das Internationale Biogas- und Bioenergie-Kompetenzzentrum (welches sich heute IBBK Fachgruppe Biogas GmbH nennt) sowie drei Jahre später die Fördergesellschaft für nachhaltige Biogas- und Bioenergienutzung (FnBB e.V.). Beide Organisationen sehen ihre Aufgabe darin, die Impulse und die Ideale der Gründerzeit weiterzutragen und die nachhaltige Kreislaufwirtschaft in der modernen Biogas- und Bioenergietechnik zu verankern. Mit ihren gewachsenen Strukturen und einem großen Netzwerk von Anlagenbetreibern und Experten der Wissenschaft und Praxis waren beide Institutionen schon damals in der Lage, Bildungsangebote und Beratungen regional, national und international anzubieten.

2 Aufgaben und Ziele des IBBK

Das IBBK versteht sich als modernes Beratungs- und Dienstleistungszentrum. Seine Arbeit erstreckt sich sowohl auf regionale und überregionale als auch auf internationale Aktivitäten und versteht seine Arbeit als zusätzlichen Impuls zur reinen Verbands- und Lobbyarbeit. Es deckt den wachsenden Bedarf an firmenunabhängiger, neutraler Informationsvermittlung zu den Themen:

- Biogas aus Biomasse im nationalen, länderübergreifenden, internationalen und globalen Kontext
- sicherer Betrieb von Biogasanlagen unter Berücksichtigung des Arbeitsschutzes
- Einsatz von CNG Compressed Natural Gas und Biomethan in der Erdgasmobilität
- Energetische Nutzung von Pflanzenöl
- Wärme- und Stromerzeugung durch Holzgas sowie
- Kreislaforientierte Abwasserreinigung.

Der Schwerpunkt des Kompetenzzentrums liegt dabei in der Bildungs- und Projektarbeit. Die IBBK Fachgruppe Biogas GmbH arbeitet inzwischen weltweit, wobei die Schwer-

punkte in Deutschland, Frankreich, Großbritannien, Südosteuropa, Türkei, Südafrika, Nordamerika und einigen Ländern Lateinamerikas (Brasilien, Chile, Ecuador und Mexiko) liegen. Diese weltweite Vernetzung ermöglicht es, in regelmäßigen Abständen auch große internationale Fachtagungen (wie z. B. die Konferenz „Progress in Biogas“, welche bereits in den Jahren 2007, 2011 und 2014 stattfand) durchzuführen.



Abb. 1: Impression von der Internationalen Konferenz „Progress in Biogas III“ vom September 2014 (Quelle: www.biogas-zentrum.de)

3 Aufgaben und Ziele der FnBB e.V.

Hauptanliegen der FnBB e.V. ist es, eine nachhaltige und kreislauforientierte Nutzung von Energie aus Biomasse zu fördern und zu verbreiten. Dieses erreichen wir über Fachveranstaltungen, Schulungen, Exkursionen, Mitarbeit bei internationalen Energieprojekten (seit mehreren Jahren ist der Verein fachlicher Partner des Programms „Intelligent Energy Europe“ der EU) sowie der Gestaltung und Nutzung von Netzwerken. Durch die Vernetzung mit Hochschulen, Umweltorganisationen, Verbänden, Einrichtungen der Fort- und Weiterbildung, der breiten Öffentlichkeit und Organisationen der Entwicklungszusammenarbeit arbeitet die FnBB e.V. aktiv am Wissenstransfer und an den politischen Rahmenbedingungen im Bereich Bioenergie mit.



Abb. 2: Homepage der FnBB e.V. (Quelle: www.fnbb.de)

4 Weiterbildung in der Biogastechnik im Wandel der Zeit

In Zeiten anhaltender Wissensexplosion, ständig wachsender Anforderungen an das berufliche Können bei gleichzeitig fortschreitender Spezialisierung der Tätigkeiten und schließlich einer immer rascheren Veränderung der wirtschaftlichen und rechtlichen Rahmenbedingungen hängt der berufliche Erfolg mehr denn je von der Weiterbildung des Einzelnen ab. Deshalb bieten wir in den Bereichen Anlagensicherheit von Biogasanlagen, Prozessbiologie (Theoretische Grundlagen und Umsetzung in der Praxis) und Kraft-Wärme-Kopplung (BHKW-Betrieb kombiniert mit gezielter Wärmenutzung) didaktisch aufbereitete Seminare und Schulungen mit Lehrinhalten aus Theorie und Praxis an, in deren Rahmen wir mit kompetenten Fachreferenten aus Praxis und Wissenschaft zusammenarbeiten. Bei der Festlegung der Seminarthemen lassen wir uns von den Bedürfnissen, Interessen und Intentionen der Zielgruppen leiten und bemühen uns bei der Auswahl und Aufbereitung der Inhalte an ihre Vorkenntnisse und Erfahrungen sowie an ihre beruflichen Aufgabenstellungen und Probleme anzuknüpfen. Wir bemühen uns darum, mit unseren Themen und Inhalten nah am Puls der Zeit zu sein und beobachten die laufenden Entwicklungen sehr genau, um brisante Themen in unseren Veranstaltungen aufzugreifen. So wurde unsererseits z. B. das Thema Gülle-Kleinanlagen lange vor Inkrafttreten der Novellierung des Erneuerbare-Energien-Gesetzes (EEG) am 01.01.2012, in dessen Rahmen der Vergütungssatz für diesen Anlagentyp erstmals gesetzlich verankert wurde (EEG 2012, § 27b), immer wieder in den Fokus unserer Fachgespräche und Infoveranstaltungen gestellt.



Abb. 3: Impression vom Internationalen Kurs im April 2015 (Quelle: IBBK Fachgruppe Biogas GmbH)

4.1 Beginn unserer Aktivitäten bei den mehrtägigen Betreiberschulungen

Im Jahr 2004 wurde von Seiten des IBBK in Kooperation mit dem in Wolpertshausen ansässigen Anlagenbauer Novatech GmbH, bei der seinerzeit eine Diplomarbeit zum Thema „Ausarbeitung von Qualifikations- und Bildungskonzepten für Betreiber von Biogasanlagen“ betreut wurde, das Thema Betreiberschulung erstmals strukturiert und fundiert bearbeitet. Nach dem Motto „Ständiges Lernen sichert den Erfolg beim Betrieb von Biogasanlagen“ kam darauf aufbauend ein Schulungskonzept mit dem Namen „proBIOGAS“ heraus.

proBIOGAS: 7-tägiger Qualifizierungskurs für Anlagenbetreiber

Bei dieser Intensivschulung, die von 2005 bis 2007 jeweils drei Mal pro Jahr durchgeführt wurde, handelte es sich um einen siebentägigen Kurs, der in einen drei- und einen viertägigen Teilblock (dazwischen lag ein Wochenende) untergliedert war. Zusammen mit dem Energiezentrum in Wolpertshausen, einem Ableger der hiesigen Wirtschaftsfördergesellschaft unseres Landkreises Schwäbisch Hall, konnten damals europäische Fördermittel (im Rahmen von Europäischer Sozialfond ESF und Regionen Aktiv) akquiriert werden. Dies hatte zur Folge, dass die Bildungsmaßnahme äußerst preiswert angeboten werden konnte. Die Schulungsinhalte von proBIOGAS waren weit gefächert und deckten den gesamten Bereich der Biogastechnik ab:

- Substratpotenziale und Wirtschaftlichkeit
- Planung, Bau und Genehmigung
- Grundlagen der biologischen Prozesse
- Fermentertechnik
- Betriebsführung
- Gülle-, Substrat-, Einbring- und Gastechnik
- Sicherheits- und Hygieneaspekte

- Störfallhandling
- Blockheizkraftwerk
- Elektro- und Heizungstechnik
- Netzanschluss und Messtechnik
- Juristische Aspekte.

Zwei halbtägige Exkursionen zu ausgewählten Biogasanlagen der Region rundeten die jeweiligen Teilblöcke und das gesamte Veranstaltungsprogramm ab. Die Anzahl der Teilnehmer pro Kurs stieg während des dreijährigen Förderzeitraums permanent von neun (Mitte April 2005) auf erstaunliche 41 (Ende Oktober 2007) an. Durchschnittlich wurden die neun Kurse von 22 Teilnehmern besucht, die aus dem gesamten Bundesgebiet – zu einem Drittel aus Baden-Württemberg – und deutschsprachigen Ländern bzw. Regionen wie z. B. Österreich, Italien (Südtirol), Belgien (Wallonien) und den Niederlanden ange-reist waren, was auch in den heutigen Kursen noch so in etwa der Fall ist.



Abb. 4: Deckblatt des Kursflyers von proBIOGAS aus dem Jahr 2007 (Quelle: energieZENTRUM Wolpertshausen)

BIOGAS Intensiv: 5-tägiger modular aufgebauter Qualifizierungskurs

Nach Auslaufen der dreijährigen projektbezogenen Fördermaßnahme entschloss sich das IBBK aufgrund der gerade erwähnten großen Nachfrage vonseiten der Teilnehmer mit dem Konzept der mehrtägigen deutschsprachigen Qualifizierungsmaßnahme (in welcher Form auch immer) weiterzumachen. Den Organisatoren war deutlich aufgefallen,

dass sich die Zielgruppe der proBIOGAS-Kurse von 2005 bis 2006 noch beinahe ausschließlich auf (zukünftige) Biogasanlagenbetreiber erstreckte. Dieser Sachverhalt hat sich aber bereits im Jahr 2007 geändert. Aus diesem Grund wendet sich das seit 2008 bereits 22 Mal (Stand Sommer 2015) durchgeführte und seinerzeit neu entwickelte Schulungskonzept BIOGAS Intensiv (www.Biogas-Intensiv.de) zwar immer noch vorrangig an Biogasanlagenbetreiber und deren Betriebspersonal, aber auch an Beschäftigte von Firmen und Dienstleistern sowie Behördenvertreter, die im Biogasbereich tätig sind und die sich ebenfalls bei den Themen Anlagensicherheit und Prozessbiologie auf den aktuellen Stand bringen wollen. Die Module sind getrennt oder zusammen buchbar und helfen den Teilnehmern dabei, Wissenslücken bei der Grundausbildung und bei aktuellen Anforderungen zu schließen. Seit jeher achten wir deshalb als Veranstalter bei unserer Auswahl der Referenten (sie kommen aus dem gesamten Bundesgebiet) darauf, dass diese alle mehrjährige Branchenkenntnis in ihren Themenschwerpunkten besitzen. BIOGAS Intensiv findet an drei Terminen im Jahr (Mitte März, Anfang Juli, Anfang Dezember) statt. Anfang November 2015 werden wir die Qualifizierungsmaßnahme durch ein eigenständiges zweitägiges Modul erweitern, das den Namen „Biogas und seine Rolle bei der Energiewende“ trägt. Sollte dieses Thema auf das erwartete Interesse stoßen, ist es vonseiten des IBBK für die Zukunft geplant, dieses Modul zweimal pro Jahr anzubieten.

5 Grundlagen der gesetzlichen Verankerung von Sicherheitsschulungen in Deutschland

Im Jahr 2012 haben 371 Erfahrungsberichte von Sachverständigen, die nach Bundes-Immissionsschutzgesetz (BImSchG) § 29a Anlagenüberprüfungen durchführten, deutlich werden lassen, dass bei 71 % aller überprüften Biogasanlagen in Deutschland bedeutsame sicherheitstechnische Mängel vorliegen. Diese Defizite sind sehr vielschichtig und setzen sich wie folgt zusammen:

- Fehlende oder mangelhafte Statik von Fermentern und Gasspeichern
- Fehlender oder mangelhafter Blitzschutz/Potenzialausgleich und unvollständige Dokumentation
- Anlagenteile waren nicht frostsicher ausgeführt
- Fehlender Anfahrschutz
- Fehlerhafte Ausführung von Leckkontrollsystemen
- Fehlende Umwallung der Anlage
- Falsch ausgelegte Gasfackel
- Sichtfenster war nicht dauerhaft technisch dicht, keine Ausweisung der Ex-Zone, elektrische Zündquellen in Ex-Zone.

Der Arbeitskreis der Kommission für Anlagensicherheit (KAS), welcher dem Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB) untersteht, vertritt deshalb seither die Meinung, dass der rapide Zubau der vergangenen Jahre mit bis zu 1.200 neuen Biogasanlagen pro Jahr in Kombination mit einer Unübersichtlichkeit der relevanten Gesetze, Verordnungen und Regelwerke sowie ein fehlender funktionierender Vollzug zu diesem Missstand geführt haben. So war es nur zwangsläufig, dass der Gesetzgeber das Thema Anlagensicherheit und Arbeitsschutz auf Biogasanlagen zusehends für wichtig erachtete und hinsichtlich der Betreiberqualifikation Handlungsbedarf sah. Aus diesem Grund wurde für alle Arbeitgeber und Beschäftigte in Biogasanlagen (außer Klär- und Rohgasaufbereitungsanlagen, für die diesbezüglich bereits weitreichendere Regelungen in puncto Arbeitssicherheit gelten) ein neues Regelwerk mit Gesetzescharakter geschaffen, in dem u. A. Mindestschulungsinhalte beim Arbeitsschutz für Biogasanlagenbetreiber beschrieben werden.

5.1 Technische Regel für Gefahrstoffe (TRGS 529): Tätigkeiten bei der Herstellung von Biogas

Bei der TRGS 529 handelt es sich um eine rechtsverbindliche Vorschrift nach § 7 Abs. 2 der Verordnung zum Schutz vor gefährlichen Stoffen (GefStoffV), die am 13.04.2015 vonseiten des Bundesministeriums für Arbeit und Soziales (BMAS) im Ministerialblatt veröffentlicht wurde und seitdem Gesetzescharakter hat. Im Rahmen dieser Technischen Regel werden industrielle Anforderungen zu Arbeitsschutz und Hygiene auf Biogasanlagen übertragen. Folgende Teilbereiche sind u. A. darin verankert:

- Grundzüge des Gefahrstoffrechts
- Gefährdungsbeurteilung

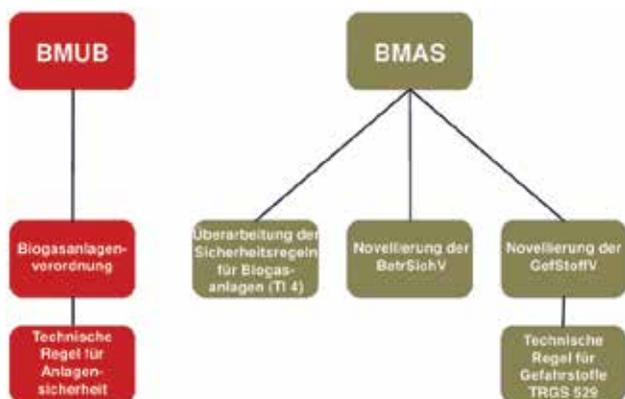


Abb. 5: Schematischer Überblick der aktuellen gesetzlichen Entwicklungen beim Thema Anlagensicherheit (Quelle: Fachverband Biogas e.V.)

- Technische Schutzmaßnahmen (Brand- und Explosionsschutz)
- Maßnahmen bei der Annahme von Kofermenten
- Lagerung von und sicherer Umgang mit Zusatz- und Hilfsstoffen
- Organisatorische Schutzmaßnahmen (Betriebsprotokoll, Hygienemaßnahmen, Dichtheitsprüfungen, Überprüfungen der Sicherheitseinrichtungen)
- Mindestschulungsinhalte für fachkundige Personen.

5.2 „Betreiberqualifikation – Anlagensicherheit von Biogasanlagen“ gemäß TRGS 529

Auf gesetzlicher Ebene wurden in letzter Zeit beim Umwelt- und Arbeitsschutz aufseiten der beiden Ministerien „Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit“ (BMUB) sowie Bundesministerium für Arbeit und Soziales (BMAS) die Aktivitäten bei den Technischen Regeln bezüglich Schulungsvorgaben intensiviert. Das im Rahmen von BIOGAS Intensiv angebotene Modul „Betreiberqualifikation – Anlagensicherheit von Biogasanlagen“ nach dem bundesweiten Konzept des Schulungsverbund BIOGAS erfüllt deshalb u. a. die Anforderungen der neu Inkraftgetretenen TRGS 529 und richtet den Fokus auf den sicheren Betrieb von Biogasanlagen. Die dabei erworbenen Kenntnisse werden zum Abschluss des zweieinhalbtägigen Moduls mit einem Multiple-Choice-Test überprüft und den Teilnehmenden mit einem Zertifikat als Schulungsnachweis bestätigt. Das erfolgreiche Bestehen berechtigt die Teilnehmer, darauf aufbauend, die Fach- und Sachkundes Schulung des Deutschen Vereins des Gas- und Wasserfaches e.V. (DVGW) G-1030 (A) zu absolvieren. Diese vom DVGW durchgeführte Schulung wird für Anlagen notwendig, die sich im Anwendungsbereich des Energiewirtschaftsrecht (EnWG) befinden. Dabei handelt es sich z. B. um Betreiber von sogenannten Satelliten-BHKW, deren Gasleitungen über öffentlichen Grund verlaufen, sowie Betriebspersonal von Aufbereitungs- und Einspeiseanlagen für Biogas.

5.3 Struktur des Schulungsverbund BIOGAS

Die IBBK Fachgruppe Biogas GmbH engagiert sich seit 2012 zusammen mit mehreren (zwischenzeitlich acht) namhaften und etablierten Schulungsanbietern und unter dem Dach der drei Trägerverbände DVGW, DWA (Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V.) sowie dem FVB e.V. (Fachverband Biogas) zusammen mit der Sozialversicherung für Landwirtschaft, Forsten und Gartenbau (SVLFG) und der Berufsgenossenschaft Energie Textil Elektro Medienerzeugnisse (BG ETEM) für die Einführung eines bundeseinheitlich abgestimmten Mindeststandards bei Biogasbetrieberschulungen, der den Anforderungen der im April 2015 Inkraftgetretenen TRGS 529 gerecht wird. Ziel ist es, im Rahmen der von den bislang neun anerkannten Bildungseinrichtungen angebotenen Kurse ein Höchstmaß an Fachlichkeit, Aktualität und Praxisnähe zu gewährleis-



Abb. 6: Logo vom Schulungsverbund BIOGAS (Quelle: Fachverband Biogas e.V.)

ten, um die Betreiber für die Umsetzung der notwendigen sicherheitstechnischen Anforderungen zu qualifizieren.

Nachhaltiger Nutzen für Anlagenbetreiber durch den Besuch dieser Sicherheitsschulungen

Die vom Schulungsverbund BIOGAS angebotene Betreiberqualifikation „Anlagensicherheit für Biogasanlagen“ bietet eine Basis für bundeseinheitliche und hochwertige Schulungen mit zielgerichteter Wissensvermittlung und schriftlicher Lernerfolgskontrolle. Die folgenden Unterpunkte sollen dem Betreiber von Biogasanlagen deutlich machen, weshalb für ihn die fundierte Wissenserweiterung im Rahmen dieses Bildungsangebots so sinnvoll ist:

- Mit jeder „Negativschlagzeile“ über Biogasanlagen werden die Rufe nach „Betreiberqualifikation“ stärker und die „sichere Energieversorgung“ von breiten Teilen der Bevölkerung infrage gestellt
- In immer mehr Genehmigungs- und Finanzierungsbescheiden sowie Versicherungspolicen werden Betreiberschulungen gefordert (Stichwort „Schadensminderungspflicht“)
- Rechtssicherheit: um im Strafrecht (StGB) gegebenenfalls den Vorwurf der groben Fahrlässigkeit abwehren zu können (Untermauerung der These, dass auch von vornherein auf der Wissensseite alles Erdenkliche unternommen wurde, den eingetretenen Schaden möglichst nicht geschehen zu lassen).

6 Zusammenfassung: Unsere Erfahrungen aus vielen Betreiberschulungen

Wir beobachten im Rahmen unserer Kurse immer wieder, dass sich so mancher Landwirt im Vorfeld seiner Anlagenplanung viel zu wenig Gedanken darüber gemacht hat, was denn da zukünftig sicherheitstechnisch auf ihn zukommt und welche immense Verantwortung er während des Betriebs des eigenen dezentralen Kraftwerks zu übernehmen hat. In letzter Zeit hören wir immer wieder von den Kursteilnehmern solche Sätze wie „Das wusste ich überhaupt nicht“, „Aber das hat uns der Anlagenhersteller gar nicht ge-

sagt“ oder „Dieser Gesetzeswulst geht doch viel zu weit“. Aus unserer Sicht sollte dem Biogasanlagenbetreiber aber schon während der Planungsphase bewusst (gewesen) sein, dass er durch den Bau der Biogasanlage ein Energieversorgungsunternehmen eröffnet. Er betreibt nun ein Biomassekraftwerk, welches aus gesetzlicher Sicht eine überwachungsbedürftige Anlage darstellt. Der dabei erzeugte Strom wird gemäß EEG vergütet. Dabei handelt es sich nicht um eine Quersubventionierung für die Land- und Entsorgungswirtschaft, sondern um ein Förderprogramm zur Entwicklung von innovativen, nachhaltigen und dezentralen Energiekonzepten, das von jedem einzelnen Bürger, der Strom aus dem öffentlichen Netz bezieht, durch die EEG-Umlage finanziert wird. Und dafür erwartet er eine Zukunftstechnologie, die sich beim Sicherheitsstandard mit der konventionellen Energieerzeugung messen lassen kann. Spätestens im Schadensfall werden Richter und Staatsanwalt den Betreiber mit dieser Wahrheit konfrontieren.

Auch fällt uns bei der Durchführung von Schulungen auf, dass Anlagenbetreiber generell noch zu wenige Betriebsdaten in ihren Anlagen erfassen. Allerdings merken wir im Rahmen unserer Kurse und beim Informationsaustausch mit mehreren Umweltgutachtern aus unserem Netzwerk, dass sich dabei langsam aber stetig eine Verbesserung abzeichnet. Trotzdem entsteht oft noch der Eindruck, dass die Datenerfassung als lästiges Übel wahrgenommen wird, wohl auch, weil gängige technische Hilfsmittel, wie Gasanalysetechniken und EDV-Programme, noch zu wenig eingesetzt werden. Auch die Selbsteinschätzung der Betreiber hinsichtlich ihres arbeitswirtschaftlichen und materiellen Aufwands im Verhältnis zum erwirtschafteten Ertrag, entbehrt des Öfteren jeder Grundlage. Nicht wenigen Anlagenbetreibern fällt es schwer, in ihrer betriebsinternen „Biogaskette“ die gut laufenden Arbeitsabschritte von den weniger gut laufenden zu unterscheiden. Gerade das stellt aber aus unserer Sicht die Grundlage für eine zielgerichtete Optimierung (dem sogenannten „Repowering“) der Biogasanlage dar, um diese aus energiewirtschaftlicher Sicht „Fit für die Zukunft“ zu machen. Dinge wie regelmäßiger und zielgerichteter Erfahrungsaustausch, bei dem auch ehrliche Betriebsvergleiche, die der Wirklichkeit standhalten, untereinander diskutiert werden, könnten oftmals schon ein erster Schritt sein, um den betriebsinternen Erfolg der Vergärungsanlage zu steigern. Hier sehen wir noch „viel Luft nach oben“.

7 Ausblick in die Zukunft

Biogas ist aufgrund seiner unterschiedlichen Nutzungspfade und seiner Speicherbarkeit eine unverzichtbare Säule der Energiewende! Der Betrieb einer Anlage darf jedoch keinesfalls als „Nebenbei-Arbeit“ degradiert werden. Biogasanlagen sind verfahrenstechnische Anlagen und damit komplexe Bauwerke, die dem Betriebsleiter in den Bereichen Technik, Sicherheit, Biologie, gesetzlichen Vorgaben, Betriebswirtschaft usw. sehr anspruchsvolle Qualifikationen abverlangen. Bleibt für die Zukunft zu hoffen, dass sich die Notwendigkeit der überbetrieblichen Weiterbildung von Anlagenbetreibern bei qualifizierten Bildungsanbietern in den kommenden Jahren etablieren wird. Denn wie einer unserer Referenten einmal bemerkt hat: „Eine Anlage ist nur so gut wie die fachliche Qualifikation ihres Betreibers“. In diesem Sinne freuen wir uns, Sie auf einer unserer nächsten Schulungen begrüßen zu dürfen. Es wäre schön, wenn auch Ihnen unser Bildungsangebot Hilfestellungen gibt, die zielgerichtet in den sicheren und zukunftsfähigen Betrieb Ihrer Biogasanlagen einfließen.

Aufbereitung und Lagerung von Zuckerrüben zur Vergärung in Biogasanlagen

WALDEMAR GRUBER

1 Einleitung

Die Zuckerrübe zeichnet sich durch eine lange Ausnutzung der Vegetationszeit und eine effiziente Verwertung von Wasser und Stickstoff aus. Aufgrund ihrer leichten und schnellen Vergärbarkeit lassen sich Zuckerrüben sehr gut in Biogasanlagen einsetzen. Ihre vermehrte Nutzung in Biogasanlagen könnte die Fruchtfolgen auflockern und Anbauisiken minimieren. Es besteht jedoch Unsicherheit hinsichtlich der Beurteilung von Verfahren, mit denen die Zuckerrüben einer Biogasanlage über das Jahr wirtschaftlich bereitgestellt werden können. Dies fällt deswegen schwer, da Lagerverluste noch nicht eindeutig quantifiziert wurden. In der Literatur werden Umsetzungsprozesse während der Silierung von Zuckerrüben beschrieben. Rückschlüsse auf die Lagerungsverluste lassen sich häufig nicht ziehen.

In diesem Zusammenhang hat sich beim KTBL die Arbeitsgruppe „Daten zum Einsatz von Zuckerrüben in Biogasanlagen“ gegründet. Ziel ist es, abgesicherte Daten hinsichtlich der Aufbereitungskosten, Lagerungsverluste und Gaserträge bereitzustellen. Versuchsdaten, die von verschiedenen Institutionen in den vergangenen Jahren ermittelt wurden, werden hierfür gesichtet und auf Plausibilität geprüft.

Untersuchungsergebnisse wurden u. a. in einem Projekt der Landwirtschaftskammer Nordrhein-Westfalen und dem Rheinischen Rübenbauer-Verband (Projektförderung: Ministerium für Klimaschutz, Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen) erstellt und fließen in die Datenanalyse mit ein. Diese Untersuchung sowie die Ergebnisse werden nachfolgend beschrieben.

2 Versuchsdurchführung

In einer zweijährigen Untersuchungsreihe wurden auf dem Landwirtschaftszentrum der Landwirtschaftskammer NRW Haus Düsse drei unterschiedliche Aufbereitungs- und Lagerverfahren für den Einsatz von Zuckerrüben in Biogasanlagen überprüft.

Im Spätherbst der beiden Jahre wurden die Zuckerrüben mit einem sechsreihigen Rübenroder geerntet und für 7 Tage unter Vlies in einer asphaltierten Fahriloanlage gelagert. Anschließend wurden diese Rüben mit einem Rübenlader trocken gereinigt.

- Folgende Konservierungsvarianten legte man für eine Lagerdauer von 9 Monaten an:
- Mischsilage aus gebröckelten Rüben und Corn-Cob-Mix (CCM) (1. Versuchsjahr) oder Lieschkolbenschrot (LKS) (2. Versuchsjahr)
 - Zuckerrübenbrei (gemuste Zuckerrüben)
 - Ganze Rüben unter Silofolie.

2.1 Mischsilage aus gebröckelten Zuckerrüben

In einer Fahrsiloplanlage wurden bei der Einsilierung schichtweise CCM und Zuckerrübenstücke eingebracht. Das CCM wurde praxisüblich mit einer Schrottmühle am Feldrand zerkleinert, die Zuckerrüben wurden mit einer Schnitzelschaufel, die an einem Frontlader montiert war, in den Silagehaufen eingefahren (Abb. 1).



Abb. 1: Mit einer Schnitzelschaufel werden die Zuckerrüben zerkleinert und Schichtweise auf der Miete mit Lieschkolbenschrot aufgebracht (Quelle: Gruber)

Der Anteil der Zuckerrüben an der gesamten Frischmasse betrug 23,6 %. Bezogen auf die Gesamttrockenmasse lag der Zuckerrübenanteil bei 8,8 %. Eine Steigerung des Zuckerrübenanteils über diesen Wert war nicht möglich, da der Haufen bereits bei diesem Anteil begann auseinander zu rutschen und das notwendige Verdichten des Siliergutes dadurch erschwert wurde.

Im Verlauf des Jahres zeigte sich, dass die Stabilität des Silagehaufens bei dem erreichten Zuckerrübenanteil in der Mischung nicht mehr gegeben war. Aufgrund des geringen Trockensubstanzgehaltes der Zuckerrüben und der starken Freisetzung von Sickersaft aus den Zuckerrübenstücken bildeten sich Risse im Silagehaufen. Über diese Risse drang nach Öffnen der Miete offensichtlich Sauerstoff in die Silage ein, was zu teilweisem Verderb führte. Bis zum Ende der Lagerung trat aus der Mischsilage Sickersaft aus.

Im zweiten Versuchsjahr wurde als Mischungspartner für die Zuckerrüben anstelle von Corn-Cob-Mix (CCM) Lieschkolbenschrot (LKS) verwendet, um den Trockensubstanzgehalt in der Silomiete zu steigern. Die Mischsilage wurde in dem zweiten Versuchsjahr in einem Fahrsilo mit senkrechten Seitenwänden angelegt.

2.2 Zuckerrübenbrei (gemuste Zuckerrüben)

In dieser Aufbereitungsvariante wurden die Zuckerrüben mit einem Gehölzschredder zerkleinert und in offene Container gefüllt. Die Lagerung im offenen Container soll die in der Praxis gebräuchliche Lagerung von Zuckerrübenbrei in einer offenen Lagune simulieren (Abb. 2).



Abb. 2: Die gemusten Rüben wurden in einen mit Folie ausgeschlagenen Container gefüllt, aber nicht abgedeckt (Quelle: Gruber)

Es fiel auf, dass sich die Struktur des eingebrachten Zuckerrübenbreis innerhalb weniger Tage veränderte. Der Brei verteilte sich gleichmäßig im Container, es bildete sich eine ebene Oberfläche aus. Während der gesamten Lagerzeit waren biologische Aktivitäten an der Oberfläche zu erkennen. Es bildeten sich Blasen und Risse, die auf eine Gasbildung hindeuteten. Mit steigender Außentemperatur wurde die Oberfläche trockener und ihre Farbe dunkler. Es bildete sich eine Verkrustung, die zwischenzeitlich durch den Eintrag von Niederschlag aufgeweicht wurde. In der Nähe der Container war während der gesamten Lagerzeit ein alkoholischer Geruch wahrnehmbar.

Die Struktur des Materials an der Oberfläche baute sich innerhalb eines halben Jahres stark ab und hatte im Sommer eine torfartige Konsistenz. Die Oberfläche war zudem warm.

Die veränderte obere Schicht erreichte im Juni eine Mächtigkeit von etwa 5 bis 8 cm. Unterhalb dieses Horizontes war der Zuckerrübenbrei auch bei sommerlichen Außentemperaturen kalt und sauer.

2.3 Lagerung ganzer Rüben unter Silofolie

Bei diesem Versuch wurden die Zuckerrüben in einer Fahrlochanlage mit Seitenwänden eingelagert und mit Silofolie luftdicht abgedeckt. Die anfängliche Stapelhöhe betrug 2,30 m. Die Siloanlage wurde zuvor komplett mit einer dicken Folie ausgeschlagen, um auftretenden Sickersaft auffangen zu können (Abb. 3). Der austretende Sickersaft wurde über eine Rohrleitung abgeführt und Verlauf und Menge der Sickersaftbildung erfasst.



Abb. 3: Ganze Zuckerrüben wurden in eine Siloanlage mit Seitenwänden gefahren und luftdicht abgedeckt; aus dem Rohr am Boden der Lagerstätte konnte der austretende Sickersaft abgeleitet und aufgefangen werden (Quelle: Gruber)

In den ersten fünf Monaten der Silierung traten aus dem Silohaufen etwa 10 % der einsilierten Masse als Sickersaft aus. Dieser wurde in der Biogasanlage verwertet.

Im August der jeweiligen Jahre wurden die Silos geöffnet und mit der Auslagerung der silierten Rüben begonnen.

Der Silohaufen hatte zu diesem Zeitpunkt etwa 1/3 seiner ursprünglichen Höhe verloren. Die Rüben hatten eine gummiartige Konsistenz, rochen stark alkoholisch und waren von einem gelblichen Schleim überzogen. Der austretende Saft war klebrig und stark korrosiv.

3 Ergebnisse und Diskussion

Die Lagerung von Zuckerrüben in einer Mischsilage ist grundsätzlich möglich, die in den beiden Versuchsjahren festgestellten Lagerverluste bezifferten sich auf 14 bis 15 % des Methanbildungspotenzials. Obwohl die weiteren Komponenten der Mischsilage (2011: CCM, 2012: LKS) sehr hohe Trockensubstanzgehalte aufwiesen, trat Sickersaft aus dem jeweiligen Stapel aus. Auch waren die Silohaufen nicht formstabil, sodass zum einen Bruchspalten auftraten und zum anderen der Stapel mit zunehmender Lagerdauer anfang zu fließen. Häufig scheidet ein Gemisch aus Lieschkolbenschrot mit Rübenbruchstücken oder CCM mit Rübenbruchstücken in der Praxis aus, da die Arbeitsabläufe während des Einlagerns schwer zu koordinieren sind und auch die optimalen Erntetermine für die jeweilige Frucht nicht mit der Ernte der anderen Frucht übereinstimmt.

Aus den genannten Gründen ist für die Praxis die Lagerung von gemusterten Zuckerrüben in Großlagerstätten oder das Lagern ganzer silierter Zuckerrüben in Mieten von größerer Bedeutung.

Für die Varianten Lagerung von Rübenmus und Silierung ganzer Zuckerrüben sind die Verluste des Methanbildungspotenzials aus dem Versuchsjahr 2012 in Tabelle 1 dargestellt.

Dieser Parameter wurde gewählt, da hiermit der Energieverlust des gelagerten Materials für den Zeitraum der Lagerung exakt beschrieben wird.

Hierzu wurden in verschiedenen Schichten der Lager Proben entnommen und chemischen und physikalischen Analysen unterzogen.

Tab. 1: Verlust des Methanbildungspotenzials 2012

Gemuste Rüben im Container		Ganze Zuckerrüben, siliert	
Obere Schicht (0–30 cm)	50,8 %	Obere Schicht (0–30 cm)	49,8 %
Mittlere Schicht (30–60 cm)	9,1 %	Mittlere Schicht (80–110 cm)	41,8 %
Untere Schicht (60–90 cm)	1,8 %	Untere Schicht (110–180 cm)	41,7 %
Durchschnittlicher Lagerverlust (0–90 cm)	22,3 %	Durchschnittlicher Lagerverlust (0–180 cm)	43,2 %

Die ermittelten Werte weisen aus, dass die Verluste der gemusterten Rüben bei Betrachtung des gesamten Containerinhaltes 22,3 % betragen, der Energieverlust der silierten ganzen Zuckerrüben liegt bei 43,2 % und ist somit fast doppelt so hoch. Es ist weiterhin zu erkennen, dass die Verluste bei der Lagerung gemusteter Rüben in den oberen Schichten, also in Bereichen in denen aerobe Verhältnisse herrschen, deutlich höher sind als in den unteren Schichten des Behälters. In Tiefen von über 60 cm konnten nur noch geringe Lagerverluste ermittelt werden. Bei der Silierung ganzer Rüben liegen die Lage-

rungsverluste zwar in der oberen Schicht auch am höchsten, jedoch sind die Lagerverluste in den mittleren und unteren Schichten des Silostapels immer noch sehr hoch. Über die gesamte Stapelhöhe der Silomiete betrachtet lagen die Energieverluste über 41 %.

Die Lagerung von Rübenmus in Container sollte das Lagern von Rübenbrei in Erdbecken oder Hochsiloplanzen nachempfinden. Die Untersuchungen zeigten, dass ein erheblicher Stoffabbau in den oberflächennahen Schichten der Lagerbehälter stattfindet. Eine luftdichte Abdeckung könnte auch in den oberen Schichten die Verluste minimieren. Eine nicht luftdichte Abdeckung erhöht hingegen Verluste in den oberflächennahen Bereichen, da sich in diesem Milieu Schimmelpilze stark vermehren können und die organische Masse abbauen. Bleibt die Oberfläche offen, verhindert die auftreffende UV-Strahlung eine Vermehrung der Schimmelpilze.

Die Silierung ganzer gestapelter Rüben birgt offensichtlich eine große Gefahr des Lufteintrittes in die Zwischenräume der Rübenkörper. Somit können aerobe Verhältnisse entstehen, was dann Schimmelpilze, Hefen und andere Mikroorganismen befähigt die organische Masse umzusetzen. Die Zwischenräume sind nach der Einlagerung der Rüben immer mit Luft gefüllt. Dies führt vermutlich auch zu einer verlangsamten Aktivität der Milchsäurebakterien. Da diese für eine zügige und vollständige Silierung der Erntegüter verantwortlich sind, wird hierin ein weiterer Grund für die hohen Lagerverluste der ganzen silierten Zuckerrüben gesehen. Spätestens beim Öffnen des Silos kann wieder Luft in den Stapel eintreten, die sich dann über die Zwischenräume verteilt.

Messungen der organischen Säuren und Alkohole während der Versuchsdurchführung wiesen die höchsten Werte von Essigsäure in den silierten ganzen Zuckerrüben aus. Essigsäure kann sowohl während der Silierung durch Essigsäurebakterien entstehen als auch bei dem Abbau von Ethanol unter aeroben Bedingungen. Da in den silierten Rüben die Milchsäure gegenüber den anderen Varianten relativ niedrig ist, nährt dies die Vermutung, dass durch Lufteintritt aerobe Abbauprozesse stattfanden und dies die hohen Lagerverluste mit begründet.

Berichte aus der Praxis zeigen, dass bei ausreichender Stapelhöhe die luftgefüllten Zwischenräume zwischen den silierten Rüben minimiert werden, da die Rüben durch die Silierung weich werden und durch das Eigengewicht zusammengedrückt werden. Dadurch entstünden zumindest im unteren Bereich des Silostocks geringere Verluste. Die oben genannte KTBL-Arbeitsgruppe versucht diesen Sachverhalt zu verifizieren und die Auswirkungen zu quantifizieren.

Festzuhalten bleibt, die Lagerung gebröckelter Rüben zusammen mit trockenen silierfähigen nachwachsenden Rohstoffen ist grundsätzlich mit tolerierbaren Lagerverlusten möglich. Während der Lagerung gemuster Zuckerrüben treten an der Oberfläche und in der obersten Schichten der Lagerbehälter große Verluste auf. Ab einer Tiefe von 60 cm sind die Lagerverluste nur noch gering.

Bleiben bei Silierung ganzer Zuckerrüben die luftgefüllten Zwischenräume erhalten, führen die aeroben Verhältnisse offensichtlich zu nicht tolerierbaren Verlusten während der Lagerzeit.

Biomassebereitstellung vom Dauergrünland für die Biogasproduktion

**MATTHIAS PLÖCHL, ANNETTE PROCHNOW, CHRISTIANE MANTHEY, KATJA GÖDEKE,
FLORIAN SCHMIDT, CHRISTIANE HERRMANN, MONIKA HEIERMANN, HANS HOCHBERG**

1 Zusammenfassung

Die Nutzung von Dauergrünland ist in den vergangenen Jahrzehnten stetig zurückgegangen. Für intensiv genutzte Standorte bietet sich eine Extensivierung nur mit deutlichen Qualitätsverlusten des darauf gewonnenen Grünfutters an. Die zusätzlich notwendige Pflege, um den Grünlandstandort zu erhalten, ist mit erheblichen Kosten und Aufwand verbunden. Die Nutzung des Aufwuchses, der nicht als Grünfutter gebraucht wird, als Einsatzstoff für die Biogasproduktion stellt eine Alternative dar. In einem umfangreichen Verbundprojekt (GNUT-Biogas) wurde an sieben Standorten vom Norden bis in den Süden Deutschlands die Eignung und das Potenzial des Grünlandaufwuchses für die Biogasproduktion untersucht. In einer begleitenden Untersuchung wurden die damit verbundenen Kosten, Energie- und Treibhausgasbilanzen sowie die Wirtschaftlichkeit dieser alternativen Nutzung des Dauergrünlands ermittelt. Grundsätzlich stellt die Nutzung des Grünlandaufwuchses in älteren und größeren Anlagen eine wirtschaftliche und ökologische Alternative zu den bisherigen Einsatzstoffen dar.

2 Einleitung

Dauergrünland wird traditionell als Weide und als Produktionsfläche für Heu und Grasilage zur Tierernährung genutzt. Außerdem zeichnet sich Dauergrünland in vielen Fällen durch eine große Artenvielfalt aus und erfüllt somit eine wichtige ökologische Funktion (ELSÄSSER 2006, RÖSCH et al. 2007, ISSELSTEIN 2010). Insbesondere diese macht die Bedeutung und die Notwendigkeit des Erhalts von Dauergrünland deutlich, was bereits politisch erkannt und in Form des Grünlanderhaltungsgebots der Europäischen Union umgesetzt wurde.

Dauergrünland in Deutschland ist in vielen Fällen anthropogen und kann nur durch regelmäßige Pflege, Beweiden oder Mähen, erhalten werden. Sinkende Tierbestände und veränderte Futterzusammensetzungen führen jedoch zu einer verminderten Nutzung des Dauergrünlands und in der Folge zu einer Veränderung der Artenzusammensetzung und eventuell auch zu einer Verbuschung des Grünlands (ISSELSTEIN 2010).

Der politisch und gesellschaftlich gebotene Erhalt des Dauergrünlands setzt also eine regelmäßige Nutzung voraus. Als Alternative zur Tierfutterproduktion bietet sich die Bereitstellung von Gras als Bioenergiequelle an (PROCHNOW et al. 2009a,b).

In einem groß angelegten Verbundvorhaben haben mehrere Landesanstalten der landwirtschaftlichen Forschung und das Leibniz-Institut für Agrartechnik Potsdam-Bornim die Eignung der Silagen von fünf Dauergrünlandtypen an sieben Standorten für die Biogasproduktion und die Auswirkung unterschiedlicher Bewirtschaftungstypen auf das Dauergrünland untersucht. Diese Arbeiten wurden durch eine ökonomische Bewertung und die Bilanzierung der Treibhausgasemissionen und der Energieflüsse ergänzt.

3 Die Standorte und Bewirtschaftungstypen

Es wurden sieben Dauergrünlandstandorte in fünf Bundesländern untersucht, welche die typischen regionalen Gegebenheiten von Wirtschaftsgrünland (in intensiver Bewirtschaftung) widerspiegeln (Tab. 1). Im Vordergrund stand dabei eine optimale und nachhaltige Ausnutzung der Flächenproduktivität.

Tab. 1: Grünlandtypen, Standorte und Standortfaktoren

Grünlandtyp	Bundesland	Standort	Standortfaktoren
Ansaat-Weidelgras	Niedersachsen	Ammerland	feucht
	Brandenburg	Niedermoor	trocken
Weidelgras-Weißklee-Weide	Brandenburg	Talsand	trocken
	Bayern	Voralpen	sehr feucht
Wiesenfuchsschwanzwiese	Sachsen	Flusstal	feucht
Glatthaferwiese	Thüringen	Ebene	sommertrocken
Montanes Intensivgrünland mit Goldhafer	Thüringen	Mittelgebirge	feucht

An jedem Standort wurden vier Nutzungsvarianten untersucht:

- 1) Standorttypische Intensität (Futter für Milchvieh) – nachhaltig optimal
- 2) Qualitätsfutterbereitstellung mit reduzierte N-Düngung und weniger Schnitten
- 3) Nutzung des Standortpotenzials mit weiter reduzierter N-Düngung
- 4) Bestandspflege zur natürlichen Regeneration mit reduzierter N-Düngung.

Neben der Düngung (Tab. 2) wurden vor allem die Schnitthäufigkeiten und Schnittzeitpunkte (Tab. 3) angepasst, um die gesteckten Ziele zu erreichen.

Tab. 2: Düngungsregime der Versuchsflächen differenziert nach Grünlandtypen und Nutzungsvarianten

Dauergrünland- Pflanzengesellschaft Standort	Nutzungs- variante	Stickstoff [kg ha ⁻¹ a ⁻¹] pro Aufwuchs						Phosphor kg ha ⁻¹ a ⁻¹	Kalium kg ha ⁻¹ a ⁻¹
		1.	2.	3.	4.	5.	Σ		
Ansaatgrünland- Weidelgras Niedersachsen	1	100	80	60	40		280	52	225
	2	100	80	40			220	52	225
	3	80	60	40			180	52	225
	4	80	80	60			220	52	225
Weidelgras- Weißklee-Weide Brandenburg (Niedermoor)	1	60	70	50	0		180	35	250
	2	60	70	0	0		130	30	220
	3	50	60	0			110	30	220
	4	60	70	0			130	30	220
Weidelgras- Weißklee-Weide Brandenburg (Talsand)	1	70	80	50	0		200	30	220
	2	70	80	0	0		150	25	200
	3	60	70	0			130	25	200
	4	70	80	0			150	25	200
Wiesenfuchs- Schwanzwiese Sachsen	1	60	60	50	40		210	35	220
	2	60	60	0	0		120	30	200
	3	60	60	0			120	30	200
	4	60	60	0			120	25	180
Glatthaferwiese Thüringen	1	60	70	50	0		180	30	220
	2	60	70	0	0		130	25	180
	3	50	60	0			110	25	180
	4	60	70	0			130	25	180
Montanes Intensivgrünland Thüringen	1	70	80	50	0		200	30	220
	2	70	80	0	0		150	25	200
	3	60	70	0			130	25	200
	4	70	80	0			150	25	200
Weidelgras- Weißklee-Weide Bayern (Allgäu)	1	60	60	60	60	60	300	44	249
	2	60	60	60	40		220	40	224
	3	40	40	60	60		200	40	224
	4	60	0	60	60		180	40	224

Tab. 3: Schnitttermine im Mittel der Versuchsjahre (2010–2013) nach Nutzungsvarianten und Aufwuchs der jeweiligen Standorte

Nutzungsvariante	1. Aufwuchs	2. Aufwuchs	3. Aufwuchs	4. Aufwuchs	5. Aufwuchs
Ansaatgrünland-Weidelgras Niedersachsen					
1	25. Mai	05. Juli	28. August	18. Oktober	
2	25. Mai	05. Juli	28. August	07. November	
3	16. Juni	20. August	14. Oktober		
4	08. Mai	16. Juli	26. September	23. Oktober	
Weidelgras-Weißklee-Weide Brandenburg (Niedermoor)					
1	11. Mai	16. Juni	29. Juli	28. September	
2	11. Mai	16. Juni	29. Juli	29. September	
3	21. Mai	02. Juli	02. September	14. Oktober	
4	08. Mai	26. Juli	01. Oktober		
Weidelgras-Weißklee-Weide Brandenburg (Talsand)					
1	10. Mai	15. Juni	29. Juli	02. Oktober	
2	10. Mai	15. Juni	29. Juli	27. September	
3	19. Mai	30. Juni	16. September	13. Oktober	
4	06. Mai	24. Juli	09. Oktober		
Wiesenfuchsschwanzwiese (Sachsen)¹⁾					
1	07. Mai	17. Juni	30. Juli	05. Oktober	
2	07. Mai	17. Juni	30. Juli	05. Oktober	
3	22. Mai	09. Juli	06. Oktober		
4	13. Juni	05. August	06. Oktober		
Glatthaferwiese (Thüringen)					
1	09. Mai	18. Juni	24. Juli	04. Oktober	
2	09. Mai	18. Juni	30. August	06. September ²⁾	
3	18. Mai	04. Juli	29. September	04. Oktober ²⁾	
4	04. Mai	15. Juli			
Montanes Intensivgrünland (Thüringen)					
1	14. Mai	23. Juni	2. August	27. September	
2	14. Mai	23. Juni	2. August	27. September	
3	23. Mai	03. Juli	18. September		
4	10. Mai	15. Juli	27. September		
Weidelgras-Weißklee-Weide Bayern (Allgäu)¹⁾					
1	08. Mai	09. Juni	14. Juli	25. August	01. Oktober
2	12. Mai	18. Juni	31. Juli	26. September	
3	24. Mai	04. Juli	25. August	01. Oktober	
4	02. Mai	15. Juli	31. August	09. Oktober	

¹⁾ Nur Versuchsjahre 2011 bis 2013.

²⁾ Geringer Abstand zum vorhergehenden Aufwuchs, da der letzte Aufwuchs nur einmal im Versuchszeitraum geerntet werden konnte.

Die Weidelgrasweiden zeigten mit 91,7 dt_{TM} ha⁻¹ bis 138,5 dt_{TM} ha⁻¹ die höchsten jährlichen Erntemengen, wobei die Ertragsmengen in Bayern höher lagen als die in Bran-

denburg oder Niedersachsen. Auf den Wiesenfuchsschwanzweiden in Sachsen konnten zwischen $73,7 \text{ dt}_{\text{TM}} \text{ ha}^{-1}$ und $91,6 \text{ dt}_{\text{TM}} \text{ ha}^{-1}$ geerntet werden. Die niedrigsten Erträge wurden in den Mittelgebirgslagen auf dem montanen Intensivgrünland ($70,1 \text{ dt}_{\text{TM}} \text{ ha}^{-1}$ bis $78,2 \text{ dt}_{\text{TM}} \text{ ha}^{-1}$) und in der Ebene Thüringens auf der Glatthaferwiese ($63,6 \text{ dt}_{\text{TM}} \text{ ha}^{-1}$ bis $80,8 \text{ dt}_{\text{TM}} \text{ ha}^{-1}$) erzielt.

4 Untersuchungen der Grünlandaufwüchse

Neben der Erhebung der Artenzusammensetzung wurden die Erntemengen und die Gutfeuchten des Ernteguts für die Standorte und Nutzungsvarianten erfasst. Das Erntegut wurde dann auf seinen Trockenmassegehalt (TM) analysiert und nach Häckseln und Anwelken für 90 Tage im Labormaßstab siliert.

Die Silagen wurden, wie bereits die Grüngutproben, einem umfassenden Analyseprogramm unterzogen. Außerdem wurden auf der Basis der Ergebnisse der Weender Futtermittelanalyse und der Verdaulichkeitsanalyse die umsetzbare Energie (ME), die Nettoenergie-Laktation (NEL) und die Gesamtenergie (GE) in $\text{MJ kg}_{\text{TM}}^{-1}$ berechnet.

Die Silagen wurden schließlich in Batchgärtests nach VDI-Richtlinie 4630 auf ihre Eignung und ihr Potenzial für die Biogasproduktion untersucht.

Die Durchführung erfolgte in 2-l-Glasflaschen bei einer Wasserbadtemperatur von $35 \text{ }^{\circ}\text{C}$ in dreifacher Wiederholung.

Die Gasvolumina der Gärversuche werden in Normliter (l_{N}), das heißt unter den Standardbedingungen ($T = 0 \text{ }^{\circ}\text{C}$, $p = 1013 \text{ hPa}$, $rH = 0$), umgerechnet. Die Methanausbeuten variierten zwischen $290 \text{ l}_{\text{N}}\text{CH}_4 \text{ kg}_{\text{O}_{\text{TM}}}^{-1}$ und $360 \text{ l}_{\text{N}}\text{CH}_4 \text{ kg}_{\text{O}_{\text{TM}}}^{-1}$, wobei die erste Nutzungsvariante tendenziell die höheren Ausbeuten erzielte und die vierte Variante die niedrigsten.

5 Bereitstellungskosten

Die Berechnung der Biomassebereitstellungskosten erfolgte auf der Grundlage des KTBL-Feldarbeitsrechners (KTBL 2014) und in Anlehnung an DEGNER (2010) und der in Tabelle 4 und Tabelle 5 getroffenen Annahmen über Arbeitsschritte, Schlaggrößen, Arbeitsgeräte und den weiteren Annahmen zu Arbeits-, Maschinen- und Direktkosten.

Für die Standorte Niedersachsen und Bayern wurde eine Schlaggröße von 2 ha und für die übrigen Standorte eine Schlaggröße von 20 ha angenommen. Es wurden jeweils 10 % Trockenmasseverluste für die Ernte und die Silierung unterstellt.

Die beiden Varianten mit den hohen Düngergaben haben grundsätzlich die höchsten Bereitstellungskosten pro Hektar und spiegeln somit die Kosten für Mineraldünger wie-

der. Die Kosten variieren von 929,25 € ha⁻¹ für die Glatthaferwiese bis zu 1.949,27 € ha⁻¹ für die Weidelgrasweide im Voralpenland. Betrachtet man die Kosten pro Tonne Trockenmasse bzw. Silage, relativieren sich diese Aussagen etwas, da jetzt auch die unterschiedlichen Erträge berücksichtigt werden. Die günstigsten Bereitstellungskosten werden in Brandenburg mit 141,66 € t⁻¹ Trockenmasse bzw. 39,52 € t⁻¹ Silage erreicht. Die höchsten Herstellungskosten verursachen die Glatthaferwiesen in Thüringen mit 234,21 € t⁻¹ Trockenmasse bzw. 73,76 € t⁻¹ Silage.

Tab. 4: Annahmen zu den Arbeitsschritten

Arbeitsschritt	Annahme	
Schlaggröße	2 ha	Standorte Niedersachsen und Bayern
	20 ha	Standorte Brandenburg, Sachsen und Thüringen
Entfernung Hof-Feld	5 km	
Abschleppen	54 kW	Schlepper
	6 m	Arbeitsbreite
Walzen	54 kW	Schlepper
	6 m	Arbeitsbreite
Mulchen	102 kW	Schlepper
	4 m	Arbeitsbreite
Gärrestausbringung, ab Hof	200 kW	Schlepper
	15 m ³	Pumptankwagen
	9 m	Schleppschlauchverteiler
Mineralische Düngung, ab Hof	67 kW	Schlepper
	1,5 m ³	Anbauschleuderstreuer
	24 m	Arbeitsbreite
	Befüllung über Düngförderschnecke	
Kalken, ab Feld	105 kW	Radlader
	2,3 m ³	Anhängeschleuderstreuer
	102 kW	Schlepper
Mähen mit Mähauflbereiter	140 kW	Schlepper
	6 m	Front-Heck-Kombination
Zetten und Wenden	102 kW	Schlepper
	12,5 m	Arbeitsbreite
Schwaden	140 kW	Schlepper
	15 m	Arbeitsbreite
Anwelkgut bergen	300 kW	selbstfahrender Feldhäcksler
	102 kW	Schlepper
	33 m ³	Häckselgutwagen
	105 kW	Radlader (13,5 t)

Sämtliche Annahmen sowie Berechnungsgrundlagen der Herstellungskosten wie Feld-Hof-Entfernung, Schlaggröße, Feld- und Silierverluste, Erntewürdigkeit der Aufwüchse, Gärrestmengen und mineralische Düngung sowie die Maschinenkombination auf den jeweiligen Grünlandstandorten wurden für die Ermittlung der Energie- und Treibhausgasbilanzen in gleicher Weise verwendet.

Tab. 5: Annahmen zu Arbeits-, Maschinen- und Direktkosten

Positionen	Einheiten	Annahmen
Nicht termingebundene Arbeiten		
Nebentätigkeit	%	50
Regiestundenzuschlag	%	20
Lohnnebenkosten	%	50
Arbeitskosten + 50 % Lohnnebenkosten	€ h ⁻¹	15,00
Leitung und Verwaltung	%	45
Siloanlage		
AfA	€ t ⁻¹	3,10
Reparaturkosten	€ t ⁻¹	0,50
Flächenkosten		
produktive Standorte	€ pro Bodenpunkt Bodenpunkte	1,90 35
naturschutzfachlich wertvolle Standorte	€ pro Bodenpunkt Bodenpunkte	1,70 25
Berufsgenossenschaft	€ ha ⁻¹	11,70
Sonstiger allgemeiner Aufwand	€ ha ⁻¹	55,00
Diesel	€ l ⁻¹	1,00
Öl	€ l ⁻¹	2,00
Bindegarn	kg t ⁻¹ € kg ⁻¹	1,75 1,80
Silofolie	m ² m ⁻³ € m ⁻² kg m ⁻²	0,50 0,50 0,14
Düngemittel		
P	€ kg ⁻¹ P	1,80
K	€ kg ⁻¹ K	0,80
N	€ kg ⁻¹ N	1,00
CaO	€ kg ⁻¹ CaO	0,05

6 Nutzungs- und Anlagenkonzepte der Biogasgewinnung

Für die Biogasgewinnung werden zwei Nutzungskonzepte gegenübergestellt. Beide Nutzungskonzepte werden in zwei Varianten unterteilt:

- A) Die Grassilage wird in bestehenden Biogasanlagen (Altanlagen) eingesetzt, was bis zu einem Anteil von 15 bis 20 % ohne zusätzliche Anpassung an die Anlagentechnik möglich ist.
- B) Die Grassilage wird in neu gebauten Biogasanlagen (Neuanlagen) genutzt, die über eine spezielle Anlagentechnik zur Grasvergärung verfügen und damit einen deutlich höheren Grasanteil im Substratmix zulassen.

Die zwei Varianten unterscheiden sich zusätzlich in der Höhe der Wärmenutzung. Dabei wurde für Altanlagen eine ausschließliche Eigenwärmeversorgung mit 25 % der produzierten Wärme und für Neuanlagen aufgrund des zugrunde gelegten Erneuerbare Energien Gesetzes (EEG) 2012 eine 60 %ige Wärmenutzung angenommen. Abzüglich des Eigenwärmebedarfs sollen 35 % der erzeugten Wärme zur Versorgung einer nahegelegenen Siedlung genutzt werden. Dafür wurde in Abhängigkeit von der Wärmemenge die Wärmenetzversorgung kalkuliert. Die grundlegenden Annahmen sind in Tabelle 6 gegenübergestellt. Weiterhin wird für die jeweilige Grünlandregion eine typische Biogas-anlagengröße angenommen:

- 500 kW_{el} in Brandenburg und Niedersachsen
- 400 kW_{el} in Thüringen und Sachsen
- 250 kW_{el} in Bayern.

Tab. 6: Annahmen zu den Nutzungskonzepten der Biogasgewinnung

Parameter	Einheit	Altanlagen EEG 2009	Neuanlagen EEG 2012
Inbetriebnahme		2009	2014
Volllaststunden des BHKW	h a ⁻¹	8.000	
Installierte Leistung (BHKW-Motor)	kW _{el}	Brandenburg, Niedersachsen: 500 (GM) Thüringen, Sachsen: 400 (GM) Bayern: 250 (ZM)	
BHKW-Motorart Wirkungsgrad (elektrisch; thermisch)	%	GM: 40; 44 ZM: 42; 40	
Eigenenergiebedarf	%	9	10,5
Substratanteil			
Rindergülle		40	40
Maissilage	%	35	20
Getreide-GPS		10	-
Grassilage		15	40
Wärmenutzung	%	25	60
Wärmeverkauf	%	-	35

GM: Gas-Otto-Motor, ZM: Zündstrahlmotor.

7 Ökonomische Bewertung

Bereitstellungskosten und Flächenprämien

Die ökonomische Bewertung der Grünlandnutzungskonzepte erfolgt anhand einer Vollkostenrechnung auf Anlagenebene inklusive Wärmeverteilung. Dazu wurden zunächst die Bereitstellungskosten von Grassilage frei Anlage ermittelt. Diese basieren auf den um eine bundeslandspezifische Flächenprämie bereinigten Herstellungskosten für Grassilage (Feld-Silo) und schließen Kosten für zusätzliche Transporte ein.

Die Nutzungskonzepte der Biogasgewinnung beinhalten keine Zwischenlagerung. Es wird davon ausgegangen, dass sich die Siloanlage aufgrund der gängigen Praxis direkt am Standort der Biogasanlage befindet und somit keine zusätzlichen Transportkosten auftreten.

Um die Konkurrenzfähigkeit der Grünlandaufwüchse gegenüber Mais auf Anlagenebene prüfen zu können, ist es sinnvoll, die auf Basis einer Vollkostenrechnung ermittelten Bereitstellungskosten frei Anlage abzüglich einer allgemeinen bundeslandspezifischen Flächenprämie zu bewerten. Gesonderte Grünlandförderungen wurden nicht berücksichtigt. Die hier getroffenen Annahmen zur Prämienhöhe (Tab. 7) berufen sich auf Schätzungen für das Jahr 2015.

Tab. 7: Durchschnittliche Betriebsgröße und geschätzte Prämienzahlung je Bundesland

Bundesland	Mittlere Betriebsgröße ¹⁾ ha	Flächenprämie 2015 ²⁾ Basisprämie + Greening € ha ⁻¹	Betriebsprämie 2015 ³⁾ € ha ⁻¹
Niedersachsen	64	278	309
Brandenburg	240	246	254
Sachsen	149	274	287
Thüringen	223	268	277
Bayern	33	275	323

¹⁾ Statistisches Bundesamt (2013).

²⁾ DBV (2013).

³⁾ Inklusive der zusätzlichen Förderung der ersten Hektar (50 € ha⁻¹ bis 30 ha; 30 € ha⁻¹ bei 31–46 ha).

Anlagenkosten

Zusätzlich zu den Bereitstellungskosten sind die Investitionen und Betriebskosten der Anlagenkonzepte für die Rentabilität von entscheidender Bedeutung. Die Wirtschaftlichkeitsberechnungen für die vorgestellten Anlagenkonzepte beruhen auf Annahmen (Tab. 8) aus Literaturwerten und Gesprächen mit Experten. In der Praxis können regionale und marktabhängige Unterschiede auftreten.

Die Varianten der Biogasgewinnung aus Grünlandaufwüchsen unterscheiden sich deutlich in den spezifischen Investitionskosten der Alt- und Neuanlagen. Dabei gründen sich die getroffenen Annahmen zum einen auf einen inflationsbedingten Kostenanstieg von jährlich 3 %. Zweitens wurde unterstellt, dass die Neuanlagen speziell für die Grasvergärung ausgelegt sind und damit um 20 % höhere Anlageninvestitionen für spezifische Anpassungen ausweisen (MATTHIAS 2010, WANK und KEYMER 2011). Als Berechnungsgrundlage wurden die Basisdaten der FNR (2013) genutzt. In den Altanlagen soll Grassilage maximal 15 % vom Substratmix ausmachen, da bis zu dieser Schwelle keine zusätzlichen Anpassungen der Anlagentechnik nötig sind (TURNER et al. 2013). Der durch den Einsatz von Gras bedingte höhere Verschleiß und Aufwand für Rührwerke und Einbringtechnik

wurde für die Altanlagen mit 3 € t FM⁻¹ entsprechend des DLG-Merkblattes 386 kalkuliert (ELSÄSSER et al. 2012). Dabei erfolgte eine Anpassung an unterschiedliche Silagequalitäten bezogen auf einen durchschnittlichen Rohfasergehalt von 8,75 % in der Frischmasse.

Tab. 8: Annahmen für die Wirtschaftlichkeitskalkulation der Biogasgewinnung

Parameter	Einheit	Altanlagen EEG 2009	Neuanlagen EEG 2012
Inbetriebnahme		2009	2014
Volllaststunden des BHKW	h a ⁻¹	8.000	
BHKW-Motorart		GM: 40; 44 ^{1),2)} ZM: 42; 40 ³⁾	
Wirkungsgrad (elektrisch; thermisch)	% _{el} ; % _{th}		
Spez. Investkosten BGA	€ kW _{el} ⁻¹	3.900 ^{1),2)} bzw. 5.200 ³⁾ 5.400 ^{1),2)} bzw. 7.200 ³⁾	
Investkosten Wärmenetz inkl. MAP			
Wärmenetz	€ m ⁻¹		190
Wärmeverteilung	€ Stück ⁻¹		1.200
Wärmenetzverluste	%		14
Zinssatz	%	4	
Nutzungsdauer			
BGA	a	15	15
Wärmenetz			30
Reparatur und Wartung ⁴⁾			
Bauteile	%	4 ⁵⁾	4 ⁵⁾
Technik, inkl. BHKW		1 ⁵⁾	1 ⁵⁾
Wärmenetz			1
Versicherung, Sonstiges (inkl. Labor) ⁴⁾	%	2	
Eigenenergiebedarf ⁶⁾	%	9	10,5
Strompreis	€ kWh ⁻¹	0,16	0,16
Arbeitszeitbedarf	AKh kW _{el} ⁻¹	4,05 ¹⁾ bzw. 4,3 ²⁾ bzw. 4,8 ³⁾	
Arbeitslohn	€ h ⁻¹	15	
Zündöl			
Verbrauch	%	5	
Preis (ZM)	€ l ⁻¹	0,70	
Substratkosten			
Rindergülle		4,5	
Maissilage	€ t FM ⁻¹	40	
Getreide-GPS		45	
Grassilage		Bereitstellungskosten	
Methanausbeute			
Rindergülle		17	
Maissilage	m _N ³ t FM ⁻¹	106	
Getreide GPS		103	
Grassilage		Versuchsdaten	

GM: Gas-Otto-Motor, ZM: Zündstrahlmotor

1) Für 500-kW-Anlagen.

2) Für 400-kW-Anlagen.

3) Für 250-kW-Anlagen.

4) Bezogen auf die jeweilige Investition.

5) Investitionskosten für Biogasanlage: 55 % Gebäude und Bauteile, 45 % technische Ausrüstung.

6) Bezogen auf gewonnene und eingespeiste Strommenge.

Erlöse

Die Erlöse für Strom ergeben sich aus den Vergütungssätzen des jeweils zugrunde gelegten EEG 2012 für Biogas (Tab. 9) sowie EEG 2009 für Biogas (Tab. 10).

Tab. 9: Ausgewählte Vergütungssätze für Strom aus Biogas nach dem EEG 2012 (ct kWh_{el}⁻¹) für das Inbetriebnahmejahr 2014

	Bis 150 kW	Bis 500 kW	Bis 750 kW	Bis 5 MW
Grundvergütung	13,73	11,81	10,56	10,56
Einsatzstoffvergütungsklasse I Holz (BiomasseVO-Anlage 2)	2,50	2,50	2,50	2,50
Einsatzstoffvergütungsklasse II Heu (BiomasseVO-Anlage 3)	8,00	8,00	8,00	8,00
Einsatzstoffvergütungsklasse I NawaRo-Mix(BiomasseVO-Anlage 2)	6,00	6,00	5,00	4,00
Einsatzstoffvergütungsklasse II Gülle (BiomasseVO-Anlage 3)	8,00	8,00	6,00	6,00

Die Wärmepreise von erneuerbaren Energien stehen in direkter Konkurrenz mit aktuellen Marktpreisen für Wärme. Der Wärmepreis für KWK-Anlagen wurde auf 7,5 ct kWh_{th}⁻¹ festgesetzt (Stand Dezember 2013).

Tab. 10: Ausgewählte Vergütungssätze für Strom aus Biogas nach dem EEG 2009 (ct kWh_{el}⁻¹) für das Inbetriebnahmejahr 2009

	Bis 150 kW	Bis 500 kW	Bis 5 MW
Grundvergütung	11,67	9,18	8,25
NawaRo-Bonus	7	7	4
Gülle-Bonus	4	1	-

Für Altanlagen können Stromgestehungskosten von 18,1 ct kWh⁻¹ bis 20,9 ct kWh⁻¹ errechnet werden. Dies liegt knapp oberhalb bis knapp unterhalb der ausgewiesenen EEG-Vergütung, wobei mit zunehmender Anlagengröße die Bedingungen insgesamt besser werden. Für Neuanlagen (nach EEG 2012) ist der Einsatz von Grassilage nicht rentabel. Lediglich für Anlagen von mindestens 500 kW_{el} kann ein positives Ergebnis erzielt werden. Die Stromgestehungskosten inkl. der Wärmegutschriften liegen zwischen 17,8 ct kWh⁻¹ und 23,3 ct kWh⁻¹. Die Erlöse nach EEG 2012 variieren von 18,6 ct kWh⁻¹ bis 19,3 ct kWh⁻¹. Um ein positives Ergebnis zu realisieren, müsste der Wärmeverkauf Preise von 11,3 ct kWh⁻¹ bis 19,4 ct kWh⁻¹ erzielen.

8 Energie- und Treibhausgasbilanzen

Allgemeine Annahmen

Vor dem Hintergrund begrenzt verfügbarer landwirtschaftlicher Nutzflächen sind die flächenbezogenen Einsparungen an Treibhausgasen sowie der Nettoenergieertrag relevante Kenngrößen. Für die Bewertung der Grünlandstandorte wurde der Hektar als funktionelle Einheit gewählt. Dies ermöglicht eine bessere Vergleichbarkeit des Flächenbedarfs der Nutzungsvarianten, der für die Energiebereitstellung notwendig ist. Die Bewertung basiert auf der Sachbilanz der Stoff- und Energieflüsse der gesamten Verfahrensketten wie in der ökonomischen Bewertung.

Die direkten und indirekten Lachgasemissionen, die durch die Ausbringung von mineralischen oder organischen Stickstoffdüngern sowie den Verbleib von stickstoffhaltigen Ernteresten entstehen, wurden nach den Vorgaben der Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)-Richtlinien berechnet (IPCC 2006). Die Treibhausgaspotenziale von Lachgas und Methan über einen Zeithorizont von 100 Jahren (GWP-100) gingen entsprechend IPCC (2007) mit $298 \text{ kg CO}_{2\text{eq}} \text{ kg}^{-1}$ (Lachgas) und $25 \text{ kg CO}_{2\text{eq}} \text{ kg}^{-1}$ (Methan) in die Berechnungen ein.

Weiterhin wurden der Verbrauch an Betriebsmitteln (Diesel, Öl, Strom, Maschinenverbrauch, Folie, Düngemittel) sowie Emissionen und Energieaufwand der Energieanlagen kalkuliert. Dabei wurde der Dieselbedarf auf Grundlage der modellierten Maschinenketten unter Anwendung der KTBL-Online-Datenbank „Feldarbeitsrechner“ bestimmt (KTBL 2014). Der Schmierölbedarf wurde mit 1 % des Dieselbedarfs angenommen. Für alle eingesetzten Maschinen wurde gemäß ihrer Lebenszeit, ihrem Gewicht und ihrer Einsatzintensität ein virtueller Substanzverlust berechnet, wobei die Massen der Maschinen den KTBL-Datensammlungen 2006 und 2004 entnommen wurden. Infrastrukturelle Aufwendungen wie der Bau der Energieanlagen, Siloanlagen oder sonstiger baulicher Anlagen fanden in Anlehnung an das Methodenhandbuch „Stoffstromorientierte Bilanzierung der Klimagaseffekte“ (THRÄN et al. 2011) keine Berücksichtigung.

Gutschriften wurden für die Einsparung von fossiler Energie sowie für die Einsparung von mineralischem Dünger erteilt. Die Emissionsfaktoren für fossilen Strom und Wärme wurden entsprechend den Angaben des Umweltbundesamtes (UBA) separat für feste Biomasse und Biogas berechnet, da die erneuerbaren Energien fossile Rohstoffe in unterschiedlichem Maße substituieren. Als Substitutionsfaktoren wurden $818 \text{ g CO}_{2\text{eq}} \text{ kWh}_{\text{el}}^{-1}$ und $338 \text{ g CO}_{2\text{eq}} \text{ kWh}_{\text{th}}^{-1}$ für feste Biomasse und $824 \text{ g CO}_{2\text{eq}} \text{ kWh}_{\text{el}}^{-1}$ und $312 \text{ g CO}_{2\text{eq}} \text{ kWh}_{\text{th}}^{-1}$ für Biogas ermittelt (berechnet nach UBA 2013 und GEMIS 2012).

Laut Informationen des UBA 2013 substituierte feste Biomasse im Jahr 2012 die Stromerzeugung aus Braunkohle zu 2,7 %, aus Steinkohle zu 74,5 % und aus Erdgas zu 22,8 %. Biogas substituierte die Stromerzeugung aus Braunkohle zu 2,8 %, aus Stein-

kohle zu 75,4 % und aus Erdgas zu 21,9 %. Die Emissionsfaktoren (inkl. Vorketten) dieser fossilen Energieträger wurden dabei mit 1080,1 g CO_{2eq} kWh_{th}⁻¹ für Braunkohle, 922,9 g CO_{2eq} kWh_{th}⁻¹ für Steinkohle und 445,6 g CO_{2eq} kWh_{th}⁻¹ für Erdgas angegeben.

Die Wärmebereitstellung aus fester Biomasse ersetzte im Jahr 2012 zu 65 % Erdöl, zu 20 % Erdgas, zu 2 % Steinkohle, zu 3 % Braunkohle und zu 10 % die Stromheizung. Die Emissionsfaktoren (inkl. Vorketten) dieser fossilen Energieträger wurden dabei mit 314,4 g CO_{2eq} kWh_{th}⁻¹ für Erdöl, 248,1 g CO_{2eq} kWh_{th}⁻¹ für Erdgas, 419,1 g CO_{2eq} kWh_{th}⁻¹ für Steinkohle, 428,7 g CO_{2eq} kWh_{th}⁻¹ für Braunkohle und 626,1 g CO_{2eq} kWh_{th}⁻¹ für die Stromheizung angegeben.

Die Wärmebereitstellung aus Biogas substituierte hingegen zu 59 % Erdöl, zu 36,4 % Erdgas und zu 4,6 % Steinkohle. Die Emissionsfaktoren (inkl. Vorketten) dieser fossilen Energieträger wurden dabei mit 343,4 g CO_{2eq} kWh_{th}⁻¹ für Erdöl, 248 g CO_{2eq} kWh_{th}⁻¹ für Erdgas und 413,5 g CO_{2eq} kWh_{th}⁻¹ für Steinkohle angegeben.

Ausschlaggebend für die Berechnungen sind die zugrunde gelegten Energie- und Emissionsfaktoren für die einzelnen Energieträger und Betriebsmittel inklusive Vorkette (Tab. 11).

Tab. 11: Energie- und Emissionsfaktoren der Energieträger und Betriebsmittel inklusive Vorketten (GEMIS 2012, Meyer-Aurich 2005)

Energieträger und Betriebsmittel	Energiefaktor	Emissionsfaktor
Diesel	41,12 MJ l ⁻¹	2,85 kg CO _{2eq} l ⁻¹
Öl	41,12 MJ l ⁻¹	2,85 kg CO _{2eq} l ⁻¹
Maschinen ¹⁾	80,00 MJ kg ⁻¹	8,00 kg CO _{2eq} kg ⁻¹
Kalk	2,58 MJ kg ⁻¹	0,31 kg CO _{2eq} kg ⁻¹
K-Dünger	19,39 MJ kg ⁻¹	1,20 kg CO _{2eq} kg ⁻¹
N-Dünger	51,57 MJ kg ⁻¹	7,56 kg CO _{2eq} kg ⁻¹
P-Dünger	18,38 MJ kg ⁻¹	1,25 kg CO _{2eq} kg ⁻¹
Silofolie	81,24 MJ kg ⁻¹	2,50 kg CO _{2eq} kg ⁻¹
Deutscher Strommix	8,23 MJ kWh _{el} ⁻¹	0,58 kg CO _{2eq} kWh ⁻¹

¹⁾ Meyer-Aurich (2005).

Die Verfahrenskette der Biogaserzeugung umfasst die Bereitstellung der Grassilage inklusive Silierung, das Beladen der Biogasanlage sowie die Konversion in Strom bzw. Strom und Wärmeenergie. Die Höhe der Feldverluste wurde auf 10 % der Trockenmasse festgelegt. Aufwüchse mit einem Trockenmasseertrag unter 10 dt ha¹ wurden als nicht erntewürdig eingeschätzt und für die Modellierung als gemulcht angenommen. Die Düngemengen sollen zum Großteil über Gärrestdüngung sichergestellt werden. Die maximale Ausbringungsmenge wurde dafür anhand der Nährstoffgehalte im Gärrest für den jeweiligen Substratmix der Biogasanlagen berechnet. Ergänzend zur Gärrestdüngung erfolgt

eine Mineraldüngung zur Abdeckung der fehlenden Nährstoffmengen. Gutschriften für die Mineraldüngereinsparungen durch eine Wiederausbringung des Gärrestes wurden für NPK anhand der Inhaltsstoffanalysedaten der Grassilagen durchgeführt, wobei für die Stickstoffdüngung über Gärrest ein Mineraldüngeräquivalent von 60 % (BAUMGÄRTEL und BEHNKE 2013) angenommen wurde.

Die Silierung der Grünlandaufwüchse erfolgt gemäß der gängigen Praxis in einem Flachsilo mit Folienabdeckung direkt am Standort der Biogasanlage. Die Silierverluste wurden mit 10 % der Trockenmasse angenommen. Die spezifische Masse der Silofolie wurde mit 460 g m^{-2} Multisilofolie (Nutzungsdauer 5 Jahre) und 40 g m^{-2} Unterziehfolie festgelegt (NUSSBAUM 2007). Bei einer Folienabdeckung von $0,5 \text{ m}^2 \text{ m}^{-3}$ ergibt sich somit ein jährlicher Folienbedarf von 70 g m^{-3} . Je Tonne Grassilage wurde ein Arbeitszeitbedarf für das Befüllen der Anlage mit Radlader (Motornennleistung 83 kW, Fassungsvermögen 2 m^3) von 4,6 Minuten angenommen (KTBL 2014).

In Abhängigkeit von der standortspezifischen Anlagengröße wurde die BHKW-Bauart, Otto-Gas-Motor (400 kW und 500 kW) und Zündöl-Motor (250 kW) festgelegt. Für die Biogasanlagen mit Otto-Gas-Motoren wurden ein elektrischer Wirkungsgrad von 40 % und ein thermischer Wirkungsgrad von 44 % angenommen. Bei kleinen Biogasanlagen (250 kW) der BHKW-Bauart Zündöl-Motor wurden ein elektrischer Wirkungsgrad von 42 % und ein thermischer Wirkungsgrad von 40 % sowie ein Zündölanteil von 5 % angesetzt. Der Methanschluß wurde einheitlich auf 1 % der Methanproduktion festgesetzt. Für die Bereitstellung von Wärme beim Endverbraucher wurden Wärmenetzverluste von 14 % angesetzt.

Aufgrund des modellierten Grasanteils wurde ein spezifischer Eigenstromverbrauch von 9 % für Altanlagen (15 % Grassilage) und 10,5 % für Neuanlagen (40 % Grassilage) festgelegt. In den Altanlagen wurde eine Anpassung des Eigenstromverbrauchs für unterschiedliche Qualitäten bezogen auf die Rohfasergehalte der Grassilagen modelliert. Hierzu wurde die Annahme getroffen, dass 50 % der zusätzlichen Anlagenkosten (DLG-Merkblatt 386) für die Grassilierung ($1,5 \text{ € t FM}^{-1}$, bei 16 ct kWh^{-1}) dem Strombedarf zuzuordnen sind. Der mittlere Rohfasergehalt der Grassilagen wurde hierzu mit 8,75 % der FM angenommen.

Die Berechnungen wurden für jeden Schnitt und jedes Jahr mit den mittleren Ertrags- und Analysedaten durchgeführt und anschließend über die jeweilige Variante aufsummiert und über die Versuchsjahre gemittelt.

Einfluss ausgewählter Landnutzungs-Referenzsysteme

Im Rahmen der Treibhausgasbilanzierung wurden neben der potenziellen Einsparung von fossilen Rohstoffen auch die Einflüsse von direkten Landnutzungsänderungen (LUC) untersucht, die nicht in Konkurrenz zur Tierhaltung stehen.

Als Referenznutzung der produktiven Grünlandtypen sind weder Mulchen noch die Kompostierung geeignet. Die rückläufigen Milchviehbestände lassen zwar freie Grünlandflächen erwarten, dies ist jedoch eher mit einem Rückgang der Intensität der Flächenbewirtschaftung verbunden als mit einer generellen Nichtnutzung dieser Flächen. Um Grassilage für die Biogasgewinnung bereitzustellen, müssen demnach produktive Standorte durch eine optimale und nachhaltige Bewirtschaftung wieder intensiviert werden. Als Ausgangssituation wurde aufgrund der projektspezifischen Versuchsdaten ein Anteil der Grassilage in der Futtermischung von Milchviehbeständen der Variante 4 (Bestandspflege) unterstellt. Um Grünlandfläche für die Biogasproduktion freizusetzen, sollte eine nachhaltige Intensivierung der Standorte von der Variante 4 auf die Variante 1 erfolgen. Der Intensivierungsbedarf am jeweiligen Standort, d. h., wie viel Fläche muss intensiviert werden, um einen Hektar für die Biogasproduktion freizusetzen und die gleiche Futterenergie für die vorhandene Tierzahl bereitzustellen, wurde über die Differenz im Nettoenergieertrag (MJ NEL ha^{-1}) der beiden Varianten berechnet. Aufwüchse mit einer Nettoenergie-Laktation unter $5 \text{ MJ NEL kg TM}^{-1}$ werden nur zur Hälfte durch die Tiere verwertet. Die Treibhausgasemissionen ergeben sich aus der Differenz der Aufwendungen bzw. Emissionen für die jeweilige Flächenbewirtschaftung und dem Hektarbedarf.

Die Nutzungsvarianten mit reduzierter Düngung haben eindeutige Vorteile in der Energie- und Treibhausgasbilanz bei der Nutzung des Aufwuchses für die Biogasproduktion. Bei den Nutzungsvarianten 1 und 2 gehen relativ hohe Energieverbräuche und Treibhausgasemissionen durch die Düngerproduktion in die Bilanz ein. In den günstigsten Fällen können in Altanlagen $656 \text{ g CO}_{2\text{eq}} \text{ kWh}^{-1}$ Strom und in Neuanlagen $774 \text{ g CO}_{2\text{eq}} \text{ kWh}^{-1}$ Strom eingespart werden. Das Einsparpotenzial der Neuanlagen ist aufgrund der Wärmegutschrift immer höher als in der vergleichbaren Altanlage ohne Wärmenutzung. Wird jedoch die Referenznutzung „Intensivierung“ berücksichtigt, ergeben sich für ertragsschwache Standorte erhebliche Nachteile und aus den Einsparungen von Treibhausgasemissionen können netto Treibhausgasemissionen freigesetzt werden.

9 Fazit

Grundsätzlich ist der Aufwuchs von Dauergrünland für die Nutzung als Einsatzstoff in Biogasanlagen geeignet. Die ökonomische und ökologische Bewertung führt teilweise zu widersprüchlichen Vorzugsvarianten. So ist wirtschaftlich häufig die Nutzungsvariante 4 günstig, während aus Sicht der Treibhausgas- und Energiebilanz die Variante 3 bevorzugt ist. Lediglich im montanen Intensivgrünland (Thüringen) stimmen alle Bewertungen in der Variante 3 überein. Auch für die Frage, ob der Einsatz in Altanlagen oder Neuanlagen sinnvoller ist, ergibt sich ein grundsätzlicher Unterschied zwischen der öko-

nomischen und der ökologischen Bewertung. Aus ökonomischer Sicht ist der Einsatz in Altanlagen und aus Umweltsicht in Neuanlagen sinnvoll.

Da jedoch mit der Novellierung des EEG 2014 der Bau von Neuanlagen und Betrieb mit Energiepflanzen unwirtschaftlich geworden ist, bleibt ohnehin nur noch der Einsatz von Grassilage in Altanlagen nach EEG 2009 als machbar übrig. Es sei denn, die gesellschaftlichen Forderungen nach Dauergrünlanderhalt und Energiewende werden entsprechend monetär von der Gesellschaft unterstützt.

Literatur

- Baumgärtel, G.; Behnke, M. (2013): Mindestwerte für die Wirkung des Stickstoffs in organischen Nährstoffträgern. LWK-Niedersachsen, <http://www.lwk-niedersachsen.de/index.cfm/portal/2/nav/341/article/15868.html>
- Degner, J. (2010): Betriebswirtschaftliche Richtwerte für die Produktion von Silage, Heu und Weidefutter aus Feldgras (zur Fütterung). Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft, Jena, <http://www.tll.de/ainfo/pdf/fgfr0710.pdf>
- Elsäßer, M. (2006): Nichtproduktionsfunktionen von Dauergrünland. In: Büchs, W. (Hrsg.): Möglichkeiten und Grenzen der Ökologisierung der Landwirtschaft – wissenschaftliche Grundlagen und praktische Erfahrungen – Beiträge aus dem Arbeitskreis „Agrarökologie“, Mitteilungen aus der Biologischen Bundesanstalt für Land- und Forstwirtschaft Berlin-Dahlem 403, S. 81-89
- Elsäßer, M.; Messner, J.; Keymer, U.; Rossberg, R.; Setzer, F. (2012): Biogas aus Gras – Wie Grünlandaufwüchse zur Energieerzeugung beitragen können. DLG Merkblatt 386
- FNR (2013): Basisdaten Bioenergie Deutschland 2013 – Festbrennstoffe Biokraftstoffe Biogas. <http://mediathek.fnr.de/broschueren/bioenergie/basisdaten-bioenergie.html>
- GEMIS (2012): Globales Emissions-Modell integrierter Systeme. Version 4.8, Öko-Institut/IINAS, Darmstadt
- IPCC (2006): Agriculture, forestry and other land use. In: IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Vol. 4, Chap. 11, IGES, Japan
- IPCC (2007): Climate Change 2007: The Physical Science Basis, Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge
- Isselstein, J. (2010): Ökosystemfunktionen des Grünlands. In: Landschaftselement oder Rohstofflieferant – zur Multifunktionalität des Grünlandes, VDLUFA-Schriftenreihe Band 66/2010, VDLUFA-Verlag, Darmstadt
- KTBL (2014): KTBL-Feldarbeitsrechner, <http://daten.ktbl.de/feldarbeit/home.html>
- Matthias, J. (2010): Ansprüche an die Biogasanlage beim Einsatz von Alternativen zu Mais. In: Biogas – Alternativen zu Mais, <http://www.duesse.de/znr/pdfs/2010/2010-05-26-energiepflanzen-07.pdf>
- Meyer-Aurich, A. (2005): Economic and environmental analysis of sustainable farming practices – a Bavarian case study. *Agricultural Systems* 86, p. 190-206

- Nussbaum, H. (2007): Technische Verfahrenslösungen für die Futterernte – Clever einsilieren ins Fahrсило. In: Futterernte auf dem Grünland – Technik für Qualität und Leistung, Arnstadt, DLG, S. 45-49, <https://www.dlg.org/fileadmin/downloads/dates/gruenland/Gruenlandtagung07.pdf>
- Prochnow, A.; Heiermann, M.; Plöchl, M.; Amon, T.; Hobbs, P. (2009a): Bioenergy from permanent grassland – A review: II. Combustion. *Bioresource Technology* 100, 4945-4954, doi:10.1016/j.biortech.2009.05.069
- Prochnow, A.; Heiermann, M.; Plöchl, M.; Linke, B.; Idler, C.; Amon, T.; Hobbs, P. (2009b): Bioenergy from permanent grassland – A review: I. Biogas. *Bioresource Technology* 100, p. 4931-4944, doi:10.1016/j.biortech.2009.05.070
- Rösch, C.; Raab, K.; Skarka, J. und Stelzer, V. (2007): Energie aus dem Grünland – eine nachhaltige Entwicklung? Forschungszentrum Karlsruhe in der Helmholtz-Gemeinschaft, Wissenschaftliche Berichte FZKA 7333, <http://www.itsas.kit.edu/pub/v/2007/roua07b.pdf>
- Thrän, D.; Fischer, E.; Fritsche, U.; Hennenberg, K.; Herrmann, A.; Oehmichen, K.; Pfeiffer, D.; Schersahl, R.; Schröder, T.; Zeller, V.; Zeymer, M. (2011): Methodenhandbuch „Stoffstromorientierte Bilanzierung der Klimagaseffekte“. Schriftenreihe des BMU-Förderprogramms „Energetische Biomassenutzung“, Band 4, DBFZ, Leipzig
- Turner, S.; Konrad, M.; Strobl, M. (2013): Substratbereitstellung von Grünland aus verfahrenstechnischer Sicht. *Biogas Forum Bayern Nr. II – 21/2013*, http://www.biogas-forum-bayern.de/publikationen/Substratbereitstellung_von_Gruenland.pdf
- UBA (2013): Emissionsbilanz erneuerbarer Energieträger – Bestimmung der vermiedenen Emissionen im Jahr 2012. Umweltbundesamt CLIMATE CHANGE 15/2013, <http://www.umweltbundesamt.de/publikationen/emissionsbilanz-erneuerbarer-energetraeger-2012>
- Wank, S.; Keymer, U. (2011): Betriebswirtschaftliche Bewertung. In: Nutzung von Grünland zur Biogaserzeugung – Machbarkeitsstudie, LfL-Schriftenreihe 4/2011, S. 137-170

Danksagung

Das Projekt GNUT wurde mit Mitteln des BMEL über die FNR gefördert. Dank auch an alle zusätzlich beteiligten Partner, die landwirtschaftlichen Landeseinrichtungen in Bayern, Sachsen, Niedersachsen sowie den Deutschen Grünlandverband.

Ansaat von artenreichen Wildpflanzenmischungen für die Biogasproduktion

MARTIN DEGENBECK

1 Einführung

Der Strukturwandel in der Landwirtschaft führt zu immer größeren Ackerschlägen, wodurch die für die Tierwelt so wertvollen Randstrukturen immer weniger werden. Zudem ist seit einigen Jahren im Rahmen der Energiewende eine starke Zunahme der Biogasanlagen in Deutschland zu beobachten; damit ist ein Intensivierungsschub in der Landwirtschaft verbunden, einhergehend mit einem steigenden Flächenanteil ertragreicher Energiepflanzen, vor allem Mais, und einer weiteren Abnahme der Strukturvielfalt in der Feldflur. Darunter leiden die Wildtiere der Agrarlandschaft wie z. B. Feldhase und Rebhuhn ebenso wie zahlreiche Vogelarten und Insekten. Ein besonderes Problem für die Honigbiene ist der Mangel an Blütentracht im Sommer.

Darüber hinaus stehen dem großflächigen Anbau von Biogasmais große Teile der Bevölkerung kritisch gegenüber, was dem Ansehen der Landwirtschaft insgesamt abträglich ist.



Abb. 1: Artenreiche, mehrjährige Wildpflanzenmischungen (WPM), hier im 1. Standjahr auf einer Praxisfläche in Niedersachsen, sind eine sinnvolle Ergänzung zum Biogasmais (Quelle: Vollrath)

Es ist deshalb nach Kompromissen zu suchen, die einerseits eine ökonomische Biogasproduktion ermöglichen, andererseits den Tieren der Agrarlandschaft noch attraktive Lebensräume bieten und außerdem zu einem positiven Image des Landwirts beitragen.

2 Vorarbeiten der Bayerischen Landesanstalt für Weinbau und Gartenbau (LWG) zu Blümmischungen

Seit Ende der 1990er-Jahre arbeitet die Bayerische Landesanstalt für Weinbau und Gartenbau Veitshöchheim (LWG) im Auftrag des Bayerischen Landwirtschaftsministeriums an der Entwicklung von „wildtierfreundlichen“ artenreichen Saatmischungen aus ein- und mehrjährigen Wild- und Kulturpflanzenarten. Für verschiedene Zwecke wurden im Rahmen mehrerer drittmittelfinanzierter Forschungsvorhaben „Blümmischungen“ zusammengestellt, aus pflanzenbaulicher und ökologischer Sicht erprobt bzw. bewertet und laufend weiterentwickelt (KUHN 2002, MARZINI und KUHN 2002, DEGENBECK 2005 und 2007). Die verbreitetste Mischung ist „Lebensraum 1“. Bekannt ist weiterhin die Mischung „Veitshöchheimer Bienenweide“.

Im Wesentlichen wurden diese vornehmlich nach ökologischen Kriterien konzipierten Blümmischungen auf vorübergehend stillgelegten Ackerflächen angesät. Sie enthalten allerdings zahlreiche Arten, die ein hohes Biomassepotenzial aufweisen. So entstand nach dem Wegfall der Stilllegungsverpflichtung der Gedanke, die Blümmischungen in Richtung Biogasnutzung weiterzuentwickeln.

3 „Energie aus Wildpflanzen“ im Überblick

Das Projekt „Energie aus Wildpflanzen“ wurde seit Juli 2008 vom Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL) aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert; Projektträger war die Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR). Von 2012 bis Mai 2015 lief die Projektphase II. Die Projektleitung lag bei der LWG; Sachbearbeiter waren Dr. Birgit Vollrath, Antje Werner, Kornelia Marzini, Dominik Kretzer, Dr. Ingrid Illies (Bienen) und Dr. Manfred Klemisch (Boden). Projektpartner waren die Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL), das Technologie- und Förderzentrum im Kompetenzzentrum für Nachwachsende Rohstoffe (TFZ), das Bundessortenamt (BSA), die Landwirtschaftskammer Niedersachsen und Saaten Zeller.

Seit 2011 fördert auch das Bayerische Staatsministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten (BayStMELF) die Forschungsarbeiten der LWG zur Thematik:

- Ringversuch zusammen mit der LfL und dem TFZ an 8 Standorten mit der Biogastestmischung (heimisch) zur Optimierung der Kulturführung und zur Prüfung der Siliereigenschaften (Januar 2011 bis März 2014, verlängert bis März 2017)
- Wildbiologische Begleituntersuchungen (Feldhase, Rebhuhn, Reh u. a.) an drei Standorten, zwei im Landkreis Würzburg, einer im Landkreis Straubing-Bogen (2011–2013)
- Wildbiologische Begleituntersuchungen im Winterhalbjahr an zwei Standorten (2014–2015).

Das Ziel der Forschungsarbeiten ist nicht, eine ökonomisch gleichwertige Alternative zum Mais zu entwickeln, sondern für verschiedene Standorte gute Ergänzungen zu den Hauptenergiekulturen anbieten zu können, es geht also um einen Kompromiss zwischen Ökonomie und Ökologie bei der Energiepflanzenproduktion für die Biogasnutzung (KUHNS und VOLLRATH 2010).

4 Vorgehensweise

Zunächst erfolgte eine Vorauswahl von Arten mit hohem Biomassepotenzial und möglichst später Blüte, damit die Ernte außerhalb der Brut- und Setzzeiten der Wildtiere erfolgen kann. Zur Vermeidung von Auswilderungen bzw. Einkreuzungen wurde diese Liste mit Vertretern des floristischen Artenschutzes unter Beteiligung des Bundesamtes für Naturschutz (BfN) diskutiert und abgestimmt. Dann wurden daraus passende Mischungen aus Arten zusammengestellt, die sich voraussichtlich gut kultivieren lassen. Zum Schutz der Wildtiere ist ein möglichst später Erntetermin wünschenswert, weshalb auch nicht-heimische, insbesondere nordamerikanische Arten getestet werden.

Es verblieben letztendlich ca. 40 Arten, die in Varianten an mehreren Standorten in Bayern, Niedersachsen und Brandenburg im Parzellenversuch getestet werden. Weitere ca. 40 Arten, über deren Eignung noch Unklarheiten bestanden, befinden sich in der Artensichtung an der LWG, beim BSA und bei Saaten Zeller; sie werden weiter beobachtet und untersucht.

Die Wildpflanzenmischungen (WPM) bestehen jeweils aus ca. 15–25 sich ergänzenden Arten; einige bieten Nektar und Pollen für Bienen und weitere Insekten, andere sind für den Ertrag ausschlaggebend. Es wurden zum einen Mischungen nur mit heimischen Stauden entwickelt, zum anderen auch WPM mit fremdländischen Arten. In beiden Fällen testet die LWG Varianten für trockenere und frische Standorte, welche anhand der gewonnenen Ergebnisse laufend weiterentwickelt werden. Auch die Bestandsgründung als Untersaat verschiedener Deckfrüchte (Mais, Sommergerste) befindet sich in der Erprobung. Mit dem Erntematerial werden Gärversuche (Batchtests) durchgeführt, um den Methanertrag zu ermitteln und diesen mit Mais vergleichen zu können.

Um Erfahrungen im praktischen Umgang mit den Biogasmischungen zu sammeln, bis hin zu Verwertungsversuchen in Biogasanlagen, wurden ab 2009 Praxisflächen mit einer Testmischung angelegt, welche von Landwirten mit Standardtechnik bewirtschaftet werden. Bis 2014 sind bereits rund 1.500 ha bundesweit angesät worden. Derzeit sind über 100 Landwirte aus ganz Deutschland beteiligt. Für die Praxisversuche wird bislang nur eine relativ weit entwickelte Mischung mit heimischen Stauden verwendet. Ergänzend führt die LWG im Rahmen des FNR-Projektes seit 2012 Bodenanalysen durch, um Erkenntnisse zur Nährstoff- und Humusbilanz zu gewinnen.

Die faunistischen Begleituntersuchungen obliegen in Unterfranken dem Landesbund für Vogelschutz (LBV; Vögel und Fledermäuse) sowie der Ökologischen Arbeitsgemeinschaft Würzburg (ÖAW; Spinnen, Insekten, Laufkäfer und andere Kleintiere). Hinzu kommen bienenkundliche Versuche durch das Fachzentrum Bienen der LWG. Die wildbiologischen Begleituntersuchungen führten Dr. Jörg Tillmann und Heike Böhme von der Tierärztlichen Hochschule Hannover durch. 2012 begannen in Kyritz (Brandenburg) Vogeluntersuchungen durch Dr. Krista Dziewiaty im Auftrag der LWG auf mehreren jeweils 5 ha großen Schlägen mit der Wildpflanzenmischung, zum Teil als Maisuntersaat.

5 Ergebnisse

5.1 Erntezeitpunkt

Bei den artenreichen Mischungen galt es zunächst, einen geeigneten Erntezeitpunkt zu finden. Die laufenden Bestimmungen der Trockenmasse ergaben, dass im ersten Standjahr am besten ab Ende August bis Ende September geerntet wird, ab dem zweiten Standjahr bei den Mischungen mit heimischen Stauden ab Mitte Juli bis August, bei jenen mit erweitertem Herkunftsspektrum (nicht-heimische Arten) ab Ende August bis Anfang Oktober.

In der Praxis orientiert sich der Bauer am Entwicklungszustand der ertragsbildenden Arten (Steinklee, Rainfarn, Beifuß, Schwarze Flockenblume usw.). Zur Hauptblüte des Rainfarns bzw. kurz danach ist die Ernte fällig.

5.2 Erträge

Im ersten Standjahr variierten die Trockenmasseerträge noch stark und erreichten im Mittel 40 % des Maisertrags. Eher lockere einjährige Bestände mit vergleichsweise niedrigen Erträgen erzielten im folgenden Nutzungsjahr häufig höhere Erträge. Einige sehr ertragreiche einjährige Bestände mit hoher Sonnenblumendeckung verzeichneten dagegen niedrigere Erträge im Folgejahr. Wie auch bei den Maisuntersaaten festgestellt worden ist, kann eine sehr dichte Deckfrucht die Entwicklung der zwei- und mehrjährigen

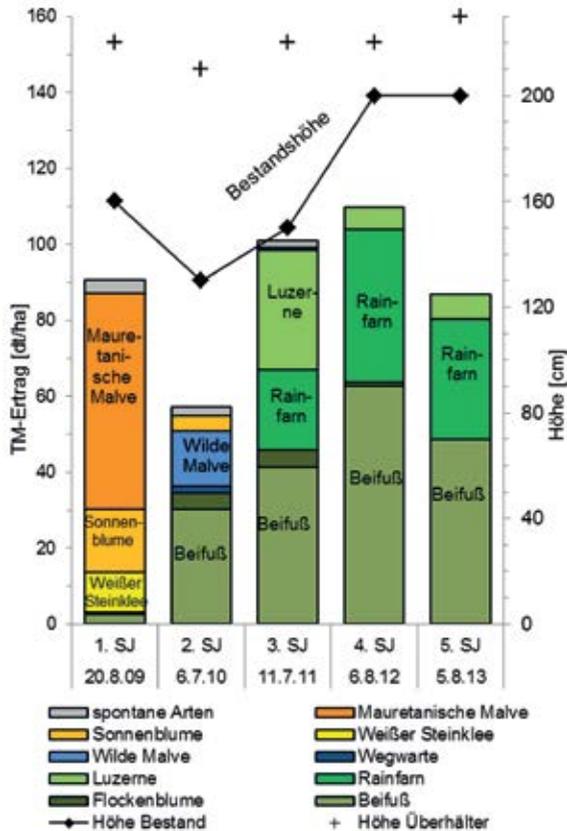


Abb. 2: Entwicklung der ertragsbildenden Arten der Wildpflanzenmischung in einer 2009 angesäten Praxisfläche in Güntersleben (TM = Trockenmasse, SJ = Standjahr)

Arten negativ beeinflussen, was einen Ertragseinbruch im nächsten Jahr und auch in den Folgejahren zur Folge haben kann. Ab dem dritten Nutzungsjahr war häufig noch eine leichte Ertragszunahme festzustellen.

Das Jahr 2013 war deutschlandweit von schlechten Maiserträgen gekennzeichnet, während die Erträge der bereits verwurzelten mehrjährigen Wildpflanzenmischungen stabil blieben und an manchen Standorten den Mais sogar übertrafen. Gerade auf durchlässigeren Böden sinkt der Methanertrag bei Sommertrockenheit aber sehr schnell unter die Wirtschaftlichkeitsschwelle, weshalb gerade dort auf eine rechtzeitige Ernte größter Wert zu legen ist. Über vier Jahre aufsummiert erzielten die besten Mischungen rund 60% des Trockenmasseertrags vom Mais. Die Methanausbeute lag bei günstigen Ernteterminen bei etwa 70–90 % des Wertes von Mais. Der Methanhektarertrag der Wildpflanzenmischungen liegt somit zurzeit im Mittel bei etwa der Hälfte von Silomais.

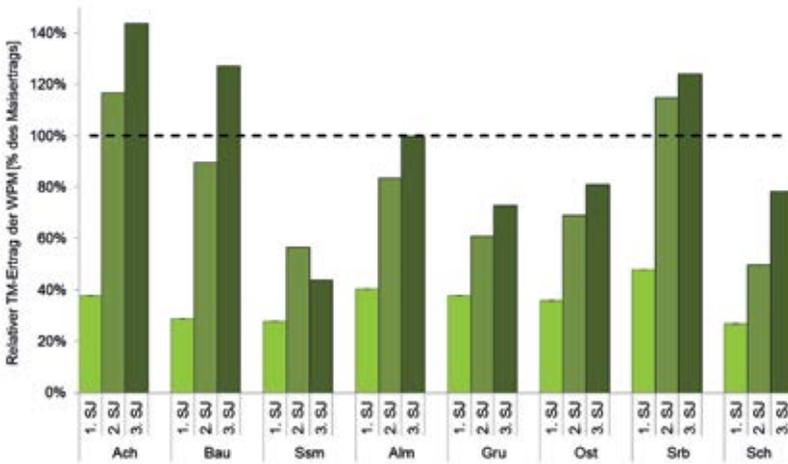


Abb. 3: Trockenmasseertrag 2013 in Prozent des Maiseintrags (gestrichelte Linie) an den 8 Versuchsstandorten des Ringversuchs Bayern, WPM im 1., 2. und 3. Standjahr

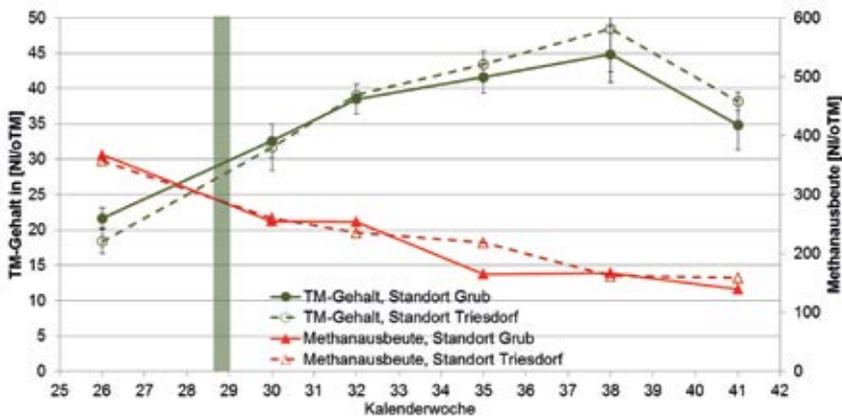


Abb. 4: Entwicklung von TM-Gehalt (o) und Methanausbeute (▲) einer WPM im 2. Standjahr; in der 28. KW wäre der optimale Erntezeitpunkt bei 27% TM-Gehalt

Interessant sind die Zwischenergebnisse des 2012 begonnenen Düngeversuchs, bei dem an mehreren Standorten verschiedene Dünge­stufen getestet werden. Es zeichnet sich ab, dass – entgegen der bisherigen Empfehlung – ab dem 2. Standjahr eine Düngung höher als auf 90 kg N_{min}/ha keinen Mehrertrag mehr bringt.

Die Silierfähigkeit wird seit 2011 im Rahmen des Ringversuchs von der LfL in Grub wissenschaftlich untersucht. Bedenken, das inhomogene Wildpflanzensubstrat bereite

bei der Silage Probleme, haben sich als unbegründet herausgestellt. Die Silagequalität ist als gut zu bewerten (VOLLRATH und OSTERTAG 2013 a und b).

5.3 Praxisversuche

Bei den Praxisversuchen kam es manchmal noch zu technischen Schwierigkeiten bei den Landwirten, weil die Erfahrung fehlt. Zum Teil wurde zu tief gesät, sodass kleinere Sämereien nicht aufgehen konnten.

Andere Landwirte benutzten schlecht vorbereitete Flächen für die vermeintlich toleranteren Wildpflanzenmischungen, was zu unnötiger Verunkrautung führte. Die Wahl des richtigen Erntetermins ist die nächste Fehlerquelle. Schließlich gab es mangels geeigneter Erntetechnik manchmal Probleme im Umgang mit dem inhomogenen Erntegut.



Abb. 5: Da in der Saatmischung auch kleine Sämereien sind, wird die Mischung auf die Bodenoberfläche gesät, nicht eingegilt und dann angewalzt; Saatstärke: 10 kg/ha (Quelle: Degenbeck)



Abb. 6: Ernte der WPM (3. Standjahr) im Sommer 2011 in Güntersleben (Landkreis Würzburg) mit einem reihenunabhängigen Häcksler. Naturschutz auf genutzten Flächen ist möglich! (Quelle: Werner)

Der Großteil der Landwirte kam jedoch gut mit den Energiepflanzenmischungen zurecht, sofern die Anbauempfehlungen der LWG genau beachtet wurden (siehe www.lwg.bayern.de/landespflege/natur_landschaft). Die Hinweise der Praktiker werden zur Optimierung der Mischungen herangezogen.

5.4 Faunistische Begleituntersuchungen

Bei allen untersuchten Tierartengruppen konnte gezeigt werden, dass die Testflächen eine mehr oder weniger deutlich höhere Arten- und Individuenzahl aufwiesen als benachbarte Maisflächen. Auch die Anzahl gefährdeter Arten war wesentlich höher.

Honigbienen und andere Blütenbesucher nutzen die Testflächen als wichtige Nektar- und Pollenquelle bis in den Spätsommer, wenn im Umfeld fast nichts mehr blüht. Die Winterstabilität der Bienenvölker erhöht sich dadurch eindeutig.



Abb. 7: Wildpflanzen wie die Wegwarte können in der Feldflur die Trachtlücke für Honigbienen im Sommer schließen (Quelle: LWG)

Sehr viele Vogelarten kommen als Nahrungsgäste und nutzen die hohen Populationsdichten der Insekten in den Beständen. Feldlerche und Grauammer profitieren von den Wildpflanzenbeständen und brüten dort in hoher Zahl. Sieben bis neun Fledermausarten, allesamt gefährdet, jagen auf den Versuchsflächen.

Für Feldhase und Rebhuhn sind die Bestände im Inneren oft zu dicht, wohingegen die Randbereiche intensiv genutzt werden. Die etwa 20–25 cm hohe Stoppelstruktur mit dem im Unterwuchs aufwachsenden Stauden bietet allerdings wertvolle Nahrung und Deckung im Winterhalbjahr (BÖHME et al. 2014).

6 Bewertung

Die ökologischen Vorteile liegen auf der Hand: durch die Strukturvielfalt bieten die Energiepflanzenmischungen vielen Tierarten Lebensraum. Nicht nur Jäger begrüßen folglich derartig begrünte Flächen, auch die Imker schätzen sie als Nektar- und Pollenquelle für die Honigbienen im trachtarmen Sommer. Zu guter Letzt ist damit ein enormer Imagegewinn für den Landwirt in der Bevölkerung verbunden, da die Bestände zumindest in den ersten beiden Jahren attraktiver aussehen als Standardkulturen.

Ein wichtiges Argument für die Energiepflanzenmischungen ist die ganzjährige Bodenbedeckung und der damit verbundene Erosionsschutz, der besonders in Hanglagen oder an Oberflächengewässern im Hinblick auf eine nachhaltige Landwirtschaft unabdingbar ist.

In Bezug auf den Ertrag liegen alle Wildpflanzenmischungen deutlich hinter dem Silomais. Dies war auf Grund der noch kurzen Entwicklungsdauer des völlig neuartigen Anbausystems nicht anders zu erwarten. Von vielen Wildpflanzen ist die Keimfähigkeit der Samen unsicher, sodass der optimale Mischungsanteil der jeweiligen Art schwierig zu ermitteln ist und von Jahr zu Jahr nachjustiert werden muss.

Wir sehen noch erhebliche Potenziale der Ertragssteigerung in den nächsten Jahren, insbesondere bei Einbeziehung fremdländischer Arten, wenngleich es niemals Ziel war, den Ertrag von Mais zu erreichen. Zudem ist zu berücksichtigen, dass der Mais aus Gründen der Nachhaltigkeit stets in einer Fruchtfolge mit ertragsschwächeren Kulturen angebaut werden muss.

Das wirtschaftliche Ergebnis kann dagegen relativ nah an eine Silomaisfruchtfolge herankommen, weil bei einmaliger Ansaat und einer Standzeit von mindestens 5 Jahren Arbeitsgänge und Produktionsmittel (nur mäßige Düngung, kein Pflanzenschutz) eingespart werden können; dies allerdings nur bei geringen Flächennutzungskosten, da für die gleiche Energiemenge etwa die doppelte Fläche benötigt wird (VOLLRATH und WERNER 2012).

Bemerkenswert war, dass selbst Bestände, die sich im ersten Jahr schlecht entwickelten bzw. verunkrautet waren, im zweiten Jahr dennoch gute Erträge lieferten. Dies ist den sehr konkurrenzstarken Wildstauden zu verdanken, die sich im ersten Jahr im Unterwuchs etabliert haben.

Ebenso haben sich Untersaaten, weniger unter Mais, vor allem aber unter Sommergerste trotz anfänglicher Bedenken im zweiten und dritten Standjahr gut entwickelt. Der Landwirt kann eine gewohnte Standardkultur in reduzierter Saatstärke (ca. 60% des Normalwertes) zusammen mit den mehrjährigen Wildpflanzenarten säen und im ersten Standjahr einen passablen Ertrag erzielen. Nimmt man geringere Erträge durch weniger dichte Bestände im ersten Standjahr in Kauf, ist über die gesamte Standzeit von mindestens fünf Jahren insgesamt ein deutlich höherer Ertrag zu erwarten.



Abb. 8: Die WPM im 2. Standjahr; Beifuß, Rainfarn, Flockenblume und Wegwarte bieten Lebensraum, Nektar und Pollen für Wildtiere und gleichzeitig gute Methanerträge (Quelle: Werner)

Dass der Ertrag nicht das alleinige Kriterium für die Anbauwürdigkeit der WPM ist, sondern ökologische Vorteile und Nachhaltigkeitsaspekte hierfür eine ausschlaggebende Rolle spielen, wird auch von anderen Autoren zunehmend anerkannt (ZÜRCHER und MESSNER 2015).

7 Hinweise für die Praxis

Je länger der Bestand genutzt werden kann, desto wirtschaftlicher ist der Anbau. Wenngleich die bisherigen Resultate sehr zuversichtlich stimmen, besteht nach wie vor noch Forschungsbedarf. Fünfzehn bis fünfundzwanzig Arten so zu kombinieren, dass sie bei gemeinsamer Ernte zu hohen Methanhektarerträgen führen und gleichzeitig eine hohe Strukturvielfalt für die Tiere bieten, ist eine große Herausforderung, die es zu meistern gilt. Die Saadmischungen werden laufend optimiert (z. B. zur Erhöhung der Artenvielfalt ab dem 3. Standjahr), ebenso das Anbausystem insgesamt (Kulturführung, Düngung usw.).

Im Zuge des Klimawandels ist künftig mit zunehmenden Wetterextremen zu rechnen. Damit kommt voraussichtlich eine mehrjährige artenreiche Mischung besser zurecht als eine Monokultur, was sich bei der extremen Frühjahrstrockenheit 2011 und auch 2013 eindrucksvoll zeigte; die bereits verwurzelten Energiepflanzenmischungen im zweiten und weiteren Standjahren entwickelten sich sehr gut.

Die Kombination von Wildpflanzenarten bietet ein großes Potenzial für Saatmischungen verschiedenster Ausprägung an verschiedensten Standorten. Bislang befinden sich schließlich erst wenige Grundvarianten im Test.

Auch im Hinblick auf die neuen Anforderungen des Bundesnaturschutzgesetzes, Ausgleichsmaßnahmen verstärkt in die landwirtschaftliche Produktion zu integrieren, bieten Energiepflanzenmischungen ein großes Entwicklungspotenzial. In diesem Fall sind dann Wildpflanzen aus dem jeweiligen Ursprungsgebiet laut Erhaltungsmischungsverordnung (ErMiV) zu verwenden. Wie wertvoll die genutzten Wildpflanzenmischungen zur Förderung der Wildtiere in der Feldflur sind, wird auch von Naturschutzseite her zunehmend anerkannt (SCHÖNE et al. 2013).

Von der Biogasmischung mit heimischen Wildpflanzen bot Saaten Zeller 2012 über Feldsaaten Freudenberger erstmals auf dem freien Markt Saatgut an, zum einen in der vollständigen Variante BG 70, zum anderen in der Untersaatvariante BG 90 ohne einjährige Pflanzen. Bei den Varianten mit fremdländischen Stauden besteht dagegen noch größerer Forschungsbedarf.

Mit den Wildpflanzenmischungen steht ein Anbausystem zur Verfügung, das entweder in Streifen oder flächig die Strukturvielfalt und damit die Biodiversität in der Agrarlandschaft erhöhen kann. Es handelt sich um eine flexible Kompromisslösung, die bereits mit kleineren Änderungen der Saatmischung entweder in Richtung Ertragsoptimierung oder in Richtung ökologischer Optimierung ausgerichtet werden könnte.

Seit 2013 besteht die Möglichkeit, sich an 10 Standorten in Bayern (überwiegend Versuchsstationen der LfL) mehrere Varianten von Wildpflanzenmischungen anzusehen und sich darüber informieren zu lassen. Im Auftrag des BayStMELF wurden „Informations- und Demonstrationszentren Energiepflanzenanbau“ geschaffen. Die Federführung obliegt der LfL, die LWG ist für die Wildpflanzenmischungen zuständig. Auf dem LWG-Gelände in Veitshöchheim befindet sich ebenfalls eine Demofläche, auf der auch Mischungen für den Siedlungsbereich und das Straßenbegleitgrün zu sehen sind. Es bestehen also ausreichende Möglichkeiten für Interessenten, sich vor Ort und in der Region über die Vorzüge des Anbausystems einen eigenen Eindruck zu verschaffen.

8 Zusammenfassung

Mit dem zunehmenden Maisanbau für die Biogasproduktion ist ein Intensivierungsschub in der Landwirtschaft verbunden; damit nimmt der Strukturverlust in der Feldflur weiter zu, was den ohnehin schon bedenklichen Rückgang der Wildtierbestände in der Agrarlandschaft, von den Insekten über die Feldvögel bis hin zum Feldhasen, weiter verstärkt hat.

Seit rund 15 Jahren arbeitet die LWG an mehrjährigen, artenreichen Saatmischungen aus Wild- und Kulturpflanzen, um die Strukturvielfalt in der Agrarlandschaft zur Förderung der dort lebenden Tiere zu verbessern. Seit 2008 werden nun Saatmischungen zur Biogasproduktion in verschiedenen Varianten entwickelt, die einerseits eine ökonomisch interessante Nutzung ermöglichen, gleichzeitig aber vielen Tierarten Lebensraum bieten sollen.

Mittlerweile konnten rund 50 % des Methanhektarertrags von Mais erreicht werden, und das bei guter Silagequalität. Durch die Einsparung von Arbeitsgängen und Betriebsmitteln bei mindestens 5–6 Jahren Standzeit reicht das wirtschaftliche Ergebnis bei geringen Flächennutzungskosten (Pacht) bereits relativ nahe an eine Maisfruchtfolge heran.



Abb. 9: Auch im 5. Standjahr sind noch blütenreiche Bestände möglich, wie hier in Oldenburg (Quelle: Vollrath)

Die ökologischen Vorteile konnten durch faunistische Begleituntersuchungen an Feldhase, Rebhuhn und anderen Feldvögeln sowie an Honigbienen, Tagfaltern, Spinnen und anderen Kleintieren eindeutig nachgewiesen werden. Hinzu kommen der Erosionsschutz durch die Dauerkultur und der Imagegewinn für den Landwirt.

Wenngleich noch Forschungsbedarf besteht, ist davon auszugehen, dass die Wildpflanzenmischungen eine geeignete, ökonomisch tragfähige Ergänzung zu den Hauptenergiepflanzen darstellen, wodurch die Biodiversität in der Agrarlandschaft deutlich verbessert werden kann. Die Wildpflanzenmischungen (WPM) können somit einen wichtigen Beitrag für die nachhaltige Landwirtschaft leisten.

Aufgrund der nachgewiesenen ökologischen Vorzüge bieten sie sich als ökologische Vorrangfläche im Rahmen des Greenings der GAP (gemeinsame Agrarpolitik) hervorragend an, z. B. entlang von Gewässern oder im Überschwemmungsbereich von Flüssen; der Landwirt kann produzieren und gleichzeitig viel für den Naturschutz in der Feldflur tun.

Literatur

- Böhme, H.; Tillmann, J.; Ronnenberg, K. (2014): Wildbiologische Begleituntersuchungen bei artenreichen Energiepflanzen-Ansaaten mit Wildpflanzen – Unveröffentlichter Abschlussbericht
- Degenbeck, M. (2005): Artenreiche Ansaaten auf Ackerflächen als neues Hauptinstrument des Naturschutzes. Faunistische Ergebnisse von zwei Pilotprojekten im Landkreis Würzburg. Abhandlungen des Naturwissenschaftlichen Vereins Würzburg, Band 45/46, S. 3–41
- Degenbeck, M. (2007): Mit Biotopverbund in die Kulturlandschaft – Artenreiche Ansaaten auf Ackerflächen als neues Hauptinstrument des Naturschutzes. LWF aktuell 57, S. 14–16
- Degenbeck, M.; Vollrath, B.; Werner, A. (2013): Mehr Vielfalt im Energiepflanzenanbau durch Wildpflanzenmischungen. Landwirtschaft ohne Pflug 1/2, S. 35–39
- Kuhn, W. (2002): Wilddeckung, bunt und lebendig. Wild und Hund 5, S. 28–31
- Kuhn, W.; Vollrath, B. (2010): Neue Wege in der Biomasseproduktion – Eine Chance fürs Niederwild. Wild und Hund 14, S. 38–42
- Marzini, K.; Kuhn, W. (2002): Stilllegungsflächen intensiv extensivieren. Bayerisches Landwirtschaftliches Wochenblatt 31, S. 44–45
- Schöne, F.; Oppermann, R.; Gelhausen, J.; Dziewiaty, K.; Bernardy, P. (2013): Naturverträgliche Nutzung ökologischer Vorrangflächen. Naturschutz und Landschaftsplanung 5, S. 133–139
- Vollrath, B.; Marzini, K. (2015): Blütenreiche Wildpflanzenmischungen für eine natur- und umweltfreundliche Biogasproduktion. Biogas-Journal 2, S. 37–41
- Vollrath, B.; Ostertag, J. (2013a): Schön schon, aber praxistauglich? Bayerisches Landwirtschaftliches Wochenblatt 47, S. 38–40
- Vollrath, B.; Ostertag, J. (2013b): Ab dem 2. Jahr sieht's anders aus. Bayerisches Landwirtschaftliches Wochenblatt 47, S. 40
- Vollrath, B.; Werner, A. (2011): Anders Biogas(en) – „Biogas spezial“, Verlagsbeilage dlz/joule, S. 28–31

Vollrath, B.; Werner, A. (2012): Wildpflanzen rentabel vergären. dlz agrarmagazin 12, S. 42–46

Vollrath, B.; Werner, A.; Marzini, K.; Degenbeck, M. (2013): Wildpflanzenmischungen als Biogassubstrat. http://www.biogas-forum-bayern.de/publikationen/Wildpflanzenmischungen_als_Biogassubstrat.pdf, Zugriff am 03.05.15

Zürcher, A.; Messner, J. (2015): Alternativen dringend gesucht. dlz agrarmagazin 4, S. 52–56

Monitoring des Biomethanproduktionsprozesses – Vorstellung des Forschungsprojekts MONA

MICHAEL BEIL, HANS-BENJAMIN BÖCKLER, JAQUELINE DANIEL-GROMKE,
MARCUS TROMMLER

1 Einleitung

Die Aufbereitung von Biogas auf Erdgasqualität wurde in Deutschland bereits in den 80er- und 90er-Jahren vor allem im Rahmen von Forschungs- und Pilotprojekten vorangetrieben. Großtechnische Projekte zur Biomethanproduktion und -einspeisung bestehen jedoch erst seit 2006. In den letzten Jahren hat sich die Biogasaufbereitung zu Biomethan neben der direkten Verstromung vor Ort etablieren können. Aktuell bereiten über 170 Anlagen Biogas zu Biomethan für die Einspeisung ins Erdgasnetz auf. In wenigen Ausnahmefällen auch für die direkte Nutzung als Kraftstoff an Tankstellen.

Im Projekt „Monitoring des Biomethanproduktionsprozesses“ (MONA) wird eine Bewertung von Biogasaufbereitungstechniken hinsichtlich ihrer Umweltauswirkungen, Wirtschaftlichkeit, Betrieb und Technik erarbeitet. Die Projektpartner Fraunhofer-Institut für Windenergie und Energiesystemtechnik (IWES), Deutsches Biomasse Forschungszentrum (DBFZ), Fraunhofer-Institut für Umwelt-, Sicherheits- und Energietechnik (UMSICHT), Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB), Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V. (KTBL) und die Universität Stuttgart betrachten dazu verschiedene bestehende Biogasaufbereitungsanlagen in Deutschland.

Den Schwerpunkt des Vorhabens bildet die Ermittlung der energetischen Effizienz der relevanten Aufbereitungstechnologien unter anderem durch messtechnische Erfassung der Methanverluste (Schlupf) an großtechnischen Biogasaufbereitungsanlagen. Weiterhin werden ökonomische und ökologische Aspekte der Biogasaufbereitung betrachtet, Spurengasanalysen an ausgewählten großtechnischen Anlagen durchgeführt und mehrere Projektanlagen hinsichtlich ihrer Energie- und Stoffströme bilanziert.

Das Projekt wird durch das Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL) über die Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR) gefördert.

Weitere Informationen zum Projekt finden sich auf der Homepage www.mona-bio-methan.de.

2 Darstellung der Messmethodik zur Bestimmung der Methanverluste und -emissionen verschiedener Aufbereitungsverfahren

Methan kann bei Biogasaufbereitungsanlagen im Wesentlichen über zwei Wege emittieren:

1. Diffuse Emissionen aufgrund von Undichtigkeiten, Havarien, Wartungsarbeiten, Austrag über Prozesschemikalien
2. Austrag über das Abgas der Aufbereitungsanlage und evtl. nach Abgasnachbehandlung.

2.1 Messstrategie

Im Rahmen des Vorhabens wird der Schwerpunkt auf die Detektion der Methanfracht im Abgasstrom gelegt. Es wird dabei unterstellt, dass im Standardbetrieb der Anlage der wesentliche Teil potenzieller Methanemissionen nicht über einen diffusen Austrag, sondern über den Abgasstrom erfolgt.

Die Bestimmung des Methanverlustes der Aufbereitungsanlage erfolgt über die direkte Vermessung des Abgasstroms (sowohl vor, als auch nach einer potenziellen Einrichtung zur Abgasnachbehandlung) und die Auswertung der Produktgasemengen, die im Regelfall durch die vor Ort installierte und eichamtlich zugelassene Messtechnik bestimmt werden.

Dazu ist eine direkte Messung der Methanmenge im Abgas erforderlich. Die Quantifizierung der Methanmenge im Abgasstrom erfolgt über eine Gasmengenmessung im Betriebszustand mit Umwertung auf den Normzustand und Messung der Methankonzentration.

Abbildung 1 skizziert die Messstellen zur Bestimmung der Gasbeschaffenheit (Q) und -volumenströme (V). Messungen finden dabei ausschließlich an den Messstellen V_3 und Q_3 (im Abgasstrom) statt. Zur Bilanzierung der Methanmengen ist weiterhin die direkte Messung des Produktgases erforderlich. Da die Aufbereitungsanlagen das Gas für die Netzeinspeisung bereitstellen, wird hier davon ausgegangen, dass die Messung

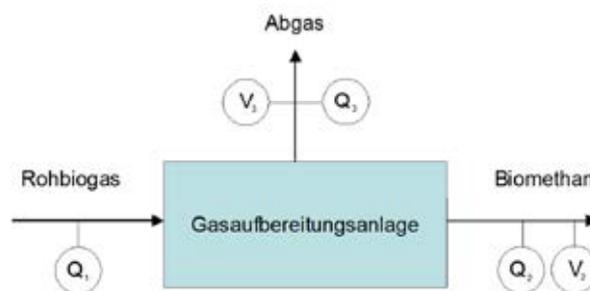


Abb. 1: Schematischer Überblick über die Messstellen zur Bestimmung der Gaszusammensetzung (Q) und -volumenströme (V)

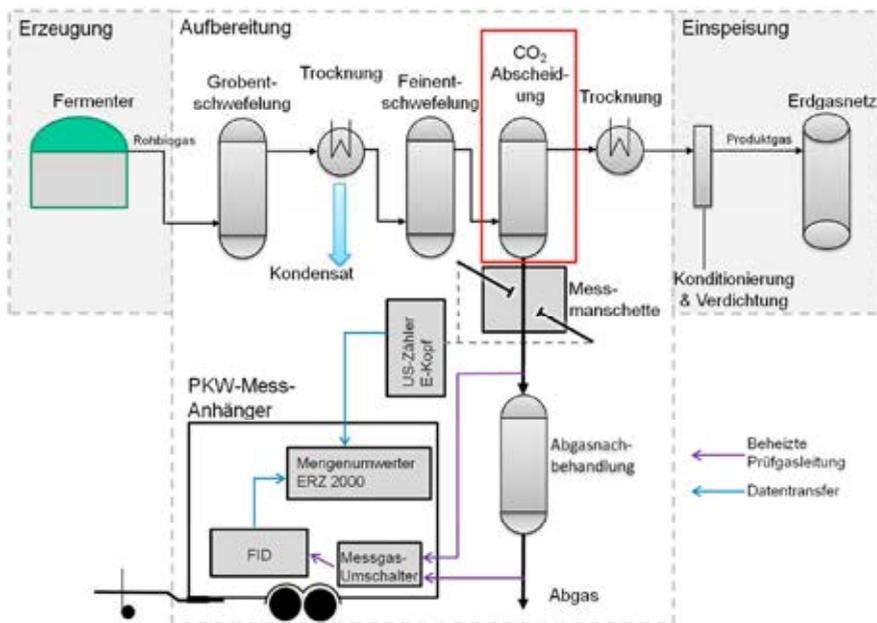


Abb. 2: Messstellen zur Bestimmung der Gaszusammensetzung und des Volumenstroms
 FID = Flammenionisationsdetektor, US = Ultraschall, E = Elektronik (Quelle: PTB)

von Volumenstrom und Methangehalt mit den ohnehin vorhandenen, zugelassenen und geeichten Messgeräten erfolgt. Die Messdaten werden dem Projektteam vom Anlagenbetreiber zur Verfügung gestellt.

Als Messtechnik für die Methankonzentration wird die robuste Flammenionisationstechnik eingesetzt. Die Volumenmessung erfolgt aufgrund der in Abhängigkeit von der verwendeten Aufbereitungstechnologie sehr unterschiedlichen Volumenströme (Normvolumenstrom $VN = 150$ bis $3.000 \text{ m}^3/\text{h}$) mithilfe eines Messgerätes, welches auf dem Ultraschallprinzip beruht.

Die erreichbaren Unsicherheiten hängen stark von den Anströmbedingungen ab, sind aber ausreichend gering. Die Messgeräte wurden vor dem Feldeinsatz in der PTB kalibriert. Zusammen mit der zugehörigen Auswertelektronik sind die Geräte auf einem Fahrzeuganhänger installiert.

Die Messtechnik wird jeweils für ca. 2 Wochen an den Anlagen installiert und betrieben sowie vor jeder Inbetriebnahme einer erneuten Funktionsprüfung unterzogen. Eine Fernauslesung der Messdaten ermöglicht die Betriebsüberwachung. Ergänzend werden Gasproben für die Laboruntersuchung genommen und in der PTB gaschromatografisch analysiert.

Die ermittelten Daten werden mit dem jeweiligen Anlagenzustand (Regelbetrieb, Druck, Temperatur; in Abhängigkeit des Verfahrens: Beladung des Adsorbers, Umschaltvorgänge etc.) korreliert und der durchschnittliche Methanverlust wird für jeden Anlagentyp ermittelt. Die statistische Signifikanz der Ergebnisse wird berechnet.

2.2 Pkw-Messanhänger

Um den Ein- und Ausbau der Messtechnik in die Biogasaufbereitungsanlage zu vereinfachen und zu beschleunigen, wurde die Messtechnik und die Auswertelektronik auf einen Anhänger installiert.



Abb. 3: Innenansicht des Pkw-Messanhängers mit Schaltschrank (Quelle: PTB)

Dieser Messanhänger ist eine Spezialkonstruktion mit integrierter Dämpfung, um Transportschäden an den empfindlichen Messgeräten zu vermeiden. Der Anhänger ist speziell für den Außeneinsatz konzipiert und verfügt über zwei räumlich getrennte Kammern: ein Gaslagerbereich und ein Messbereich mit Arbeitsplatz und Lagermöglichkeiten für die Messperipherie.

Für den Anhänger existiert ein Sicherheitskonzept für die Fälle „Gasalarm“ und „Spannungsausfall“ mit einer unterbrechungsfreien Stromversorgung für 24-V-Netze.

Abbildung 3 zeigt eine Innenansicht des Messanhängers. Gut zu erkennen sind links die Ablagevorrichtungen für die Messgas- und Versorgungsleitungen und rechts der Ein- und Ausgang für die Messgasleitungen sowie die in blauen Kästen eingehausten beheizten Armaturen für Messgasumschaltung und Filter. Rechts zu sehen ist die Front des

Schaltschrank und im Hintergrund der Arbeitsplatz. Sämtliche Geräte werden während des Transportes gesichert.

2.3 Ergebnisse

Im Rahmen des Messprogramms wurden bis zur Drucklegung dieses Beitrags sieben Biogasaufbereitungsanlagen folgender Technologien vermessen:

- Drei Aminwäschen
- Zwei Druckwasserwäschen
- Eine Druckwechseladsorption
- Eine Membranaufbereitung.

Die Messperioden betragen dabei jeweils ca. zwei Wochen.

Nachfolgend werden beispielhaft Messergebnisse einer Aminwäsche mit einer Rohgas-Nennkapazität von $700 \text{ m}_N^3/\text{h}$ dargestellt.

Abbildung 4 zeigt den Massenstrom des organisch gebundenen Kohlenstoffs (C_{org} in kg/h) im Off-Gas-Strom der Biogasaufbereitungsanlage als Funktion der Zeit. Zusätzlich wird hier ein Grenzwert der TA-Luft für organisch gebundenen Kohlenstoff (Frachtwert) von $0,5 \text{ kg}/\text{h}$ dargestellt.

Der durchschnittliche Durchfluss des Off-Gas-Stroms der Anlage betrug während des Messzeitraums $308 \text{ m}_N^3/\text{h}$.



Abb. 4: Massenstrom des organisch gebundenen Kohlenstoffs im Off-Gas-Strom einer Aminwäsche als Funktion der Zeit; Grenzwert der TA-Luft (BMU 2002) für organische Stoffe (Angabe als Gesamtkohlenstoff) (Quelle: PTB)

Es wird deutlich, dass der durchschnittliche Massenstrom an organischem Kohlenstoff (0,2 kg/h) bei der untersuchten Anlage den Fracht-Grenzwert der TA-Luft durchgehend unterschreitet. Basierend auf diesen Messergebnissen wird jedoch ebenso deutlich, dass bei einer Verdopplung der Anlagenkapazität auf 1.400 m_N³/h und gleicher Betriebsweise der Anlage ein durgehend sicheres Unterschreiten dieses Grenzwertes nicht zu jedem Zeitpunkt gegeben wäre.

3 Ökonomische Aspekte der Biomethanbereitstellung

Bei der Kostenanalyse wird im Wesentlichen zwischen Biomassebereitstellungskosten, Rohbiogasbereitstellungskosten, Aufbereitungskosten und Biomethanbereitstellungskosten frei Erdgasnetz unterschieden. Der Schwerpunkt der Betrachtung im Projekt MONA liegt auf der Analyse der Kosten für die Biogasaufbereitung.

Mithilfe einer Herstellerbefragung wird durch das DBFZ eine Kostenanalyse bezüglich der Biomasse-, Rohbiogas-, und Biomethanbereitstellungskosten sowie der Aufbereitungskosten durchgeführt. Dabei werden die in der Praxis auftretenden Einflussgrößen auf diese Bereitstellungskosten analysiert und im Rahmen von Sensitivitätsanalysen bewertet. Die ökonomische Bewertung der übrigen Schritte zur Biomethanbereitstellung erfolgt hingegen anhand von Modellanlagen bzw. -konzepten, welche den in der Praxis anzutreffenden Anlagenbestand weitestgehend widerspiegeln sollen. Hinsichtlich der kostenseitigen Betrachtung erfolgt zudem eine Differenzierung bzgl. des Substrateinsatzes, der Wärmebedarfsdeckung und der Art des Aufbereitungsverfahrens.

Auf der Basis der Datenerhebung am Markt verfügbarer Aufbereitungstechnologien im Herbst 2012 wurden durchschnittliche Aufbereitungskosten mithilfe der Annuitätenmethode in Anlehnung an die VDI-Richtlinie 2067 berechnet. Die wesentlichen Parameter der Wirtschaftlichkeitsberechnung sind in Tabelle 1 im Überblick dargestellt.

Tab. 1: Rahmenparameter für die wirtschaftliche Bewertung (FNR 2014)

Parameter	Einheit	Wert
Betrachtungszeitraum	a	20
Mischkalkulationssatz für Gesamtkapital	%	7
Inflation für kapitalgebundene Kosten	% p. a.	1
Inflation verbrauch-, betriebsgebundene, sonstige Kosten	% p. a.	2
Instandsetzung bezogen auf die Gesamtinvestition	% p. a.	2
Anlagenverfügbarkeit	%	96
Strompreis (in Abhängigkeit der Anlagengröße gestaffelt)	ct/kWh _{el}	10–15
Wärmepreis (für Aminwäsche)	ct/kWh _{th}	5
Versicherung	% p. a.	0,5

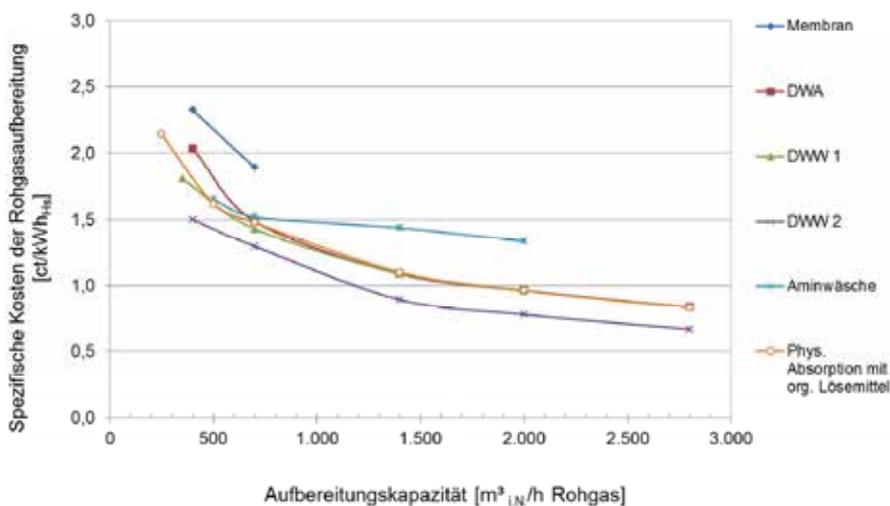


Abb. 5: Spezifische Kosten der Rohgasaufbereitung in Abhängigkeit vom Aufbereitungsverfahren und Anlagengröße nach Angaben der Hersteller (DWA= Druckwechseladsorption, DWW= Druckwasserwäsche) (Quelle: FNR 2014)

Insgesamt konnten aufgrund der Herstellerrückmeldungen 6 Verfahren in die Bewertung einbezogen werden: ein Membranverfahren, eine Druckwechseladsorption, zwei Druckwasserwäschen, eine Aminwäsche und eine Polyglykolwäsche.

Die ermittelten spezifischen Kosten der Aufbereitung, die im Rahmen des Parallelprojektes „Überarbeitung der Studie: Einspeisung von Biogas in das Erdgasnetz“ (FNR 2014) nach Angaben der Hersteller ermittelt wurden, sind in Abbildung 5 dargestellt.

Die Ergebnisse zeigen deutliche verfahrensspezifische Unterschiede sowie Größendegressionseffekte. Die höchsten Aufbereitungskosten weisen hier die kleineren Aufbereitungsanlagen mit Kapazitäten bis zu 500 m³_N BG/h auf. Im direkten Vergleich weist das noch relativ neue Membranverfahren mit 2,3 ct/kWh_{H₂} die höchsten Aufbereitungskosten auf. Durch die Anlagengröße bedingte Kostendegressionen führen zu Aufbereitungskosten für die größte hier betrachtete Anlagengröße von 2.800 m³_N BG/h zwischen 0,66 und 0,83 ct/kWh_{H₂}.

Die Ergebnisse wurden im „Wirtschaftlichkeitsrechner Biogas“ des KTBL ergänzt und dienen als Basis für das neue Gasverwertungsmodul „Biomethaneinspeisung“.

Literatur

BMU 2002: Erste Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Bundes-Immissionsschutzgesetz (Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft – TA Luft) vom 24. Juli 2002

FNR (Hrsg.) (2014): Leitfaden- Biogasaufbereitung und -einspeisung. Veröffentlichung im Rahmen des Projektes „Studie – Einspeisung von Biogas in das Erdgasnetz“, Projektnehmer: DBFZ Deutsches Biomasseforschungszentrum gemeinnützige GmbH, Projektpartner Schnutenhaus & Kollegen Rechtsanwälte, Förderkennzeichen (FKZ): 22008811, 5. Auflage, Gülzow-Prüzen

VDI 2067: Fachausschuss VDI 2067, VDI 2067, Blatt 1 – Wirtschaftlichkeit gebäudetechnischer Anlagen - Grundlagen und Kostenberechnung, September 2000

Biomethan – Perspektiven der Bereitstellung und Nutzung in Deutschland und Europa

FRANK SCHOLWIN, JOHAN GROPE

1 Einleitung

Biomethan ist ein Veredlungsprodukt von Biogas, das durch die anaerobe Vergärung feuchter Biomasse entsteht. Für dessen gezielte Produktion werden z. B. Bioabfälle, tierische Exkremente und Energiepflanzen eingesetzt. Biogas wird zu Biomethan aufbereitet, indem nicht gewünschte Bestandteile (insbesondere Kohlendioxid) aus dem Gas entfernt werden. Damit besteht Biomethan im Wesentlichen aus Methan und kann äquivalent zu Erdgas verwendet werden. Diese Eigenschaft macht Biomethan zu einem sehr flexiblen und gleichzeitig erneuerbaren Energieträger, der zur Strom- und/oder Wärmeerzeugung oder als Kraftstoff eingesetzt werden kann (Abb. 1). Darüber hinaus ist Biomethan in gasförmiger Form oder auch verflüssigt als LBG (Liquified Bio Gas) durch Nutzung der vorhandenen Gasinfrastrukturen einfach speicher- und transportierbar.

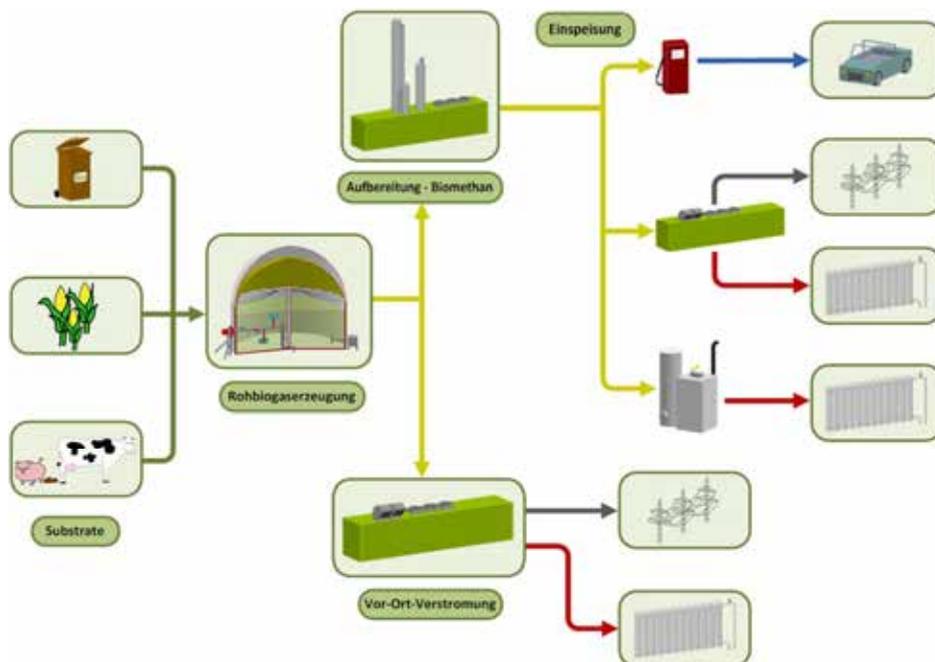


Abb. 1: Wertschöpfungskette der Biogas- und Biomethanbereitstellung und -nutzung (Quelle: DBFZ 2014)

2 Status quo der Bereitstellung und Nutzung von Biomethan

Die Bereitstellung und Nutzung von Biomethan hat sich in den letzten Jahren in mehr und mehr Ländern Europas etabliert. Allen voran hat es in Deutschland einen kontinuierlichen Ausbau der Biomethanproduktion in den Jahren 2006 bis 2014 gegeben. Vorreiter in der Bereitstellung und Nutzung von Biomethan war allerdings Schweden, wo die ersten Biomethananlagen bereits in den 1990er-Jahren in Betrieb genommen wurden. Die Beispiele Schweden und Deutschland zeigen auch die länderspezifisch sehr unterschiedlichen Motive für die Biomethanherzeugung und -nutzung: In Deutschland, wo eine der größten Herausforderungen in der Transformation des Energiesystems vom Ersatz fossiler und nuklearer Energieträger zur Strombereitstellung durch erneuerbare Energieträger besteht, war die Bereitstellung erneuerbaren Stroms Hauptmotiv für den Ausbau der Biomethanproduktion in den letzten Jahren. In Schweden, mit großen Anteilen Wasserkraft im Strommix, wird die Biomethanproduktion hingegen insbesondere zur Bereitstellung alternativer Kraftstoffe vorangetrieben.

Die Motive der Bereitstellung und Nutzung von Biomethan sind in den europäischen Ländern, wie diese Beispiele zeigen, sehr unterschiedlich und können sich im Laufe der Zeit aufgrund sich wandelnder Bedarfe innerhalb der Transformation der Energiesysteme ändern. Die Erkenntnis, dass Biomethan aufgrund seiner Flexibilität einen besonderen Beitrag zur sicheren und umweltfreundlichen Energieversorgung beitragen kann, zeigt sich durch die zunehmend implementierten Instrumente zur Förderung der Bereitstellung und Nutzung von Biomethan in den europäischen Ländern. Gleichzeitig steht die Biomethanbranche der Herausforderung gegenüber, die vergleichsweise hohen Kosten der Biomethanbereitstellung zu rechtfertigen.

2.1 Status quo in Deutschland

In Deutschland waren Ende 2014 knapp 170 Biomethanherzeugungsanlagen, die zusammen über eine Einspeisekapazität von ca. 105.000 Nm³/h verfügen, in Betrieb (Abb. 2). Da die Biomethanherzeugungsanlagen aber i. d. R. nicht auf Volllast betrieben werden, infolge von notwendigen Reparatur- und Revisionsarbeiten zweitweise nicht in Betrieb sind und einige der in 2014 in Betrieb genommenen Anlagen noch nicht das gesamte Jahr Biomethan in das Gasnetz eingespeist haben, wurden 2014 schätzungsweise nur ca. 600 Millionen m³ Biomethan in das Erdgasnetz eingespeist (bei den theoretisch maximal möglichen jährlichen 8.760 Volllaststunden wären gut 900 Millionen m³/a erreichbar). Die Entwicklung der Biomethanherzeugung in Deutschland zeigt einen kontinuierlichen Zubau von ca. 30 jährlich neu errichteten Biomethanherzeugungsanlagen seit 2009. Treiber hierfür war in erster Linie die Förderung der Strombereitstellung aus Biomethan über das Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG).

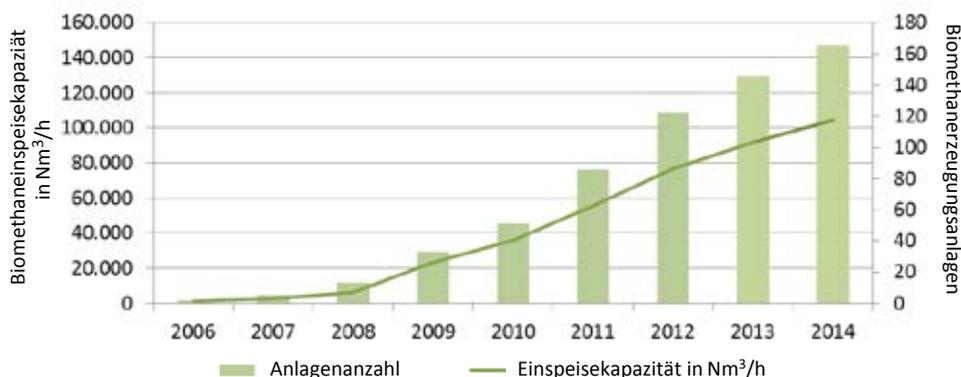


Abb. 2: Entwicklung der Biomethanerzeugung in Deutschland zwischen 2006 und 2014 (Quelle: Edel 2014)

Durch die erhebliche Reduzierung der Vergütung für Strom aus Biomethan im Rahmen der letzten Novellierung des EEG 2014 sind die Anreize der Biomethanerzeugung in Deutschland deutlich gesunken. Die Gründe hierfür liegen in der Streichung des Gasaufbereitungsbonus und insbesondere in der Streichung der Einsatzstoffvergütungsklassen I und II bei der Stromerzeugung aus Biomethan, welches aus nachwachsenden Rohstoffen hergestellt wird.

Anreize bestehen weiterhin lediglich für Anlagen die organische Abfälle und Reststoffe einsetzen, da Biomethan aus diesen Substraten eine Nachfrage als Biokraftstoff und im Öko-Gas-Markt besitzt. Allerdings sind die Nachfragevolumina in diesen Märkten vergleichsweise klein und durch die Umstellung der Biokraftstoffquote auf eine Treibhausgas (THG)-Minderungsquote zum 1.1.2015 haben sich die Rahmenbedingungen für Biomethan im Biokraftstoffmarkt ebenfalls verschlechtert. Die Umstellung hat hier insbesondere die Konkurrenzsituation für Biomethan aus Rest- und Abfallstoffen verschärft, welches zuvor doppelt auf die Biokraftstoffquote angerechnet wurde und damit im Vergleich zu anderen Biokraftstoffen den doppelten Marktwert besaß. Aufgrund der Vorreiterrolle, die Deutschland durch die Umstellung der Quote auf die THG-Minderungsquote einnimmt, besteht nun für die in Deutschland produzierten Biokraftstoffe – und somit auch Biomethan – die Herausforderung, mit Biokraftstoffen aus dem Ausland zu konkurrieren, welche relativ hohe THG-Minderungspotenziale aufweisen und relativ geringe Bereitstellungskosten haben. Deutschland ist durch die Umstellung der Quote ein attraktiver Markt für genau diese Biokraftstoffe geworden, wodurch im Ausland eine Selektierung der Biokraftstoffe zwischen der Nutzung im eigenen Land und dem Export nach Deutschland stattfindet.

Ein relevanter Ausbau der Stromerzeugung aus Biomethan ist unter diesen Rahmenbedingungen in Deutschland nicht mehr zu erwarten. Damit ist eine gezielte Förderung der Biomethanerzeugung mit Rücksicht auf den Natur- und Umweltschutz und dessen

Beitrag zur Transformation des Energiesystems sowie zur THG-Minderung nicht mehr möglich. Selbst bestehende Biomethanerzeugungsanlagen stellt die EEG-Novellierung vor existenzielle Herausforderungen. Im Rahmen der ab Ende 2016 geplanten Ausschreibungen für Strom aus erneuerbaren Energien, welche die bisherige Vergütung nach dem EEG ersetzen werden, könnte sich dies ändern und die Stromerzeugung aus Biomethan wieder attraktiv werden.

2.2 Status Quo in Europa

Ende 2014 war in Europa etwa eine Einspeisekapazität von 170.000 Nm³/h bzw. 1,3 Mrd. Nm³/a Biomethan (Abb. 3) installiert (PRZADKA 2015). Die größten Einspeisekapazitäten wurden in Deutschland, Schweden und den Niederlanden aufgebaut. Aufgrund aktuell geschaffener Rahmenbedingungen, insbesondere Feed-In-Tarife für die Einspeisung von Biomethan in das Erdgasnetz unabhängig vom Nutzungsweg, sind die größten Wachstumsmärkte in Großbritannien, Frankreich und Italien zu sehen.

In den meisten Ländern wird das Biomethan vorwiegend aus Reststoffen bereitgestellt. In einigen Ländern ist aber auch zunehmend der Einsatz nachwachsender Rohstoffe im Fokus (Luxemburg, Großbritannien, Schweden, Frankreich, Italien).

Die Förderinstrumente sind sehr unterschiedlich ausgestaltet. Direkte Gaseinspeisevergütungen bestehen in Frankreich, Luxemburg, Großbritannien, Italien und Dänemark. Indirekte Vergütung z.B. über die Bereitstellung von Strom und/oder Wärme existieren in Deutschland, Großbritannien und Österreich. Steuervergünstigungen (bei Nutzung als Kraftstoff) spielen in Schweden, Norwegen, Finnland und Deutschland eine wesentliche Rolle.

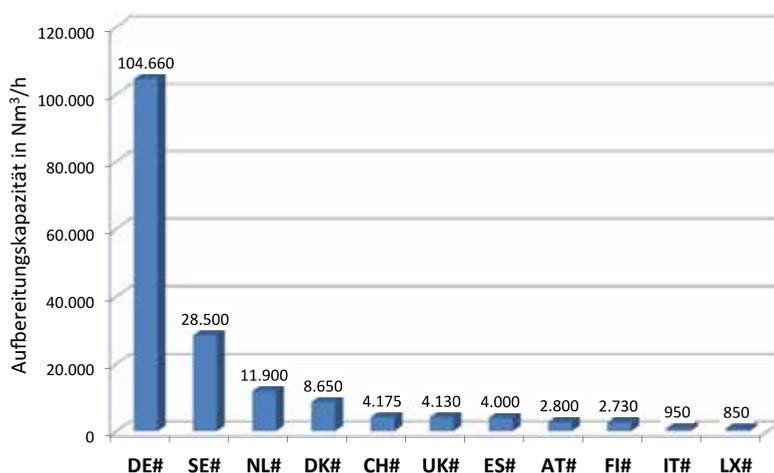


Abb. 3: Biomethanerzeugungskapazitäten in ausgewählten europäischen Ländern (Quelle: Przadka 2015)

3 Potenziale der Biomethanherzeugung

3.1 Potenziale in Deutschland

Zahlreiche Studien zeigen unterschiedliche Ergebnisse insbesondere hinsichtlich des Flächenpotenzials und damit des Potenzials zum Anbau von Energiepflanzen, das jedoch auch das wesentliche Ausbaupotenzial für die Biogas- und Biomethanbereitstellung darstellt. Auswertungen im Rahmen des Projektes BM-Strat weisen ein Ausbaupotenzial von zusätzlich ca. 35 bis 60 TWh_{H₂} Biogas pro Jahr bis 2020 aus (Tab. 1). Zusammen mit dem bereits heute produzierten Biogas könnten 2020 damit ca. 115 bis 140 TWh_{H₂} Biogas jährlich erzeugt werden.

Während heute ca. 5 % des in Deutschland produzierten Biogases zu Biomethan aufbereitet werden, gehen die Experten davon aus, dass 2020 20 bis 32 TWh_{H₂}/a sinnvoll zu Biomethan aufbereitet werden könnten und damit ca. 20 % des dann erzeugten Biogases. Damit besteht das Potenzial, die Biomethanherzeugung in Deutschland bis 2020 um den Faktor 3 bis 5 auszubauen.

Wesentlich für den Ausbau ist die Fortführung der Biomethanherzeugung aus Energiepflanzen, für die es aktuell aber keine ausreichenden Anreize gibt.

Tab. 1: Potenziale der Biogaserzeugung im Jahr 2020 in Deutschland¹⁾

Biomasseherkunft	Potenzial [TWh _{H₂} /a]
Industrielle Reststoffe	0,5
Landwirtschaftliche Reststoffe	0,5
Kommunale Abfälle	1,5–3,7
Klärschlamm (Klärgas)	1
Tierische Exkremente	10
Energiepflanzen	22,9–45,8
Gesamt	36,4–61,5

¹⁾ Die Potenziale wurden auf Grundlage der Auswertung von Potenzialstudien unter Einbezug von Expertenmeinungen im vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie beauftragten Vorhaben „Perspektiven der Biogaseinspeisung und instrumentelle Weiterentwicklung des Förderrahmens“ zusammengetragen (Scholwin 2014).

3.2 Potenziale in Europa

Auf europäischer Ebene sind ebenfalls erhebliche Potenziale zum Ausbau der Biomethanbereitstellung vorhanden, die auch bei nur geringer Nutzung des technischen Potenzials bis 2030 eine Verdoppelung der Biomethanherzeugung (inklusive Biogas) in Europa (Tab. 2) ermöglichen (2030: 185 TWh_{H₂}/a Methan). Das wesentliche Ausbaupotenzial liegt auch hier in der Nutzung von Energiepflanzen.

Tab. 2: Potenziale der Biomethanherzeugung im Jahr 2030 in Europa nach Schätzungen der European Biogas Association (EBA) (Kovacs 2015)

Biomasseherkunft	Biomethanpotenzial ¹⁾ TWh _{H₂} /a	Nutzungsgrad %	Erwartete Biomethanproduktion ¹⁾ TWh _{H₂} /a
Industrielle Reststoffe	30	50	15
Stroh	90	20	18
Kommunale Abfälle	80	40	32
Klärschlamm	60	60	36
Tierische Exkreme	180	35	63
Energiepflanzen	480	25	120
Landschaftspflege	20	40	8
Gesamt	940		292

¹⁾ Gesamtpotenzial an Methan, ohne Unterscheidung zwischen Biogas und Biomethan.

4 Beitrag zur Transformation der Energiesysteme

Biomethan kann aufgrund seines flexiblen Einsatzes (Abb. 4) in vielerlei Hinsicht besondere Funktionen in der Transformation der Energiesysteme mit dem Ziel der Verminderung von Treibhausgasemissionen übernehmen. Dies betrifft alle drei Sektoren: Strom, Wärme und Kraftstoffsektor. Wo und wie Biomethan diese Funktion am besten über-

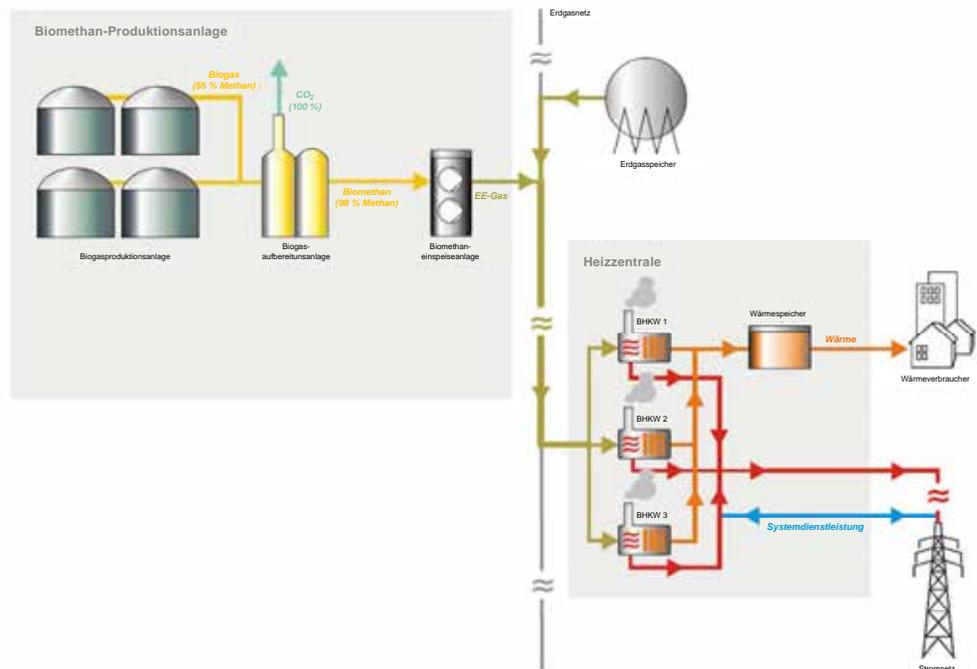


Abb. 4: Flexible Strombereitstellung aus Biomethan (Quelle: Holzhammer 2014)

nimmt, hängt insbesondere auch von den unterschiedlichen länderspezifischen Rahmenbedingungen ab. Eine Herausforderung für politische Entscheidungsträger besteht darin, diesen nachfolgend genauer erläuterten Funktionen einen Wert zuzuschreiben. Um den unter heutigen Rahmenbedingungen noch vergleichsweise hohen Kosten die sehr vielfältigen positiven Wirkungen der Biomethanbereitstellung und -nutzung eine Bewertung aber unabdingbar.

4.1 Beitrag im Stromsektor

Die Stromproduktion mittels Biomethan kann insbesondere bei der Umstellung der Stromversorgung auf zunehmend fluktuierende erneuerbare Energien (Wind und Solar) einen besonderen Beitrag leisten.

Im Folgenden sind die wesentlichen Faktoren aufgelistet, durch welche die Strombereitstellung aus Biomethan einen positiven Beitrag zur Transformation des Stromsystems leisten kann:

- Die Strombereitstellung mittels Biomethan liefert gesicherte Leistung und Systemdienstleistungen (positive und negative Regelenergie, Blindleistung, Schwarzstartfähigkeit usw.).
- Vergleichsweise lange Stillstandszeiten sind ohne nennenswerte Energieverluste möglich.
- Die Stromerzeugung mittels Biomethan hat die Fähigkeit auf mehrtägige Angebotsüberschüsse erneuerbarer Energien im zukünftigen Stromsystem und gleichzeitig sehr schnell auf Dargebotsänderungen zu reagieren.
- Die Biomethanerzeugung stellt eine optimale Kombination zu Power-to-Gas dar, da die Biogasaufbereitungsanlage das nötige CO₂ zur Methanisierung von Wasserstoff bereitstellen kann und selbst die Energieerzeugung flexibel gestalten und somit als Energiespeicher fungieren kann.
- Die Verstromung von Biomethan in Kraft-Wärme-Kopplung mit hoher Wärmenutzung weist einen sehr hohen Nutzungsgrad bezogen auf die eingesetzte Biomasse auf und kann entsprechend Beiträge zur THG-Minderung leisten.

4.2 Beitrag im Wärmesektor

Die Nutzung von Biomethan zur reinen Wärmebereitstellung (d. h. ohne gekoppelte Stromerzeugung) stellt nicht per se eine sinnvolle Verwertungsform dar. Grundsätzlich sollten vorrangig Maßnahmen zur Einsparung des Wärmeverbrauchs umgesetzt werden. Darüber hinaus haben Technologien, die Wärme ohne den Einsatz von Biomasse bereitstellen (z. B. Solar- und Geothermie oder Wärmepumpen) den Vorteil, dass sie ohne begrenzte Ressourcen und deren teilweise aufwendige Bereitstellung auskommen. Legt man das Einsparpotenzial von Treibhausgasen zugrunde, ist insbesondere in Ländern, in

denen der Strom heute noch hauptsächlich aus fossilen Energieträgern und insbesondere Kohle bereitgestellt wird, die Verstromung des Biogases vor Ort (d. h. ohne dessen Aufbereitung zu Biomethan) gegenüber der Verwertung des Biomethans zur reinen Wärmebereitstellung zu bevorzugen.

Allerdings stellt die Wärmebereitstellung aus Biomethan insbesondere dort, wo die Gasinfrastruktur vorhanden ist, eine vergleichsweise einfach umsetzbare Bereitstellung erneuerbarer Wärme dar. Speziell in den Anwendungsfällen, in denen es kaum oder keine Alternativen gibt, kann Wärme aus Biomethan eine sinnvolle, wenn nicht sogar die einzige Alternative einer effiziente und erneuerbaren Endenergiebereitstellung sein (z. B. erneuerbare Wärme für die historische Altstadt mittels Kraft-Wärme-Kopplung).

Darüber hinaus fördert die Biomethannutzung den Ausbau einer sinnvollen Infrastruktur; z. B. den Aufbau von Nahwärmenetzen, die zukünftig auch mit E-Gas und Wärmepumpen betrieben werden können.

4.3 Beitrag im Kraftstoffsektor

Biomethan kann im Kraftstoffsektor einen wesentlichen Beitrag zur Reduzierung von Treibhausgasen (Abb. 5) und zur Unabhängigkeit vom Import fossiler Kraftstoffe beitragen. Insbesondere wenn Biomethan aus Rest- und Abfallstoffen erzeugt wird, sind die THG-Einsparungen vergleichsweise groß (Abb. 5). Bei der Verwendung von Energiepflanzen zur Biomethanerzeugung sind die möglichen Reichweiten von Fahrzeugen in Bezug auf die erforderliche Anbaufläche (ausgedrückt in km/ha) im Vergleich zu anderen Biokraftstoffen (Bioethanol und Biodiesel) ebenfalls größer.

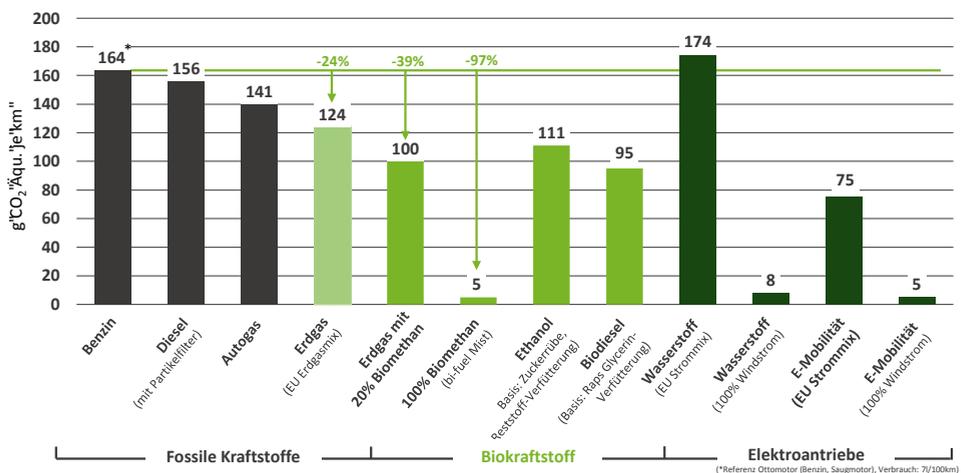


Abb. 5: Treibhausgasemissionen von Kraftstoffen (Well-to-Wheel) in g CO₂ Äqu. je km (Quelle: Geisler 2015 nach dena 2012)

Gegenüber der Elektromobilität hat Biomethan als Kraftstoff den Vorteil, dass wesentlich größere Reichweiten mit einer Tankfüllung möglich sind. Dies hat insbesondere eine Bedeutung für den Schwerlasttransport, wo relativ große Transportdistanzen überwunden werden müssen. Wird das Biomethan zu LBG verflüssigt, kann dieser Vorteil aufgrund der höheren Energiedichte noch weiter ausgebaut werden. Bei gleichem Tankvolumen kann in diesem Fall die bis zu dreifache Energiemenge und damit auch die dreifache Reichweite umgesetzt werden.

In den Ländern, in denen eine Erdgasinfrastruktur (Tankstellen und Erdgasfahrzeuge) bereits vorhanden ist, kann Biomethan ohne jeglichen Zusatzaufwand als erneuerbarer Kraftstoff genutzt werden. Für öffentliche Fuhrparks (z. B. Stadtreinigungen oder ÖPNV) liefert der Einsatz von Biomethan in den Fahrzeugen die Möglichkeit der Erschließung lokaler Stoffkreisläufe durch die Verwertung kommunaler und gewerblicher Bioabfälle, was darüber hinaus auch einen positiven Marketingeffekt haben kann.

4.4 Sektorübergreifender Beitrag

Aufgrund der flexiblen Einsetzbarkeit von Biomethan (KWK, Kraftstoff, Wärme und stofflich) kann Biomethan aus bestehenden Erzeugungskapazitäten in der Zukunft je nach Sinnhaftigkeit für das Gesamtsystem relativ leicht und in kurzer Zeit in andere Verwertungspfade gelenkt werden. Dies stellt einen großen Vorteil in Bezug auf die Dynamik der Transformation von Energiesystemen dar, da sich im Laufe des Transformationsprozesses die Bedarfe aufgrund der sich verändernden Energiemixe in den einzelnen Sektoren und neuer Technologien stark verändern können.

6 Fazit

Die Energiebereitstellung aus Biomethan hat sich in Europa etabliert. Während in Deutschland als Land mit dem mit Abstand größten Biomethanmarkt in Europa die Unterstützung der Bereitstellung und Nutzung von Biomethan stark zurückgestellt wurde, werden in anderen europäischen Ländern zunehmend attraktive Förderinstrumente geschaffen.

Biomethan kann in den verschiedenen Sektoren besondere Beiträge zur Transformation der Energiesysteme leisten. Diese haben einen besonderen Wert, der stark von den länderspezifischen Rahmenbedingungen abhängt. Eine Herausforderung besteht darin, diese Werte zu erkennen, um eine Rechtfertigung für die vergleichsweise hohen Bereitstellungskosten von Biomethan zu schaffen.

Biomethan wird je nach Herausforderungen in den einzelnen Ländern zukünftig vor allem folgende Nischen bedienen:

- Bedarfsgerechte Strombereitstellung (insbesondere über längere Zeiträume, d. h. mehrere Tage und Wochen und damit insbesondere in Ländern mit hohen Anteilen fluktuierender Stromquellen wie Wind und Solar)
- Bereitstellung von Systemdienstleistungen zur Unterstützung einer gesicherten Stromversorgung
- Effiziente Wärmeversorgung, insbesondere dort, wo Alternativen (Effizienzmaßnahmen und andere Technologien zur Bereitstellung erneuerbarer Wärme) nicht umsetzbar sind
- Erneuerbarer Kraftstoff, perspektivisch insbesondere im Schwerlasttransport
- Ergänzung der Power-To-Gas-Technologien zur Bereitstellung erneuerbaren Kohlenstoffdioxids für die Methanisierung.

Literatur

DBFZ (2014): Darstellung der Biomethan- und Biogaswertschöpfungskette. Ist-Stand der Biomethannutzung, Leipzig

Edel, M. (2015): Biomethane framework conditions in Germany, Paris

Geisler, R. (2015): Die industrielle Sicht – Biomethan als Kraftstoff, Berlin

Holzhammer, U. (2014): (Möglicher) Beitrag von Biomethan zur Transformation des Energiesystems, Berlin

Kovacs, A. (2015): Biomethan – Beitrag zur zukünftigen Energieversorgung in Europa, Berlin

Przadka, A. (2015): State of the art and future prospects of biogas and biomethane in Europe, Vaasa

Scholwin, F. et al. (2014): Potenziale der Biogasgewinnung und -nutzung, Rostock

Biogas als Kraftstoff – eine Option für den hiesigen Absatzmarkt?

MATTHIAS EDEL, TONI REINHOLZ

1 Einleitung

Der Ausbau der Biogaseinspeisung wurde in den vergangenen Jahren vor allem durch das Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG) angetrieben. Die Novellierung des EEG im Jahr 2014 setzte aus heutiger Sicht allerdings keine Anreize für neue Projekte zur Stromerzeugung aus Biomethan. Ein alternativer Verwendungspfad, der deshalb verstärktes Interesse erfährt, ist der Verkehrssektor.

Als besonders klima- und umweltfreundlicher Biokraftstoff besitzt Biomethan gute Voraussetzungen, um zur Erreichung der Klimaschutzziele im Straßenverkehr einen nennenswerten Beitrag zu leisten. Denn der Einsatz von Biomethan in Erdgasfahrzeugen hat eine sehr gute Klimabilanz und verursacht auch weniger Feinstaubemissionen als Diesel- und Ottomotoren. Viele Akteure setzen deshalb darauf, dass Biomethan zukünftig verstärkt im Straßenverkehr abgesetzt werden kann.

Mit mehr als 20 Prozent Marktanteil an der Erdgasmobilität ist Biomethan bereits eine wichtige Option in diesem Bereich; im Vergleich zur Stromerzeugung ist der Straßenverkehr jedoch noch ein Nischensegment für Biomethan. Inwieweit die Erwartungen der Akteure zukünftig erfüllt werden können, hängt deshalb von vielen Faktoren und Rahmenbedingungen ab. Im Folgenden werden diese Faktoren spezifiziert, wobei der Fokus auf den rechtlichen Rahmenbedingungen, den Preisen und Mengenpotenzialen in der Erdgasmobilität sowie den Treibhausgasvermeidungspotenzialen von Biomethan liegen soll.

2 Biomethan im Straßenverkehr

2.1 Erdgasmobilität

Biomethan kann wie Erdgas als Kraftstoff für Erdgasfahrzeuge genutzt werden. Deutschland verfügt mittlerweile über ein gut ausgebautes Erdgastankstellennetz. Ende 2014 wurden 921 Erdgastankstellen betrieben, von denen 166 Biomethan in Beimischungen und 168 100-Prozent-Biomethan anboten (erdgas mobil 2015). Die Zulassung von Neufahrzeugen ist trotz eines größeren Fahrzeugangebots zuletzt nur geringfügig auf rund 100.000 Erdgasfahrzeuge gestiegen.



Abb. 1: Absatz von Erdgas/Biomethan als Kraftstoff; Anteil am Kraftstoffabsatz im Straßenverkehr (Quelle: erdgas mobil 2015, KBA 2015)

Daher stagniert auch der Absatz von Erdgas und Biomethan und liegt nach Schätzung bei 2,3 TWh in 2014 (s. Abb. 1). Davon sind ca. 550 GWh Biomethan (BMW i 2015). Der Anteil von Biomethan in der Erdgasmobilität konnte somit in der Vergangenheit signifikant von ca. 6 Prozent in 2011 auf rund 24 Prozent in 2014 gesteigert werden.

Im Vergleich zur prognostizierten Biogaseinspeisung von ca. 7,1 TWh für das Jahr 2014 (BNetzA 2014) nimmt Biomethan als Kraftstoff noch eine Nischenrolle ein.

2.2 Bio-LNG

Das Absatzpotenzial von Biomethan in Erdgasfahrzeugen ist ohne eine Vergrößerung der Fahrzeugflotte sehr begrenzt. Eine vielversprechende Alternative ist der Einsatz von Flüssigerdgas (Liquified Natural Gas (LNG)) im Straßengüterverkehr, wo es auch mittel- bis langfristig wenige Optionen zur Verringerung der Treibhausgasemissionen gibt. Biomethan kommt hierbei eine wichtige Rolle zu, denn die Beimischung von Biomethan zu LNG verbessert die Treibhausgasbilanz gegenüber dem dominierenden Kraftstoff Diesel nennenswert. LNG mit 20 Prozent Biomethan könnte bei einem Anteil von 4 Prozent am Kraftstoffmarkt die Treibhausgasemissionen des Straßengüterverkehrs in Deutschland um 240.000 t CO₂ pro Jahr mindern (dena 2014). Über die bestehenden Rahmenbedingungen hinaus gibt es derzeit in Deutschland jedoch keine Regelungen, die den Einsatz von LNG bzw. Bio-LNG fördern.

3 Rechtliche Rahmenbedingungen

Deutschland muss wie alle anderen Mitgliedsstaaten der EU bis zum Jahr 2020 den Anteil erneuerbarer Energien im Verkehr auf zehn Prozent erhöhen (EU 2009). Wie die Staaten dies erreichen, ist nicht festgelegt. In Deutschland ist die Biokraftstoffquote das wichtigste Instrument zur Förderung von erneuerbaren Energien im Verkehr. Für Biomethan gilt zudem bis Ende 2015 eine Steuerbefreiung, wenn das Biomethan mit einigen irrelevanten Ausnahmen nicht auf die Quotenverpflichtung angerechnet wurde. Die Steuerbefreiung für Biomethan wird allerdings nur in seltenen Fällen in Anspruch genommen.

3.1 Bisher: energetische Biokraftstoffquote

Unternehmen, die gewerblich Otto- oder Dieselmotorkraftstoffe in Verkehr bringen, waren bis zum 31.12.2014 dazu verpflichtet, einen energetischen Mindestanteil von 6,25 Prozent an Biokraftstoffen in den Verkehr zu bringen. Biomethan konnte unter bestimmten Voraussetzungen zur Erfüllung dieser Quotenverpflichtung herangezogen werden.

Biokraftstoffe aus ausgewählten biogenen Abfällen und Reststoffen konnten bisher doppelt auf die Quotenverpflichtung angerechnet werden. Für Biomethan war dies ein wichtiger Hebel, denn der Anteil von rest- und abfallstoffbasiertem Biomethan im Straßenverkehr betrug im Jahr 2013 90,7 Prozent. Im Vergleich dazu stammten nur 14,5 Prozent der flüssigen Biokraftstoffe aus Rest- und Abfallstoffen (BLE 2014).

3.2 Aktuell: Treibhausgasminderungsquote

Mit der Umstellung auf die Treibhausgasminderungsquote setzt Deutschland als erster europäischer Mitgliedsstaat die Anforderungen der Fuel Quality Directive (FQD) um. Nun sind Mineralölunternehmen verpflichtet, durch das Inverkehrbringen von Biokraftstoffen die Treibhausgasemissionen, die durch die abgesetzten Kraftstoffe im Straßenverkehr entstehen, um zunächst 3,5 Prozent zu verringern. Ab 2017 beträgt diese Treibhausgasminderungsquote 4 Prozent und erhöht sich 2020 auf 6 Prozent (Abb. 2). Zukünftig soll zudem die Elektromobilität zur Erfüllung der Biokraftstoffquoten angerechnet werden.

Im Unterschied zur energetischen Biokraftstoffquote ist nun das Treibhausgasvermeidungspotenzial der Biokraftstoffe ein zentrales Wettbewerbsmerkmal. Hinzu kommt: je höher dieses Potenzial ist, desto weniger Biokraftstoffe werden für die Quotenverpflichtung benötigt. Die in 2013 auf die Biokraftstoffquote angerechneten Biokraftstoffe hatten ein durchschnittliches Treibhausgasminderungspotenzial von 50,7 Prozent. Mit diesem Wert würden in 2015 mehr Biokraftstoffe benötigt als für die bisher vorgeschriebene energetische Quote von 6,25 Prozent (Abb. 2). Da jedoch die Treibhausgasminderungsquote Anreize setzt, Biokraftstoffe mit hohem Treibhausgasminderungspotenzial einzusetzen, wird sich dieser Durchschnittswert voraussichtlich deutlich verbessern. Für Bio-

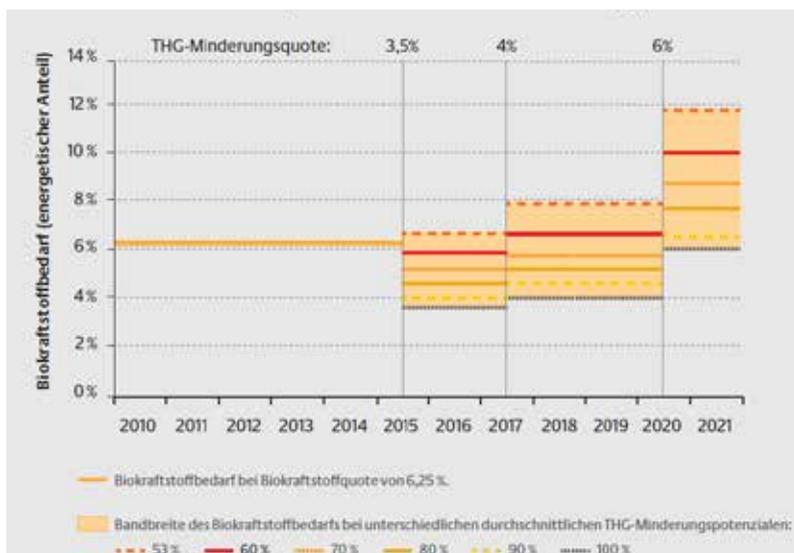


Abb. 2: Biokraftstoffquote und Korridor THG-Minderungsquote (Quelle: dena 2015)

kraftstoffe, die bisher doppelt auf die Biokraftstoffquote angerechnet werden konnten, ist denkbar, dass diese verstärkt in anderen europäischen Ländern eingesetzt werden, wo ein Preisaufschlag für diese Qualitäten bezahlt wird.

Es ist folglich schwer abschätzbar, ob kurzfristig der Bedarf an Biokraftstoffen steigt und sich damit auch das Absatzpotenzial für Biomethan erhöht. Spätestens ab 2020 dürfte allerdings nochmals eine signifikante Nachfragersteigerung nach Biokraftstoffen entstehen. Dies setzt allerdings voraus, dass die Elektromobilität bis dahin noch nicht auf die Biokraftstoffquote angerechnet werden kann bzw. noch nicht im erforderlichen Maße Marktanteile dazugewinnen konnte.

3.3 Zukünftig: Begrenzung von Biokraftstoffen aus Ackerfrüchten

Mitte 2015 beschlossene Vorgaben des Europäischen Parlaments sehen vor, dass Biokraftstoffe aus Ackerfrüchten zukünftig maximal 7 Prozent zu den Zielen zum Ausbau der erneuerbaren Energien im Verkehrssektor beitragen sollen. Die restlichen 3 Prozent müssen dann aus erneuerbarem Strom sowie Biokraftstoffen aus Rest- und Abfallstoffen kommen. Gegenüber dem heutigen Anteil bedeutet dies eine deutliche Steigerung dieser Alternativen. Letztlich könnte dies weitere Wettbewerbsvorteile für Biomethan bringen, da Biomethan weit überwiegend aus Rest- und Abfallstoffen für den Kraftstoffmarkt produziert wird.

4 Wettbewerbssituation

4.1 Bisher: Quotenpreis

Preisbestimmend für die Biokraftstoffquote in Deutschland war in der Vergangenheit die Differenz zwischen Dieseldieselkraftstoff und Biodiesel mit Nachhaltigkeitsnachweisen. Je günstiger Diesel im Vergleich zu Biodiesel war, desto höher fiel der Quotenpreis aus. Für Biokraftstoffe, die doppelt auf die Quote angerechnet werden konnten, war für den Quotenpreis Biodiesel auf Basis von Altspeseölen und -fetten maßgeblich. Auf Basis von Handelspreisen vom Februar 2014 ergab dies zum Beispiel einen Preis für eine einfache Quote von umgerechnet 2,03 ct/kWh_{HS} und von 3,47 ct/kWh_{HS} für doppelt anrechenbare Biokraftstoffe (STX Services 2014, boerse.de 2014). Die doppelte Anrechenbarkeit brachte demnach für Biokraftstoffe aus Rest- und Abfallstoffen ungefähr einen Vorteil um den Faktor 1,5.

Biomethan war folglich dann wirtschaftlich, wenn der einfache oder doppelte Quotenpreis zuzüglich des Erdgaspreises höher lag als der Preis für Biomethan mit Nachhaltigkeitsnachweis (Abb. 3). In 2013 und 2014 war in der Regel nur doppelt anrechenbares Biomethan als Kraftstoff wirtschaftlich.

4.1.1 Aktuell: Treibhausgasbilanz (THG-Bilanz)

Biomethan aus Rest- und Abfallstoffen besitzt ein relativ hohes Treibhausgasvermeidungspotenzial im Vergleich zu den meisten flüssigen Biokraftstoffen. Gemäß den Standardwerten für Treibhausgasemissionen aus der Erneuerbare-Energien-Richtlinie beträgt diese bei Biomethan aus Exkrementen und aus Abfällen 73–82 Prozent (Tab. 1).

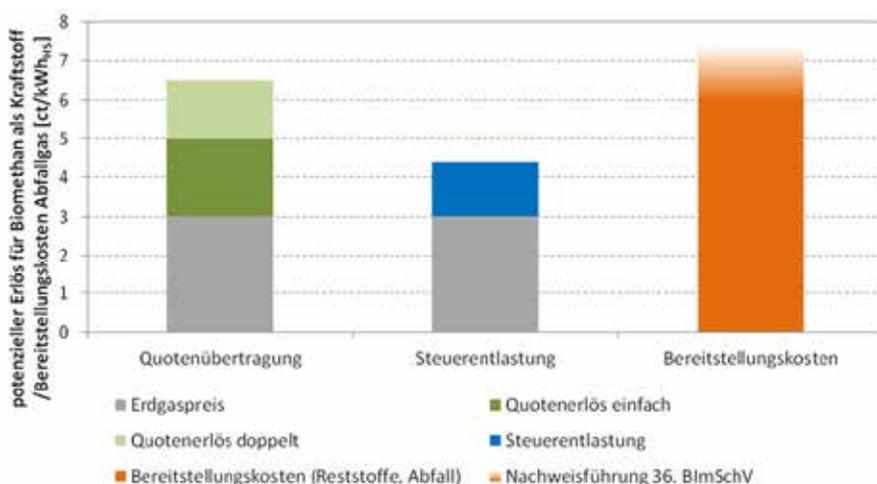


Abb. 3: Typische Erlöse und Kosten für Biomethan aus Abfall- und Reststoffen (Quelle: EDEL 2014)

Tab. 1: THG-Bilanz – ausgewählte Standardwerte gemäß Erneuerbare-Energien-Richtlinie (Amtsblatt der Europäischen Union 2009)

Biokraftstoff Rohstoff	Biodiesel			Biomethan		Bioethanol	
	Raps	Palmöl	Altspeiseöle	Abfall	Exkremente	Zucker- rüben	Weizen
THG-Vermeidung [%]	38	37–56	83	73	81–82	52	47

Alternativ zu Standardwerten können auch spezifische Treibhausgasberechnungen durchgeführt werden. So kann zum Beispiel durch den Einsatz von erneuerbaren Energien bei der Bereitstellung der Prozessenergie oder der Emissionseinsparung durch Substitution von Kohlendioxid in anderen Verfahren (Gewächshäusern) die THG-Bilanz verbessert werden. Andere Optionen sind z. B. Verbesserungen der Abwärmenutzung, Änderung des Düngemiteleinsatzes und die Verringerung des Energiebedarfs.

Einige der genannten Maßnahmen sind mit hoher Wahrscheinlichkeit kostendeckend umsetzbar. Es ist daher wahrscheinlich, dass die durchschnittlichen Treibhausgasemissionen der Biokraftstoffe zukünftig noch über das Niveau von 2013 (50,7 Prozent) steigen werden. Der Wettbewerbsvorteil von Biomethan aus Rest- und Abfallstoffen ist demnach eine um den Faktor 1,4 bis 1,6 bessere Treibhausgasbilanz gegenüber dem durchschnittlichen Treibhausgasvermeidungspotenzial. Im Vergleich zur doppelten Anrechenbarkeit ändert sich die Wettbewerbssituation von Biomethan, im Rahmen der Treibhausgasvermeidungsquote, nicht eindeutig in die eine oder andere Richtung.

4.1.2 Zukünftig: Verbesserung der Treibhausvermeidungsbilanz

Eine große Chance zur Verbesserung der Treibhausgasbilanz besteht für Biomethan in der Kombination mit einer Power-to-Gas(PtG)-Anlage. Dabei kann das bei einer Biogasaufbereitung gewonnene hochreine Kohlendioxid zur Methanisierung von Wasserstoff, der bei der Elektrolyse von überschüssigem Strom entsteht, genutzt werden. Die ersten Anlagen dieser Art haben den Betrieb aufgenommen. Wie hoch zusätzliche Treibhausgaseinsparungen dadurch zukünftig sein können, gilt es noch zu evaluieren.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Die Einführung einer Treibhausgasvermeidungsquote seit 1.1.2015 verstärkt zukünftig die Bedeutung des Treibhausgasvermeidungspotenzials im Wettbewerb um die Quotenerfüllung. Biomethan aus Rest- und Abfallstoffen besitzt ein vergleichbar hohes Treibhausgasvermeidungspotenzial. Im Vergleich zur doppelten Anrechenbarkeit entsteht dadurch allerdings zunächst kein entscheidender Wettbewerbsvorteil für Biomethan. Es sei

denn, es können kostengünstig zusätzliche Treibhausgasminderungspotenziale wie zum Beispiel die Verwendung des Kohlendioxids in einer PtG-Anlage erschlossen werden.

Entscheidend bleibt wie bisher auch die Entwicklung des Verhältnisses zwischen Diesel- und Biodieselpreis. Letzterer wird theoretisch steigen, wenn der Bedarf an Biokraftstoffen steigt. Ob und in welchem Maß der Biokraftstoffbedarf zunimmt, hängt wesentlich von der Entwicklung der durchschnittlichen Treibhausgasbilanz ab. Dies ist allerdings mit hoher Unsicherheit behaftet.

Abgesehen von der guten Treibhausgasbilanz verursacht Biomethan aber auch deutlich weniger lokale Emissionen (z.B. Feinstaub) als der Einsatz von flüssigen Kraftstoffen in Otto- oder Dieselmotoren. Viele Kommunen und Städte setzen genau deshalb im Bereich des öffentlichen Personennahverkehrs auf Erdgas und Biomethan. In verflüssigter Form sind Biomethan und Erdgas auch eine interessante Option für den Straßengüterverkehr. Insofern ist die zukünftige Entwicklung der Erdgasmobilität ein weiterer wichtiger Faktor für die Absatzpotenziale von Biomethan in Deutschland.

Literatur

- Amtsblatt der Europäischen Union (2009): Richtlinie 2009/28/EG Des Europäischen Parlaments und des Rates vom 23. April 2009 zur Förderung der Nutzung von Energie aus erneuerbaren Quellen und zur Änderung und anschließenden Aufhebung der Richtlinien 2001/77/EG und 2003/30/EG
- BLE (2014): Evaluation und Erfahrungsbericht für das Jahr 2013 – Biomassestrom-Nachhaltigkeitsverordnung, Biokraftstoff-Nachhaltigkeitsverordnung, Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung (Hg.), Bonn
- BMWi (2015): Zeitreihen zur Entwicklung der Erneuerbaren Energien in Deutschland, Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (Hg.), Berlin
- BNetzA (2014): Biogas-Monitoringbericht 2014, Bundesnetzagentur, Bonn
- Boerse.de (2014): Diesel Realtimekurs in Euro je Tonne. <http://www.boerse.de/rohstoffe/Diesel/XC0009677813>, Zugriff am 25.02.2014.
- dena (2014): 2. Zwischenbericht Initiative Erdgasmobilität, Deutsche Energie-Agentur (Hg.), Berlin
- dena (2015): Treibhausgasminderungsquote und Korridor THG-Minderungsquote, Deutsche Energie-Agentur (Hg.), Berlin
- Edel, M. (2014): THG-Vermeidungsquote – Vortrag im Rahmen der Arbeitsgruppe Kraftstoffe der dena-Biogaspартnerschaft am 04.03.2014 in Berlin
- erdgas mobil (2015): Daten bereitgestellt durch erdgas mobil GmbH, Stand Januar 2015
- KBA (2015): Neuzulassungsbarometer im Dezember 2014, Kraftfahrzeugbundesamt
- STX Services (2014): STX Market update February 24, 2014

Regionaler Nährstoffausgleich – Ergebnisse des Projekts „Bauernhof Niedersachsen“

LUDWIG THEUVSEN, WELF GUENTHER-LÜBBERS

1 Ausgangssituation

Hinsichtlich der Nährstoffsituation ist Niedersachsen grob zweigeteilt. Auf der einen Seite stehen die durch eine intensive landwirtschaftliche Nutztierhaltung gekennzeichneten Regionen im westlichen Niedersachsen; in den viehstarken Landkreisen wie Cloppenburg, Emsland, Grafschaft Bentheim, Oldenburg, Osnabrück und Vechta sind deutliche Nährstoffüberschüsse zu verzeichnen (LWK Niedersachsen 2015). Schwierigkeiten bei der Einhaltung der gesetzlich zulässigen Ausbringungsmengen bereitet in erster Linie das Phosphat (P_2O_5), gefolgt vom Stickstoff (N). Verschärft worden ist die Situation durch den unter dem Einfluss des Erneuerbare-Energien-Gesetzes (EEG) zwischenzeitlich stark forcierten Ausbau der Biogasproduktion (WÜSTHOLZ 2014). Durch den vermehrten Anbau von Energiepflanzen für Biogasanlagen stiegen die Futtermittel- und damit die Nährstoffimporte. Darüber hinaus sanken die wirtschaftlichen Anreize zum Export von transportwürdigen Wirtschaftsdüngern, insbesondere Geflügelmist. In der Veredelungsregion ist in der Folge ein deutlicher Nährstoffüberhang von bis zu 54 kg P_2O_5 /ha LF (Landwirtschaftlich genutzte Fläche) aus tierischen Ausscheidungen und Gärresten zu verzeichnen. Aus den Landkreisen mit Nährstoffüberschüssen müssten gegenwärtig insgesamt rund 33.000 t Phosphat pro Jahr exportiert werden, um die geltenden rechtlichen Rahmenbedingungen für die Ausbringung von Wirtschaftsdüngern einhalten zu können (LWK Niedersachsen 2015). Sollte es, z.B. durch die Novellierung der Düngeverordnung, zu einer weiteren Verschärfung der gesetzlichen Rahmenbedingungen kommen, würden die in andere Regionen zu exportierenden Nährstoffmengen weiter ansteigen (WÜSTHOLZ 2014).

Auf der anderen Seite sind in den Ackerbauregionen im südlichen und östlichen Niedersachsen erhebliche Nährstoffdefizite zu verzeichnen, die überwiegend mit mineralischen Düngemitteln ausgeglichen werden. Unter Nachhaltigkeitsgesichtspunkten ist dies kritisch zu beurteilen. Die Produktion von Stickstoffdüngemitteln ist außerordentlich energieintensiv und mit entsprechend großen Emissionen klimarelevanter Gase verbunden (WEGENER und THEUVSEN 2010). Die weltweiten Phosphatreserven wiederum sind endlich; die Reichweite der zu vertretbaren Kosten ausbeutbaren Lagerstätten wird nur noch auf etwa 115 Jahre geschätzt (ELSNER 2008).

Die skizzierte Ausgangssituation lässt ein großes Potenzial für einen überregionalen Nährstoffausgleich durch den Transport von Wirtschaftsdüngern aus Veredelungs- in Ackerbauregionen erkennen. Allerdings sind flüssige Wirtschaftsdünger nur wenig transportwürdig (KTBL 2013). Eine Möglichkeit zur Erhöhung der Transportwürdigkeit besteht darin, die Gülle zu separieren, um die Nährstoffdichte zu erhöhen und die transportierte Nährstoffmenge zu vergrößern (BRAUCKMANN et al. 2014). Durch die Separation entstehen eine feste und eine dünne Güllefraktion. Die feste Fraktion hat eine wesentlich höhere Nährstoffdichte als normale Gülle und ist daher deutlich transportwürdiger. Zudem handelt es sich um einen Feststoff, der ähnlich wie Geflügelmist mit Abschiebe- oder Kipp-LKWs transportiert werden kann, für die eher Rückfracht zur Verfügung steht. Eine zweite Möglichkeit besteht darin, aus viehdichten Regionen importierte Wirtschaftsdünger zunächst in Biogasanlagen einzusetzen und erst dann als Teil der Gärreste auf Ackerflächen auszubringen. Für die Nutzung dieser Systemdienstleistung (HÖHER 2014) der Biogasproduktion wird ein erhebliches Potenzial erkennbar, da in niedersächsischen Ackerbauregionen etwa 150 Anlagen bislang allein auf NawaRo-Basis betrieben werden. Weitere rund 340 Anlagen setzen gerade so viel Wirtschaftsdünger ein, dass der Güllebonus nach dem EEG 2009 aktiviert werden kann (Kompetenzzentrum 3N 2012). In diesen Anlagen könnte der Wirtschaftsdüngeranteil erhöht werden.

Um die Möglichkeiten einer nachhaltigen Biomassenutzung in Biogasanlagen auf Grundlage der Wirtschaftsdüngerpotenziale in Niedersachsen ausloten zu lassen, hat das Niedersächsische Ministerium für Ernährung, Landwirtschaft, Verbraucherschutz und Landesentwicklung das Projekt „Bauernhof Niedersachsen“ initiiert. In diesem Projekt haben verschiedene Arbeitsgruppen an den Universitäten Göttingen und Osnabrück mit dem Ziel zusammengearbeitet, die umfassende Nutzung von Wirtschaftsdüngern in Biogasanlagen in Ackerbauregionen unter rechtlichen, ökonomischen und ökologischen Gesichtspunkten zu analysieren. Niedersachsen wird dabei gleichsam als ein großer Bauernhof betrachtet, auf dessen Flächen der erforderliche Nährstoffausgleich herbeigeführt wird. In den folgenden Kapiteln werden ausgewählte Ergebnisse der Zusammenarbeit vorgestellt.

2 Wirtschaftsdüngerpotenziale und Gülleseparation

In Niedersachsen fielen 2013/14 insgesamt 47,6 Mio. t Dung aus der landwirtschaftlichen Nutztierhaltung an. Gegenüber dem Vorjahr bedeutete dies einen Anstieg um 734.000 t. Davon entfielen rund 38,8 Mio. t auf Gülle und 8,8 Mio. t auf Mist und Jauche. 2,76 Mio. t Wirtschaftsdünger und damit 538.000 t mehr als im Vorjahr wurden überregional verbracht, überwiegend aus der Weser-Ems-Region in andere Landesteile.

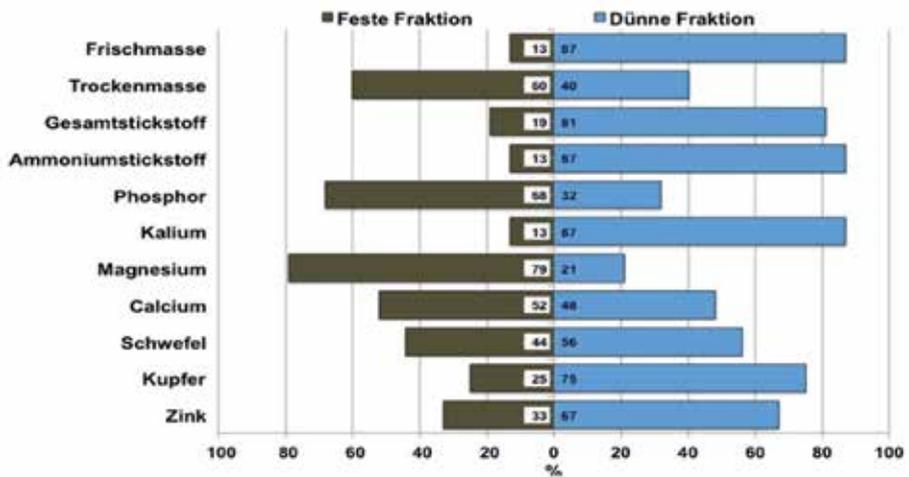


Abb. 1: Abtrennungsgrade Schweinegülle beim Einsatz einer Dekanterzentrifuge (Quelle: Brauckmann 2013)

Insbesondere die Verbringung von Hühnertrockenkot und Geflügelmist aus den Überschusskreisen zur Bioenergieerzeugung oder Düngung ist aufgrund des großen Biogaspotenzials und der hohen Nährstoffgehalte sowie der daraus resultierenden vergleichsweise hohen Transportwürdigkeit gängige Praxis (LWK Niedersachsen 2015). Für flüssige Wirtschaftsdünger werden dagegen zur Verminderung des Wassergehaltes und damit Verbesserung der Transportwürdigkeit verschiedene Möglichkeiten zur Gülleseparation diskutiert. Die wichtigsten Verfahren sind der Einsatz von Pressschneckenseparatoren und Dekanterzentrifugen. Beim Einsatz von Dekantern wird ein sehr guter Abscheidegrad bei Phosphor erzielt (Abb. 1). Da das Phosphat im Vordergrund der Nährstoffproblematik steht, wird nachfolgend von der Anwendung der Dekantertechnik ausgegangen.

Betrachtet man den Nährstoffanfall in viehdichten Regionen, so wird deutlich, dass die Phosphatsalden in den Schwerpunktregionen der Milcherzeugung in etwa ausgeglichen sind, während die veredelungsstarken Landkreise hohe Phosphatüberschüsse aufweisen. Unter dem Gesichtspunkt des überregionalen Nährstoffausgleichs müssen daher die Separierung der Schweinegülle und die anschließende Verbringung der festen Fraktion im Vordergrund stehen. Würde der gesamte Geflügelmist aus der Veredelungsregion überregional verbracht, verbliebe noch ein Restüberschuss von etwa 13.500 t Phosphat. Aufgrund der hohen Phosphatabscheidung der Dekantertechnik könnte die zu transportierende Phosphatmenge von 13.500 t im Jahr mit nur 0,8 Mio. t Güllefeststoff realisiert werden. Damit reduzierte sich der Transportaufwand auf ein Fünftel gegenüber der Rohgülle. Allerdings müsste dazu ein großer Teil der in der Region anfallenden Schweinegülle separiert werden (GUENTHER-LÜBBERS et al. 2014a).

3 Rechtliche Rahmenbedingungen

Beim Einsatz von Wirtschaftsdüngern in Biogasanlagen sind bau-, veterinär- und transportrechtliche Vorgaben zu beachten (GUENTHER-LÜBBERS et al. 2014b).

Die Umstellung einer NawaRo- auf eine Gülle-NawaRo-Biogasanlage stellt eine wesentliche Nutzungsänderung dar. Daher ist eine Änderungsgenehmigung erforderlich. Unterschieden werden muss in diesem Zusammenhang wiederum zwischen Anlagen, bei denen eine Genehmigung gemäß Bundes-Immissionsschutzgesetz (BImSchG) notwendig ist, und kleineren Anlagen, die nach Baugesetzbuch (BauGB) genehmigt worden sind. Im zweiten Fall ist bei einer Erweiterung der Lagerkapazität für die Gärreste nur eine Baugenehmigung für das Lager notwendig (LOIBL 2014).

Biogasanlagen, welche bereits Gülle einsetzen oder diese zukünftig als Substrat einsetzen möchten, haben zahlreiche veterinärrechtliche Vorschriften zu beachten, da sie dem Tierische-Nebenprodukte-Recht unterliegen. Unter anderem sind die folgenden Rechtsvorschriften zu beachten:

- Kreislaufwirtschaftsgesetz (KrWG)
- Verordnung (EG) Nr. 1069/2009 mit Hygienevorschriften für nicht für den menschlichen Verzehr bestimmte tierische Nebenprodukte
- Durchführungsverordnung (EU) Nr. 142/2011
- Tierische Nebenprodukte-Beseitigungsgesetz (TierNebG)
- Tierische Nebenprodukte-Beseitigungsverordnung (TierNebV)
- Schweinehaltungshygieneverordnung (SchHaltHygV).

Eine Gülle-NawaRo-Biogasanlage ist nach Art. 24 der VO (EG) 1069/2009 zulassungspflichtig; der Betreiber unterliegt der Informationspflicht. Die Zulassung wird von der jeweiligen Landesbehörde erteilt (MAHNKEN 2014). VO (EG) 1069/ 2009 unterscheidet in Abhängigkeit von der Gefahr, die von tierischen Nebenprodukten für die Gesundheit von Mensch und Tier ausgeht, drei Risikokategorien; Wirtschaftsdünger fallen in Kategorie 2; ihr Einsatz in Biogasanlagen ist ohne vorherige Pasteurisierung zulässig.

Der überregionale Transport von Gülle wird durch die Verordnung über das Inverkehrbringen und Befördern von Wirtschaftsdüngern (WDüngV) geregelt. Diese Verbringungsverordnung ergänzt die Anforderungen der Düngemittelverordnung (DüMV) und der Düngeverordnung (DüV) und ist von Tierhaltern, Biogasanlagenbetreibern und am Nährstofftransport beteiligten Lohnunternehmern und Händlern einzuhalten. Jeder, der Wirtschaftsdünger gewerbsmäßig in Verkehr bringt, muss sich bei der zuständigen Behörde vor der erstmaligen Tätigkeit registrieren lassen. Die Verbringungsverordnung macht durch umfangreiche Dokumentationspflichten die Nährstofftransporte nachvollziehbar. Die abgebenden Betriebe, die Beförderer und die aufnehmenden Betriebe müssen Aufzeichnungen in Form von Nährstofflieferscheinen über die Verbringung und den

Empfang von Wirtschaftsdüngern führen. Falls die empfangenen Wirtschaftsdünger aus einem anderen Bundesland stammen, ist dies der zuständigen Behörde bis zum 31. März des Folgejahres zu melden (LWK NRW 2014). Die Wirtschaftsdünger abgebenden Betriebe sind dazu verpflichtet, die zuständige Behörde über die Nährstofflieferungen zu informieren. Seit dem Jahr 2012 müssen die Meldungen in Niedersachsen im Internet mit dem Meldeprogramm der Landwirtschaftskammer Niedersachsen durchgeführt werden.

Zur Reduktion der Transportkosten werden zunehmend Fahrzeuge eingesetzt, die sowohl Gülle als auch z. B. Getreide transportieren können. Aus hygienischen Gründen verfügen diese sogenannten „Duoliner“ oder „Kombiliner“ über voneinander getrennte Ladekammern, sodass kein Wirtschaftsdünger im selben Laderaum transportiert wird wie z. B. Futtermittel. Die Zertifizierung dieser Transportfahrzeuge nach GMP+-Standard ist möglich. Die Reinigung der Fahrzeuge nach jedem Transportvorgang muss dokumentiert werden; vor jedem Beladen mit Getreide ist eine optische Kontrolle der Ladefläche durchzuführen (BIELEFELD 2014).

Insgesamt vollziehen sich der Transport von Wirtschaftsdüngern und ihr Einsatz in Biogasanlagen in einem engen rechtlichen Rahmen. Unüberwindbare rechtliche Hürden stehen dem Einsatz von Wirtschaftsdüngern in Biogasanlagen aber nicht entgegen.

4 Wirtschaftlichkeitsbetrachtung

4.1 Planungsannahmen

Zwecks Analyse der Wirtschaftlichkeit des Wirtschaftsdüngereinsatzes in NawaRo-Biogasanlagen wird beispielhaft eine bereits von SCHMEHL et al. (2012) ökobilanziell bewertete, 2005 in Betrieb gegangene und dementsprechend nach dem EEG 2004 vergütete Anlage in Südniedersachsen betrachtet. Aufgrund ihrer Lage kommt für diese Anlage der Bezug von Wirtschaftsdüngern aus der Weser-Ems-Region in Betracht. Die installierte elektrische Leistung beträgt $2 \times 300 \text{ kW}_{el}$; die beiden Blockheizkraftwerke werden zwecks Optimierung der Vergütung als eigenständige Anlagen betrieben. Jährlich werden 5.086 MWh elektrische Energie und 5.120 MWh Wärmeenergie erzeugt. Die Anlage verfügt über ein Reaktorvolumen von 4.400 m^3 im Hauptfermenter und Nachgärer. Entsprechend den Einsatzstoffen, der Rationsgestaltung und der zum Einsatz gelangenden Eintrags-, Rühr- und Pumptechnik beträgt die durchschnittliche Verweilzeit in der Anlage 134 Tage. Das angeschlossene Gärrestlager hat ein Volumen von 4.500 m^3 . Die anfallende Wärme wird zur Trocknung von Getreide, Körnermais und Scheitholz verwendet. Die Anlage erhält den Technologiebonus für die Trockenfermentation (TF-Bonus) nach dem EEG 2004 und setzt Maissilage (8.040 t; 67 %), Getreide-Ganzpflanzensilage (GPS), Zuckerrüben (je 1.800 t bzw. 15 %) und Getreidekörner (360 t; 3 %) ein.

Im Zuge der Analyse der Wirtschaftlichkeit des Wirtschaftsdüngereinsatzes sind verschiedene Szenarien betrachtet worden (Tab. 1):

- Einsatz von unseparierter Schweinegülle im Umfang von 33 Masse-% als Ersatz für (a) Energiemais oder (b) Getreide-Ganzpflanzensilage.
- Einsatz von Schweinegülle-Dekanter im Umfang von 33 Masse-% als Ersatz für (a) Energiemais oder (b) Getreide-Ganzpflanzensilage und Getreidekörner.
- Ersatz aller bislang zum Einsatz gelangenden Substrate durch Schweinegülle-Dekanter.
- Einsatz von 33 Masse-% Geflügelmist als Ersatz von (a) Energiemais oder (b) Getreide-Ganzpflanzensilage, Getreidekörner und Energiemais.

Zusätzlich wurde die Erhöhung des Wirtschaftsdüngereinsatzes in Biogasanlagen, die bereits Wirtschaftsdünger einsetzen, von 33 auf 50 Masse-% für (a) unseparierte Schweinegülle, (b) Schweinegülle-Dekanter sowie (c) Geflügelmist wirtschaftlich bewertet. In den Berechnungen wird davon ausgegangen, dass die Wirtschaftsdünger aus einer Entfernung von 150 km zur Biogasanlage transportiert werden und bei Inkaufnahme eines Umwegs von 50 km eine Beladung für die Rückfahrt zur Verfügung steht. Im Falle des Einsatzes flüssiger Schweinegülle wird angenommen, dass die abgebenden viehhaltenden Betriebe die Gülle frei Biogasanlage zur Verfügung stellen. Im Falle der Separierung der Schweinegülle tragen die viehhaltenden Betriebe annahmegemäß die Separierungskosten, während die Transportkosten in Höhe von 12 € pro Tonne vom Betreiber der Biogasanlage übernommen werden.

4.2 Investitionen, Ertrags- und Aufwandseffekte

Mit der Umstellung einer NawaRo- auf eine Gülle-NawaRo-Biogasanlage sind verschiedene bauliche Veränderungen verbunden, um die bau- und veterinärrechtlichen Voraussetzungen für den Einsatz flüssiger oder fester Wirtschaftsdünger zu schaffen sowie den erhöhten logistischen Anforderungen gerecht zu werden. Investitionskosten fallen insbesondere für die Einfriedung der Anlage, eine automatische Toreinfahrt, eine Waageeinrichtung, den Ausbau der Infrastruktur auf der Anlage, Planungs-, Gutachten- und Genehmigungsverfahren, die Schaffung eines ausreichend großen Lagers für flüssige oder feste Wirtschaftsdünger sowie Veränderungen entlang der Gärstrecke (je nach eingesetztem Wirtschaftsdünger, Modifizierung der Eintragstechnik, zusätzliche Heizeinheit im Hauptfermenter, Nassvermahlungseinheit oder Vergrößerung des Gärsubstratlagerolumens) an. Insgesamt unterscheiden sich die betrachteten Szenarien erheblich hinsichtlich der erforderlichen Zusatzinvestitionen. Generell sind die Investitionen bei einer Erhöhung des Wirtschaftsdüngeranteils von 30 auf 50 Masse-% geringer als bei Umrüstung einer NawaRo-Anlage auf den erstmaligen Einsatz von Wirtschaftsdüngern, da Teile der notwendigen Technik bereits vorhanden sind (Tab. 1).

Neben den notwendigen Investitionen sind auch Veränderungen der Kosten und Leistungen durch Umstellung des Anlagenbetriebs zu berücksichtigen. Hinsichtlich der Leistungen ergeben sich – wiederum zum Teil in Abhängigkeit vom eingesetzten Wirtschaftsdünger – Effekte aufgrund des Wegfalls des Technologiebonus für die Trockenfermentation, der Möglichkeit der Aktivierung des Güllebonus sowie der Erzielung zusätzlicher Erlöse für Gärsubstrate. Die Fixkosten der Anlage verändern sich durch erhöhte Abschreibungen, die Verzinsung des höheren eingesetzten Kapitals, steigende Versicherungsprämien und höhere Lohnkosten aufgrund eines größeren Arbeitszeitbedarfs. Veränderungen der variablen Kosten resultieren vorwiegend aus der – in unterschiedlichem Umfang erfolgenden – Substitution bislang eingesetzter Gärsubstrate (Mais, Ganzpflanzensilage, Getreidekörner) durch Wirtschaftsdünger.

Tabelle 1 stellt die Investitionssummen und kalkulatorischen Gewinnbeiträge der betrachteten Szenarien im Überblick dar. Den Bezugspunkt für die angegebene Veränderung der Gewinnbeiträge stellt jeweils die Ausgangssituation der betrachteten Biogasanlage ohne bzw. mit 33 Masse-% Einsatz von Wirtschaftsdünger dar. Es wird deutlich, dass der Einsatz unseparierter Schweinegülle selbst unter der Annahme, dass die Gülle frei Biogasanlage durch die abgebenden landwirtschaftlichen Betriebe bereitgestellt wird, im Beispielfall finanziell unattraktiv ist. Aus dem Einsatz von Schweinegülle-Dekanter resultieren dagegen unter den Annahmen, die der Wirtschaftlichkeitsanalyse zugrunde lagen, erhebliche positive Gewinnbeiträge. Am attraktivsten ist der Einsatz des sehr nährstoff- und energiereichen Geflügelmists. Allerdings wird dieser bereits zu erheblichen Teilen überregional verbracht. Eine deutlich ansteigende Nachfrage nach diesem Substrat durch Biogasanlagen in Ackerbauregionen könnte daher vermutlich nicht oder nur zu erheblich höheren Kosten aufgrund anziehender Preise bei zunehmender Verknappung bedient werden. Im größeren Umfang kann unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten ein überregionaler Nährstoffausgleich daher nur durch Einsatz der festen Fraktion separierter Schweinegülle erreicht werden (GUENTHER-LÜBBERS et al. 2014a).

Tab. 1: Investitionssummen und kalkulatorische Gewinnbeiträge der betrachteten Szenarien (Guenther-Lübbers et al. 2014a)

Szenario		WD-Einsatz 33 % (a: Ersatz von Mais)	WD-Einsatz 33 % (b: Ersatz von GPS, Getreidekörner, ggf. Mais)	WD-Einsatz 100 % (Ersatz aller Substrate)	WD-Einsatz 50 % statt 30 %
1 Schweine- gülle	Investitions- summe	482.180 €	482.180 €	---	272.000 €
	kalk. Gewinnbeitrag	-17.229 €	-12.976 €	---	-2.741 €
2 Schweine- gülle- Dekanter	Investitions- summe	398.600 €	398.600 €	1.440.000 €	261.000 €
	kalk. Gewinnbeitrag	110.439 €	121.408 €	96.342 €	13.238 €
3 Geflügel- mist	Investitions- summe	403.600 €	390.600 €	---	42.250 €
	kalk. Gewinnbeitrag	177.834 €	207.078 €	---	50.732 €

5 Ökologische Betrachtung

Das Projekt „Bauernhof Niedersachsen“ schloss auch eine Analyse der ökologischen Wirkungen des Einsatzes von Wirtschaftsdüngern in Biogasanlagen in Ackerbauregionen ein. Diese erstreckte sich zum einen auf die Betrachtung der Wirkungskategorien „Klimawandel“ und „Versauerung“ für die im Rahmen des Projekts betrachteten Szenarien. Klimaeffekte wurden durch Ermittlung der Auswirkungen des Einsatzes von Wirtschaftsdüngern auf die Emissionen klimarelevanter Gase bewertet (Maßeinheit: CO₂-Äquivalent). Die Versauerung geht dagegen maßgeblich auf die Emissionen von Stickoxiden, Ammoniak und Schwefeldioxid zurück (Maßeinheit: SO₂-Äquivalent). Die Berechnungen ergaben, dass der Einsatz von Wirtschaftsdüngern in NawaRo-Biogasanlagen im Umfang von 33 Masse-% bzw. die Erhöhung des Wirtschaftsdüngeranteils von 33 auf 50 Masse-% erhebliche ökologische Vorteile aufweist. Einzelheiten können dem Beitrag von GELDERMANN et al. entnommen werden.

Neben den genannten Wirkungskategorien wurde auch der mögliche Beitrag der verschiedenen Szenarien zu einem überregionalen Nährstoffausgleich betrachtet. Im Mittelpunkt stand dabei das Phosphatreduktionspotenzial in den Überschussregionen durch Einsatz von Wirtschaftsdüngern in Biogasanlagen in Ackerbauregionen. Dabei zeigte sich, dass der Einsatz flüssiger Schweinegülle (33 Masse-%) nur in bisherigen NawaRo-Anlagen den bestehenden Phosphatüberschuss (etwa 33.000 t pro Jahr) nur um rund 8,5 % mindern würde. Der Einsatz von Schweinegülle Schweinegülle-Dekanter (33 Masse-%)

würden dagegen bereits zu einer Minderung des Phosphatüberschusses um fast 40 % führen. Würden darüber hinaus auch noch das Exportpotenzial bei Geflügelmist weitgehend ausgeschöpft und der Wirtschaftsdüngeranteil in den Biogasanlagen in Ackerbauregionen, die bereits Wirtschaftsdünger einsetzen, von 33 auf 50 Masse-% erhöht, wäre der vollständige Abbau der Phosphatüberschüsse in der Veredelungsregion möglich.

6 Handlungsempfehlungen

Aus der Studie „Bauernhof Niedersachsen“ wird ein erhebliches Potenzial zur Realisierung eines überregionalen Nährstoffausgleichs ersichtlich. Die rechtlichen und ökonomischen Rahmenbedingungen stehen einer Erschließung dieses Potenzials nicht im Wege. Ganz im Gegenteil: NawaRo-Biogasanlagen in Ackerbauregionen können unter den der Studie zugrunde gelegten Annahmen ihre Rentabilität durch den Einsatz von Wirtschaftsdüngern nachhaltig steigern. Dies gilt zumindest dann, wenn feste Wirtschaftsdünger wie Schweinegülle-Dekanter oder Geflügelmist eingesetzt werden. Ohne Separierung ist die Nutzung von Schweinegülle dagegen finanziell unattraktiv. Unter ökologischen Gesichtspunkten ist die stärkere Nutzung von Wirtschaftsdüngern in NawaRo-Anlagen unter den Aspekten Klimaschutz, Versauerung und Ausgleich von Nährstoffüberschüssen sehr positiv zu beurteilen. Trotzdem werden die sich bietenden Möglichkeiten eines überregionalen Nährstoffausgleichs bislang nur unzureichend genutzt. Dafür sind, wie etwa die empirische Studie von KRÖGER et al. (2014) gezeigt hat, vor allem Akzeptanzdefizite auf Seiten der Anlagenbetreiber verantwortlich. Hinzu kommt, dass viele Biogasanlagen bereits seit Längerem in Betrieb sind und daher der Zeitraum, für den noch eine garantierte Einspeisevergütung nach dem EEG gezahlt wird, zum Teil deutlich unter 20 Jahre liegt. Größere Investitionen in eine Umrüstung der Anlagen werden dann möglicherweise aus Risikogründen nicht durchgeführt. Aus diesen Befunden ergeben sich die folgenden Handlungsempfehlungen an den Gesetzgeber bzw. die öffentliche Verwaltung:

- Prüfung einer Verlängerung der Fristen, für die auf Wirtschaftsdüngernutzung umstellende Biogasanlagen noch eine garantierte Einspeisevergütung erhalten.
- Finanzielle Förderung von Maßnahmen zur Erhöhung der Energiedichte von Wirtschaftsdüngern, speziell von Techniken zur Gülleseparation.
- Ausdehnung der – bislang auf Betriebe, die maximal 40 km voneinander entfernt liegen, begrenzten – Regelung des § 51a Bewertungsgesetz auf den überregionalen Nährstoffausgleich.
- Verstärkte Bereitstellung von Informationen zum Wirtschaftsdüngereinsatz in Biogasanlagen zwecks Überwindung von Akzeptanzdefiziten.
- Vereinheitlichung der Anwendung bau- und veterinärrechtlicher Regelungen.

Literatur

- Bielefeld, K. (2014): Agentur Klare Konzepte. GMP+ Zertifizierung von Transportfahrzeugen. Experteninterview. Hamburg
- Brauckmann, H.-J. (2013): Alternative Bioenergie-Rohstoffe in Biogas-Wertschöpfungsketten. Vortrag im Rahmen des Workshop Bioenergie-Regionen „Probleme und Lösungsansätze bei der Etablierung alternativer Bioenergie-Rohstoffe“, Nienburg, 17.-18.09.2013
- Brauckmann, H.-J.; Hering, J.; Broll, G. (2014): Nährstoffgehalte und Biogaserträge separierter Gülle. In: Guenther-Lübbers, W.; Kröger, R.; Theuvsen, L. (Hrsg.): Nährstoffmanagement von Wirtschaftsdüngern und Gärresten – Ökonomie, Ökologie, Technik und Logistik, Göttingen, S. 43-56
- Elsner, H. (2008): Stand der Phosphat-Reserven weltweit. Vortrag im Rahmen der Braunschweiger Nährstofftage, November 2008
- Geldermann, J.; Hesse, M.; Garbs, M.; Schmehl, M. (2015): Auswirkungen der Biogastechnologie aus ökologischer Sicht. In: Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft. (Hrsg.): KTBL/FNR-Kongress Biogas in der Landwirtschaft – Stand und Perspektiven, Darmstadt. S. 30-41
- Guenther-Lübbers, W.; Garbs, M.; Brauckmann, H. J.; Geldermann, J.; Broll, G.; Theuvsen, L. (2014a): Nachhaltige Biomassenutzung in Biogasanlagen auf der Grundlage der Wirtschaftsdüngerpotenziale in Niedersachsen („Bauernhof Niedersachsen“). Studie im Auftrag des Ministeriums für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz, Hannover
- Guenther-Lübbers, W.; Diekmann, A.; Theuvsen, L. (2014b): Rechtliche und ökonomische Aspekte des Einsatzes von Wirtschaftsdüngern in Biogasanlagen – Eine Szenarioanalyse. In: Guenther-Lübbers, W.; Kröger, R.; Theuvsen, L. (Hrsg.): Nährstoffmanagement von Wirtschaftsdüngern und Gärresten. Ökonomie, Ökologie, Technik und Logistik, Göttingen, S. 81-103
- Höher, G.C. (2014): Landwirtschaftliche Biogaserzeugung in Niedersachsen: Systemdienstleistungen durch Biogas und Synergien in der Landwirtschaft. In: Guenther-Lübbers, W.; Kröger, R.; Theuvsen, L. (Hrsg.): Nährstoffmanagement von Wirtschaftsdüngern und Gärresten – Ökonomie, Ökologie, Technik und Logistik, Göttingen, S. 1-8
- Kompetenzzentrum 3N (2012): Biogasinventur 2012, Werlte, unveröffentlicht
- Kröger, R.; Theuvsen, L.; Konerding, J.R. (2014): Güllefeststoffe als Gärsubstrat für Biogasanlagen – Ergebnisse einer empirischen Erhebung unter Biogasanlagenbetreibern. Berichte über Landwirtschaft 92(3)
- KTBL (Hg.) (2013): Faustzahlen Biogas, Darmstadt
- Loibl, H. (2014): Fachanwalt für Verwaltungsrecht. Experteninterview. Regensburg
- LWK Niedersachsen (2015): Nährstoffbericht in Bezug auf Wirtschaftsdünger für Niedersachsen 2013/2014, Oldenburg
- LWK NRW (2014): Erläuterungen zur Verbringungsverordnung für Wirtschaftsdünger. <http://www.landwirtschaftskammer.de/landwirtschaft/ackerbau/duengung/duengeverordnung/vvoartikel.htm>, Zugriff am 13.2.2014
- Mahnken, M. (2014): Niedersächsisches Landesamt für Verbraucherschutz und Lebensmittelsicherheit. Experteninterview. Oldenburg

- Schmehl, M.; Hesse, M.; Geldermann, J. (2012): Ökobilanzielle Bewertung von Biogasanlagen unter Berücksichtigung der niedersächsischen Verhältnisse. Research Paper Nr.11, Wirtschaftswissenschaftliche Fakultät, Georg-August-Universität Göttingen
- Wegener, J.; Theuvsen, L. (2010): Handlungsempfehlungen zur Minderung von stickstoffbedingten Treibhausgasemissionen in der Landwirtschaft. Studie im Auftrag des WWF. Berlin
- Wüstholtz, R.F. (2014): Ökologische Erfordernisse und ökonomische Auswirkungen ordnungsrechtlicher Veränderungen bezüglich des Nährstoffeinsatzes in der Landwirtschaft im Kontext der europäischen Nitrat- und Wasserrahmenrichtlinie. Dissertation, Universität Hohenheim

Wirtschaftsdünger und Gärprodukte – Eigenschaften im Kontext der Biogaserzeugung und Düngung

GERD REINHOLD, WILFRIED ZORN

1 Problemstellung

Wirtschaftsdünger fallen als Nebenprodukte der Tierhaltung an und wurden schon immer zur Düngung und Erhaltung der Bodenfruchtbarkeit in den landwirtschaftlichen Stoffkreislauf zurückgeführt. Unterschieden werden flüssige (Gülle und Jauche) und feste Wirtschaftsdünger (Stallmist und Geflügeltrockenkot). In Deutschland beträgt der Düngereanfall 152,2 Mio. t/a – davon 110,8 Mio. t Gülle, 9,6 Mio. t Jauche und 31,8 Mio. t Stallmist (SCHULTHEISS et al. 2000). Der Wirtschaftsdüngeranfall ist proportional zum Tierbesatz, sodass deutliche regionale Unterschiede anzutreffen sind. Die Effizienz der Verwertung der Wirtschaftsdünger wird durch die Aufwandmenge bestimmt. Die derzeit gültige Düngeverordnung schreibt hierzu eine Obergrenze von 170 kg N/ha im Betriebsdurchschnitt fest. Die düngungsrelevanten Inhaltsstoffe der Wirtschaftsdünger (WD) lassen sich bei Kenntnis des Trockensubstanzgehaltes relativ gut über Richtwerte beschreiben. Der flächenbezogene Anfall ist somit direkt vom Tierbesatz abhängig. Zur Vereinfachung wird der Parameter Großvieheinheiten (GV)-Besatz angewendet. Aufgrund des hohen GV-Besatzes in den Veredlungsregionen sind z.T. die regionalen Verwertungsmöglichkeiten begrenzt und es muss ein Transport von Nährstoffen aus den Regionen heraus erfolgen.

Mit der Nutzung der Biogastechnologie in der Landwirtschaft und durch das Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG) 2004, welches die Grundlage für den Ausbau des Betriebszweiges Biogas (durch die Möglichkeit des Einsatzes von nachwachsenden Rohstoffen (NawaRo)) darstellt, entstand das neue Düngemittel – Gärprodukt (GP) – das es sinnvoll zu verwerten gilt.

Gärprodukte haben ähnliche Eigenschaften wie Wirtschaftsdünger, variieren aber in den Inhaltsstoffen und ihren Eigenschaften deutlich stärker als die Wirtschaftsdünger. Die Nährstoffgehalte lassen sich relativ gut über die eingesetzten Substrate unter Beachtung des Masseabbaus über die Fugatfaktoren abschätzen. Da der Substrateinsatz in vielen Biogasanlagen (BGA) nicht konstant ist, sollte aber einer Beprobung bei der Ermittlung der Nährstoffgehalte der Vorzug gelassen werden.

Bisher erfolgte trotz ähnlicher Eigenschaften und Wirkungen für Planungs- und Managementzwecke keine Gleichbehandlung von Gärprodukten und Wirtschaftsdüngern. Eine entsprechende Empfehlung zur Anrechnung der Gärprodukte erfolgte schon 2006 durch die TLL (TLL 2006). Mit der in 2015 geplanten Novelle der Düngeverordnung und

Düngegesetz ist die Zusammenfassung von WD und GP geplant, wodurch regional die Obergrenzen deutlich früher erreicht werden und somit auch deutlich mehr Nährstoffe regional umzuverteilen sind.

Mit fast 8.000 landwirtschaftlichen Biogasanlagen in Deutschland sind Gärprodukte sowohl von der Menge als auch von den Inhaltsstoffen keine vernachlässigbaren Düngemittel; es gilt, diese effizient und ohne negative Auswirkungen auf die Umwelt zu verwerten.

2 Inhaltsstoffe und Eigenschaften von Wirtschaftsdünger und Gärprodukten

Thüringen führt seit 2004 ein Biogas-Monitoring durch, in welchem die Inhaltsstoffe der Substrate und Gärprodukte anlagenkonkret ermittelt werden. Das ermöglicht den direkten Vergleich der Wirtschaftsdünger und Gärprodukte (Tab. 1), wobei aber zu beachten ist, dass in Thüringen im Durchschnitt mehr als 70 % WD im Substratmix sind.

Tab. 1: Inhaltsstoffe und Eigenschaften von Biogassubstraten und dem Gärprodukt (Biogas-Monitoring Thüringen)

	n	Inhaltsstoffe					
		TM % der FM	oTM % der TM	N _t % der FM	NH ₄ -N % von N _t	P % der FM	K % der FM
Wirtschaftsdünger							
Rindergülle	99	9,1	80	0,42	48	0,08	0,03
Schweinegülle	28	5,4	74	0,43	73	0,10	0,20
Trockenkot	26	44,0	77	2,22	22	0,65	1,07
Stallmist	34	25,0	85	0,64	15	0,13	0,60
Gärprodukt	125	6,0	72	0,45	67	0,08	0,31
NawaRo							
Maissilage	134	31,5	95,4	0,51	7,4	0,07	0,34
Anweilksilage	64	31,3	89,1	0,92	10,1	0,11	0,74
GPS	17	35,4	93,3	0,75	9,9	0,10	0,60
Getreidekorn	82	84,8	97,5	1,84	0,65	0,33	0,41

Allerdings ist in Tabelle 1 nur der Mittelwert der Gärprodukte dargestellt. Eine höhere Aussagekraft erreicht man, indem man die Gärprodukte vergleichbarer Anlagenfütterung gruppiert. Für Thüringen war folgende Gruppierung sinnvoll:

- BGA mit mehr als 85 % Rindergülle (RG)
- BGA mit mehr als 85 % Schweinegülle (SG)
- BGA mit mehr als 70 % Trockenkot (TK) und Schweinegülle
- BGA mit mehr als 70 % NawaRo.

Die Auswertung der Ergebnisse zeigt eine hohe Variabilität der Gärprodukteigenschaften. Die eingesetzten Substrate beeinflussen die Eigenschaften der Gärprodukte deutlich (Tab. 2). Gärprodukte aus BGA mit überwiegender Gülleeinsatz (> 85 %) sind durch niedrigere TM-Gehalte (5–6 %) im Vergleich zu Produkten aus Anlagen mit überwiegender NawaRo-Einsatz (> 75 %) gekennzeichnet. Deren mittlerer TM-Gehalt liegt bei ca. 10 %. Der Ammoniumanteil am Gesamtstickstoff ist bei BGA mit hohen Anteilen an Schweinegülle und/oder Trockenkot (> 80 % $\text{NH}_4\text{-N}$ von N_t) deutlich höher als bei Anlagen mit hohen NawaRo oder Rindergülleinsatz (ca. 60 % $\text{NH}_4\text{-N}$ von N_t).

Tab. 2: Inhaltsstoffe von Gärprodukten bei unterschiedlichem Substrateinsatz

		RG > 85 % RG	SG > 85 % SG	TK - SG > 70 % TK + SG	NawaRo > 70 % NawaRo
TM	%	6,04	4,36	4,16	10,02
oTM	% der TM	72	69	67	76
N _t	% der FM	0,41	0,51	0,50	0,60
$\text{NH}_4\text{-N}$	% von N_t	64	83	81	58
C/N		6,11	3,32	3,32	6,72
S	mg/kg TM	8.282	8.360	7.515	4.650
P	% der TM	0,48	0,40	0,34	0,96
K	% der TM	1,89	1,15	1,31	5,27

In Feldversuchen hat sich eine gute Korrelation zwischen dem Anteil des $\text{NH}_4\text{-N}$ am N_t und dem Mineraldüngeräquivalent bezogen auf den Gesamtstickstoffgehalt herausgestellt. Je höher dieser Anteil ist, je effizienter ist somit das Gärprodukt als Dünger und je mehr ist eine echte Substitution von Mineraldünger möglich. Dennoch sollte bei der Bemessung der N-Düngung die Wirtschaftsdünger einen Anteil von 60 bis 70 % am Gesamtbedarf nicht überschreiten. Weiter ist bei einer Düngung mit Gärprodukten zu beachten, dass die hohen Ammonium-N-Anteile potenziell zu Verlusten führen können. Der Einsatz von emissionsarmer Applikationstechnik und eine unverzügliche Einarbeitung sind deshalb zwingend erforderlich.

3 Anfall von Wirtschaftsdünger und Gärprodukte

In Deutschland wurden 2014 rund 1.25 Mio. ha NawaRo für die Substratproduktion angebaut. Bei einem unterstellten Ertrag von 40 t/ha, 10 % Siliiverlusten und einem Fugafaktor von 0,8 – der den Masseerhalt bei der Biogaserzeugung beschreibt – folgt ein Gärprodukthanfall von etwa 36 Mio. t/a aus den eingesetzten nachwachsenden Rohstoffen. Reststoffe, die nach EEG-Monitoring 8,1 % der Substrate in den Biogasanlagen ausmachen, führen zu einem geschätztem Anfall von ca. 6. Mio. t/a Gärprodukt.

Nachwachsende Rohstoffe und Abfälle machen rund 56 % des Biogassubstrates aus, woraus folgt, dass 44 % des Substrates Wirtschaftsdünger sind. Damit werden in Deutschland nur knapp 23 % der Wirtschaftsdünger über Biogas energetisch genutzt. In Deutschland fallen ca. 152,2 Mio. t/a Wirtschaftsdünger an (TLL 2006). Somit ist mit einem Gärprodukthanfall aus dem Wirtschaftsdüngereinsatz von ca. 35 Mio. t/a auszugehen.

Der Gesamtanfall an Gärprodukten beträgt in Deutschland somit rund 76 Mio. t/a, die etwa zur Hälfte aus den eingesetzten NawaRo stammen. Durch die Mitvergärung von NawaRo und Reststoffen hat sich der Gesamtanfall von Wirtschaftsdünger und Gärprodukte mengenmäßig auf ca. 190 Mio. t/a erhöht.

Geht man davon aus, dass Gärprodukte ähnliche Nährstoffgehalte wie flüssige Wirtschaftsdünger aufweisen (Tab. 1), so hat sich in den letzten 15 Jahren der Nährstoffanfall bundesweit um ca. 25 % erhöht. Eine Anrechnung dieser Nährstoffe auf die betrieblichen Obergrenzen ist nicht nur sinnvoll, sondern auch aus ökologischen Gründen geboten.

4 Düngewirkung von Gärprodukten

Die Düngewirkung von Gärprodukten ähnelt dem der flüssigen Wirtschaftsdünger, wobei aber der Substrateinsatz die physikalischen Eigenschaften der einzelnen Gärprodukte deutlich beeinflusst. Beim Einsatz in wachsenden Beständen verhindern hohe TM-Gehalte ein schnelles Einsickern, sodass die N-Wirkung nicht optimal ist. Neuere Entwicklungen zeigen auch, dass z. B. Schlitzverfahren bei der Applikation der Gärprodukte auf Wintergetreide im Frühjahr möglich sind. In der TLL wurden zur Ermittlung der Düngewirkung von Gärprodukten neben Gefäßversuchen bereits 2006 Untersuchungen in einer Mikroparzellenanlage durchgeführt und ab 2009 mehrere Feldversuche angelegt. Zum Einsatz kamen vorrangig Gärprodukte aus Anlagen mit für Thüringen typischer aber doch auch sehr unterschiedlicher Fütterung. Im Einzelnen waren das:

- Rindergülle, als Vergleichsvariante (RG)
- Gärprodukt auf Grundlage dieser Rindergülle (vRG)
- Gärprodukt auf Basis von NawaRo (Mais, GPS, Getreidekorn, ergänzt ab 2010 mit ca. 30 % Ziegenmist am Substratmix) mit und ohne PIADIN (vNawaRo)
- Gärprodukt auf Basis von Schweinegülle mit und ohne PIADIN (vSG).

Die eingesetzten Gärprodukte weisen ein breites Eigenschaftsspektrum auf (Tab. 3). Mit den Gärprodukten wurde 100 % des N-Bedarfs (brutto) abgedeckt. In weiteren Varianten erfolgte eine zusätzliche Gabe von 40 % KAS, um die anrechenbaren Verluste zu simulieren. Ergänzt wurden die Versuche durch die Varianten ohne Düngung und abgestufter Mineraldüngung mit KAS.

Tab. 3: Inhaltsstoffe der im Pflanzenbauversuch eingesetzten Gärprodukten (Mittelwerte 2007–2014)

		RG	vRG	vNawaRo	vSG
TM	%	10,1	5,8	12,0	2,8
oTM	% der TM	83,8	71,3	72,9	60,1
C _{org}	%	4,71	2,19	3,84	1,11
N _t	% der FM	0,42	0,30	0,79	0,45
NH ₄ -N	% von N _t	0,21	0,19	0,51	0,40
C/N		11,2	7,3	4,9	2,5
pH		6,8	7,6	7,7	7,9
P	% der TM	0,08	0,06	0,12	0,04
K	% der TM	0,33	0,29	0,60	0,29

Im Ergebnis der Versuche auf den Mikroparzellen, wie auch in den beiden Feldversuchen zeigt sich, dass bei sachgerechter Bemessung der Gabenhöhe und verlustarmer Ausbringung hohe Stickstoff-Mineraldüngeräquivalente (N-MDÄ) erreichbar sind. Im Wesentlichen bestimmt der Anteil den NH₄-N am Gesamtstickstoff das N-MDÄ (Tab. 4 und Abb. 1)

Tab. 4: Ergebnisse aus der Mikroparzellenanlage (2007–2013), 8 Versuchsernten, Mittel von 4 Böden)

Prüfglied	NH ₄ -N % von N _t	N-MDÄ %
Mineralischer Stickstoff	-	100
Rindergülle	50	57
Vergorene RG	63	72
Vergorenen NawaRo	65	60
Vergorene Schweinegülle	89	92
Vergorene NawaRo + PIADIN	65	63
Vergorene Schweinegülle + PIADIN	89	98

Weiter zeigt sich in den Versuchen die Stabilisierung der organischen Substanz durch den Biogasprozess. Bei Rindergülle ist der C-Bedarf zur Erhöhung des C_{org}-Gehaltes des Bodens (Mittel von 4 Böden) um 0,1 % mit 7,7 t/ha deutlich höher als bei den eingesetzten Gärprodukten (Abb. 2).

Eine Wertminderung durch die Verringerung des C-Gehaltes im Wirtschaftsdünger (Abbau der Trockensubstanz) ist bei der Bewertung der Gärprodukte nicht angeraten, da ausgehend vom VDLUFA Standpunkt „Humusbilanzierung“ im Biogasprozess eine Stabilisierung des Kohlenstoffes erfolgt. Werden in einer Regressionsanalyse die Werte für Wirtschaftdünger und Gärprodukte getrennt verrechnet so folgt, dass je Tonne aufgebrauchter Trockensubstanz bei Wirtschaftsdünger ca. 90 kg Humus-C und bei Gärprodukten rund 140 kg Humus-C im Boden verbleiben (VDLUFA 2004).

Mit den vergorenen NawaRo wird auch noch zusätzlich Kohlenstoff als Humusgrundlage dem Boden zugeführt. Eine Reduzierung des Humusgehaltes der Böden ist bei Beachtung der Fruchtfolgegrundsätze durch die Biogaserzeugung nicht zu befürchten.

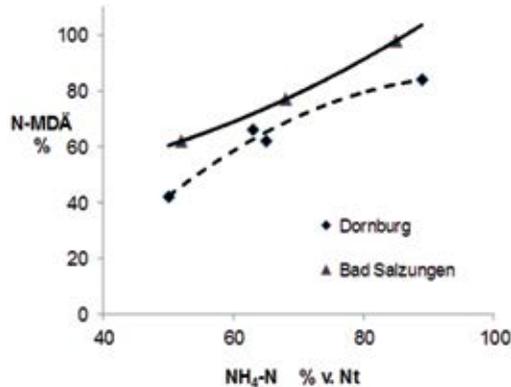


Abb. 1: N-Mineraldüngeräquivalent von Gülle und Gärprodukten in Abhängigkeit vom NH₄-N-Anteil am Gesamt-N (Feldversuchen Dornburg und Bad Salzung, 2009–2013)

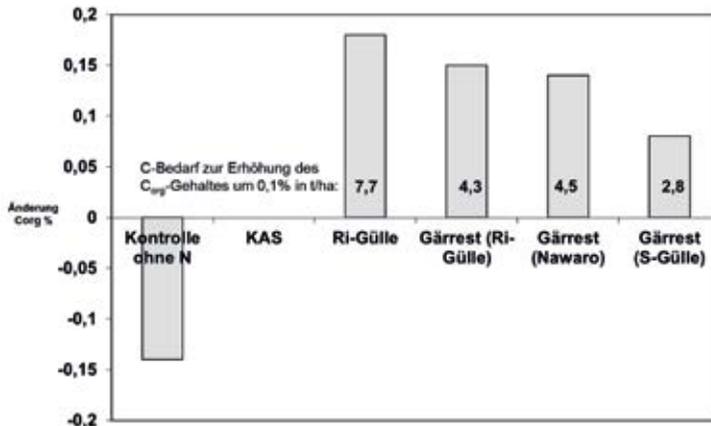


Abb. 2: Änderung des C_{org}-Gehaltes durch differenzierte Düngung 2007–2011 (Mikroparzellenversuch Jena-Zwätzen, Mittel von 4 Böden)

5 Wirkung der Biogaserzeugung im Stoffkreislauf

Der Wert der Gärprodukte wird aus den Nährstoffgehalten (N, P, K) und unter Beachtung des Mineraldüngeräquivalents für Stickstoff abgeleitet. Er liegt im Mittel der Gärprodukte von wirtschaftsdüngerdominierten Anlagen bei einem Wert von ca. 6 €/m³ und steigt auf ca. 8 €/t bei hohem NawaRo-Einsatz. Davon sind die Transport- und Applikationskosten (3–5 €/t) abzuziehen, sodass ein Mehrwert erwirtschaftet werden kann. Prinzipiell sollte der Verursacher der Gärprodukte alle Kosten der Lagerung sowie der Applikation tragen und der Pflanzenbauer als Nutzer der Gärprodukte die wirksamen Nährstoffe vergüten, da diese nicht in Form von Mineraldünger zu kaufen und zu applizieren sind.

Weitere nicht monetäre, aber zu beachtende Faktoren sind:

- Vereinheitlichung der Dünger im Betrieb (bessere Planbarkeit der Einsatzmenge, keine getrennte Applikationslinien für feste und flüssige Wirtschaftsdünger)
- verbesserte N-Wirkung durch reduzierten TM-Gehalt (schnellere Infiltration) und erhöhte NH₄-N-Anteile
- Geruchsminderung und Verbesserung der hygienischen Parameter (Keimreduktion um 1 bis 2 Zehnerpotenzen)
- Interner Kreislauf für N, P, K durch Fruchtfolgeveränderung (reduzierter (Stoppel-) Weizenanbau in Ackerbauregionen)
- Steigerung des Wirtschaftsdüngeranfalls in Ackerbauregionen.

Eine Bewertung der Verringerung des C-Gehaltes durch einen Abbau der Trockensubstanz ist nicht angeraten, da erstens entsprechend der Ergebnisse des VDLUFA-Standpunktes „Humusbilanzierung“ eine Stabilisierung des Kohlenstoffes erfolgt (Wirtschaftsdünger ca. 90 kg Humus-C/t TM, Gärprodukte ca. 140 kg Humus-C/t TM) und zweitens mit dem NawaRo-Anteil zusätzlich Kohlenstoff zugeführt wird.

Inwieweit sich der Nährstoffwert realisieren lässt, hängt maßgeblich von der Nährstoffversorgung der Böden und dem daraus resultierenden Düngebedarf ab. Tierbesatz sowie BGA-Bestand beeinflussen damit den Düngewert der Gärprodukte maßgeblich. Hinsichtlich des Nährstoffanfalls im Gärrest kann überschlägig davon ausgegangen werden, dass eine kW-Bemessungsleistung des NawaRo-Anteils einer GV entspricht. Dabei ist eine kW-Bemessungsleistung die jährlich produzierte Strommenge dividiert durch die Jahrestundenzahl. Somit sind Großvieheinheiten und Biogasanlagen gleichrangig zu bewerten (Tab. 5).

Tab. 5: Vergleich von Milchkuh und „Beton-Kuh“

Parameter	Milchkuh	„Betonkuh“
Flächenbedarf	0,5 ha/GV Grundfutter	0,5–0,55 ha kW
Futtermittelanforderungen	Energiekonzentration	Verdaulichkeit
N-Anfall im Gärprodukt (netto)	80–90 kg/GV	86–95 kg/kW
P-Anfall im Gärprodukt	14–16 kg/GV	16–18 kg/kW
K-Anfall im Gärprodukt	100–110 kg/GV	85–95 kg/kW

In Thüringen bestehen gute Voraussetzungen zur Realisierung des Wertes der Gärprodukte. Voraussetzung dafür ist der relativ geringe Veredlungsbesatz von 0,64 (GV + kW)/ha, der sich aus 0,47 GV/ha und 0,172 kW/ha errechnet.

Dagegen wird insbesondere in den klassischen Veredlungsregionen in Norddeutschland durch den Einsatz von NawaRo in BGA das Problem der Nährstoffüberschüsse verstärkt. Folgerichtig fallen zusätzliche Transport- bzw. Entsorgungskosten für die Gärprodukte an, die deutlich über dem Wert der Gärprodukte liegen. Die Aufbereitung der Gärprodukte, die von den Stufen der Feststoffabtrennung über die Trocknung mit Überschusswärme der BGA bis zur Totalaufbereitung zu Dünger erfolgen kann und auch schon praktisch an vielen Standorten erfolgt, stellt aber nur sehr begrenzt eine Lösung für regional zu hohen Veredlungsbesatz (GV + kW/ha) dar. Durch eine am Veredlungsbesatz orientierte Agrarstrukturplanung hätten die hohen Zusatzkosten, vermieden werden können.

Durch die anaerobe Fermentation werden lediglich CH₄ und CO₂ aus dem Substrat entnommen. Wichtiger ist die Wirkung hinsichtlich des Nährstoffkreislaufs im Betrieb (Abb. 3 und 4).

In Ackerbauregionen verdrängt Mais für die BGA den „Stoppel“-Weizen. Der Vergleich des Getreideanbaus mit dem Verkauf des Kornes und dem Silomaisanbau für die



Abb. 3: Stickstoffkreislauf beim Anbau von Mais statt Getreide für die BGA



Abb. 4: Phosphorkreislauf beim Anbau von Mais statt Getreide für die BGA

Biogasanlage zeigt, dass bei Beachtung der anrechenbaren Verluste von 40 % somit ca. 100 kg Stickstoff im internen betrieblichen Kreislauf verbleibt. Weiter findet mit dem Produkt Biogas kein Export von Phosphor statt, sodass der gesamte Phosphor im Betrieb verbleibt.

Inwieweit sich der Nährstoffwert realisieren lässt, hängt maßgeblich von der Nährstoffversorgung der Böden sowie dem Düngbedarf und damit direkt vom Tierbesatz (GV/ha) zuzüglich dem Besatz an BGA, der sich auch in Analogie zum Tierbesatz als kW-Bemessungsleistung pro Hektar darstellen lässt, ab. Hinsichtlich des Nährstoffanfalls im Gärrest kann überschlägig davon ausgegangen werden, dass eine kW-Bemessungsleistung des NawaRo-Anteils einer GV entspricht. Die Addition von GV/ha und kW/ha bezeichnet man als Veredlungsbesatz und hat damit ein Maß zur Einschätzung der Verwertungsmöglichkeiten der Nährstoffe. Somit sind Großvieheinheiten und Biogasanlagen gleichrangig zu bewerten.

Daneben stellt der Veredlungsbesatz auch eine gute Kennzahl für agrarstrukturelle Planungen dar. Im Rahmen der Novellierung der Düngeverordnung ließe sich dieser auch zur Regionalisierung einsetzen, indem z. B. die Anforderungen an die Lagerkapazität vom Veredlungsbesatz im Landkreis abhängig gemacht werden.

Literatur

- Schultheiß, U.; Döhler, H.; Schwab, M. (2010): Wirtschaftsdünger tierischer Herkunft – jährliche Anfallmenge in der Bundesrepublik Deutschland. Landtechnik 65(5), S. 354–356
- TLL (Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft) (2006): Standpunkt zur Ermittlung der Nährstoffgehalte und zur Nährstoffbilanzierung bei Einsatz von Biogäsmüll
- VDLUFA (2004): Standpunkt Humusbilanzierung - Eine Methode zur Analyse und Bewertung der Humusversorgung von Ackerland. Speyer

Vermarktung von Gärprodukten an Privathaushalte

JOHANNES DAHLIN, MICHAEL NELLES, CARSTEN HERBES

1 Hintergrund und Einleitung

Gärprodukte werden überwiegend in der Landwirtschaft als organischer Dünger und Bodenverbesserer eingesetzt. Deren Einsatz wird u. a. durch die Düngeverordnung (DüV) geregelt. Aufgrund von Nährstoffüberschüssen in einigen Regionen Deutschlands können diese Gärprodukte nicht im regionalen Kontext eingesetzt werden. Abbildung 1 verdeutlicht die Stickstoffverteilung in Deutschland und zeigt Regionen mit Nährstoffüberschüssen auf.

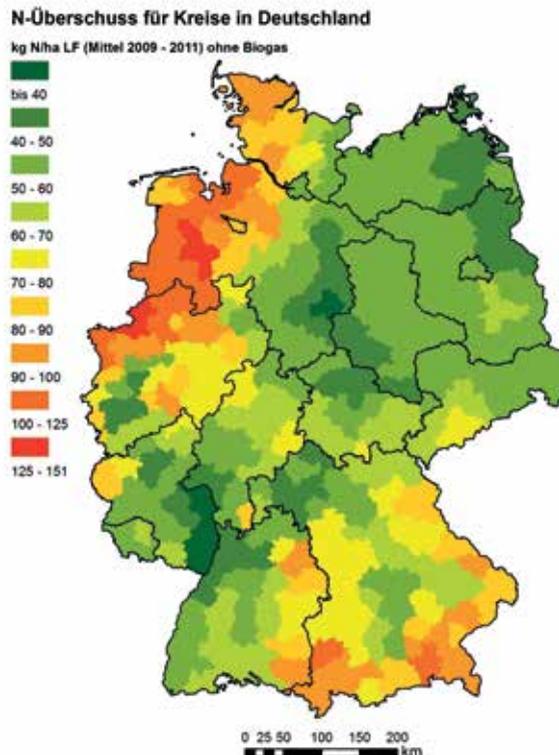


Abb. 1: N-Überschuss für Kreise in Deutschland (Quelle: HfWU Darstellung; Daten von Bach 2014)

Aufgrund der zu erwartenden Verschärfung durch die Novellierung der Düngerverordnung (DüV) wird der Einsatz von Gärprodukten in der Landwirtschaft voraussichtlich weiter eingeschränkt. Lösungsansätze für die weitere Nutzung der Nährstoffe sind u. a.

- Transport und Vermarktung von Gärprodukten in Regionen mit einem Nährstoffbedarf (z. B. Ackerbauregionen)
- Vermarktung von Gärprodukten in den nicht landwirtschaftlichen Bereich (z. B. an Privatgärtner).

Die Aufbereitung von Gärprodukten durch eine Aufkonzentrierung der Nährstoffe erhöht deren Wert je Gewichtseinheit. Abhängig von der Beschaffenheit des Gärproduktes gibt es verschiedene Aufbereitungsverfahren, die Anwendung finden können und verschiedene Endprodukte erzeugen. Von einer einfachen Separation bis hin zum Bandtrockner oder einer Verdampfung steht eine Vielzahl von Verfahren zur Verfügung. Als mögliche Endprodukte können beispielsweise Pellets, Granulat und Kügelchen erzeugt werden. Im Gegensatz zu nicht aufbereiteten Gärprodukten sind diese Produktformen einfach zu handhaben und geruchsärmer. Die Aufbereitung von Gärprodukten erhöht nicht nur deren Transportwürdigkeit, sondern eröffnet ein breiteres Spektrum für deren Vermarktung. In der EU werden bislang über 95 % der Gärprodukte in der Landwirtschaft eingesetzt. Bereits 3 % der Gärprodukte werden jedoch zu hochwertigen Produkten aufbereitet und stehen auch für den nicht landwirtschaftlichen Bereich zur Verfügung (SAVEYN und EDER 2014).

2 Gartenbausektor als potenzieller Zielmarkt

Der Gartenbau (Privathaushalte) ist ein Bereich, in dem bereits geringe Mengen an Gärprodukten eingesetzt werden. Dieser Bereich könnte in Zukunft vermehrt für den Absatz von Gärprodukten genutzt werden und dort den mineralischen Dünger substituieren. In Deutschland besitzen etwa 36 Mio. Menschen und damit etwas mehr als die Hälfte aller Personen über 14 Jahren einen Garten bzw. lebt in einem Haushalt, der einen Garten besitzt (STATISTA 2014). Insgesamt werden mit Gartenpflanzen rund 4 Mrd. Euro pro Jahr umgesetzt (ZENTRALVERBAND GARTENBAU 2015). Die Integration von Gärprodukten in diesem Sektor ist jedoch abhängig von Akzeptanz der Düngemittelhersteller, der Vermarkter sowie der Endkunden. Die Präferenzen und Einstellungen der Privatgärtner zu Gartendüngern sind daher von entscheidender Bedeutung und bieten wichtige Anhaltspunkte bei der Vermarktung von Gärprodukten in den Gartenbaubereich. Abhängig von den eingesetzten Substraten und dem Aufbereitungsverfahren können aus den resultierenden Gärprodukten

- Komposte zur Substrat- und Erdenherstellung sowie
- organische Dünger



Abb. 2: Beispiele für Gartendünger aus Gärprodukten (Quelle: www.hamptonfeedlot.com (links) sowie eigene Abbildung (rechts))

erzeugt werden. Diese Produktkategorien lassen sich nicht immer strikt trennen. Dieser Beitrag hebt hauptsächlich auf organische Dünger ab. In Abbildung 2 werden zwei Beispiele für Gartendünger gezeigt, die auf Basis von Gärprodukten aus der Biogaserzeugung hergestellt werden.

Der Einsatz von Gärprodukten im Gartenbaubereich wurde bereits mehrfach aus pflanzenbaulicher Sicht untersucht. Die Qualität und Wertigkeit der Gärprodukte ist maßgeblich von den eingesetzten Stoffen abhängig. Diese können durch eine unabhängige Kontrolle überprüft und abgesichert werden. Der Düngewert des Produktes kann über die Analyse ebenfalls berechnet werden, indem die pflanzenverfügbaren Nährstoffe mit den Düngerpreisen multipliziert werden. Schadstoffe, wie Schwermetalle, werden ebenfalls erfasst (RAL 2013). Die absoluten Schwermetallgehalte werden durch den Biogasprozess nicht verändert, sondern erhöhen sich aufgrund des Abbaus der organischen Bestandteile (AMON 2013). Laut eines Testergebnisses zu Gartendüngern konnte bei einigen Düngern Uran nachgewiesen werden (ÖKO-TEST 2015). Dieses stammt hauptsächlich aus dem Abbau von mineralischem Phosphor. Durch die Substitution von mineralischem Phosphor durch Gärprodukte könnte dem Uraneintrag in Hausgärten vorgebeugt werden. Wie Konsumenten ihre Gärten düngen, wie sie Düngemittel auswählen und ob sie geneigt sind, Gärprodukte zu Düngezzwecken in ihren Hausgärten einzusetzen, wurde bislang aber noch nicht untersucht.

3 Methodik

Um ein erstes Verständnis des möglichen Einsatzes von Gärprodukten für den Privatgartenbau zu entwickeln, haben wir uns für eine qualitative Befragung entschieden. Das Ziel war nicht, ein repräsentatives Bild des Verhaltens der deutschen Privatgärtner zu gewinnen, sondern durch Tiefeninterviews Verhaltensmuster, Entscheidungslogiken und Präferenzen explorativ zu ergründen, d.h. den Einsatz von Düngern im Hausgarten aus Sicht der Beteiligten besser zu verstehen. In qualitativen Interviews können die Befragten offen ihren Standpunkt und ihre Sichtweise zum Thema schildern. Diese Form der Befragung bietet gerade bei neuen Forschungsfeldern die Möglichkeit, neue Bereiche einzuordnen und zu strukturieren (GLÄSER und LAUDEL 2010). Insgesamt wurden 14 Personen interviewt, die in zwei Gruppen aufgeteilt werden können. Die erste Gruppe besteht aus Vermarktern von Gärprodukten für den Gartenbaubereich ($n = 4$). Die zweite Gruppe besteht aus potenziellen Kunden, den Privatgärtnern ($n = 10$). Für die persönlichen Interviews wurden zwei Leitfäden entwickelt, anhand dessen die GärproduktHersteller und Vermarkter sowie Privatgärtner als potenzielle Abnehmer befragt wurden. Die Interviews wurden mit Tonband aufgenommen und anschließend transkribiert. Danach wurde das Material einer qualitativen Inhaltsanalyse unterzogen und mit der Software MAXQDA ausgewertet (MAYRING 2010).

Die Ergebnisse aus den Befragungen sind in Kapitel 4 und Kapitel 5 zusammengefasst. Aufgrund der qualitativen Herangehensweise und der geringen Anzahl an interviewten Personen lassen sich keine generalisierbaren Aussagen treffen. Vielmehr stellen diese ersten Ergebnisse einen Ausgangspunkt für weiterführende Forschungen dar.

4 Die Sicht der Biogas-Akteure und Vermarkter

Der Gartenbau wurde als Zielmarkt für Gärprodukte von einigen Akteuren aus der Biogasbranche bereits ins Auge gefasst. Sie versuchen gezielt, Gärprodukte in diesem Nischenmarkt zu vermarkten. Die ersten Ansätze sind vielfältig und unterscheiden sich im Volumen, in der Professionalität und der Produktvielfalt.

4.1 Ansätze zur Vermarktung

Gärprodukte können entweder als reines Gärprodukt oder als Mischprodukt hergestellt und angeboten werden. Der Trockensubstanzgehalt sollte mindestens 85 % betragen, um eine angemessene Produktstabilität über die gesamte Wertschöpfungskette inklusive Lagerung im Handel leisten zu können. Die Gärprodukte werden in verschiedenen Produktformen und Verpackungsgrößen vertrieben. Die Verpackungsvarianten reichen von kleinen Eimern über Kartons bis hin zu Säcken und Big Bags.

Bei Privatgärtnern können hohe Verkaufspreise für Gärprodukte von bis zu 9 €/l erzielt werden. Dabei spielen die Nährstoffgehalte aus Sicht der Vermarkter oft eine untergeordnete Rolle. Diese Preise erscheinen auf dem ersten Blick sehr hoch, müssen jedoch mit Vorsicht betrachtet werden. Die Verpackungs- und Marketingkosten dürfen nicht unterschätzt werden. Hinzu kommen die Margen von über 50 %, die vom Handel für den Vertrieb und die Verkaufsfläche beansprucht werden und die im Verkaufspreis oft mit inbegriffen sind. Die Vermarktung der Produkte geschieht ab Hof, per Internet, über einen Zwischenhändler oder direkt an einen Gartencenter.

4.2 Herausforderungen für Vermarkter von Gärprodukten

Aufgrund der geringen anfallenden Mengen einer einzelnen Biogasanlage ist der Vertrieb an einen überregionalen Großabnehmer nur schwer zu realisieren. Der Vertrieb der Gärprodukte erfolgt daher vornehmlich an einen kleinen und regionalen Kundenkreis. Der Vertrieb auf diesem Wege ist sehr aufwendig, da die Abfüllung, Etikettierung und Auslieferung kleiner Chargen sehr zeitintensiv ist. „Economies of Scale“ kann der Einzelbetrieb kaum erzielen.

Mit der Produktvielfalt und den Preisen der großen Hersteller und Gartencenter können kleine Anbieter oft nicht mithalten. Darüber hinaus ist es für neue Produkte aufgrund ihrer mangelnden Bekanntheit schwierig, mit den etablierten Produkten und Marken zu konkurrieren. Biogasanlagenbetreiber gehen oft so vor, dass sie ein Produkt erst erzeugen und im zweiten Schritt versuchen, dafür einen Absatz zu finden und mögliche Kundenwünsche zu berücksichtigen. Die Kundenwünsche können dabei eher von größeren Anbietern und Unternehmen berücksichtigt werden, da eine größere Produktvielfalt angeboten werden kann. In Belgien und den Niederlanden gibt es bereits Düngemittelhersteller, die getrocknete Gärprodukte erwerben um anschließend durch Zugabe von weiteren mineralischen und organischen Düngern ein gewünschtes Endprodukt zu erzielen. Somit kann ein uniformes Produkt mit einer einheitlicher Produktform sowie konstanten Nährstoffgehalten hergestellt werden. Ab einer bestimmten Größe erhöht sich die Wahrscheinlichkeit, auch für größere Abnehmer (z. B. Gartencenter) als interessanter Lieferant eingestuft zu werden. Für größere Abnehmer, wie Weiterverarbeiter und Gartencenter, sind eine gleichbleibende Qualität sowie konstante Nährstoffgehalte von zentraler Bedeutung. Um Gärprodukte nachfrageorientiert produzieren zu können, ist es wichtig, die Präferenzen der Privatgärtner zu berücksichtigen.

5 Die Sicht der Privathaushalte zu Düngern für den Hausgarten

Von Privatgärtnern wird eine Vielzahl von Düngern im Garten eingesetzt. Als Universaldünger wurden u. a. Düngerkalk, Pellets aus Rinderdung, Blaukorn und Hornmehl eingesetzt. Bei den Spezialdüngern waren es u. a. Buchsdünger, Rosendünger, Hortensiendünger und Tomatendünger. Sonstige Dünger, die entweder selbst hergestellt wurden oder von Nachbarn bezogen wurden, sind Brennesseljauche, Hasenmist, Kuhmist und Pferdemist. Der Einsatz dieser Produkte wurde oft mit familiärer Überlieferung und Hinweisen aus der Nachbarschaft begründet. Vor allem der Einsatz von Pferdemist wurde häufig bei der Düngung von Rosen hervorgehoben. Als weitere Alternativen für eine Düngung wurden auch Bananenschalen und Kaffeesatz angegeben.

5.1 Einkaufsentscheidung bei Düngern

Beim Düngerkauf sind viele Privatgärtner überfordert. Sie haben im Gartencenter eine große Auswahl, jedoch wenig Anhaltspunkte, worauf sie achten sollten. Oft wird die Beratung beim Händler als nicht zufriedenstellend empfunden oder wird gar nicht erst in Anspruch genommen. Daher nehmen viele Kunden den Produktnamen und die Marke als Anhaltspunkt bei ihrer Kaufentscheidung. Wenn ein Dünger für bestimmte Pflanzengruppen, wie Buchs oder Rosen benötigt wird, greifen viele Konsumenten der Einfachheit halber zu Düngern mit der Aufschrift Buchs- oder Rosendünger. Universaldünger werden oft für generelle Anwendungen erworben, wenn der Fokus nicht auf einer bestimmten Pflanzenart liegt. Die Inhaltsstoffe auf der Verpackungsrückseite werden ebenfalls berücksichtigt. Für viele Käufer sind diese Informationen jedoch zu komplex und wenig aussagekräftig. Woraus sich ihr Dünger zusammensetzt, ist für viele Kunden nach wie vor nicht ersichtlich. Schlagworte wie „Guano“ sind für die Befragten jedoch greifbar. Darüber hinaus ist „Bio“ für einige Konsumenten ein weiteres wichtiges, positiv besetztes, Schlagwort für eine Kaufentscheidung. Einige der Befragten sind aufgrund dieser positiv bewerteten Attribute bereit, einen vergleichsweise höheren Preis zu zahlen und geben sogar an, die günstigsten Produkte zu meiden, weil damit eine minderwertige Qualität assoziiert wird. Preiskunden auf der anderen Seite bevorzugen jedoch nur die günstigsten Produkte. Der Düngereinkauf sowie die Pflege der Blumen und Beete werden vorwiegend von Frauen vorgenommen. Männer wirken im Garten oft bei den größeren Arbeiten, z. B. Rasen mähen oder Bäume schneiden, mit.

5.2 Gründe für den Verzicht auf Düngung generell

Einige der interviewten Personen stehen dem Kauf von Düngern generell kritisch gegenüber. Sie führen an, dass sie mit dem Wachstum ihrer Pflanzen zufrieden sind und gehen ebenfalls davon aus, dass in der Erde bzw. Blumenerde genügend Dünger vorhanden ist.

Darüber hinaus war für sporadische Anwender von Düngemitteln der Unterschied vor und nach einer Düngung nicht erkennbar und wurde aufgrund dessen eingestellt. Ein Privatgärtner erwähnte, dass ein starkes Wachstum bei Zierpflanzen im Garten nicht erwünscht sei, weil dies einen erhöhten Pflegeaufwand durch das Schneiden der Sträucher mit sich bringe.

5.3 Differenzierung bei der Düngeranwendung

Die interviewten Privatgärtner unterscheiden bei der Anwendung von Düngern im Garten oft zwischen den verschiedenen Pflanzen und deren Nutzung. Vermehrt wurde angegeben, dass für den Gemüseanbau organische Dünger bevorzugt eingesetzt werden. Begründet wurde dies in dem Wunsch, Bio-Gemüse selbst zu erzeugen. Mineralischer Dünger wurde dagegen vermehrt bei Zier- und Kübelpflanzen eingesetzt. Aufgrund der blauen oder weißen Farbe wurde dieser Dünger den Bereichen „Chemie“ und „Spritzmittel“ zugeordnet und mit möglichen Belastungen assoziiert. Trotz der eher negativen Einstellung zu mineralischen Düngern wird dieser bei Zierpflanzen bevorzugt angewendet. Dies wurde damit begründet, dass Zierpflanzen nur schön aussehen müssten, jedoch nicht verzehrt werden und daher nicht gesund sein müssten. Dünger wurden im Garten häufig eingesetzt obwohl die Notwendigkeit dafür von den Privatgärtnern selbst bezweifelt wurde. Dies wurde damit begründet, dass sie als Hobbygärtner ihre Freizeit für den Garten opfern, im Gegenzug aber die Früchte ihrer Arbeit ernten wollen. Der Einsatz von Düngern ist für viele Gärtner daher eine zusätzliche Absicherung ihrer Arbeit.

5.4 Bereitschaft Biogas-Gärprodukte einzusetzen

Die Einstellung der meisten interviewten Personen zu Biogas ist tendenziell eher negativ. Zwar werden erneuerbare Energien und die Verwertung von organischen Abfallstoffen in Biogasanlagen generell begrüßt – der gezielte Anbau von nachwachsenden Rohstoffen sowie die „Tank oder Teller“-Diskussion wurden jedoch als negativ bewertet. Darüber hinaus wurde die Biodiesel- und Bioethanolherstellung oft mit Biogasgewinnung gleichgesetzt. Für manche der Befragten spielte die Biogasthematik jedoch überhaupt keine Rolle. Die Präferenzen bezüglich der möglichen Ausgangsstoffe der Gärprodukte waren sehr unterschiedlich. Nachwachsende Rohstoffe wurden eher negativ bewertet, da sie speziell für die Biogasgewinnung angebaut werden. Ihre Eigenschaften hingegen wurden aufgrund ihrer Homogenität für einen möglichen Einsatz im Garten durchaus positiv bewertet. Bei Gärprodukten aus Abfallanlagen war es genau entgegengesetzt. Die Verwertung von organischen Reststoffen und die zusätzliche Gewinnung von Energie wurden positiv bewertet. Deren Einsatz im Garten würden viele Privatgärtner jedoch meiden, da unliebsame Rest- und Störstoffe darin vermutet werden. Plastik, Glas und Metall sowie die Möglichkeit von Fleischabfällen und darin enthaltene Knochen wurden damit asso-

ziert. Gülle und Mist wurden mit starkem Geruch in Verbindung gebracht. Bei einem möglichen Einsatz im Garten waren die interviewten Privatgärtner zwiespalten. Mist und Gülle sind als Dünger bekanntlich eine gute Möglichkeit, aber aufgrund des Geruchs, der damit assoziiert wird, sind die Kunden eher zurückhaltend.

6 Ausblick

Der Markt für Dünger im Gartenbaubereich wird von etablierten Unternehmen bestimmt, deren Strukturen über Jahre hinweg gewachsen sind. Für neue Anbieter ist es daher schwierig, sich zu etablieren. Der Biogassektor hat sich erst in den letzten zehn Jahren stark entwickelt. Aufgrund der oft hohen Entsorgungskosten für unbehandelte Gärprodukte in Regionen mit einem Nährstoffüberschuss sowie rechtliche Restriktionen ist der Druck zum Handeln gegeben. Daher müssen weitere Absatzmärkte und Strukturen für die Gärproduktvermarktung entwickelt und etabliert werden. Dabei sind regionale Lösung anzustreben und haben den Vorteil einer weiteren regionalen Wertschöpfung sowie vermiedener Transportkosten. Zusätzlich könnten steigende Preise für mineralische Dünger die Wertschätzung und Nachfrage nach Gärprodukten auf Seiten der Düngerhersteller positiv beeinflussen. In einigen bereits angebotenen Düngern werden u. a. tierische Nebenprodukte der Kategorie 3 sowie pflanzliche Stoffe aus der Lebens-, Genuss- und Futtermittelindustrie angeboten. Gärprodukte könnten in diesen Düngern ebenfalls integriert werden. Die Präferenzen und Entscheidungslogiken der Privathaushalte bei der Düngerauswahl sollten in weiteren, ggf. auch quantitativen Untersuchungen, noch detaillierter beleuchtet werden. Da vielen Privatgärtnern nicht bewusst ist, welche Ausgangsstoffe in ihrem Dünger enthalten sind, könnten Gärprodukte ebenfalls integriert werden. Von einer deutlichen Kenntlichmachung der Biogasherkunft ist jedoch abzuraten. Die Düngermittelhersteller sind an dieser Stelle das entscheidende Nadelöhr bei einer weiteren Integration von Gärprodukten in den Markt für Gartendünger für Privathaushalte.

Literatur

- Amon, T.; Döhler, H.; Grebe, S.; Klages, S.; Roth, U.; Wilken, D.; Wulf, S. (2013): Qualität und Verwertung des Gärrückstandes. In: Leitfaden Biogas - Von der Gewinnung zur Nutzung, Gülzow-Prüzen, S. 184–201
- Bach, M. (2014): Berechnung von Stickstoff-Flächenbilanzen für die Landwirtschaft in Deutschland mit Regionalgliederung Kreise und kreisfreie Städte – Jahre 2003 bis 2011. Abschlussbericht, Univ. Gießen

- Gläser, J.; Laudel, G. (2010): Experteninterviews und qualitative Inhaltsanalyse. VS Verlag für Sozialwissenschaften, Wiesbaden, 4. Aufl.
- Mayring, P. (2013): Qualitative Inhaltsanalyse - Grundlagen und Techniken. Beltz Verlag, Weinheim
- ÖKO-TEST (2015): Gartendünger – Schadstoffe inklusive. In: Ratgeber Bauen Mai 2015, Frankfurt am Main, ÖKO-TEST Verlag GmbH, S. 232–237
- RAL (2013): Deutsches Institut für Gütesicherung und Kennzeichnung e. V.. http://www.kompost.de/fileadmin/docs/guetesicherung/Pruefzeugnis_Gaerprodukt_fluessig.pdf, Zugriff am 29. 04.2015
- Saveyn, H.; Eder, P. (2014): End-of-waste criteria for biodegradable waste subjected to biological treatment (compost & digestate): Technical proposals. Conference proceedings, Sevilla, Spain
- Statista (2015): Anzahl der Personen in Deutschland, die einen Garten besitzen, von 2010 bis 2014 (in Millionen). <http://de.statista.com/statistik/daten/studie/171446/umfrage/besitz-eines-gartens/>, Zugriff am 29.04.2015
- Zentralverband Gartenbau (2015): Branche. <http://www.g-net.de/zierpflanzenbau.html>, Zugriff am 29.04.2015

Danksagung

Die Forschungsarbeit wurde im Rahmen des Forschungsprojektes GÄRWERT (FKZ 22402312) durchgeführt. Die Förderung des Projektes erfolgt/e durch finanzielle Unterstützung des Bundesministeriums für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL) über die Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR) als Projektträger des BMEL für das Förderprogramm Nachwachsende Rohstoffe.

Fruchtfolgen mit Energiepflanzen und Marktfrüchten auf diluvialen Standorten Nordostdeutschlands

GUNTER EBEL, VINCENT PLOGSTIES, CHRISTIANE HERRMANN, CHRISTINE IDLER,
MONIKA HEIERMANN, GERT BARTHELMES, PETER KORNTZ, JANINE MÜLLER,
JOACHIM AURBACHER

1 Einleitung

Das EVA-Fruchtfolgeprojekt wurde am Standort Güterfelde fortgeführt. Im Folgenden werden zusammenfassende Ergebnisse zum Trockenmasse-, Methangasertrag und zum Deckungsbeitrag für die getesteten Fruchtfolgen mitgeteilt¹. Weitere Informationen sind der Internetseite /www.eva-verbund.de zu entnehmen.

2 Ergebnisse

2.1 Trockenmasseerträge

In den EVA-Fruchtfolgeversuchen wies Mais im Mittel der Jahre mit 158 dt TM/ha die höchsten Erträge vor Sorghum bicolor (relativ 92) und Sudangrashybride (relativ 83) auf. Bei den anderen geprüften Fruchtarten war das Ertragsniveau wesentlich geringer (relativ < 60 gegenüber Mais). Die Getreidearten nahmen die Ertragsrelation: Winterroggen > -triticale > -gerste > Sommergetreide ein (vgl. EBEL und BARTHELMES 2015). Stark abweichende Jahreswitterungen mit Extremereignissen führten auf dem zur Vorsommertrockenheit neigenden Diluvialstandort bei allen Pflanzen zu erheblichen Ertragsschwankungen (z.B. Mais 85...192; Sorghum b. x s. 99...154; Wintergetreide 49...108 dt TM/ha). Diese extremen Schwankungen sind für die Rohstoffbereitstellung zu berücksichtigen und erfordern eine mehrjährige Bewertung der Fruchtarten und Fruchtfolgen (Risikoabschätzung EVA 3).

2.2 Methangashektarerträge

Mit der zunehmenden Anzahl an Batch-Gärtests von Proben der EVA-Fruchtfolgeversuche konnten Richtwerte für Methanausbeuten ermittelt werden (vgl. PLOGSTIES et al. 2015). Danach wies jeweils Mais in Hauptfruchtstellung durchschnittliche Methanerträge von ca. 5.150 m³ CH₄/ha bezogen auf die organische Trockenmasse im Versuchszeitraum auf, gefolgt von Sorghum bicolor mit 4.100 m³ CH₄/ha, Sudangrashybride mit ca. 3.700 m³ CH₄/ha, Luzernegras mit ca. 2.430 m³ CH₄/ha, Wintergetreide mit 2.350 m³ CH₄/ha. Bei weiteren getesteten Fruchtarten war der Methangasertrag < 40 % im Vergleich zu Mais.

¹ Förderung: BMEL; Projektträger: FNR e.V. FKZ: 22006012.

2.3 Deckungsbeiträge

Ökonomisch lässt sich aus den Daten ein Vorzug des Körneranbaus von Winterroggen vor den Fruchtarten Mais für Ganzpflanzen- und Kornnutzung, Wintertriticale (Korn), Winterroggen, Sorghum b. x s. und Luzernegras jeweils als Ganzpflanzennutzung für das Landbauggebiet III des Landes Brandenburg ableiten. Alle anderen Anbauoptionen erreichten nur z.T. unter günstigen Bedingungen positive Deckungsbeiträge. Auch für die ökonomische Risikostreuung (Ertragsausfall Mais – 2006 negative Deckungsbeiträge in Hauptfruchtstellung) sind neben den pflanzenbaulichen / ökologischen Erfordernissen (z.B. phytosanitäre Wirkung, ganzjährige Bedeckung – Erosionsschutz, entgegenwirken Nährstoffverlagerung etc.) diversifizierte Fruchtfolgen notwendig.

3 Empfehlungen

Aus pflanzenbaulicher, ökonomischer und ökologischer Sicht werden für die Landbau-region III Brandenburgs die getesteten Fruchtfolgen:

- Mais GP/Winterroggen GP/Grünschnittroggen GP/Sudangras GP/Wi.Roggen-K,
- Sorghum bicolor GP/Winterroggen-Korn/Mais GP/ Winterroggen-Korn,
- Winterroggen GP/Senf GD/Mais-Korn/Sorghum b. x s. GP/Winterroggen-Korn empfohlen (GP = Ganzpflanze, K = Korn, GD = Gründüngung).

Aus dem bisherigen Kenntnisstand könnte als Kompromiss eine Fruchtfolge über 6 Jahre: Luzernegras (Ansaat August)/ Jahr 1: Luzernegras 1. Hauptnutzungsjahr (HNJ)/ Jahr 2: Luzernegras 2.HNJ/ Jahr 3: Mais GP (nach Umbruch Luzernegras im Frühjahr)/ Jahr 4: Winterroggen GP/ Senf GD/ Jahr 5: Sorghum bicolor GP/ Jahr 6: Winterroggen Korn für die Landbauregion III in Brandenburg empfohlen werden.

Literatur

Ebel, G.; Barthelmes, G. (2015): Nachhaltige Ganzpflanzengetreideproduktion auf diluvialen Standorten Nordost-Deutschlands. Tagungsband des FNR/KTBL-Kongress in Potsdam. Herausgeber: Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V., Darmstadt

Plogsties, V.; Herrmann, C.; Idler, C.; Heiermann, M. (2015): Zweiter Zwischenbericht des Teilprojektes 4 (FKZ: 22006312) „Ermittlung des Einflusses der Substratqualität auf die Biogasausbeute“ im Rahmen des Verbundvorhabens „Standortangepasste Anbausysteme für die Produktion von Energiepflanzen – EVA 3“

Versuchsbericht: www.fnr-server.de/ftp/pdf/berichte/22013008.pdf

Analyse des Anbaus und der Nutzung von landwirtschaftlichen Biogassubstraten

ECKART PETIG, SEBASTIAN AUBURGER, ELISABETH ANGENENDT, ENNO BAHRS

1 Einführung

Die Biogasproduktion hat sich in den letzten Jahren auch aufgrund der politischen Förderung fest in den landwirtschaftlichen Produktionsstrukturen etabliert und bildet somit einen signifikanten Teil der landwirtschaftlichen Wertschöpfung. Dabei konkurriert der Anbau der Biogassubstrate mit dem Anbau für Nahrungs- und Futtermittel. Im Vergleich zu vielen anderen pflanzenbaulichen Produkten sind die Substratpreise vergleichsweise stark von der Entfernung zur Biogasanlage und den damit verbundenen Transportkosten abhängig. Ziel des Beitrages ist es, eine Methodik zur Bestimmung der Biogassubstratnachfrage (Biogas-Analyse-Tool) vorzustellen, mit deren Hilfe die Substratnachfrage und -bereitstellungskosten auf regionaler Ebene modelliert werden kann.

2 Methodik

Die Analyse basiert auf Datensätzen von rund 800 georeferenzierten Biogasanlagen aus Baden-Württemberg, die aus Angaben der Übertragungsnetzbetreiber extrahiert wurden. Des Weiteren werden für jeden Anlagenstandort die variablen Substratbereitstellungskosten für Silomais, Zuckerrüben, Winterweizen Ganzpflanzen-Silage und Winterweizenkorn berechnet. Zur Berücksichtigung der regionalen Standortbedingungen werden Daten vom STATISTISCHEN BUNDESAMT (2014) und KTBL (2014) genutzt. Diese werden zusammen mit der Variable „Wirtschaftsdünger“ an ein lineares Optimierungsmodell (Biogas-Analyse-Tool) übergeben. Der Energiebedarf der Biogasanlagen wird über die installierte elektrische Leistung bestimmt. Als Zielfunktion werden dann die Substratbereitstellungskosten für die installierte Anlagegröße minimiert, wobei gleichzeitig massebezogene und gärbiologische Restriktionen des Substratmixes vom Modell berücksichtigt werden. Auf diese Weise kann der Substratbedarf der einzelnen Anlagen bestimmt und auf regionaler Ebene (Gemeinde, Landkreis) aggregiert werden. Das lässt, kombiniert mit dem regionalen Ertragspotenzial, Rückschlüsse auf den Flächenanspruch in den Regionen zu (AUBURGER und BAHRS 2015).

3 Ergebnisse

Mit dem Biogas-Analyse-Tool wird zunächst der Flächenbedarf für die Silomaissubstratproduktion der Status-Quo-Situation in den verschiedenen Regionen berechnet. In

Abbildung 1 ist diese Vorgehensweise bildlich dargestellt und zeigt einen höheren absoluten Flächenbedarf im Südwesten und Westen Baden-Württembergs. Diese Konzentration ist zum einen mit der höheren Biogasanlagendichte bzw. der höheren installierten kW/ha LF in diesen Landkreisen zu erklären. Zum anderen ist dies aber auch auf geringere Silomaiserträge in einigen dieser Kreise zurückzuführen. Bei dieser exemplarischen Darstellung wurden aufgrund der Anschaulichkeit absolute Werte ausgewiesen, die bei einer umfassenden Bewertung mit den unterschiedlichen Flächenpotenzialen der Landkreise in Relation gesetzt werden müssen. Die Ergebnisse konvergieren mit bisherigen Schätzungen anderer Institutionen bezüglich Anbauumfängen und Einsatzmengen (FNR 2014) und dienen als Eingangsdaten für weiterführende modellbasierte Forschungsprojekte im Rahmen des Forschungsprogramms Bioökonomie Baden-Württemberg¹.

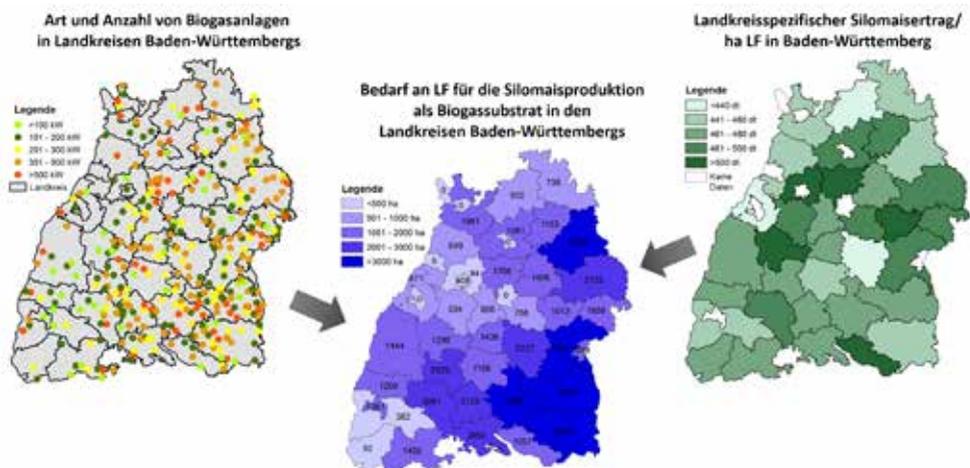


Abb. 1: Exemplarischer Datenstrom sowie Ergebnisse im regionalen Biogas-Analyse-Tool für einzelne Landkreise Baden-Württembergs

Literatur

Auburger, S.; Bahrs, E.: Regionalisierte Treibhausgasbilanzen der Biogasproduktion in Deutschland auf Basis eines ökonomisch ökologischen Modellansatzes unter besonderer Berücksichtigung der Zuckerrübe als Energiepflanze. In: Schriften der Gesellschaft für Wirtschafts- und Sozialwissenschaften des Landbaues, 2015 (angenommen)

Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR) (Hrsg.) (2014): Basisdaten Bioenergie Deutschland 2014. Gülzow-Prüzen

KTBL (2014): Leistungs- Kostenrechner Pflanzenbau. Darmstadt. Online verfügbar unter <https://www.ktbl.de>, Zugriff am 20.01.2015

Statistisches Bundesamt (2014): Regionaldatenbank. Ernte- und Betriebsberichterstattung. Flensburg. Online verfügbar unter: www.destatis.de, Zugriff am 20.02.2015

¹ Weiterführende Informationen zum Forschungsprogramm: <https://biooekonomie-bw.uni-hohenheim.de/>

BioEnergy Farm 2 – Gülle, der nachhaltige Energieträger der Landwirtschaft

KATRIN KAYSER, MARK PATERSON

1 Das BioEnergy Farm 2-Projekt

Viehhaltende Betriebe verfügen mit Gülle, Festmist und landwirtschaftlichen Reststoffen über gute Ausgangsstoffe zur Bereitstellung erneuerbarer Energien aus Biogas. Damit können sie nicht nur ihre Energie selbst erzeugen, oder ein Zusatzeinkommen durch die Einspeisung von Strom generieren und ihren Betrieb klimafreundlicher machen, sondern auch die Nährstoffverwertung optimieren. Somit lassen sich durch Biogas-Kleinanlagen sowohl Energie- als auch Stoffkreisläufe auf betrieblicher Ebene schließen.

Trotz der vielfältigen Vorteile sind kleine Biogasanlagen in den europäischen Tierhaltungsbetrieben noch nicht weit verbreitet. Hier setzt das Projekt BioEnergy Farm 2 an und stellt Veröffentlichungen, Informationsveranstaltungen, Schulungen und Exkursionen für Landwirte und andere Interessierte zur Verfügung. Darüber hinaus besteht die Möglichkeit, die Machbarkeit einer Biogas-Kleinanlage für den eigenen Betrieb unverbindlich durch unabhängige Experten prüfen zu lassen.

Neben den Landwirten gehören auch (politische) Entscheidungsträger zur Zielgruppe des Projekts. Basierend auf den Projektergebnissen werden Handlungsempfehlungen zur weiteren Verbreitung von Biogas-Kleinanlagen abgeleitet und den Entscheidungsträgern zur Verfügung gestellt.

Die im Projekt erarbeiteten Dokumente sowie ein Online-Rechner zur überschlägigen Wirtschaftlichkeitsabschätzung einer Biogas-Kleinanlage sind auf der Projektwebseite www.bioenergyfarm.eu verfügbar.



Abb. 1: Logo des BioEnergy Farm 2-Projekts

In dem Projekt arbeiten neben der IBBK Fachgruppe Biogas GmbH und dem Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V. (KTBL) elf Partner aus sieben europäischen Ländern zusammen. Gefördert wird das Projekt durch das „Intelligent Energy Europe“ Programm der Europäischen Union [IEE/13/683/SI2.675767]. Das BioEnergy Farm 2-Projekt endet im Dezember 2016.

2 Projektziele

Das Ziel vom BioEnergy Farm 2-Projekt ist es, Hemmnisse zur Nutzung von Gülle und landwirtschaftlichen Reststoffen in Klein-Biogasanlagen zu identifizieren und Landwirte bei der Projektumsetzung zu unterstützen.

2.1 Scans und Businesspläne

BioEnergy Farm 2 bietet Landwirten zwei Stufen der Unterstützung an, in deren Zentrum die im Projekt entwickelten Berechnungsprogramme („Tools“) stehen:

- Auf der Projektwebseite ist es möglich, mit einem einfachen Berechnungsprogramm (Online-Scan) selbst eine grobe Machbarkeitsprüfung durchzuführen.
- Zusammen mit einem Experten, der bei Bedarf auch vor Ort eine Beratung zu Gülle-/Festmistvergärung durchführt, wird mit einem Offline-Tool eine genauere Berechnung zur wirtschaftlichen Machbarkeit durchführen. Die Ergebnisse werden in Form eines Businessplans zur Verfügung gestellt.

Die Berechnungsprogramme berücksichtigen die nationalen Förderregime sowie typische Technologiekosten. Die Beratung im Rahmen von BioEnergy Farm 2 liefert Landwirten unabhängige und technologieneutrale Informationen. Dies vereinfacht die Beurteilung von realen Angeboten zum Bau einer Biogas-Kleinanlage.

Ziel ist es, dass im Rahmen des Projektes europaweit 700 Landwirte die Machbarkeit einer Biogas-Kleinanlage prüfen und einen individuellen Businessplan erstellen. Als direkte Folge dieser Unterstützung könnten so Kleinanlagen mit einer Gesamtleistung von 28 MW bis 18 Monate nach Projektende errichtet werden.

2.2 Expertentraining und internationaler Austausch

In der ersten Projekthälfte liegt der Schwerpunkt auf der Ausarbeitung der „Tools“ sowie der Schulung von Experten in der Nutzung dieser Instrumente. Damit einher geht ein Erfahrungsaustausch über verschiedene Konzepte für Biogas-Kleinanlagen. Hierbei wird deutlich, wie unterschiedlich die Rahmenbedingungen und die Anlagenkonzepte in den Partnerländern sind und welche unterschiedlichen Ansätze es bei der Gasverwertung gibt. Die Unterschiede zum deutschen Blickwinkel sind zum Teil sehr groß, insbesondere wenn es um einfache Konzepte zur Eigenenergieversorgung eines landwirtschaftlichen Betriebs geht.

Insbesondere bei an den Hof angepassten Biogas-Kleinanlagen, gibt es in Deutschland viele nicht ausgeschöpfte Potenziale, z.B. hinsichtlich der Anlagenzahl, der Rentabilität, aber auch im Hinblick auf die sinnvolle Förderung von Klimaschutzmaßnahmen in der Landwirtschaft.

Wirtschaftsdünger als Silomaissubstitut

CHRISTOF WETTER, ELMAR BRÜGGING, MARIUS KERKERING

1 Projektbeschreibung

Biogasanlagen nutzen Substrate aus der Landwirtschaft und ermöglichen so eine CO₂-neutrale Energiegewinnung. Eine Studie für den Kreis Steinfurt zeigt, dass hier nur 5 % der anfallenden tierischen Ausscheidungen als Biogassubstrat genutzt werden. Das Potenzial zur Substratversorgung mit Feststoffen aus der Separation ist jedoch mindestens doppelt so hoch. Eine Separationstechnik muss auf den Anfall von tierischen Ausscheidungen an allen Ställen angepasst sein und möglichst kontinuierlich arbeiten. Eine unnötige Lagerung der Rohgülle führt zu hohen Methangasverlusten. Mit der Separation der Ausscheidungen am Stall und dem Transport der festen Fraktionen zur Biogasanlage können Gülle-Cluster gebildet und effektiv Energiesubstrate substituiert werden. Gleichzeitig bietet die anschließende Aufbereitung der Gärreste die Chance der Bildung einer nachhaltigen Nährstoff-Senke für Regionen mit hohen Nährstoffüberschüssen.

2 Durchführung

Ziel der Versuche war die Aufklärung der Aufteilung der Nährstoffe und der Biogaserträge. Dies insbesondere auch hinsichtlich ihrer Lagerstabilität. Untersucht wurde ein dreistufiger Separationsaufbau. Zunächst eine Grob- und Störstoffseparation, um grobe Feststoffe abzutrennen, gefolgt von einer Feinfiltration, die eine phosphorreiche, feste Fraktion und ein nahezu feststofffreies Filtrat erzeugt. Zur Feinfiltration (60 bis 100 µm) wurde eine innovative Kleinfiltration in kontinuierlicher Betriebsweise genutzt. Für die Feststoffabtrennung bis zur klaren Flüssigkeit wurden zudem Versuche mit verschiedenen Flockungsmitteln durchgeführt.



Abb. 1: Separationstechnik zur kontinuierlichen Feinfiltration

Eine mögliche Optimierung kann durch die Nutzung von Flockungsmitteln erfolgen. Die Entwicklung der derzeit verfügbaren Hilfsmittel basiert auf Erfahrungen aus der Anwendung bei Hafenschlick oder Klärschlämmen. Eine wirtschaftliche Nutzung dieser Mittel ist in den seltensten Fällen möglich. Mit verschiedenen Versuchen zum Flockungsmechanismus wurden alternative Hilfsmittel gesucht und gefunden.

3 Ergebnisse

Bei einem erfolgreichen Gülle-Cluster, mit mehreren Einheiten von Veredelungsbetrieben die eine Biogasanlage mit separierter Gülle beliefern, kann der Einsatz von „klassischen“ Substraten wie Silomais reduziert werden. Eine Substitution von rund 14 % des eingesetzten Silomais ist möglich. Die Einsparung in der Substratbeschaffung beträgt so für eine Biogasanlage, mit einer installierten Leistung von rund 500 kW_{el}, rund 50.000 € im Jahr. In viehveredelungsstarken Regionen ist ein ebenso wichtiger Faktor, die auf diese Weise eingesparte Flächennutzung von rund 25 ha.

Die Rohgülle weist eine geringe Lagerstabilität auf. Innerhalb weniger Tage reduziert sich der Methangasertrag um über 50 %. Im Vergleich finden sich bei der Alterung von festen Fraktionen, aus der Separation von Rohgülle, keine Verluste. Vereinzelt finden sich durch die Lagerung auch erhöhte Biogaserträge. Die in der Separation erzeugten Feststoffe sind für eine Biogaserzeugung deutlich lagerstabiler.

Mit der Aufdeckung von auf Gülle anwendbaren Flockungsmechanismen konnten alternative Hilfsmittel mit deutlich höherer Wirksamkeit gefunden werden. Es zeigte sich, dass die bisher wenig genutzte Emulsionsspaltung deutlich effektivere Flockungseffekte in tierischen Ausscheidungen auslöst als konventionelle Hilfsmittel.

Das Projekt wurde mit Mitteln aus dem Zweckvermögen des Bundes bei der Landwirtschaftlichen Rentenbank gefördert.

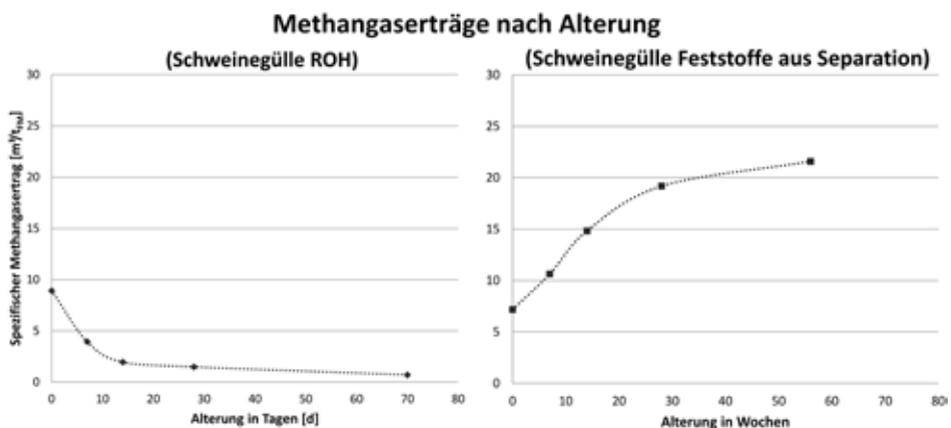


Abb. 2: Vergleich der Methangaserträge nach Alterung von Rohgülle und fester Fraktion aus der Separation von Schweinegülle

Entwicklung einer anorganisch synthetischen Gülle zur definierten Bilanzierung von Strohvergärungen

SEBASTIAN ANTONCZYK, PAUL SCHERER

1 Einleitung

Im Rahmen der EU-Richtlinien für Erneuerbare Energien 2009/28/EC und 28/70/EC werden Biokraftstoffe aus Abfällen oder Reststoffen per Verordnung eine viermal bessere CO₂-Einsparung zugesprochen als bei Gewinnung aus Nahrungs- und Futtermittelpflanzen. Stroh erfüllt die Kriterien für ein günstiges, in großen Mengen vorhandenes und nicht mit der Nahrungsmittelproduktion konkurrierendes Substrat.

Einige Landwirte haben sowohl landwirtschaftliche Lignocellulose-Reststoffe (Stroh) als auch Gülle, die für die Biogasproduktion geeignet sind. Die Gülle kann als Co-Substrat für die anaerobe Vergärung und, aufgrund der chemischen Eigenschaften, auch als nützlicher Puffer betrachtet werden. Lignocellulose haltigen Reststoffen fehlt oft die Pufferkapazität für eine Hochleistungsvergärung.

In Batch Mini-Fermentationen wurde der Einfluss der Pufferkapazität auf die Fermentation von Weizenstroh mittels synthetischer Gülle untersucht. Dies eröffnet die Möglichkeit, den Einfluss einer Fuzzy-Logik-Regelung auf die Vergärung von Stroh erstmalig unter chemisch definierten Bedingungen zu untersuchen. Natürliche Gülle kann als Trägerflüssigkeit bzw. als Puffer aufgrund von Schwankungen nur bedingt wissenschaftlich genutzt werden. Der Grund hierfür ist der variable Anteil an organischer Trockensubstanz, die unterschiedlichen chemischen Verbindungen (organische Säuren, Ammonium etc.) sowie der Gehalt an Mikroorganismen, die in verschiedenen Chargen variieren. Die Mikroorganismen in der Gülle führen zu einem Abbau oder einer Veränderung des Substrats, sodass keine definierten Voraussetzungen für eine genaue Bilanzierung zu Biogas gegeben wären.

2 Material und Methoden

Weizenstroh wurde mit einer Kugelmühle auf eine definierte Länge von 100 µm zerkleinert. Für die Versuche wurden zwei synthetisch, anorganische Lösungen mit einer ionischen Zusammensetzung ähnlich der Rindergülle hergestellt, um den Einfluss ihrer Pufferkapazität auf die Fermentation von gemahlenem Weizenstroh zu untersuchen. Aufgrund von Elementanalysen unterschiedlicher Rindergüllen wurden zwei synthetische Güllen entwickelt. Der Unterschied zwischen den beiden bestand in der Ammoniumquelle, zum einen wurde Ammoniumcarbamat (AC), zum anderen Ammoniumhydrogencarbonat (AHC) verwendet.

Es wurde das Gasbildungspotenzial (nach VDI 4630, Bergedorfer Gärttest) des Strohs in etwa 200 Mini-Batch-Fermentern (250-ml-Gefäße) mit und ohne Zugabe der synthetischen Gülle untersucht. Als Inokulum wurde Klärschlamm einer benachbarten Abwasserreinigungsanlage verwendet, und vorsorglich mit einer Spurenelement-Lösung versetzt um Mangelerscheinungen vorzubeugen. Mit Gleichung 1 wurde die theoretische spezifische Gasproduktionsrate (sGPR) für das verwendete Weizenstroh berechnet:

$$sGPR = w(B) \cdot w(C) \cdot w(K) \cdot sGPR(C) \quad (\text{Gl. 1})$$

w(C): 44,3 % Massenanteil Kohlenstoff

w(B): 97 %, da 3 % der Organik in bakterielle Biomasseneubildung geht

w(K): 67,39 % Massenanteil Kohlenhydrate bzw. vergärbare Substanzen

sGPR(C): 1,866 Nl g_{VS}⁻¹ Kohlenstoff bei 0 °C und 1 bar Druck

Daraus ergibt sich eine theoretisches sGPR von 540 ml g_{oTS}⁻¹.

3 Ergebnisse

Die Ergebnisse der Batch-Fermentationen zeigten, dass die synthetische Gülle mit AC trotz hoher Alkalinität nicht im richtigen Bereich pufferte und nur eine sGPR von 142 ml g_{oTS}⁻¹ sowie einen Methangehalt von 27,2 % (bei einem End-pH von 5,63) aufwies. Später stellte sich heraus, dass das AC bei Temperaturen von 60 °C zerfällt und sich somit nicht für die angestrebte thermophile Prozessführung eignete. Der Ansatz mit AHC zeigte hingegen eine sGPR von 487,3 ml g_{oTS}⁻¹, einen Methangehalt von 52,3 % sowie einen End-pH von 7,78; damit mind. 90,2 % Abbau der abbaubaren Organik (s. o.). Somit wird die synthetische Gülle aus Tabelle 1 jetzt als Trägerflüssigkeit in kontinuierlichen Stroh-Fermentationen verwendet.

Tab. 1: Überblick über die Ionenzusammensetzung der synthetischen Gülle und dem im Labor bestimmten Konzentrationsbereich von Rindergülle

Zusammensetzung (Salze)	Synthetische Gülle		Rindergülle
	Ionenkonzentration mg l ⁻¹	Gesamtkonzentration mg l ⁻¹	Ionenkonzentration mg l ⁻¹
KHCO ₃	2.000 K ⁺	2.400 K ⁺	1.100–3.700
K ₂ CO ₃	400 K ⁺	2.400 K ⁺	1.100–3.700
NH ₄ HCO ₃	2.500 NH ₄ ⁺	2.500 NH ₄ ⁺	1.500–3.000
CaCl ₂ *6 H ₂ O	250 Ca ²⁺	250 Ca ²⁺	120–450
MgCl ₂ *6 H ₂ O	90 Mg ²⁺	90 Mg ²⁺	30–150
Fe ₂ (SO ₄) ₃	6,5 Fe ³⁺	6,5 Fe ³⁺	2–12
	16,8 SO ₄ ²⁻	26,5 SO ₄ ²⁻	250–350
Na ₂ SO ₄	9,7 SO ₄ ²⁻	26,5 SO ₄ ²⁻	250–350
	4,66 Na ⁺	711,2 Na ⁺	400–1.200
NaHCO ₃	706,5 Na ⁺	711,2 Na ⁺	400–1.200

Nutzung von Geflügelkot für den Aufschluss von Getreidestroh

CHRISTINA WARNKE-GURGEL, FRIEDRICH WEISSBACH, NILS ENGLER, HANNES KREMP

1 Ziel des Vorhabens

Vorgestellt wird ein Verfahrenskonzept zum gemeinsamen Einsatz von Hühnertrockenkot (HTK) und Getreidestroh als Substrate für die Biogasgewinnung. Getreidestroh steht in großen Mengen zur Verfügung, wird aber wegen seines hohen Gehaltes an schwer fermentierbarer Zellwandsubstanz (Lignocellulose) in der Biogasproduktion kaum eingesetzt. Die Nutzung der in der Geflügelhaltung anfallenden Exkremente in der Biogasproduktion ist bisher nur begrenzt möglich, weil diese viel mehr Stickstoff enthalten, als für den Fermentationsprozess vorteilhaft ist. Andererseits ist bekannt, dass sich feuchtes Stroh durch Silieren unter Harnstoffzusatz aufschließen lässt. Die Projektidee bestand darin, die in den N-reichen Geflügelexkrementen enthaltene Harnsäure anstelle von synthetischem Harnstoff für den biologisch-chemischen (ammoniakalischen) Aufschluss des schwer abbaubaren N-armen Getreidestrohs zu nutzen. Ziel war es, auf diese Weise die Biogasausbeute aus dem Stroh zu verbessern und den bei alleinigem Einsatz von HTK überschüssigen Stickstoff nutzbringend zu verwerten.

2 Material und Methoden

Vorversuche hatten gezeigt, dass es unter bestimmten Bedingungen zu den angestrebten biologisch-chemischen Umsetzungen in Gemischen aus Stroh und HTK und damit zum Strohaufschluss kommen kann. Als wichtige Voraussetzung dafür erwies sich eine Erwärmung des HTK-Stroh-Gemisches während der ersten Phase des Verfahrens durch aerobe Umsetzungen.

Unter Nutzung eines leistungsfähigen mobilen Schredders wurden 16 t Weizenstroh mit 48 t HTK (40 % TS) vermischt und das Gemisch ohne Verdichtung zu einem kompakten Haufwerk aufgestapelt. Im Substratstapel kam es durch spontan ablaufende biologische und chemische Umsetzungen innerhalb von 5 Tagen zu einer Erwärmung auf 60–70 °C und zu einem Anstieg des pH-Wertes auf etwa 8,5. Nach erwiesener Erwärmung wurde das Gemisch in einer zweiten Verfahrensphase verdichtet und unter Luftabschluss weiter gelagert (konserviert). Zur Prüfung des Aufschlusseffektes wurden Batchversuche in 60-L-Gärgefäßen bei 6-facher Wiederholung und 60 Tagen Gärdauer durchgeführt und die Ergebnisse nach einem neuen Verfahren ausgewertet (ENGLER und WEISSBACH 2015).

3 Ergebnisse

In den Batchversuchen wurde ein eindeutiger Aufschlusseffekt des Stroh nachgewiesen. Dieser äußert sich sowohl in der Beschleunigung des oTS-Abbaus als auch in einem Anstieg des spezifischen Biogasertrags (Tab. 1).

Tab. 1: Aufschlusseffekt und Beschleunigung des oTS-Abbaus

Zeit in Tagen	Messwerte		Methanausbeute [L(N)/kg oTS]			
	Stroh	HTK	Stroh-HTK- rechnerischer Erwartungswert ¹⁾	Gemisch Messwert mit Aufschluss	Differenz zum Erwartungswert	Messwert mit Aufschluss relativ [%]
10	93	300	185	225	40	122
20	163	381	260	287	27	110
30	199	398	288	311	23	108
40	217	401	298	320	22	107
50	225	402	303	324	21	107
60	228	402	306	326	20	107

¹⁾ oTS-Relation von Stroh zu HTK = 56 : 44.

Nach beispielsweise 30 Tagen Gärdauer im Laborfermenter stieg der Methanertrag des Gemisches im Mittel um 23 Normliter je kg oTS (Tab. 1). Auf den Strohanteil des Gemisches bezogen ist das ein Mehrertrag von rund 40 Normlitern Methan je kg oTS. Für die Gestaltung des Verfahrens sind folgende Empfehlungen zu geben:

- Vermischung der beiden Komponenten im Mengenverhältnis 1 t oTS aus Stroh auf 1 t oTS aus HTK; bei durchschnittlichen TS- und oTS-Gehalten entspricht das einem Frischmasseverhältnis von 1 t Stroh auf 3 t HTK,
- Befeuchtung des Gemisches, soweit nötig, auf einen TS-Gehalt von etwa 50 %,
- mehrtägige Lagerung im unverdichteten kompakten Haufen unter Folie bis zum Erreichen der Temperatur von 60 bis 70 °C,
- anschließend Umlagern, Verdichten und damit Konservieren des Gemisches.

Bei der Anwendung des Verfahrens ist zugleich mit einer Hygienisierung des HTK zu rechnen, da pathogene Keime eine mehrtägig anhaltende Temperatur von mindestens 60 °C nicht überstehen dürften.

Literatur

- Block, H.-J.; Weissbach, F.; Schmidt, L. (1989): Erhöhung des Futterwertes von Stroh durch Harnstoffbehandlung. FAO-Symposium „Development in the use of new and non-conventional feeds in ruminant nutrition“, Genf
- Engler, N.; Warnke-Gurgel, C.; Kremp, H.; Weissbach, F. (2015): Wieviel Biogas können HTK-Stroh-Gemische unter Praxisbedingungen liefern? 8. Biogas Innovationskongress, Osnabrück, S. 27-36
- Engler, N.; Weissbach, F. (2015): Auswertungsverfahren für Biogas-Batch-Versuche unter Berücksichtigung zeitlicher Verläufe. 9. Rostocker Bioenergieforum. 18./19.06.2015, S. 281-293

Körnermaisstroh für die Biogasproduktion

MONIKA FLESCHHUT, JOHANNES OSTERTAG, STEFAN THURNER, JOACHIM EDER

1 Einleitung

Durch die Verwertung von landwirtschaftlichen Reststoffen in der Biogasproduktion ist es möglich, die Konkurrenz zur Nahrungs- und Futtermittelproduktion zu entschärfen sowie „Teller und Tank“ zu bedienen. Maisstroh, das nach dem Körnermaisdrusch weitestgehend auf dem Feld verbleibt, ist ein möglicher Reststoff für die Biogasproduktion mit einem bisher völlig ungenutzten Potenzial von 4,5 Mio. t Trockenmasse (TM) in Deutschland. Seine Eignung als Substrat für die Biogasproduktion ist jedoch weitgehend unbekannt. Daher sind grundlegende Fragen zum Leistungspotenzial von Körnermaisstroh zu klären. Im Vordergrund steht zunächst die Bewertung von Ertragsparametern und der spezifischen Methanausbeute.

2 Methodik

Zur Prüfung der Sorteneigenschaften, wurde am Standort Freising ein Feldversuch mit vier Sorten in dreifacher Wiederholung angelegt. Um zusätzlich den Einfluss des Abreifegrades ermitteln zu können, erfolgte die Ernte an drei zeitlich versetzten Terminen (13.10.2014; 27.10.2014; 4.11.2014), beginnend mit dem Zeitpunkt der frühen Druschreife. Bei der Ernte wurden die Kolben von Hand ausgebrochen, in Korn und Spindel separiert und die Restpflanze mit dem Parzellenhäcksler geerntet. Durch Mischen der Restpflanze und der gehäckselten Spindeln konnte anschließend das Maisstroh (= Restpflanze ohne Körner) gewonnen und für nachfolgende Untersuchungen genutzt werden. Die spezifischen Methanausbeuten wurden in Batchversuchen am Institut für Landtechnik und Tierhaltung der LfL nach den Richtlinien der VDI 4630 (ANONYMUS 2006) ermittelt.

3 Ergebnisse und Diskussion

Bei einem durchschnittlichen Kornertrag von 133 dt TM ha⁻¹ (Mittel über alle Sorten und Erntetermine) lag der Strohertrag bei 115 dt TM ha⁻¹ und schwankte in Abhängigkeit von der Sorte und dem Erntezeitpunkt zwischen 106 und 122 dt TM ha⁻¹. Dabei konnte ein signifikanter Ertragsabfall hin zum dritten Erntetermin (4.11.2014) beobachtet werden, während die Sortenunterschiede nur gering waren. Die Trockensubstanz (TS)-Gehalte des Maisstrohs nahmen im Verlauf der Abreife signifikant von 26 % auf 35 % (Mittel über alle Sorten) zu und lagen damit auch bei später Ernte noch im Zeitfenster der optimalen Siloreife.

Bei den Untersuchungen zur spezifischen Methanausbeute wurden durchschnittlich $318 \text{ NI CH}_4 (\text{kg oTM})^{-1}$ erzielt, während die Methanausbeuten von Silomais (Gesamtpflanze zur Siloreife) unter denselben Bedingungen (gleiche Sorten und gleicher Standort) im Mittel bei $357 \text{ NI CH}_4 (\text{kg oTM})^{-1}$ lagen. Für den Erntezeitpunkt des Maisstrohs wurde ein negativer Effekt auf die Methanausbeute beobachtet (tendenziell geringere Methanausbeuten bei zunehmender Abreife der Restpflanze), der bei den einjährigen Ergebnissen nicht statistisch abgesichert werden konnte. In Bezug auf die Sortenwahl konnten nur geringfügige Unterschiede festgestellt werden. Die errechneten Methanhektarerträge lagen im Mittel bei $3500 \text{ Nm}^3 \text{ CH}_4 \text{ ha}^{-1}$, wobei sich in dieser Kennzahl signifikante Effekte des Erntetermins und der Sortenwahl niederschlugen. So sanken die Methanhektarerträge im Verlauf der drei Erntetermine von 3760 auf $3180 \text{ Nm}^3 \text{ CH}_4 \text{ ha}^{-1}$ (Abb. 1). Bezüglich der Sortenwahl ergaben sich lediglich für eine Sorte signifikant geringere Methanhektarerträge im Vergleich zu den übrigen Sorten. Insgesamt waren die Methanhektarerträge für ein Reststoff-Substrat sehr hoch. Zu berücksichtigen ist jedoch, dass die Ergebnisse des Exaktversuches als maximales Potenzial unter Idealbedingungen zu verstehen sind, wohingegen in der Praxis vor allem technische Restriktionen bei der Strohbergung zum Tragen kommen. So zeigen erste Ergebnisse eines Erntetechnikversuches der LfL, dass mit den getesteten Techniken durchschnittlich 50 % des gesamten Strohanfalls geborgen werden können.

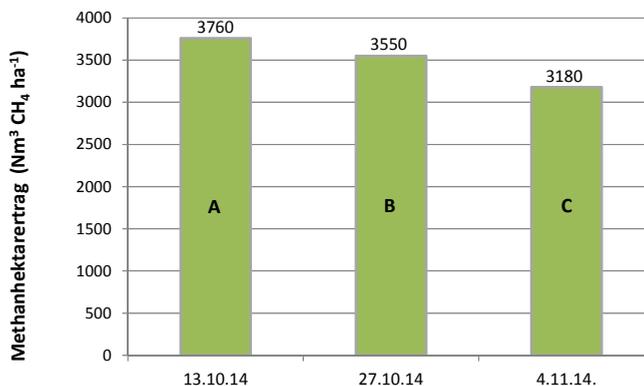


Abb. 1: Methanhektarerträge ($\text{Nm}^3 \text{ CH}_4 \text{ ha}^{-1}$) von Körnermaisstroh in Abhängigkeit des Erntetermins; Mittel über alle Sorten, $n = 12$; verschiedene Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede (LSD, $\alpha = 0,05$)

Literatur

Anonymus (2006): Vergärung organischer Stoffe - Substratcharakterisierung, Probenahme, Stoffehebung, Gärversuche. VDI Richtlinie 4630, Verein Deutscher Ingenieure.

INEMAD – Im- und Export von Wirtschaftsdüngern

SONJA KAY, CLAUDIA ZIEGLER, JEROEN BUYSSE

1 Hintergrund

In den vergangenen Jahren stand eine relativ konstante Tierproduktion einer sinkenden landwirtschaftlichen Nutzfläche gegenüber, so dass der Tierbesatz pro ha sowie die Nährstofflast pro Fläche anstieg. Gleichzeitig wurden Obergrenzen für die Ausbringung von Wirtschaftsdüngern (170 kg N/ha) erlassen.

Im Allgemeinen ringen Länder mit einem Tierbesatz von > 1 GVE/ha mit Nährstoffüberschüssen. Diese Regionen versuchen durch Aufbereitung oder Export das Überangebot zu reduzieren.

An diesem Punkt greift das EU-Forschungsprojekt INEMAD „Verbessertes Nährstoff- und Energiemanagement durch Anaerobe Gärung“ ein. Ziel ist es innovative Strategien zur (Wieder)Verknüpfung der beiden Erwerbszweige – Viehhaltung und Ackerbau – zu untersuchen und darauf aufbauend Möglichkeiten einer optimierten Nährstoffnutzung zu etablieren. Es sollen belastbare Aussagen über die verschiedenen Möglichkeiten des Nährstoffmanagements und eines überbetrieblichen Austauschs generiert und daraus Empfehlungen für Politik und Praxis abgeleitet werden.

2 Transportströme

Der Tierbesatz in den Niederlanden und Belgien ist (überdurchschnittlich) hoch und damit auch die Nährstofflast. Beide Länder begehen jedoch unterschiedliche Wege bei der Problemlösung. Die Niederlande setzen im Wesentlichen auf den Export der Nährstoffe. In den Jahren 2010–2014 wurden jährlich 2–2,5 Mio. t Wirtschaftsdüngern exportiert. Dies entspricht einem Nährstoffgehalt von etwa 25–32 Mio. kg P_2O_5 sowie 32–35 Mio. kg N. Hauptabnehmer waren Deutschland, Belgien und Frankreich. In Flandern (Belgien) hingegen werden überschüssige Wirtschaftsdünger zunächst aufbereitet und anschließend als Konzentrate bzw. Komposte exportiert. Im gleichen Zeitraum wurden zwischen 0,9–1,7 Mio. t mit einem Nährstoffgehalt von 17 bis 24 Mio. kg P_2O_5 sowie 17–26 Mio. kg N exportiert. Diese Mengen fließen nach Frankreich und in die Niederlande.

Im Wesentlichen nehmen Niedersachsen und Nordrhein-Westfalen als direkte Nachbarn die Stoffströme auf. Gemäß der Nährstoffberichte beider Länder verbleiben diese Ströme jedoch nicht in den jeweiligen Bundesländern, sondern werden in andere Bundesländer weitergeleitet.

3 Wirtschaftliche Bedeutung

Dieser Austausch von Nährstoffen innerhalb Europas weist auch eine große wirtschaftliche Bedeutung auf. So fallen pro Tonne zwischen 5 und 20 € Transportkosten an. Allein das Transportaufkommen der Niederlande und Flandern verursacht Kosten von rund 60 Mio. €. Demgegenüber steht ein Nährstoffwert von etwa 1 €/kg N und 0,80 €/kg P₂O₅. Insgesamt wird mit dem Transport von Wirtschaftsdüngern ein Düngewert von 100 Mio. € umgesetzt (Abb. 1).

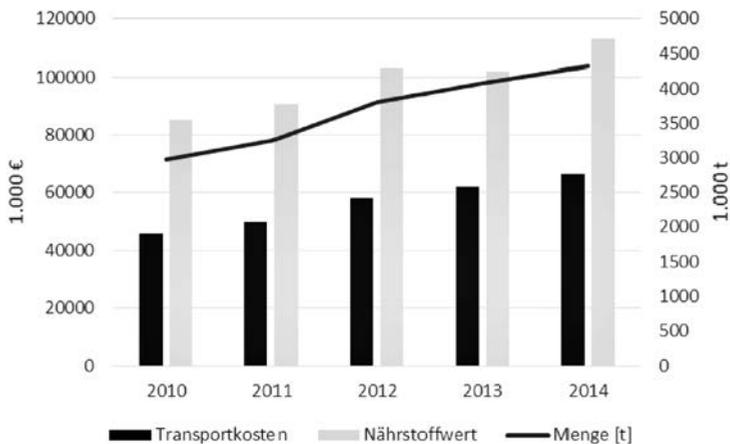


Abb. 1: Transportkosten und Nährstoffwerte der exportierten Wirtschaftsdünger aus den Niederlanden und Flandern

Literatur

- Landwirtschaftskammer Niedersachsen (2013): Nährstoffbericht in Bezug auf Wirtschaftsdünger für Niedersachsen 2012/2013. Oldenburg: Landwirtschaftskammer Niedersachsen
- Landwirtschaftskammer Nordrhein-Westfalen (2014): Nährstoffbericht 2014. Münster: Landwirtschaftskammer Nordrhein-Westfalen
- Netherlands Enterprise Agency (2015): Dutch manure export 2010-2014. Assen: Netherlands Enterprise Agency
- Vlaamse Landmaatschappij (2011-2015): Voortgangsrapport Mestbank 2010, 2011, 2012, 2013, 2014 over het mestbeleid in Vlaanderen. Brussel: Vlaamse Landmaatschappij

The research leading to these results has received funding from the European Union's Seventh Framework Programme (FP7/2007-2013) under grant agreement n° 289712.

Gräseruntersaaten und Zwischenfrüchte zur Steigerung der Gewässerschutzleistung im Energiepflanzenanbau

CHRISTINE VON BUTTLAR, BIRGIT KRÄLING, MATTHIAS WILLMS

Im EVA III-Verbundvorhaben werden als Teilvorhaben „Untersuchungen und Praxiseinführungen eines grundwasserschutzorientierten Biomasseanbaus vor dem Hintergrund der Anforderungen der EG-Wasserrahmenrichtlinie“ zur Erprobung und Optimierung eines grundwasserschonender Energiepflanzen-Anbauverfahrens durchgeführt. Das Vorhaben wird von der Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe (FNR) gefördert. Es werden Ergebnisse vom Standort Niedersachsen (bei Soltau) vorgestellt. Der ausgewählte Praxisbetrieb setzt überwiegend Mais, aber auch Ganzpflanzengetreide und Schweinegülle als Gärsubstrat ein. Es handelt sich um einen sandigen Lehmlandstandort mit 18–42 Bodenknoten und im Mittel 800 mm Jahresniederschlag bei 7,6 °C Jahresmitteltemperatur.

1 Zwischenfrüchte als Untersaaten im Mais etablieren

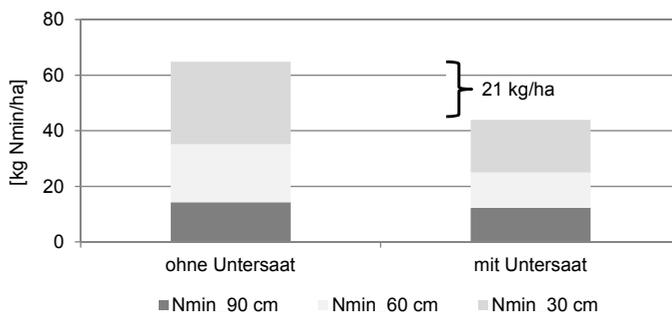


Abb. 1: Herbst- N_{\min} nach Mais ohne und mit Gräseruntersaat. Mittel der Jahre 2011–14

Durch den Anbau von Rotschwingel bzw. Weidelgrasmischungen als Untersaaten im Mais, konnte der Herbst- N_{\min} -Wert im Mittel der Jahre 2011 bis 2014 um rund 21 kg/ha gesenkt werden. Das Ertragsniveau des Mais mit und ohne Untersaaten war jeweils gleich hoch. Voraussetzung für gelungene Untersaaten ist eine ausreichende Wasserversorgung. Die Praxis zeigte, dass ein Einarbeiten der Untersaaten dem breitwürfigen Verteilen, z.B. mit dem Schleuderstreuer, vorzuziehen ist, da bessere Feldaufgänge erzielt werden. Die Grasnarbe sollte über Winter stehen bleiben und eine Nachnutzung des Grasaufwuchses im Folgejahr vorgesehen werden. Positiver Nebeneffekt des Anbaus von Untersaaten als Zwischenfrucht sind eine verbesserte Befahrbarkeit zur Ernte sowie die Reduzierung von Bodenverdichtungserscheinungen. Eine an den tatsächlichen

Nährstoffbedarf angepasste N-Düngung, die in ausreichendem Maß die standörtliche N-Nachlieferung berücksichtigt, ist ein weiterer entscheidender Faktor für das Gelingen eines grundwasserschonenden Silomaisanbaus mit niedrigen N-Überhängen vor Winter.

2 Zwischenfrüchte nach Biogassubstrat Getreide-GPS

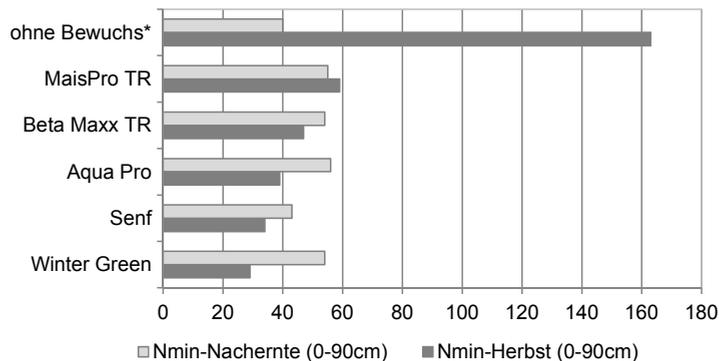


Abb. 2: Nachernte- und Herbst- N_{\min} verschiedener Zwischenfruchtmischungen nach Getreide-GPS 2014

Zwischenfrüchte können den nicht verbrauchten Düngerstickstoff und bodenbürtigen Stickstoff, der bis zum Herbst mineralisiert, konservieren und vor Auswaschung schützen. Sie sind daher die geeignete Folgenutzung nach früh räumendem Getreide-GPS oder vor Sommerungen. Die gesetzlichen Rahmenbedingungen haben eine starke Bewerbung von Zwischenfruchtmischungen zur Folge. Nach Roggen-GPS im August 2014 erfolgte die Aussaat mehrerer Zwischenfruchtarten bzw. -mischungen. Zur Saat der Zwischenfrüchte erfolgte eine Gärrestgabe von 20 m³/ha. Die Stickstoffbindung durch den Aufwuchs der Zwischenfrüchte lag im Herbst 2014 zwischen 112 und 181 kg N/ha (Vorjahr: 97–163 kg N/ha). Auch Kalium wurde in hohen Mengen in der Pflanzenmasse gebunden (167–249 kg K/ha). Die in den Zwischenfrüchten gebundenen hohen Mengen an Stickstoff werden über dem Winter vor der Auswaschung geschützt und stehen im Frühjahr wieder der Folgekultur zur Verfügung. Hinsichtlich der N_{\min} -Werte nach der Ernte und im Herbst zeigt sich ein gutes Grundwasserschutzpotenzial der Zwischenfrüchte. Dies wird im Vergleich zur gleichermaßen gedüngten Parzelle ohne Bewuchs deutlich, die als Referenzparzelle angelegt wurde. Die getesteten Zwischenfruchtmischungen nahmen zwischen 100–200 kg N/ha an Stickstoff in der Pflanzenmasse auf und konnten den Herbst- N_{\min} gegenüber der „Freifläche“ um bis zu 100 kg N/ha auf Herbst- N_{\min} -Werte zwischen 30–50 kg N/ha senken.

Zwischenfruchtanbau als ein Beitrag zum Gewässerschutz im Energiepflanzenanbau

GUNTER EBEL, DANIELA ZANDER, ERNST WALTER, JENS ECKNER, CARSTEN RIECKMANN

1 Einleitung

Die gesellschaftlichen/politischen Rahmenbedingungen für den Energiepflanzenanbau und die in diesem Zusammenhang diskutierten Restriktionen aus Sicht des Gewässerschutzes (z.B. N-Saldo nicht größer als 60 kg N/ha) erfordern vertiefende Untersuchungen. Diesbezüglich werden innerhalb der EVA-Versuche im Satellitenprojekt „Zwischenfruchtanbau als ein Beitrag zum Gewässerschutz im Energiepflanzenanbau“ aus pflanzenbaulicher, ökologischer und ökonomischer Sicht Varianten zur Verminderung der N-Verlagerung nach unterschiedlichen Ernteterminen von Getreide bzw. Mais (Reifegruppen und/oder Saattermin) getestet¹.

2 Material und Methoden

Senf als abfrierende bzw. Grünschnittroggen als winterharte Zwischenfrucht werden orthogonal, ergänzt mit einem standortabhängigen Zusatzprüfglied (b4) pfluglos nach Getreide bzw. Mais etabliert (Tab. 1). Zum Vergleich wird die Variante ohne Winterbegrünung getestet. Die Versuche werden an fünf Standorten (s.u.) mit je drei Anlagen in den Zeiträumen 2012–14; 2013–15; 2014–16 durchgeführt.

Tab. 1: Zwischenfruchtversuch (Winterbegrünung) nach Getreide bzw. Mais

Faktor	Stufen
A: Vorfrucht (Pflanzenart/ Erntetermin) ¹⁾	a1: Getreide Korn (Winterweizen oder Winterroggen) a2: Mais früh (S180 bis S200) a3: Mais mittelfrüh bis mittelspät (S240 bis S260)
B: Zwischenfrucht (zeitlich versetzte Aussaat in Abhängigkeit der Vorfrucht Getreide, Mais bzw. Sorghum)	b1: ohne Winterbegrünung (Kontrolle) b2: Grünschnittroggen b3: Senf b4: winterharte Zwischenfrucht (standortdifferenziert)

¹⁾ Das Prüfmerkmal „Mineralischer Bodenstickstoff“ unter den Zwischenfruchtvarianten in den Bodentiefen 0–30, 30–60, 60–90 cm ist Schwerpunkt für die Bewertung der Nitratverlagerung.

3 Erste Ergebnisse

In Güterfelde (frühjahrs- und vorsommertrockener sandiger Standort Nordostdeutschlands) bewirkte eine günstige Niederschlagsverteilung im Mai/Juni 2013 überdurch-

¹ <http://www.eva-verbund.de>; Förderung: BMEL; Projektträger: FNR e.V. FKZ: 22006012.

schnittlich hohe Erträge von Winterroggen (94 dt/ha) bzw. Mais (188 dt TM/ha). Das führte zu hohen N-Entzügen und relativ geringen Mengen an mineralischem Bodennitrogen in der Schicht 0–90 cm nach der Ernte der Vorfrüchte ($\leq 10 \text{ kg N}_{\min}/\text{ha}$). Die Vorwinterentwicklung der Zwischenfrüchte war allgemein flächendeckend mit entsprechenden Entzügen je Biomasseentwicklung. Beides begründete tolerable Bodennitrogen-Mengen ($< 30 \text{ kg N}_{\min}/\text{ha}$ in 0–90 cm) im Mittel als auch zu jedem Probenahmetermin des Zeitraums 10/2013 bis 05/2014. Unter den Varianten ohne Begrünung nach Mais sind bis zu dreifach höhere N_{\min} -Mengen gegenüber den Varianten mit Zwischenfrüchten auffällig (21 zu 7 kg/ha in 0–90 cm). Am Standort Forchheim (Körnermais-Region, Rheintal, Baden-Württemberg) wurden ähnliche Maiserträge bei ebenfalls tolerablen Rest- N_{\min} nach der Ernte bzw. im Sickerzeitraum ermittelt. Dabei waren auch hier in der Variante ohne Bewuchs höhere N_{\min} -Mengen vorhanden.

Im Zwischenfruchtversuch in Werlte (Futterbau-Veredlungsregion, Niedersachsen) lag der Bodennitrogen nach der Maisernte über dem Niveau der untersuchten Standorte Güterfelde und Forchheim, trotz des Ertragsoptimums und hoher N-Entzüge. Eine Ursache dafür wird in der Vorbewirtschaftung gesehen, die in der folgenden Auswertung stärker zu berücksichtigen ist. An den Standorten Ascha (Verwitterungsböden der Vor- und Mittelgebirgslagen, Bayern) und Burkersdorf (Thüringen) verzögerten sich durch extreme Witterungssituationen 2013 die Feldarbeiten bzw. das Pflanzenwachstum. Die Folge waren sehr geringe Maiserträge, deutlich geringere N-Entzüge und relativ hohe N_{\min} -Mengen nach der Maisernte. Die Entwicklung der Zwischenfrucht nach Mais war vor Winter an den Standorten Werlte und Ascha nur bedingt möglich (schlechter Aufgang). In Burkersdorf wurde bei der Variante ohne Winterbegrünung eine um ca. 80 kg/ha höhere Bodennitrogen-Menge als bei Senf bzw. Grünschnittroggen nach Mais im Januar 2014 ermittelt.

Da Nitratstickstoff dominiert, besteht insbesondere in Fällen mit hohen N_{\min} -Mengen (z. B. bei fehlender Winterbegrünung nach Mais) die Gefahr einer stärkeren Nitratverlagerung. Das deutet sich auch bei geringeren N_{\min} -Mengen für den Zeitraum November 2013 bis Mai 2014 am Standort Güterfelde an.

4 Ausblick

Unstrittig bleibt, dass der Zwischenfruchtanbau teilweise Boden-N über die Winterperiode in der Biomasse speichert und im Vergleich zu fehlender Winterbegrünung einer Verlagerung im Sickerzeitraum entgegenwirkt. Die Statusergebnisse werden mit den Anbauperioden 2013–15 und 2014–16 evaluiert. Des Weiteren erfolgt für die Projektgesamtbetrachtung eine Berücksichtigung der Faktoren Vorfruchtwirkung und Bewirtschaftungsintensität sowie die Querauswertung weiterer Zwischenfruchtversuche.

Erfolge mit Mais-Untersaaten auch unter extremen Witterungseinflüssen

DANIELA SCHUMANN, MICHAEL GRIEB, MAENDY FRITZ

1 Einleitung

Im Rahmen des deutschlandweiten Verbundvorhaben EVA (Entwicklung und Vergleich von optimierten Anbausystemen für landwirtschaftliche Produktion von Energiepflanzen unter den verschiedenen Standortbedingungen Deutschlands) gehen mehrere landwirtschaftliche Institutionen der Frage nach, ob sich Ackerfuttermischungen als Untersaaten in Energiepflanzenfruchtfolgen etablieren und nutzen lassen. Dazu wurden deutschlandweit Feldversuche angelegt, darunter auch an einem Standort im Vorderen Bayerischen Wald. In den Versuchen wird folgenden Fragestellungen nachgegangen: Welche Untersaatmischungen eignen sich für diesen Standort am besten zur Etablierung ertragreicher Aufwüchse in Maisbeständen? Welches Ansaatverfahren eignet sich am besten für die Etablierung von Untersaaten in Maisbeständen? Welche Vorteile bringen Untersaaten im Mais für den Gewässerschutz und für die Ertragsstabilisierung einer Fruchtfolge?

2 Versuchsbeschreibung

Es wurden ausgewählte Ansaatmischungen zu zwei unterschiedlichen Terminen im Mais als Untersaat ausgesät (1. Termin = BBCH 13, 2. Termin = BBCH 15). Hierfür wurde auf überjährige Ackerfuttermischungen wie Klee gras (FM4K), Luzernekleegrass (FM3K) und Weidelgrasartenmischung (WV) zurückgegriffen. Der Versuch wird in drei aufeinander folgenden Jahren (drei Rotationen) wiederholt um Witterungseinflüsse zu berücksichtigen. Die Dauer einer Rotation beträgt zwei Jahre. Im ersten Jahr werden Maisanbau und -ernte sowie Untersaatenetablierung realisiert. Das zweite Jahr dient als Hauptnutzungsjahr der Ackerfuttermischungen. Ausgewählte Ergebnisse der ersten Rotation sind Inhalt dieses Beitrages.

3 Ergebnisse

Die Maiserträge des Jahres 2013 waren mit durchschnittlich 65 dt TM/ha das Resultat extremer Witterungseinflüsse (Abb. 1). Eine ungewöhnlich feucht-kühle Witterung im Frühjahr verzögerte die Aussaat. Niedrige Temperaturen verhinderten einen zügigen Aufgang, worauf langanhaltende und starke Niederschläge das Saatgut einschlammten. Frühzeitiges Abreifeverhalten der Pflanzen verhinderte jede weitere Biomassebildung.

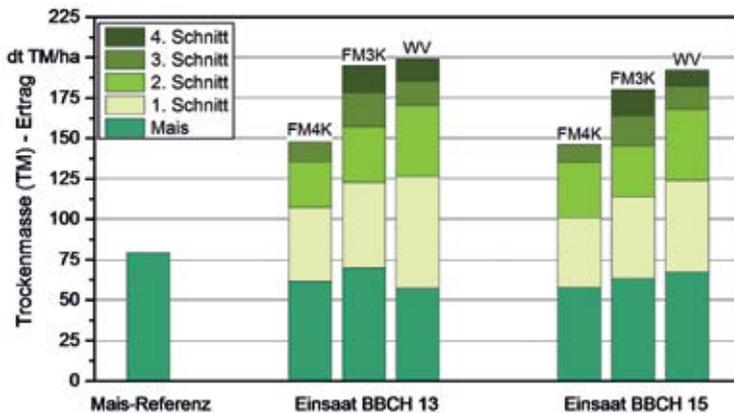


Abb. 1: Mais- und Ackerfüttererträge aus 2013 und 2014 in Anlage I

Ein erhöhtes Windaufkommen im Spätsommer, das die Maispflanzen umknickte, machte zudem eine frühzeitige Beerntung notwendig.

Der Feldaufgang der Untersaaten unter Mais führte zu sehr lichten Beständen. Zudem litten diese unter einem erhöhten Unkrautbesatz. Erst nach der Maisernte konnten sich die Einsaaten langsam erholen. Entgegen der schlechten Etablierungserfolge im Jahr 2013 bildeten die Einsaaten im darauffolgenden Jahr 2014 überraschend dichte, wüchsige Bestände (Abb. 1). Die höchsten Erträge hatten Weidelgras (134 dt TM/ha) und FM3K (121 dt TM/ha) zu verzeichnen. FM4K hingegen war als Resultat eines lückigen Bestandes durch geringere Ertragsleistung (88 dt TM/ha) gekennzeichnet. Ein Vergleich der Saattermine ergab nur beim Weidelgras markante Differenzen von 142 dt TM/ha (1. T.) und 125 dt TM/ha (2. T.).

Dass die Kulturen witterungsbedingt die N-Düngung in 2013 nicht umsetzen konnten, lässt sich in den sehr hohen bis hohen N_{\min} -Gehalten in allen Varianten sowohl zu Vegetationsende 2013 erkennen. Besonders hohe N_{\min} -Gehalte wurden unter anderem für die Mais-Referenz-Variante festgestellt. Die um bis zu 200 kg/ha reduzierten N_{\min} -Gehalte im Frühjahr 2014 lassen darauf schließen, dass durch den fehlenden Pflanzenbestand (Brache nach Mais) oder durch den geringen Bewuchs (Ackerfüttermischungen), der mobile Stickstoff im Boden ausgewaschen wurde.

4 Fazit

Unter extremer Witterung stellten sowohl Mais- als auch Untersaatenetablierung eine große Herausforderung dar, die sich sowohl im Pflanzenbestand als auch in den Reststickstoffgehalten widerspiegelte. Dennoch erzielten die ausgewählten Ackerfüttermischungen unerwartet gute Erträge im Folgejahr.

Getreide-Ganzpflanzensilage mit Untersaat für die Biogasproduktion

ANNA TECHOW, CHRISTINE RIEDEL, DOROTHEA HOFMANN

1 Einleitung

Unter den bestehenden Boden- und Klimaverhältnissen in Deutschland ist Mais die zurzeit leistungsfähigste Kulturart zur Produktion von Methan. Wegen erhöhter Schädlings- und Krankheitsgefahr in maisbetonten Fruchtfolgen sind aber sinnvolle Ergänzungen gefragt. Ganzpflanzensilage (GPS) aus Wintergetreide kann aufgrund der vielfältigen Möglichkeiten in fast jede Fruchtfolge integriert werden. Das Ertragspotenzial ist zwar deutlich niedriger als bei Silomais, allerdings bedingt die winterliche Bodenbedeckung eine Verminderung von Bodenerosion und Stickstoffaustrag. Zudem kann durch den Anbau einer Untersaat von Ackerfuttermischungen der Ertrag pro Hektar und Jahr noch deutlich erhöht werden. Mit pflanzenbaulichen Vorteilen wie der Verbesserung der Humusbilanz und der Förderung des Bodenlebens tragen die Ackerfuttermischungen zur langfristigen Sicherung der Bodenfruchtbarkeit bei. In diesem Versuchsvorhaben der Bayerischen Landesanstalt für Landwirtschaft wird geprüft, ob sich unterschiedliche Getreidearten sowie deren Kombination mit Untersaaten zur Etablierung ertragreicher Aufwüchse eignen.

2 Material und Methoden

Die Studie basiert auf einem 4-jährigen Feldversuch (2012–2015), der im Rahmen eines deutschlandweiten Verbundvorhabens (EVA = Entwicklung und Vergleich von optimierten Anbausystemen für landwirtschaftliche Produktion von Energiepflanzen unter den verschiedenen Standortbedingungen Deutschlands) angelegt wurde. Ergänzend wurden an diesem Versuchsstandort in Grub (Braunerde auf Münchener Schotterebene, sL) weitere Versuchsvarianten aufgenommen.

Abgesehen von der Getreideart (Winterroggen, Triticale, Wintergerste, Sommergerste) wurden verschiedene Mischungen (Luzernegras: FM3K, Klee gras: FM4K, Weidelgras Mischung: Bastard- + Welsches Weidelgras) sowie unterschiedliche Einsaatvarianten (Frühjahrsansaat, Herbstansaat, Blanksaat) geprüft.

3 Ergebnisse

Die Abbildung 1 zeigt die Trockenmasseerträge der Getreidearten sowie die zusätzlichen Erträge durch die Luzernegrasesaat. Das Wintergetreide konnte sein Ertragspotenzial

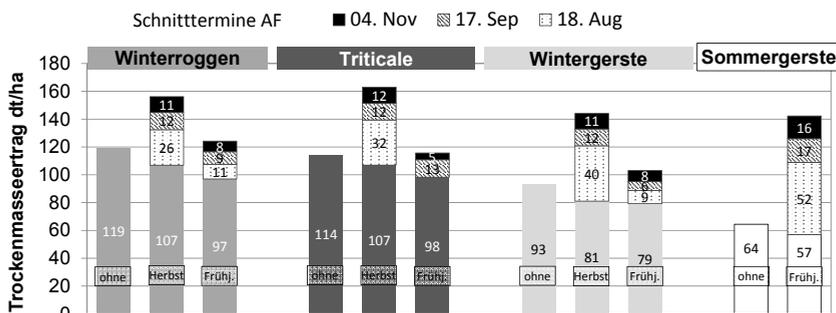


Abb. 1: Trockenmasseerträge (dt/ha) der vier Getreidearten sowie der Luzernegrasesaaten im Frühjahr oder Herbst des Versuchsjahres 2014

aufgrund der Frühjahrstrockenheit im Jahr 2014 nicht voll ausschöpfen und erreichte ohne Untersaat deshalb insgesamt reduzierte Erträge.

Der Ertrag von Sommergerste lag wesentlich unter dem der Winterungen. Durch eine Frühjahrseinsaat konnten Einbußen im Biomasseertrag aber weitestgehend vermieden werden. Winterroggen und Triticale erreichten erwartungsgemäß die höchsten Erträge.

Durch die auf 2/3 reduzierte Saatstärke und den Herbizidverzicht fiel der Getreideertrag in den Untersaat-Varianten insgesamt geringer aus als in den Reinsaat-Varianten. Die nach der Ernte der Deckfrucht gut etablierte Untersaat konnte den Biomasseertrag allerdings mit 2–4 zusätzlichen Schnitten nochmal erheblich steigern. Die Frühjahrsuntersaaten haben sich aufgrund der Trockenheit deutlich schlechter etabliert und präsentierten sich auch im Jahresverlauf weniger wüchsig als die Untersaaten vom Herbst. Erfahrungen aus dem vorherigen Versuchsverlauf haben allerdings gezeigt, dass die Frühjahrsuntersaaten nach der Deckfruchternte noch einmal aufholen und im Folgejahr sehr gute Erträge bringen können.

4 Fazit

Durch die Kombination von Getreide-GPS mit Ackerfuttermischungen als Unter- oder Blanksaat lassen sich ertragreiche Aufwüchse ernten. Auch in der Literatur finden sich Angaben, dass der Ertrag durch den Anbau einer Folgekultur und/oder Untersaat gegenüber dem reinen Hauptfruchtanbau um rund 20 % gesteigert werden kann (z.B. KARPENSTEIN-MACHAN 2005). Zusätzlich ist der über Winter begrünete Acker weniger erosions- und auswaschungsgefährdet und trägt somit zur langfristigen Sicherung der Bodenfruchtbarkeit und des Ertragspotenzials bei.

Literatur

Karpenstein-Machan, M. (2005): Energiepflanzenanbau für Biogasanlagenbetreiber. DLG-Verlag, Frankfurt/M.

Das GR3-Projekt – Möglichkeiten einer alternativen Energiegewinnung durch die Verwertung ungenutzter Grasressourcen

ACHIM KAISER, MICHAEL KÖTTNER

1 Vorstellung des GR3-Projektes

Das Kürzel GR3 steht für GRas as a GReen Gas Resource. Im Rahmen dieses Projektes ist die IBBK Fachgruppe Biogas GmbH maßgeblich mit beteiligt, Lösungen zu erarbeiten, die dazu führen sollen, den Anteil bei der nachhaltigen Verwertung von Grasreststoffen in Biogasanlagen zu erhöhen, regionale Wertschöpfungsketten (die nicht mit Nahrungsmitteln konkurrieren) zu entwickeln, Arbeitsplätze im ländlichen Raum zu schaffen und einen langfristigen Markt für Grasreststoffe in der Region zu etablieren. Die insgesamt elf Projektpartner kommen aus fünf verschiedenen Ländern. Diese sind Belgien, Dänemark, Deutschland, Italien und Portugal. Im Rahmen des Projektes werden Akteure vernetzt, bewährte Verfahrenstechniken identifiziert und es finden Informationsveranstaltungen (Workshops und Exkursionen) statt. Vorrangiges Projektziel ist es, während der dreijährigen Laufzeit (April 2013 bis März 2016) Entscheidungsträger, Schlüsselfiguren und weitere Akteure im Bereich Grasverwertung in den fünf Modellregionen (Flandern, Süddänemark, Saarland, Veneto, Großblissabon) gezielt zusammen zu bringen.



Abb. 1: Logo vom GR3-Projekt [Quelle: www.grassgreenresource.eu] (links); Öffentlichkeitsarbeit im Rahmen der Zukunftstechnologietage am 06.11.2015 in Cottbus [Quelle: IBBK Fachgruppe Biogas GmbH] (rechts)

2 Aktivitäten des IBBK bei GR3

Die Aktivitäten des IBBK im Rahmen des Projektes, das finanziell unterstützt wird vom EU-Programm Intelligent Energy Europe (IEE), waren verteilt auf drei Arbeitspakete, den sog. Workpackages (WPs).

2.1 Erstellung eines Reports über den aktuellen Stand der Technik bei der Erfassung, Bergung und Verarbeitung von Gras (WP 3)

Ziel des sog. BAT-Reports war es, eine Evaluierung und Zuordnung der am besten zur Verfügung stehenden Techniken zur Erfassung, Bergung und Verarbeitung von Grasreststoffen zu erstellen. Der Report (er kann neben weiteren Publikationen von der Website www.grassgreenresource.eu heruntergeladen werden) besteht aus den folgenden fünf Teilbereichen „Evaluierung der verschiedenen Fermentertechniken“, „Identifizierung und Bewertung geeigneter Grasarten“, „Bewertung verschiedener Aufbereitungstechnologien für diverse Grasreststoffe“, „Mäh-, Berge- und Lagertechnik von Grasreststoffen verschiedener Herkunft“ sowie „Bewertung der Logistikkette“.

2.2 Gezielte Akteursvernetzung der jeweiligen Zielgruppen (WP 5)

Im Rahmen von WP 5 sollten vorrangig Akteure vernetzt und zum intensiven Fachaus-tausch bewegt werden, die aus den drei Zielgruppen Kommunalvertreter (Städte, Gemein-den, Landkreise), Vertreter der Abfallwirtschaft und Entsorgungsunternehmen, Naturschutzinitiativen und Landschaftserhaltungsverbände, sowie Betreiber von Biogas- und Kompostierungsanlagen kommen. Insgesamt fanden im Rahmen der Akteursvernet-zung über den Zeitraum von Februar 2014 bis Mai 2015 fünf sehr erfolgreich verlaufene Veranstaltungen statt. Diese setzten sich zusammen aus drei Workshops (in Saarbrü-cken, Ingelheim/Rhein und Waldenburg) sowie zwei Exkursionen (Schleswig-Holstein und Rheinland-Pfalz/Lothringen).

2.3 Entwicklung von Businessplänen (WP 5)

Für die vorher identifizierten führenden Akteursgruppen werden vom IBBK individuelle und projektspezifische Businesspläne entwickelt. Diese sollen sehr deutlich die ökonomischen und rechtlichen Rahmenbedingungen darstellen sowie die Synergien zwischen den jeweiligen Substratbeschaffern (Inverkehrbringer der Grasreststoffe) und den ent-sprechenden Verwertern (Biogaserzeugern) aufzeigen.

2.4 Informationsbereitstellung (WP 7) durch Öffentlichkeitsarbeit, Website und regelmäßigen Newsletter

Das IBBK ist dafür verantwortlich, die im Rahmen des Projektes gewonnenen Erkennt-nisse nach außen zu tragen. Dies geschieht hauptsächlich durch folgende Aktivitäten:

- Zielgerichtete Newsletter (alle vier Monate) an den interessierten Personenkreis (Be-reitstellung von Neuigkeiten im Projekt, auf Veranstaltungen hinweisen, Bereitstel-lung von Informationen für die Zielgruppe)
- Öffentlichkeitsarbeit durch Vorträge auf (inter-)nationalen Messen, Konferenzen und Tagungen.

Nachhaltige Ganzpflanzengetreideproduktion auf diluvialen Standorten Nordost-Deutschlands

GUNTER EBEL, GERT BARTHELMES

1 Einleitung

Am Standort Güterfelde, der den Boden-Klima-Raum „trocken-warme diluviale Böden des ostdeutschen Tieflandes“ und das brandenburgische Landbaugebiet III repräsentiert, liegen seit 2005 Erfahrungen aus verschiedenen Versuchen zum Ganzpflanzengetreideanbau für den Kosubstrateinsatz in Biogasanlagen vor. Hier sind vor allem die Versuche im Fruchtfolgeprojekt EVA sowie die Getreideversuche mit den Faktoren Erntezeitpunkt und Fungizideinsatz (2007 und 2008 – vgl. EBEL, BARTHELMES und ADAM 2009) und das Ganzpflanzengetreideprojekt im Zeitraum von 2008 bis 2011 zu nennen. Im Folgenden werden die Ergebnisse des Projektes „Nachhaltige Ganzpflanzengetreideproduktion“ inklusive der Untersuchungsschwerpunkte Saatzeit/Saatstärke, N-Düngung und Untersaaten der Versuchsjahre 2011/12, 2012/13, 2013/14 mitgeteilt.

2 Ergebnisse

2.1 Jahresvergleich und TM-Gehalte

Die Ganzpflanzengetreideerträge variierten witterungsbedingt im Jahresvergleich von 74 dt TM/ha (2012) bis 124 dt TM/ha (2014) und im Artenvergleich mit Winterroggen (88...126 dt TM/ha) \geq Artenmischung (77...126 dt TM/ha) $>$ Wintertriticale (56...118 dt TM/ha). Die Ertragsrelation aller Ganzpflanzengetreideversuche am Standort seit 2005 wurde somit bestätigt – Winterroggen mit 91 dt TM/ha $>$ -triticale (83) $>$ -gerste (76) deutlich vor Sommergetreide mit 55 dt TM/ha. Die Ganzpflanzenernte 2013 erfolgte wie 2010 witterungsbedingt ca. 14 Tage später (19. Juni) als in den Vorjahren bzw. 2014. Durch die günstige Niederschlagsverteilung im Mai/Juni 2013 bzw. Mai 2014 wurde der optimale TM-Gehaltsbereich (28–35 %) zur Ernte eher eingehalten als 2012 (lange Trockenheit im Mai).

2.2 Saatzeit und -stärke

Im Vergleich der Saatzeit lag das dreijährige Ertragsmittel der Arten für die frühe Aussaat (14.09. bis 21.09.) bei 117 dt TM/ha. Bei einem späteren Saattermin (08.10. bis 12.10.) traten innerhalb von 20 Tagen signifikante Mindererträge von 16 % (= 98 dt TM/ha) gegenüber der frühen Aussaat auf. Diese Ertragseinbußen variierten aber in den Jahren witterungsbedingt von 2 % (2014 – nicht signifikant), 12 % (2013 – signifikant) bis zu 40 % (2012 – signifikant). Für die reduzierte Saatstärke (Winterroggen 175 statt 220/265

bzw. Wintertriticale 240 statt 300/360 keimfähige Körner/m²) wurden bei der frühen Saatzeit keine Effekte und bei der späten Saatzeit signifikant geringere Erträge ausgewiesen. Eine Steigerung der Saatstärke auf 120 % erbrachte im Mittel der drei Jahre keinen Ertragsvorteil.

2.3 N-Düngung

Ohne mineralische N-Düngung waren Ertragseinbußen im dreijährigen Mittel von 34 bis 39 % und variantenbezogen bis zu 50 % (Wintertriticale 2012) zu verzeichnen. Diese Größenordnung wird allgemein in der Literatur für andere Produktionsrichtungen ebenfalls angegeben. Bei reduziertem N-Aufwand (70 % Düngungsmenge = 70–75 kg N/ha in zwei Gaben mit Kalkammonsalpeter = KAS) traten 5 % (Winterroggen – nicht signifikant) bis zu 9 % geringere Erträge (Wintertriticale, Artenmischung – signifikant) gegenüber der ortsüblichen Variante auf. Der Erfolg der Alzondüngung hängt maßgeblich von einem zeitigeren Ausbringungstermin im Vergleich zu KAS ab. Allerdings ist das sehr stark von der Befahrbarkeit und demzufolge von der Witterung im Zeitraum Mitte Februar/Anfang März abhängig.

2.4 Untersaaten

Die Untersaaten (Einjähriges Weidelgras, Serradella und Knaulgras jeweils mit Frühjahrsensaat in die Getreidebestände) konnten sich zum einen 2012 durch das trockene Frühjahr nur sehr zögernd bzw. 2013 durch das sehr späte Frühjahr gar nicht etablieren. Nur die Variante mit Knaulgras in der Herbstsaat entwickelte sich flächendeckend in den geprüften Versuchsjahren und kann bedingt empfohlen werden. Diese lückigen Untersaatbestände bzw. die optimale Niederschlagsverteilung Mai/Juni 2013 bzw. 2014 beeinflussten kaum den Ertrag des Ganzpflanzengetreides. Die Erntewürdigkeit der Untersaaten war eingeschränkt (vgl. EBEL et. al. 2015).

Literatur und Hinweise auf ausführliche Informationen

- Dickeduisberg, M.; Bischof, R.; Biertümpfel, A.; Gurgel, A.; Ebel, G.; Barthelmes, G. (2015): So geben Ganzpflanzen Gas. In: dlz agrarmagazin April 2015
- Ebel, G.; Barthelmes, G.; Adam, L. (2009): Energie aus Getreide – Ganzpflanzenutzung zur Biogaserzeugung. Neue Landwirtschaft, Berlin 7/2009, S. 50–51
- Ebel, G.; Eckner, J.; Walter, E.; Zander, D.; Rieckmann, C. (2015): Zwischenfruchtanbau als ein Beitrag zum Gewässerschutz im Energiepflanzenanbau. In: Tagungsband – Thüringer Bioenergetag in Jena am 26.02.2015, Herausgeber: Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft, Jena, S. 6–15
- Versuchsberichte: www.fnr-server.de/ftp/pdf/berichte/22016811.pdf ; [.../22012908.pdf](http://www.fnr-server.de/ftp/pdf/berichte/22012908.pdf) und [.../22013008.pdf](http://www.fnr-server.de/ftp/pdf/berichte/22013008.pdf) (<http://www.eva-verbund.de>) ;

Förderung: BMEL; Projektträger: FNR e.V.

Zuckerrüben als Biogassubstrat: Untersuchungen zur Reduzierung des Erdanteils durch Auswahl des Genotyps

STEFAN DIRKS, PETER SCHULZE LAMMERS

1 Einleitung und Zielsetzung

Durch den Einsatz von Zuckerrüben in Biogasanlagen kommt es zum Eintrag von Erde in den Fermenter. Besonders die in der Wurzelrinne anhaftende Erde lässt sich auch durch ein Waschen der Rüben nicht vollständig entfernen. Vor allem bei Sandfraktionen wird von einer Sedimentation ausgegangen, welche das Fermentervolumen reduziert (STRUBE 2011).

Im Rahmen des FNR-Projekts „Aufbereitung und Konservierung von Zuckerrüben zur Verwendung in NawaRo-Biogasanlagen“ wurden daher zwölf verschiedene Zuckerrübensorten auf ihre Erdanhaftungen in der Wurzelrinne nach der Wäsche untersucht. Ziel der Untersuchung war die Bewertung von Rübensorten hinsichtlich der durch den Phänotyp bedingten Erdanhaftungen in der Wurzelrinne.

2 Material und Methoden

Zur Bestimmung des in der Wurzelrinne anhaftenden Erdanteils wurden die zu untersuchenden Rüben mittels einer Rübenwaschanlage gewaschen um am Rübenkörper anhaftende Erde zu entfernen. Gewaschen wurden je 20 Rüben pro Waschgang mit einer fünffachen Wiederholung. Somit wurden pro Sorte 100 Rüben bonitiert. Die Waschzeit betrug drei Minuten je Waschgang.

Nach dem Waschvorgang wurde der in der Wurzelrinne verbleibende Erdanteil manuell herausgetrennt. Die in Einzelfällen am Rübenkörper, also außerhalb der Wurzelrinne, anhaftende Erde wurde dabei nicht berücksichtigt. Die Erde der je 20 Rüben eines Waschgangs wurde im Trockenschrank bei 105 °C bis zur Gewichtskonstanten getrocknet. Nach der Trocknung wurde das Gewicht der Proben ermittelt, sodass pro Sorte Erdproben in fünffacher Wiederholung vorlagen.

3 Ergebnisse

Abbildung 1 zeigt die Ergebnisse aus den Jahren 2013 und 2014. Um die Ergebnisse vergleichen zu können wurden diese in Bezug auf ein Kilogramm frische Rüben gesetzt.

Es ist zu beachten, dass die jeweiligen Rübensorten von jedem der beteiligten Züchter auf unterschiedlichen Standorten angebaut wurden. Daher ist ein Vergleich der erzielten

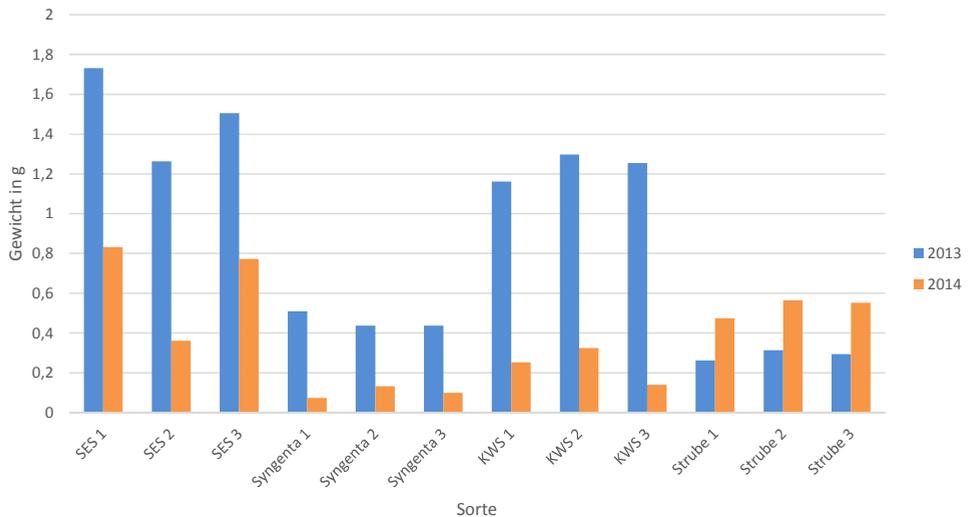


Abb. 1: Erdanhang in der Wurzelrinne zwölf verschiedener Rübensorten in den Jahren 2013 und 2014 in Gramm (g) Erde je Kilogramm (kg) Rübe (FM)

Ergebnisse zwischen den einzelnen Züchtern nicht sinnvoll. Ein Vergleich der drei Sorten eines Züchters ist hingegen zulässig.

Die dargestellten Ergebnisse zeigen das Mittel der fünf Wiederholungen. Es ist zu erkennen, dass der Anteil der anhaftenden Erde zwischen den Rübensorten der beteiligten Züchter sehr stark schwankt. Die Unterschiede zwischen den drei Sorten eines jeden Züchters fallen im Vergleich dazu jedoch sehr gering aus. Daraus lässt sich schließen, dass der Standort, insbesondere Boden und Witterung, einen hohen Einfluss auf die Erdanhaftungen in der Wurzelrinne hat. Auch die zum Teil sehr ausgeprägten Unterschiede zwischen den Jahren 2013 und 2014 weisen auf diesen Zusammenhang hin.

Dennoch zeigen sich Unterschiede in der Quantität der in der Wurzelrinne anhaftenden Erde, die auf die phänotypische Ausprägung der Rüben zurückzuführen sind. Vor allem bei der Sorte „SES 2“ zeigt sich in beiden Jahren ein deutlicher Unterschied zu den anderen Sorten.

Ein Anbau aller Sorten an einem Standort erfolgt im Jahr 2015 und ermöglicht einen Vergleich der Sorten verschiedener Züchter.

Literatur

Strube (2011): Informationen zu Biogas 2011/2012

FNR-Projekt: Aufbereitung und Konservierung von Zuckerrüben zur Verwendung in NawaRo-Biogasanlagen

DOMINIK SCHAIPER, GERD-CHRISTIAN MAACK, WOLFGANG BÜSCHER

1 Einleitung

Zuckerrüben gewinnen als Biogassubstrat zunehmend an Bedeutung. Um eine ganzjährige Verfügbarkeit zu gewährleisten, haben sich in der Praxis mehrere Konservierungs- und Lagerungsvarianten als geeignet erwiesen. Die Verfahren unterscheiden sich nach bisherigen Erfahrungen in der Zusammensetzung des Substrates, verfahrenstechnischen Aufwendungen und den spezifischen Kosten.

2 Material und Methode

Für die Beurteilung des Konservierungserfolgs der Varianten wurden im Rahmen des o. g. Projektes unter anderem Zuckerrüben im Versuchsmaßstab einsiliert. Die Varianten „Mus, offen“, „Mus, geschlossen“, „gebröckelt, geschlossen“, „ganz, offen“ und „ganz, geschlossen“ stellen die Lagerungsverfahren dar. Die Zuckerrüben wurden manuell nass gereinigt und anschließend entsprechend den Anforderungen im Verfahren entweder gemust, grob gebröckelt oder unzerkleinert in 120-Liter-Fässer mit der Möglichkeit des luftdichten Verschießens eingelagert. In jedem Verfahren gab es eine dreifache Wiederholung.

Die mit Glaswolle eingefassten befüllten Fässer wurden in einer wärmeisolierten Maschinenhalle auf dem Campus Klein Altendorf über 231 Tage (Nov. 2013 - Jun. 2014) gelagert. Es wurden absolute Gewichte, Temperaturverläufe und pH-Werte erfasst, sowie Eingangs- und Ausgangsproben zwecks Analyse in ein externes Labor versandt. Mittels Berechnungen wurden anhand der Laborergebnisse die Lagerungsverluste in Form von Verlust an Methanbildungspotenzial (MBP) (nach WEISSBACH et al. 2011) und an Trockenmasse (TM) bestimmt.

3 Ergebnisse

Die im Folgenden angeführten Ergebnisse wurden auf ein anfängliches Füllgewicht von 65 kg Frischmasse (FM) umgerechnet, da sich aufgrund der unterschiedlichen Zerkleinerungsintensität der Zuckerrüben ein unterschiedlicher Füllstand ergab. Der Trockenmassegehalt der eingelagerten Zuckerrüben lag bei 239 g/kg FM. Bei einer Füllmenge von 65 kg FM ergibt dies einen absoluten TM-Gehalt von 15,54 kg. Das Methanbildungspotenzial liegt folglich bei 5.432,43 Normlitern.

Tab. 1: Trockenmasse- und Methanbildungspotenzialverluste in den Lagerungsvarianten

Parameter	Einheit	Mus, offen	Ganz, offen	Ganz, geschl.	Mus, geschl.	Gebröckelt, geschl.
TM-Verlust	kg	7,38	4,75	2,28	1,94	2,06
TM-Verlust	%	46,49	30,56	14,56	12,48	13,26
MBP-Verlust	Normliter	2.646,24	1.768,86	368,41	367,92	209,10
MBP-Verlust	%	48,71	32,89	6,78	6,77	3,85

Tabelle 1 belegt Unterschiede im Gehalt an TM bzw. des MBP für die einzelnen Lagerungsvarianten zum Zeitpunkt der Auslagerung. Das Verfahren „gebröckelt, geschlossen“ weist den betragsmäßig geringsten Verlust an MBP auf, wobei die Variante „Mus, geschlossen“ einen geringeren absoluten TM-Verlust aufweist.

Abbildung 1 veranschaulicht die Temperaturentwicklung in den Fässern und zeigt die stärkste Erwärmung in der Variante des offen gelagerten Muses, welche die hohen Verluste an Trockenmasse (siehe Tab. 1) bedingt.



Abb. 1: Temperaturverlauf in den Lagerungsvarianten und der Umgebung (Tag 1 - Tag 231) (mittels Temperaturlogger; für Variante „ganz, offen“ Annahme der Umgebungstemperatur)

4 Diskussion und Ausblick

Die dargelegten Ergebnisse bestätigen, dass sich die Lagerungsverfahren bezüglich des Werterhalts des Substrats unterscheiden. Die Untersuchungen im Versuchsmaßstab sollen auftretende Verluste in der Praxis abbilden. Um die Übertragbarkeit einschätzen zu können, werden derzeit Lagerungsversuche in 1000-Liter-Containern in Kombination mit Datenerhebungen auf Betrieben durchgeführt.

Literatur

Weißbach, F.; Wagner, A.; Scholtissek, M.; Auerbach, H.; Herbes, C. (2011): Konservierungsverluste bei der Silierung von Zuckerrüben für die Biogasgewinnung. Landtechnik 4.2011, 66. Jahrgang.

Zweiphasige Vergärung von Zuckerrüben zur Biomethanherzeugung – Verfahrenstechnische Optimierung der Konservierung und der Konversion zur Steigerung der Energieausbeute

ELZBIETA KUMANOWSKA, SIMON ZIELONKA, HANS OECHSNER

1 Biogasproduktion aus Zuckerrüben

Die Biogasanlagen in Deutschland werden meistens mit Gülle und Maissilage beschickt. Aus ökologischen Gründen werden ökonomisch gleichwertige Substrate zur Biogasproduktion gesucht. Die Zuckerrübe stellt eine interessante Alternative dar, wegen folgender Vorteile:

- hoher Biomassertrag und hohe Biogasausbeute (WEISSBACH 2009);
- hoher Abbaugrad (KRAKAT et al. 2010);
- sehr kurze Konversionszeit (geringer Anteil an unvergärbaren Lignin).

2 Ziele des Projektes

Das Verbundprojekt der Landesanstalt für Agrartechnik und Bioenergie der Universität Hohenheim und der Firma Novatech GmbH ist in zwei Teilprojekte untergliedert.

2.1 Teilprojekt 1

Es gibt verschiedene Lagerungsverfahren, die alle ähnliche Probleme aufweisen (DEININGER 1995). Es ist bisher keine kostengünstige Lösung für eine verlustarme Lagerung am Markt verfügbar. Das Ziel des Teilprojektes ist die Entwicklung einer neuen, optimalen Konservierungstechnik für Zuckerrüben als Biogassubstrat. In Laborversuchen werden die Eigenschaften derart silierter Rüben mit den Eigenschaften von Rüben aus herkömmlichen Konservierungsverfahren verglichen.

2.2 Teilprojekt 2

Während der einphasigen Biogasproduktion kommt es zu Problemen mit der Prozessstabilität und Prozesskontrolle durch die schnelle und intensive Säurebildung, sowie zu intensiver Schaumbildung (SVENSSON et al. 2014). Zweiphasige Biogasverfahren weisen vor allem bei den Zuckerrüben große Vorteile auf (STOYANOVA et al. 2014). Die Gefahr der Versäuerung besteht nicht und es wird durch den Einsatz spezieller Hochleistungsmethanreaktoren eine schnelle Vergärung bei höherer Raumbelastung erreicht. Das erzeugte Biogas hat einen Methangehalt von bis zu 80 %.

Das Ziel des Teilprojektes 2 ist die Entwicklung eines Verfahrens zur Erzeugung eines hochkalorischen Biogases auf Basis von Zuckerrüben.



Abb. 1: Vorversuche zum Sickersaftanfall

Literatur

- Deining, A. (1995): Flüssig konservierte Beta-Rüben in der Rinderfütterung – Verfahrenstechniken und Leistungsfähigkeit, Dissertation, Universität Hohenheim
- Krakat, N.; Westphal, A.; Satke, K.; Schmidt, S.; Scherer, P. (2010): The microcosm of a biogas fermenter: Comparison of moderate hyperthermophilic (600C) with thermophilic (550C) conditions, Eng. Life Sc., 10(6)
- Svensson, L.M.; Björnsson, L.; Mattiasson, B. (2014): Enhancing performance in anaerobic high-solids stratified bed digesters by straw bed implementation, Bioresource Technology
- Stoyanova, E.; Forsthuber, B.; Pohn, S.; Schwarz, Ch.; Fuchs, W.; Bochmann, G. (2014): Reducing the risk of foaming and decreasing viscosity by two-stage anaerobic digestion of sugar beet pressed pulp, Biodegradation 25
- Weißbach, F. (2009): Das Gasbildungspotenzial von frischen und silierten Zuckerrüben bei der Biogasgewinnung, Landtechnik 64

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Verbundvorhaben Durchwachsene Silphie – Anbauoptimierung, Sätechnik und Züchtung

JOHANNES KÖHLER, ANDREA BIERTÜMPFEL, ANDREAS SCHÄFER, CLAUDIA REHSE

1 Projektziele

Die Durchwachsene Silphie (*Silphium perfoliatum L.*) wird gegenwärtig deutschlandweit auf ca. 450 ha als Koferment für Biogasanlagen angebaut. Neben der hohen Biomasse- und Methanerträge je Flächeneinheit trägt der ausdauernde Korbblütler zur Erhöhung der Biodiversität bei, vermindert Erosion durch die ganzjährige Bedeckung und liefert zahlreichen Insekten in der blüharmen Zeit von Juli bis September ein reichhaltiges Nahrungsangebot. Zur Verbesserung der Konkurrenzfähigkeit gegenüber Mais und zur Erhöhung der Attraktivität für die Landwirte, ist es erforderlich ein kostengünstigeres Anlageverfahren als die bisher übliche Pflanzung zu entwickeln, das Risiko bei der Bestandesetablierung zu minimieren, die Bestandesführung zu optimieren sowie verbessertes Pflanzenmaterial durch züchterische Maßnahmen zu erzeugen. Diese Fragestellungen stehen im Fokus des seit Januar 2015 vom Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft geförderten Verbundvorhabens „Durchwachsene Silphie – Anbauoptimierung, Sätechnik und Züchtung“.

2 Inhalte und Aufgaben

Koordinator des Projektes ist die Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft (TLL), die auch für die Optimierung des Anbauverfahrens verantwortlich ist. Dies schließt die Prüfung geeigneter Herkünfte, die Verbesserung der Düngungsstrategie und die Testung möglicher Herbizidvarianten ebenso ein, wie die Durchführung von Aussaatversuchen auf Parzellen und in der Praxis.

Letztgenannte Versuche erfolgen in Kooperation mit dem Institut für Landtechnik (IfL) der Universität Bonn, das sich schwerpunktmäßig mit der Erprobung und Modifizierung praxisüblicher Technik bezüglich ihrer Eignung für die Silphiesaat befassen soll. Ziel ist es, die Kosten für die Anlage eines Silphiebestandes zu verringern und das Etablierungsrisiko beim Saatverfahren zu minimieren. Eine enge Zusammenarbeit mit landwirtschaftlichen Betrieben ist Voraussetzung für eine schnelle Überprüfung der Ergebnisse in der Praxis.

Dritter Partner des Verbundvorhabens ist die N.L. Chrestensen GmbH (NLC) in Erfurt. Hier laufen seit 2010 erste Züchtungsarbeiten zur Verbesserung der Homogenität des Pflanzenmaterials sowie zur Selektion von Genotypen mit hohen Biomasse- und

Methanerträgen, um die Konkurrenzfähigkeit der Silphie gegenüber Mais zu erhöhen. Erstes Zuchtmaterial soll im Projektverlauf auf den Versuchsflächen der TLL zur Prüfung kommen.

Im Ergebnis des Projektes sollte es möglich sein, die Wirtschaftlichkeit des Anbaus zu verbessern und die Anbaufläche der Durchwachsenen Silphie bundesweit weiter zu erhöhen.

Methanertragspotenzial der Durchwachsenen Silphie (*Silphium perfoliatum*)

NICOLA LEONARD HAAG, HANS-JOACHIM NÄGELE, KLAUS REISS,
ANDREA BIERTÜMPFEL, HANS OECHSNER

1 Einleitung

Mit einem Anteil von ca. 80 % an den eingesetzten Energiepflanzen in deutschen Biogasanlagen, stellt Maissilage das Haupteinsatzsubstrat in der Biogasproduktion dar. Aufgrund seines hohen Ertragspotenzials, seines einfachen Anbaus und seiner optimalen Eigenschaften im Biogasprozess wird Mais gegenwärtig oft in Reinkultur angepflanzt und mindert somit seine ökologische Verträglichkeit. Des Weiteren steht Mais in starkem Konflikt zwischen der Nutzung als Nahrungsmittel oder Kraftstoff (FNR 2014). Alternative Substrate können oft nicht mit dem Methanertragspotenzial von Mais konkurrieren und finden daher selten Verwendung. Die Durchwachsene Silphie hingegen, könnte, dank ihrer ganzjährigen Bodenbedeckung, der Biodiversitätsanreicherung und ihrer Erosionsschutzeigenschaft, zu einer Entschärfung dieses Problems beitragen. Um die Suche nach alternativen Substraten für die Biogasproduktion voranzutreiben, wurde das Methanertragspotenzial unterschiedlicher Silphiesorten in batch und kontinuierlichen Labortests untersucht.

2 Material und Methoden

Die Silphiesorten (*BB, Horn, ND, RB, RU, U rot, USA*) wurden von der Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft ausgewählt und kultiviert. Das geerntete Material wurde umgehend gehäckselt (Eliet, Super Prof 2000 STD, Belgien), mit einem homofermentativen Milchsäurepräparat (Bio-Sil, Dr. Pieper, Wuthenow, Deutschland) versetzt und in 120 l Fässern für 5 Monate bei 20 °C siliert. Die anschließenden Methanertragstests wurden an der Landesanstalt für Agrartechnik und Bioenergie in Hohenheim, gemäß VDI-Richtlinie 4630 durchgeführt (VDI 2006). Um den maximalen spezifischen Methanertrag (SMY) zu ermitteln, wurde der Hohenheimer Biogasertragstest (HBT) ausgeführt. Die kontinuierlichen Abbauprobungen wurden in 20 l Rührkesselreaktoren durchgeführt, um zusätzlich die Prozessstabilität zu überprüfen.

3 Ergebnisse und Diskussion

Der mittlere spezifische Methanertrag der Silphiesorten variierte im HBT von $0,228 \pm 0,0073$ $\text{m}^3_{\text{N}}/\text{kg}$ organischer Trockenmasse (oDM) (*Horn*) bis $0,261 \pm 0,0099$ $\text{m}^3_{\text{N}}/\text{kg}$ oDM (*Urot*)

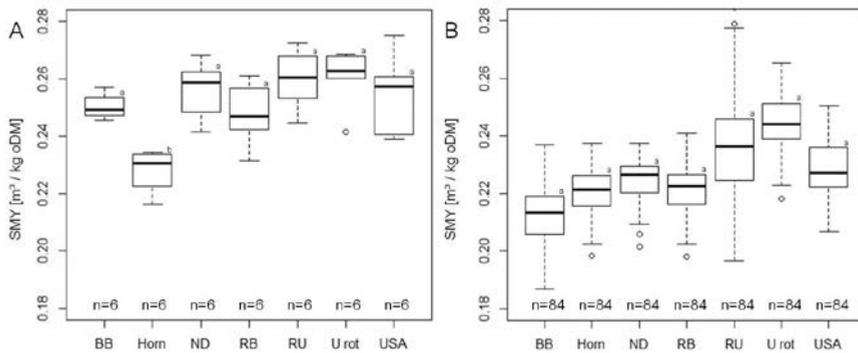


Abb. 1: Spezifische Methanerträge (SMY) der Silphievarianten, ermittelt im HBT (A) sowie im kontinuierlichen Biogasertragstest (B)

(Abb.1). Der Mittelwert aller analysierten Proben, im HBT, lag bei $0,251 \pm 0,0141 \text{ m}^3\text{N/kg oDM}$. Im kontinuierlichen Fermentationsprozess wurden Mittelwerte der einzelnen Sorten von $0,220 \pm 0,0091 \text{ m}^3\text{N/kg oDM}$ (*Horn*) bis zu $0,244 \pm 0,0104 \text{ m}^3\text{N/kg oDM}$ (*U rot*) erfasst. Im Mittel betrug der spezifische Methanertrag $0,227 \pm 0,0158 \text{ m}^3\text{N/kg oDM}$ in den kontinuierlichen Versuchen. Unter Einbeziehung eines durchschnittlichen Ertrags (53 Mg Frischmasse (FM)/ha), des oDM Gehalts (31.18 % FM), Silierverlusts (12 %), und dem Energiegehalt von $9,968 \text{ kWh/m}^3 \text{ CH}_4$, errechnet sich ein Energieertrag von 25.674 kWh/ha für die Durchwachsene Silphie. Im Vergleich zu einer durchschnittlichen Gras- (24.930 kWh/ha) oder Maissilage (46.491 kWh/ha) weist die Silphie ein beachtliches Potenzial als alternatives Biogassubstrat auf (KTBL 2013). Obwohl Mais das deutlich ertragsreichste Substrat ist, könnte durch züchterischen Fortschritt die Silphie weiter optimiert werden, um so eine weitere Alternative im Biogassubstratmix darzustellen. Des Weiteren kam es in den kontinuierlichen Versuchen zu keinerlei Prozessstörungen und es konnten keine inhibierenden Eigenschaften der Silphie auf den Biogasprozess festgestellt werden.

4 Schlussfolgerung

S. perfoliatum stellt eine Alternative für die Diversifizierung des Biogassubstratmixes dar. Die Energieausbeute pro Hektar sowie der positive ökologische Effekt machen die Durchwachsenen Silphie zu einem geeigneten Biogassubstrat.

Literatur

FNR (2014): Basisdaten Bioenergie. FNR, Gülzow

VDI (2006): VDI 4630: Vergärung organischer Stoffe – Substratcharakterisierung, Probenahme, Stoffdatenerhebung, Gärversuche. VDI, Frankfurt

KTBL (2013): Faustzahlen Biogas. KTBL, Darmstadt

Verbundvorhaben: Spurenelemente durch Energiepflanzen – Stoffströme und Handlungsempfehlungen für eine optimierte Prozessbiologie in Biogasanlagen

BENEDIKT SAUER, HANS RUPPERT, ROLF RAUBER, HEIKE STRÄUBER, JÜRGEN PRÖTER, KATHARINA HEY, WIEBKE FAHLBUSCH, MICHAEL DITTRICH-ZECHENDORF, TINO PASOLD

1 Einleitung

Bei alleinigem Maissilage-Input in Biogasanlagen reichen die Spurenelemente für eine optimale Methanbildung oft nicht aus. Mais weist sehr niedrige Cobaltgehalte auf. Derzeit werden in Deutschland in mehr als 3.000 Biogasanlagen industrielle Additive zugefüttert, um dem Mangel zu begegnen. Dies hilft zwar, birgt aber Umweltrisiken und verursacht Kosten. Andere Energiepflanzen kumulieren im Vergleich zu Mais erheblich mehr an essenziellen Spurenelementen. Durch die Zumischung dieser Energiepflanzen sollte es möglich sein, eine ausreichende Spurenelementversorgung für die Vergärung zu gewährleisten, wodurch auf synthetische Spurenelementadditive verzichtet werden könnte.

2 Pflanzenbau

Es werden 2-jährige Feldversuche (2014/15 und 2015/16) auf Standorten in Göttingen (90 Bodenpunkte) und Schoningen (47 Bodenpunkte) durchgeführt. Als spurenelementreiche Feldfrüchte werden z. B. eine mehrjährige Blütmischung in Dauerkultur, Wickroggen und Winterackerbohnen als Winterungen sowie Sommerackerbohnen und Amarant als Sommerungen geprüft. Diese Energiepflanzen werden mithilfe des Indexes der relativen Anbauwürdigkeit (IrA) bewertet. IrA berücksichtigt u. a. den TM- und Methanertrag, Spurenelementgehalt, Wurzelbildung, N_{\min} im Boden über Winter und Wassergehalt des Bodens nach der Ernte. Anbaukosten und Akzeptanz gehen ebenfalls mit ein. Nach den Winterungen wird Mais als Zweitfrucht angebaut, um die Vorfruchtwirkung der Winterungen zu erfassen. Mit einem vielfältigeren Energiepflanzenanbau werden Nachhaltigkeitsansprüche an die Biogaserzeugung deutlich besser erfüllt.

3 Charakterisierung des anaeroben Prozesses

Im quasi-kontinuierlichen Betrieb im Labor werden Reaktoren mit Maissilage und Spurenelementadditiven gezielt mit Cobalt und Nickel unterversorgt und prozess-analytisch verfolgt (untere Schwellenwerte identifiziert). Anschließend werden ausgewählte Pflan-

zenmischungen hinsichtlich ihrer Wirksamkeit zur Substitution von Additiven bei der Vergärung von Maissilage getestet.

4 Mikrobiologische Analyse der anaeroben Vergärung

Proben der quasi-kontinuierlichen Gärtests werden quantitativen und qualitativen Analysen der mikrobiellen Gemeinschaften unterzogen. Diese Datensätze werden zusammen mit den physikochemischen Betriebsparametern (DBFZ) und den Ergebnissen der Spurenelementanalysen (GZG) multivariaten, statistischen Analyseverfahren unterzogen. Dadurch sollen direkte Zusammenhänge und Abhängigkeiten zwischen mikrobiellen Gemeinschaften und den entsprechenden Reaktorbedingungen aufgezeigt werden.

5 Multielementanalysen

Alle Proben von den Versuchsfeldern und den Labor- sowie Praxisfermentern werden nach einem Säuretotalaufschlussverfahren mittels ICP-OES und -MS auf über 50 Elemente hin untersucht. Eine Element-Prognose-Methode Boden-Pflanze wird erarbeitet. Die Verfügbarkeit der Spurenelemente im Fermentermaterial wird untersucht (Extraktion, Filtration, Multielementbestimmung). Toxische Schwellen im Biogasprozess bei einer Überdosierung werden für kritische Elemente ermittelt (ORGA-Tests). Die gesammelten Daten des Projektes fließen in einer Datenbank zusammen. Dies ermöglicht eine grobe Prognose der Stoff- und Elementströme. Handlungsempfehlungen für einen nachhaltig optimierten Energiepflanzenbau bei gleichzeitig maximaler Biogasausbeute werden abgeleitet und veröffentlicht.

6 Beteiligte Institutionen

- Georg-August-Universität Göttingen: Interdisziplinäres Zentrum für Nachhaltige Entwicklung (IZNE): Geowissenschaftliches Zentrum (GZG): Abteilung Sedimentologie/Umweltgeowissenschaften sowie Department für Nutzpflanzenwissenschaften: Abteilung Pflanzenbau
- Deutsches Biomasseforschungszentrum gGmbH (DBFZ) in Leipzig: Department Biochemische Konversion: AG Charakterisierung und Entwicklung anaerober Prozesse
- Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung – UFZ in Leipzig: Department Umweltmikrobiologie: AG Mikrobiologie anaerober Systeme.

Projektlaufzeit: Anfang 2015 bis Ende 2017

Amarant als spurenelementreiches Biogassubstrat: Selektion zur Erarbeitung praxistauglicher Amarantlinien für bayerische Standortbedingungen

BENEDIKT SAUER, ANDREAS TRAUNER, MAENDY FRITZ

1 Problemstellung

Aufgrund seiner hohen Erträge ist Mais im Moment die wichtigste Kultur zur Erzeugung von Substrat für die Biogasproduktion. Mais ist jedoch sehr arm an den für die Methanproduktivität wichtigen Spurenelementen Cobalt und Nickel (EBERL et al. 2014). In der Praxis müssen dadurch meist industriell erzeugte Spurenelementadditive dem Vergärungsprozess zugefügt werden, um einen Mangel während des Biogasprozesses zu vermeiden. Die Kulturpflanze Amarant hat bei Versuchen gezeigt, dass sie im Vergleich zu anderen Pflanzen deutlich höhere Konzentrationen der für die methanproduzierenden Mikroorganismen essenziellen Elemente Cobalt und Nickel aufweist. Die Zugabe von Amarant zu Maissubstrat könnte somit die Prozessstabilität im Biogasfermenter unterstützen, den Methanertrag positiv beeinflussen, den potenziell risikobehafteten Zukauf von Additiven vermindern oder überflüssig machen und gleichzeitig das Landschaftsbild bereichern.

Da Amarant bisher jedoch überwiegend zu Zwecken der Nahrungsmittelproduktion genutzt wird, und dies vorrangig außerhalb Europas, ist die Pflanze noch nicht an die Bedingungen hier angepasst. Beim Anbau im gemäßigten Klima kann es dadurch zu einigen Schwierigkeiten kommen. Durch die Kälteempfindlichkeit ist keine frühe Aussaat möglich, sowie durch die teils lange Vegetationszeit von mehr als 120 Tagen wird eine ausreichende Abreife mit den gewünschten TS-Gehalten von 28 % meist nicht erreicht. Eine sinnvolle Eingliederung in die landwirtschaftliche Kulturfolge ist dadurch erschwert. Erste Ergebnisse aus verschiedenen Versuchen haben jedoch gezeigt, dass Amarant durchaus ein großes Ertragspotenzial aufweist und somit als Substratlieferant oder Cosubstrat für Biogasanlagen in Zukunft eine Rolle spielen kann. Wenige Selektionszyklen könnten ausreichen, um Amarant an unser Klima anzupassen.

2 Zielsetzung

Zielsetzung dieses Projektes ist es, den Anbau, die Selektion und Vermehrung von Amarantlinien als spurenelementreiches Biogassubstrat zu erarbeiten sowie die stoffliche Kaskadennutzung, d.h. die getrennte Verwertung von Rispe bzw. Korn und Restpflanze, zu untersuchen und zu bewerten. Ausgehend von einem bereits durchgeführten Amarant-Screening soll diese Pflanze an hiesige Kulturbedingungen angepasst werden. Die



Abb. 1: Amarant-Screening auf einem Versuchsfeld bei Straubing (Quelle: Sauer)

wichtigsten Selektionskriterien sind dabei der Trockenmasseertrag und Trockensubstanzgehalt, eine frühe Abreife, die Standfestigkeit, ein möglichst hoher Gehalt an Spurenelementen, ein hoher Rispenanteil zur Kaskadennutzung und ein hoher Gehalt an weiteren wertvollen Inhaltsstoffen.

Durch die insgesamt vier nutzbaren Vegetationsperioden (2015–2018) innerhalb der Projektlaufzeit steht ausreichend Anbau-, Vermehrungs- und Selektionszeit zur Verfügung, um zum Projektende deutlich verbesserte und an unsere Anbaubedingungen angepasste Amarantlinien vorweisen zu können. Auf Grundlage dieses erwarteten Fortschritts könnte die nötige privatwirtschaftliche Züchtung und Vermehrung dieser Kultur in Gang gesetzt werden, um den Züchtungsvorsprung etablierter Kulturen wie Mais zu verringern.

3 Laufzeit

1. Juni 2015 bis 31. Dezember 2018

Literatur

Eberl, V.; Fahlbusch, W.; Fritz, M; Sauer, B. (2014): Screening und Selektion von Amarantorten und -linien als spurenelementreiches Biogassubstrat. Berichte aus dem TFZ, Nr. 37. Technologie- und Förderzentrum im Kompetenzzentrum für Nachwachsende Rohstoffe (TFZ), 114 Seiten, Straubing

Potenzial der Andenlupine (*Lupinus mutabilis*) und weiterer Lupinenarten für die Biogaserzeugung

STEFFEN R. ROUX, DENNY WIEDOW, NORBERT KANSWOHL, MARGITTA BECK,
FRANK HÖPPNER, MANUEL DEYERLER

1 Einleitung

Vor dem Hintergrund der steigenden Bedeutung von pflanzlicher Biomasse für die bioenergetische Verwertung wurde in den vergangenen Jahren der Ruf nach alternativen Energiepflanzen zur Erhaltung bzw. Erhöhung der Kulturpflanzendiversität in der Landwirtschaft lauter. In einem durch die FNR geförderten Projekt werden Herkünfte der Andenlupine (*Lupinus mutabilis*) mit Weißer (*L. albus*) und Blauer Lupine (*L. angustifolius*) in ihrer Effizienz als erneuerbare Energieträger untersucht.

2 Biomassepotenzial

Im Jahr 2014 wurden an 3 agrarökologisch divergenten Orten – Groß Lüsewitz (MV), Braunschweig (NI), Triesdorf (BY) – Leistungsprüfungen mit 3 Andenlupinen, 13 Weißen Lupinen und 2 Blauen Lupinen zur Erfassung des Gesamttrockenmasseertrags angelegt. Zur Prüfung der Hauptfrucht- bzw. Zweitfruchteignung wurden 2 Aussaattermine verwendet. Zur exakten Beurteilung des Biomassepotenzials wurden die Prüfglieder jeweils individuell bei Erreichen eines definierten Entwicklungsstadiums beerntet. Neben der Ertragerfassung erfolgte die Beurteilung wichtiger agronomischer Merkmale.

Die mittleren Erträge an Gesamttrockenmasse (GTM) fielen an allen 3 Standorten bei ortsüblich früher Aussaat höher aus als bei dem späten Aussaattermin (Zieltermin 15.05.2014). Sowohl die höchsten mittleren Erträge der Gesamtversuche als auch die höchsten Maximalerträge wurden am Standort Groß Lüsewitz erzielt. Ein Prüfglied von *L. mutabilis* erreichte im Mittel über die Prüforte mit 180,5 dt/ha und 172,4 dt/ha in Aussaatvariante 1 bzw. 2 die höchsten GTM-Erträge (Abb. 1). Weitere 4 Prüfglieder von *L. albus* erzielten in Aussaatvariante 1 mittlere GTM-Erträge von über 100 dt/ha, während die geprüften *L.-angustifolius*-Herkünfte in ihren GTM-Erträgen deutlich zurückblieben. Der Gehalt an Trockensubstanz (TS) zum Schnittzeitpunkt lag bei Aussaatvariante 1 zwischen 19,9 % und 41,4 %, wobei die leistungsfähigste Andenlupine einen TS-Gehalt von 20,0 % aufwies. In der 1. Aussaatvariante zeigten die Messungen der Wuchshöhen (Stadium Blühbeginn bzw. 1. Hülsenbildung) signifikante bzw. hochsignifikante positive Korrelationen mit dem Gesamttrockenmasseertrag.

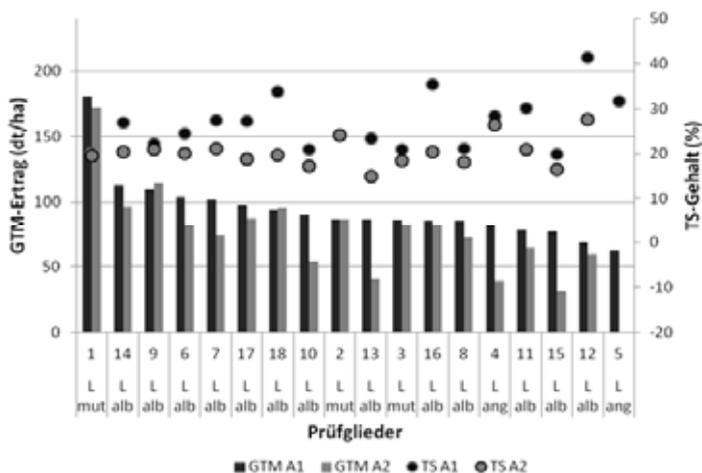


Abb. 1: GTM-Erträge und TS-Gehalte von 3 Andenlupinen (*L. mut.*), 13 Weißen Lupinen (*L. alb.*) und 2 Blauen Lupinen (*L. ang.*) in Aussaatvarianten 1 (A1) und 2 (A2)

3 Biogas- und Methanertrag

Im Rahmen der GTM-Leistungsprüfung wurden an allen Prüferten beim Schnitt von den Parzellen der 1. Aussaatvariante Biomasseproben gezogen. Zur Ermittlung der Biogasausbeuten wurden Batch-Versuche unter Zusatz eines Überschusses von Impfschlamm durchgeführt. Hierzu wurde eine Laboranlage verwendet, die aus gasdichten Faulflaschen (1 Liter), Gaswaschflaschen verbunden mit gasdichten Schläuchen, Gassäcken und einem thermostatgesteuerten Wasserbad (38 °C) besteht. Neben den Lupinensubstraten wurde eine aus Impfgülle bestehende Kontrollvariante angesetzt. Das täglich produzierte Biogas wurde über einen Trommelgaszähler der Fa. Ritter mengenmäßig und die Biogasqualität (CH₄, CO₂, O₂) durch einen Biogasmonitor der Fa. Ansyco qualitativ erfasst und anschließend verbrannt. Die Summe der im Versuchszeitraum ermittelten Biogasmengen diente zur Berechnung der Biogasausbeute. Bei der Durchführung von Batch-Versuchen ist auf ein ausgewogenes Verhältnis zwischen Impfschlamm und Substrat zu achten. Entsprechend der VDI 4630-Empfehlung (2006) wurde für die Ansätze ein Masseverhältnis oS-Substrat/oS-Impfschlamm von < 0,5 verwendet. Das Abbruchkriterium lag vor, wenn die gebildete Tagesgasmenge 1 % der Gesamtgasmenge entsprach (Versuchsdauer ca. 35 Tage). In ersten Untersuchungen wurden für 18 Lupinen-Biomasseproben vom Standort Groß Lüsewitz Biogaserträge zwischen 307 und 582 l_N·kg⁻¹ oS und Methanerträge zwischen 154 und 309 l_N CH₄·kg⁻¹ oS bei 51,5 bis 57,7 Vol. % Methan ermittelt.

Miscanthus als Biogassubstrat – Auswirkung von Erntezeitpunkt und Bestandesalter auf Biomassertrag und biochemisches Methanpotenzial

AXEL SCHMIDT, THORSTEN RUF, PHILIPP DELFOSSE, CHRISTOPH EMMERLING

Kurzfassung

Die Nutzung von Biomasse zur Erzeugung von Biogas stellt einen wichtigen Bestandteil innerhalb der erneuerbaren Energien dar. Durch die finanzielle Förderung dieser Art der Energieerzeugung im Rahmen des EEG hat sich seit dessen Einführung die Anbaufläche von Silomais enorm vergrößert. Die Folgen dessen können für den Boden sehr negativ sein. Hier sind insbesondere Humusverluste und Erosion zu nennen. Daher besteht Bedarf den Mais durch andere bodenschonendere Kulturen zu ersetzen. Ein besonders vielversprechender Ansatz ist die Nutzung von anspruchslosen Dauerkulturen. Eine dieser Dauerkulturen ist *Miscanthus × giganteus*. Die energetische Nutzung von Miscanthus beschränkt sich bisher fast ausschließlich auf Verbrennung. Die Nutzung als Co-Ferment in Biogasanlagen ist aufgrund des hohen Lignin-Anteils schwer möglich, da diese Substanzen schlecht mikrobiell abbaubar sind. Ein Ansatz den Ligningehalt gering zu halten ist den Miscanthus nicht, wie bei thermischer Verwertung üblich, erst nach Abtrocknen im Bestand über den Winter zu ernten, sondern bereits im Herbst, wenn die Phytomasse noch frisch und grün ist. Hierbei zeigen sich wesentlich höhere spezifische Gaserträge. Außerdem ist der Biomassertrag durch noch nicht abgefallene Blätter höher. Das Produkt aus spezifischen Methanertrag und der produzierten Biomasse pro Fläche ergibt den Biogas-(Methan-)ertrag pro Fläche. Dies ist die entscheidende Größe zum Vergleich verschiedener Energiepflanzen zur Biogasproduktion. Aufgrund des sehr hohen Biomassertrags pro Hektar kann die Nutzung von Miscanthus als Biogassubstrat, trotz geringerer spezifischer Methanproduktion, die Größenordnung von Mais erreichen. Eine Bilanzierung der Nährstoffgehalte von Blättern, Stängeln, Rhizomen und Streu zu verschiedenen Zeitpunkten lässt darauf schließen, dass die mit einer Herbsterte verbundenen Ertragsdepressionen in Folgejahren aufgrund verminderte Rhizodeposition durch Rückführung der Gärrückstände kompensiert werden können. Die untersuchten Bestände, die in den Jahren 1995 und 2008 gepflanzt wurden unterscheiden sich hinsichtlich Biomassertrag und Gasproduktion nicht signifikant.

Der Anbau von Miscanthus steigert die Diversität in der Agrarlandschaft und verbessert den Bodenschutz. Er stellt somit eine ressourcenschonende Methode zur Energiegewinnung dar.



Abb. 1: *Miscanthus x giganteus* kurz vor der Ernte im Frühjahr (Quelle: © Axel Schmidt)



Abb. 2: *Miscanthus x giganteus* kurz vor der Ernte im Herbst (Quelle: © Axel Schmidt)

Kohlenstoffbilanz über einen zweistufigen/zweiphasigen Biogasprozess

MANDY SCHÖNBERG, VOLKER SCHÖNBERG, JULIANE SCHNEIDER

Im Rahmen des BMBF-Projektes „MethanoQuant“ wurde am Lehrstuhl Abfallwirtschaft der BTU Cottbus-Senftenberg über eine zweistufige/zweiphasige Versuchsanlage eine Kohlenstoffbilanz aufgestellt.

1 Material und Methoden

Die Versuchsanlage besteht aus einem thermophilen Feststofffermenter als Leach-Bed-Reaktor (LBR), einem thermophilen Perkolatspeicher (LBRS) und einem mesophilen Anaerobfilter (AF) als separate Methanstufe (Abb. 1). Der LBR wurde mit 7,5 kg Maissilage für eine Verweilzeit von 18 Tagen befüllt. Die Zirkulation der Prozessflüssigkeit erfolgte über zwei verschiedene Kreisläufe. Durch die Perkolation reicherten sich die Intermediate aus dem Feststoff in der Prozessflüssigkeit an und wurden anschließend im LBRS gesammelt. Ein kontinuierlicher Volumenstrom gelangte aus dem LBRS in den AF, durchströmt diesen und wurde in den LBR zurückgefördert. Das entstandene Biogas wurde in separaten Gasbeuteln gesammelt. Täglich erfolgte eine Gasmengenerfassung und Gasanalyse.

Die verwendete Maissilage wurde bei 60 °C für 48 h vorgetrocknet und kam von der Reiter GbR in Bad Wörishofen/Stockheim. Sie wies einen TS von 90,6 Ma.-% auf. Davon machten 0,1 Ma.-% die organische Säuren bzw. Alkohole und 3,2 Ma.-% die anorganische TS aus. Etwa die Hälfte des TS waren Zellinhaltsstoffe mit Nicht-Faser-Kohlenhydrate (40,2 Ma.-%), wie Stärke (32,5 Ma.-%), Zucker (0,5 Ma.-%) und Pektin, Rohfett (1,7 Ma.-%) und Rohprotein (7,9 Ma.-%). Die Gerüstsubstanzen wie Hemizellulose (24,6 Ma.-%), Zellulose (17,7 Ma.-%) und Lignin (4,5 Ma.-%) bildeten den Rest.

2 Ergebnisse und Diskussion

Der Abbaugrad lag bei 76 Ma.-% und die Methanausbeute bei 309 $\text{ml kg}^{-1}\text{TS}$. Somit wurden bereits nach 18 Tagen 96 % des im Referenzgärtest ermittelten Wertes erreicht.

Die Tab.1 zeigt die Kohlenstoffbilanz (TC) über das Gesamtsystem während der Versuchsreihe. Im Anfangszustand befanden sich 3.904 g_{TC} (100 %) im System. Während des Versuchszeitraums wurden über die Gasphase 2.144 g_{TC} (55 %) ausgezogen. Zum Ende der Versuchsdurchführung wurden 986 g_{TC} (25 %) als Gärrest entnommen, 618 g_{TC} (16 %) blieben im System.

Die Feinbilanzierung des AF erfolgte über den gelösten Kohlenstoff (DC). Zu Beginn waren 185 g_{DC} gelöster Kohlenstoff im AF. Dies macht einen Anteil von etwa 5,8 % aus.

94,2 % wurden über die Prozessflüssigkeit aus dem LBRS in den AF eingetragen. Das gelöste CO₂, welches mit der Flüssigphase in den AF eingebracht wurde, machte nur etwa 1 % (31 g_{DC}) aus. Zu CH₄ wurden 604 g_{DC} (19 %) und zu CO₂ 183 g_{DC} (6 %) umgesetzt. 68 % des DC verließen den AF ohne Umsatz wieder (refraktärer Kohlenstoff). Der Hauptteil (83 %) des umgesetzten DC kann durch die Säuren und Alkohole erklärt werden, ein Rest von 130 g_{DC} ist noch unbekannt.

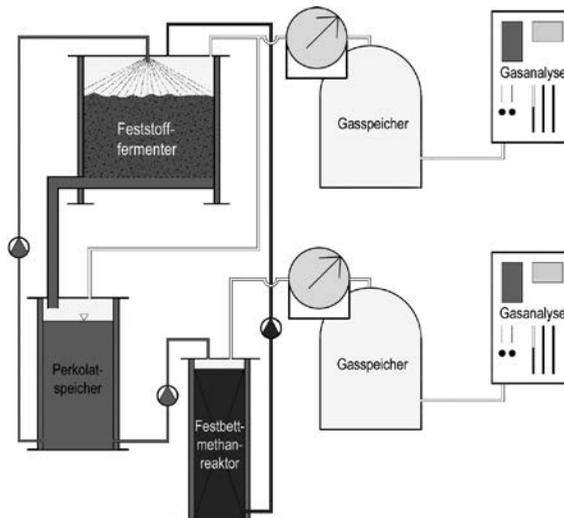


Abb. 1: Versuchsanlage mit Feststofffermenter als Leach-Bed-Reaktor (LBR) (100 Liter), Perkolatspeicher für Prozessflüssigkeit (LBRS) (60 Liter), Anaerobfilter (AF) (30 Liter, Bioflow 40), erster Prozessflüssigkeitskreislauf (68–140 l d⁻¹) mittels einer Membranpumpe W100, zweiter Prozessflüssigkeitskreislauf (1 l h⁻¹) mittels zweier Schlauchpumpen PD 5201, Gasmengenerfassung durch zwei Trommelgaszähler TG 05/5, Gasspeicher (100–250 l, TECOBAG) und Gasanalyse mittels Analysegerät SSM6000

Tab. 1: Kohlenstoffbilanz über die zweistufige/zweiphasige Versuchsanlage

Bezeichnung	TC [g]	[%]
Substrat (Tag 0)	3.414	87,4
LBRS (Tag 0)	260	6,7
AF (Tag 0)	230	5,9
CH ₄ aus dem LBR und LBRS	-484	12,4
CO ₂ aus dem LBR und LBRS	-877	22,5
CH ₄ aus dem AF	-599	15,3
CO ₂ aus dem AF	-184	4,7
Probenahme aus LBRS und AF	-21	0,5
Gärrest (Tag 18)	-986	25,2
LBRS (Tag 18)	-362	9,3
AF (Tag 18)	-256	6,6
Differenz	+135	+3,5

Isolierung und Charakterisierung anaerober Mikroorganismen aus Biogasreaktoren

SARAH HAHNKE, THOMAS LANGER, MICHAEL KLOCKE

1 Einleitung

Für den anaeroben Abbau von Biomasse zur Gewinnung von Biogas ist eine komplexe Mikroflora verantwortlich, wobei die Mehrheit dieser Mikroorganismen ebenso wie ihre Stoffwechselleistungen bislang nicht wissenschaftlich untersucht ist. Die Kenntnis der Biogas-Mikrobiologie ist jedoch der Schlüssel für die technologische Optimierung der Biogasproduktion. Im Rahmen dieser Arbeit wurden exemplarische Mikroorganismen für typische Stoffwandlungsprozesse in Biogasreaktoren isoliert und detailliert hinsichtlich Stoffwechsel und Genetik beschrieben. Zentrales Ziel der Arbeit ist der Aufbau einer Datenbank mit Referenzen zur Erschließung von kultivierungsunabhängig erzeugten Datensätzen (Metagenom- und Metatranskriptomdaten) zur Aufklärung von Struktur, Dynamik und Funktion der mikrobiellen Gemeinschaften in Biogasreaktoren.

2 Diversität der gewonnenen Isolate

Mittels unterschiedlicher Isolierungsstrategien wurden Mikroorganismen aus drei verschiedenen Biogasreaktoren isoliert. Die Stammsammlung umfasst derzeit 58 Arten aus 10 phylogenetischen Klassen (Abb. 1). Darunter befinden sich 14 Stämme, die als neue Art bzw. Gattung zu bezeichnen sind.

3 Charakterisierung und Genomsequenzierung neuer Arten

Bisher unbekannte Bakterienisolate aus den Phyla *Clostridia* und *Bacteroidia* wurden auf ihre physiologischen Eigenschaften hin untersucht und als Vertreter neuer Bakterienarten beschrieben. Dazu wurden unter anderem die Genome sequenziert und annotiert, wie z.B. das Genom des erstmals beschriebenen Bakteriums *Clostridium bornimense* M2/40 (Abb. 2).

Ein weiterer Fokus der Arbeiten liegt auf der Isolierung und Beschreibung von Vertretern aus der Familie *Porphyromonadaceae*. Die gewonnenen Isolate zeigen sehr enge Verwandtschaft zu Sequenzen, die in vergangenen Studien schon häufig in Biogasreaktoren bzw. methanogenen Habitaten detektiert wurden. Bisher wurden jedoch noch keine Vertreter dieser Arten isoliert und hinsichtlich ihres metabolischen Potenzials untersucht. Die Funktion dieser Mikroorganismen im trophischen Netzwerk von Biogasreaktoren ist daher noch weitgehend unbekannt.

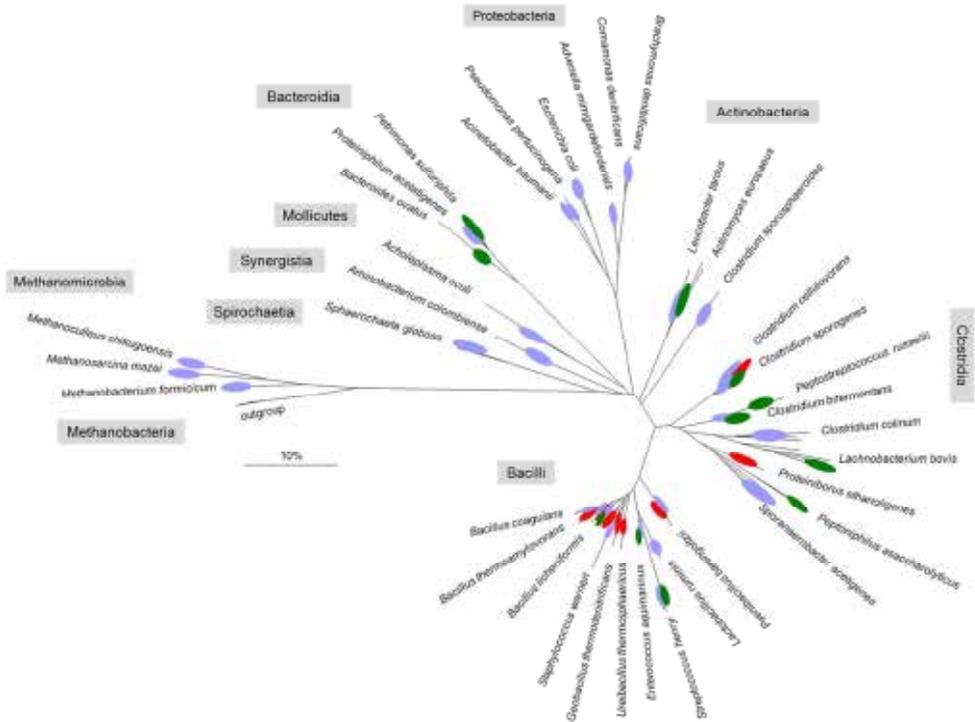


Abb. 1: Phylogenetischer Stammbaum der bisher aus Biogasreaktoren gewonnenen Isolate und verwandter Mikroorganismen basierend auf 16S rRNA Gensequenzen. Die Isolate sind entsprechend ihres Ursprungs aus den untersuchten drei Reaktoren farblich markiert. Maßstab: 10 % Sequenzabweichung.

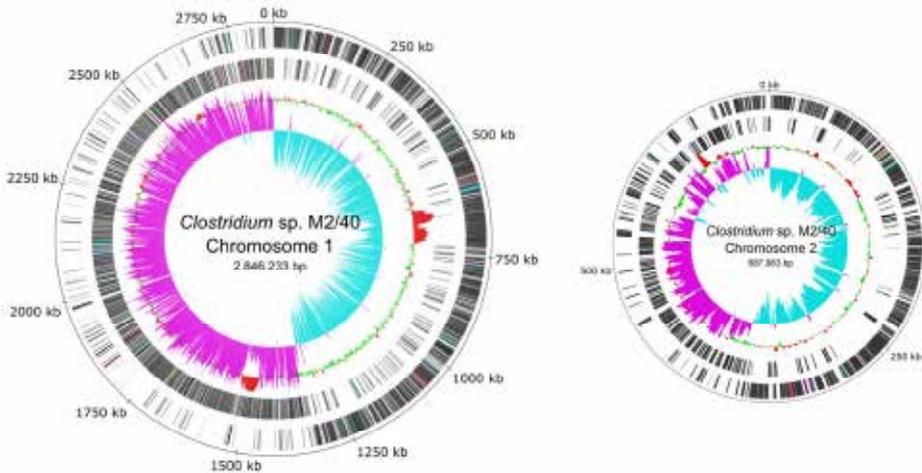


Abb. 2: Genomkarte des Typenstamms M2/40 für die erstmals beschriebene Art *Clostridium bornimense*. Das Genom besteht aus einem Chromosom (2,85 Mb) und einem kleineren Chromid (688 Kb) [Quelle: Tomazetto].

Vergleichende Untersuchung der mikrobiellen Gemeinschaften bei der anaeroben Mono-Vergärung von Mais- und Zuckerrübensilage

JOHANNA KLANG, SUSANNE THEUERL, MICHAEL KLOCKE

1 Einleitung

Biogas entsteht als Endprodukt beim anaeroben Abbau von organischer Biomasse. Die Biomethanisierung ist ein biologischer Prozess, der von einer Vielzahl unterschiedlicher Mikroorganismen durchgeführt wird. Das „Wohlergehen“ der mikrobiellen Lebensgemeinschaft hängt von vielen Faktoren ab, u. a. vom verwendeten Substrat, d. h. von der Zusammensetzung und Verfügbarkeit der Nährstoffe. Je nach vorherrschenden Bedingungen entwickeln sich unterschiedliche mikrobielle Lebensgemeinschaften, die gegenüber Veränderungen und Störungen im Prozess unterschiedlich robust sein können. Wie eine stresstolerante Lebensgemeinschaft zusammengesetzt sein sollte, ist jedoch größtenteils noch unbekannt.

2 Experimenteller Aufbau und Durchführung

In dieser Studie wurde Mais- bzw. Zuckerrübensilage als Monosubstrat, in jeweils drei parallel-betriebenen Rührkesselreaktoren, fermentiert. Die Reaktoren wurden in Anlehnung an die VDI-Richtlinie 4630 über drei Monaten bis hin zu einer Raumbelastung von $2 \text{ g}_{\text{oTS}} \text{ L}^{-1} \text{ d}^{-1}$ hochgefahren. Anschließend liefen die Reaktoren für weitere acht Monate im konstanten Betrieb.

Während des ganzen Versuchszeitraums wurden wöchentlich chemische Analysen (TS, oTS, N_{Kjel} , $\text{NH}_4^+\text{-N}$, Säuren) des Gärrestes durchgeführt. Zusätzlich wurden die Einsatzstoffe sowie die Gärreste hinsichtlich der Anteile von Fett, Zellulose, Hemizellulose, Lignin und Zucker untersucht.

Ein ausgewähltes Probenset wurde hinsichtlich der Struktur und zeitlichen Variation der mikrobiellen Gemeinschaften mittels TRFLP (Terminaler Restriktionsfragmentlängenpolymorphismus, genetischer Fingerabdruck) in Kombination mit einem Klonierungs-/Sequenzierungsansatz untersucht.

3 Ergebnisse und Interpretation

Die verwendeten Einsatzstoffe zeigten große Unterschiede in der chemischen Zusammensetzung, wobei die Maissilage einen größeren Anteil an komplexen Bestandteilen (Lignin, Zellulose, Hemizellulose und Fett) aufwies, während die Zuckerrübensilage mehr leicht

abbaubare Bestandteile wie Zucker, Ethanol und Acetat enthielt. Diese Unterschiede zeigten deutliche Auswirkungen im Verlauf der täglich gebildeten Biogasmenge: Während die für die Biogasbildung verfügbaren Komponenten der Zuckerrübensilage bereits kurz nach der Fütterung fast komplett in Biogas umgesetzt wurde, zeigten die Reaktoren, in denen Maissilage fermentiert wurde, eine gleichmäßigere Gasproduktion über den gesamten Tagesverlauf hinweg.

Die unterschiedliche Substratzusammensetzung machte sich ebenfalls im Abbau-grad bemerkbar: Die mit Maissilage betriebenen Reaktoren zeigten im Vergleich zu den Zuckerrübensilage-Reaktoren eine etwas geringere Abbaurate (78 % vgl. 87 %). Dennoch scheint die mikrobielle Lebensgemeinschaft in den Maissilage-Reaktoren ein breiteres Substratabbaupotenzial zu haben als die der Zuckerrübensilage-Reaktoren: In Ersteren wurde eine Verringerung der Mengen an Hemizellulose, Protein und Fett beobachtet, während sich diese Verbindungen in den Zuckerrübensilagen-Reaktoren akkumulierten.

Die molekularbiologische Analysen bestätigten diese Vermutung, denn die bakterielle Gemeinschaft in den Maissilage-Reaktoren zeigte eine höhere Diversität und eine gleichmäßigere Verteilung der Gemeinschaftsmitglieder als die in den Zuckerrübensilage-Reaktoren. Bei Letzteren war dagegen eine Dominanz einzelner Arten zu beobachten. Zudem zeigten die Maissilage-Reaktoren eine höhere Abundanz von Vertretern der Abteilung *Firmicutes*, die dafür bekannt sind an der Hydrolyse von komplexen Makromolekülen wie Zellulose beteiligt zu sein. Im Gegensatz dazu wurden die Rübensilage-Reaktoren dominiert von Vertretern der Abteilung *Bacteroidetes*, die hauptsächlich leichtverwertbare, niedermolekulare Stoffe wie beispielsweise Zucker, Ethanol und Acetat umsetzen.

Ebenso wie die Bakterien, zeigten auch die methanogenen Archaeen Unterschiede zwischen den beiden Einsatzstoffen. Der letzte Schritt, die Produktion von methan-haltigem Biogas, wurde in den Maissilage-Reaktoren hauptsächlich durch Vertreter der obligat acetoklastischen Gattung *Methanosaeta* durchgeführt, während in den Zuckerrübensilage-Reaktoren fast identische Mengenteile für *Methanosaeta* und *Methanosarcina* vorlagen.

Trotz der Unterschiede beider untersuchten Einsatzstoffe und der damit verbundenen Unterschiede in den mikrobiellen Lebensgemeinschaften konnten sowohl vergleichbare Abbauraten als auch vergleichbare Biogas- bzw. Methanausbeute erreicht werden. Die vorliegenden Ergebnisse lassen jedoch vermuten, dass eine höhere mikrobielle Diversität und das damit verbundene größere physiologische Spektrum, ein besseres Anpassungspotenzial an sich verändernde Umweltbedingungen zur Folge hat.

Literatur

Klang, J.; Theuerl, S.; Szewzyk, U.; Huth, M.; Tölle, R.; Klocke, M. (2015): Dynamic variation of the microbial community structure during the long-time mono-fermentation of maize and sugar beet silage, *Microbial Biotechnology*, im Druck DOI: 10.1111/1751-7915.12263

Anaerobe Batch-Fermentation mit Mais- und Amaranthsilagen: Biogasproduktion und molekulare Charakterisierung mikrobieller Gemeinschaften

BRIGITTE KEMPTER-REGEL, CHRISTIAN GRUMAZ, FRANZISKA WIESE, KATHARINA SCHERGE, CAROLIN BIRK, URSULA SCHLISSMANN, PHILIP STEVENS, KAI SOHN, DIETER BRYNIOK

Wissenschaftler der Universität Hohenheim und des Fraunhofer-Instituts für Grenzflächen- und Bioverfahrenstechnik IGB, sowie Partner aus der Industrie fokussieren sich auf die Verbesserung der Nachhaltigkeit der Biogasproduktion. Aus diesem Grund wird jeder einzelne Prozessschritt (z. B. Anbau der Pflanzen, Silierung zur Konservierung und Verbesserung der Säureausbeute, Biogasprozess, Wiederverwertung des Gärrestes und Rückständen) überprüft. In den vorgestellten Versuchen wurden sowohl Presskuchen, als auch unbehandelte Mais- und Amaranthsilagen respektive ihrer Biogasproduktion und der vorhandenen Mikroorganismenpopulationen untersucht.

Die Biogasproduktion wurde nach Standard Batch-Vergärungstests in Batch-Reaktoren gemäß der VDI-Richtlinie 4630 für die Substrate Mais- und Amaranthsilage untersucht. Als Inokulum diente der Gärrest einer kontinuierlichen Biogasanlage im Labormaßstab, die mit verschiedenen Substraten, unter anderem auch Mais jedoch kein Amaranth, gefüttert wurde. Das Inokulum wurde in den 1 l-Batch-Reaktoren vorbereitet, bei 37 °C temperiert und kontinuierlich durchmischt. Die Reaktoren wurden insgesamt drei Mal gefüttert und somit zu einem Fedbatch-Prozess modifiziert. Nach den Fütterungen wurde die Biogasproduktion in den einzelnen Reaktoren gemessen. Um sicherzugehen, dass die Substrate vollständig abgebaut waren, wurden Proben aus den Reaktoren entnommen und hinsichtlich der Acetat- und Propionatkonzentration untersucht. Um den Prozess der Biogasproduktion in den Fedbatch-Experimenten zu verstehen, wurde das Metagenom der mikrobiellen Populationen analysiert. Die komplexen Populationen wurden durch Shotgun-Sequenzierung (WGS – whole genome shotgun) charakterisiert. Abgesehen von der stabileren taxonomischen Klassifizierung mit WGS-Daten im Vergleich zu zielorientierten Herangehensweisen wie 16S Amplikon-Sequenzierung, können mit der Shotgun-Sequenzierung Anreicherungen von bestimmten kodierenden Bereichen sichtbar gemacht und folglich Stoffwechselwege rekonstruiert werden. Speziell in einem so komplexen 4-Phasen Prozess wie der Methanproduktion (Hydrolyse, Acidogenese, Acetogenese und Methanogenese) ist es essentiell, nicht nur die Schlüsselmikroorganismen zu kennen, sondern auch die Stoffwechselwege zu verstehen, die zu einer höheren Methanausbeute führen.

Ergebnisse der Biogasausbeute und der molekularen Charakterisierung der mikrobiellen Gemeinschaften werden präsentiert.

Wir danken dem Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) für die Förderung des Projekts »GOBI: Ganzheitliche Optimierung der Biogasprozesskette zur Steigerung der betrieblichen, stofflichen, energetischen und ökologischen Effizienz unter besonderer Berücksichtigung der Produktion eines natürlichen kundenspezifischen Düngemittels«, Förderkennzeichen 03EK3525A, im Programm „BioProFi – Bioenergie – Prozessorientierte Forschung und Innovation“.

Entwicklung von molekularen Markern zur Überwachung von Biogasanlagen

JAQUELINE DERENKÓ, ANTJE RADEMACHER, CARSTEN JOST, MICHAEL KLOCKE

1 Einleitung

Die Verwendung von Biogas als verlässlicher und sicherer Energielieferant ist nicht zuletzt davon abhängig, ob der gesamte Prozess des anaeroben Abbaus überwacht, bewertet und effizient gehalten werden kann. Neben dem Endprodukt können auch Ausgangsstoffe sowie Zwischenprodukte dieses Prozesses als Grundlage für ein Prozessmonitoring dienen. Ein noch weitreichenderes Potenzial bietet die Überwachung der mikrobiellen Gemeinschaft. Hierfür sind molekularbiologische Nachweissysteme wie die quantitative PCR (qPCR) geeignet. Mit Hilfe dieser Methodik könnten bestimmte Indikatororganismen (sog. Biogas-Marker) mittels eines Schnelltests direkt vor Ort nachgewiesen und somit Informationen über den Fermentationszustand gewonnen werden. Die Umsetzung in die Praxis birgt jedoch Schwierigkeiten. Neben der Identifizierung geeigneter prozessrelevanter Indikatororganismen spielt die Auswahl einer für die Biogasanlage repräsentativen Probe ebenfalls eine wichtige Rolle.

2 Molekularbiologische Untersuchungen

Als Grundlage für die Entwicklung von Biogas-Markern dienen in dieser Studie mesophile (37 °C) und thermophile (55 °C) zweistufige zweiphasige Grassilagefermenter. Die mikrobielle Gemeinschaft dieses Mehrkomponentensystems wurde zunächst molekularbiologisch untersucht um potentielle prozessrelevante Indikatororganismen zu identifizieren. Die Evaluierung der Verteilung der Mikroorganismen bildet die Basis zur Entwicklung aussagekräftiger molekularer Markersysteme.

In ersten Versuchen konnte bereits nachgewiesen werden, dass sich die mikrobielle Gemeinschaft innerhalb des Reaktorsystems z.T. deutlich unterscheidet. Im Vergleich zum Perkolat konnten im Gärrest Bakterien in 55-fach höherer Anzahl detektiert werden. Ebenfalls war der Anteil der *Archaea* im Biofilm des Anaerobfilters gegenüber dem des Perkolats deutlich größer (26-fach). Die Identifizierung der Mikroorganismen des Gärrestes zeigte, dass hier 51 % (unter mesophilen Bedingungen) und 90 % (unter thermophilen Bedingungen) der Bakterien dem Stamm *Firmicutes* zugeordnet werden konnten. Die mesophile mikrobielle Gemeinschaft zeichnete sich gegenüber der thermophilen grundsätzlich durch eine höhere Diversität aus. Eine Quantifizierung der methanogenen Sub-

kategorien der *Archaea* innerhalb der verschiedenen Kompartimente zeigte eine unterschiedliche Verteilung je nachdem, ob es sich um Gärrest, Biofilm oder Perkolat handelte. Damit verlässliche Aussagen über den Fermentationszustand erhoben werden können, muss außer dem Vorhandensein des jeweiligen Indikatororganismus auch dessen Aktivität berücksichtigt werden. Durch eine zusätzliche Untersuchung der RNA wird es möglich, die tatsächliche Stoffwechselaktivität einzelner Mikroorganismen nachzuweisen. In dieser Arbeit zeigt die Quantifizierung mittels qPCR (Ziel: 16S rRNA) des Gärrestes, dass die DNA in höherer oder ähnlicher Quantität vorliegt wie die RNA und damit auf keine erhöhte Aktivität der gärrestassoziierten Mikroorganismen geschlossen werden kann. Erste Untersuchungen die Diversität betreffend eröffnete sehr unterschiedliche Einblicke. Bakterien, die im thermophilen Gärrest auf DNA-Ebene dominant vertreten waren, fanden sich auf RNA-Ebene ebenfalls stark repräsentiert. Dieses ist ein Indiz, dass zahlenmäßig häufig auftretende Mikroorganismen einen durchaus hohen Anteil an den Stoffwandlungsprozessen in einem Biogasreaktor haben. Im Gegensatz dazu, unterschieden sich die stoffwechselaktiven Bakterien im mesophilen Gärrest z.T. stark von den im DNA-Pool dominierenden Bakterien.

3 Diskussion und Ausblick

Weiterführende Untersuchungen müssen zeigen, ob eine Einschätzung der Fermentation aufgrund von DNA-basierten Analysen ausreichend ist, oder ob es vielmehr nötig sein wird, eine RNA-basierte Analytik zur molekularbiologischen Prozesskontrolle zu etablieren. Unter Berücksichtigung dessen liefert diese Arbeit die Grundlage für die Etablierung entsprechender (RT-) qPCR gestützter Nachweissysteme.

Entwicklung konservierungsfähiger, adaptierter Inokula zur standardisierten Biogasbildungspotenzialbestimmung organischer Biomasse

JÖRN HEERENKLAGE, KERSTIN SAHM, DOROTHEA RECHTENBACH, IMMO RÖSKE,
THOMAS VOSS, GARABED ANTRANIKIAN, KERSTIN KUCHTA

1 Einleitung

In anaeroben Batch-Untersuchungen zur Überprüfung der biologischen Abbaubarkeit unterschiedlicher Substrate werden Inokula eingesetzt, um die für die anaeroben Abbauprozesse erforderliche Biomasse bereitzustellen. Diese Inokula enthalten eine Vielzahl unterschiedlicher mikrobieller Arten, sind aber bisher noch nicht standardisiert worden, sondern unterscheiden sich in ihrer Herkunft und Zusammensetzung und damit auch in ihrer Abbauaktivität. Darüber hinaus sind diese Inokula nur begrenzt lagerfähig und können ihre mikrobiellen Eigenschaften dabei verändern. Daraus entsteht das Problem, dass Ergebnisse aus verschiedenen Untersuchungen möglicherweise nicht miteinander verglichen werden können. Die Bewertung der biologischen Abbaubarkeit und des Biogasbildungspotenzials einzelner Substrate ist jedoch von großer Bedeutung.

2 Projektziel

Ziel des Projektes ist es, Grundlagen für die Entwicklung und Produktion anaerober Inokula unter standardisierten Rahmenbedingungen zu erarbeiten und deren Umsetzung aufzuzeigen. Ziel ist es, durch eine optimierte Kombination verschiedener Konservierungsmethoden lagerfähige Inokula zu erhalten, die reproduzierbar stabil in Biogaspotenzialbestimmungen eingesetzt werden können. Dieses soll primär durch die Methodik der Gefriertrocknung (Lyophilisierung) erreicht werden. Die Standardisierung und Entwicklung einer Inokulabank wird zur Harmonisierung der unterschiedlichen Untersuchungsmethoden beitragen.

3 Untersuchungskonzept

Das Projekt wird an der Technischen Universität Hamburg-Harburg an den Instituten Technischen Mikrobiologie und Umwelttechnik und Energiewirtschaft – Schwerpunkt Abfallressourcenwirtschaft gemeinsam durchgeführt. Für die Konservierung der Inokula werden zunächst geeignete Stabilisierungs- und Konservierungsmethoden ausgewählt und in Batch-Versuchen mit herkömmlichen Inokula überprüft. Zum Einsatz kommt in erster Linie die Lyophilisierung der Inokula. Hierbei wird besonders die Verwendbarkeit zusätzlicher Additive zum Gefrierschutz getestet. Die Produktion der standardisier-

ten Inokula erfolgt in kontinuierlich betriebenen Rührkesselreaktoren unter mesophilen und thermophilen Milieubedingungen. Als Modellsubstrat wird zunächst Dünnschlempe eingesetzt, welches in der Bioethanolproduktion anfällt. Die Etablierung der Mikroflora wird den mit mikrobiologischen Methoden DDGE und FISH überprüft. Nach der Adaptierung einer stabilen Vorkultur erfolgt die Lyophilisierung mit geeigneten Gefrierschutzmitteln unter spezifischen Rahmenbedingungen. Das Lyophilisat wird erneut in einem Rührkesselreaktor rekultiviert, um eine stabile Mikroflora zu etablieren. Die Produktion der konservierungsfähigen Inokula erfolgt anschließend in Rührkesselreaktoren in größerem Maßstab. Nach der Produktion der standardisierten Inokula werden diese aufkonzentriert, konserviert und gelagert. Zur Charakterisierung der versandfähigen Inokula werden diese chemisch-physikalisch und mikrobiologisch analysiert. Für den Einsatz in Batchuntersuchungen können die Inokula auf Anfrage versandt werden. Die konservierten und standardisierten Inokula werden rekultiviert und der Einsatz in Biogaspotenzialuntersuchungen überprüft. Optional werden Vergleichsversuche mit den standardisierten Inokula auf Basis der VDI 4630 mit ausgewählten Instituten durchgeführt, um die Einsatzfähigkeit der hergestellten Inokula in der Praxis eingehender zu überprüfen.

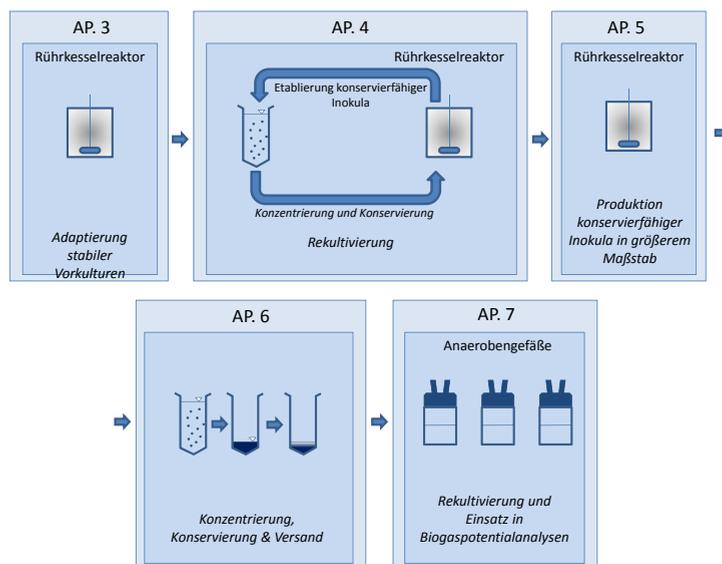


Abb. 1: Schematische Darstellung des Ablaufes einzelner Untersuchungsschritte

Danksagung

Die Autoren danken der Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. für die Förderung dieses Projektes.

Charakterisierung der methanogenen Gemeinschaft bei erhöhten N-Konzentrationen in Schwimmbettfermentern

LISA ROTHE, KAY BEINERSDORF, NICLAS KRAKAT

1 Einleitung

Um regenerative Energie aus Biogasanlagen zu erzeugen ist vor allem das Gärsubstrat ein wichtiger Faktor. Die meisten Biogasanlagen verwenden nachwachsende Rohstoffe (z.B. Mais) gemischt mit Wirtschaftsdünger. Diese Tatsache wird kritisiert, da Ackerfelder statt zur Nahrungs- nun zur Energieversorgung genutzt werden. Um dieses Problem zu entschärfen bietet es sich an, Restsubstrate, wie Geflügelkot oder Schnittgut, zu verwenden. Die Fermentation solcher stickstoffreichen Substrate ist problematisch, da sie zur Akkumulation von zellgiftigen Ammoniak führen kann. Um dennoch gute Biogaserträge zu erzielen, benötigt man eine an hohe Stickstoffkonzentrationen angepasste mikrobielle Gemeinschaft.

Ziel dieser Studie ist die thermophile/hyperthermophile Biomethanisierung von stickstoffreicher Grassilage in einem zweiphasigen und zweistufigen Schwimmbettfermentersystem (SBF). Der Fokus liegt dabei auf der kulturunabhängigen Charakterisierung der Struktur der Archaeengemeinschaft im Anaerobfilter. In diesem befinden sich Aufwuchskörper, auf denen sich Methanogene ansiedeln, die für die Methanproduktion verantwortlich sind.

2 Methoden

2.1 Reaktorbedingungen

Die zweistufigen und zweiphasigen SBF bestanden aus einer thermophilen (55 °C) bzw. hyperthermophilen (65 °C) Hydrolyseeinheit und einem nachgeschalteten Anaerobfilter (55 °C). Die Perkolationsflüssigkeit wurde anschließend über einen Perkolatspeicher in die Hydrolyseeinheit zurückgeführt. Als Gärsubstrat wurde für beide SBF Kleegrassilage verwendet. Für mikrobiologische Untersuchungen wurde Perkolationsflüssigkeit aus dem Anaerobfilter entnommen.

2.2 Mikrobiologische Analysen

Für mikrobiologische Untersuchungen wurde aus den genommenen Proben die mikrobielle DNA isoliert. Die Analyse der Zusammensetzung der methanogenen Archaeengemeinschaft erfolgte auf Basis der 16S rRNA Gene mittels einer molekulargenetischen Fingerprunttechnik (terminal restriction fragment length polymorphism, TRFLP) und der Erstellung von Sequenzbibliotheken.

3 Ergebnisse und Diskussion

In dieser Studie zeigte der thermophile SBF die besseren Gasausbeuten und hatte vermutlich daher eine an hohe Stickstoffkonzentrationen besser angepasste Mikrobiologie. Die Gasausbeuten lagen bereits während der Einfahrzeit ca. 5 % über den substratspezifischen Referenzwerten (Gasbildungstests nach VDI 4630) von $223 \text{ L}_N \text{ kg}_{\text{FM}}^{-1}$ bzw. $632 \text{ L}_N \text{ kg}^{-1} \text{ oTS}^{-1}$.

Hinsichtlich der Struktur der archaeellen Gemeinschaft ist bei erhöhten Raumbelastungen und somit auch erhöhten Stickstoffkonzentrationen ein deutlicher Unterschied in der relativen Häufigkeit der TRFLP-Fragmente zu erkennen. Die Struktur der an solche erhöhte Stickstoffkonzentrationen angepassten Archaeengemeinschaft nach einer Raumbelastungssteigerung auf $4 \text{ kg oTS (m}^3 \text{ d)}^{-1}$ ist in Abbildung 1 dargestellt. Vertreter der *Methanomicrobiaceae* (TRF 107 und 433) dominierten mit relativen Anteilen von über 50 % den Anaerobfilter des thermophilen SBF (55 °C). Vertreter der *Methanobacteriaceae* (TRF 340) traten dagegen nur mit einer relativen Häufigkeit von ca. 5 % auf. Für die Biogasproduktion im thermophilen SBF waren demzufolge überwiegend Vertreter der *Methanomicrobiaceae*, aber auch ein bislang noch unbekannter Organismus (TRF 67) verantwortlich.

Bei dem hyperthermophilen SBF lagen die Gaserträge ca. 11 % unter den in Gasbildungstests (VDI 4630) ermittelten Referenzwerten. Im Anaerobfilter des hyperthermophilen SBF (65 °C) lag die relative Häufigkeit der Vertreter der *Methanomicrobiaceae* (TRF 107 und 433) bei ca. 13 %. In diesem Anaerobfilter setzten sich Vertreter der *Methanobacteriaceae* (TRF 340) durch. Ein unbekannter Organismus (TRF 67) wurde hier ebenfalls mit noch höheren relativen Anteilen als im thermophilen SBF detektiert. Im Anaerobfilter des hyperthermophilen SBF waren deutlich mehr Vertreter der *Methanobacteriaceae* und *Methanosarcinales* zu finden als im thermophilen SBF. Bei hyperthermophilen Temperaturen setzten sich diese Organismengruppen durch und sind offensichtlich vorrangig für die Methanproduktion verantwortlich.

Für eine an hohe N-Konzentrationen angepasste Mikrobiologie in einem thermophilen SBF scheinen also vor allem Vertreter der *Methanomicrobiaceae* eine wichtige Rolle zu spielen, während im hyperthermophilen System Vertreter der *Methanobacteriaceae* von Bedeutung sind. In Zukunft müssen jedoch noch weitere Arbeiten zur genauen Identifizierung (z. B. TRF 67) und Anreicherung der Mikroorganismen durchgeführt werden, um diese als Hilfskulturen für die Bioaugmentation nutzbar zu machen.

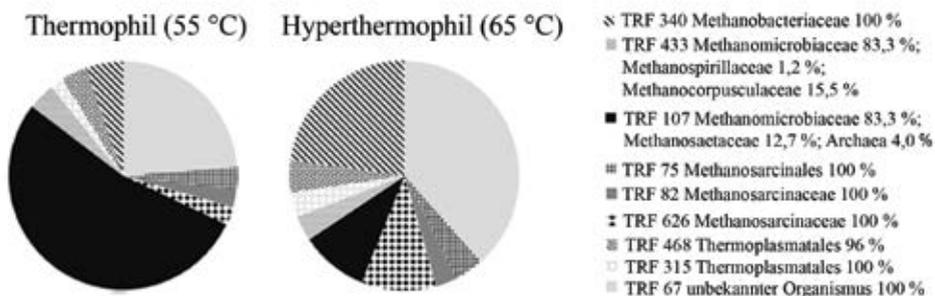


Abb. 1: Strukturelle Zusammensetzung der Archaeengemeinschaft im Anaerobfilter bei einer Raumbelastung von $4 \text{ kg oTS (m}^3 \text{ d)}^{-1}$ und Ammoniumkonzentrationen von ca. $2.700 \text{ mg kg}_{\text{FM}}^{-1}$ im thermophilen und hyperthermophilen SBF. Untersucht wurde die Perkolationsflüssigkeit des Anaerobfilters, der bei beiden Systemen bei 55 °C betrieben wurde. Als Substrat diente Kleegrassilage. Die Angaben in Prozent geben an, mit welcher Wahrscheinlichkeit es sich um diese Organismengruppe handelt.

Mechanische Vorbehandlung von organischen Reststoffen zur Optimierung der Gasausbeute

CHRISTOF WETTER, ELMAR BRÜGGING, DANIEL BAUMKÖTTER

1 Einleitung und Zielsetzung

Die Biogastechnologie bietet verschiedenste Ansätze zur Optimierung. Eine Möglichkeit ist die Vorbehandlung der eingesetzten Substrate, um höhere Biogasausbeuten zu erzielen, neue Substrate zu erschließen und die Gesamtwirtschaftlichkeit von Biogasanlagen zu erhöhen. Im Rahmen des Interreg IVa Projektes GreenGas wurden u. a. landwirtschaftliche Reststoffe und Rohstoffe mechanisch aufgeschlossen und hinsichtlich der Steigerung des Biogasertrages untersucht. Die Untersuchungen zur mechanischen Zerkleinerung dazu wurden anhand eines Prallreaktors im Technikumsmaßstab durchgeführt.

2 Bisherige Ergebnisse der Versuche

Der Prallreaktor als mechanisches Vorbehandlungsverfahren bietet eine Vielzahl von Einstellungen und Kombinationsvarianten. So können Form und Größe der Auslassöffnung, die Drehzahl des Rotors, die Abmessungen der Prallelemente sowie der Anstellwinkel des Rotors verändert werden. Zudem hat der Durchsatz Einfluss auf das Ergebnis.

Für die Untersuchungen zur mechanischen Vorbehandlung mit dem Prallreaktor wurden Stroh und Getreide-Ganzpflanzensilage ausgewählt. Mit Hilfe dieser modellhaften Substrate werden die Versuche zur technischen Optimierung und zur Ermittlung der jeweiligen optimalen Einstellungen hinsichtlich des Stromverbrauchs durchgeführt.



Abb. 1: Innenansicht Prallreaktor

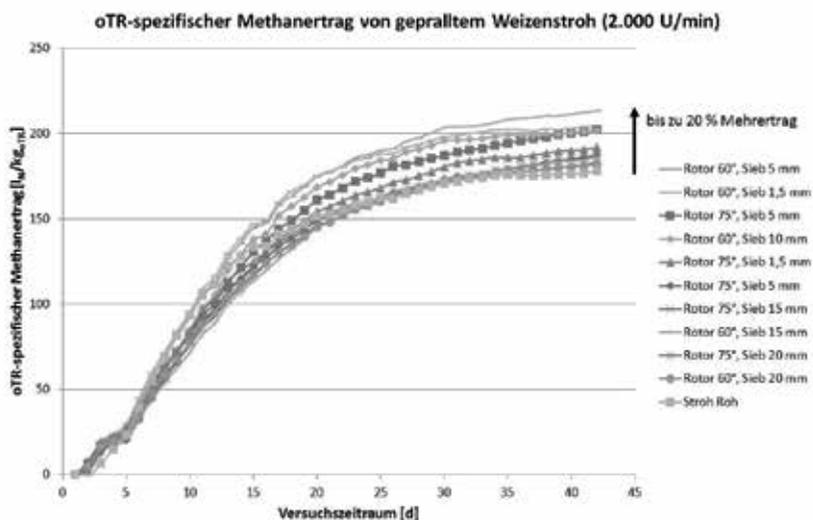


Abb. 2: Steigerung des Methanertrages bei Weizenstroh durch Zerkleinerung

Wesentliches Ziel der Substratvorbehandlung ist die Steigerung der Biogaserträge. Dazu wurden die jeweiligen Biogaspotenziale auf den laboreigenen Eudiometer-Versuchsständen bestimmt. So ist durch die mechanische Vorbehandlung zum Beispiel bei Weizenstroh eine Steigerung beim Methanertrag von bis zu 20 % je nach Einstellung des Prallreaktors möglich. Demgegenüber war bei Hafer-Ganzpflanzensilage zum Teil nur ein geringer Mehrertrag zu verzeichnen.

3 Fazit und Ausblick

Der Prallreaktor als Verfahren der mechanischen Vorbehandlung ist grundsätzlich für verschiedene Substrate geeignet und kann den Methangasertrag erhöhen. Zudem können durch die erstmalige systematische Untersuchung der mechanischen Vorbehandlung die Parameter für einen hinsichtlich Energieaufwand und Biogasertrag optimalen Aufschluss bestimmt werden. Diese Erkenntnisse verbessern die Wirtschaftlichkeit des gesamten Biogasprozesses, da zum einen die Vorbehandlung an sich optimiert wurde und zum anderen in Biogasanlagen bisher wenig genutzte Reststoffe mit diesem Aufschluss nun verwendet werden können.

Prozesscharakteristik und lösliche Spurenelemente der Startup-Phase einer thermophilen Güllebiogasanlage

SEBASTIAN ANTONCZYK, RICHARD ARTHUR, PAUL SCHERER

1 Einleitung

Der Schwerpunkt dieses Projekts lag auf der Abbaueffizienz und den gelösten, bioverfügbaren Spurenelementkonzentrationen bei verschiedenen Temperaturen in drei parallelen Biogasreaktoren eines Milchviehbetriebs. Erhöhte thermophile Bedingungen sollten die Effizienz der gut laufenden Hofanlage weiter steigern. Aufgrund älterer Literatur über schwach belastete Anlagen gibt es eine allgemeine Furcht vor einer Ammoniakinhibierung und damit kaum thermophil betriebene Gülle-Biogasanlagen in Deutschland. Wir zeigen, dass es thermophil sogar noch mit effektiveren Raumzeitausbeuten funktioniert.

2 Material und Methoden

Die Substratzusammensetzung (angegeben in Feuchtmasse) bestand aus Maissilage (2.600 kg/Fermenter/Tag), Grassilage (500 kg/Fermenter/Tag), Rinderfestmist (250 kg/Fermenter/Tag) und Rindergülle (6.500 kg/Fermenter/Tag). Folgende Prozessparameter wurden aufgenommen: Täglicher Substratinput. Wöchentlich: TS, oTS, Phosphat, Ammonium (NH_4^+), Ammoniak (NH_3 berechnet aus NH_4^+ , Temperatur, pH), Alkalinität, Leitfähigkeit und dem Fettsäurespektrum (VFA) von C1–C6. Die in der Flüssigphase gelösten Spurenelementkonzentrationen Mn, Cu, Zn, Co, Ni, Se und W wurden wöchentlich als bioverfügbare Form mit einer Total Reflection X-Ray Spectrometry (TXRF, Bruker GmbH, Berlin) gemessen. Die Ergebnisse stellen die erste Anwendung der TXRF für eine solche Matrix und die erste langfristige Untersuchung der gelösten Mikronährstoffe in einer thermophilen Biogasanlage dar. Das Gasvolumen, CH_4 , CO_2 , H_2 , H_2S und O_2 wurde mit einem Gasmessgerät der Firma Binder GmbH (Ulm) analysiert.

Die Biogasanlage besteht aus drei baugleichen, parallel geschalteten 115 m^3 zylindrischen Fermentern (je 14,5 m hoch, Durchmesser 3,3 m). Die Gesamtanlage inklusive des Endlagers produzierte im Mittel zwischen 185–189 kW_{el} (max. 190 kW_{el}). Das unbeheizte Endlager hat ein Volumen von 1.000 m^3 und der Gärrest einen Temperaturbereich von $20 \text{ }^\circ\text{C}$ (Winter, $< -10 \text{ }^\circ\text{C}$) und $30 \text{ }^\circ\text{C}$ (Sommer).

3 Ergebnisse

Die drei Fermenter wurden mit Rindergülle befüllt und alle mit gleichem Substrat (s. oben) bei 37 °C (!) gestartet (Experimental Week 0, EW0). Alle Fermenter wurden jede Woche um 1,0 °C erhöht bis zu einer Temperatur von 51 °C. Ein Testfermenter wurde von 37 °C auf 53 °C, 55 °C und 57 °C erhöht (F3, Abb. 1). Die Fermenter F1 und F2 dienten als temperaturkonstante Referenzfermenter bei 53 °C. Die organische Beladungsrate (OLR) von 12,5 kg_{oTM} m⁻³ d⁻¹ wurde in der EW30 durch Zugabe von Grassilage auf 14 kg_{oTS} m⁻³ d⁻¹ erhöht. Entsprechend lag die HRT zwischen 11,5–13,5 Tagen. Die Abbauraten entsprachen KTBL-Werten. Allerdings brachte 57 °C etwa 0,55 m³ kg_{oTS}⁻¹ d⁻¹ statt 0,5 m³ kg_{oTS}⁻¹ d⁻¹ bei 53 °C. Die Ablaufwerte der Gesamtfettsäuren im Endlager betragen < 500 ppm. Das Güllesilo war ungerührt, wodurch schwankende Werte des TS von 3–9 % gemessen wurden. Somit wurde auf die NH₄⁺-Konzentration sowie auf die Gasmenge Einfluss genommen. Der Einfluss von NH₄⁺ (1.500–2.300 mg l⁻¹, 300–500 mg l⁻¹ NH₃ bei 57 °C) zeigte aber offenbar keinen negativen Effekt auf die Gasproduktion (Abb. 1).

In der Regel lagen die Konzentration von Mn und Zn zwischen 1–5 mg l⁻¹, Cu 0,1–0,22 mg l⁻¹, Co und Ni zwischen 0,02–0,2 mg l⁻¹ sowie Se und W zwischen 0,001 und 0,04 mg l⁻¹ (limitiert). Der weniger aktive Fermenter F2 (51 °C) besaß einen höheren Restnickelgehalt als F3 (durchschnittlich 0,085 statt 0,052 mg l⁻¹). Das Futter der Rinder und die Fermenter wurden routinemäßig mit einem kommerziellen Spurenelementpulver mit den Elementen Mn, Zn, Cu, Co, Mo und Se ergänzt, jedoch ohne Ni und W (Ni ist in Deutschland nicht als Nahrungsmittelzusatz zugelassen).

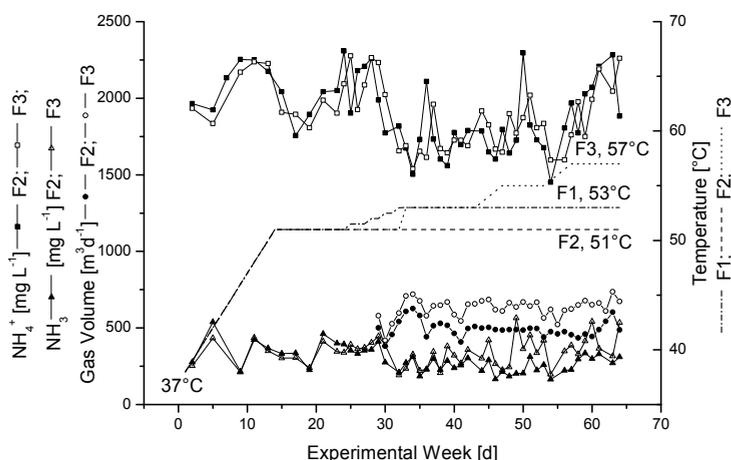


Abb. 1: Die oberen zwei Kurven zeigen die NH₄⁺-Werte der Fermenter F2 und F3. Die mittleren Kurven sind die Temperaturverläufe von F1, F2 und F3. Die untersten Kurven zeigen die berechneten NH₃-Werte. Direkt über diesen Kurven sind die Gasvolumen von F2 und F3 abgebildet, die nicht mit den vielen Peaks von Ammonium/Ammoniak korrelieren.

Entwicklung eines Verfahrens zur Gewinnung von Ammoniumcarbamat aus der Vergärung stickstoffhaltiger Einsatzstoffe

JEANNETTE BUSCHMANN, CHRISTIAN STRUTZ, GÜNTER BUSCH

1 Hintergrund und Zielstellung

In der Erschließung weiterer Substrate für die Biogaserzeugung sind insbesondere Abfälle aus der landwirtschaftlichen und industriellen Produktion von Interesse. Abfälle aus der Intensivtierhaltung verfügen über ein hohes Biogaspotenzial, wirken jedoch aufgrund ihrer Stickstoffinhalte potentiell inhibierend auf die im Biogasprozess beteiligten Mikroorganismen, so dass im kontinuierlichen Betrieb die Notwendigkeit besteht, den (Ammonium)Stickstoff (TAN) aus dem System zu entfernen. Dieses Problem ist besonders evident bei der Vergärung von Geflügelkot, welcher bis zu 70 g Stickstoff pro kg TS enthält und somit als Monosubstrat, ohne weitere Maßnahmen nicht vergärbar ist. Geflügelkot fällt weltweit in großen Mengen in Geflügelmastanlagen an und stellt ein Umwelt- und Entsorgungsproblem mit z.T. weitreichenden ökologischen Folgen dar (Überdüngung/Eutrophierung, Emissionen, mikrobielle und parasitäre Belastungen).

Neben der Stickstoffentfernung aus dem Biogassystem und der Ermöglichung eines effizienten Monovergärungsprozesses ist eine stoffliche Verwertung des entgasteten Stickstoffs anzustreben, welche in dem hier entwickelten Verfahren über die Bindung des TAN in festen Ammoniumsalzen realisiert wird. Das Ammoniumsalz(gemisch) kann als Düngemittel eingesetzt und potentiell auch als Edukt für die Harnstoffsynthese verwendet werden. Die Bindung und Konzentration des Stickstoffs in einem festen Produkt birgt Vorteile in der Lager-, Transport- und Dosierfähigkeit.

2 Versuchsdurchführung

In der Vergärung des Geflügelkots kommt ein zweistufiges Anaerobic Sequencing Batch Reactor (ASBR)-Verfahren zum Einsatz. In der ersten Prozessstufe wird das Festsubstrat thermophil (54 °C), bei einer Beladungsrate von 3 kg oTS/(m³ · d) hydrolysiert. Die Methanisierung des abgetrennten Hydrolysats erfolgt im mesophilen Bereich bei 38 °C.

Der Methanisierungsablauf wird vor der Rezirkulation in die Hydrolysestufe in eine Desorptionskolonne geführt und auf Siedetemperatur erhitzt. Der in der Prozessflüssigkeit enthaltene Ammoniumstickstoff (TAN) sowie Kohlenstoffdioxid werden in die Gasphase überführt und entsprechend aus der Prozessflüssigkeit entfernt. Die desorbierten feuchten Gase NH₃ und CO₂ werden in einen Synthesereaktor geführt und sublimieren unter einer Betriebstemperatur von 5 °C zu Ammoniumsalzen.

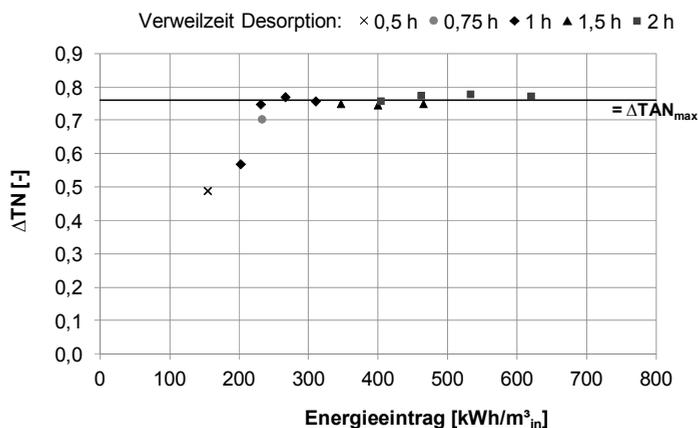


Abb. 1: Entgasungsgrad an Gesamtstickstoff (TN) in Abhängigkeit vom Energieeintrag

3 Ergebnisse

Während der anaeroben Degradation im ASBR-System werden bis zu 90 Ma.-% des im festen Eingangssubstrat enthaltenen Stickstoffs, in vorwiegend mineralisierter Form ($\text{NH}_4^+/\text{NH}_3$) in die Flüssigphase überführt. Der Ammoniumstickstoff kann im Desorptionsprozess vollständig aus der Prozessflüssigkeit entfernt werden (Abb. 1). Über Sublimation der desorbierten feuchten Gase werden Ammoniumsalze (vorwiegend Ammoniumcarbammat, -carbonat, -bicarbonat) gebildet.

Der Einsatz von 1 t Hühnerkot (TS_{in}), mit einem Gesamtstickstoff(TN)-Anteil von 4,6 Ma.-%, im zweistufigen Monovergärungsprozess mit angelagerter Desorption und Salzsynthese erlaubt eine Stickstoffbindung von bis zu 36 $\text{kg}_{\text{TN}}/t_{\text{TS},\text{in}}$ (≈ 78 Ma.-%) in der Ammoniumsalzfracht. Maximale spezifische Produkterträge von 2,7–2,9 $\text{kg}_{\text{Salz}(\text{FM})}/\text{kg}_{\text{TN,desorbiert}}$ setzen eine annähernd vollständige Entgasung des Ammoniumstickstoffs voraus und können bereits unter einer hydraulischen Verweilzeit von 1 h in der Desorption erzielt werden.

Eine quasi-kontinuierliche Desorption des Ammoniumstickstoffs (TAN) aus der zirkulierenden Prozessflüssigkeit bewirkt eine annähernde Konstanz in der TAN-Konzentration in der Flüssigphase des Gesamtsystems in einem unkritischen Bereich von 2,5–3,0 g/l, so dass ein langfristig stabiler Biogasprozess unter dem Einsatz von Hühnerkot als Monosubstrat, mit Methangaserträgen von bis zu 280 $\text{Nl}_{\text{CH}_4}/\text{kg}_{\text{O}_\text{TS}}$ gewährleistet wird.

Gefördert durch: Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL),
 Projektträger: Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR), FKZ: 220 032 12

Entwicklung eines Verfahrens zur fermentativen Konversion von Wasserstoff aus fluktuierenden Quellen zu Biomethan in Biogasanlagen (H₂-Transfer)

BERNHARD LECKER, HANS OECHSNER

1 Projekteinordnung

Im Zuge des geplanten Ausbaus von erneuerbaren Energien in Deutschland werden zukünftig trotz Ausbau des Stromnetzes und Schaffung von Flexibilität beim Stromverbrauch beträchtliche Speicherkapazitäten für elektrische Energie benötigt. Die vorhandenen Pumpspeicherkraftwerke reichen bei weitem nicht aus. Biomethan eignet sich hervorragend als chemisches Speichermedium, das im Erdgasnetz zwischengelagert, bei Bedarf in BHKW verstromt oder als Kraftstoff genutzt werden kann. Fluktuierender Strom aus Windkraft- oder PV-Anlagen kann über die Elektrolyse zu Wasserstoff umgewandelt werden.

Die Methanerzeugung wird derzeit mit katalytisch-thermochemischen Verfahren (Sabatier-Prozess) erprobt, die nur als sehr große Anlagen umsetzbar sind. In unserem Projekt werden Verfahren für dezentrale Energieerzeugung entwickelt, bei denen die Methanisierung von Wasserstoff und Kohlendioxid auf biologischem Wege mithilfe von hydrogenotrophen Methanbakterien erfolgt, die im Biogasprozess ohnehin vorhanden sind. Diese reduzieren CO₂ zusammen mit Wasserstoff zu Methan und Wasser [$CO_2 + 4H_2 \rightarrow CH_4 + 2H_2O$]. Ziel des Ansatzes ist es auch, das Verfahren für bestehende Biogasanlagen zu erproben, um einen möglichst großen Teil der existierenden 7.500 Biogasanlagen technisch zu optimieren und weiter zu entwickeln.

1.1 Versuchsbeschreibung

In einem ersten Vorversuch wurde in einem 400 Liter Biogasfermenter Wasserstoff halbstöchiometrisch eingetragen und feinblasig verteilt. Dieser Fermenter wurde mit Getreideschrot bei einer Raumbelastung von 1,7 kg oTS/m³ und Tag gefüttert. Es zeigte sich, dass der zugegebene Wasserstoff wie erwartet zusammen mit dem in der Biogasanlage gebildeten CO₂ zu Methan umgesetzt wurde. Damit stieg der Methangehalt im entstehenden Biogas bis auf knapp 80 % an, der CO₂-Gehalt fiel auf ca. 13 % ab. Außerdem war noch bis zu 7 % nicht umgesetzter Wasserstoff im Biogas enthalten. Durch den Verbrauch an CO₂ stieg der pH-Wert geringfügig an (pH 8,3). Durch diesen externen Energieinput kann der Methanertrag je Hektar gesteigert werden.

Im weiteren Verlauf des Projektes werden vier Laborfermenter aufgebaut, die Eintragstechnik für Wasserstoff weiter optimiert und die optimalen Konversionsbedingun-

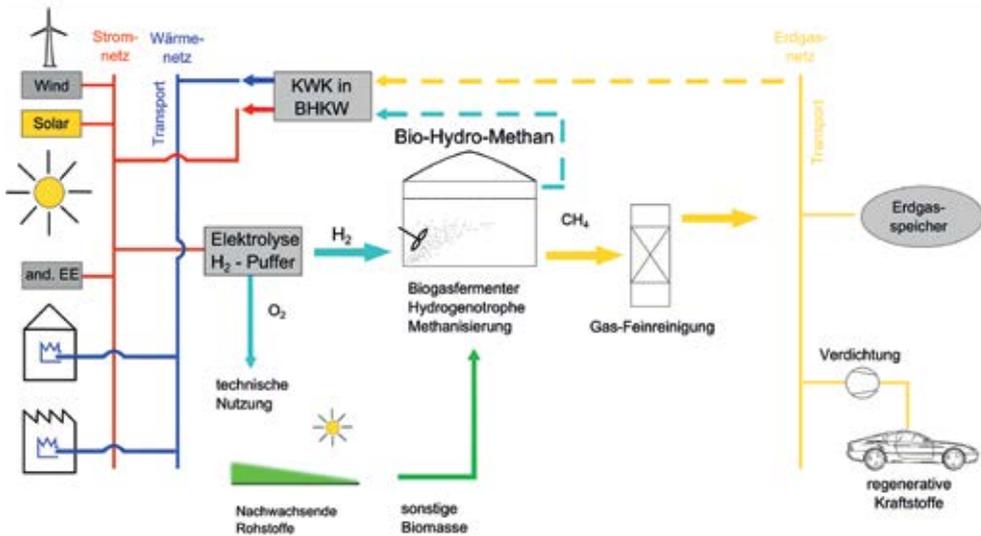


Abb. 1: Schema der biologischen Wasserstoff-Methanisierung (Quelle: Oechsner 2014)

gen (TS-Gehalt, Blasengröße, Gärtemperatur, Verweilzeit und Raumbelastung) ermittelt. Zum Abschluss des Projektes soll ein temporärer Versuchsbetrieb an der Forschungsbiogasanlage Unterer Lindenhof erfolgen.

Literatur

Oechsner, H. (2014): Biogasproduction – state of the art and innovative methods for advancement of technology. Bio-Ökonomie-Kongress Baden-Württemberg, Stuttgart, Haus der Wirtschaft, 29–30. Oktober, 2014

Biogene Methanisierung von Wasserstoff und Kohlenstoffdioxid

CHRISTOF WETTER, ELMAR BRÜGGING, MATTHIAS GRUTTMANN, SARAH ABTMEYER

1 Projektbeschreibung

Der Ausbau von erneuerbaren Energien zur Energiewende macht aufgrund der fluktuierenden Stromerzeugung die Schaffung von Speicherkapazitäten notwendig. Die größte Speicherkapazität bietet das Erdgasnetz. Mit der Power-to-Gas-Technologie kann aus Strom von erneuerbaren Energiequellen Wasserstoff hergestellt werden, der dann in einem weiteren Schritt mit Kohlenstoffdioxid zu Methan umgesetzt werden kann. Statt der klassischen chemisch-katalytischen Methanisierung nach dem Sabatier-Prozess kann alternativ auch die biogene Methanisierung mit Hilfe von Mikroorganismen angewendet werden. Das Projekt wurde innerhalb des Interreg IVa Projektes GreenGas bearbeitet. Das Ziel war es, ein vielseitig einsetzbares Verfahren zu entwickeln, mit dem aus Kohlenstoffdioxid bzw. Biogas und Wasserstoff Biomethan erzeugt wird, welches als Energieträger vielfältig eingesetzt werden kann.

2 Durchführung

Zur Untersuchung der biogenen Methanisierung von Biogas wurden im Rahmen des Projektes zwei halbtechnische Reaktoren entwickelt. Bei der Entwicklung der Reaktoren wurde ein besonderes Augenmerk auf die Vermeidung von Wasserstoffverlusten und eine maximale Verweilzeit der Gase in der Suspension gelegt. Auch die Messwerterfassung spielte eine entscheidende Rolle. Das Ergebnis der Planungen sind zwei identische Edelstahlreaktoren.

Die Reaktoren sind nahezu vollständig aus Edelstahl gefertigt, haben ein Reaktionsvolumen von jeweils 42 Litern und ein hohes Verhältnis von Höhe zu Durchmesser. Zur Untersuchung des kontinuierlichen Prozesses wurde über den gesamten Versuchszeitraum der pH-Wert, die Leitfähigkeit, das Redoxpotenzial, das FOS/TAC-Verhältnis, der Gehalt an organischen Säuren sowie die Gasmenge und dessen Zusammensetzung gemessen.

3 Ergebnisse

Zur Untersuchung der biogenen Methanisierung wurden an den Reaktoren Versuche zum Einfluss der Durchmischung sowie zur maximalen Produktgasqualität durchgeführt. Die Durchmischung des Reaktionsgemisches dient zum Ausgleich von Konzentrationsunter-

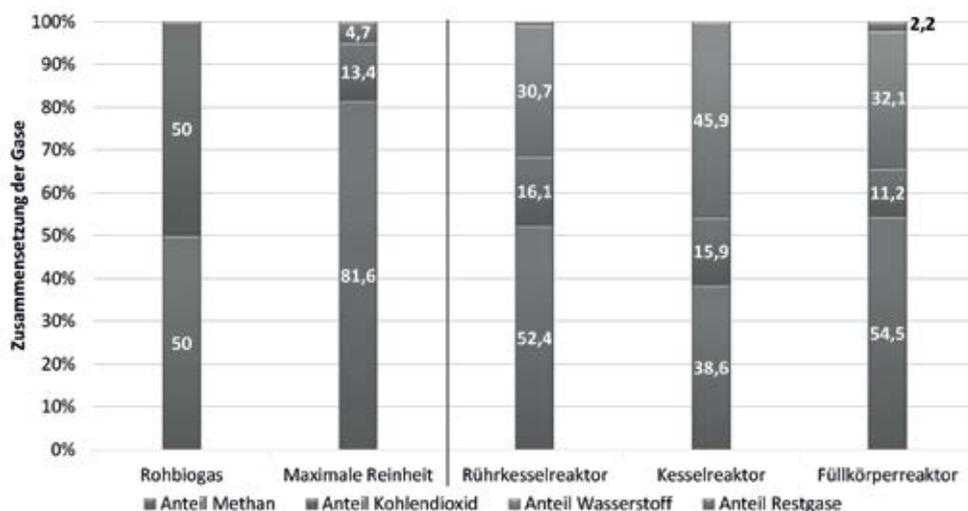


Abb. 1: Vergleich der Gaszusammensetzung vor und nach der Methanisierung bei unterschiedlichen Betriebsweisen

schieden und zur Verlängerung der Aufenthaltszeit der Gase in der Flüssigkeit. Die Ergebnisse der Untersuchungen sind in Abbildung 1 aufgeführt.

Die Ergebnisse der ersten Versuchsreihe, in dem die Eignung des Verfahrens zur Erzeugung von einspeisefähigem Gas untersucht wurde, zeigen, dass der Wobbe-Index des Produktgases für die Einspeisung geeignet ist. In der zweiten Versuchsreihe, in der der Einfluss der Durchmischung überprüft wurde, wurde die Anlage mit aktiver Durchmischung mit einem Rührorgan, ohne Durchmischung und mit keramischen Füllkörpern, ohne Durchmischung, betrieben. Die Ergebnisse des Füllkörperversuches deuten darauf hin, dass eine aktive Durchmischung durch den Einsatz von Füllkörpern substituiert werden kann. Durch den Einsatz von Füllkörpern anstelle eines Rührwerks wird der Eigenenergieverbrauch der Anlage erheblich reduziert.

Biologische Konversation von Wasserstoff und Kohlendioxid in Methan zur Energiespeicherung

SÖREN THIERING, REINHARD PÄTZ, MARION SEIDEL, REIK ELLMANN, ANDREAS WINKLER

1 Grundlagen

Auf Grund des stetig steigenden Ausbaus der erneuerbaren Energien, insbesondere Solar- und Windenergie, kommt es zunehmend zu starken Schwankungen am deutschen Strommarkt. Um diesen Schwankungen entgegen zu wirken, bedarf es einer kostengünstigen und effizienten Speichertechnologie, welche langfristig große Mengen an Energie speichern kann. Ein Ansatz ist es, Wasserstoff mittels Wasserelektrolyse herzustellen, welcher in einem zweiten Schritt in Methan umgewandelt wird. Vereinfacht lässt sich der Prozess mit den Gleichungen 1 und 2 darstellen:

Elektrolyse:



Methanisierung:



Nach einem Aufreinigungsschritt kann das Methan in das Gasnetz eingespeist, und somit langfristig gespeichert werden. Beispielsweise besitzt Deutschland eine Speicherkapazität von 83 Tagen (Fraunhofer Institut IWES, 2009). Damit wäre auch die Speicherung von saisonalen Überschüssen möglich.

2 Technische Umsetzung

Die erste größere Pilotanlage zur Umwandlung von elektrischer Energie in Methan wurde von der ETO Gas GmbH in Kooperation mit Audi entwickelt und gebaut. Sie hat eine Leistung von 6 MW. Da beim eingesetzten Verfahren, dem Sabatier-Prozess, eine Temperatur von ca. 200 °C benötigt wird, muss die anfallende Abwärme effizient genutzt werden. Dies impliziert ein Wärmenutzungskonzept, welches nur in großen und zentralen System wirtschaftlich ist.

Alternativ dazu besteht die Möglichkeit einer biologischen Konversation. Dabei wird der Wasserstoff von hydrogenotrophen methanogenen Mikroorganismen umgesetzt. Diese sind bereits in ausreichender Menge in anaeroben Abwasserbehandlungs- sowie

in Biogasanlagen vorhanden. Sie benötigen für ihren Stoffwechsel eine Temperatur von ca. 35 bis 60 °C und arbeiten auch bei Umgebungsdruck effizient.

Bei einer technologischen Umsetzung muss lediglich Wasserstoff zusätzlich in das System eingetragen werden, wodurch es zu einer Steigerung des Methananteils kommt.

3 Ergebnisse

Die Konversion des Wasserstoffes zu Methan verlief sehr effizient, so dass lediglich ein Wasserstoffanteil von maximal 0,47 % im Gasstrom aus dem Reaktor verblieben ist. Dies entspricht einer Umsatzrate von 99,58 % des eingesetzten Wasserstoffes. Weiterhin konnte die Methanbildung von 51 ml/(l · d) auf 97 ml/(l · d) gesteigert werden. Die maximale Methankonzentration im Gas lag bei 87,1 %. Zum Vergleich ist die Methanbildung in Abhängigkeit zur Menge des eingesetzten Wasserstoffes in Abbildung 1 dargestellt.

Weiterhin konnte im Rahmen der Forschungsarbeiten die technologischen Grundlagen geschaffen werden, um dieses Verfahren auch an kleinen bis mittleren Anlagen einzusetzen zu können. Folglich kann der „Power-to-Gas-Ansatz“ auch mit kleineren Anlagen dezentral umgesetzt werden. Hierfür ist lediglich eine Umrüstung von bereits vorhandenen Anlagen nötig.

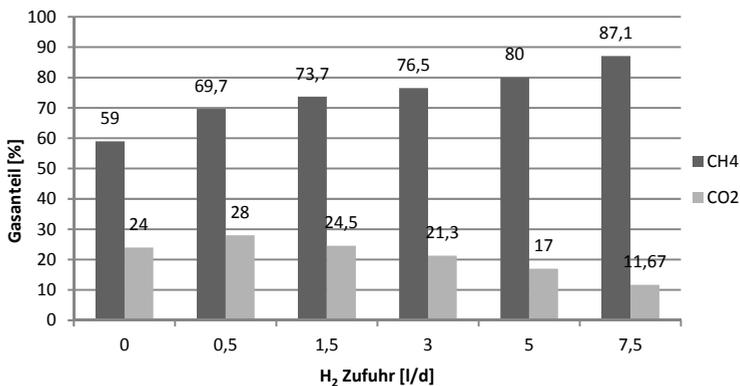


Abb. 1: Gaszusammensetzung in Abhängigkeit des eingesetzten Wasserstoffes am Beispiel eines 50-l-Reaktors

Literatur

Fraunhofer Institut IWES (2009): Dynamische Simulation der Stromversorgung in Deutschland nach dem Ausbauszenario der Erneuerbaren-Energien-Branche. Kassel

Bedarfsorientierte Methansynthese auf Basis der Integration weiterer erneuerbarer Energieträger

MARKO BURKHARDT, ISABEL JORDAN, SABRINA HEINRICH, JOHANNES BEHRENS,
TOBIAS KOSCHACK

1 Hintergrund

Erneuerbare Energien als geeigneter Ersatz für fossile Energieträger sind derzeit aufgrund ihrer schlechten Speichermöglichkeiten in der Diskussion. Für die nächsten Jahre gilt es daher, das Problem der Zwischenspeicherung in Zeiten des Überangebotes an Energie zu lösen. Eine Möglichkeit könnte die Power-to-Gas-Strategie sein, bei der elektrische in chemische Energie (hier Wasserstoff H_2) überführt wird. Der durch Elektrolyse gebildete Wasserstoff kann in Methan (CH_4) umgewandelt und in das bereits bestehende Erdgasnetz eingespeist werden. Alternativ zum chemisch-physikalischen Sabatier-Prozess kann die Methanisierung mittels biologisch katalysierter Verfahren erfolgen. Dieser Prozess wird zurzeit am Lehrstuhl Abfallwirtschaft der BTU Cottbus-Senftenberg untersucht. Zum Einsatz kommt ein neuartiges und bereits patentiertes Rieselbettverfahren (Patentnummer: DE10201309734.4) (Abb. 1).

2 Kurzbeschreibung des Verfahrens

Das Rieselbettverfahren unterscheidet sich von anderen bisher angewendeten Methanisierungsverfahren durch die Ausbildung eines Biofilms auf Füllkörpern. Die gasförmigen Substrate durchströmen den Reaktionsraum und diffundieren in den Biofilm, wo der Umsatz von H_2 und CO_2 zu CH_4 erfolgt. Durch eine geringfügige Rezirkulation von Prozessflüssigkeit werden die im Biofilm immobilisierten Mikroorganismen mit Nährstoffen versorgt. Der wesentliche Vorteil ist die große Stoffaustauschfläche und die Ausbildung eines Drei-Phasen-Systems (Biofilm, Flüssig- und Gasphase). Aufgrund des bestehenden hohen Konzentrationsgradienten in der Grenzschicht erhöht sich die Diffusion der Gase, die meist limitierend wirkt. Somit wird der Stofftransport in und aus dem Biofilm intensiviert und der mikrobielle Umsatz erhöht. Eine Rezirkulation von Gas wird dadurch nicht erforderlich und das produzierte Gas kann kontinuierlich und nahezu rein abgeführt werden.

3 Ergebnisse

Unter der Voraussetzung einer dauerhaft anaeroben Atmosphäre konnte in den Technikumversuchen ein nahezu vollständiger Umsatz von H_2 und CO_2 erreicht werden. Ohne

eine Gasrezirkulation liegt eine CH_4 -Konzentration von 98 Vol.-% vor. Ein stabiler Prozessablauf wurde bis zu einer Raumbeladung von $6,9 \text{ Nm}^3_{\text{H}_2}/(\text{m}^3 \times \text{d})$ und einer Produktivität von $1,7 \text{ Nm}^3_{\text{CH}_4}/(\text{m}^3 \times \text{d})$ erreicht (Abb. 2). In ersten Versuchen konnte zudem bestätigt werden, dass Bedarfsschwankungen und eine flexible Methanproduktion für das Rieselbettverfahren kein Hindernis darstellen. Innerhalb von wenigen Minuten kann die Methanisierung „eingeschaltet“ bzw. „ausgeschaltet“ werden. Bei Einspeisen von Biogas als CO_2 -Lieferant konnte ein Upgrading von ca. 70 Vol.-% CH_4 auf ebenfalls 98 Vol.-% CH_4 erzielt werden (Abb. 3).

Die Leistungsfähigkeit des Rieselbettverfahrens zum Biogas-Upgrading wird derzeit weiter erforscht. Ferner sind Untersuchungen zur Steigerung der Produktivität durch einen thermophilen Betrieb bzw. unter erhöhtem Druck Gegenstand der laufenden Forschungsarbeiten.



Abb. 1: Rieselbettreaktoren im Technikum der BTU Cottbus-Senftenberg

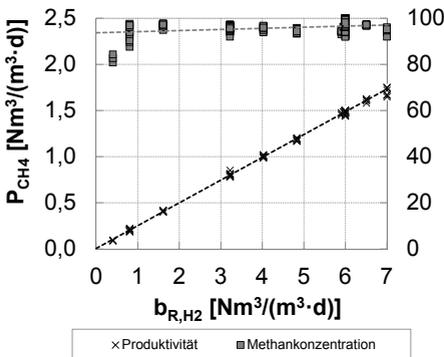


Abb. 2: Methansynthese aus CO_2 und H_2 im Rieselbettreaktor

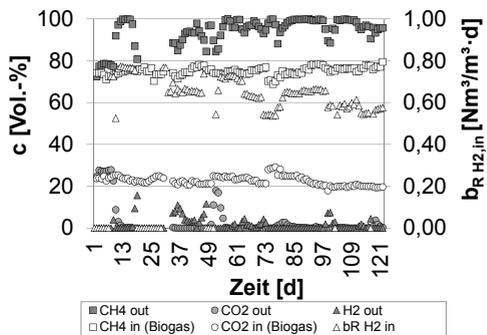


Abb. 3: Biogas-Upgrading im Rieselbettreaktor

Gefördert durch die FNR (FKZ 22407112)

Hochdruckfermentation bis 100 bar: Einfluss auf Biogasproduktion und -aufbereitung

WOLFGANG MERKLE, SIMON ZIELONKA, ANDREAS LEMMER

1 Einleitung

In Deutschland wächst der Bedarf an Regelernergie stetig mit dem fortschreitenden Ausbau der volatilen Erneuerbaren Energien. Hierfür muss die bedarfsgerechte Stromproduktion ausgebaut und neue Konzepte zur Speicherung von Energie entwickelt werden.

In diesem Zusammenhang birgt die Herstellung von Biomethan ein großes Potenzial. Das weitreichende, bereits existierende, Erdgasnetz kann sowohl zum Transport als auch zur Speicherung des Biomethans genutzt werden und ermöglicht somit eine dezentrale Bereitstellung von Regelernergie. Um eine sichere Gasnutzung zu gewährleisten, muss das Biomethan denselben hohen technischen Qualitätsansprüchen genügen wie Erdgas. Um Biomethan aus Biogas zu erzeugen, muss dieses zunächst aufbereitet ($> 90\text{--}95\%$ Methan) (DVGW 2011) und anschließend komprimiert werden (Druck abhängig vom spezifischen Gasnetz). Bei heutigen Verfahren erfolgt die Biomethanerzeugung erst nach dem Biogasprozess mithilfe von technischen Aufbereitungsverfahren.

Ziel des neuen AG-HiPreFer-Verfahrens ist es, die bisher getrennten Prozessschritte Biogaserzeugung, Aufbereitung und Druckerhöhung in einem Verfahren zu integrieren. Dafür wurde ein neues zweistufiges Verfahren zur Biogasproduktion entwickelt: die zweistufige Hochdruckfermentation. Im Methanreaktor dieses Verfahrens wird durch methanogene Archaeen ein Druck von bis 100 bar im Reaktor erzeugt. Erste Vorversuche zum spezifischen Methanertrag wurden hierzu durchgeführt.

2 Material und Methoden

Die vorliegende Studie beschäftigt sich mit dem anaeroben Fermentationsprozess bis zu dem Druck von 100 bar. Dabei wurde der Einfluss von Druck auf die Gasqualität und Gasproduktion in drei Hochdruck Batchreaktoren mit einem Bruttovolumen von jeweils 0,640 l untersucht (Abb. 1). Drei Druckstufen (1, 50, 100 bar_{Abs}) wurden bei einer Temperatur von 37 °C getestet. Jeder Reaktor wurde mit 0,5 l Flüssigkeit gefüllt, die eine CSB-Konzentration von $3,89 \pm 0,58$ g/l aufwies. Der Vordruck in den Reaktoren wurde mithilfe von Stickstoff erzeugt.

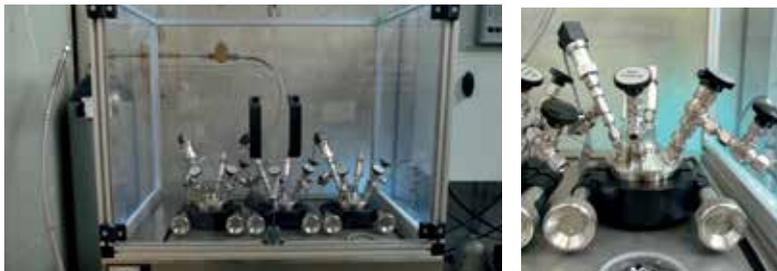


Abb. 1: Hochdruck Batchanlage

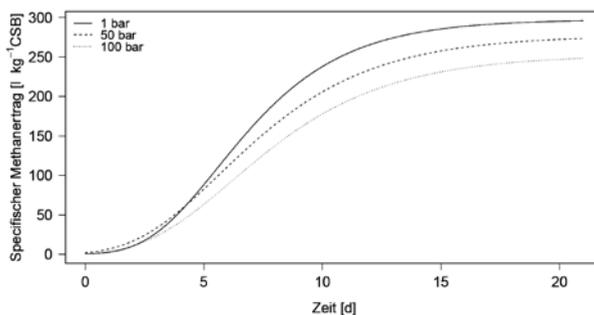


Abb. 2: Gasbildungskurven bei drei verschiedenen Vordrücken (1, 50, 100 bar)

3 Ergebnisse und Schlussfolgerungen

Obwohl für die Untersuchungen ein Inokulum aus einer Labor-Biogasanlage verwendet wurde, die unter atmosphärischem Druck betrieben wurde, startete die Biogasproduktion in allen Versuchsvarianten nahezu gleich schnell. Eine Hemmung der Mikroorganismen durch die kurzfristige Druckerhöhung ohne Adaptionenmöglichkeit konnte nicht beobachtet werden. Der Einfluss des Drucks zeigt, dass niedrigere Vordrücke (1 bar) zu einer geringfügig höheren Gasbildung führten im Vergleich zu höheren Vordrücken (50, 100 bar). Bei der Gasqualität zeigte sich, dass Methangehalte zwischen 88 % bei 1 bar und 86,3 % bei 100 bar erreicht wurden und der spezifische Methanertrag von $297 \pm 15,9$ auf $253 \pm 22,1$ l/kg CSB abnahm (Abb. 2).

In allen Varianten konnte ein hochkalorisches Biogas erzeugt werden. Die Löslichkeit von Methan in der Flüssigphase bei hohen Drücken muss weiter untersucht werden. Außerdem sind für eine genauere Beurteilung des Einflusses des Drucks weitere Studien notwendig, insbesondere im kontinuierlichen Betrieb.

Literatur

DVGW Technische Regel Arbeitsblatt G 262 (2011): Nutzung von Gasen aus regenerativen Quellen in der öffentlichen Gasversorgung, Wirtschafts- und Verlagsgesellschaft Gas und Wasser mbH, Bonn

Thermophile Vergärung der Flüssigphase bei der Pelletierung von Landschaftspflegegrün

MARK GOLDENTHAL, PER LIND, PAUL SCHERER

1 Zusammenfassung

Das von der Bi.En GmbH & Co. KG entwickelte BtE®-Verfahren (Biomass-to-Energy) ist ein neues, effizientes Verfahren (70 % Energieausbeute) zur energetischen Verwertung von halmgutartiger Biomasse. Bei diesem Verfahren wird die halmgutartige Biomasse nach einer Konditionierung mit 250–300 l Flüssigkeit pro Tonne FM mechanisch in eine flüssige und eine feste Phase getrennt. Die nach der Separierung, mit mineralischen Pflanzeninhaltsstoffen, abgereicherte feste Phase wird mit der Wärme eines BHKW getrocknet und zu Pellets oder Briketts gepresst. Die flüssige Phase, mit einem hohen Anteil leicht vergärbare Pflanzeninhaltsstoffe, wird der Vergärung zur Erzeugung von Biogas zugeführt und das erzeugte Biogas in einem BHKW verstromt. Die Pilotanlage hat einen Durchsatz von derzeit max. 36 t_{FM}/d. Die Optimierung des Fermentationsverfahrens geschieht im Rahmen eines Forschungsprojektes mit der HAW Hamburg.

Gestartet wurde der 2.000-l-Reaktor mit einer Monomais-Trockenvergärungsanlage (55 °C), um diese mit 55 °C weiter zu betreiben. Die Beladungsrate (OLR) bewegte sich zwischen 4–13 kg_{oTS}/m³/d (mit Spitzen bei 16) und die Verweilzeit (HRT) zwischen 11 (Start) und 3 Tagen. Die spezifische Gasproduktion (GPR) betrug bis zu 0,7 m³/kg_{oTS}/d. Im mit Carriern gefüllten Fermenter stellte sich eine oTS von 2–4 % ein, wobei das Substrat des Grüngut-Presssafts 2–7 % oTS (inkl. gelöstes oTS) aufwies. Weiterhin wurden Spurenelemente hinzugesetzt, um insbesondere genügend Kobalt bereit zu stellen. Eine sehr hohe Stabilität zeigte sich in dem niedrigen Gesamtfettsäurewert von 200–600 ppm während der Fermentation. Die Gasausbeuten lagen in separaten Batchversuchen bei 387 ml_{Methan}/g_{oTS} bzw. bei 645 ml_{Biogas}/g_{oTS} mit 60 % Methangehalt (vorsiliertes Substrat). Eine Ammoniakhemmung konnte bisher nicht festgestellt werden (ca. 1.000–3.500 ppm NH₄ bzw. 300–1.000 ppm NH₃).

2 Betriebsanalytik zur Optimierung des Prozesses

Zur Prozessoptimierung in Richtung Belastungsgrenze, Restgaspotenzial und langfristige Betriebsstabilität werden verschiedene Methoden eingesetzt. Wöchentlich werden chemische Analyseparameter erhoben, wie das Fettsäuremuster inkl. Milchsäure, Alkohole, 15 Mikro- und Makroelemente, TS, oTS (fest und gelöst), FOS/TAC, Ammonium/Ammoniak, Phosphat, pH, CH₄, CO₂ sowie eine mikroskopische Zellzählung von Methan-

bildnern und Begleitbakterien. Hierdurch sind Rückschlüsse darauf möglich, wie effizient und stabil die Anlage fährt. Es wurden ferner Hygienekeime wie Enterokokken und coliforme Bakterien sowie die Hygienisierung auf Jakobskreuzkraut-Samen untersucht.

3 Aussicht und Potenzial

Das BtE®-Verfahren stellt wenig Anforderungen an die Qualität der Substrate. Die durch das BtE®-Verfahren in fester Form vorliegende Energie ist als Pellets lagerfähig. Sie kann flexibel und bedarfsabhängig in handelsüblichen Verbrennungsanlagen eingesetzt werden. Unter Berücksichtigung von Verlusten bei der Silierung, der Konditionierung und des Eigenbedarfs an Strom und Wärme, kann bis zu 70 % des Energieinhaltes der Biomasse als Nutzenergie zur Verfügung gestellt werden. Für die günstige Energiebilanz trägt die extern nutzbare Überschusswärme des BHKW bei, da der Eigenenergiebedarf bei thermophilen Biogasfermentern, wegen der kurzen Verweilzeiten, deutlich geringer ist als bei einem mesophilen Fermenter. Gleichzeitig erreicht man eine weitgehende Hygienisierung.

4 Verlauf des Fermentationsprozesses

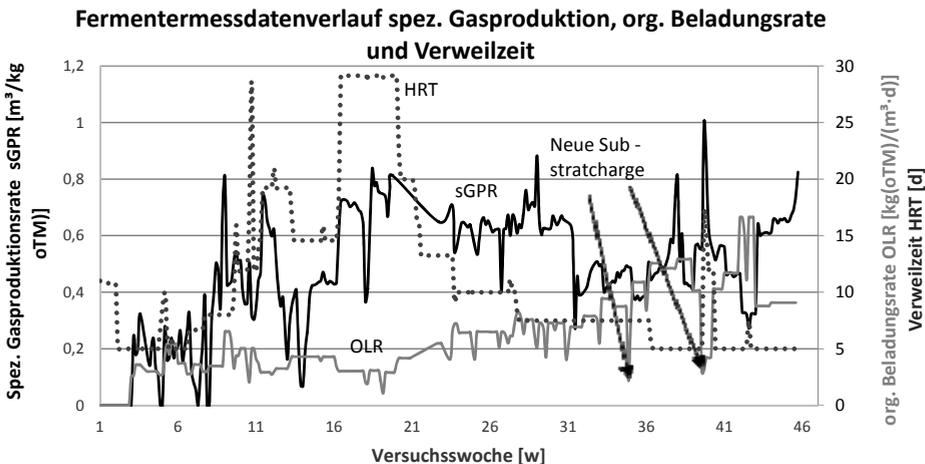


Abb. 1: Original-Fermentermessdaten von 46 Versuchswochen des 2 m³ Pilot- und Demonstrationsfermenters der Bi.En GmbH & Co. KG auf dem Gelände der Abfallwirtschaft Rendsburg-Eckernförde in Borgstedt. Davor gab es eine lediglich 3-wöchige Anlaufphase beim Aufbau der Anlage. Negativ-Peaks zeigen technische Änderungen an der Versuchsanlage an.

Optimierung des Rührprozesses in Biogasfermentern

MICHAEL EHRENTRAUT, SVEN ANNAS, SEBASTIAN BARTSCHER, TORSTEN KROHNER,
HANS-ARNO JANTZEN, JÜRGEN SCHOLZ, CHRISTOF WETTER, PETER GLÖSEKÖTTER

1 Einleitung

In Biogasfermentern werden elektrisch betriebene Rührsysteme eingesetzt, um den Fermenterinhalt zu durchmischen und damit für homogene Konzentrationen der Komponenten zu sorgen. Für das Rühren wird mit 7–15 % einer der größten Anteile des Eigenstrombedarfs einer Biogasanlage benötigt. Ziel des Projektes ist die Erarbeitung einer belastbaren CFD¹-gestützten Entwicklungsmethodik, deren Berechnungsergebnisse durch den Einsatz einer neuen Messtechnik quantitativ überprüfbar werden sollen. Zu diesem Zweck soll ein an die Anwendung angepasstes Wireless Sensor Network (WSN)-System entwickelt und eingesetzt werden.

2 Methodik

2.1 Rheometrie

Eine besondere Schwierigkeit liegt in der Materialcharakterisierung des gerührten, pseudoplastischen Mediums mit Fließgrenze, die der Auslegung des Rührprozesses zugrunde liegt und als Randbedingung für die CFD-Simulation benötigt wird. Aufgrund der vielen Einflussfaktoren (Zusammensetzung, TS-Gehalt, Partikelgröße, Temperatur, Faserlänge etc.) des Gärsubstrates kann hierbei nicht auf Daten aus der Literatur zurückgegriffen werden. Experimentelle Untersuchungen sind erforderlich. Rheometer mit rotierenden Elementen (Spalt- und Kugelviskosimeter, Viskosimeter mit Scheiben- oder Blattrührern) weisen eine Reihe von Nachteilen auf, weswegen der Fokus der Voruntersuchungen auf ein Rohrviskosimeter gelegt wird. Somit können die spezifischen Materialkennwerte wie Fließindex und Konsistenzfaktor experimentell ermittelt werden. Simulative Voruntersuchungen zur benötigten Einlauflänge der laminaren Rohrstrecke unter Verwendung eines pseudoplastischen Modellmediums zeigen, dass diese bei Gärsubstraten im Vergleich zu Newton'schen Medien erheblich kürzer ausgeführt werden darf.

¹ CFD = computational fluid dynamics.

2.2 Sensorik

Zur Bestimmung der Geschwindigkeiten der Oberflächenströmung ist ein Ultra Wide Band-System in Vorbereitung. Zusätzlich werden bildverarbeitende Verfahren zur Bestimmung der Strömungsgeschwindigkeit genutzt.

2.3 Simulationsmodelle

Die für Simulationen der rotierenden Systeme zur Verfügung stehenden Verfahren weisen einen unterschiedlich hohen Modellierungsgrad und damit stark variierende Rechenzeiten auf. Das Sliding Mesh (SM)-Modell löst die Rotation durch ein bewegtes Rechengitter auf, während das Multiple Reference Frame (MRF)-Modell die Navier-Stokes-Gleichungen auf einem stationären Gitter in einem bewegten Bezugssystem löst. Numerische Voruntersuchungen eines HYDROMIXER-Rührwerks der Firma Steverding² im Originalmaßstab mit pseudoplastischem Modellmedium zeigen unterschiedliche Ergebnisse für die SM- und MRF-Modellierung (s. Abb. 1).

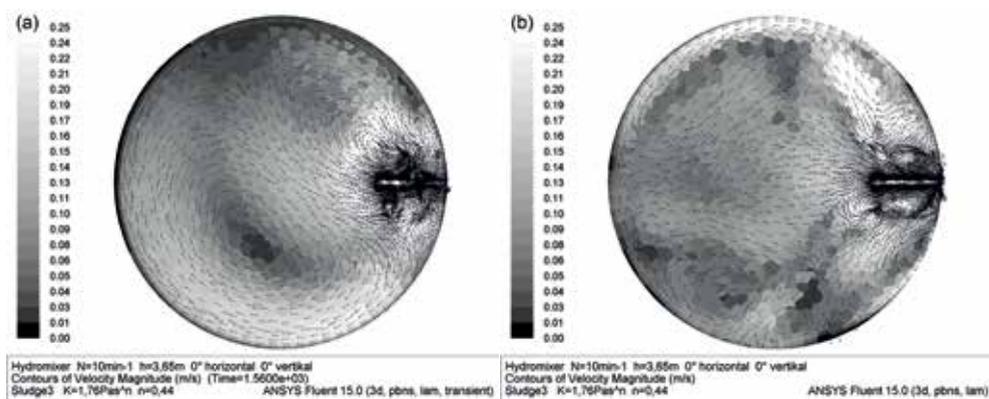


Abb. 1: Simulative Geschwindigkeitsfelder (Fermenterdurchmesser: 24 m, Füllhöhe: 6 m) auf Höhe der Mittelachse des Rührwerks HYDROMIXER nach (a) SM- und (b) MRF-Modell

2.4 Scale-up

Im Bereich Scale-up werden zunächst Versuche an zwei Modellfermentern durchgeführt, um Kriterien für eine Maßstabübertragung zu ermitteln. Hierbei handelt es sich um zwei zum Original geometrisch ähnliche Modellfermenter im Maßstab 1:12 und 1:48. Ziel dabei ist es, die Durchmischung im kleinen Maßstab zu untersuchen und auf den Originalfermenter zu übertragen. Die Versuchsergebnisse werden zur Validierung der neuen Messtechnik und der CFD-gestützten Entwicklungsmethodik eingesetzt.

² Stefan Steverding Rührwerkstechnik GmbH, Stadtlonn.

Optimierung der fermenterinternen biologischen Biogasentschwefelung

UTA BREUER, ANJA SCHREIBER, GERD-RAINER VOLLMER, NICOLE BÄGER

1 Einleitung und Hintergrund

Im Zusammenhang mit den gegenwärtig weiter steigenden Rohstoffpreisen wird die energetische Effizienz von Biogasanlagen zum exponierten Wirtschaftsfaktor. Diese wird im Wesentlichen durch die Biogas- bzw. Methanproduktion (Biogasproduktion aus dem Substratangebot an organischer Substanz) sowie durch die Auslastung der Blockheizkraftwerke (BHKW) bestimmt. Maßstab für die Auslastung des BHKW sind die Jahresbetriebsstunden, die wiederum wesentlich durch die Häufigkeit des Ölwechsels determiniert werden. Häufige Ölwechsel führen zu empfindlichen wirtschaftlichen Einbußen. Für eine möglichst lange Nutzungszeit der Motoröle muss daher der Schwefelwasserstoffgehalt im Biogas dauerhaft niedrig gehalten werden.

Von den gegenwärtig etwa 8.000 Biogasanlagen in Deutschland arbeitet die überwiegende Zahl mit einer internen biologischen Entschwefelung. Die Entschwefelung mittels Luftzufuhr in den Fermenter ist unter den derzeit am Markt verfügbaren Entschwefelungstechnologien mit Abstand am kostengünstigsten. Jedoch ist eine betriebssichere Entschwefelung auf ca. 200 ppm H₂S im Biogas nicht immer zu erreichen, da das Verfahren temporären Schwankungen unterliegt (z. B. durch Änderungen in der Substratzufuhr und das Unterrühren der Schwimmdecke im Nachgärer).

Die Immobilisierung von speziellen fadenförmigen Sulfurikanten im Gasraum der Biogasanlage soll das Verfahren der internen Biogasentschwefelung optimieren und die Effektivität deutlich steigern. In einem im Grundlagenbereich angesiedeltem Forschungsvorhaben der Hochschule Nordhausen (gefördert durch das TMBWK) konnten im Zeitraum 2008/2010 die Sulfurikanten *Beggiatoa alba* und *Thiothrix nivea* als potente Schwefelwasserstoffoxidanten ermittelt werden. Das aktuell in der Durchführung befindliche und von der Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. geförderte Forschungsvorhaben greift diese Ergebnisse auf und führt weitergehende Untersuchungen durch, die genaue Aussagen zur Effizienzsteigerung der Biogasentschwefelung durch den Einsatz der genannten Zielsulfurikanten sowie Immobilisierungslösungen liefern.

2 Untersuchungsprogramm und erste Ergebnisse

Die über die Deutsche Sammlung für Mikroorganismen und Zellkulturen GmbH (DSMZ) beschafften Reinkulturen *Beggiatoa alba* und *Thiothrix nivea* werden, entsprechend des Ziels der Adaption auf die Bedingungen im Gasraum einer Biogasanlage, auf ihr Wachstum bei unterschiedlicher Nährstoffversorgung und unterschiedlichen Temperaturbedingungen untersucht und angepasst. Darüber hinaus erfolgt die Untersuchung des Adaptionsverhaltens auf verschiedenen Immobilisierungsträgern sowohl im Labor als auch im Gasraum einer 1m³-Versuchsbiogasanlage. Die Kontrolle der Überlebensfähigkeit und der Aktivität der Sulfurikanten erfolgt zunächst im Labor auf speziellen Nährlösungen. Die gentechnische Identifikation der Zielsulfurikanten in einem Bakteriengemisch, bestehend aus den Zielsulfurikanten und der autochthonen im Gasraum der Versuchsbiogasanlage vorhandenen Bakterienflora, erfolgt durch die Ableitung von 16S rRNA-Primern und dem PCR-Nachweis der Sulfurikanten.

Im Ergebnis der ersten Untersuchungen konnte eine molekularbiologische Methode zur Kontrolle des Vorhandenseins und zum Nachweis der Zielsulfurikanten in der bakteriellen Gemeinschaft im Gasraum der Versuchsbiogasanlage entwickelt werden. Als Immobilisierungsträger zeigten sich unterschiedliche Materialien, wie Kunststoffe und Gewebe, als auch ein Schlauchsystem als geeignet. Das im vorangegangenen Forschungsvorhaben ermittelte Potenzial der Zielsulfurikanten konnte in Laborreaktoren erneut nachgewiesen werden.

3 Chancen und Perspektiven

Die Entwicklung eines internen Entschwefelungsverfahrens für Biogasanlagen mit einer erhöhten Entschwefelungsleistung durch bisher in der Praxis im Gasraum des Fermenters/Nachgärers noch nicht eingesetzte Schwefelbakterien, die sich bereits in vorherigen Untersuchungen als potentiell geeignet erwiesen, kann maßgeblich zur Wirtschaftlichkeit von Biogasanlagen beitragen. Die im Vorhaben gewonnenen Ergebnisse sind in der Praxis unmittelbar nutzbar. Die Überimpfung in Reaktoren, die sich in Betrieb befinden als auch der Einbau von Immobilisierungsvorrichtungen sind möglich. Weitere Ergebnisse werden präsentiert.

Gefördert durch: Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL)
Projekträger: Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR)

Untersuchungen zur Wirkung von Eisenhydroxid-basierten Produkten bei der Entschwefelung von Biogasanlagen

SABINE RAHN, DETLEF GÜSSBACHER, EVGENIJ MARCENKO

1 Einleitung und Stand der Technik

Neben der biologischen Entschwefelung hat die chemische Entschwefelung mittels eisenbasierter Reaktionsmittel die weiteste Verbreitung erfahren. Von größter Bedeutung ist dabei die Gruppe der Eisenhydroxide. Den wenigsten Anwendern ist bekannt, dass sich hinter der Bezeichnung „Eisenhydroxid“ eine Gruppe von Stoffen verbirgt, die sich aus Eisen(III)-Oxid mit unterschiedlichem Wasseranteil ableitet. Oft liegen verschiedene Bindungsformen gleichzeitig vor. Das zur Entschwefelung eingesetzte Eisenhydroxid kommt aus unterschiedlichen Industriezweigen. Aufgrund seiner besonders guten Reaktivität stammt es überwiegend aus Prozessen der Wasseraufbereitung. Aber auch Produkte aus der industriellen Herstellung, dem Bergbau oder der Metallindustrie finden heute Anwendung. Obwohl sich alle verwendeten Eisenhydroxide in ihren physikalischen und chemischen Eigenschaften unterscheiden, ist der Eisengehalt im Produkt bisher das alleinige Qualitätskriterium. Auch anlagenspezifische Rahmenbedingungen, wie z.B. Verweilzeit, finden bisher keine Berücksichtigung. Soll die Effizienz der chemischen Entschwefelung verbessert werden, müssen weitere Eigenschaften beschrieben werden, die einen Einfluss auf die Umsetzungsgeschwindigkeit mit Schwefelwasserstoff (H_2S) (Start und Dauer der Reaktion) haben.

2 Ergebnisse

Anhand von umfangreichen Untersuchungen konnten weitere physikalische und chemische Eigenschaften benannt und gewichtet werden, die neben dem Eisengehalt die Effizienz eisenhydroxidbasierter Produkte hinsichtlich ihrer Umsetzungsgeschwindigkeit mit H_2S bestimmen. Zu den wichtigsten gehören der Kristallisationsgrad (Struktur), die Herkunft, das Alter und die spezifische Oberfläche der Produkte (Tab. 1).

Tab. 1: Bedeutung der Einflussfaktoren für die Umsetzungsgeschwindigkeit

Einflussfaktor	Start der Reaktion	Dauer der Reaktion
Kristallisationsgrad	XXX	XXX
Spezifische Oberfläche	XX	X
Herkunft	XXX	XX
Alter	X	0

XXX – große Bedeutung; XX – mittlere Bedeutung; X – geringe Bedeutung; 0 – keine Bedeutung.

2.1 Kristallisationsgrad (Struktur) und spezifische Oberfläche

Grad und Umfang der Kristallisation bestimmen maßgeblich die Umsetzungsgeschwindigkeit mit H_2S . Je nachdem wie das Eisenhydroxid entstanden ist, liegt es in amorphen und/oder kristallinen Strukturen vor. Kristalline Strukturen weisen eine strenge regelmäßige Anordnung auf. In amorphen oder auch ungeordneten Strukturen sind die Moleküle deutlich weniger dicht gepackt und unregelmäßig angeordnet. Sie sind weniger stabil und verfügen aufgrund der vielen Hohlräume über eine größere spezifische Oberfläche und damit über eine schnellere Umsetzungsgeschwindigkeit mit H_2S . Mit zunehmendem Anteil an kristallinen Strukturen im Produkt verzögert sich die Umsetzungsgeschwindigkeit, anfangs nur der Beginn der Reaktion, ab $\geq 50\%$ kristallinem Anteil auch die Dauer der Reaktion. Es konnte weiter festgestellt werden, dass diese Beziehung nicht linearer Art ist.

2.2 Herkunft und Alter

Wie stark der Kristallisationsgrad ist, richtet sich nach Herkunft, Alter und Aufbereitungsgrad. Produkte aus der Wasseraufbereitung weisen in der Regel etwas geringere Eisengehalte auf als Produkte aus der Metallindustrie oder dem Bergbau. Sie bestehen überwiegend aus amorphen Strukturen und verfügen in der Folge über eine bessere Umsetzungsgeschwindigkeit. Produkte aus dem Bergbau oder der Metallindustrie besitzen oft einen Eisengehalt von $\geq 50\%$ und setzen sich überwiegend aus kristallinen Strukturen zusammen. Dementsprechend langsamer ist auch deren Umsetzungsgeschwindigkeit. Mit zunehmendem Alter der Produkte kommt es zu einer Verlagerung von amorph in Richtung kristallin.

3 Anwendung in der Praxis

Anhand der Untersuchungsergebnisse ist es nun möglich, die Effizienz unterschiedlicher Eisenhydroxide besser und genauer zu beschreiben. Unter Berücksichtigung der Anlagenführung können jetzt maßgeschneiderte Rezepturen für die Entschwefelung erstellt werden. Je nach Verweilzeit werden rein amorphe oder Kombinationen aus amorphen und kristallinen Strukturen empfohlen.

Literatur

- Marcenko, E. (2015): Untersuchungen zur Wirkung von Eisenhydroxid – basierten Produkten bei der Entschwefelung von Biogasanlagen, Bachelorarbeit FH Münster
- Rahn, S.; Güßbacher, D.; Marcenko, E. (2015): Untersuchungen zur Wirkung und Optimierung von Eisenpräparaten zur Entschwefelung von Biogas, Innovationskongress Osnabrück

Untersuchungen zur Beladungsrate mit Schwefelwasserstoff (H₂S) von Eisenhydroxid basierten Gasreinigungsmassen im Vergleich zu Aktivkohle in Abhängigkeit von der relativen Gasfeuchte

CHRISTOPHER OTTO, SINA BALKE

1 Einleitung

Die Entschwefelung von Bio- und Klärgasen ist ein notwendiger Prozessschritt, um nachgelagerte Aggregate wie Gaswärmetauscher, Verbrennungskraftmaschinen (BHKW) und Oxidationskatalysatoren vor Korrosion zu schützen. Dabei ist die nachgelagerte Feinentschwefelung mittels Adsorbentien eine Technik, mit der Reingaswerte von bis zu 0 ppm H₂S erreicht werden können. Um diese Technik möglichst kosteneffizient betreiben zu können, ist es notwendig, die optimalen Prozessbedingungen des verwendeten Filtermediums zu kennen. Ein wichtiger Parameter hierbei ist die relative Gasfeuchte. Mit Hilfe einer kleintechnischen Versuchsanlage wurde die Abhängigkeit der Beladungsrate an Schwefelwasserstoff bei verschiedenen Eisenhydroxid basierten Gasreinigungsmassen im Vergleich zu einer Aktivkohle unter den Bedingungen unterschiedlicher Gasfeuchten untersucht.

2 Versuchsaufbau

2.1 Verwendete Geräte und Chemikalien

Der Aufbau der Versuchsanlage wird anhand des R&I-Schemas dargestellt.

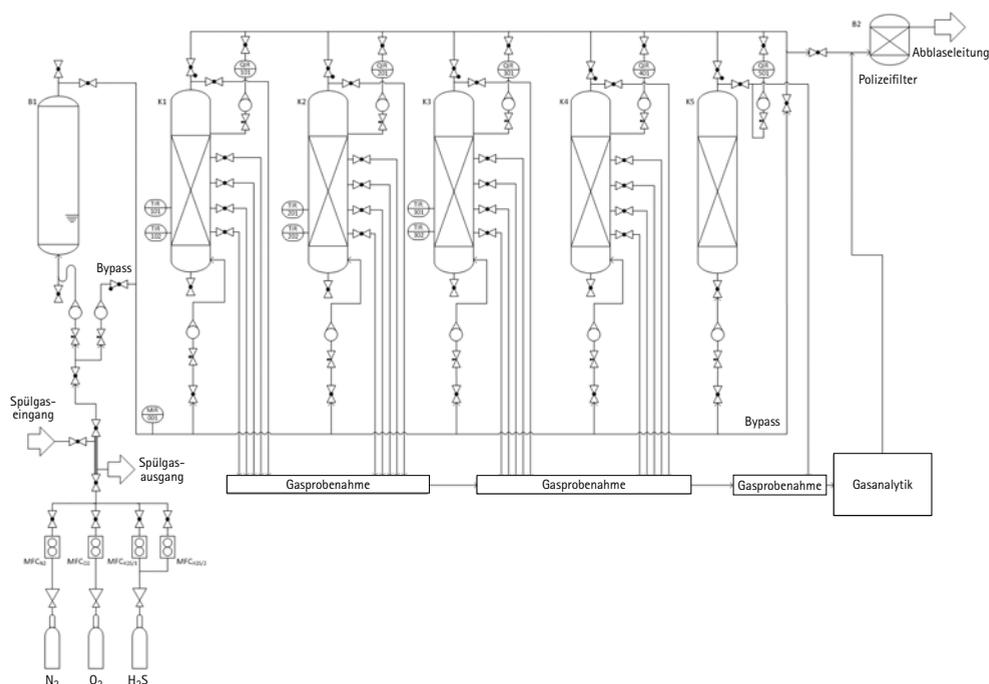


Abb. 1: R&E-Schema der kleintechnischen Versuchsanlage

2.2 Charakteristik der verwendeten Gasreinigungsmassen

Tab. 1: Untersuchte Eigenschaften der Gasreinigungsmassen

Untersuchungsprodukt	Kornspektrum mm	Ø TS-Gehalt %	Eisengehalt bezogen auf TS %	Ø BET-Fläche m ² /g _{TS}
Eisenhydroxid basierte Masse 1	2,5–3,15	88,32	19,19	82,210
Eisenhydroxid basierte Masse 2	2,5–3,15	87,76	34,14	161,504
Eisenhydroxid basierte Masse 3	2,5–3,15	87,53	21,87	85,031
Aktivkohle	4	81,40		770,230

2.3 Versuchsdurchführung

Ein definiertes Gasmischung aus Stickstoff mit 5.000 ppmv H₂S und 19.000 ppmv O₂ wurde über vier parallele Adsorberkolonnen mit gleichem Füllvolumen von 220 ml und einer Anströmgeschwindigkeit im Leerrohr von 3 cm/s geleitet. Ein Teil des Gases wurde vorher befeuchtet, um eine definierte relative Gasfeuchte des Gemisches zu erreichen. Hinter den Adsorbentensystemen zeichnete jeweils ein kalibriertes Messgerät die H₂S-Konzentration im Reingas auf. Als Abbruchkriterium des Beladungsversuchs wurde ein H₂S-Gehalt im Reingas von 1.000 ppmv festgelegt.

3 Ergebnisse

Abbildung 2 stellt die erreichten Beladungsraten pro cm^3 dar, womit die unterschiedlichen Schüttdichten der Adsorbentien berücksichtigt werden. Die verschiedenen Gasreinigungsmassen erreichen ihre höchste Beladung bei jeweils unterschiedlichen relativen Gasfeuchten. Somit stehen für unterschiedliche Gasfeuchten unterschiedliche Adsorbentien mit jeweils optimaler Beladungsrate zur Verfügung.

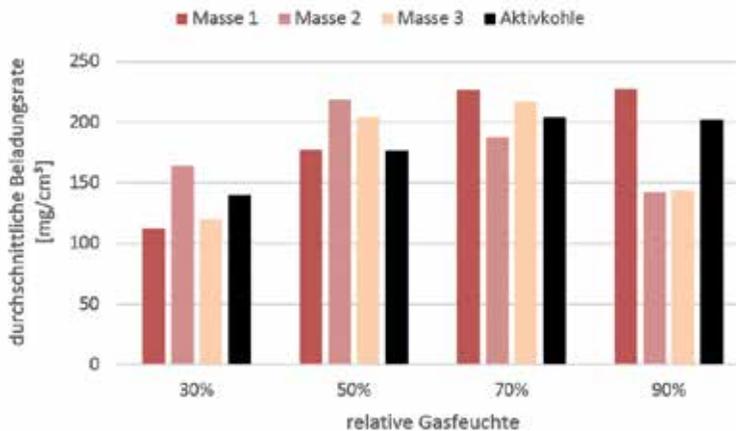


Abb. 2: Vergleich der Beladungsraten mit H_2S pro cm^3 in Abhängigkeit von der relativen Gasfeuchte

Optimierung der selektiven, externen Entschwefelung des unbehandelten Rohbiogases mit neuem Filtermaterial

WALTER HILGERT, HERBERT ZÖLSMANN

1 Der erfolgreiche Weg zu nachhaltiger Bioenergie

Die richtige Nutzung und Optimierung der verfahrenstechnischen Vorteile der Bioenergietechnik sind Grundvoraussetzung für die richtige Einordnung und deren gesellschaftlichen Bedeutung für den Energiemarkt.

Eine Verbesserung der Rentabilität von Biogasanlagen ist nicht nur als Reaktion auf ausbleibende Förderungen und politisch unklare Zukunftsaussichten notwendig – die Verbesserung der Rentabilität, insbesondere von landwirtschaftlichen Biogasanlagen, ist auch eine wichtige Frage der Wertschöpfungsqualität.

Ausgehend von diesen Gedankenansätzen steht heute für den Bereich Gaskonditionierung eine nachhaltige und rentable Entschwefelungstechnologie auf der Basis des bio-chemischen Filtermaterials UgnCleanPellets® S 3.5 zur Verfügung.

2 Bisheriger Stand der Biogaseschwefelung

Die meist verbreiteten Entschwefelungstechniken sind die interne (Grob-)Entschwefelung durch Lufteinblasung in den anaeroben(!) Fermenter bzw. durch Zugabe von Eisen-salzen oder/und die externe (Fein-)Entschwefelung mit Aktivkohle.

2.1 Nachteile der internen biologischen/chemischen Entschwefelung

Die interne Entschwefelung ist kurzfristig betrachtet eine kostengünstige Methode, um die H_2S -Frachten im Biogas zu reduzieren. Jedoch zeigen sich nach Laufzeiten von mehreren Jahren in vielen Fällen die kostenintensiven Nachteile dieser anfänglichen Investitions-einsparung, da im „gereinigten“ Biogas noch immer Schwefel frachten enthalten sind, die sowohl den Rohrleitungen, den Armaturen und vor allem dem Motor des BHKW mittel- und langfristig Schaden zufügen bzw. zusätzliche Maßnahmen und Kosten erfordern.

2.2 Nachteile der externen Entschwefelung mit Aktivkohle

Die bisher weitverbreitete H_2S -Eliminierung durch Entschwefelungskohle setzt ein gekühltes und somit getrocknetes und wieder erwärmtes Biogas voraus. D. h. die kostbare feucht-warme Energie des Biogases muss vernichtet werden, um Entschwefelungskohle überhaupt wirksam einsetzen zu können. Dies wiederum hat zur Folge, dass zusätzlich

Kühlenergie verbraucht wird. Das so gebildete Kondensat enthält schwefelsaure, aggressive Komponenten, die die Lebensdauer der Aggregate korrosionsbedingt begrenzen.

Aktivkohlen sind zwar ein vielseitig einsetzbares Mittel um Geruchsstoffe und gasförmige Störstoffe aller Art zu binden. Jedoch kann Aktivkohle eben nur die große Oberfläche und keine ausschließlich selektive Reaktion bieten. Eine kostenintensive Entsorgung als Abfallstoff ist in den meisten Fällen nicht zu vermeiden.

3 Neues Filtermaterial zur selektiven biochemischen H₂S-Entfernung im Biogas

Das neu entwickelte biochemische Filtermaterial UgnCleanPellets® S 3.5 auf Zellulosebasis nutzt die Energie des unbehandelten Biogases, statt sie zu vernichten. Dies funktioniert, indem die 100%ige relative Feuchte und die Wärme des Biogases für die kombinierte biologisch-chemische und vollständige Entschwefelung gewinnbringend angewendet statt verschwendet wird.

Weiterhin wird die interne und externe Oberfläche dieses Filtermaterials ausschließlich durch Schwefel genutzt, da das Verfahren selektiv nur Schwefelwasserstoff (statt auch vieler Begleitstoffe) aus dem Biogas entfernt und dadurch deutlich höhere Beladungskapazitäten erreicht.

Am Ende der Nutzungsdauer der UgnCleanPellets® steht der vorher als Schadstoff vorliegende Schwefel(-wasserstoff) als wertvoller Schwefeldünger zur Verfügung. Dies hat zwei weitere Vorteile – die Entsorgungskosten, wie im Falle der Aktivkohle, entfallen und die Entschwefelungskosten werden durch Verwendung des Entschwefelungsproduktes als Dünger und Bodenverbesserer signifikant gesenkt.

Tab. 1: Eigenschaften der drei unterschiedlichen Entschwefelungsmethoden auf einen Blick

	Interne Entschwefelung	Entschwefelung mit Aktivkohle	Entschwefelung mit UgnCleanPellets®
Ungestörte anaerobe, biologisch natürliche Vorgänge im Fermenter (max. Biomethan-gehalt)	--	+++	+++
Vermeidung von Korrosion im Fermenter und in nachgeschalteten Anlagenkomponenten	--	--	+++
Tatsächliche Entfernung von H ₂ S aus dem Fermenter	-	+++	+++
Nutzung der Energie des Biogases	+	---	+++
Verzicht auf Biogasaufbereitung	0	---	+
Gezielte H ₂ S-Entfernung	+/-	--	+++
Entschwefelungsgrad bis ~ 0 ppm	--	++	++
Nutzung des Schadstoffes H ₂ S als Wertstoff	+	---	+++

BIO-CO₂NCEPT – Eine kostengünstige Kleingasturbine zur dezentralen Stromerzeugung mittels Biogas

JAN MIHALYOVICS, ALEXANDER HEINRICH, DIETER PEITSCH

1 Einleitung

Im Rahmen eines 13 monatigen Forschungsprojektes wurde in Zusammenarbeit mit dem Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA) in São José dos Campos /Brasilien und der Technischen Universität Berlin der Prototyp einer kostengünstigen Kleingasturbine entwickelt. Diese besteht hauptsächlich aus weltweit verfügbaren Komponenten aus der Automobilindustrie und ist für die Verbrennung von Biogas konzeptioniert. Ziel war es im Rahmen einer Machbarkeitsstudie zu zeigen, dass weltweit verfügbare Abgasturbo-lader sowie Ersatzteile aus dem Lastkraftwagenmarkt genutzt werden können, um eine Kleingasturbine zur dezentralen Stromerzeugung herzustellen die insbesondere in Entwicklungs- und Schwellenländern genutzt werden kann. Die Bio-CO₂NCEPT genannte Kleingasturbine soll 22 kW Strom bei einem Wirkungsgrad von 25 % (rekuperiert) erzeugen und dabei wesentlich kostengünstiger sein als bereits am Markt bestehende Systeme.

Die Kleingasturbine weist eine ungewöhnliche Kreislaufanordnung auf, bei der die Lastabnahme vor dem Gasgenerator stattfindet. Diese Anordnung wurde mit Hilfe moderner Leistungsrechnungen untersucht und ein Model erstellt, das durch anstehende Testläufe noch zu validieren ist.

2 Aufbau der Kleingasturbine

Abbildung 1 zeigt die Vorderansicht der Kleingasturbine mit der Bezeichnung der einzelnen Komponenten. Abbildung 2 verdeutlicht zusätzlich die Strömungsführung. Simulationen haben gezeigt, dass insbesondere beim Start der Maschine die Gefahr besteht den Verdichter an seiner Leistungsgrenze zu betreiben. Um dem Entgegenzuwirken und das Hochfahren zu vereinfachen wurde ein Bypass vorgesehen, der die Strömung um die Leistungsturbine herum führt. Der Bypass bildet somit ein zusätzliches Instrument zur Regelung des Prototyps. Abbildung 3 zeigt ein vereinfachtes Maschinenschema für den Maschinenprototyp.

Bei der Brennkammer für den Prototyp handelt es sich um eine Topfbrennkammer, welche für die Verbrennung eines Biogases mit einem Mindestmethangehalt von 60 % optimiert ist. Mit Hilfe eines einfachen V-Bandflansches kann sie zu Wartungs- und Diagnosezwecken geöffnet werden. Die an der TU Berlin installierte Gasmischanlage erlaubt

die Untersuchung verschiedener Methankonfigurationen und kann somit Tagesschwankungen in der Methankonfiguration abbilden wie sie auch in der Natur vorkommen.

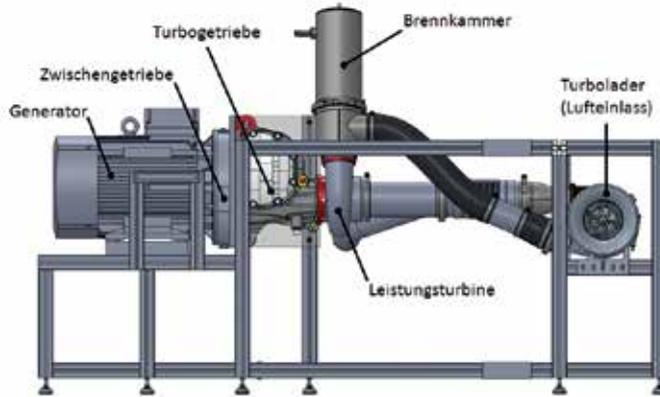


Abb. 1: Vorderansicht

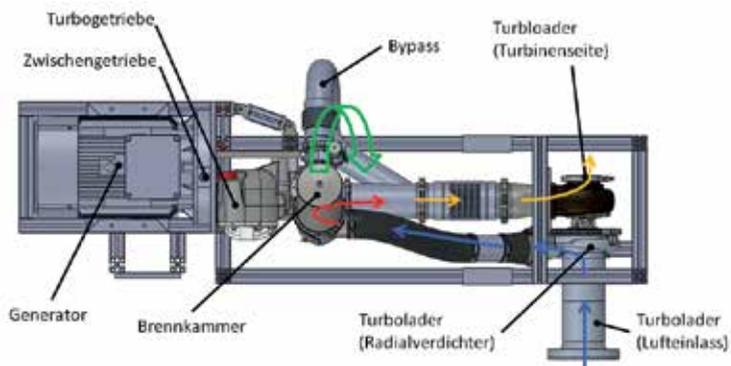


Abb. 2: Draufsicht mit Strömungsführung

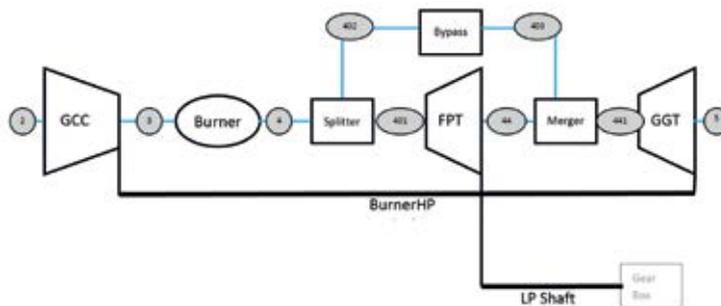


Abb. 3: Maschinenschema

Reduzierung der Stickstoffbelastung des Kreislaufwassers

REINHARD PÄTZ, REIK ELLMANN, ANDREAS WINKLER

1 Zielstellung

Das Recyclingwasser in Biogasanlagen, die vorwiegend mit pflanzlichen Substraten und Geflügelkot betrieben werden, enthält einen hohen Anteil an Ammoniumstickstoff. Bei Verwendung dieses Wassers als Anmischflüssigkeit kommt es zu einer Anreicherung dieser Stickstoffkomponente, das zu einer Produkthemmung der Aminosäureumwandlung zu Substraten und der Methanbildung führt. Durch Zwischenschaltung einer biologischen Stickstoffeliminierungsstufe soll dieser negative Einfluss reduziert werden.

2 Technischer Lösungsansatz

Bisherige Verfahren der biologischen Stickstoffelimination basieren auf der totalen Nitrifikation mit anschließender Denitrifikation; für hochbelastete Abwässer bevorzugt durch eine vorgeschaltete Denitrifikation (PÄTZ 1994). Der Energiebedarf für eine derartige Prozessführung ist hoch und würde so den Gewinn des Biogasprozesses schmälern. Seit einiger Zeit werden energiearme Verfahren mit speziellen Mikroorganismen untersucht, die nicht nur mit geringerem Sauerstoffaufwand, sondern auch mit weniger apparativem Aufwand betrieben werden (SCHMIDT 2003). Je nach technologischer Gestaltung sind das u. a. der ANAMMOX-Prozess, der SHARON-Prozess oder der CANON-Prozess (WESLOY 2004). Kennzeichen all dieser Prozesse ist, dass nur etwa die Hälfte des Ammoniumstickstoffs zu Nitrit oxidiert werden muss, um dann in einer mikrobiellen Disproportionierungsreaktion des Nitrits mit dem restlichen Ammoniumstickstoff molekularen Stickstoff zu bilden. Spezielle Mikroorganismen führen diesen Prozess durch. Deshalb müssen diese Mikroorganismen durch eine spezielle Adaptationsweise angezüchtet und angereichert werden.

In einem Projekt, gefördert von der Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen „Otto von Guericke“ e.V. (AiF), wurden erste grundlegende Untersuchungen durchgeführt. Diese wurden in einer kleintechnischen Versuchsanlage im Rahmen einer Bachelorarbeit unter Einsatz realer Gärreste einer Biogasanlage, mit Maissilage und Hühnerkot als Substrat, überprüft und verbessert.

3 Ergebnisse

Das wichtigste Ergebnis ist eine sukzessive Anreicherung einer speziellen mikrobiellen Population, die die Stickstoffdisproportionierung sicher und in einer der Anlage ange-

passten Produktivität realisiert. Die Mikroorganismen sind durch eine Rotfärbung gekennzeichnet (mikroskopisches Bild der adaptierten Mikroorganismen in Abbildung 1).

Durch die Teilreduzierung des Stickstoffgehaltes im Kreislaufwasser, konnte nicht nur eine Stabilisierung der Biogasproduktion nachgewiesen werden, sondern es kam zu einer Erhöhung des Methananteils im Biogas selbst. Das ist in Abbildung 2 dargestellt.

Im Rahmen der Forschungsarbeiten, besonders an der kleintechnischen Anlage unter realen Bedingungen, konnten außerdem wertvolle Erkenntnisse für die großtechnische Realisierung gewonnen werden. Insbesondere das Energiemanagement trägt entscheidend zu den positiven Ergebnissen bei.

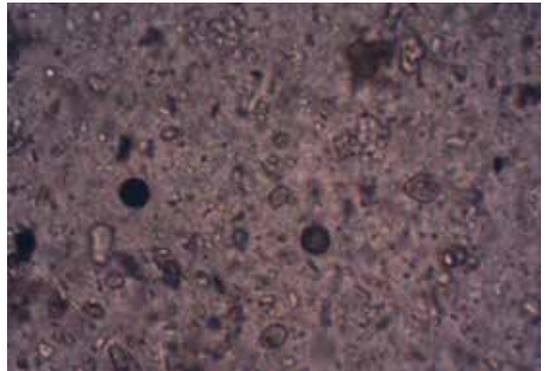


Abb. 1: Mikroskopisches Bild der angereicherten adaptierten Mikroorganismen mit typischer Rotfärbung

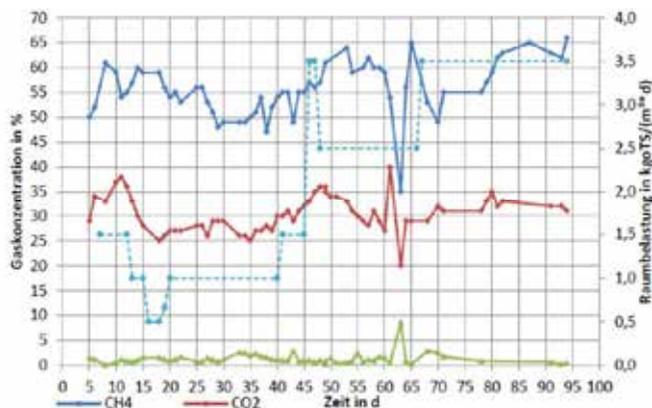


Abb. 2: Stabilisierung der Biogasbildung und Erhöhung des Methananteils durch Reduzierung der Stickstoffbelastung des Kreislaufwassers (Quelle: Winkler 2014)

Literatur

- Pätz, R.; Heppe, A. (1995): Hochleistungsbiologie zur Behandlung stickstoffhaltiger Abwässer. 7. Heiligenstädter Kolloquium, 7.11. bis 9.11. 1994; Tagungsband Heiligenstadt, pp. 207–214
- Schmidt, I. et al.: New concepts of microbial treatment processes for the nitrogen removal in wastewater, FEMS Microbiology Reviews 27, 2003, pp. 481–492
- Wesoly, I. (2004): Betriebsstrategien für den Anammox-Prozess in Sequencing Batch Reaktoren. Dissertation Universität Hannover
- Winkler, A. (2014): Verwertung stark stickstoffhaltiger Substrate für die Biogasgewinnung. Bachelorarbeit Hochschule Anhalt

Repowering Biogasanlagen Baden-Württemberg – Erarbeitung eines anlagenspezifischen Repowering Maßnahmenkataloges

JOSHUA GÜSEWELL, MARLIES HÄRDTLEIN, LUDGER ELTROP

1 Zielsetzung

Fast 75 % der Biogasanlagen in Baden-Württemberg (BW) sind seit 2009 oder früher in Betrieb (MLR 2014). Da viele Komponenten nicht auf die volle Laufzeit der 20-jährigen EEG-Förderung ausgelegt sind, besteht ein gezielter Modernisierungsbedarf, insbesondere auch dann wenn die Anlagen nachhaltig über den Förderzeitraum hinaus betrieben werden sollen. Daher wird untersucht, welche Optionen für ein Nach- und Umrüsten des Anlagenbestandes in BW bestehen und welche ökonomischen und ökologische Herausforderungen und Chancen sowohl auf Betriebs- als auch auf Energiesystemebene mit Repowering verbunden sind.

Das Projekt wird im Rahmen des Forschungsprogramms Bioökonomie Baden-Württemberg des Landes Baden-Württemberg gefördert und ist im Forschungsfeld „Nachhaltige und flexible Wertschöpfungsketten für Biogas in Baden-Württemberg“ angesiedelt.

2 Technisches Modell zur Analyse des Anlagenbestandes

Es wurde ein Modell in MATLAB entwickelt, das in die vier Hauptmodule Substrataufbereitung, Gasproduktion, Gasaufbereitung und Gasnutzung unterteilt ist. Den Modellrahmen (Abb. 1) bilden die Substrate frei Feld und die zur Verfügung gestellte Energie in Form von Strom, Wärme und Biomethan. In dem Modell kann jede Anlage im Bestand durch eine Konfiguration an gängigen Komponenten abgebildet werden. Anhand der genannten Grenzen erfolgt die Analyse der Anlageneffizienz und der Integration der Repowering-Maßnahmen.

Als primärer Dateninput dienen die EEG-Anlagenstammdaten und Bewegungsdaten. Zusätzlich werden im weiteren Verlauf georeferenzierte Daten wie Entfernungen zu Gas-

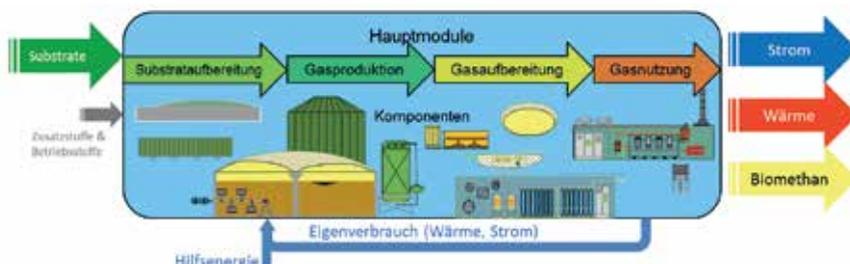


Abb. 1: Übersicht des technischen Biogasanlagen-Modells zur Repowering-Analyse

netzen und Wärmesenken implementiert. Um die Substratzusammensetzung und genaue Anlagenkonfiguration in BW herzuleiten, wird u.a. die Auswertungen der Betreiberumfrage BW des IERs genutzt (HÄRDLEIN et al. 2013).

3 Repowering-Maßnahmen

Repowering-Maßnahmen umfassen einerseits notwendige Ersatzmaßnahmen, bei denen Komponenten am Ende ihrer Lebenszeit ausgetauscht werden müssen (\approx Sowieso-Maßnahmen), wie z.B. Rührwerke. Da diese bis zu 50 % des Eigenstromverbrauchs verursachen, liegt hier auch ein Hebel für die Effizienzsteigerungen vor (LEMMER et al. 2012).

Andererseits umfasst das Repowering gezielte Optimierungsmaßnahmen, bei der das Grundkonzept der Anlage zunächst erhalten bleibt. Es werden Komponenten erweitert (z.B. neues BHKW für Flex-Betrieb), neue Komponenten integriert (z.B. Substrataufbereitung) oder die biologische Prozessführung optimiert. Dagegen wird bei Maßnahmen mit Veränderungen im Betriebskonzept die Anlage deutlich ausgebaut (z.B. Ausbau hin zu multivalenten Wärmenetzen), gänzlich verändert (z.B. Umrüstung zur Gasaufbereitung) oder umfangreiche Komponenten zugebaut (z.B. mittels Power-to-Gas-Konzepten). Diese Konzepte werden auch im Hinblick auf einen Weiterbetrieb über die EEG-Förderung hinaus entwickelt.

4 Ausblick

Die oben aufgeführten Maßnahmen werden hinsichtlich ihrer energetischen Effizienz, der Wirtschaftlichkeit sowie der ökologischen Auswirkungen (Emissionen und Ressourceneinsatz) für typische Anlagenkonfigurationen in BW analysiert. Für eine ganzheitliche Bewertung wird auch die Systemdienlichkeit (aktives Verhalten zur Stabilisierung und Flexibilisierung des Energiesystems) der Maßnahmen betrachtet. Auf dieser Grundlage wird ein anlagenspezifischer Maßnahmenkatalog erarbeitet, der auch vielversprechende Kombination und Ausbaupfade beinhaltet.

Literatur

- Härdtlein, M.; Eltrop, L.; Messner, J.; Dederer, M. (2013): Schwachstellen-Identifikation und Optimierungspotenziale von Biogasanlagen in Baden-Württemberg. Hg. v. Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung (IER). Universität Stuttgart; Staatliche Biogasberatung BW
- Lemma, A.; Nägele, H.-J.; Oechsner, H. (2012): Intensivmessprogramm BGA. Detaillierte Datenerhebung an der Biogasanlage „Unterer Lindenhof“. Hg. v. Bioenergieforschungsplattform Baden-Württemberg
- Ministerium für ländlichen Raum und Verbraucherschutz Baden-Württemberg (MLR) (Hg.) (2014): Entwicklung der Biogasanlagen in Baden-Württemberg sowie den Stadt-/Landkreisen. R. Mueller (LEL)

Flexible Biogasverstromung – Einfluss verschiedener Laststufen auf den elektrischen Wirkungsgrad und die Abgasemissionen

SIMON JUAN TAPPEN, MATHIAS EFFENBERGER

1 Aufgabenstellung und Vorgehensweise

Mit der letztjährigen Reform des Erneuerbare-Energien-Gesetzes wurde der Schwerpunkt bei der Biogasnutzung eindeutig weg vom quantitativen Ausbau der Erzeugungskapazität hin zur Bereitstellung von regelbarer Leistung gelegt. Daraus ergeben sich neue Anforderungen an die Blockheizkraftwerke (BHKW) durch einen ausgedehnteren Teillast- oder Intervall-/Start-Stopp-Betrieb.

In dieser Arbeit wird untersucht, wie sich solche Änderungen in der Betriebsweise von BHKW auf den elektrischen Wirkungsgrad und die Abgasemissionen auswirken. Zu diesem Zweck werden im Raum Bayern Vor-Ort-Messungen an verschiedenen BHKW-Aggregaten zur Biogasverwertung durchgeführt. In diesem Beitrag werden Ergebnisse zum Verhalten fünf verschiedener Biogas-Aggregate bei Volllast sowie bei 80 und 60 % Teillast vorgestellt. Es wurden folgende Parameter bestimmt:

- elektrischer Wirkungsgrad in Bezug auf die zugeführte Methanmenge;
- Konzentration an Kohlenmonoxid (CO), Stickoxid (NO_x) und Kohlenwasserstoffen (C_nH_m) im Abgas;
- Methanschlupf, berechnet aus der gemessenen C_nH_m -Fracht im Abgas und der zugeführten Methanmenge.

2 Ergebnisse

2.1 Zum elektrischen Wirkungsgrad

Die Tabelle 1 fasst die Ergebnisse zum elektrischen Wirkungsgrad bei Voll- und Teillastbetrieb für jeweils zwei Messtermine zusammen. Durch die weniger effektive Verbrennung im Teillastbereich sank der mechanische und damit auch der elektrische Wirkungsgrad bei allen gemessenen Aggregaten deutlich ab.

Anzumerken ist, dass jeweils zwischen der ersten und der zweiten Messung an dem 250 kW Gas-Otto-Motor und an der Mikrogasturbine eine Wartung vorgenommen wurde. Hieraus können die höheren Werte für den elektrischen Wirkungsgrad bei der zweiten Messung erklärt werden.

Tab. 1: Ermittelte elektrische Wirkungsgrade verschiedener BHKW-Aggregate bei unterschiedlicher Last

BHKW-Aggregat/ elektrische Nennleistung	Betriebsstunden zu Beginn der Messung		Elektrischer Wirkungsgrad [%]					
			Volllast		80 % Teillast		60 % Teillast	
	1. M.	2. M.	1. M.	2. M.	1. M.	2. M.	1. M.	2. M.
Gas-Otto (190 kW)	19.123	21.898	35,7	36,0	33,5	33,1	33,0	32,6
Gas-Otto (250 kW)	13.467	19.063	42,1	43,0	39,9	41,7	37,1	39,7
Gas-Otto (530 kW)	1.810	2.204	37,3	36,4	34,8	34,8	32,3	31,8
Zündstrahl (265 kW)	37.653	-	43,2	-	41,4	-	35,8	-
Mikrogasturbine mit Gasverdichter (65 kW)	5.256	7.701	23,2	23,6	22,0	22,5	18,6	18,8

1. M.: erste Messung, Mittelwert; 2. M.: zweite Messung, Mittelwert.

2.2 Zu den Abgasemissionen

Der Teillastbetrieb hatte unterschiedliche Wirkungen auf die untersuchten Abgaskomponenten: Während in den meisten Fällen im Teillastbereich die NO_x -Konzentrationen, aufgrund der kühleren Verbrennung, abnahmen, stieg die Konzentration an Kohlenwasserstoffen durch die weniger effiziente Verbrennung an. Da das Methan Hauptbestandteil der Kohlenwasserstoffe ist, stieg der Methanschluß parallel mit an. Drei von vier gemessenen Kolbenmotoren hielten im Volllastbetrieb die NO_x -Grenzwerte gemäß TA-Luft nicht ein. Im Abgas der Mikrogasturbine hingegen lagen die NO_x -Konzentrationen in allen Fällen unter dem Grenzwert. Die CO -Konzentrationen verhielten sich im Teillastbereich von Aggregat zu Aggregat unterschiedlich. Die Tabelle 2 zeigt beispielhaft die Messwerte für den 530 kW Gas-Otto-Motor.

Tab. 2: Gemessene Konzentrationswerte im Abgas des 530 kW Gas-Otto-Motors ohne Abgasnachbehandlung in unterschiedlichen Lastbereichen

Messung / Last	CO [mg m^{-3}]		NO_x [mg m^{-3}]		C_nH_m [mg m^{-3}]		Methanschluß [%]
	MW ¹⁾	Stabw ²⁾	MW	Stabw	MW	Stabw	MW
1. M. / Volllast	403	7	1.173	200	192	13	0,3
2. M. / Volllast	416	14	1.220	198	198	10	0,4
1. M. / 80 % Teillast	456	4	558	92	322	22	0,6
2. M. / 80 % Teillast	440	3	625	119	339	27	0,6
1. M. / 60 % Teillast	482	6	433	58	406	30	0,9
2. M. / 60 % Teillast	450	2	417	58	424	18	0,8

1. M.: erste Messung, Mittelwert; 2. M.: zweite Messung, Mittelwert; ¹⁾ Mittelwert. ²⁾ Standardabweichung.

Mit dem häufig verwendeten Oxidationskatalysator können CO und Formaldehyd weitgehend eliminiert werden, nicht jedoch Methan. Die thermische Nachverbrennung verringert die Kohlenwasserstoffkonzentration im Abgas um ca. 98,5 %. In weiteren Untersuchungen soll auch geklärt werden, wie sich ein Start-Stopp-Betrieb auf den Wirkungsgrad dieser Abgasreinigungseinrichtungen auswirkt.

Prozessstörungen in landwirtschaftlichen Biogasanlagen – Das Projekt BIOGAS-LIVE

SUSANNE THEUERL, MICHAEL KLOCKE

1 Das Motto

Das Projekt BIOGAS-LIVE (Förderung BMEL/FNR 22013913) ist ein Forschungsvorhaben, das sich explizit mit der zeitnahen Ursachenaufklärung von Prozessstörungen unter besonderer Berücksichtigung der Systemmikrobiologie in landwirtschaftlichen Biogasanlagen befasst. Das Motto dieses Projektes lautet: „Patient Biogasanlage – Symptome erkennen, Ursachen aufklären“.

2 Der Hintergrund

Biogasanlagen sind ein hoch sensibles biologisches System, in dem eine komplex interagierende Gemeinschaft verschiedenster Mikroorganismen organische Biomasse zu energiereichem Biogas umsetzt.

Zur Gewährleistung einer möglichst stabilen und effizienten Biogaserzeugung sind regelmäßige, verfahrenstechnisch-chemische Prozessüberwachungen heutzutage Standard (DROSG 2013). Was bislang jedoch noch fehlt, ist die Möglichkeit den „Gesundheitszustand“ der in einer Biogasanlage beheimateten Mikroorganismen zu erfassen.

Jüngste Forschungsarbeiten lieferten bereits erste Hinweise darauf, dass bestimmte Bakterienarten schon im Vorfeld von Prozessstörungen verstärkt auftreten (z. B. THEUERL und KLOCKE 2015). Basierend auf diesen Erkenntnissen soll nun im Rahmen des Projektes BIOGAS-LIVE intensiv daran gearbeitet werden, Mikroorganismen zu identifizieren, die als sichere Indikatoren für kurz bevorstehende Prozessstörungen – die sozusagen als „Krisen-Propheten“ - wirken können.

3 Die Herangehensweise

Da Störungen im Betriebs- bzw. Prozessablauf in landwirtschaftlichen Biogasanlagen nicht vorhergesagt werden können bzw. da Prozessstörungen aus ökonomischen Gründen verständlicherweise nicht gezielt herbeigeführt werden können, ist die grundlegende Herausforderung dieses Projektes die Spurensuche direkt zum richtigen Zeitpunkt am Ort des Geschehens, der Prozessstörung.

Eine enge Zusammenarbeit mit Anlagenbetreibern und Anlagen-beratenden Ingenieurbüros in Kombination mit einem störfall-orientierten Informationssystem zur

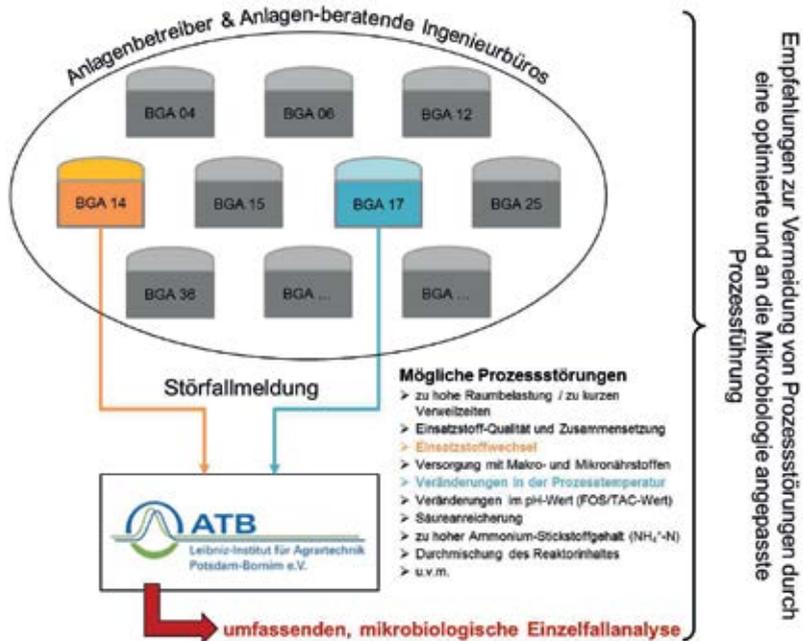


Abb. 1: Aufbau eines störfall-orientierten Informationssystems in enger Zusammenarbeit zwischen Anlagenbetreibern, anlagenberatende Ingenieurbüros und den Autoren zur Dokumentation und gezielten mikrobiologischen Einzelfall-Analyse von Prozessstörungen in landwirtschaftlichen Biogasanlagen.

zeitnahen Ursachenaufklärung von Prozessstörungen ist für die erfolgreiche Umsetzung des Projekts von entscheidender Bedeutung (Abb. 1).

Im Falle einer Prozessstörung erfolgt eine detaillierte Analyse der Struktur und zeitlichen Variation der mikrobiellen Gemeinschaft unter Verwendung modernster mikro- und molekularbiologischer Methoden. Ziel ist es, die „gestörte“ mikrobielle Biozönose von der „normalen/gesunden“ bzw. der wieder „genesenen“ Biozönose abzugrenzen und so Mikroorganismen zu identifizieren, die im Zusammenhang mit bevorstehenden Prozessstörungen/-instabilitäten stehen.

Literatur

- Drosg, B. (2013): Process monitoring in biogas plants. IEA Bioenergy Task 37 – Energy from Biogas
- Theuerl, S.; Klocke, M. (2015): Tatort Biogasanlage – mikrobiologische Kriminaltechnik. Biogas Journal, Ausgabe 4

Prozessinhibierungen bei der Monofermentation von Grassilage – Phenyllessigsäure als Indikatorsubstanz

CAROLA GRIEHL, FRANK LANGGUTH, SIMONE BIELER, GERD-RAINER VOLLMER

1 Einleitung und Zielstellung

In der BRD werden heute schon 30–40 % der Biogasanlagen mit Gras oder Grassilage als Cosubstrat (ca. 8 % Grassilageanteil am Gesamtsubstrat (DLG 2012)) betrieben. Eine Anteilssteigerung von Grassilagen bis hin zur Monofermentation ist aufgrund des hohen Stickstoffgehaltes der Grassilage bekanntermaßen problematisch.

Ziel unserer Untersuchungen war, die bei der Monovergärung von Grassilage zu Biogas auftretenden Prozessstörungen zu untersuchen und Möglichkeiten zum Ausschluss inhibierender Effekte aufzuzeigen.

2 Methoden und Durchführung

Die Versuche zur Mono- und Covergärung von Grassilage (T55) erfolgten in kontinuierlich betriebenen mesophilen 8 l-Laborfermentern mit entsprechender Mess- und Regelungstechnik. Prozessbegleitend wurde der Gehalt an flüchtigen Carbonsäuren mittels Headspace-GC bestimmt, die Detektion der aromatischen Carbonsäuren erfolgte mittels GC-MS.

3 Ergebnisse und Diskussion

Nach Etablierung eines einstufigen Abbauprozesses wurden Belastungssteigerungsversuche zur Ermittlung der maximalen Raumbelastung durchgeführt. Abbildung 1 zeigt die Biogasausbeuten bei der Mono- und Covergärung (40 % Grassilage, 60 % Maissilage) in Abhängigkeit von der Raumbelastung. Als Grenzbelastung bei einstufiger Prozessführung wurden 3,0 g oTS/(l·d) (Monovergärung Grassilage) bzw. 3,5 g oTS/(l·d) (Covergärung mit Maissilage) ermittelt. Durch Co-Fermentation mit Gülle (25 % Grassilage, 75 % Rindergülle) konnte das Problem des hohen Feststoffgehaltes gelöst und die Raumbelastung auf 4,0 g oTS/(l·d) angehoben werden.

Im Vergleich zur einstufigen Verfahrensführung konnte durch eine vorgeschaltete Hydrolysestufe (mesophil) die Effektivität des Grassilageabbaus bei geringen Raumbelastungen (2,5 g oTS/(l·d)) um knapp 11 % gesteigert werden. Bei Raumbelastungen > 3,5 g oTS/(l·d) wurde ein Anstieg der Propionsäurekonzentration detektiert (Abb. 2). Bereits bei einer Raumbelastung von 3,0 g oTS/(l·d) reicherte sich Phenyllessigsäure

an, die bereits in früheren Projekten bei der Vergärung von proteinreichen Substraten als Frühindikator von Hemmungen identifiziert wurde (GRIEHL und HECHT 2009, GRIEHL et al. 2010).

Für Grassilage wird insgesamt die Covergärung mit Gülle empfohlen. Mit etablierter Hydrolysestufe scheint auch eine Monovergärung umsetzbar.

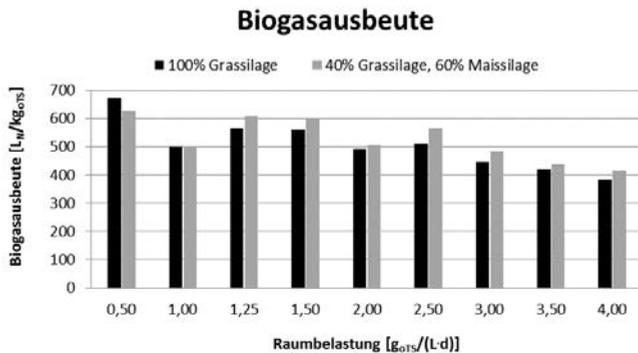


Abb. 1: Biogasausbeute von einstufiger Mono-/Covergärung bei steigender Raumbelastung

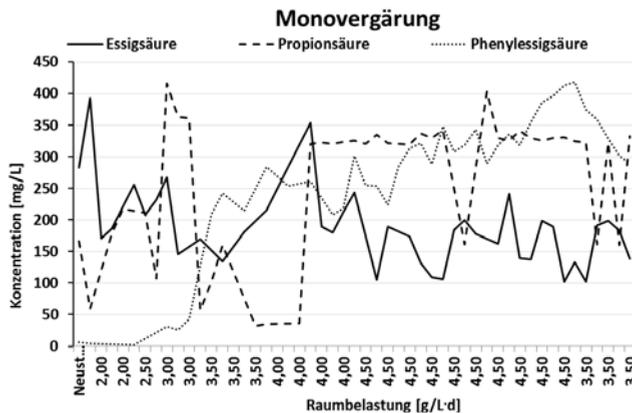


Abb. 2: Konzentration der Indikatorsäuren bei der zweistufigen Monovergärung

Literatur

DLG (Hrsg.) 2012: Biogas aus Gras; DLG-Merkblatt 386

Griehl, C.; Hecht, C.; Streuber, S.; Ganß, Y.; Kremp, H. (2010): Bestimmung von Phenyllessigsäure zur Früherkennung von Prozessstörungen in Biogasanlagen. Chem. Ing. Tech. 82, 12, 2223–2229

Hecht, C.; Griehl, C. (2009): Investigations on the accumulation of aromatic compounds during biogas production from kitchen wastes. Bioresour. Technol. 100, 654–658

Dynamische Simulation von Laborbiogasanlagen

KAREN FRONK, RENÉ SIMON, ANDREA HEILMANN

1 Einleitung

Die Überwachung wichtiger Prozessparameter ist aufgrund komplexer biologischer Prozesse, wenigen online messbaren Parametern und der Vielfalt eingesetzter Substrate schwierig. Aus diesem Grund können Störungen, z.B. durch den Mangel an Spurenelementen, nicht immer rechtzeitig erkannt werden.

Die Simulation von Biogasanlagen ermöglicht die Darstellung der wichtigsten Prozessparameter (Tab. 1), um den Prozesszustand beurteilen zu können. Als Simulationsgrundlage dienen das mathematische Modell ADM1 (anaerobic digestion model No. 1) und dessen Weiterentwicklungen: ADM1xp und ADM1xpd [1]–[3].

Diese Arbeit stellt einen wichtigen Teil des Promotionsvorhabens „Modellgestütztes Monitoring von Störungen der Prozessbiologie in Biogasanlagen“ dar: Grundlage der weiteren Modellierung, z.B. des Einflusses von Spurenelementen, ist der Nachweis, dass sich die Laborreaktoren durch Simulationsmodelle abbilden lassen.

2 Gärversuche

Die Gärversuche erfolgen an sechs Reaktoren mit einem Füllvolumen von jeweils 1,5 l, die in eine Kontrollreihe sowie zwei Versuchsreihen aufgeteilt sind. In den Versuchsreihen soll ein Mangel an Spurenelementen (Nickel, Kobalt, Molybdän und Eisen) hervorgerufen werden. Der Impfschlamm stammt aus einer Biogasanlage A (BGA A) mit Monovergärung von Maissilage. Die Laborreaktoren werden mit einem künstlichen Substrat (Nachbau Maissilage), gefüttert. Die Messung wichtiger Parameter und deren Messintervall ist in Tabelle 1 aufgelistet.

3 Modellierung

Die Modellierung des Versuchsaufbaus erfolgt mit dem Programm Simba#B [4] mit einem Skalierungsfaktor von 1000, für eine bessere Simulation durch das Modell.

In der Simulationssoftware ist die Modifikation ADM1xpd [4] implementiert.

In Abbildung 1 ist der Versuchsaufbau als Modell dargestellt. Das Impfmateriale aus der BGA A wird dem Laborreaktor zugeführt und mit Wasser vermischt. Die Substratzugabe erfolgt entsprechend den Fütterungsintervallen im Labor.

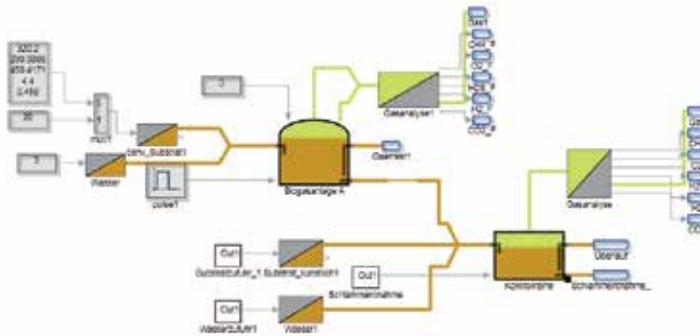


Abb. 1: Modellbild der Biogasanlage A und des Laborreaktors 1

4 Ergebnisse

Die ersten Ergebnisse zeigen, dass die Simulation des Laborreaktors prinzipiell möglich ist (Tab. 1). Die Simulationsdaten bilden die Einflüsse der Substratzugabe ab (Daten nicht gezeigt). Dabei sind die gemittelten Daten der Simulations- und Messdaten im Zeitraum vom 01.04.–01.06.2015 aufgeführt.

Tab. 1: Mittelwerte der Simulations- und Messdaten sowie die Messintervalle

Parameter	Mittelwert Simulation	Mittelwert Reaktoren	Messintervall Labor
pH [-]	7,34	7,37	wöchentlich
FOS/TAC [-]	1,56	2,78	wöchentlich
Gasmenge [m ³ /d]	755,37	886,57	online
Methangehalt [%]	53,87	52,97	online
N [kg/m ³]	3,19	2,01	monatlich
TS [%]	3,94	2,3	monatlich
CSB [kg/m ³]	50,50	24,33	monatlich

5 Zusammenfassung und Ausblick

Grundsätzlich sind die Abbildung der Labormessdaten und der Einfluss der Fütterungsintervalle mit Hilfe des Simulationsmodells möglich, sodass die Integration der Spurenelemente in die Modellierung auf der Basis der Ergebnisse der Laborreaktoren in Zukunft vorgenommen werden kann. Die Unterschiede zwischen den Mess- und Simulationsdaten resultieren u. a. aus der Einfahrphase des Simulationsmodells. Eine detailliertere Abbildung des Gärprozesses mit Hilfe von Simulation bietet eine Beobachtung und Prognose der Prozessstabilität.

Literatur

Die Literatur kann bei den Autoren angefordert werden.

Dynamische Simulation für den optimierten und flexiblen Betrieb von Biogasanlagen

INGOLF SEICK, RALF TSCHPETZKI

Mit der aus ökologischen und ökonomischen Gründen immer wichtiger werdenden Substratausnutzung und der angestrebten Flexibilisierung der Stromerzeugung von Biogasanlagen steigt der Bedarf an mathematischen Prozessmodellen zur Optimierung des Anlagenbetriebs. Für die Beschreibung der anaeroben Vergärung ist eine Vielzahl von Modellen verfügbar, die sich hinsichtlich Methodik und Komplexität z.T. grundsätzlich unterscheiden. Eine Variante des etablierten Modellansatzes ADM1 (IWA 2002) – das ADM1xpd (OGUREK et al. 2013) – wurde mit Blick auf den Einsatz von Mischsubstraten erstellt und eignet sich damit auch gut für die Modellierung landwirtschaftlicher Biogasanlagen.

Ausgehend von einem FuE-Kooperationsprojekt¹ wurde ein System zur modellbasierten Betriebsunterstützung für Biogasanlagen entwickelt (ifak 2015). Neben Analysen der biologischen Prozesse bzw. des Betriebszustandes und der Kosten ermöglicht das System ein frühzeitiges Erkennen kritischer Situationen und den Vergleich von Betriebsvarianten durch Prognosesimulationen. Grundlage dieses Werkzeugs ist ein Basissimulationssystem, welches durch flexible grafische Verschaltung und Parametrierung von Modellblöcken die Modellierung von Biogasanlagen mit dem o.g. Modellansatz ADM1xpd ermöglicht (ALEX et al. 2014). Die Anlagenmodelle erlauben die dynamische Simulation verschiedener Fütterungsmöglichkeiten (Substratart, -menge und -dosierung) sowie Betriebsweisen (z.B. Rezirkulation, Gärrestentnahmen, Umfahrungen Behälter).

Die Abbildung der Substrate ist ein wesentlicher Schritt für realistische Anwendungen von Berechnungsmodellen für Biogasanlagen. Dies gilt insbesondere für relativ komplexe und hinsichtlich ihrer Zusammensetzung u.U. stark variierende Substrate, wie z.B. nachwachsende Rohstoffe. Hierfür wurde eine entsprechende Systemkomponente implementiert. Eine weitere wichtige Voraussetzung für praktische Anwendungen von Simulationsmodellen zur Betriebsunterstützung von Biogasanlagen ist die Abbildung der Biogasspeicherung und der Biogasnutzung im BHKW. Hierfür wurde ein statisches, nicht-lineares BHKW-Modell mit lastabhängigem elektrischen Wirkungsgrad implementiert. Damit kann die Differenz der Gasproduktion der Gärbehälter (berechnet mit ADM1xpd) und des Gasbedarfs der BHKW ermittelt werden. Diese Vereinfachung erlaubt effektive Prognosesimulationen, insbesondere zur Optimierung der (bedarfsgerechten) Fütterung, wenn der Prognosehorizont deutlich über den möglichen Speicherzeiten des Biogases auf der Anlage liegt. Das System prognostiziert auch den Verlauf des Gasspeichervolumens.

¹ Gefördert durch: Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages

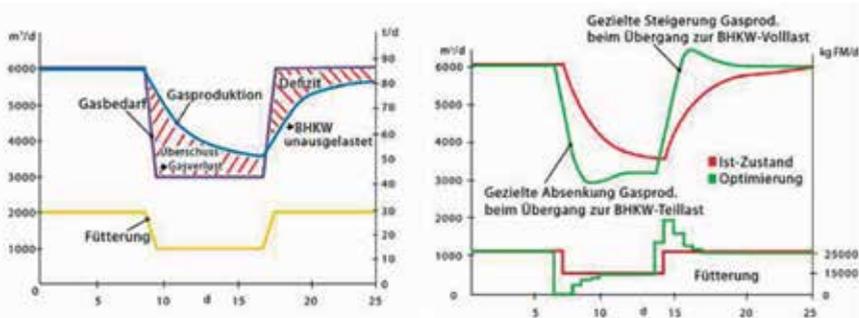


Abb. 1: Beispiel für die Anwendung des Simulationssystems

Jedoch ist dafür der Anfangszustand des Modells mit der Gasspeicherfüllstandsmessung abzugleichen, was eine ausreichende Messgenauigkeit erfordert.

In Abbildung 1 wird eine Anwendung des Simulationssystems auf einer typischen landwirtschaftlichen Biogasanlage mit etwa 25 t/d NawaRo-Fütterung sowie mesophiler Nassvergärung in einem Fermenter und einem Nachgärer sowie zwei BHKW mit je 250 KW_{el} gezeigt. Es wird davon ausgegangen, dass bei zeitweisem Stillstand eines BHKW der Gasbedarf auf 50 % sinkt. Wenn nun z.B. die Fütterung proportional reduziert wird, wäre ein nicht verwertbarer Überschuss die Folge. Das linke Bild zeigt die entsprechend abweichenden Verläufe der Gasproduktion der Gärbiologie (abhängig von der Fütterungsmenge) sowie des Gasbedarfs der BHKW. Beide Größen werden vom Simulationsmodell prognostiziert. Für einen optimalen Betrieb sollten Produktion und Bedarf weitgehend abgeglichen werden. Dies geschieht im Beispiel mit Hilfe der Simulation einer stufenweisen Anpassung der Tagesmengen der Fütterung (siehe rechtes Bild). Kleinere Abweichungen können vom Gasspeicher kompensiert werden. Die Auswirkung von Belastungssteigerungen auf die Stabilität der Prozessbiologie wird ebenfalls vom Modell berechnet und ist in diesem Beispiel unkritisch. Durch die optimierte Fütterung lässt sich der situationsbedingt maximale Gewinn erzielen.

Literatur

Alex, J.; Ogurek, M.; Schütze, M.: A novel simulation platform to test WWTP control options. 11th IWA conference on instrumentation control and automation, 18.-20. September 2013, Narbonne, France

ifak system GmbH: SIMBIA Professional. Software-System zur modellbasierten Betriebsunterstützung für Biogasanlagen. Magdeburg, 2015.

IWA (2002): Anaerobic Digestion Model No. 1. Scientific and Report No. 13, 1. Auflage, IWA Publishing, ISBN: 1-900222-78-7

Ogurek, M.; Seick, I.; Kujawski, O.; Alex, J.: Toward modeling of biogas plants in engineering practice. 11th IWA conference on instrumentation control and automation, 18.-20. September 2013, Narbonne, France

Vorort-Zustandsbeurteilung des Prozesses von Biogasanlagen mithilfe miniaturisierter Mittel-Infrarot-Spektrometer (MIRS)

MARCEL MAYER, GUNTHER PESTA

1 Grundlagen der IR-Spektroskopie

Jedes Molekül absorbiert je nach Molekülstruktur charakteristische Frequenzen der elektromagnetischen Strahlung und setzt diese in Molekülschwingungen um. Die absorbierten Frequenzen treten im Ergebnisspektrum als Absorptionsbanden auf. Abhängig vom Energiegehalt der verwendeten Strahlung werden verschiedene Schwingungsarten beim absorbierenden Molekül erzeugt. Im mittleren-infraroten Strahlungsbereich (2,5–50 μm) werden vor allem Absorptionsbanden infolge von Grundschiwingungen beobachtet, während bei der energiereicheren nah-infraroten Strahlung (0,8–2,5 μm) Ober- und Kombinationsschwingungen der Grundschiwingungen aus dem mittleren-infraroten Strahlungsbereich auftreten (GRÜNZLER und GREMLICH 2003). Die Intensität der Grundschiwingungsbanden ist dabei im Vergleich zu den Banden der Ober- und Kombinationsschwingungen um den Faktor 10 bis 100 größer (GRÜNZLER und GREMLICH 2003).

Tab. 1: Unterteilung des gesamten IR-Spektrums in drei Teilbereiche

Spektralbereich	Wellenlängen [μm]	Wellenzahl [$1/\text{cm}$]
Nahes Infrarot (NIR)	0,8–2,5	12.500–4.000
Mittleres Infrarot (MIR)	2,5–50	4.000–200
Fernes Infrarot (FIR)	50–1.000	200 –10

2 Vorstellung des IR-Sphinx ATR – Messtechnik

Zur Vermessung von Proben werden diese auf den ATR-Kristall aufgetragen und wechselwirken an der Grenzfläche zum ATR-Kristall mit der darin weitergeleiteten IR-Strahlung (COMLINE 2015). Dieser Vorgang ist schematisch in Abbildung 1 dargestellt.

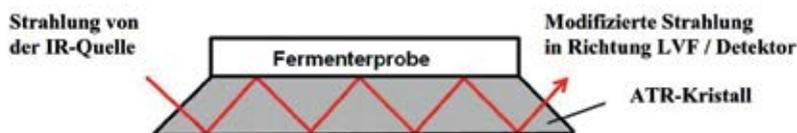


Abb. 1: Die von der IR-Quelle emittierte Strahlung wird durch den ATR-Kristall geleitet und wechselwirkt an der Grenzfläche zwischen ATR-Kristall und Probe mit den Inhaltsstoffen der Fermenterprobe. Die modifizierte Strahlung wird abschließend in Richtung Detektor weitergeleitet (Skoog und Leary 1996).

Die IR-Strahlung tritt dabei vor der Reflexion an der Grenzfläche wenige Mikrometer in das Probenmaterial ein, wird dort absorbiert, und erst danach in Richtung des ATR-Kristalls zurück reflektiert. Die Proben können so ohne jegliche Vorbehandlung direkt vermessen werden; selbst eine Filtration/Feststoffseparation ist nicht nötig.

Für die Biogasproduktion sind insbesondere folgende Parameter/Inhaltsstoffe von Bedeutung und mit dem MIRS analysierbar:

- Essigsäurekonzentration
- Propionsäurekonzentration
- Gesamtsäurekonzentration
- Ammonium-Stickstoff.

Mit der MIRS-Analytik werden vergleichbar gute Messergebnisse, wie mit der klassischen durchgeführten Gas-Chromatographie, erzielt. In Abbildung 2 sind exemplarisch die Messergebnisse für den Messparameter „Essigsäurekonzentration“ sowohl von der MIRS-Analytik, als auch von der Gas-Chromatographie dargestellt.

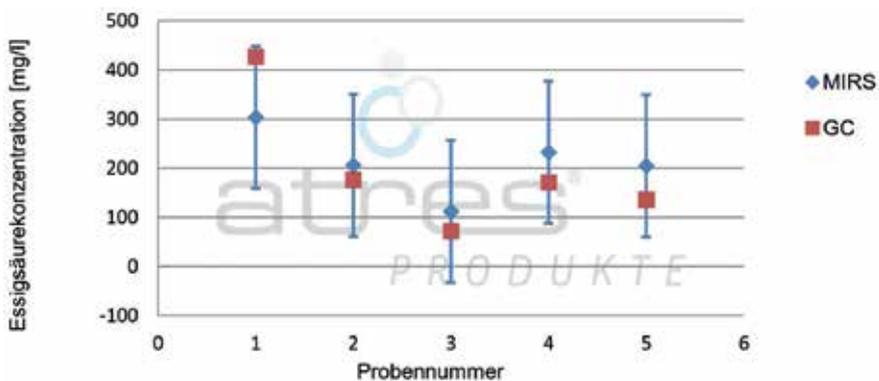


Abb. 2: Das Diagramm zeigt die Messergebnisse für den Messparameter „Essigsäurekonzentration“ von fünf Proben. Jede Probe wurde sowohl mit dem MIRS (blau), als auch mit der klassischen Gas-Chromatographie (GC, rot) vermessen. Angegeben ist das 1-Sigma-Fehlerintervall der MIRS-Analyse.

Literatur

Comline Elektronik Elektrotechnik GmbH (2015): IR-Sphinx ATR. Datenblatt
www.comline-elektronik.eu Datenblatt

Günzler, H.; Gremlich, H.-U. (2003): IR-Spektroskopie. WILEY-VCH Verlag, Weinheim, 4. Auflage

Skoog, D.A.; Leary J.J. (1996): Instrumentelle Analytik. Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg, 4. Auflage

Mikroskopisches Bildverfahren zur Bestimmung der Gasbildungsrate von Biogasanlagen

PAUL SCHERER, YONAS SHAIKH

1 Quantitativer, mikroskopischer Fingerabdruck: QMF

Es wird eine mikroskopische, halbautomatische Bildmethode vorgestellt, um die Zellzahl eines Bioreaktors zu bestimmen. Dabei macht man sich zunutze, dass die Methan bildenden Mikroorganismen im Fermenter einen charakteristischen und einzigartigen fluoreszierenden „Farbstoff“ in Form des an der Methanbildung beteiligten Faktors F420 besitzen. Werden methanbildende Zellen mit einem Licht der Wellenlänge von 420 nm blauviolett angestrahlt, so emittieren sie blaugrünes Licht von 470–500 nm. Erst bei gehemmten, geschädigten oder inaktiven methanbildenden Zellen sinkt das Leuchten der Fluoreszenz stark ab. Andere nicht-methanogene Mikroorganismen des Biomasseabbaus können durch eine Phasenkontrastmikroskopie oder eine Gegenfärbung mit SYBR Green differenziert werden.

Die Ergebnisse sollen zeigen, dass die Anzahl der Methanbildner linear mit der Gasbildungsrate und damit mit der Leistung eines Biogasreaktors korreliert. Somit kann umgekehrt auf die Leistung eines Biogasreaktors geschlossen werden.

Die digitale Bildanalyse von zweidimensionalen Bildern wurde quantitativ mit der klassischen dreidimensionalen Zählmethode in Zählkammern evaluiert. Mit selbst erstellten Software-Algorithmen können die Mikroorganismen in morphotypische Bildklassen differenziert werden. Dadurch ist ein quantitativer, mikroskopischer Fingerabdruck (QMF) zur parallelen Erfassung der mikrobiellen Diversität in einem Biogasreaktor möglich. Zusätzlich kann sowohl die methanogene Fluoreszenzintensität als auch deren flächenmäßige Ausdehnung in μm^2 eingerechnet werden. Doch auch ohne diese Zusatzauswertungen ergibt sich bereits eine sehr hohe lineare Korrelation zwischen der Zahl an Methanbildnern (in gewisser Weise auch der Gesamtzellzahl) und der Gasbildungsrate.

Auf der rechten Seite in Abbildung 1 ist zu erkennen, dass ein Futterrüben-Biogasreaktor im Optimum mit Zellzahlen von 10^9 Methanbildnern liegt, wobei er dann zwischen $4\text{--}5 \text{ m}^3_{\text{Biogas}}/\text{m}^3/\text{Tag}$ produziert. Ähnliche volumetrische Gasbildungsraten (vGPR) kann man auch in der Praxis mit thermophilen, gut durchmischten Hochleistungsgülleanlagen erzielen (z.B. Firma 4Biogas, Dortmund bzw. Bebra Biogas GmbH, Dortmund; s. FNR Projekt FKZ 22011710 mit Güllebiogasanlage in Seth).

Eine lineare Regressionsgerade mit R^2 von 0,99 (extrem hoher Wert) wurde ferner mit einer 1 m^3 Biogasanlage ($37 \text{ }^\circ\text{C}$) und teilweiser Rezirkulation des Outputs über einen Zeitraum von mehr als 500 Tagen erhalten (hier nicht grafisch dargestellt). Das Sub-

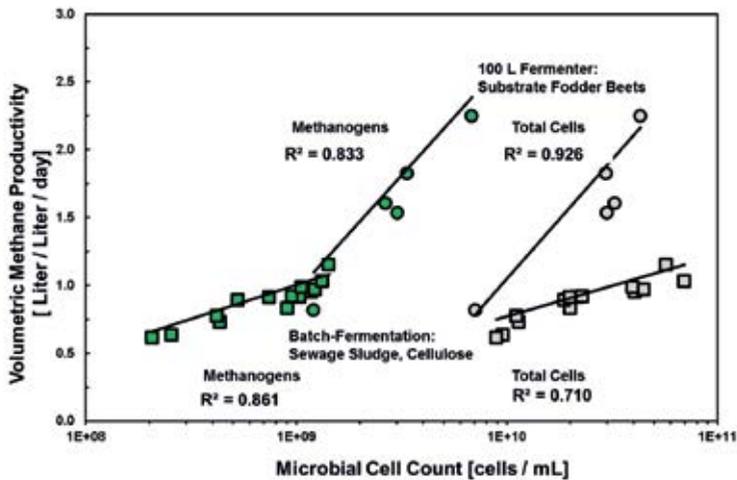


Abb. 1: Bestimmtheitsmaß der Streuung (Korrelationsquotient im Quadrat) zwischen volumetrischer Gasbildungsrate und Zellzahlen; zum einen im 1 l Batch-System mit Reinstcellulose als Modellsubstrat (mesophil, 41 °C), zum anderen in einem kontinuierlich betriebenen 100 l Fermenter mit Futterrübensilage als Substrat (mesophil, 41 °C) und einer Beladung von 2–7 kg organischer Trockenmasse/m³/d

strat war Schweinegülle mit Gerste und Triticale. Die Beladungsraten lagen zwischen 3–13 kg_{oTS}/m³/d. Es ist festzuhalten, dass die Zahl der Methanbildner mit der vGPR eines Biogasfermenters direkt korrelierte, unabhängig von dieser Substratauswahl (Testzellulose, Rübensilage, Getreide mit Schweinegülle) und dem Fermentertyp (batchweise oder kontinuierlich). Das heißt die Korrelation galt universell. Somit kann umgekehrt von der Zellzahl/ml der Methanbildner in erster Annäherung direkt auf die vGPR einer Biogasanlage geschlossen werden.

Biogasanlagen mit einem hohen Trockenmassegehalt wiesen generell die höchsten Zellzahlen auf, was offenbar die Gasproduktion und Prozessstabilität steigert. Die Kombination weiterer Analysenwerte (Fluo-Intensität, Zellfläche, Fettsäurewerte, Organik-Input/Organik-Output, Morphotyp-Diversität mit der Bildanalyse) wird Gegenstand weiterer Arbeiten sein (in Bearbeitung, Doktorarbeit Yong-Sung Kim).

Literatur

Shaikh, Y. (2012) Validierung eines mikrobiellen Qualitätsindexes zur Einstufung von Biogasanlagen, HAW Hamburg (Masterarbeit)

Danksagung

Ein Teil der Zellzählungen führte Lukas Neumann an der HAW durch.

Elektrooptische at-line Bestimmung der Zellvitalität in Biogasprozessen

ERICH KIELHORN, JOHANNA KOSERSKE, ALEXANDER ANGERSBACH, EMMA RITZI,
JÖRN BEHEIM-SCHWARZBACH, TORSTEN UNMACK, BORIS HABERMANN,
PETER NEUBAUER, STEFAN JUNNE

1 Einleitung

Die bestehenden Messsysteme in Biogasanlagen basieren auf der Analyse von Umgebungszuständen und geben daher keine direkten Informationen über den physiologischen Zustand der Zellen wieder.

Die Messung zellphysiologischer Parameter, u. a. durch die Flusszytometrie, hat sich in den letzten Jahren in Bakterienreinkulturen etabliert. Einen neuen Ansatz zur Charakterisierung zellphysiologischer Eigenschaften bietet das elektrooptische Monitoring bakterieller Kulturen (JUNNE et al. 2008, JUNNE et al. 2010). Das hier vorgestellte Messverfahren erlaubt erstmalig die gleichzeitige Erkennung der Zellgröße, Zellzahl und des Transmembranpotenzials in Bakterienkulturen. Diese Parameter liefern wichtige Informationen über den physiologischen Zellzustand, insbesondere über die Stoffwechselleistung.

2 Elektrooptische Bestimmung der Zellpolarisierbarkeit

Zur Bestimmung der Zellpolarisierbarkeit in Biogaskulturen wurde eine bestehende Messmethode auf die Anforderungen von Biogasproben angepasst und als tragbares System mit halbautomatischer Probenvorbereitung ausgelegt. Ein elektrisches Wechselfeld wirkt bei 4 Frequenzen zwischen 200 kHz bis 2.100 kHz auf die Zellen ein. Die photometrische Erfassung der richtungsabhängigen optischen Dichteänderung der Zellsuspension, ergibt ein Spektrum der Polarisierbarkeit der Zellen in Abhängigkeit der Frequenz. Mehrere Biogaskultivierungen im Labormaßstab, in Batch- als auch in kontinuierlicher Betriebsweise, wurden durchgeführt. In den Batch-Kultivierungen kamen Kulturen aus Kläranlagen und Biogasanlagen mit unterschiedlichen Substraten zum Einsatz. Die kontinuierlichen Kulturen wurden über einen Zeitraum von 20 Tagen hinweg analysiert. Bei der kontinuierlichen Fermentation wurde die Zugabe von Maissilage schrittweise erhöht, bis es zur Versäuerung und dem Ende der Biogasproduktion kam. Neben der Polarisierbarkeit wurden bei allen Versuchen Standardparameter erfasst.

Unterzieht man die erhaltenen Daten für alle Frequenzen einer Hauptkomponentenanalyse (PCA), so ergibt sich eine Korrelation zwischen den Prozessdaten wie der Entwicklung der Biogasbildungsrate, dem FOS/TAC-Wert und der Essigsäurekonzentration

zu den elektrooptischen Messwerten. Die Polarisierbarkeit der Zellen liefert damit eine Aussage über den physiologischen Zustand und ermöglicht das Einstellen geeigneter Prozessbedingungen für maximale Stoffwechselleistungen. Damit wird eine Bewertung ermöglicht, ob der aktuelle Betriebszustand geeignete Bedingungen für die Mikroben darstellt oder nicht. Anders als bei vielen etablierten Methoden muss dabei nicht die Entwicklung des Methanertrages abgewartet werden. Zudem wird bei Störungen eine Einschätzung ermöglicht, ob ungünstige Zustände der mikrobiellen Konsortien vorliegen oder andere Gründe zu einem ungewünschten Betriebszustand geführt haben.

Das neue Messverfahren eignet sich als integriertes Prozessanalysewerkzeug für ein besseres Verständnis der Bedingungen in der Flüssigphase. Ein solches Messkonzept kann Betriebsrisiken vor allem bei instabilen Bedingungen wie einer veränderten Raumbelastung oder bei sich ändernden Substratzusammensetzungen reduzieren. Die Definition und Optimierung stabiler Betriebspunkte anhand des Zellzustandes wird ermöglicht.

Literatur

- Junne, S. et al. (2010): Electrooptical monitoring of cell polarizability and cell size in aerobic *Escherichia coli* batch cultivations. *Journal of Industrial Microbiology & Biotechnology*, 37(9): pp. 935-942
- Junne, S. et al. (2008): Electrooptical measurements for monitoring metabolite fluxes in acetone-butanol-ethanol fermentations. *Biotechnology and Bioengineering*, 99(4): pp. 862-869

Verbundvorhaben „BiogasEnzyme“

**MONIKA HEIERMANN, JÖRN BUDE, ARNO CORDES, STEFAN DRÖGE,
SEBASTIAN ESCHENBACHER, ROBERT KAUSMANN, JÖRG KRETZSCHMAR,
LIANE MÜLLER, NILS ROTTMANN, TERESA SUÁREZ QUIÑONES,
MATTHIAS WAWRA**

1 Einleitung

Enzympräparate werden bereits seit Jahren in Biogasanlagen eingesetzt. Primär sollen sie für einen beschleunigten Substrataufschluss sorgen. Sekundär hat der Enzymeinsatz weitere Auswirkungen auf den Fermenterinhalt. Hier wird vermutet, dass sich durch eine verminderte Viskosität oder eine geringere Tendenz zur Schwimmdeckenbildung 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.

In dem umfangreichen, fast vierjährigen Verbundvorhaben „BiogasEnzyme“ wurden Wirkmechanismen, Dosis-Effekt-Beziehungen, Abhängigkeit der Enzymwirkung von Grad und Art der Fütterung sowie vom Prozesszustand und schließlich die Beeinflussung der verschiedenen Prozessparameter durch den Enzymeinsatz untersucht. Durchgeführt wurde das Forschungsvorhaben mit den Verbundpartnern Archea Service GmbH, ASA Spezialenzyme GmbH, Biogas Nord Anlagenbau GmbH, Deutsches Biomasseforschungszentrum gGmbH, Prüf- und Forschungsinstitut Pirmasens e.V. unter der Koordination des Leibniz-Instituts für Agrartechnik Potsdam-Bornim e.V. Das Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft förderte das Vorhaben über seinen Projekträger, die Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V.

2 Material und Methoden

Die Untersuchungen wurden in systematischen Versuchsanstellungen im Labor- und Technikumsmaßstab durchgeführt und in Praxisanlagen überprüft. Es wurden sowohl die Wirkung von einzelnen Enzympräparaten als auch von Mischungen von Enzymen eingesetzt. Als Einsatzstoffe wurde Maissilage, Grassilage, Ganzpflanzensilagen von Getreide und Zuckerhirse sowie von Geflügelmist ausgewählt. Die Ergebnisse der Experimente wurden zur Bewertung des Enzymeinsatzes in Bezug auf Stoffflüsse, Energiebilanz und Wirtschaftlichkeit genutzt.

3 Ergebnisse und Fazit

Ergebnisse der umfassenden Untersuchungen zeigen, dass grundsätzliche Effekte auf den Biogasprozess im Labormaßstab sowohl in Batch- als auch in kontinuierlichen Verfahren nachgewiesen werden können. Bei typischerweise in der Praxis vorgenommenen Enzymzugaben direkt in einen mesophil betriebenen Fermenter waren keine positiven Effekte auf den Abbaugrad und die Abbaugeschwindigkeit feststellbar. Die in Batch- und Technikumsversuchen erzielten positiven Ergebnisse, wie z.B. ein höherer Gasertrag oder eine Reduzierung der notwendigen Rührwerksleistung, konnten in den Praxisversuchen nur ansatzweise bestätigt werden. Aus ökonomischer Sicht stehen den positiven Effekten durch eine höhere Gasproduktion und verringerte Substrat- und Betriebskosten die relativ hohen Kosten für den Enzymeinsatz entgegen. Weiterhin konnten im Vorhaben keine eindeutigen Auswirkungen auf die Stoffbilanzierung, jedoch tendenziell positive Effekte auf die Energiebilanzierung festgestellt werden.

Die erworbenen wissenschaftlichen Erkenntnisse sollen nun als Grundlage für weitere Forschungen zur Prozessmikrobiologie, für die Weiterentwicklung von Analysemethoden zur Prozessdynamik und für die Entwicklung von neuen Enzympräparaten dienen.

Literatur

Heiermann, M. et al. (2014): Schlussbericht zum Verbundvorhaben: Untersuchungen und Bewertung zum Einsatz von Enzymen in Biogasanlagen auf deren Wirksamkeit und deren Wirkungsweise sowie zur Veränderung des Verfahrensablaufs im Labor-, Technikum- und Praxisanlagen-Maßstab; Kurztitel: BiogasEnzyme; Teilvorhaben 1-6. Online verfügbar unter <http://www.fnr-server.de/ftp/pdf/berichte/22027707.pdf>

Wirkung von hydrolytischen Enzymen im Biogasprozess

DOROTHEA TELSCHOW, SARA GATZ

1 Hintergrund

Eine der größten Reserven bei der Biogasproduktion ist die Verbesserung des Aufschlusses von Nicht-Stärke-Polysacchariden (NSP). Dies ist einerseits entscheidend für die Produktivität des Prozesses und andererseits für die Viskosität des Fermenterinhalt (GERHARDT 2011). Der Einsatz von leistungsfähigen, Cellulose spaltenden Enzymen ist daher das Mittel zum Erfolg.

2 Wirkungsweise

Durch hydrolytische Enzyme werden Cellulose und Hemicellulose schneller und vollständiger zu Zuckern aufgespalten und damit für die Versäuerung und letztendlich für die Biogasproduktion zur Verfügung gestellt (TELSCHOW 2007). Daraus folgen die Senkung des TS-Gehaltes und der Viskosität, die Auflösung von Schwimm- und Sinkschichten, ein geringerer Substratverbrauch bei gleicher Leistung bzw. mehr Energie bei gleicher Fütterung, weniger Gärrest und ein geringerer Energieverbrauch der Rührwerke (HILSE et al. 2010).

3 Fallbeispiel

3.1 Stromeinspeisung und Input

Der Betreiber einer 1.040 kW Biogasanlage stellte für die Datenerhebung seine Betriebs-tagebücher und die Ergebnisse der durchgeführten Analysen zur Verfügung.

Im Diagramm (Abb. 1) wird erkennbar, dass ab Enzymeinsatz ca. 1.219 kWh_{el}/d mehr eingespeist werden konnte. Das entspricht einem Mehrerlös von ca. 219 €/d (bei 0,18 €/kWh_{el}). Zusätzlich wurde ca. 1 t organische Trockensubstanz (oTS) pro Tag und damit ca. 96 €/d an Substratkosten (Maissilage) eingespart. Durch die Steigerung der Biogasproduktion und der gleichzeitigen Substrateinsparung sowie unter Berücksichtigung der Kosten für das Enzympräparat ergibt sich so ein Rohertrag für den Betreiber von ca. 270 € pro Tag.

3.2 Spezifische Energie und TS-Gehalt im Fermenter

Die Verwendung des hoch konzentrierten, Cellulose-spaltenden Enzympräparates bewirkte eine beträchtliche Steigerung der spezifischen Energieproduktion von ca. 116 kWh_{el}/t oTS, bei gleichzeitiger Senkung des TS-Gehaltes im Fermenter um 2,5–3 % (Abb. 2). Die spezifische Energieproduktion liegt dabei im Durchschnitt erheblich über den theoretischen Werten (mit KTBL-Werten ermittelt (ROTH et al. 2010)), was wiederum für eine höhere Gasausbeute aus den Substraten spricht.

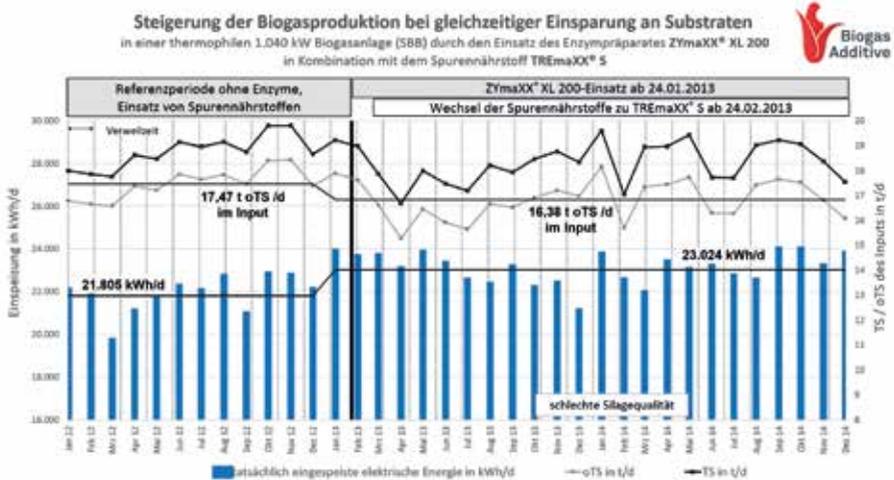


Abb. 1: Steigerung der Biogasproduktion bei gleichzeitiger Einsparung an Substrat



Abb. 2: Steigerung der Energieproduktion bei gleichzeitiger Verringerung des TS-Gehaltes

4 Fazit

Beide Betrachtungsweisen zeigen, dass durch den Einsatz des Enzympräparates (in Kombination mit Spurennährstoffen) ein deutlich besserer Aufschluss der Substrate mit wirtschaftlich sehr interessanten Effekten erreicht wurde (BIOGAS-ADDITIVE.DE 2014).

Literatur

Die Literatur kann bei den Autoren angefordert werden.

Steigerung der Substratverwertung durch die Applikation von hydrolytischen Biogasenzyemen

TORSTEN UNMACK, JÖRN BEHEIM-SCHWARZBACH, CHRISTIAN LÖCHTE

1 Ausgangssituation und Zielstellung

Die Rohstoffkosten machen einen wesentlichen Teil der Betriebskosten in Nawaro-Biogasanlagen aus. Die Substratpreise unterliegen aufgrund der gestiegenen Nachfrage erheblichen Schwankungen. Das stellt für den wirtschaftlichen Betrieb einer Anlage eine erhebliche Herausforderung dar. In Biogasanlagen mit landwirtschaftlichen Substraten (Nawaro, Wirtschaftsdünger) besteht der Gärrest, bezogen auf die Trockensubstanz, zu ca. 20–30 % aus Cellulose und Hemicellulose. Diese ungenutzten Substratanteile im Gärrest stellen für die Betreiber von Biogasanlagen ein deutliches Ertragssteigerungspotenzial dar, welches durch die Verwendung von hydrolytisch wirkenden Biogasenzyemen zur Steigerung der Biogasproduktion genutzt werden kann. In einer großangelegten Pilotstudie haben die Partner DSM, Biopract und AC Biogas die Wirkung des Biogasenzyems MethaPlus® L100 an 5 Standorten untersucht. Für die Pilotstudie wurden alle Standorte über einen Zeitraum von 3,5 Verweilzeiten beprobt und bilanziert. Um Veränderung im heterogenen Substratausgangsmaterial zu erfassen und zu berücksichtigen, wurden alle Inputströme regelmäßig chemisch charakterisiert. Das Maß für die Bewertung ist der spezifische Energieertrag $[\text{kWh/t oTS}_{\text{Input}}]$, welcher angibt, wieviel Energie pro eingesetzter Tonne organischer Masse produziert wird.

1.1 Standortübersicht

Die Pilotstudie wurde an 5 Standorten durchgeführt. An Standorten mit mehreren Modulen wurde die eine Hälfte der Module als Referenz und die zweite für die Applikation verwendet.

Tab. 1: Übersicht Biogasanlagen mit Angabe der getrennt bilanzierbaren Module/Linien, elektrische Leistung und Verweilzeit pro Modul und Anlagenhersteller

Standort	Anzahl Module [-]	Energie/Modul		Verweilzeit [d]	Anlagenhersteller [-]
		[MWh/d]	[kW]		
Prenzlau	4	12	500	70	Envitec
Brunne	2	12	500	70	Envitec
Worin	1	12	500	70	Envitec
Rosslieben	1	16,8	700	90	Schmack
Kannawurf	1	72	3.000	75	Schmack

1.2 Parameter für Ertragsbilanz

Substrate: tägliche Erfassung der zugeführten Masse je Substratart, wöchentliche Ermittlung der chemischen Zusammensetzung je Substratart: TS, oTS, N-Total, $\text{NH}_4\text{-N}$, NDF, ADF, ADL, Rohfett, Zucker und Stärke.

Energie/Biogas: Biogasproduktion (m^3/d), Stromproduktion (kWh/d) und Biogaszusammensetzung ($\%-\text{CH}_4$, $\%-\text{CO}_2$).

1.3 Zeitbedarf/Perioden der Pilotstudie

Die Zeitachse der Pilotstudie wird durch die jeweilige Verweilzeit (VWZ) der Anlage vorgegeben. Während der Referenzperiode (= 1 VWZ) wurde der Ausgangszustand ermittelt. Nach Abschluss der Referenzperiode wurde in den Applikationsmodulen die Enzymkonzentration aufgebaut. Nachfolgend fand über zwei Verweilzeiten die Enzymapplikation statt. Module ohne Applikation wurden als zusätzliche Referenz behandelt.

2 Ergebnisse Pilotstudie

Für die Bewertung der MethaPlus-Applikation und der Darstellung der verbesserten Substratverwertung wurden die Perioden mit Enzymzugabe mit der jeweiligen Referenzperiode verglichen. An Standorten mit mehreren Modulen wurde ein zusätzlicher Quervergleich durchgeführt. Nachfolgende Tabelle zeigt für die Standorte die Steigerung des spezifischen Energieertrags.

Tab. 2: Standortbezogene Übersicht der Steigerung des Energieertrags und dadurch resultierende Einsparung an Maissilage für gesamten Standort

Standort	Steigerung Energieertrag [%]	Einsparung Maissilage [t FM/d]
Prenzlau	+ 5 %	5,6
Brunne	+ 8 %	4,4
Worin	+ 10 %	2,5
Rossleben	+ 5 %	1,9
Kannawurf	+ 6 %	7,8

3 Bewertung

Die aufwendig angelegte Studie konnte erneut die leistungsfördernde Wirkung von hydrolytischen Enzymen nachweisen. Durch das eingesetzte Biogaszym (MethaPlus®) konnte der spezifische Energieertrag in den Anlagen im Mittel um 6,8 % gesteigert werden, was sich direkt auf die Effizienz der Biogasproduktion auswirkt und damit die Rentabilität der Anlagen verbessert. Aufgrund der intensivierten Substrathydrolyse und der besseren Substratumsetzung konnte je nach Anlagengröße zwischen 1,9–7,8 t Mais pro Tag eingespart und gleichzeitig der Gärrest-Anfall (DüngeVO) reduziert werden. Im Gegensatz zu vielen mechanischen Vorbehandlungen stellt der Enzymeinsatz eine einfache und kostengünstige Lösung dar, die Wirtschaftlichkeit nachhaltig zu verbessern.

Wie heiß ist nötig – Wie heiß ist möglich? Hygienisierende Vergärung mit thermophiler Biogasanlage

SANDRA OFF, PAUL SCHERER

1 Die Suche nach der optimalen Temperatur

Die Verwendung von unbehandelter Gülle als organischer Dünger auf landwirtschaftlichen Flächen führt zu einem geschlossenen Nährstoffkreislauf. Es kann jedoch ebenfalls zu einem Zyklus an Pathogenen führen. Diese Studie zeigt, dass eine Verbreitung von Krankheitserregern durch den Betrieb von Biogasanlagen unter erhöht thermophilen Bedingungen stark minimiert werden kann. Über einen Zeitraum von mehr als zwei Jahren wurden hygienische Messungen an einer großtechnischen Biogasanlage eines Milchviehbetriebs durchgeführt. Als Substrate wurden 70 % Gülle sowie Mais und Gras eingesetzt. Drei parallele 115 m³ zylinderförmige Reaktoren (14,5 m Höhe) wurden mit identischer Substratzusammensetzung betrieben. Die Temperatur des einen Referenzfermenters betrug konstant 53 °C, die des Testfermenters wurde langsam von 51 °C auf 59 °C erhöht und wieder abgesenkt. Die entsprechende hydraulische Verweilzeit (HRT) belief sich auf 12 bis 13,5 Tage. Das ungeheizte Endlager hatte ein Volumen von 1.000 m³.

Eine Prozesstemperatur mit stabiler Gasproduktion bei größtmöglichem hygienisierenden Effekt wurde anhand monatlicher Untersuchungen ermittelt. Dafür wurden Proben der Gülle, der Reaktoren und des Endlagers mit Hilfe mikrobieller Plattentechnik unter Verwendung von speziellen Selektiv-Nährmedien analysiert und so *E. coli* / Coliforme, Enterokokken und Salmonellen sowie die Gesamtkeimzahl als Bezugsgröße bestimmt. Die Zahl der aeroben und fakultativ anaeroben Mikroorganismen lag bei allen Prozesstemperaturen zwischen 10⁸ und 10⁹ KBE/ml (koloniebildende Einheiten pro ml). *E. coli*-Keime und Coliforme wurden um etwa drei Dekaden von 10⁶–10⁷ auf 10³–10⁴ KBE/ml bei einer Temperatur von 59 °C reduziert (Abb. 1), zum Teil unter die Nachweisgrenze von 100 KBE/ml.

Ebenso wurden Enterokokken mindestens um den Faktor 1.000 verringert. Dies lässt den Schluss zu, dass Rindergülle weitgehend durch thermophile anaerobe Vergärung bei 59 °C hygienisiert werden kann – bei gleichzeitig unverändert hohen Raumzeitausbeuten.

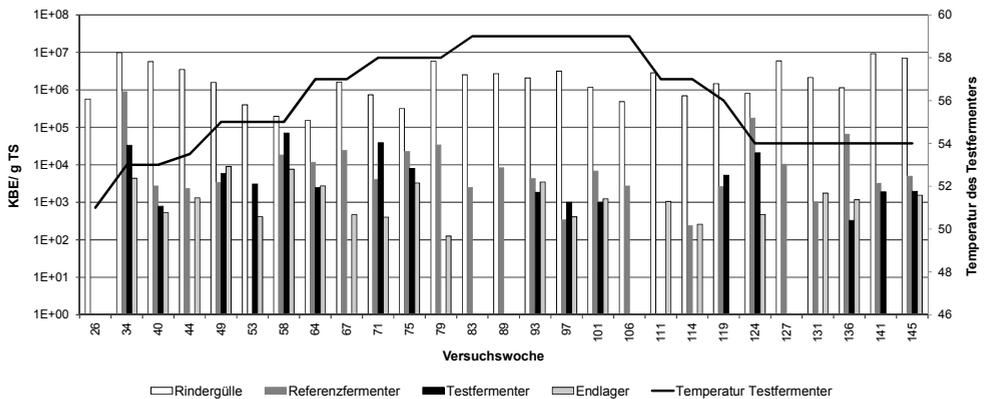


Abb. 1: Darstellung der Anzahl an nachgewiesenen Coliformen einschl. *E. coli* in der Rindergülle, im Referenzfermenter und im Testfermenter sowie im Endlager. Die Detektion der Coliformen erfolgte mit dem Chromocult® Coliformen Agar. Bei einer Temperatur von 59 °C fiel die Anzahl an Coliformen in den Proben häufig unter die Nachweisgrenze (10^2 KBE/ml).

1.1 Reaktorstabilität

Die Untersuchungen zeigten, dass die erhöhten Temperaturen im Testfermenter (55–59 °C) erstaunlicherweise zu keinem nennenswerten Unterschied in der temperaturabhängigen Ammoniak-Konzentration im Vergleich zum Referenzfermenter (53 °C) führten (beide 100–700 ppm NH_3 bzw. 1.000–3.300 ppm NH_4^+ , hier nicht dargestellt). Eine Ammoniak-bedingte Hemmung konnte während der gesamten Versuchszeit nicht beobachtet werden. Die spezifische Gasproduktion zeigte ebenfalls keine Beeinträchtigung durch die erhöhten thermophilen Prozessbedingungen (Abb. 2). Die Gaserträge lagen beim Testfermenter zum Teil sogar über denen der Referenzfermenter.

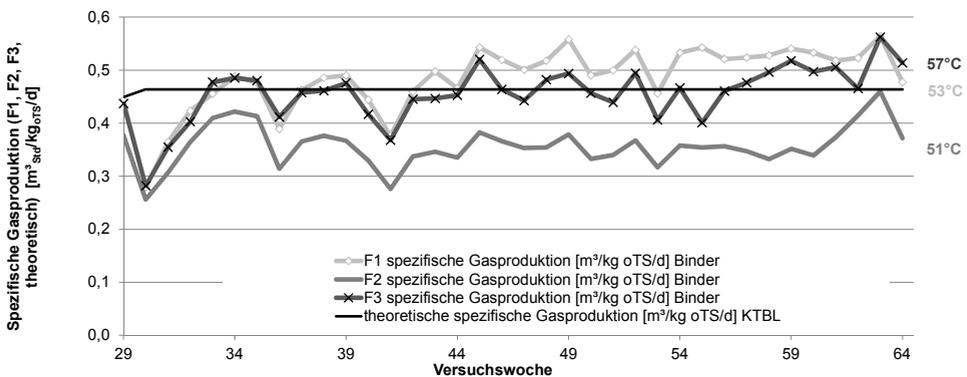


Abb. 2: Darstellung der spezifischen Gasproduktion. Der Testfermenter F3 weist bei 57 °C eine ähnliche Effizienz auf wie die Referenzfermenter F1 (53 °C) oder F2 (51 °C). F2 hat mit 51 °C die geringste Gasproduktion. Es zeigte sich keine temperaturabhängige Hemmung. Die Gasdaten wurden für jeden Reaktor separat erhoben (Quelle: Firma Binder, Ulm, Germany).

Clostridium botulinum – Vorkommen und Verhalten im Biogasprozess

BIANCA FRÖSCHLE, MICHAEL LEBUHN

1 Einleitung

Clostridium botulinum zählt zu den sporenbildenden, obligat anaerob wachsenden Bakterien. Durch die Bildung des Nervengifts Botulinum-Neurotoxin ist *C. botulinum* in der Lage, schwerwiegende, u.U. tödliche Vergiftungen bei Mensch und Tier auszulösen, den sog. Botulismus. Neben einer akuten Form wurde seit den 1990er Jahren vermehrt auch von einer chronischen Form („viszeraler“ Botulismus) bei Rindern berichtet. Das Krankheitsbild und eine ursächliche Beteiligung von *C. botulinum* sind weder beim Mensch noch beim Rind bisher wissenschaftlich belegbar (DORNER 2014, HOEDEMAKER 2014, BfR 2015). In den Medien wurde dennoch wiederholt behauptet, Biogasanlagen trügen zur Verbreitung von *C. botulinum* bei und stellten damit ein hygienisches Risiko für Mensch und Tier dar. Diese Vorwürfe sollten in dieser Studie mit wissenschaftlichen Untersuchungen und Daten aus der Praxis geprüft werden.

2 Material und Methoden

Der Nachweis des Erregers erfolgte über eine kombinierte Methode aus kultureller Anreicherung und molekularbiologischer Detektion mittels quantitativer Real-Time PCR (qPCR). In einem Screening-Ansatz wurden insgesamt 106 Proben von Einsatzstoffen, Gärgemischen und Gärprodukten ausgewählter bayerischer Biogasanlagen qualitativ auf die Anwesenheit von *C. botulinum* untersucht. Davon waren 34,0 % pflanzliche Substrate (z.B. Silagen), 12,3 % tierische Substrate (z.B. Gülle, Festmist), 23,6 % Gärgemische (Hauptgärer) und 30,2 % Gärprodukte aus nachgeschalteten Prozessstufen (Nachgärer und Endlager).

In Keimträgerversuchen wurde das Verhalten des Keims im Prozess quantitativ bestimmt. Dazu wurde *C. botulinum* in mesophile (38 °C) sowie thermophile (55 °C) Labor-Fermenter eingebracht und der Verlauf der Keimzahlen gemessen.

3 Ergebnisse und Diskussion

In keiner der im Screening untersuchten Proben konnte *C. botulinum* nachgewiesen werden.

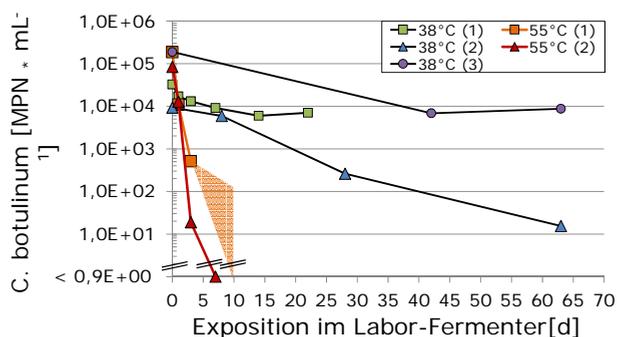


Abb. 1: Reduktion von *C. botulinum* in Laborfermentern bei 38 bzw. 55°; MPN = most probable number, wahrscheinlichste Anzahl

Die Keimträgerversuche ergaben, dass *C. botulinum* sowohl im mesophilen und noch wesentlich schneller im thermophilen Betrieb reduziert wurde (Abb. 1). Die Zeit, die zur Reduktion um 90 % benötigt wurde (D-Wert), betrug bei 38 °C $34,6 \pm 11,2$ d und bei 55°C $1,0 \pm 0,2$ d.

4 Schlussfolgerungen

Die Ergebnisse dieser Studie belegen, dass auch der durch die Fähigkeit zur Sporenbildung widerstandsfähige und wärmeliebende *C. botulinum* durch den Biogasprozess reduziert wird. Die hygienische Qualität ist damit im Gärprodukt gegenüber den unbehandelten Einsatzstoffen wie Gülle bzw. Mist verbessert. Eine Vermehrung der Keime wurde in keinem Fall festgestellt. Die Abwesenheit von *C. botulinum* in den Proben von Praxisbetrieben belegt, dass dieser Organismus in diesem Umfeld bei guter fachlicher Praxis von untergeordneter Bedeutung ist.

Literatur

- BfR (ed) (2015): Fragen und Antworten zu Botulismus. Aktualisierte FAQ des BfR vom 23. Januar 2015. http://www.bfr.bund.de/de/fragen_und_antworten_zu_botulismus-70355.html
- Dorner, B.; Werber, D.; Dorner, M. et al (2014): „Chronischer Botulismus“: Als neue Krankheit nicht belegt. Deutsches Ärzteblatt 111:A 1468–1471
- Hoedemaker, M.; Seyoldt, C.; Breves, G. et. al. (2014): Abschlussbericht - Bedeutung von Clostridium botulinum bei chronischem Krankheitsgeschehen und Teilprojekt: Mikrobiologisches Risikopotenzial von Biogasanlagen unter besonderer Berücksichtigung von Hühnertrockenkot als Gärsubstrat. Stiftung Tierärztliche Hochschule Hannover. <http://www.bmel.de/SharedDocs/Downloads/Tier/Tiergesundheit/Tierseuchen/Botulismus-Abschlussbericht-Hannover.html>

Überleben von Wildpflanzensamen aus Blütmischungen in der anaeroben Vergärung der Biogas-Prozesskette

JULIANE HAHN, PAULA R. WESTERMAN, MONIKA HEIERMANN, BÄRBEL GEROWITT

1 Einleitung

Das Hauptsubstrat für die Erzeugung des Energieträgers Methan im Rahmen der landwirtschaftlichen Biogasproduktion in Deutschland ist nach wie vor Mais. Dessen wirtschaftlicher Erfolg als Energiepflanze führt jedoch zu Boden- und anderen ökologischen Problemen wie der Ausbreitung von Schädlingen und nicht zuletzt einem monotonen Landschaftsbild (FNR-Kampagne „Energie pflanzen“).

Die Suche nach Biogassubstraten, die ökologischen Mehrwert haben, läuft auf Hochtouren. Ein aktueller Forschungsschwerpunkt sind Mischungen aus Wildpflanzen. Als Blühstreifen an Energiemaisfeldern angebaut sollen sie zu einer Diversifizierung der Acker-Monokulturen führen, Lebensraum für Flora und Fauna schaffen, die Fruchtbarkeit des Ackerbodens (Humusgehalt) verbessern (VOLLRATH 2011) und gleichzeitig energetisch nutzbar sein. Allerdings wird in der bisherigen Forschung ein Aspekt nicht beleuchtet: das Risiko, dass der Gärrest mit Wildpflanzensamen¹ kontaminiert sein kann.

Der Gärrest - der Rückstand der anaeroben Vergärung - wird im Allgemeinen als Düngemittel auf das Feld zurückgeführt. Mit dem Gärrest werden auch alle Schaderreger und Pflanzensamen, die die anaerobe Vergärung überleben, auf das Feld zurückgeführt und können dort Probleme verursachen, insbesondere wenn es sich um Unkräuter, invasive oder nicht-einheimische Arten handelt. Durch die große Vielfalt an Sameneigenschaften u. a. Dormanzmechanismen unterscheiden sich Pflanzensamen erheblich in ihrer Fähigkeit die extremen Bedingungen in Biogasanlagen zu überleben (WESTERMAN et al. 2012).

¹ Der Begriff „Wildpflanzensamen“ wird in diesem Projekt synonym für „Wildpflanzen-Diasporen“ gebraucht. Es wird nicht nur das Überleben der (freien) Samen im botanischen Sinne betrachtet, sondern auch das der Samen in verschiedenen Früchten (z. B. in Kapseln oder Hülsen).

2 Forschungsansatz

Seit Ende 2014 wird im FNR-Projekt „Wildpflanzen-Samen in der Biogas-Prozesskette; Eintrags- und Überlebensrisiko unter dem Einfluss von Prozessparametern“ (FKZ 22401114) das Risiko untersucht, dass die Samen aus einer kommerziell erhältlichen Wildpflanzen-Blütmischung die verschiedenen Schritte der Biogas-Prozesskette überleben und somit möglicherweise mit dem Gärrest verbreitet werden können. Die Möglichkeiten einer Risikoverminderung durch die Steuerung verschiedener Prozessparameter der Biogaserzeugung werden abgeschätzt. Im Einzelnen wird der Grad der Inaktivierung der Wildpflanzensamen

- in Abhängigkeit von den eingesetzten Wildpflanzen-Arten
- in Abhängigkeit vom Teilprozess und einzelnen Prozessparametern
- bei Vergärung in der Wildpflanzen-Biomasse

beleuchtet.

Als erste Ergebnisse präsentieren wir die Versuche zum Überleben von Pflanzensamen während der anaeroben Vergärung im Labormaßstab. Wir inkubierten Samen von elf Arten in kontinuierlich-durchmischten Labor-Reaktoren im unteren und oberen mesophilen Temperaturbereich bei 35 °C und 42 °C und überprüften ihre Keim- und Lebensfähigkeit nach verschiedenen Expositionszeiten.

Literatur

Fachagentur für Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR)(2015): Energie pflanzen! <http://www.energie-pflanzen.info/aktuelles/>

Vollrath, B. (2011): Energie aus Wildpflanzen. Lösungsansatz für die Entschärfung der Konkurrenz zwischen Bioenergieproduktion und Naturschutz? Nutzungskonkurrenzen in der Landwirtschaft - Ursachen, Auswirkungen und Lösungsansätze. DAF. Braunschweig, 19.10.2011

Westerman, P.R. et al. (2012): Weed seed survival during mesophilic anaerobic digestion in biogas plants. *Weed Research* 52, 307-316

Erarbeitung eines Standards für die wiederkehrende Prüfung von Biogasanlagen

ALEXANDER LIEBENSTEIN, STEFAN SEIBEL, SANDER SCHWICK

1 Aktuelle Situation

Die aktuelle Situation im Bereich der wiederkehrenden Prüfungen von Biogasanlagen zeigt, dass unterschiedliche Anforderungen und Ansichten von Sachverständigen (z. B. zum Prüfumfang, der Gestaltung von Prüfberichten und Definition der Prüfergebnisse) sowie unterschiedliche Anforderungen und Erfahrungen von Genehmigungsbehörden in diesem Bereich zu abweichenden „Standards“ führen. Die Problematik bei den zahlreich vorhandenen, aktuell veröffentlichten Konzepten, Richtlinien und Vorgaben ist die Komplexität der Informationen, die fehlende Trennung der Ansprechpartner und die fehlende länderübergreifende Akzeptanz sowie die schwer zu gewährleistende Aktualität.

2 Projektbeschreibung

Das Gesamtziel des vom Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL) über die Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR) geförderten Projekts (Förderkennzeichen: 22010013), ist die Entwicklung eines bundesweit einheitlichen Prüfschemas für regelmäßig wiederkehrende Prüfungen von Biogasanlagen. Das Projekt läuft seit dem 1. August 2014 bis zum 31. Juli 2016.

Zusammen mit den Projektpartnern Fachverband Biogas e.V., SGS-TÜV Saar GmbH, SKW Schwarz Rechtsanwälte Wirtschaftsprüfer Partnerschaft mbH und Sozialversicherung für Landwirtschaften, Forsten und Gartenbau (SVLFG) sowie weiteren involvierten Kreisen (u. a. Genehmigungsbehörden, Sachverständigen, Vereinen und Verbänden) erarbeitet die DLG e.V. ein Prüfschema, welches Anlagenbetreibern, Genehmigungsbehörden und Prüfinstituten eine entsprechende Rechtssicherheit für die einheitliche Durchführung von wiederkehrenden Sachverständigenprüfungen (§15 BetrSichV, VAWS, §29a BImSchG) geben soll.

Mit dem Prüfschema sollen die Inhalte bzw. Anforderungen aller bestehenden Sicherheitsstandards (z. B. TRGS 529, Arbeitshilfe für sicherheitstechnische Prüfungen an Biogasanlagen des Länderausschuss für Immissionsschutz (LAI), Sicherheitsregeln für Biogasanlagen der SVLFG) zusammengefasst werden.

Gärrestmanagement zur Effizienzsteigerung von Biogasanlagen

MARKUS HEBERLEIN, ANDREAS WEGER, FABIAN STENZEL, ANDREAS HORNING

1 Ausgangssituation

In Regionen mit einer hohen Dichte an Viehveredelungsbetrieben und Biogasanlagen herrscht eine Verwertungskonkurrenz (Flächenlimitierung) zwischen der Ausbringung von tierischen Wirtschaftsdüngern (Gülle) und der landwirtschaftlichen Verwertung von Gärresten. Durch die anstehende Novellierung der Düngeverordnung (DüV) soll die geltende Ausbringungsobergrenze für Stickstoff von 170 kg N/ha auf alle organischen Düngemittel, insbesondere auf die gesamten Gärreste (auch pflanzlicher Herkunft) aus Biogasanlagen, ausgeweitet werden. Zukünftig kann die Ausbringung von Gärresten auf landwirtschaftlichen Flächen in Nährstoffüberschussregionen daher zu einer erheblichen finanziellen Mehrbelastung für Biogasanlagenbetreiber führen. Ein Ansatzpunkt zur zukünftigen Effizienzsteigerung von Biogasanlagen ist ein effektives Gärrestmanagement. In diesem Kontext kann das von Fraunhofer UMSICHT entwickelte TCR®-Verfahren (Thermo-Catalytic Reforming), in dem organische Reststoffe in die Konversionsprodukte Synthesegas, Öl und Biokohle überführt werden, einen wichtigen Beitrag zur Zukunftssicherung von Biogasanlagen leisten.

2 Gärrest- und Nährstoffmanagement

Um die Verwertungskonkurrenz zu Wirtschaftsdüngern zu entschärfen und eine lokale Nährstoffübersorgung zu vermeiden, müssen die Gärreste in Regionen exportiert werden, die einen Nährstoffbedarf aufweisen. Allerdings führt der hohe Wasseranteil der Gärreste zu hohen Transportkosten und schränkt den wirtschaftlichen Transportradius ein. Ziel ist es daher, die im Gärrest enthaltenen Nährstoffe in eine transportwürdigere Form zu überführen. Abbildung 1 zeigt eine Nährstoffbilanz und die Aufteilung der Stickstoff- und Phosphorfrachten nach mechanischer Entwässerung exemplarisch für eine 1 MW_{el} landwirtschaftliche Biogasanlage.

An größeren Biogasanlagen erfolgt in der Regel bereits eine mechanische Entwässerung des Gärrests. Der flüssige Gärrest steht wie bisher zur Düngung und als humusbildendes Material zur Verfügung. Der feste Gärrest mit ca. 25 % TS-Gehalt wird auf ca. 90 % getrocknet, pelletiert und anschließend der TCR®-Anlage zugeführt. Abbildung 2 zeigt exemplarisch eine Nährstoffbilanzierung unter Angabe der Stickstoff- und Phosphorfrachtaufteilung für das Verfahrenskonzept.

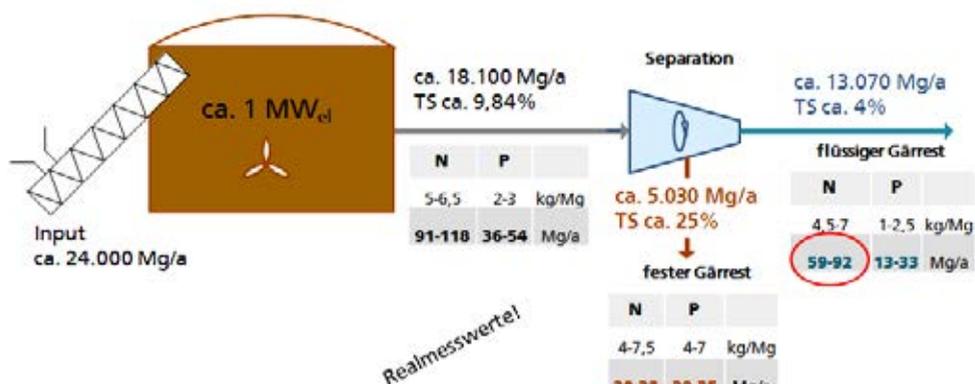


Abb. 1: Nährstoffaufteilung der Gärrestfraktionen nach mechanischer Entwässerung

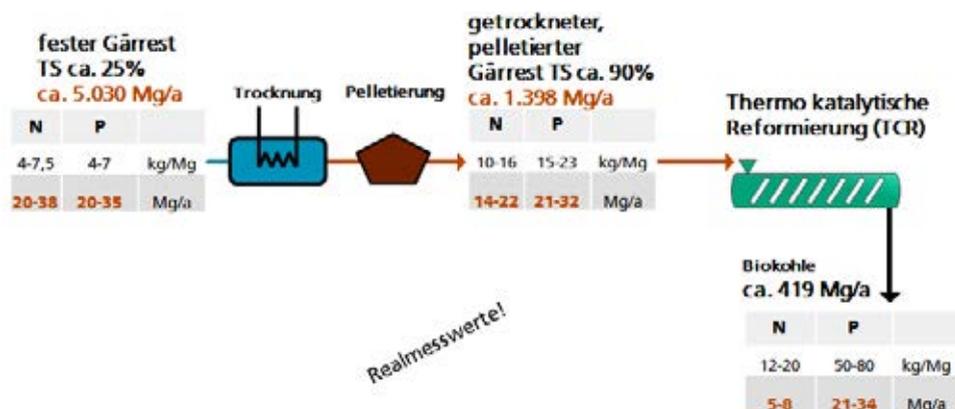


Abb. 2: Nährstoffaufteilung nach Trocknung, Pelletierung und TCR®-Verfahren

Bei einer Ausbringungsobergrenze von 170 kg N/ha für 105 Mg N/a im unbehandelten Gärrest ergibt sich ein Flächenbedarf von ca. 618 Hektar. Durch das Gärrestmanagement könnte der Flächenbedarf nach der mechanischen Entwässerung für ca. 76 Mg N/a aus der Flüssigphase auf 447 Hektar reduziert werden. Durch Verwertung des festen Gärrests in der TCR®-Anlage und der zusätzlichen Stickstoffentfrachtung des flüssigen Gärrests mittels Biokohle kann der Flächenbedarf auf 312 Hektar reduziert werden. Erste Versuche zeigten, dass eine Stickstoffreduktion um bis zu 30 % möglich ist. Für die Biokohle existieren zudem unterschiedliche Verwertungsoptionen. Neben der Anwendung als Bodenverbesserer sind auch gartenbauliche Verwertungswege oder der Einsatz als Filtermedium denkbar. Für Biokohle in der stofflichen Nutzung sind wesentlich höhere Erlöse erzielbar.

Mechanische und enzymatische Aufbereitung von Gärresten zur anschließenden Rückführung in den Prozess

JONAS LINDNER, IRINA MIROSHNICHENKO, SIMON ZIELONKA, HANS OECHSNER, ANDREAS LEMMER

1 Einleitung

Der limitierende Faktor des anaeroben Abbaus von lignozellulosehaltigen Substraten ist die Hydrolysestufe (BRUNI et al. 2010). In einer Forschungsarbeit von MÖNCH-TEGEDER et al. (2013) konnte durch mechanische Aufbereitung eine Methanertragssteigerung von bis zu 25 % erreicht werden. Bei leicht fermentierbaren Silagen führt die mechanische Substrataufbereitung zu einem Verlust an flüchtigen Substanzen durch die Erwärmung, so dass eine selektive Aufbereitung lignozellulosehaltiger Substrate anzustreben ist. Ergänzend zur mechanischen Aufbereitung ist in der Literatur ein aerober Aufschluss von Lignin mit Weißfäule-Pilzen beschrieben, der zu einer Steigerung der Verdaulichkeit führt (TUYEN et al. 2012).

Das Ziel dieser Studie ist es, die nicht abgebauten Faserstoffe des Gärrestes mechanisch mit einer Kugelmühle aufzubereiten, das Lignin mit dem aeroben Pilz Shiitake „*lentinula edodes*“ weiter aufzuschließen und die aufbereiteten Faserstoffe anschließend in den Prozess zurückzuführen. Dieses Verfahren soll die aufzubereitende Stoffmasse reduzieren und die Nachteile einer Vorbehandlung verringern.

2 Material und Methoden

Die Gärreste aus einer zweistufigen Laboranlage, die mit einem Heu/Stroh Gemisch (50/50) gefüttert wurde und der separierte Gärrest der Praxisbiogasanlage „Unterer Lindenhof“ wurden mechanisch (2 und 5 min) mit einer Kugelmühle aufbereitet, mit dem aeroben Pilze „Shiitake“ beimpft und für eine Dauer von 29 Tagen inkubiert. Von diesen Gärresten wurde anschließend der Verlust an organischer Trockensubstanz (oTS), der Ligningehalt und der spezifische Methanertrag ermittelt.

3 Ergebnisse und Diskussion

Durch die pilzliche Aufbereitung kam es zu einem Verlust an organischer Trockensubstanz. Dieser betrug bei dem Heu/Stroh Gärrest zwischen 36 und 40 % und bei dem Gärrest der Praxisbiogasanlage zwischen $10,8 \pm 1,4$ % und $14,4 \pm 1,4$ % (2 bzw. 5 min Aufbereitungszeit).

Der Ligningehalt des Heu/Stroh Gärrestes nahm von 9,4 auf 14,8 % oTS durch die aerobe Aufbereitung mit Pilzen zu. Bei dem Heu/Stroh Gärrest kam es zu einer Abnahme des Ligningehalts um ca. 10 %.

Durch die rein mechanische Aufbereitung mit fünf Minuten konnte der Methanertrag um 4,7 % bei dem Heu/Stroh Gärrest und um 99,3 % bei dem Gärrest der Praxisanlage gesteigert werden. Durch die hohen oTS-Verluste bei der Aufbereitung mit aeroben Pilzen kam es bei der kombinierten Aufbereitung der Heu/Stroh Gärreste insgesamt betrachtet jedoch zu einem Verlust des Methanertrags zwischen 58,2 und 86,4 % im Vergleich zur unbehandelten Variante. Im Gegensatz dazu hatte die kombinierte Aufbereitung des Gärrestes der Praxisanlage positive Effekte auf den Methanertrag (Steigerung bis zu 134,5 %) (Abb. 1).

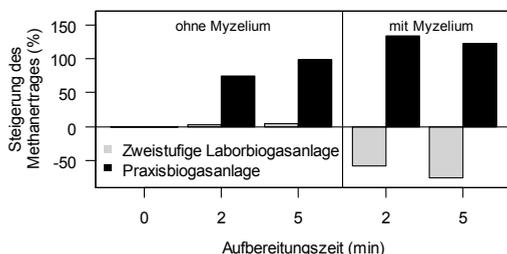


Abb. 1: Steigerung des Methanertrags durch die mechanische und enzymatische Aufbereitung der Gärreste der zweistufigen Laboranlage und der Praxisanlage

4 Zusammenfassung

Die Untersuchungen zeigen, dass die mechanisch/enzymatische Aufbereitung nur bei Gärresten mit einem hohen Ligningehalt einen positiven Effekt auf den Methanertrag hat. Bei Gärresten mit einem geringen Ligningehalt kann durch eine rein mechanische Aufbereitung der Methanertrag gesteigert werden. Jedoch muss in weiteren Untersuchungen ermittelt werden, ob dieses neuartige Verfahren zur Gärrestaufbereitung energetisch und wirtschaftlich sinnvoll ist.

Literatur

- Bruni, E.; Jensen, A.P.; Angelidaki, I. (2010): Comparative study of mechanical, hydrothermal, chemical and enzymatic treatments of digested biofibers to improve biogas production. *Bioresource Technology* 101: 8713-8717
- Mönch-Tegeder, M.,; Oechsner, H.; Jungbluth, T. (2013): Verwertungsmöglichkeiten von Pferdemist in Biogasanlagen. *VDI-Berichte* 2208: 259-260
- Tuyen VD; Cone, J.W.; Baars, J.J.P.; Sonnenberg, A.S.M; Hendriks, W.H. (2012): Fungal strain and incubation period affect chemical composition and nutrient availability of wheat straw for rumen fermentation. *Bioresource Technology* 111:336-342

Wirkungen der Biogasgärrestdüngung in ökologischen Fruchtfolgen auf C_{org} -Gehalte und Bodenaggregatstabilität

ANJA SIMON, KARIN LEVIN, KURT-JÜRGEN HÜLSBERGEN, HANS JÜRGEN REENTS

1 Einleitung

Gärreste aus Biogasanlagen haben in den letzten Jahren als schnell wirksamer organischer Dünger im ökologischen Landbau an Bedeutung gewonnen. Die Wirkungen von Gärresten auf Böden, Gehalte an organischem Kohlenstoff (C_{org}) und Aggregatstabilität sind jedoch bisher nicht ausreichend feldexperimentell untersucht worden.

2 Material und Methoden

In einem ortsstabilen Streifenversuch in Viehhausen (nahe Freising) werden seit 2004 die Auswirkungen der Biogasgärrestdüngung in verschiedenen ökologischen Fruchtfolgen (FF) auf Bodenprozesse untersucht. Im Fokus dieser Bodenuntersuchungen sind drei vierfeldrige Fruchtfolgen: 5.2 Klee gras - Winterweizen - Zwischenfrucht Leguminosen/Nicht-Leguminosen - Mais - Sonnenblume; 6.2 Klee gras - Winterweizen - Klee gras - Klee gras; 7.1 Klee gras - Winterweizen - Zwischenfrucht Grünroggen - Mais - Triticale. Alle Fruchtfolgen wurden jeweils als mit Gärrest gedüngte und ungedüngte Varianten angelegt.

Im Frühjahr 2010 und 2014 wurden Bodenproben (0–10 cm) entnommen und Elementaranalysen (C, N) durchgeführt. Die Aggregatstabilität wurde mittels Siebtauchverfahren von Bodenproben aus dem Februar 2014 (vor der Gärrestdüngung) und Mai 2014 (nach der Düngung) ermittelt.

3 Ergebnisse und Diskussion

Die Gehalte an organischem Kohlenstoff der ungedüngten Parzellen haben sich im Mittel über alle Parzellen von 2010 bis 2014 um $0,1 \text{ g kg}^{-1}$ erhöht. In der FF 5.2 zeigt sich eine Abnahme des C_{org} -Gehalts um $0,1 \text{ g kg}^{-1}$, während in der klee grasdominierten FF 6.2 ein Anstieg von $0,4 \text{ g kg}^{-1}$ auftrat (Abb. 1). In den gedüngten Parzellen erhöhte sich der C_{org} -Gehalt im Mittel um $1,0 \text{ g kg}^{-1}$, den stärksten Anstieg wies FF 7.1 mit $1,6 \text{ g kg}^{-1}$ auf, während sich in FF 5.2 der C_{org} -Gehalt um nur $0,4 \text{ g kg}^{-1}$ erhöhte. Der beobachtete Anstieg des C_{org} Gehalts durch die Biogasgärrestdüngung deckt sich mit den Ergebnissen von MÖLLER (2009). Die hohen Gehalte an C_{org} in FF 6.2 können unter anderem auf die geringe Bodenbearbeitung (KASPER et al. 2009) und den Effekt des Klee grasses zurückgeführt werden. Der geringe Anstieg in FF 5.2 begründet sich

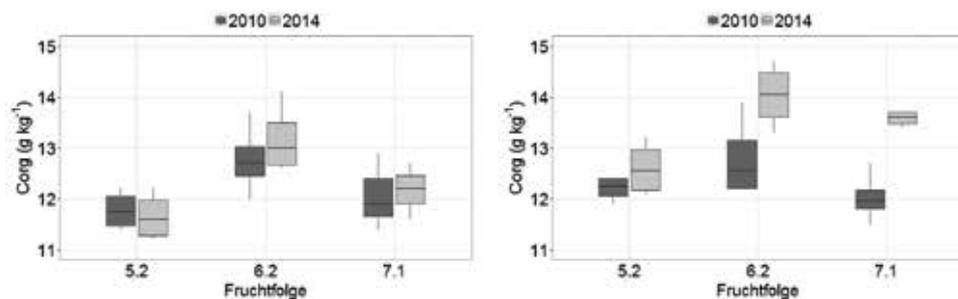


Abb. 1: C_{org} -Gehalte der ungedüngten Parzellen (links) und der gedüngten Parzellen (rechts) der FF 5.2, 6.2 und 7.1

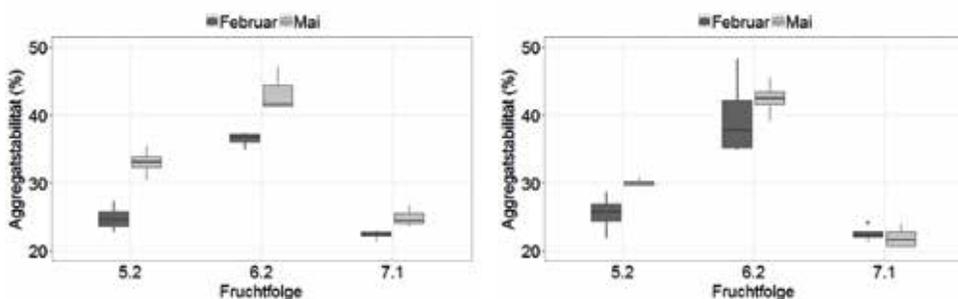


Abb. 2: Aggregatstabilität der ungedüngten (links) und der gedüngten Parzellen (rechts) der FF 5.2, 6.2 und 7.1

durch die hohe Bodenbearbeitungsintensität, sowie durch den Anbau von humuszehrenden Reihenkulturen (Sonnenblumen, Mais) in zwei aufeinander folgenden Jahren. In der Aggregatstabilität zeigten sich nur geringe Unterschiede zwischen den gedüngten und den ungedüngten Parzellen (Abb. 2).

Diese Beobachtung steht im Gegensatz zu den von FRØSETH et al. (2014) und WANG et al. (2013) getroffenen Aussagen, die eine Verbesserung der Aggregatstabilität auf die Zugabe von organischen Düngern zurückführten. Jedoch wiesen SPACCINI und PICCOLO (2013) darauf hin, dass es, in Abhängigkeit von der Qualität des organischen Düngers, auch zu geringen oder negativen Effekten in der Stabilität kommen kann. Deutliche Unterschiede der Stabilität zeigen sich in den verschiedenen FF, die höchste Stabilität wies die Klee grasvariante 6.2 auf.

Literatur

Die Literatur kann bei den Autoren angefordert werden.

Stickstoffbilanzen von Weizen in ökologischen Energiepflanzen-Fruchtfolgen mit Gärrestdüngung

KARIN LEVIN, ANJA SIMON, STEFAN KIMMELMANN, HANS JÜRGEN REENTS,
KURT-JÜRGEN HÜLSBERGEN

1 Einleitung

Die Biogasproduktion im ökologischen Landbau bedeutet eine Intensivierung der innerbetrieblichen Stoffkreisläufe. Biogasgärreste sind N-reiche Düngemittel, die gezielt in der Fruchtfolge eingesetzt werden können. Sie ermöglichen damit Ertragssteigerungen, auch in der Nahrungsmittelproduktion (Synergieeffekte). In diesem Beitrag werden die Effekte auf N-Salden und N-Verwertung des Weizens in verschiedenen Fruchtfolgen untersucht.

2 Methoden

Ein Feldversuch zur Untersuchung von Energiepflanzen-Fruchtfolgen und Gärrestdüngung unter Bedingungen des ökologischen Landbaus wird seit 2004/2005 in Viehhausen bei Freising durchgeführt (REENTS et al. 2011). In den vierfeldrigen Fruchtfolgen wird der Weizen als Nahrungsweizen und die anderen Kulturen zur Biogasproduktion genutzt. Für die Untersuchung wurden folgende Fruchtfolgen ausgewählt: FF 1.1: Klee gras – Weizen – Zwischenfrucht Grünroggen – Mais – Triticale; FF 5.1: Klee gras – Weizen – Zwischenfrucht Leguminosen/Nicht-Leguminosen (Gründüngung) – Mais – Triticale; FF 6.1: Klee gras – Weizen – Klee gras – Triticale. Gärrestmengen wurden entsprechend des Ertrags und der daraus berechneten Biogasmenge der jeweiligen Fruchtfolge zurückgeführt.

Die scheinbare Dünger N-Ausnutzung (N_{Gesamt} und N_{NH_4}) (FRØSETH et al. 2014) und N-Verwertungs-Effizienz (EHMELE 1994 zit. n. SCHUSTER et al. 2007, 22) wurden für das Versuchsjahr 2014 mit den Gleichungen 1 und 2 berechnet:

$$\text{Scheinbare Dünger N-Ausnutzung (\%)} = 100 \times \frac{\text{N-Entzug}_{\text{gedüngt}} - \text{N-Entzug}_{\text{ungedüngt}}}{\text{N-Düngung}} \quad (\text{Gl. 1})$$

$$\text{N-Verwertungs-Effizienz (\%)} = 100 \times \frac{\text{N-Entzug}_{\text{Korn}}}{\text{N-Entzug}_{\text{gesamt}}} \quad (\text{Gl. 2})$$

N-Salden wurden mit dem Bilanzierungsmodell REPRO (HÜLSBERGEN und KÜSTERMANN 2005) ermittelt.

3 Ergebnisse und Diskussion

In 2014 waren die Weizenerträge für die Bedingungen des ökologischen Landbaus außerordentlich hoch (Tab. 1). Die niedrige N-Ausnutzung von 21–25 % weist darauf hin, dass trotz langjähriger Düngung nur ein geringer Teil des (organischen) N ertragswirksam umgesetzt wird. In FF 6.1 (50 % Klee grasanteil) waren Ertrag und Rohproteingehalt am höchsten, die N-Ausnutzung jedoch am niedrigsten, der Dünger konnte nicht in gleicher Weise in Ertrag umgesetzt werden. Die hohe N-Verwertungs-Effizienz in allen 3 Fruchtfolgen bestätigt, dass der aufgenommene Stickstoff hauptsächlich für die Kornbildung genutzt wurde, die Effizienz nimmt aber mit höherer N-Düngung in FF 6.1 ab. Obwohl die N-Salden im Weizen sehr hoch sind und auf die Gefahr von N-Verlusten hinweisen, sind sie über die ganze Fruchtfolge gesehen viel niedriger. Dies zeigt, dass es einen N-Transfer in der Fruchtfolge gibt, und macht deutlich wie wichtig ein gutes Fruchtfolgemanagement (z.B. Winterzwischenfrüchte, N-zehrende Kulturen wie Mais) ist, um Verluste zu vermeiden, wenn N-Flüsse intensiviert werden.

Tab. 1: Weizenertrag, Rohproteingehalt und N-Effizienz

	Einheit	Fruchtfolge		
		1.1	5.1	6.1
Kornertrag	dt ha ⁻¹ , 14 % Feuchte	88,9	90,5	92,8
Rohproteingehalt	% TM	10,9	10,1	12,7
Dünger N-Ausnutzung	%			
Korn - N _{Gesamt}		25,2	22,1	20,8
Korn - N _{NH4}		42,7	37,5	35,3
Stroh - N _{Gesamt}		5,5	3,3	6,8
Stroh - N _{NH4}		9,3	5,6	11,6
N-Verwertungs-Effizienz	%	85,2	86,2	79,7
N-Saldo	kg ha ⁻¹			
Weizen		140	153	244
Fruchtfolge		80	55	64

Literatur

Die Literatur kann bei den Autoren angefordert werden.

Danksagung

Die Autoren danken dem Bayerischen Staatsministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten für die Projektfinanzierung.

Modellierung von bedarfsorientierten Biogasanlagen

ENRIQUE KREMERS, RAINER BOLDUAN

1 Kontext der bedarfsorientierten Biogasproduktion

Um eine nachhaltige Energieproduktion zu erzielen und dabei gleichzeitig Systemdienstleistungen zur Stabilisierung der Versorgungssicherheit anbieten zu können, bedarf es einer flexiblen und bedarfsangepassten Stromproduktion. Biogasanlagen können einen bedeutenden Beitrag dazu leisten.

Neben den Zielen, den Bedarf zu decken und maximale Strompreise zu erzielen, ist die Option der Kompensation fluktuierender Stromerzeugung aus Wind und PV ebenso wichtig, um das Netz auch in seiner zukünftigen Entwicklung zu stabilisieren. Dies spiegelt sich z. B. in den Leitszenarien des Netzentwicklungsplans 2033 wider, in dem steile Stromgradienten für die Residuallast vorhergesagt werden.

2 Modellierung

Die vorgestellte Studie basiert auf einem Modell für (einzelne und multiple) Biogasanlagen, die die bedarfsorientierte Stromproduktion für Anwendungen auf unterschiedlichen räumlichen Skalen simuliert. Grundlage ist ein Modell einer individuellen Biogasanlage, mit der die Echtzeit-Biogasproduktion sowie der Speicherfüllstand bestimmt werden. Die Bereitstellung von Flexibilitätskapazitäten erfolgt über einen Ausbau der Gasspeicher- und BHKW-Kapazitäten. Zur Erzielung maximaler Flexibilität wurde die übliche Praxis der Erweiterung eines BHKW-Moduls verwendet. Zudem wird die Wirtschaftlichkeit der Szenarien berücksichtigt. Das individuelle Modell (agenten-basierter Ansatz) wird repliziert und mit regionalen Daten zu einem Anlagenpool bestückt, der simuliert werden kann. Es resultieren folgende mögliche Strategien der Simulation:

- Die optimale Anpassung der technischen Machbarkeit hinsichtlich Reaktionszeit und Lastkurvenanstieg, um steile Stromgradienten ausgleichen zu können
- Orientierung an Strommarktpreisen und Analyse ihrer tatsächlichen Korrelation mit regionalen Bedarfsszenarien.

3 Simulationsergebnis (Beispiel)

Im Folgenden ist ein Szenario für eine Anpassung der Biogasstromproduktion an die Spotmarktpreise für folgende Rahmenbedingungen (s. Abb. 1, links) dargestellt:

- Simulation aller Biogasanlagen einer Großregion; Annahmen: Stromversorgung ausschließlich über Biogasanlagen; Anlagen flexibel ausgelegt, Gasspeicherkapazität

Flexible Strombereitstellung von Kleinvergärungsanlagen – Potenzial und Grenzen im Pilotmaßstab

LAURA WEITZE

Kleinvergärungsanlagen < 75 kW dienen der dezentralen Verwertung von z.B. organischen Reststoffen sowie zur Stromerzeugung und Wärmenutzung vor Ort. Aufgrund von messtechnischen und peripheren Anlagen, die für den Anlagenbetrieb unerlässlich sind, sind kleine Vergärungsanlagen noch immer proportional teurer, als Anlagen mit einer installierten Leistung von z.B. 500 kW. Inwieweit kleine Vergärungsanlagen einen Beitrag zur flexiblen Strombereitstellung leisten, wurde erst unzureichend untersucht.

Mit der containerbasierten Pilotanlage, welche von der BioVAG GbR, DGS Thüringen und der Bauhaus-Universität Weimar, vertreten durch die Professur Biotechnologie in der Ressourcenwirtschaft, entwickelt und durch ein regionales Ingenieurbüro 2009/10 gebaut wurde, galt es Erkenntnisse zu prozessbezogenen Betriebsweisen und notwendigen technischen Baugruppen zu erhalten sowie die Frage nach einer schnell installierbaren Anlage zu beantworten. Das aus EFRE-Mitteln geförderte Projekt zur Projektierung, Bau und Testbetrieb einer kleinen und mobilen Vergärungsanlage – PORTAFERM –, wurde durch eine einjährige Pilotphase erfolgreich betrieben und wissenschaftlich begleitet. Abbildung 1 zeigt die Rückansicht der Pilotanlage mit liegendem Fermenter, Heizzentrale und dem Gärrestzwischenammler.



Abb. 1: Containerbasierte Pilotanlage mit liegendem Fermenter (Quelle: Weitze)

Verschiedene Betriebsweisen zur Flexibilisierung der Biogasproduktion wurden vielerorts bereits unter labortechnischen oder halbtechnischen Maßstäben durchgeführt. Hierzu gehören die Veränderung der Aufenthaltszeit oder die Zugabe von schnell abbaubaren Co-Substraten zur stufenweisen oder stoßartigen Erhöhung der Gasproduktion. Große Herausforderungen bestehen in der Übertragbarkeit von kleintechnischen Versuchen auf das Prozessverhalten von großtechnischen Anlagen. Hierbei stellt die Kleinvergärungsanlage, mit einer installierten elektrischen Leistung von 10 kW und einem Fermentervolumen von 50 m³, eine Brückenfunktion dar.

Im Zuge der einjährigen Testphase wurden verschiedene Betriebszustände untersucht und mit einem definierten Grundbetrieb verglichen. Der Fragestellung nach einer flexiblen Gasproduktion, wurde sich durch eine Veränderung der hydraulischen Aufenthaltszeit und einer stufenweisen Zugabe von Schrot genähert. Die Beurteilung der Leistungsfähigkeit erfolgte durch die Auswertung von Online-Messdaten und durch regelmäßige labortechnische Analysen des Wirtschaftsdüngers sowie des Gärrestes. Die Analysen dienten der Aussagefähigkeit über die technische Ausgereiftheit des Systems, mit der Zielsetzung einer stabilen Fermenterbiologie mit gleichzeitiger Variierung der Eingangsstoffe und -mengen.

Das Poster stellt die Ergebnisse der drei Prozesszustände dar, die im Hinblick auf Potenziale und Grenzen zur flexiblen Strombereitstellung von Kleinvergärungsanlagen ausgewertet werden.

Das Projekt wurde gefördert durch:



GroenGas – InNet

CHRISTOF WETTER, ELMAR BRÜGGING, JAN ORTMANN

1 Projektbeschreibung

Biogas wird in den meisten der rund 8.000 Biogasanlagen in Deutschland und 130 Biogasanlagen in den Niederlanden zur Erzeugung von Elektrizität in einem Blockheizkraftwerk (BHKW) direkt an der Biogasanlage genutzt. Die freigesetzte Wärme kann dabei zum einen oftmals nicht zu 100 % genutzt werden, zum anderen ist die Gaserzeugung aufgrund des sehr trägen Systems schlecht regelbar.

Das produzierte Biogas kann jedoch auch effizienter genutzt werden, wie etwa durch Aufbereitung des Biogases auf Erdgasqualität mit anschließender Einspeisung in das Erdgasnetz, wie es bei rund 150 Biogasanlagen in Deutschland und mehr als 20 Biogasanlagen in den Niederlanden bereits der Fall ist. Dem Biomethan stehen in dieser Form sämtliche Anwendungen offen, für die momentan fossiles Erdgas genutzt wird (siehe Abb. 1). Mit der Speicherung von Biomethan im Erdgasnetz können beispielsweise KWK-Anlagen deutlich besser wärmegeführt betrieben und so der Gesamtwirkungsgrad erhöht werden.

In diesem Projekt wurden die unterschiedlichen Nutzungspfade von Biogas, speziell die von Biomethan, in Hinblick auf ihre ökonomischen und ökologischen Besonderheiten analysiert sowie jeweils Best-Practice-Beispiele aufgeführt. Des Weiteren sind die rechtlichen und wirtschaftlichen Rahmenbedingungen für Biomethan in Deutschland und den Niederlanden untersucht worden.

2 Ergebnisse

Biomethan ist bereits heute für unterschiedliche Zwecke wirtschaftlich einsetzbar. Dazu zählt zum Beispiel die dezentrale Verstromung in BHKW. In das Erdgasnetz eingespeistes Biomethan kann direkt beim Anlagenbetreiber oder über spezialisierte Börsen bezogen und von dem Käufer in KWK-Anlagen eingesetzt werden. Eine Vergütung des KWK-Stroms nach dem EEG ist durch ein Massenbilanzsystem sichergestellt.

Des Weiteren ist Biomethan als Kraftstoff sowohl in Deutschland (rund 200 Tankstellen) als auch in den Niederlanden (rund 130 Tankstellen) bereits weit verbreitet. Durch die nationale Umsetzung der EU-Richtlinie 2009/28/EG sind Mineralölkonzerne verpflichtet, über Beimischung von Biokraftstoffen eine Reduzierung des Treibhausgasausstoßes zu erreichen. Biomethan bietet sich dafür an, da dieses lediglich bilanziell gehandelt wird und technisch mit Erdgas identisch ist. Somit entfallen technische Vorbehalte der Kunden.

Ein weiteres interessantes, bis dato jedoch noch nicht wirtschaftliches, Einsatzszenario ist die stoffliche Nutzung von Biomethan in der Chemieindustrie. Es existieren bereits erste Produkte, welche mit einem vom TÜV SÜD und BASF entwickeltem Verfahren zertifiziert wurden.

Das Ausbauziel der Bundesregierung, eine Jahresproduktion von 6 Mrd. Normkubikmetern Biomethan bis 2020, ist trotz dieser großen Bandbreite an Nutzungsmöglichkeiten noch sehr weit entfernt und mit der aktuellen Förderstruktur auch nur schwer erreichbar. Auf der Erzeugungs- wie auch auf der Abnahmeseite sind jedoch noch große Potentiale vorhanden, sodass eine Anpassung der Förderung wünschenswert ist.

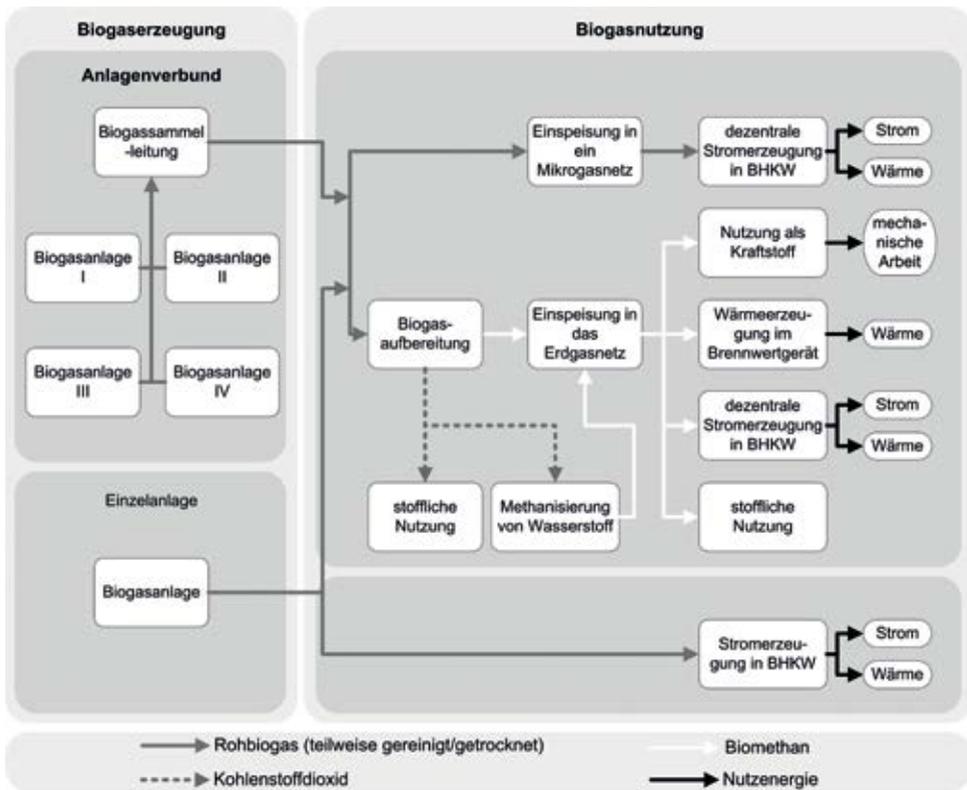


Abb. 1: Nutzungspfade für Biogas

Emissions- und Betriebsverhalten eines mit Biomethan betriebenen Traktors mit Zündstrahlmotor – Erste Ergebnisse

SEBASTIAN MAUTNER, PETER EMBERGER, EDGAR REMMELE, KLAUS THUNEKE

1 Einführung und Zielsetzung

Regional erzeugte Biokraftstoffe leisten einen Beitrag zur Verminderung von Treibhausgasemissionen und erhöhen die Versorgungssicherheit. Derzeit verfügbare Biokraftstoffe sind primär Biodiesel, Pflanzenölkraftstoff, Bioethanol und Biomethan. Für Biodiesel, Pflanzenölkraftstoff und Bioethanol konnte die Eignung als Kraftstoff für landwirtschaftliche Maschinen vielfach unter Beweis gestellt werden. Für die Nutzung von Biomethan als Kraftstoff für landwirtschaftliche Maschinen liegen in Deutschland bislang nur wenige Erfahrungen bezüglich des Emissionsverhaltens und der Praxistauglichkeit vor. Ziel des Untersuchungsvorhabens ist einen für Biomethanbetrieb geeigneten Traktor in einem Feldtest und an einem Prüfstand anhand wiederkehrender Messungen hinsichtlich des Leistungs-, Verbrauchs- und Emissionsverhaltens zu untersuchen.

2 Methodik

Untersuchungsobjekt ist der erste in Kleinserie erhältliche Biomethan-Traktor der Abgasstufe IIIA in Deutschland. Der Traktor hat einen auf ein Zündstrahl-Prinzip umgerüsteten Motor, bei dem sowohl gasförmiger, als auch flüssiger Kraftstoff zeitgleich eingesetzt wird (Dual-Fuel). Es besteht weiterhin die Möglichkeit des reinen Dieselbetriebes. Die Messungen der gesetzlich limitierten Abgasemissionen Kohlenstoffmonoxid (CO), Stickstoffoxide (NO_x), Kohlenwasserstoffe (HC) und Partikelmasse (PM) werden an einem Prüfstand mit einem Non-Road Steady Cycle (NRSC), in Anlehnung an ISO 8178 durchgeführt. Die Leistungsabnahme erfolgt an der Zapfwelle durch eine Wirbelstrombremse (Abb. 1).

Zusätzlich zu den Emissionsmessungen werden Leistungs- und Verbrauchsmessungen durchgeführt. Die Messungen erfolgen sowohl im Dual-Fuel-Betrieb, als auch im reinen Dieselbetrieb. Die Ergebnisse werden hinsichtlich der Unterschiede zwischen Dieselbetrieb und Dual-Fuel-Betrieb diskutiert.



Abb. 1: Aufbau des Versuchsschleppers am Traktorenprüfstand

3 Ergebnisse

Bisher konnte der Traktor seine volle Tauglichkeit für den täglichen Einsatz in mehr als 320 Arbeitsstunden unter Beweis stellen. Weder Leistung noch Verbrauch zeigten eine Verschlechterung während des untersuchten Zeitraums. Die gesetzlich limitierten Abgas-komponenten sind auf vergleichbaren Niveaus. HC- und PM-Emissionen sind im Dual-Fuel-Betrieb höher als im Dieselbetrieb, während die NO_x -Emissionen niedriger sind. Bei den nicht limitierten Emissionen (Methan) zeigen sich starke Unterschiede je nach Betriebspunkt und Umgebungsbedingungen.

4 Ausblick

Auf Basis der ersten Ergebnisse sollen Optimierungen des Dual-Fuel-Betriebes hinsichtlich Emissionen, Leistung und Verbrauch vorgenommen werden. Ein möglicher Ansatz ist die Anpassung des eingesetzten Biomethan/Diesolverhältnisses für verschiedene Lastpunkte. Darüber hinaus werden weitere Erfahrungen im Praxiseinsatz des Traktors gesammelt.

Eigenenergieversorgung in der Lebensmittel- und Getränkeindustrie über die nachhaltige Biogasproduktion aus organischen Reststoffen

KATHARINA HARTMANN

1 Projektvorstellung BIOGAS³

Die Lebensmittel- und Getränkeindustrie produziert in Deutschland jährlich ca. 52 Mio. Tonnen Reststoffe. Bei über der Hälfte davon handelt es sich um biogene Reststoffe, die für die Vergärung in Biogasanlagen geeignet wären. Bei dem Einsatz dieser organischen Reststoffe in Klein-Biogasanlagen besteht ein substantielles Potenzial, die Kosten der Abfallentsorgung kleiner und mittelständischer Unternehmen deutlich zu minimieren.

Zudem ist die Ernährungsindustrie eine Branche mit einem hohen Energiebedarf: bei Heizung, Kühlung und Strom kommt es häufig zu einem hohen Verbrauch und somit zu hohen Kosten. Über den Bau und Betrieb von Klein-Biogasanlagen kann der Energiebedarf von Unternehmen ganz oder teilweise mit Eigenenergie gedeckt werden. Dies trägt zur Energieautarkie und zu weiteren Kosteneinsparungen bei (dargestellt in Abb. 1).

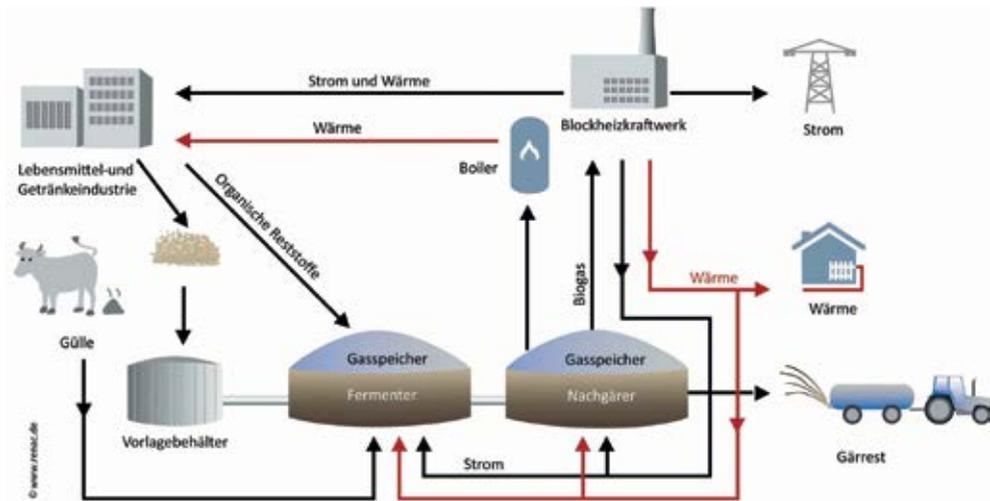


Abb. 1: Integration einer Biogasanlage in die Produktionsprozesse der Ernährungsindustrie

2 Projektziel

Ziel des Projekts BIOGAS³ ist es, die Eigenenergieversorgung in der Lebensmittel- und Getränkeindustrie über die nachhaltige Biogasproduktion aus organischen Reststoffen zu fördern.

Studien belegen zwar ein substanzielles Ausbaupotenzial für die Biogasproduktion in der Ernährungsindustrie, die energetische Nutzung dieser Reststoffe über die Biogasproduktion ist jedoch noch nicht ausgeschöpft (GAIDA et al. 2013).

Insbesondere in Branchen wie der Milch- und Fleischproduktion, Bäckereien, der Gemüse- und Obstverarbeitung sowie der Stärke- und Ölherstellung fallen organische Reststoffe an, die einen sehr hohen Energiegehalt aufweisen und sich ideal für den Einsatz in Biogasanlagen eignen (Tab. 1).

Tab. 1: Energiegehalte unterschiedlicher Substrate der Ernährungsindustrie (KTBL 2015, ergänzt)

Energiegehalte unterschiedlicher Substrate	TS-Gehalt %	oTS-Gehalt %	Biogas m ³ /t FM	Methangehalt %	Primärenergie kWh/t
Molke	5	92	34,5	53	183
Biertreber	24	96	122,1	59	720
Kartoffelpülpe	25	94	143,4	50	717
Schlachtabfälle	15	84	60,5	55	333
Brot- und Backreststoffe	65	97	479,2	53	2540
Vgl.: Maissilage	35	95	216,1	52	1124

3 Projektinhalte

Innerhalb des BIOGAS³ Projektes wurden bereits mehrere Berichte zu Umsetzungsmöglichkeiten, Kooperationsmodellen und den rechtlichen sowie den finanziellen Rahmenbedingungen für Klein-Biogasanlagen erarbeitet und veröffentlicht.

Wie sich eine Biogasanlage optimal in die Prozesse der Lebensmittel- und Getränkeindustrie integrieren lässt und inwieweit sie zur Energieversorgung, Energieeffizienz und Kostensenkung des jeweiligen Betriebs beiträgt, ist in jedem Fall individuell zu prüfen.

In den von BIOGAS³ angebotenen Workshops und Trainingsevents wurden so bereits diverse Lebensmittel- und Getränkeproduzenten über die Möglichkeiten der Eigenenergieversorgung ihres Betriebs informiert und individuell beraten. Neben den Schulungsevents zählen auch kostenfreie persönliche Beratungen und die Durchführung individualisierter Wirtschaftlichkeitsberechnungen sowie Betriebsbesichtigungen zu dem Portfolio von BIOGAS³.

Literatur

Gaida, B. et al. (2013): Bestandsaufnahme zum biogenen Reststoffpotential der deutschen Lebensmittel- und Biotechnik-Industrie. Hochschule Bremen

Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V. (KTBL) (2015): Wirtschaftlichkeitsrechner Biogas. <http://daten.ktbl.de/biogas/>

Einbindung von Güllebiogasanlagen in das Energiemanagementsystem von Milchviehställen

MANFRED HÖLD, HEINZ BERNHARDT, JÖRN STUMPENHAUSEN

1 Einleitung

Durch Förderung der Produktion von erneuerbarer Energie sind viele Landwirte mit dem Einstieg in die Stromproduktion aus Biogas, Photovoltaik, Windkraft neben ihrer Funktion als Nahrungsmittelproduzent auch zum Energieproduzenten geworden. Durch Absenkung der Einspeisevergütung für Strom aus Biomasse [§43 EEG 2014] – außer bei Gülleanlagen bis 75 kW Leistung [§45 EEG 2014] – und steigenden Preisen für Zukaufstrom ist es für landwirtschaftliche Milchviehbetriebe sinnvoll, einen hohen Anteil am Gesamtstromverbrauch durch eigenproduzierten Strom zu decken.

Im zukünftig hochgradig technisierten und automatisierten Milchviehstall wird zunehmend Energie in Form von Strom und Wärme benötigt. Um einerseits einen hohen Anteil an eigen produziertem Strom am Gesamtstromverbrauch zu erreichen und andererseits die Belastung des öffentlichen Stromnetzes möglichst gering zu halten, wurde das Projekt „Integrated Dairy Farming – Stall 4.0“ gestartet.

2 Fragestellung

Zu klären ist, in wie weit die Stromproduktion aus Biogas durch Güllevergärung über das Energiemanagementsystem (EMS) des Milchviehstalls sinnvoll gesteuert werden kann, um einerseits den Milchviehstall möglichst mit eigenproduziertem Strom zu versorgen und andererseits dem Verteilnetzbetreiber eine Steuergröße anbieten zu können, so dass dieser die Netzstabilität aufrecht erhalten kann. Zudem wird betrachtet, wie die anfallende Wärme bei der Verstromung von Biogas in das Konzept „Integrated Dairy Farming – Stall 4.0“ integriert werden kann.

3 Material und Methode

Um die Gülle-Biogasanlage in das EMS einzubinden wird die theoretische Anlagenleistung anhand von Basiswerten berechnet. Der Bedarf an elektrischer bzw. thermischer Leistung der einzelnen Verbraucher im Milchviehstall wird anhand von Lastgängen auf mehreren Praxisbetrieben ermittelt.

Die Biogasanlage muss somit mehrere Aufgaben innerhalb des EMS in Abhängigkeit verschiedener Parameter übernehmen:

- Bereitstellung von elektrischer Energie, wenn Energie im Stall benötigt wird;
- Bereitstellung von elektrischer Energie, wenn Energie im Stromnetz des Verteilnetzbetreibers benötigt wird;
- Speicherung von Biogas, wenn keine elektrische Energie benötigt wird.

Die Biogasanlage muss eine dementsprechend ausreichende Speicherkapazität besitzen um die Anforderungen des Energiemanagementsystems zu erfüllen.

4 Ergebnisse

In Abbildung 1 ist dargestellt, wie eine mit Gülle betriebene Biogasanlage dimensioniert sein kann, wenn davon ausgegangen wird, dass die Anlage nur acht Stunden am Tag das Biogas verbrennt und Strom erzeugt.

Gülleanfall ¹⁾	TS-Gehalt	Trockensubstanz	org. Masse	org. Masse
m ³ / Kuh und Jahr	%	kg / Kuh und Jahr	% von TS	kg org.Masse / Kuh und Jahr
20,0	10,0	2.000,0	82,5	1.650,0
Biogas ²⁾	Biogasvolumen	Methangehalt ²⁾	Methan	
l/kg org. Masse	m ³ / Kuh und Jahr	%	m ³ / Kuh und Jahr	
418,0	689,7	56,9	392,4	
1 m³ Methan ~ 3,3 - 4,3 kWh_{el} ³⁾ --> ø kWh_{el}				
elektr. Energie in kWh / Kuh und Jahr				1.491,3
Anzahl der Kühe im Milchviehstall				120
elektr. Energie in kWh / Jahr				178.952
Volllaststunden des Verbrennungsmotors pro Tag				8
Anlagengröße in kW				61

Abb. 1: Auslegung des elektrischen Generators einer Biogasanlage bei reduzierter Laufzeit

¹⁾ Wendland, M. et al. (2012): Leitfaden für die Düngung von Acker- und Grünland, Freising.

²⁾ Strauß, G. (2012): Keimreduktion in Biogasfermentern und Biogaserträge von Rindergülle unterschiedlicher Provenienz.

³⁾ Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V. (KTBL) (2013): Faustzahlen Biogas, Darmstadt, 3. Auflage.

Literatur

EEG (2014): Erneuerbare-Energien-Gesetz vom 21. Juli 2014 (BGBl. I S. 1066), das zuletzt geändert durch Artikel 1 des Gesetzes vom 22. Dezember 2014 (BGBl. I S. 2406)

Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V. (KTBL) (2013): Faustzahlen Biogas, Darmstadt, 3. Auflage

Strauß, G. (2012): Keimreduktion in Biogasfermentern und Biogaserträge von Rindergülle unterschiedlicher Provenienz, http://www.lufa-speyer.de/downloads/12-2012_Rinderguelle-Biogasertrag.pdf, Zugriff am 12.06.2015

Wendland, M. et al. (2012): Leitfaden für die Düngung von Acker- und Grünland, Freising

Wirtschaftliche Potenziale und rechtliche Rahmenbedingungen für Biogaskleinanlagen in der Großregion Saarland/ Frankreich/ Luxemburg und Belgien (Wallonie)

KATHARINA LAUB, BERNHARD WERN

1 Hintergrund

In den Ländern Deutschland, Frankreich, Luxemburg und Belgien existieren sehr unterschiedliche Förderregime für Biogas. Um für Investoren und Politik einen Vergleich der verschiedenen Förderregime zu ermöglichen und somit letztendlich einen überregionalen Austausch zu gewährleisten, wurde das INTERREG-Projekt „Ecobiogaz“ initiiert. Beteiligt sind Partner aus der ganzen Großregion (GR), also aus Teilen Frankreichs, Wallonie, Luxemburg, Rheinland-Pfalz und dem Saarland.

Ziel des Projektes ist es, die Rahmenbedingungen von Biogas in den vier genannten Ländern zu erfassen und Vorschläge für deren Optimierung zu erarbeiten. Hierfür werden die ökonomischen und rechtlichen Rahmenbedingungen und Wechselwirkungen analysiert. Die Länder werden miteinander verglichen und die Ergebnisse dieser Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen bilden die Grundlage für eine spätere Potenzialanalyse von Kleinbiogasanlagen in der Großregion.

Reststoffe aus der Landwirtschaft bieten ein interessantes und in der Großregion noch häufig ungenutztes Potenzial zur Energiegewinnung. In Deutschland allerdings führte die Schaffung von Anreizen für einen vermehrten Gülleeinsatz in Biogasanlagen zu Fehlentwicklungen, da hierdurch in vielen bereits viehstarken Regionen eine zusätzliche Erzeugung von Gärsubstraten stattfand. Eine mögliche Lösung des Konflikts bietet im EEG 2014 die gezielte Förderung von Güllekleinanlagen. Das gesetzliche und wirtschaftliche Umfeld zur Errichtung von Biogaskleinanlagen ist in den vier Ländern der Großregion sehr unterschiedlich. Dies wird u. a. in der unterschiedlichen Ausbaugeschwindigkeit deutlich. Deutschland nimmt hier eine klare Vorreiterstellung ein.

2 Wirtschaftliche Analyse

Im Projekt wurden verschiedene Biogaskleinanlagen mit unterschiedlichem Substratmix (80 % Gülle, 20 % Kosubstrat bzw. 100 % Gülle) in der Regionen miteinander verglichen. Insbesondere die Vergütungsrahmen haben sich im Laufe der letzten Jahre in der gesamten GR geändert. Wobei weiterhin eine spezielle Förderung güllebasierender Kleinanlagen nur für Deutschland existiert. In Anbetracht der Vergleichbarkeit der verschiedenen Modellierungen zwischen den einzelnen Ländern der GR muss beachtet werden, dass die gewährte Einspeisevergütung in allen Ländern für unterschiedliche Zeiträume geregelt

ist. Während in Deutschland die jeweilige EEG- Vergütung speziell für Kleinanlagen auf 20 Jahre fixiert ist, sind es in Frankreich und Luxemburg nur 15 Jahre und in Belgien ist die Vergütung auf 10 Jahre festgelegt. Auch die Vergütung der Wärme ist unterschiedlich organisiert. In Belgien und Frankreich ist die Vergütung des Stromes an die Nutzung der Wärme gekoppelt, in Deutschland und Luxemburg dagegen nicht.

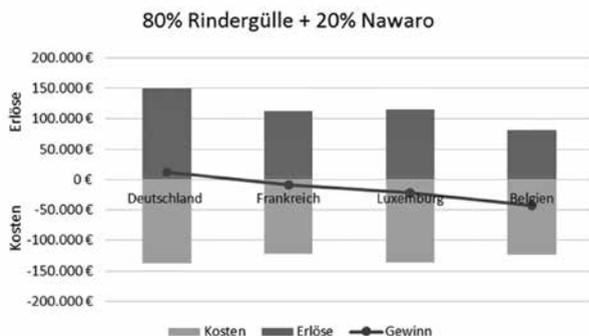


Abb. 1: Wirtschaftlichkeit 75 kW Anlage in der GR
(Quelle: Projekt Ecobiogaz 2014)

Die wirtschaftliche Vergleichsrechnung für Kleinanlagen (siehe Abb. 1) zeigt große Rentabilitätsunterschiede zwischen den betrachteten Ländern. Im Bereich der Kleinbiogasanlagen ist einzig in Deutschland ein wirtschaftlicher Betrieb gegeben. Trotz teilweise bestehender Investitionsförderungen in den anderen Ländern wie z.B. Belgien können die Stromerzeugungskosten weder mit den reinen Stromerlösen noch mit den Gesamterlösen (Kombination aus Strom- und Wärmeerlösen) gedeckt werden.

So ist es auch nicht weiter überraschend, dass in Belgien (Wallonie), Luxemburg und Frankreich keine bzw. kaum Kleinanlagen errichtet werden.

Die Rentabilität der Kleinanlagen ist generell abhängig vom Methangehalt der Gülle. Außerdem spielt das Vorhandensein eines Gärrestlagers eine große Rolle in der Kostenbetrachtung. Durchschnittlich liegen die Produktionskosten bei 22 €/ct/kWh_{el}.

3 Fazit

Für die Gewährleistung eines wirtschaftlichen Betriebs von Güllekleinanlagen ist es erforderlich, dass die Produktionskosten von 22 ct/kWh_{el} durch die entsprechende Stromvergütung gedeckt sind. Eine Wärmenutzung ist positiv, sollte aber vor dem Hintergrund eines generell höheren Eigenwärmebedarfs bei Kleinanlagen nicht für die Rentabilität erforderlich sein. Mit der Nichtanerkennung des Eigenwärmebedarfs der Fermenterbeheizung besteht vor allem in Frankreich dringend Handlungsbedarf in der gesetzlichen Vergütungsstruktur, falls die Installation solcher Anlagen politisch gewünscht ist.

Literatur

Projekt Ecobiogaz (2014): Wirtschaftliche Modellierung von Gülle-Kleinanlagen in der Großregion, Saarbrücken

Projekt Ecobiogaz (2015): Rechtliche Rahmenbedingungen der Errichtung und des Betriebs von Biogasanlagen, Saarbrücken

Humusgehalte und Bodenleben unter Energiepflanzenfruchtfolgen

KATHARINA WINTER

1 Bodenuntersuchungen im EVA-Verbund-Projekt

Der Anbau von Energiepflanzen zur Substratbereitstellung für Biogasanlagen bietet zahlreiche Anbauoptionen. Trotz Fruchtfolgealternativen mit nahezu vergleichbaren Methanerträgen wird in der landwirtschaftlichen Praxis weiterhin weitgehend Silomais genutzt. Das EVA-Verbundprojekt untersucht verschiedene vierfeldrige Fruchtfolgen zu unterschiedlichen Fragestellungen, so auch zum Zustand von Böden beim Anbau von Energiepflanzen. Böden sind die essentiellen natürlichen Ressourcen für die Landwirtschaft, deren Funktionen notwendigerweise zu erhalten sind. Diese als Lebensgrundlage und Lebensraum für Bodenorganismen zu schützen ist notwendige Voraussetzung für deren Umsatzleistungen, weshalb dies auch im Bundesbodenschutzgesetz festgeschrieben ist. Die Aktivitäten der Organismen führen zur Mineralisierung von Nährstoffen, wie zu stabilen Kohlenstoffverbindungen (Humus). Ergebnisse vom Versuchsstandort Dornburg in Thüringen zeigen die Effekte für Humusgehalt und Bodenleben bei vier verschiedenen EVA-Fruchtfolgen.

Die Berechnung der Humusbilanz der Fruchtfolgen wurde nach VDLUFA durchgeführt. Für die mikrobiologischen Analysen fanden von 2008 bis 2011 im Herbst und Frühjahr Bodenprobennahmen statt. Die Düngung der Fruchtfolgen erfolgte ausschließlich mineralisch, bei Stickstoff nach SBA.

Das Verbund-Projekt „Entwicklung und Vergleich von optimierten Anbausystemen für die landwirtschaftliche Produktion von Energiepflanzen unter den verschiedenen Standortbedingungen Deutschlands III“ (EVA III) wird vom Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft durch die Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe (FNR) gefördert.

Für die Durchführung der mikrobiologischen Untersuchungen danke ich Dr. Sabine Tischer von der Martin-Luther-Universität Halle.

2 Ergebnisse

2.1 Humusbilanz

Die nach VDLUFA (2014) errechneten Humusbilanzen der untersuchten Fruchtfolgen zeigen sich, unter reiner Biomassennutzung, negativ. Nur mit der Rückführung der Gärprodukte entstehen ausgeglichene Werte. Eine Ausnahme bildet das Ackerfutter. Hier

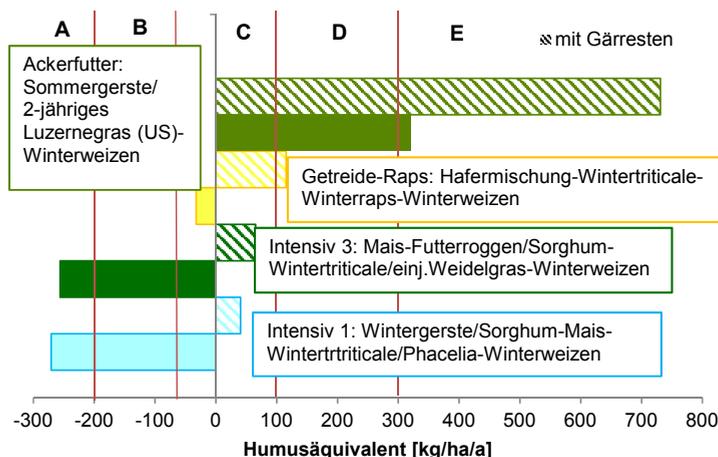


Abb. 1: Humusbilanz der 4 Fruchtfolgen: Jahresmittelwert aus zwei Rotationen, nach VDLUFA (2014) unterer Wert (Erhaltung), die gestreiften Balken zeigen die Humusreproduktion mit dem Einsatz von Gärresten; Humusreproduktion A = sehr niedrig, B = niedrig, C = ausgeglichen, D = hoch, E = sehr hoch

entwickelt sich auch ohne organische Düngung eine sehr hohe Humusreproduktion. Die so gesparten Düngermengen können auf anderen Flächen eingesetzt werden (Abb. 1).

2.2 Mikroorganismen-tätigkeit im Boden

Im Vergleich der Fruchtfolgen trat eine erhöhte Mikroorganismenaktivität in der Fruchtfolge „Intensiv 1“ auf. Auch andere bodenbiologische Parameter, wie die enzymatische Umsetzung, deuteten auf höhere Aktivität hin. Die Kombination von C3- und C4-Pflanzen in der Fruchtfolge „Intensiv 3“ erschien dagegen weniger vorteilhaft. Eine noch geringere Attraktivität für das Bodenleben bot die Fruchtfolge Getreide-Raps. Die Variante mit mehrjährigem Ackerfutter zeigte zwar niedrige, aber sehr stabile Werte über den Untersuchungszeitraum.

3 Fazit

Zur Erhaltung und Aktivierung des Bodenlebens sind Anbausysteme mit möglichst diversen Pflanzenarten vorteilhaft. Wichtig ist dabei die Versorgung mit organischer Substanz als Nährstoff für die Bodenorganismen. Beim Anbau von Energiepflanzen führt die Rückführung der Gärprodukte zum Ausgleich der Humusbilanz. Einen sehr guten Beitrag dazu kann der Anbau von 2-jährigem Leguminosen-Gräser-Gemenge, wie Luzernegras, leisten.

„THG-Rechner Biogas“: Eine Web-Anwendung für die Analyse der Treibhausgasemissionen von Biogasbetrieben

MATHIAS EFFENBERGER, ANDREAS BUSCHMANN, MONA MAZE, BIANCA ZERHUSEN

1 Einleitung und Problemstellung

Die Treibhausgas(THG)-Bilanz von Biogasketten stellt sich sehr variabel dar und ist mit erheblichen Unsicherheiten behaftet. Sollen die spezifischen Umweltwirkungen für eine reale Biogasanlage berechnet werden, so stehen hierfür kaum Hilfsmittel zur Verfügung, die auch von einem Laien in Sachen Ökobilanzierung verwendet werden können. Durch Vergleich der Ergebnisse von Modellstudien mit ähnlicher Konfiguration lässt sich die Bilanz hingegen nur grob abschätzen. Wir haben daher die Webanwendung THG-Rechner Biogas entwickelt, mit welcher die THG-Emissionen von Biogasketten für landwirtschaftliche Einsatzstoffe unter Berücksichtigung betrieblicher und standörtlicher Gegebenheiten ermittelt werden können.

2 Konzeption der Web-Anwendung

Vorrangige Zielstellung für die Konzeption der Webanwendung war es, die Nutzer für die THG-Bilanz der Energiebereitstellung aus Biogas zu sensibilisieren und mit dem erforderlichen Wissen über wesentliche Einflussfaktoren auszustatten. Die Genauigkeit und Darstellung der Bilanzierungsergebnisse in absoluten Werten hatten vor diesem Hintergrund nur zweite Priorität.

Um eine betriebsindividuelle Abschätzung der Treibhausgas- und Energiebilanz vorzunehmen, wird ausgehend von Standardwerten die Bilanz durch die Angaben des Nutzers zunehmend konkretisiert. Wichtige Aktivitätsdaten werden größtenteils vom Nutzer abgefragt. Bilanzglieder mit vergleichsweise geringer Bedeutung für das Endergebnis werden zu Gunsten der Benutzerfreundlichkeit aus der Literatur geschätzt oder auf der Grundlage von Modellen errechnet. Die Anwendung ist so ausgelegt, dass sie auch bei einem Minimum an betriebsspezifischen Angaben ein (dann allerdings entsprechend unsicheres) Ergebnis liefert.

Das Bilanzierungsmodell betrachtet die Biogaskette als einen von mehreren möglichen Zweigen eines landwirtschaftlichen Betriebs. Am Beginn steht die Rohstoff-/Substratbereitstellung, wobei Wirtschaftsdüngern tierischer Herkunft und Reststoffen keine vorgelagerten Umweltwirkungen angerechnet werden. Der landwirtschaftliche Betrieb wird anhand des Landkreises, der Wirtschaftsweise, der Betriebsgröße und der durchschnittlichen Schlaggröße modelliert. Die Anbau-Biomasse kann anhand des TM-Gehaltes und

gegebenenfalls des Entwicklungsstadiums zur Ernte näher beschrieben werden. Die Biogasanlage wird auf Grundlage der Angaben zur baulichen Ausstattung, zum Management und zu den Energieströmen modelliert. Die Biogasverwertung wird bis zur Einspeisung ins Stromnetz (ohne Berücksichtigung von Umspannverlusten) bilanziert. Die berechneten Umweltwirkungen werden auf die Nutzenergie in Form von Wärme und Strom bezogen.

3 Möglichkeiten der Web-Anwendung

Entsprechend der Eingaben bzw. der hinterlegten Standardwerte werden in der Anwendung die absoluten Werte der THG-Emission berechnet und auf die jeweilige funktionelle Einheit umgelegt. Für den Nutzer wird der Anteil der einzelnen Bilanzposten tabellarisch und in Form eines Kreisdiagramms dargestellt (Beispiel siehe Abb. 1). Ausgehend vom Status der Bilanzergebnisse können für verschiedene Maßnahmen (einzeln oder in Kombination) die Effekte auf die analysierten Umweltwirkungen berechnet werden.

Die Anwendung ist in ihrer jetzigen Form voll funktionsfähig und bietet zahlreiche Anknüpfungspunkte für eine Erweiterung des Bilanzierungsmodells um derzeit nicht berücksichtigte Prozesse wie Landnutzungsänderungen und Humusbilanz oder nur in vereinfachter Form abgebildete Prozesse wie die Nährstoffbilanz und die standörtlichen Gegebenheiten.

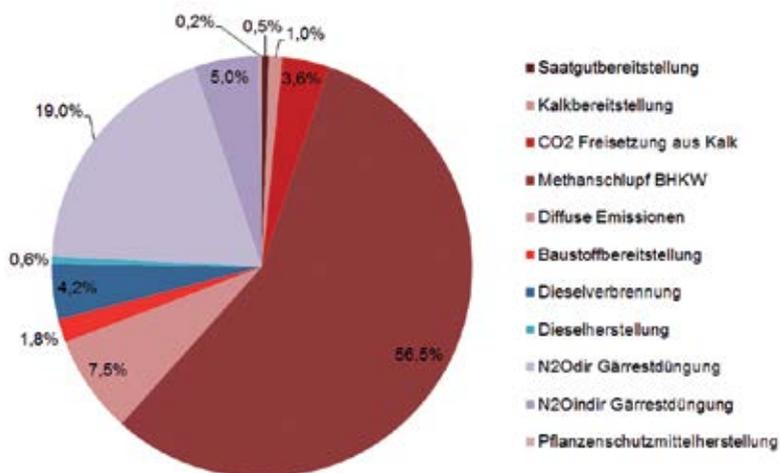


Abb. 1: Kreisdiagramm zur Aufteilung der gesamten THG-Emissionen für einen Beispielbetrieb mit über 90 % Massenanteil von Wirtschaftsdüngern an den Einsatzstoffen

Einfluss der Fruchtfolgegestaltung auf die Treibhausgasemissionen im Energiepflanzenanbau – Ergebnisse aus dem EVA-Projekt am Standort Dornburg

CHRISTIANE PETER, JENS ECKNER

1 Einleitung

In Deutschland nahm die Erzeugung von Biogas aus Energiepflanzen in den letzten Jahren stetig zu. Durch die positiven Eigenschaften von Mais für die Biogasherstellung können regional hohe Maisdichten entstehen, die möglicherweise negative Umweltwirkungen zur Folge haben. Ein wichtiger ökologischer Indikator für die Bewertung von Biogas sind die klimarelevanten Spurengase, die beim Anbau von Biomasse entstehen. Als Basis für eine Bewertung der Auswirkungen auf die Umwelt wurden in Feldversuchen im EVA-Projekt verschiedene Energiepflanzenfruchtfolgen hinsichtlich ihrer Treibhausgasemissionen (THG-Emissionen) bewertet, um sie mit dem Referenzsystem Silomais in Selbstfolge vergleichen zu können. Die Ergebnisse bilden die Grundlage für eine Optimierung von Energiepflanzenfruchtfolgen, sowie für die Ableitung von Anbauempfehlungen.

2 Material und Methoden

Die fünf untersuchten Fruchtfolgen (Abb. 1) bestehen überwiegend aus annuellen Energiepflanzen und wurden am Standort Dornburg (Thüringen) seit 2005 in Parzellenversuchen angebaut. Auf der Grundlage der experimentellen Daten (Erträge, Inhaltsstoffe, Anbauverfahren) wurden detaillierte THG-Emissionsberechnungen mit dem im Projekt entwickelten multivarianten empirischen Modell MiLA (GLEMNITZ et al. 2013; basierend auf den internationalen Standards für Ökobilanzen) durchgeführt. Als Systemgrenze wurde das Futterlager (Silo) definiert.

3 Ergebnisse

Im Vergleich einzelner Kulturarten und Fruchtfolgekombinationen verursacht der Anbau von *W. Triticale*-Ganzpflanzensilage (GPS), auf dem Getreidegunststandort Dornburg flächenbezogen geringere und produktbezogenen gleich hohe Emissionen wie Mais (Abb. 1, 2). Aufgrund der effizienten Stickstoffumsetzung und der Substrateigenschaften des Maises liegt die Kultur trotz hoher flächenbezogener Emissionen und N-Aufwendungen auf einem niedrigen Emissionsniveau. Die aufwandsintensiven Zweikultursysteme (Mix 1–3) bieten bei hoher Flächeneffizienz jedoch geringere Emissionseinsparpoten-

ziale. Extensivierungsansätze mit mehrjährigem Luzernegras bei geringem Stickstoffaufwand und adäquater Ertragsleistung zeigen geringe produktbezogene Emissionen. Zusammenfassend stellt diese extensive Ackerfutterfruchtfolge eine emissionsmindernde, energieeffiziente und ökologisch wertvolle Alternative für die Biogassubstratbereitstellung dar. Die vielgliedrigen und abwechslungsreichen Fruchtfolgen Mix 1, 2 und 3 sind mit der Maisselbstfolge bezüglich der der aufgezeigten THG-Emissionen (flächen- und produktbezogen) nicht vergleichbar. Vor dem Hintergrund der Minimierung des Ertragsrisikos, der arbeitswirtschaftlichen Aspekte und möglicher Leistungen hinsichtlich Gewässer- und Bodenschutz (Bodendeckung über Winter, N-Fixierung, Humusbilanz), Biodiversität und Landschaftsbild haben aber abwechslungsreiche Fruchtfolgen eine bevorzugte Anbauberechtigung.

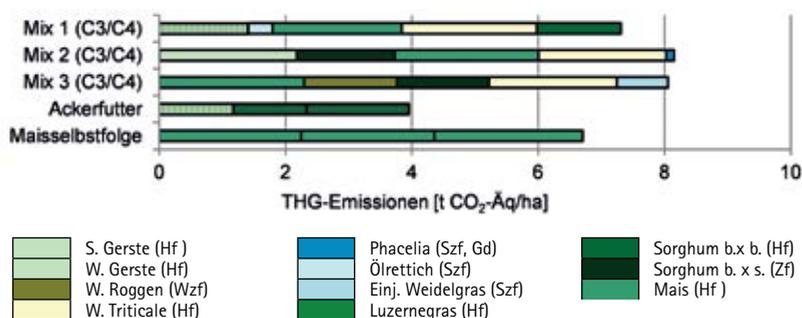


Abb. 1: THG-Emissionen pro ha der fünf Fruchtfolgen gemittelt über Mix 1 (Anlage 1+2; 2004–2008), Mix 2 (Anlage 3+4; 2009–2012), Mix 3, Ackerfutter und Maisselbstfolge (Anlage 1–4; 2005–2012) am Standort Dornburg (alle Fruchtarten wurden als GPS geerntet, Hf = Hauptfrucht, Szf = Sommerzwischenfrucht, Wzf = Winterzwischenfrucht, Zf = Zwischenfrucht)

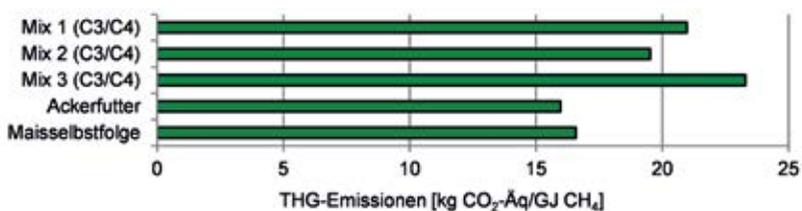


Abb. 2: THG-Emissionen pro GJ Methanertrag der fünf Fruchtfolgen gemittelt über Mix 1 (Anlage 1+2; 2004–2008), Mix 2 (Anlage 3+4; 2009–2012), Mix 3, Ackerfutter und Maisselbstfolge (Anlage 1–4; 2005–2012) am Standort Dornburg

Literatur

Glemnitz, M.; Willms, M.; Platen, R.; Specka, X.; Peter, C.; Prescher, A.-K.; von Buttlar, C.; Kräling, B. (2014): Ökologische Folgewirkungen des Energiepflanzenanbaus EVA II, Endbericht, Teilprojekt 2, Müncheberg, ZALF

Modellierung des Stickstoffaustrages bei der Verwendung von Gärrestdünger – Ergebnisse aus dem EVA-Projekt

ANNE-KATRIN PRESCHER, MICHAEL GLEMNITZ

1 Einleitung

Bei der Erzeugung von Biogas in Biogasanlagen fallen systembedingt im Fermenter als Nebenprodukt nährstoffreiche Gärreste an, die im Allgemeinen von den Landwirten direkt als organische Dünger genutzt werden. Dies bietet die Möglichkeit, den Bedarf an mineralischen Düngern zu reduzieren und einen Teil der gebildeten organischen Substanz auf die Fläche zurückzuführen. Die ökologischen Folgewirkungen der Gärrestdüngung sind jedoch noch Gegenstand wissenschaftlicher Untersuchungen. Besonders der Einfluss von Gärresten auf den Stickstoffaustrag in das Grundwasser ist noch unklar. Eine Studie von SVOBODA et al. (2013) zeigte ein vergleichbares Nitrataustragspotenzial bei der Düngung mit Gärresten und Gülle, wohingegen PÖTSCH (2005) höhere Nitratkonzentrationen im Sickerwasser nach Gärrestdüngung beobachtete. In dieser Studie soll daher untersucht werden, welchen Einfluss die Verwendung von Gärresten anstelle von mineralischen Düngern auf den Stickstoffaustrag in das Grundwasser hat.

2 Material und Methoden

Es wurde der Kleine Gärrestversuch des EVA-Projektes untersucht, bei dem drei N-Düngevarianten miteinander verglichen wurden: 1. 100 % N aus mineralischer Düngung, 2. 50 % N aus mineralischer und 50 % N aus organischer Düngung und 3. 100 % N aus organischer Düngung. Der Versuch startete in 2009 (Anlage 1) bzw. 2010 (Anlage 2) und umfasst eine Fruchtfolge von Mais – Winterroggen/Sudangras – Wintertriticale/Einjähriges Weidelgras – Winterweizen. Das Modell MONICA wurde im Rahmen des Projektes für die Verwendung von Gärrestdüngern parametrisiert: neben Trockenmasse-, Nitrat-, Ammonium- und Harnstoffgehalt, werden Parameter über den Anteil von schnell bzw. langsam abzubauenen Substanz und deren Eigenschaften berücksichtigt. Mit Hilfe der Parameterwerte für Rindergülle, die bereits in MONICA vorlagen, wurde der Parametersatz für Gärrestdünger ermittelt.

3 Ergebnisse

Im Allgemeinen scheint bei der Verwendung von Gärresten der mittlere absolute Fehler zwischen gemessenen und modellierten $N_{\min}(0-30 \text{ cm})$ -Werten zu sinken, wenn die Pa-

parameter eine langsamere Mineralisierung im Boden definieren. Nach der Anpassung des Parametersatzes für Gärreste verbesserte sich die Güte der $N_{\min}(0-30\text{ cm})$ -Modellierung und der Ertragsmodellierung (Abb. 1). Mithilfe des so ermittelten Parametersatzes für Gärreste konnte die Stickstoffauswaschung bei Gärrest-Anwendung mit MONICA modelliert werden (Abb. 2).

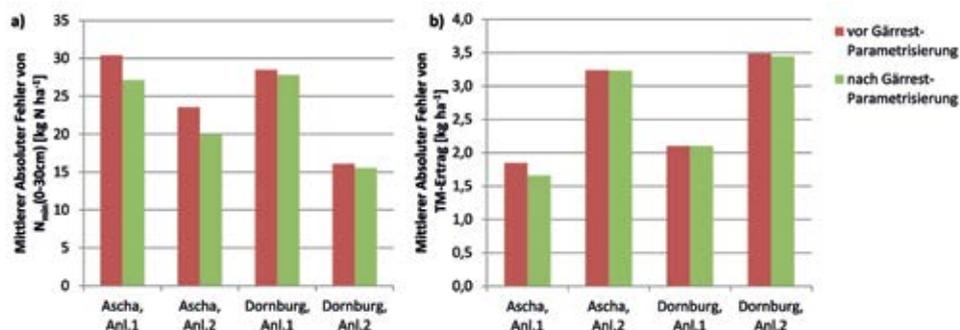


Abb. 1: Mittlerer absoluter Fehler zwischen gemessenen und modellierten Werten von (a) $N_{\min}(0-30\text{ cm})$ und (b) Trockenmasseertrag vor bzw. nach der Parametrisierung des Gärrestdüngers. Vor der Gärrest-Parametrisierung wurde der Parametersatz für Rindergülle zur Berechnung benutzt.

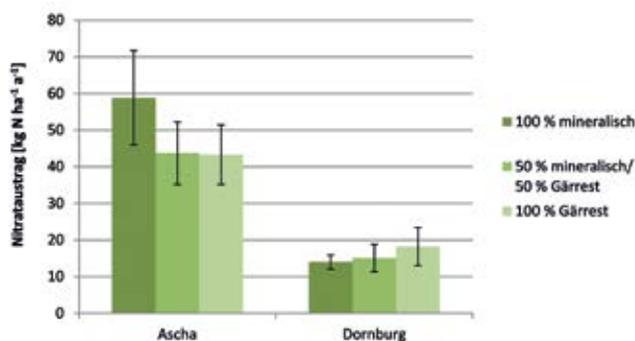


Abb. 2: Modellierter Stickstoffaustrag in 1,2 m Tiefe für die drei verschiedenen Düngervarianten in Ascha und Dornburg (Mittelwert und Standardabweichung über zwei Anlagen)

Literatur

- Pötsch, E. (2005): Abschlussbericht zum Forschungsprojekt BAL 2941: Nährstoffgehalt von Gärückständen aus landwirtschaftlichen Biogasanlagen und deren Einsatz im Dauergrünland
- Svoboda, N.; Taube, F.; Wienforth, B.; Kluß, C.; Kage, H.; Herrmann, A. (2013): Nitrogen leaching losses after biogas residue application to maize. Soil and Tillage Research, 130, pp. 69–80

Was ist und was will Bioökonomie? – Perspektive der Ethik

BIRGIT KRÖBER, NATALIA MATIZ, MARLIES HÄRDTLEIN, LUDGER ELTROP,
THOMAS POTTHAST

1 Einleitung

Leitende Idee der Bioökonomie ist die verstärkte Nutzung nachwachsender Rohstoffe und biogener Reststoffe in stofflichen und energetischen Verwendungspfaden (BMBF 2010). Das Potenzial an verfügbarer Biomasse in Deutschland ist jedoch begrenzt und zum großen Teil bereits in Nutzung (FNR 2014). Zusätzlich möchten immer mehr Branchen und Industriezweige von der Biomasse profitieren. Aufgrund dieses starken Nutzungsdrucks und insbesondere der Konkurrenz zur Nahrungsmittelproduktion haben sich gesellschaftliche Kontroversen und Akzeptanzdiskussionen um den Biomasseanbau entwickelt. Dabei geht es nicht nur um die „Teller-Tank“-Problematik und (weltweit) steigende Lebensmittelpreise, sondern ebenso um ästhetische und ökologische Aspekte der Kulturlandschaft. Diese Situation gibt Anlass, über eine gezielte Neuausrichtung der Biomassenutzung und über die Programmatik der Bioökonomie, auch unter ethischer Perspektive, nachzudenken. Unser Poster zeigt, welche Aspekte das neue Feld Bioökonomie implizit und explizit berührt und über welchen Ansatz vielversprechende Pfade der Biomassebereitstellung und -nutzung für eine Etablierung der Bioökonomie mit besonderem Blick auf ethische Aspekte ermitteln werden können.

Das Projekt „Indikatoren Biomassenutzung Baden-Württemberg 2.0 – Schlüsselindikatoren für eine Bewertung von integrierten Biomasse-Nutzungspfaden für Baden-Württemberg“ wird im Forschungsprogramm Bioökonomie Baden-Württemberg durch das Ministerium für Wissenschaft, Forschung und Kunst, BW unterstützt und durch die Baden-Württemberg Stiftung finanziert.

2 Implikationen und Interpretationen?

Bioökonomie ist ein junger Begriff, der nicht allen geläufig ist. Abbildung 1 liefert einen Überblick über die Bioökonomie und zeigt, welche Schwerpunkte heute bereits existieren und welche Kritiken unter verschiedenen Blickrichtungen bestehen. Außerdem werden darüber hinausgehende Betrachtungsweisen sichtbar. In der oberen Hälfte erkennt man Schwerpunkte der Forschung einerseits, aber auch Schwerpunkte industrieller Nutzung andererseits. Es zeigt sich, welche Forschungsbereiche die Forschungsförderung erreicht, und welche Innovationen sich aus der Forschung heraus auf dem Markt bereits wiederfinden. Der untere Teil der Abbildung hingegen benennt, welche Herausforderungen und Potenziale bestehen. Die braunfarbigen Begriffe führen Ideen auf, Bioökonomie ethisch zu denken (vgl. KRÖBER und POTTHAST 2015).

Mitwirkende

Sarah Abtmeyer

Fachhochschule Münster, Fachbereich Energie Gebäude Umwelt

Dr. Elisabeth Angenendt

Universität Hohenheim, Institut für Landwirtschaftliche Betriebslehre

Alexander Angersbach

Elosystems GbR

Sven Annas

Fachhochschule Münster, Fachbereich Maschinenbau

Sebastian Antonczyk

Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg, Labor für Angewandte Mikrobiologie

Prof. Dr. Dr. Garabed Antranikian

Technische Universität Hamburg, Institut für Technische Mikrobiologie

Richard Arthur

Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg, Labor für Angewandte Mikrobiologie

Sebastian Auburger

Universität Hohenheim, Institut für Landwirtschaftliche Betriebslehre

Prof. Dr. Joachim Aurbacher

Justus-Liebig-Universität Gießen,
Institut für Betriebslehre der Agrar- und Ernährungswirtschaft

Nicole Bäger

BTN Biotechnologie Nordhausen GmbH

Prof. Dr. Enno Bahrs

Universität Hohenheim, Institut für Landwirtschaftliche Betriebslehre

Sina Balke

HeGo Biotec GmbH, Forschung & Entwicklung

Dr. Gert Barthelmes

Landesamt für Ländliche Entwicklung, Landwirtschaft und Flurneuordnung,
Referat Ackerbau, Grünland

Sebastian Bartscher

Fachhochschule Münster, Fachbereich Maschinenbau

Prof. Dr. Johann Bauer

Technische Universität München, Lehrstuhl für Tierhygiene

Daniel Baumkötter

Fachhochschule Münster, Fachbereich Energie, Gebäude, Umwelt

Prof. Dr.-Ing. Frank Baur

Institut für ZukunftsEnergieSysteme gGmbH

Margitta Beck

Universität Rostock, Professur für Agrartechnologie und Verfahrenstechnik

Jörn Beheim-Schwarzbach

Institut für Agrar- und Stadtökologische Projekte, Abteilung Biogene Reststoffe
Biopract GmbH

Johannes Behrens

Brandenburgische Technische Universität Cottbus-Senftenberg,
Lehrstuhl Abfallwirtschaft

Michael Beil

Fraunhofer Institut für Windenergie und Energiesystemtechnik

Kay Beinersdorf

Leibniz-Institut für Agrartechnik Potsdam-Bornim e.V., Abteilung Bioverfahrenstechnik

Prof. Dr. Heinz Bernhardt

Technische Universität München, Lehrstuhl für Agrarsystemtechnik

Simone Bieler

Hochschule Anhalt, Angewandte Biowissenschaften und Prozesstechnik

Andrea Biertümpfel

Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft, Thüringer Zentrum Nachwachsende Rohstoffe

Carolin Birk

Fraunhofer Institut für Grenzflächen- und Bioverfahrenstechnik, Abteilung Umweltbiotechnologie und Bioverfahrenstechnik

Hans-Benjamin Böckler

Physikalisch-Technische Bundesanstalt

Rainer Bolduan

European Institute for Energy Research

Manuel Brehmer

Technische Universität Berlin

Prof. Dr. Uta Breuer

Hochschule Nordhausen, FB Ingenieurwissenschaften

Dr.-Ing. Elmar Brüggling

Fachhochschule Münster, Fachbereich Energie, Gebäude, Umwelt

Prof. Dr. Dieter Bryniok

Fraunhofer Institut für Grenzflächen- und Bioverfahrenstechnik,
Abteilung Umweltbiotechnologie und Bioverfahrenstechnik

Dr. Jörn Budde

Leibniz-Institut für Agrartechnik Potsdam-Bornim e.V., Abteilung Technikbewertung

Dr.-Ing. Marko Burkhardt

Brandenburgische Technische Universität Cottbus-Senftenberg,
Lehrstuhl Abfallwirtschaft

Prof. Dr.-Ing. Günter Busch (emeritiert)

Brandenburgische Technische Universität Cottbus-Senftenberg,
Lehrstuhl Abfallwirtschaft

Prof. Dr. Wolfgang Büscher

Universität Bonn, Institut für Landtechnik

Andreas Buschmann

Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft, Institut für Landtechnik und Tierhaltung

Jeanette Buschmann

Brandenburgische Technische Universität Cottbus-Senftenberg,
Lehrstuhl Abfallwirtschaft

Dr. Christine von Buttlar

Ingenieurgemeinschaft für Landwirtschaft und Umwelt-IGLU

Jeroen Buysse

Universität Gent, Department of Agricultural economics

Dr. Arno Cordes

ASA Spezialenzyme GmbH

Vasilis Dandikas

Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft, Institut für Landtechnik und Tierhaltung

Jaqueline Daniel-Gromke

Deutsches Biomasseforschungszentrum gemeinnützige GmbH

Martin Degenbeck

Bayerische Landesanstalt für Weinbau und Gartenbau

Dr. Sabine Deimling

PE Europe GmbH

Dr. Philippe Delfosse

Luxembourg Institute of Science and Technology, Environmental Research and Innovation Department

Velina Denysenko

Deutsches Biomasseforschungszentrum gemeinnützige GmbH

Jaqueline Derenkó

Leibniz-Institut für Agrartechnik Potsdam-Bornim e.V., Abteilung Bioverfahrenstechnik und Institut für Biochemie und Biologie (Universität Potsdam)

Anne Deutschmann

Fraunhofer-Institut für Keramische Technologien und Systeme

Manuel Deyerler

Bildungszentrum Triesdorf, Abteilung Pflanzenbau und Versuchswesen

Stefan Dirks

Universität Bonn, Institut für Landtechnik

Michael Dittrich-Zechendorf

Deutsches Biomasseforschungszentrum gGmbH, Bereich Biochemische Konversion

Veronika Dollhofer

Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft, Abteilung Qualitätssicherung und Untersuchungswesen

Dr. Samart Dorn-In

Technische Universität München, Lehrstuhl für Tierhygiene

Martin Dotzauer

Deutsches Biomasseforschungszentrum gemeinnützige GmbH

Dr. Stefan Dröge

Prüf- und Forschungsinstitut Pirmasens e.V., Department Biotechnology and Microbiology

Dr. Gunter Ebel

Leibniz-Institut für Agrartechnik Potsdam-Bornim e.V.

Jens Eckner

Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft

Matthias Edel

Deutsche Energie-Agentur GmbH

Dr. Joachim Eder

Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft, Institut für Pflanzenbau und Pflanzenzüchtung

Dr. Mathias Effenberger

Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft, Institut für Landtechnik und Tierhaltung

Florian Ehrendreich

Deutsches Biomasseforschungszentrum gemeinnützige GmbH

Michael Ehrentraut

Fachhochschule Münster, Fachbereich Maschinenbau

Reik Ellmann

Binowa GmbH

Dr. Ludger Eltrop

Universität Stuttgart, Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung

Dr.-Ing. Peter Emberger

Technologie und Förderzentrum, Biogene Kraft-, Schmier- und Verfahrensstoffe

Prof. Dr. Christoph Emmerling

Universität Trier, FB VI Raum und Umweltwissenschaften/Bodenkunde

Nils Engler

Universität Rostock, Abfall- und Stoffstromwirtschaft

Sebastian Eschenbacher

Biogas Nord Anlagenbau GmbH

Wiebke Fahlbusch

Universität Göttingen, Abteilung Sedimentologie und Umweltgeowissenschaften

Monika Fleschhut

Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft, Institut für Pflanzenbau und Pflanzenzüchtung

Stefan Fogel

Fraunhofer Institut für Keramische Technologien und Systeme

Dr. Maendy Fritz

Technologie- und Förderzentrum im Kompetenzzentrum für Nachwachsende Rohstoffe, Sachgebiet Rohstoffpflanzen und Stoffflüsse

Karen Fronk

Hochschule Harz, Fachbereich Automatisierung und Informatik

Bianca Fröschle

Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft, Abteilung Qualitätssicherung und
Untersuchungswesen

Matthias Garbs

Georg-August-Universität Göttingen

Sara Gatz

Biogas – Additive.de GmbH & Co. KG

Prof. Dr. Jutta Geldermann

Georg-August-Universität Göttingen

Prof. Dr. Bärbel Gerowitt

Universität Rostock, Agrar- und Umweltwissenschaftliche Fakultät

Christoph Gers-Grapperhaus

LWK Niedersachsen.

Michael Glemnitz

Leibnitz-Zentrum für Agarlandschaftsforschung e.V., Institut für Landnutzungssysteme

Prof. Dr.-Ing. Peter Glösekötter

Fachhochschule Münster, Fachbereich Elektrotechnik und Informatik

Dr. Katja Gödeke

Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft

Mark Goldenthal

Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg, Fakultät Life Sciences

Michael Grieb

Technologie- und Förderzentrum im Kompetenzzentrum für Nachwachsende Rohstoffe,
Sachgebiet Rohstoffpflanzen und Stoffflüsse

Carola Griehl

Hochschule Anhalt, Angewandte Biowissenschaften und Prozesstechnik

Johan Grope

Institut für Biogas, Kreislaufwirtschaft und Energie

Dr. Waldemar Gruber

Landwirtschaftskammer Nordrhein-Westfalen

Dr. Christian Grumaz

Fraunhofer Institut für Grenzflächen- und Bioverfahrenstechnik,
Abteilung Molekulare Biotechnologie, Arbeitsgruppe Funktionelle Genomanalysen

Matthias Gruttmann

Fachhochschule Münster, Fachbereich Energie Gebäude Umwelt

Dr. Welf Guenther-Lübbbers

Georg-August-Universität Göttingen, Department für Agrarökonomie und
Rurale Entwicklung

Joshua Güsewell

Universität Stuttgart, Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwend

Detlef Güßbacher
Hego Biotec GmbH

Nicola Leonard Haag
Universität Hohenheim, Landesanstalt für Agrartechnik und Bioenergie

Boris Habermann
Institut für Agrar- und Stadtökologische Projekte, Abteilung Biogene Reststoffe

Juliane Hahn
Universität Rostock, Agrar- und Umweltwissenschaftliche Fakultät

Dr. Sarah Hahnke
Leibniz-Institut für Agrartechnik Potsdam-Bornim e.V., Abteilung Bioverfahrenstechnik

Dr. Marlies Härdtlein
Universität Stuttgart, Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung

Katharina Hartmann
Renewables Academy AG

Eva Hauser
Institut für ZukunftsEnergieSysteme gGmbH

Markus Heberlein
Fraunhofer-Institut für Umwelt-, Sicherheits- und Energietechnik,
Biologische Verfahrenstechnik, Institutsteil Sulzbach-Rosenberg

Jörn Heerenklage
Technische Universität Hamburg, Institut für Umwelttechnik und Energiewirtschaft

Dr. Monika Heiermann
Leibniz-Institut für Agrartechnik Potsdam-Bornim e.V.

Prof. Dr. Andrea Heilmann
Hochschule Harz, Fachbereich Automatisierung und Informatik

Alexander Heinrich
Technische Universität Berlin, Fachgebiet Luftfahrtantriebe

Sabrina Heinrich
Brandenburgische Technische Universität Cottbus-Senftenberg,
Lehrstuhl Abfallwirtschaft

Prof. Dr. Carsten Herbes
Hochschule für Wirtschaft und Umwelt Nürtingen-Geislingen

Dr. Christiane Herrmann
Leibniz-Institut für Agrartechnik Potsdam-Bornim e.V.

Dr. Martina Hesse
Georg-August-Universität Göttingen

Katharina Hey
Universität Göttingen, Department für Nutzpflanzenwissenschaften

Dr.-Ing. Walter Hilgert
Rietzler Gruppe GmbH

Hans Hochberg
Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft

Dr. Dorothea Hofmann

Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft, Institut für Pflanzenbau und Pflanzenzüchtung

Manfred Höld

Hochschule Weihenstephan – Triesdorf, Fakultät Land- und Ernährungswirtschaft

Uwe Holzhammer

Fraunhofer Institut für Windenergie und Energiesystemtechnik

Dr. Frank Höppner

Julius Kühn-Institut, Institut für Pflanzenbau und Bodenkunde

Prof. Dr. Andreas Hornung

Fraunhofer-Institut für Umwelt-, Sicherheits- und Energietechnik

Prof. Dr. Kurt-Jürgen Hülsbergen

Technische Universität München, Lehrstuhl für Ökologischen Landbau und Pflanzenbausysteme

Dr. Bärbel Hundt

Justus-Liebig-Universität Gießen, Institut für Landschaftsökologie und Ressourcenmanagement

Dr. Christine Idler

Leibniz-Institut für Agrartechnik Potsdam-Bornim e.V.

Prof. Dr.-Ing. Hans-Arno Jantzen

Fachhochschule Münster, Fachbereich Maschinenbau

Dr.-Ing. Karin Jobst

Fraunhofer Institut für Keramische Technologien und Systeme

Isabel Jordan

Brandenburgische Technische Universität Cottbus-Senftenberg, Lehrstuhl Abfallwirtschaft

Carsten Jost

Leibniz-Institut für Agrartechnik Potsdam-Bornim e.V., Abteilung Bioverfahrenstechnik

Dr.-Ing. Stefan Junne

Technische Universität Berlin, Institut für Biotechnologie

Achim Kaiser

IBBK Fachgruppe Biogas GmbH

Prof. Dr. Norbert Kanswohl

Universität Rostock, Professur für Agrartechnologie und Verfahrenstechnik

Robert Kausmann

Leibniz-Institut für Agrartechnik Potsdam-Bornim e.V., Abteilung Technikbewertung

Sonya Kay

Insitut für ZukunftsEnergieSysteme gGmbH, Arbeitsfeld Stoffströme

Katrin Kayser

IBBK Fachgruppe Biogas GmbH

Dr. Brigitte Kempter-Regel

Fraunhofer Institut für Grenzflächen- und Bioverfahrenstechnik,
Abteilung Umweltbiotechnologie und Bioverfahrenstechnik

Dr.-Ing. Marius Kerkering

Fachhochschule Münster, Fachbereich Energie, Gebäude, Umwelt

Ulrich Keymer

Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft, Institut für Betriebswirtschaft und
Agrarstruktur

Erich Kielhorn

Technische Universität Berlin, Institut für Biotechnologie

Stefan Kimmelmann

Technische Universität München, Lehrstuhl für Ökologischen Landbau und
Pflanzenbausysteme

Isabella Kinker

Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft, Abteilung Qualitätssicherung und
Untersuchungswesen

Johanna Klang

Leibniz-Institut für Agrartechnik Potsdam-Bornim e.V., Abteilung Bioverfahrenstechnik

Dr. Michael Klocke

Leibniz-Institut für Agrartechnik Potsdam-Bornim e.V., Abteilung Bioverfahrenstechnik

Johannes Köhler

Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft, Referat Nachwachsende Rohstoffe

Benjamin Korb

Technische Universität München, Lehrstuhl für Verbrennungskraftmaschinen

Peter Kornatz

Justus-Liebig-Universität Gießen, Institut für Betriebslehre der Agrar- und
Ernährungswirtschaft

Tobias Koschack

Brandenburgische Technische Universität Cottbus-Senftenberg,
Lehrstuhl Abfallwirtschaft

Johanna Koserske

Technische Universität Berlin, Institut für Biotechnologie

Michael Köttner

IBBK Fachgruppe Biogas GmbH

Dr.-Ing. Niclas Krakat

Leibniz-Institut für Agrartechnik Potsdam-Bornim e.V., Bioverfahrenstechnik

Birgit Kräling

Ingenieurgemeinschaft für Landwirtschaft und Umwelt-IGLU

Prof. Dr.-Ing. Matthias Kraume

Technische Universität Berlin

Ulrich Krause

AMODIA Bioservice GmbH

Dr.-Ing. Bernd Krautkremer

Fraunhofer Institut für Windenergie und Energiesystemtechnik

Dr. Enrique Kremers

European Institute for Energy Research

Dr.-Ing. Hannes Kremp

Eco-Cert

Jörg Kretzschmar

Deutsches Biomasseforschungszentrum gGmbH, Fachbereich Biochemische Konversion

Dr. Birgit Kröber

Universität Tübingen, Internationales Zentrum für Ethik in den Wissenschaften

Torsten Krohner

Fachhochschule Münster, Fachbereich Maschinenbau

Prof. Dr.-Ing. Kerstin Kuchta

Technische Universität Hamburg, Institut für Umwelttechnik und Energiewirtschaft

Elzbieta Kumanowska

Universität Hohenheim, Landesanstalt für Agrartechnik und Bioenergie

Thomas Langer

Leibniz-Institut für Agrartechnik Potsdam-Bornim e.V., Abteilung Bioverfahrenstechnik

Frank Langguth

Hochschule Anhalt, Angewandte Biowissenschaften und Prozesstechnik

Katharina Laub

Institut für ZukunftsEnergieSysteme gGmbH

Dr. Michael Lebuhn

Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft, Abteilung Qualitätssicherung und Untersuchungswesen

Bernhard Lecker

Universität Hohenheim, Landesanstalt für Agrartechnik und Bioenergie

Dr. Andreas Lemmer

Universität Hohenheim, Landesanstalt für Agrartechnik und Bioenergie

Karin Levin

Technische Universität München, Lehrstuhl für ökologischen Landbau und Pflanzenbausysteme

Alexander Liebenstein

Deutsche Landwirtschafts-Gesellschaft e.V., Testzentrum Technik und Betriebsmittel

Dr. Jan Liebetrau

Deutsches Biomasseforschungszentrum gemeinnützige GmbH

Per Lind

Bi.En GmbH & Co. KG

Jonas Lindner

Universität Hohenheim, Landesanstalt für Agrartechnik und Bioenergie

Prof. Dr.-Ing. Bernd Linke

Leibniz-Institut für Agrartechnik Potsdam-Bornim e.V.

Dr. Christian Löchte

DSM Biogas

Annett Lomtscher

Fraunhofer Institut für Keramische Technologien und Systeme

Dr. Gerd-Christian Maack

Universität Bonn, Institut für Landtechnik

Christiane Manthey

Verbraucherzentrale Baden-Württemberg e.V.

Evgenij Marcenko

Fachhochschule Münster

Natalia Matiz

Universität Stuttgart, Institut für Energiewirtschaft und rationelle Energieanwendung

Eric Mauky

Deutsches Biomasseforschungszentrum gemeinnützige GmbH

Sebastian Mautner

Technologie und Förderzentrum, Biogene Kraft-, Schmier- und Verfahrensstoffe

Marcel Mayer

Atres

Mona Maze

Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft, Institut für Landtechnik und Tierhaltung

Wolfgang Merkle

Universität Hohenheim, Landesanstalt für Agrartechnik und Bioenergie

Prof. Dr. Michael Mertig

Kurt-Schwabe-Institut für Mess- und Sensortechnik e.V.

Andreas Mielke

UGN-Umwelttechnik GmbH

Jan Mihalyovics

Technische Universität Berlin, Fachgebiet Luftfahrtantriebe

Irina Miroshnichenko

Belgorod State Agricultural University

Ivo Muha

Johann Wolfgang Goethe-Universität Frankfurt am Main

Janine Müller

Justus-Liebig-Universität Gießen, Institut für Betriebslehre der Agrar- und Ernährungswirtschaft

Liane Müller

Deutsches Biomasseforschungszentrum gGmbH, Fachbereich Biochemische Konversion

Dr. Hans-Joachim Nägele

Universität Hohenheim, Landesanstalt für Agrartechnik und Bioenergie

Mario Nast

Hochschule Weihenstephan Triesdorf, Fakultät Land- und Ernährungswirtschaft

Prof. Dr. Michael Nelles

Deutsches Biomasseforschungszentrum gemeinnützige GmbH

Prof. Dr. Peter Neubauer

Technische Universität Berlin, Institut für Biotechnologie

Dr. Hans Oechsner

Universität Hohenheim, Landesanstalt für Agrartechnik und Bioenergie

Dr. Wolfram Oelßner

Kurt-Schwabe-Institut für Mess- und Sensortechnik e.V.

Dr. Sandra Off

Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg, Fakultät Life Sciences

Jan Ortmann

Fachhochschule Münster, Fachbereich Energie, Gebäude, Umwelt

Dr. Johannes Ostertag

Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft, Institut für Tierernährung und Futterwirtschaft

Christopher Otto

HeGo Biotec GmbH, Vertriebsleiter Gasreinigung, Abteilung Biogas

Tino Pasold

Universität Göttingen, Abteilung Sedimentologie und Umweltgeowissenschaften

Mark Paterson

Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V.,
Team Energie, Emissionen und Klimaschutz

Prof. Dr. Reinhard Pätz

Hochschule Anhalt, Abteilung für Bioprozesstechnik

Prof. Dr.-Ing. Dieter Peitsch

Technische Universität Berlin, Fachgebiet Luftfahrtantriebe

Gunther Pesta

Atres

Christiane Peter

Leibnitz-Zentrum für Agrarlandschaftsforschung e.V.,
Institut für Landschaftssystemanalyse

Dr. Sabine Peters

AMODIA Bioservice GmbH

Eckart Petig

Universität Hohenheim, Institut für Landwirtschaftliche Betriebslehre

Matthias Plöchl

BioenergieBeratungBornim GmbH

Vincent Plogsties

Leibniz-Institut für Agrartechnik Potsdam-Bornim e.V.

Jan Postel

Deutsches Biomasseforschungszentrum gemeinnützige GmbH

Prof. Dr. Thomas Potthast

Universität Tübingen, Internationales Zentrum für Ethik in den Wissenschaften

Dr.-Ing. Maximilian Prager

Technische Universität München

Anne-Katrin Prescher

Leibnitz-Zentrum für Agarlandschaftsforschung e.V.,

Institut für Landschaftssystemanalyse

Prof. Dr. Annette Prochnow

Leibniz-Institut für Agrartechnik Potsdam-Bornim e.V., Abteilung Technikbewertung und Stoffkreisläufe

Dr. Jürgen Pröter

Deutsches Biomasseforschungszentrum gGmbH, Bereich Biochemische Konversion

Dr. Teresa Suárez Quiñones

Leibniz-Institut für Agrartechnik Potsdam-Bornim e.V., Abteilung Technikbewertung

Antje Rademacher

Leibniz-Institut für Agrartechnik Potsdam-Bornim e.V., Abteilung Bioverfahrenstechnik

Dr. Sabine Rahn

Agravis Raiffeisen AG

Prof. Dr. Rolf Rauber

Universität Göttingen, Department für Nutzpflanzenwissenschaften

Dr. Dorothea Rechtenbach

Technische Universität Hamburg, Institut für Umwelttechnik und Energiewirtschaft

Dr. Hans Jürgen Reents

Technische Universität München, Lehrstuhl für Ökologischen Landbau und Pflanzenbausysteme

Dr. Torsten Rehl

PE INTERNATIONAL

Claudia Rehse

N.L. Chrestensen Erfurt, Abteilung Zucht und Produktion

Torsten Reinelt

Deutsches Biomasseforschungszentrum gemeinnützige GmbH

Dr.-Ing. Gerd Reinhold

Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft

Toni Reinholz

Deutsche Energie-Agentur GmbH

Klaus Reiß

Universität Hohenheim, Landesanstalt für Agrartechnik und Bioenergie

Dr. Edgar Remmele

Technologie und Förderzentrum, Biogene Kraft-, Schmier- und Verfahrensstoffe

Carsten Rieckmann

Landwirtschaftskammer Niedersachsen

Dr. Christine Riedel

Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft, Institut für Pflanzenbau und Pflanzenzüchtung

Detlef Riesel

FNR

Emma Ritzi

Institut für Agrar- und Stadtökologische Projekte, Abteilung Biogene Reststoffe

Dr. Immo Röske

Technische Universität Hamburg, Institut für Technische Mikrobiologie

Kay Rostalski

KSB AG

Lisa Rothe

Leibniz-Institut für Agrartechnik Potsdam-Bornim e.V., Bioverfahrenstechnik

Dr. Nils Rottmann

Biogas Nord Anlagenbau GmbH

Dr. Steffen Roux

Julius Kühn-Institut, Institut für Züchtungsforschung an landwirtschaftlichen Kulturen

Thorsten Ruf

Universität Trier, FB VI Raum und Umweltwissenschaften/Bodenkunde

Stephan Ruile

Universität Hohenheim, Landesanstalt für Agrartechnik und Bioenergie

Prof. Dr. Hans Ruppert

Universität Göttingen, Interdisziplinäres Zentrum für Nachhaltige Entwicklung

Dr. Kerstin Sahn

Technische Universität Hamburg, Institut für Technische Mikrobiologie

Dr. Benedikt Sauer

Universität Göttingen, Interdisziplinäres Zentrum für Nachhaltige Entwicklung

Andreas Schäfer

Universität Bonn, Institut für Landtechnik

Dominik Schaiper

Universität Bonn, Institut für Landtechnik

Matthias Schelter

Kurt-Schwabe-Institut für Mess- und Sensortechnik e.V.

Prof. Dr. Paul Scherer

Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg, Labor für Angewandte Mikrobiologie, Fakultät Life Sciences

Katharina Scherge

Fraunhofer Institut für Grenzflächen- und Bioverfahrenstechnik, Abteilung Umweltbiotechnologie und Bioverfahrenstechnik, Arbeitsgruppe Bioenergie

Ursula Schliessmann

Fraunhofer Institut für Grenzflächen- und Bioverfahrenstechnik,
Abteilung Umweltbiotechnologie und Bioverfahrenstechnik, Arbeitsgruppe Bioenergie

Meike Schmehl

Georg-August-Universität Göttingen

Axel Schmidt

Universität Trier, FB VI Raum und Umweltwissenschaften/Bodenkunde

Florian Schmidt

Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft

Sabine Schmitz

Universität Hohenheim, Landesanstalt für Agrartechnik und Bioenergie

Juliane Schneider

Brandenburgische Technische Universität Cottbus-Senftenberg,
Lehrstuhl Abfallwirtschaft

Prof. Dr.-Ing. Frank Scholwin

Institut für Biogas, Kreislaufwirtschaft und Energie

Prof. Dr.-Ing. Jürgen Scholz

Fachhochschule Münster, Fachbereich Maschinenbau

Mandy Schönberg

Brandenburgische Technische Universität Cottbus-Senftenberg,
Lehrstuhl Abfallwirtschaft

Volker Schönberg

Brandenburgische Technische Universität Cottbus-Senftenberg,
Lehrstuhl Abfallwirtschaft

Anja Schreiber

Hochschule Nordhausen, FB Ingenieurwissenschaften

Prof. Dr.-Ing. Peter Schulze Lammers

Universität Bonn, Institut für Landtechnik

Daniela Schumann

Technologie- und Förderzentrum im Kompetenzzentrum für Nachwachsende Rohstoffe,
Sachgebiet Rohstoffpflanzen und Stoffflüsse

Dr. Petra Schüsseler

FNR

Sander Schwick

Deutsche Landwirtschafts-Gesellschaft e.V., Testzentrum Technik und Betriebsmittel

Stefan Sebök

Leibniz-Institut für Agrartechnik Potsdam-Bornim e.V.

Stefan Seibel

Deutsche Landwirtschafts-Gesellschaft e.V., Testzentrum Technik und Betriebsmittel

Ingolf Seick

Hochschule Magdeburg-Stendal, Fachbereich Wasser- und Kreislaufwirtschaft

Marion Seidel

Hochschule Anhal, Abteilung für Bioprozesstechnik

Anja Simon

Technische Universität München, Lehrstuhl für Ökologischen Landbau und Pflanzenbausysteme

Prof. Dr. René Simon

Hochschule Harz, Fachbereich Automatisierung und Informatik

Yonas Shaikh

Fachhochschule Trier, Umwelt-Campus Birkenfeld

Dr. Kai Sohn

Fraunhofer Institut für Grenzflächen- und Bioverfahrenstechnik, Abteilung Molekulare Biotechnologie

Silke Stempin

KSB AG

Fabian Stenzel

Fraunhofer-Institut für Umwelt-, Sicherheits- und Energietechnik, Biologische Verfahrenstechnik, Institutsteil Sulzbach-Rosenberg

Philip Stevens

Fraunhofer Institut für Grenzflächen- und Bioverfahrenstechnik, Abteilung Molekulare Biotechnologie

Dr. Heike Sträuber

Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung, Department Umweltmikrobiologie

Christian Strutz

Brandenburgische Technische Universität Cottbus-Senftenberg, Lehrstuhl Abfallwirtschaft

Prof. Dr. Jörn Stumpenhausen

Hochschule Weihenstephan – Triesdorf, Fakultät Land- und Ernährungswirtschaft

Mathias Stur

Deutsches Biomasseforschungszentrum gemeinnützige GmbH

Simon Juan Tappen

Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft, Institut für Landtechnik und Tierhaltung

Dr. Anna Techow

Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft, Institut für Pflanzenbau und Pflanzenzüchtung

Dorothea Telschow

Biogas – Additive.de GmbH & Co. KG

Dr. Susanne Theuerl

Leibniz-Institut für Agrartechnik Potsdam-Bornim e.V., Abteilung Bioverfahrenstechnik

Prof. Dr. Ludwig Theuvsen

Georg-August Universität Göttingen

Annegret Thiele

Sozialversicherung für Landwirtschaft, Forsten und Gartenbau

Sören Thiering

Hochschule Anhalt, Abteilung für Bioprozesstechnik

Dr. Klaus Thuncke

Technologie und Förderzentrum, Biogene Kraft-, Schmier- und Verfahrensstoffe

Stefan Thurner

Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft, Institut für Landtechnik und Tierhaltung

Rainer Tietböhl

Bauernverband Mecklenburg-Vorpommern e.V.

Andreas Trauner

Technologie- und Förderzentrum im Kompetenzzentrum für Nachwachsende Rohstoffe, Sachgebiet Rohstoffpflanzen und Stoffflüsse

Marcus Trommler

Deutsches Biomasseforschungszentrum gemeinnützige GmbH, Bereich Biogastechnologie

Dr.-Ing. Ralf Tschepetzki

Ifak System GmbH

Torsten Unmack

Biopract GmbH

Prof. Dr. Gerd-Rainer Vollmer

Biotechnologie Nordhausen GmbH

Thomas Voss

Technische Universität Hamburg, Institut für Umwelttechnik und Energiewirtschaft

Prof. Dr.-Ing. Georg Wachtmeister

Technische Universität München, Lehrstuhl für Verbrennungskraftmaschinen

Dr. Ernst Walter

Landwirtschaftliches Technologiezentrum Augustenberg

Dr. Christina Warnke-Gurgel

Eco-Cert

Matthias Wawra

Archea Service GmbH

Andreas Weger

Fraunhofer-Institut für Umwelt-, Sicherheits- und Energietechnik, Biologische Verfahrenstechnik, Institutsteil Sulzbach-Rosenberg

Prof. Dr. Friedrich Weißbach

Freischaffender Firmenberater

Laura Weitze

Bauhaus-Universität Weimar, Bauhaus-Institut für zukunftsweisende Infrastruktursysteme

Bernhard Wern

Institut für ZukunftsEnergieSysteme gGmbH

Dr. Paula R. Westerman

Universität Rostock, Agrar- und Umweltwissenschaftliche Fakultät

Prof. Dr.-Ing. Christof Wetter

Fachhochschule Münster, Fachbereich Energie Gebäude Umwelt

Dr. Denny Wiedow

Universität Rostock, Professur für Agrartechnologie und Verfahrenstechnik

Franziska Wiese

Fraunhofer Institut für Grenzflächen- und Bioverfahrenstechnik,
Abteilung Molekulare Biotechnologie, Arbeitsgruppe Funktionelle Genomanalysen

Dr. Matthias Willms

Leibniz-Zentrum für Agrarlandschaftsforschung e.V.,
Institut für Landschaftssystemanalyse

Andreas Winkler

Binowa GmbH

Katharina Winter

Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft

Daniela Zander

Technologie- und Förderzentrum im Kompetenzzentrum für Nachwachsende Rohstoffe

Bianca Zerhusen

Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft, Institut für Landtechnik und Tierhaltung

Claudia Ziegler

Insitut für ZukunftsEnergieSysteme gGmbH, Arbeitsfeld Stoffströme

Josef K. Ziegler

ARGE Biogas – SAFETY FIRST

Dr. Simon Zielonka

Universität Hohenheim, Landesanstalt für Agrartechnik und Bioenergie

Peter Zimmermann

Ingenieurbüro TEB

Herbert Zölsmann

UGN-Umwelttechnik GmbH

Wilfried Zorn

Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft

Dr. Jens Zosel

Kurt-Schwabe-Institut für Mess- und Sensortechnik e.V

KTBL-Veröffentlichungen

**Faustzahlen Biogas**

2013, 3. Ausgabe, 360 S., 23 €, ISBN 978-3-941583-85-6
(Best.-Nr. 19506)

Das Nachschlagewerk enthält alle relevanten Daten und Fakten zu Biogas in der Landwirtschaft. Es erläutert die Entwicklung des Biogassektors, die technisch-biologischen Grundlagen und die Substratbereitstellung, Gasausbeute, Gärrestverwertung, Wirtschaftlichkeit und Umweltwirkungen.

**Gasausbeute in landwirtschaftlichen Biogasanlagen**

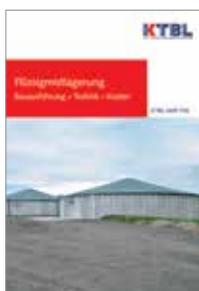
2015, 3. Auflage, 36 S., 9 €, ISBN 978-3-945088-03-6
(Best.-Nr. 40107)

Dieses Heft bietet Richtwerte zur Abschätzung der Gasausbeute in landwirtschaftlichen Biogasanlagen, die Hersteller, Planer, Berater und Betreiber bei Planung und Konzeption unterstützen.

**Direktvermarktung von Biogasstrom**

2013, 60 S., 9,5 €, ISBN 978-3-941583-83-2
(Best.-Nr. 40101)

In Zeiten höchsten Stromverbrauchs bietet Strom aus Biogas eine zuverlässige und bedarfsgerechte Alternative zu witterungsabhängigen Energiequellen wie Wind und Sonne. Dieses Heft erläutert die technischen Anforderungen, rechtlichen Rahmenbedingungen und möglichen Kosten, mit denen ein Anlagenbetreiber bei der Direktvermarktung seines von ihm erzeugten Stroms rechnen muss.

**Flüssigmistlagerung**

Bauausführung – Technik – Kosten
2014, 52 S., 9 €, ISBN 978-3-941583-99-3
(Best.-Nr. 40106)

Bei der Planung und Errichtung von Anlagen zur Lagerung von Flüssigmist sind zahlreiche bau- und umweltrechtliche Anforderungen zu berücksichtigen. Dieses Heft beschreibt die fachgerechte Bauausführung und trifft Aussagen zu Anfallmengen und Kosten.



Betriebsplanung Landwirtschaft 2014/15
Daten für die Betriebsplanung in der Landwirtschaft
2014, 24. Auflage, 832 S., 26 €, ISBN 978-3-941583-93-1
(Best.-Nr. 19515)

Maschinenkosten kalkulieren, Arbeitseinsätze planen oder Produktionsverfahren bewerten – die 24. Auflage des KTBL-Standardwerkes bietet zu jedem Anlass der betrieblichen Planung umfassende Informationen zu Tierhaltung, Pflanzenproduktion und Energiegewinnung.



Biogas in der Landwirtschaft – Stand und Perspektiven
FNR/KTBL-Kongress vom 10. bis 11. September 2013 in Kassel
2013, 412 S., 25 €, ISBN 978-3-941583-82-5
(Best.-Nr. 11501)

Der Tagungsband bietet eine Übersicht über die Möglichkeiten der Effizienzsteigerung von Biogasanlagen durch die Optimierung biologischer, technischer und logistischer Prozesse. Die Weiterentwicklung und der Ausbau der Biogas-Technologie sind wichtig für eine moderne und nachhaltige Energiepolitik. Die Branche steht nach Jahren eines rasanten quantitativen und auch qualitativen Wachstums vor neuen Herausforderungen.



Logistik rund um die Biogasanlage
2013, 132 S., 24 €, ISBN 978-3-941583-75-7
(Best.-Nr. 11498)

Die Schrift bietet die Hintergrundinformationen zur Verfahrensbewertung in der Biomasselogistik: von den rechtlichen Rahmenbedingungen über die Fahrzeugtechnik, die Wegestruktur, den Bodenschutz, die soziale Akzeptanz, die Qualitätssicherung, die Arbeitswirtschaft und Ökonomie, die Klimawirkung bis zur Informationstechnik.

Bestellhinweise

Versandkosten werden gesondert in Rechnung gestellt. Preisänderungen vorbehalten.
Wir freuen uns auf Ihre Bestellung. Senden Sie diese bitte an

KTBL, Bartningstraße 49, 64289 Darmstadt | Tel.: +49 6151 7001-189 |
Fax: +49 6151 7001-123 | E-Mail: vertrieb@ktbl.de | www.ktbl.de

Besuchen Sie auch unseren Online-Shop www.ktbl.de



Biogasanlagen in der Landwirtschaft

Heft Print, DIN A5, 100 Seiten, Bestell-Nr. 1453
ISBN/EAN 978-3-8308-1070-4, 6. Auflage 2013

Die Biogaserzeugung in Deutschland boomt. Für viele Landwirte ist dieser Betriebszweig inzwischen ein wichtiges Standbein beim Einkommen. Das Heft informiert ausführlich über Grundlagen der Erzeugung und der Planung, über technische Anforderungen bis zum wirtschaftlichen Betrieb. Dabei werden alle Änderungen des 2012 in Kraft getretenen Gesetzes zu Erneuerbaren Energien (EEG) berücksichtigt. Im Mittelpunkt stehen unter anderem Kennzahlen zur Gasausbeute verschiedener Substrate, die Möglichkeiten einer sinnvollen Wärmenutzung und die richtige Lagerung der verfügbaren Biomassearten. Weiterer Schwerpunkt sind Änderungen im EEG, z. B. die aktuellen Regelungen zur Stromvergütung und die Möglichkeit der Direktvermarktung an Strombörsen.



Gute fachliche Praxis bei der Stickstoffdüngung

Heft Print, DIN A5, 92 Seiten, Bestell-Nr. 1017
ISBN/EAN 978-3-8308-1059-9, 10. Auflage 2013

Die Stickstoffdüngung beeinflusst maßgeblich den Ertrag und die Qualität der Produkte. Das Heft beschreibt die optimale Düngung bei den wichtigsten Ackerbaukulturen, wie z. B. Getreide, Winterraps, Kartoffeln. Außerdem wird die Düngung von unterschiedlichen Gemüsekulturen und von Grünland vorgestellt. Die unterschiedlichen Methoden zur Ermittlung des Stickstoffbedarfs werden an praktischen Beispielen beschrieben. Der Leser lernt den fachgerechten Einsatz von organischen und mineralischen Düngemitteln kennen und verstehen.

Bestellungen an

aid-Vertrieb
c/o IBRo Versandservice GmbH
Kastanienweg 1, 18184 Roggentin

oder 038204 66544 (Tel.)
0228 84 99-200 (Fax)
bestellung@aid.de

Mehr Infos auf

www.aid.de
www.aid-medienshop.de
www.landschaftt.info