

Schriftenreihe Umweltingenieurwesen

Band 95

Tagungsband

14. ROSTOCKER BIOENERGIEFORUM

Veranstalter

Universität Rostock

Landesforschungsanstalt für Landwirtschaft und Fischerei MV

Deutsches Biomasseforschungszentrum gemeinnützige GmbH

19. DIALOG ABFALLWIRTSCHAFT MV

Veranstalter

Universität Rostock, Ministerium für Landwirtschaft und Umwelt MV, enviMV

geplant am 16./17. + 18. Juni 2020

an der Universität Rostock

(nicht durchgeführt aufgrund der Beschränkungen im Zuge der Corona-Pandemie)

Professur

Abfall- und Stoffstromwirtschaft

Agrar- und Umweltwissenschaftliche Fakultät

**Universität
Rostock**



Traditio et Innovatio

Tagungsband zum 14. Rostocker Bioenergieforum/19. DIALOG Abfallwirtschaft MV
HERAUSGEBER

Prof. Dr. Michael Nelles
Universität Rostock
Agrar- und Umweltwissenschaftliche Fakultät
18051 Rostock

CIP-KURZTITELAUFNAHME

14. Rostocker Bioenergieforum/19. DIALOG
Universität Rostock
Agrar- und Umweltwissenschaftliche Fakultät
Rostock, 2020

© Universität Rostock, Agrar- und Umweltwissenschaftliche Fakultät,
18051 Rostock

BEZUGSMÖGLICHKEITEN

Universität Rostock
Universitätsbibliothek, Schriftentausch
18051 Rostock
Tel.: 0381/498-8639, Fax: 0381/498-8632
E-Mail: tausch.ub@uni-rostock.de

Universität Rostock
Agrar- und Umweltwissenschaftliche Fakultät
Professur Abfall- und Stoffstromwirtschaft
Justus-von-Liebig-Weg 6, 18059 Rostock
Tel.: 0381/498-3401, Fax: 0381/498-3402

ISBN 978-3-86009-507-2 DOI https://doi.org/10.18453/rosdok_id00002650

Gedruckt in Deutschland auf Recyclingpapier.

Die Verantwortung für den Inhalt der Beiträge und die Abbildungen liegt bei den jeweiligen Autoren/-innen.

Inhalt

Vorwort	11
---------------	----

PLENARVORTRÄGE

Michael Nelles, Karen Deprie

Biomassenutzung 2050 – Beitrag zum Klima- und Ressourcenschutz sowie zur nachhaltigen Energieversorgung	15
---	----

Frank Baur, Bernhard Wern, Patrick Matschoss

Bioenergie 2030 – Ziele und notwendige Maßnahmen	27
--	----

Martin Maslaton

Aktuelle Überwachungs- und Stilllegungspraxis der Immissionsschutzböhrden – Anspruch und Wirklichkeit beim Betrieb von Biogasanlagen.....	39
---	----

Forum A Kraftstoff/Transport

Sylvio Nagel, Tanja Mast, Uwe Holzhammer, Ludger Eltrop

Die Rolle der Bioenergie im Energie- und Mobilitätssystem in Deutschland – Ergebnisse einer modellgestützten Systemanalyse	47
--	----

Philipp Rüschen, Tobias Röther, Fabian Gievers

Erzeugung von Bio-LNG aus dezentralen Biogasanlagen – eine ökobilanzielle Bewertung der Treibhausgasminderung	57
---	----

Matthias Edel, Jakob Jegal, Toni Reinholtz

Bio-LNG – eine erneuerbare und emissionsarme Alternative im Straßengüter- und Schiffsverkehr	65
--	----

Ulrike Schümann, Fanny Langschwager, Karsten Schleef, Tim Schulzke, Volker Heil, Martin Peters, Nils Rettenmaier

Maritime Kraftstoffe durch Pyrolyse biogener Reststoffe und Veresterung mit biobasierten höheren Alkoholen - PyroMar	77
--	----

Martin Uglert, Susanne Proschke, Olaf Schröder, Markus Jakob

Charakterisierung der Mischbarkeit von regenerativen Kraftstoffen	85
---	----

F. Müller-Langer, N. Dögnitz, C. Marquardt, D. Posselt, T. Schripp, S. Majer, N. Bullerdiek, A. Zschocke, A.-M. Halling, J. Buse

Einsatz von Multiblend JET A-1 in der Praxis	97
--	----

Forum B Biogas Optimierte Konzepte und Anlagen

Ines Wilkens, Roland Bauböck, Robert Ißler, Marianne Karpenstein-Machan, Jan Kelch, Peter Schmuck
Wie sieht die Zukunft der Bioenergiedörfer nach dem Auslaufen der 20 Jahre EEG-Förderung aus?109

Tanja Mast, Sylvio Nagel, Uwe Holzhammer, Ludger Eltrop
Biogasanlagen neu denken – technisch-ökonomische Charakterisierung für die Einbindung in die modellgestützte Systemanalyse123

Norbert Grösch, Regine Vogt, Abdessamad Saidi, Wilfried Zörner
Repoweringmaßnahmen hinsichtlich zukünftiger Aufgaben von Biogasanlagen133

Dietmar Ramhold, Markus Daldrup, Jürgen Lenz
Stickstoffreduktion und Prozessoptimierung durch Erhöhung der Proteinverfügbarkeit in BGAs143

David Bugłowski
Düngewirkung von Gärresten steigern159

Robert Manig
Nutzung von Wasserstoff im System Biogas167

Forum B Biogas Anlagenoptimierung

Johan Grope, Frank Scholwin, Michael Nelles
Modellbasierte Prozessüberwachung in großtechnischen Biogasanlagen....175

Sven Annas, Michael Elfering, Hans-Arno Jantzen, Jürgen Scholz, Uwe Janoske, Andreas Heller, Lukas Buntkiel
Rühr- und Mischvorgänge in Biogasanlagen: Potentiale und Erfolgschancen. 185

Eric Mauky, Mathias Stur, Christian Krebs, Manuel Winkler, Jörg Kretzschmar
Gasspeichermanagement für einen optimierten bedarfsgesteuerten Betrieb von anaeroben Vergärungsanlagen195

Christoph Eusterbrock
Vortex Extraction Digester(VED)205

Tim Kuhlow, Katrin Schönher, Jörg Burgstaler, Denny Wiedow, Norbert Kanswohl
Kaltes Plasma und Ultraschall – Eine Synergie als nächste Generation der Biomassedesintegration?213

Forum B Biogas Neue Substrate

<i>Jan Sprafke, Niklas Lajewski, Andrea Schüch, Michael Nelles</i>	
Kontinuierliche Gärversuche mit Bioabfall und Co-Substraten	223
<i>Andreas Gurgel, Julia Schneider</i>	
Zukunftskonzepte für eine nachhaltige Energieversorgung und den Klimaschutz	237
<i>Franziska Schäfer, Leandro Janke, Falko Niebling, Alfons Himmelstoss, Jürgen Pröter</i>	
NovoHTK – Ein neuartiges Verfahren zur Monovergärung von Hühnertrockenkot	253
<i>D. Gallegos Ibanez, H. Wedwitschka, L. Moeller, N. Stabenau, A. Bauer, A. Zehnsdorf, W. Stinner</i>	
Feedstock suitability assessment of Elodea, wheat straw and mixed Elodea-wheat straw silages.....	267
<i>Britt Schumacher, Harald Wedwitschka, Bernd Nordzieke, Peter Fischer, Jan Grundmann</i>	
Holzvergärung zur Biogas- und Torfersatzstoffgewinnung	277

Forum C Thermische Nutzung fester Bioenergieträger

<i>Andreas Schonhoff, Nicolai D. Jablonowski, Petra Zapp</i>	
Energieträger <i>Sida hermaphrodita</i> – Bewertung umweltbezogener Nachhaltigkeit mittels Ökobilanzierung.....	289
<i>G. Kabengele , M. Barz, M. Böttcher, K. Fankhänel, W. Wichtmann , T. Dahms, N. Körner, C. Oehmke, M. Wenzel, L. Bork</i>	
Projekt BOOnaMoor – Untersuchungen zur thermischen Nutzung von Niedermoorbiomasse	299
<i>Daniela Pomsel, Kerstin Wurdinger, Laura García, Nora Szarka, Volker Lenz</i>	
Ölersatz Biomasse Feuerung	311
<i>Anja Bartsch</i>	
Rechtliche Herausforderungen der dezentralen Einspeisung in Fernwärmenetze	323
<i>Torsten Schmidt-Baum, Nele Jaschke</i>	
Mehrkanzler-Biomeiler – Neue Möglichkeiten zur Schließung regionaler Energie- und Stoffkreisläufe durch flammenlose energetische Nutzung von Reststoffen	329

<i>Matthias Stark, Abdessamad Saidi, Wilfried Zörner</i>	
KomBio-Speicher: Entwicklung eines neuartigen Dampfspeichersystems für ein flexibles Biomasse-Heizkraftwerk zur Erhöhung der Systemstabilität	345
<i>Johannes Steinbrück, Leonhard Walz, George Francis</i>	
Biomass Steam Processing – Energieeffiziente Nutzbarmachung von Bioreststoffen in einer 2.000 t/a Demonstrationsanlage	355
<i>Falko Niebling, Michael Tietze, Hagen Hilse</i>	
Wie aus organischen Reststoffen marktfähige Produkte entstehen – Innovative Verknüpfungen von Verfahren und Technologien zur Nährstoffrückgewinnung im Wachstumskern abonoCARE®	363
<i>Roland Bischof, Jan Schlegel, Thomas Hering</i>	
Biomasseasche – Wertstoff oder Abfall?	377
Posterbeiträge	
<i>Tanja Mast, Maria Koller, Uwe Holzhammer</i>	
Verfügbarkeit und Erlösmöglichkeiten unterschiedlicher Biogasanlagenkonzepte im Smart-Market-Ansatz	391
<i>Georg Eysel-Zahl</i>	
Agroforstwirtschaft – ein multifunktionales Anbausystem in Zeiten des Klimawandels	399
<i>Katharina Bär</i>	
NETFLEX-Entwicklung einer Steuerung zur Integration von Biogasanlagen in Netze	405
<i>Stefanie Wageneder, N. Grösch, A. Saidi, R. Wagner, M. Glötzl, J. Gleich, C. Hermann, S. Mielke, C. Freydank, W. Zörner</i>	
Lösungsansätze zur technischen Anpassung bestehender Biogasanlagen für die Nutzung	409
<i>Sebastian Foth, Andrea Schüch, Michael Nelles</i>	
COASTAL Biogas – Energetische Verwertung von Seegras als Co-Substrat in der Vergärung	415
<i>Markus Daldrup, Marc Kurzbuch, Dietmar Ramhold, Harald Lindorfer</i>	
Monovergärung von Weizenpülpe	425
KOOPERATIONSPARTNER	445
DIE VERANSTALTER	461

DIALOG Abfallwirtschaft MV

Matthias Labrenz

- Mikroplastik in aquatischen Systemen: gegenwärtige und (potentielle) zukünftige Belastungen 471

Jens Tränckner

- Konzept zur Klärschlammertsorgung einschließlich Phosphor-Recycling in MV 475

Ina Abraham

- Die Novelle des Kreislaufwirtschaftsgesetzes 489

Rainer Wiedenbröker

- Steigerung der Energieeffizienz durch Wärmenutzung zur Klärschlammertrocknung 495

Mischa Paterna

- Zukunft der Kreislaufwirtschaft – Aktuelle Beispiele 499

Aktuelle Themen unserer Doktoranden im Bereich Abfallwirtschaft in der MENA-Region und in China

Asma Sakri, Ali Aouabed, Abdallah Nassour

- Co-processing of RDF in cement industry: A case of study Algeria 503

Haniyeh Jalalipour, Satyanarayana Narra

- Odor Control in Composting Facilities 515

M.-M. Narra, V. S. Ekanthalu, S. Hartard, G. Morscheck, S. Narra, M. Nelles

- Municipal solid waste behaviour in the Chinese peri-urban area – Zhaoquanying 525

Nour El Houda Chaher, Abdallah Nassour, Michael Nelles, Moktar Hamdi

- Optimization of food and green wastes mixture ratios during open windrow co-composting process 537

Qahtan Thabit, Abdallah Nassour and Michael Nelles

- Energy Efficiency increment of Waste incineration plant in combination with CSP technology in MENA region 549

- In dieser Reihe bisher erschienen 555

Das 14. Rostocker Bioenergieforum wird mit Mitteln des Bundesministeriums für Ernährung und Landwirtschaft gefördert.

Gefördert durch:

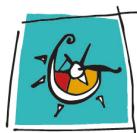


Bundesministerium
für Ernährung
und Landwirtschaft



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Diese Veranstaltung wird weiterhin gefördert durch:



VRD STIFTUNG
FÜR ERNEUERBARE
ENERGIEN



SCHAUMANN
BioENERGY

Vorwort

Die aktuelle Corona-Pandemie ist ein gutes Beispiel für eine globale Herausforderung mit deren Bewältigung sich die internationale Staatengemeinschaft sehr schwer tut. Es gab und gibt reichlich Realitätsverweigerung bei politischen Führungskräften wie z.B. Bolsonaro oder Trump, viel nicht abgestimmte Maßnahmen und Aktionismus der Länder, die ja inzwischen alle davon betroffen sind. Ein Austausch der Erkenntnisse und Erfahrungen, die China, Südkorea und Taiwan in den ersten Wochen/Monaten der Pandemie gesammelt haben, findet nur eingeschränkt statt. Auch dies ist ein Grund dafür, dass wir in Europa seit Mitte März 2020 ein Hotspot der Corona-Pandemie sind und von der ersten Corona-Welle stark getroffen wurden. Darüber hinaus trägt hierzu natürlich auch das übliche, uneinheitliche Vorgehen innerhalb der EU aber auch innerhalb von Deutschland bei. Trotzdem bin ich zuversichtlich, dass wir die damit verbundenen großen medizinischen, wirtschaftlichen und gesellschaftlichen Folgen, zumindest in Deutschland, gut überstehen werden. Ich hoffe auch, dass wir dann national und international die richtigen Lehren daraus ziehen werden, um die anderen vielfältigen globalen Herausforderungen besser zu bewältigen.

Beispiele für zentrale Zukunftsaufgaben sind die Energiewende und der langfristige Aufbau einer biobasierten Wirtschaft, wobei die Bioenergie eine Schlüsselrolle spielen wird. Leider ist hier auf nationaler Ebene festzustellen, dass u.a. die Umstellung des Energiesystems auf erneuerbare Energien, die Steigerung der Energieeffizienz, sowie die Optimierung des Wärme- und Transportsektors nur schleppend vorankommen. Eine weitere zentrale globale Herausforderung ist die Sicherstellung einer ökonomisch, ökologisch und sozial tragfähigen Versorgung der Volkswirtschaften mit Rohstoffen. Hier geht es insbesondere darum eine Kreislaufwirtschaft aufzubauen, die den Namen auch verdient und eine Versorgung weitgehend mit abfallbasierten Sekundärrohstoffen gewährleistet. Bei der Entwicklung der erneuerbare Energien inkl. Bioenergie sowie Bioökonomie und Abfallwirtschaft schneiden wir zwar im internationalen Vergleich ganz gut ab, trotzdem ist aber selbstkritisch anzumerken, dass wir in Deutschland nicht nur bei der „Energiewende“ sondern auch bei der „Rohstoffwende“ erst am Anfang eines langen Weges stehen. Von einer nachhaltigen Energieversorgung und einer wirklichen Kreislaufwirtschaft sind wir auch in Deutschland noch sehr weit entfernt!

Ein wichtiger Baustein unserer erfolgreichen Arbeit ist vor diesem Hintergrund die Veranstaltung von Fachtagungen zu aktuellen praxisrelevanten Themen mit unseren Kooperationspartnern aus der Praxis, Wissenschaft, aus den Ministerien und der Verwaltung. Zentrale Veranstaltungen für uns sind das „Rostocker Bioenergieforum“ und der „DIALOG Abfallwirtschaft MV“, die in diesem Jahr wieder als Doppeltagung vom 16. bis 18. Juni geplant war.

Vor dem Hintergrund der aktuellen Vorgaben von Bund, Land und Universität Rostock zur Eindämmung der Corona-Pandemie ist in diesem Jahr keine Präsenzveranstaltung an der Agrar- und Umweltwissenschaftlichen Fakultät möglich. Deshalb haben wir uns nun nach Abstimmung mit unseren Kooperationspartnern für die Absage der beiden Fachveranstaltungen entschieden. Da für uns als Veranstalter der persönliche Erfahrungsaustausch aber im Vordergrund steht, wollten wir die Veranstaltung auch nicht als Onlineversion durchführen.

Dies ist besonders schade, weil wir wieder sehr interessantes Programm auf Basis der vielen interessanten Beitragsvorschläge aus der Wissenschaft und Praxis erstellt haben. Inzwischen haben wir wie angekündigt aus den einge-reichten schriftlichen Beiträgen das vorliegende Fachbuch zu beiden Tagungen erstellt und hoffen, dass die Informationen für Ihre tägliche Arbeit hilfreich sind.

Unsere nächsten Fachtagungen sind im Sommer 2021 geplant und wir würden uns dann sehr über Ihre Teilnahme freuen!

Bleiben Sie gesund und beste Wünsche im Namen der Veranstalter!



Prof. Dr. mont. Michael Nelles
Professur für Abfall- und Stoffstromwirtschaft
Universität Rostock

Wissenschaftlicher Geschäftsführer
DBFZ Deutsches Biomasseforschungszentrum gemeinnützige GmbH

PLENARVORTRÄGE

FACHÜBERGREIFEND

Biomassenutzung 2050 – Beitrag zum Klima- und Ressourcenschutz sowie zur nachhaltigen Energieversorgung

Zusammenfassung: Die Begrenzung des menschengemachten Klimawandels ist als gesamtgesellschaftliche Aufgabe eine der drängendsten unserer Zeit. Die Bundesregierung hat sich zum Ziel gesetzt, bis 2050 80 bis 95 % THG-Emissionen im Vergleich zu 1990 einzusparen. Gelingen wird dies nur, wenn bis dahin von der momentanen, fossilen Grundlage des Wirtschaftens auf eine biobasierte umgestiegen wird.

Biomasse ist eine nachwachsende Ressource, ist aber zu jedem bestimmten Zeitpunkt aufgrund begrenzter Anbauflächen auch nur begrenzt verfügbar. Um einen maximalen Beitrag zum Klimaschutz, zum Schutz von Ressourcen und zur Energieversorgung zu leisten, sollte der Fokus in den kommenden Jahrzehnten verstärkt auf die stoffliche Nutzung, v.a. in Form von Kaskaden, gelegt und Bioenergie überwiegend aus Rest- und Abfallstoffen gewonnen werden. Bei Reduzierung des Primärenergieverbrauchs gemäß politischer Ziele könnten bis 2050 immerhin bis zu 17 % des Bedarfs auf diese Weise gedeckt werden.

Bei der energetischen Nutzung muss es anwendungsseitig darum gehen, durch Schwachpunkte anderer erneuerbarer Energieträger entstehende Lücken im System zu füllen. Dies betrifft insbesondere den Ausgleich von Schwankungen bei Wind- und Solarkraft durch Flexibilisierung der Anlagen im Strom- und Wärmebereich, ergänzende Kraftstoffoptionen v.a. für Luft-, Hochsee- und Schwerlastverkehr auf Basis lignozellulosehaltiger Rohstoffe und spezielle Industrieanwendungen. Gegebenenfalls kann Biomasse auch zu negativen Emissionen durch Kohlenstoffabscheidung und -speicherung beitragen, sofern diese Technologien künftig Akzeptanz finden, und CO₂ als industriellen Rohstoff zur Verfügung stellen.

All dies steht unter dem Vorbehalt weiterhin sowie zunehmend günstiger politischer und rechtlicher Rahmenbedingungen. Hier sind bis 2050 v.a. Monitoringsysteme im Hinblick auf Nachhaltigkeit zu schaffen und sich berührende Gesetzesbereiche, z.B. Landwirtschaft und Energie, integriert und ressortübergreifend zu behandeln und Überschneidungen und Widersprüche zu beseitigen.

Abstract: Limiting anthropogenic climate change is one of today's most burning challenges for society as a whole. The German Federal Government aims to reduce Germany's GHG emissions by 80 to 95 % by 2050, compared to 1990 levels. This can only be achieved if the current, fossil-based economy has moved on to a bio-based one by then.

Biomass is renewable resource. However, the area suitable for production is limited; thus, the same goes for the amount of biomass available at any point in time. In order to maximise its contribution to climate and resource protection as well to energy supply, biomass use should increasingly focus on material/industrial applications over the coming decades and cascading uses should be preferred. Bioenergy should predominantly be sourced from residues and wastes. If primary energy consumption is reduced according to political targets, up to 17 % of Germany's energy demand can be met this way by 2050.

Energetic usage of biomass will mainly serve to compensate structural weaknesses of other renewable energy carriers. This applies to balancing fluctuations in wind and solar power by increasing flexibility of biomass heat and power plants, but also to supplementary, preferably lignocellulosic-based fuel options e.g. for aviation and marine and heavy duty transport and to special industrial applications. Biomass also has the potential to contribute to negative emissions by way of carbon capture and storage, if such technologies are accepted in future, and to provide CO₂ as an industrial raw material.

The abovementioned contributions can, however, only be achieved if political and legal frameworks remain favourable, and are developed to become even more so. By 2050, monitoring systems for sustainability aspects need to be in place and cognate areas of law, such as agriculture and energy, must be approached in an integrated way across ministries in order to eliminate overlaps and contradictions.

1 Hintergrund

Der Klimawandel ist eines der drängendsten Probleme unserer Zeit. Die bereits heute sichtbaren Folgen der menschengemachten Erwärmung stellen Deutschland, wie alle anderen Länder der Erde, vor beträchtliche Herausforderungen. Im Übereinkommen von Paris bekannten sich im Dezember 2015 daher 197 Länder zu der Absicht, die menschengemachte globale Erwärmung auf deutlich unter 2 °C, möglichst auf 1,5 °C, gegenüber vorindustriellen Werten begrenzen zu wollen.

Vor diesem Hintergrund hat sich die deutsche Bundesregierung nationale und internationale Ziele gesetzt, um einen Beitrag zur Begrenzung dieses Wandels zu leisten. Bis 2030 sollen 55 Prozent an Treibhausgasen (THG) im Vergleich zu 1990 eingespart werden, bis 2050 dann 80 bis 95 %. Bis Ende 2020 sollten es bereits 40 % sein; es ist jedoch mittlerweile ersichtlich, u.a. aus dem offiziellen Projektionsbericht der Bundesregierung von 2019, dass dieses Ziel mit einer Einsparung von nur 33 % klar verfehlt werden wird, wenn Deutschland im „Normalmodus“ wirtschaftet. Aufgrund der aktuellen COVID-19-Pandemie kann es sogar sein, dass Deutschland die Klimaschutzziele für 2020 doch noch erreicht. Zusätzliche Anstrengungen in allen Bereichen werden aber nach Eindämmung des Coronavirus SARS-CoV-2 und dem damit verbundenen Hochfahren der Wirtschaft in den nächsten Jahren erforderlich sein.

Um den nicht nachhaltigen Verbrauch fossiler Ressourcen zu begrenzen und gleichzeitig den Wohlstand der Menschen zu sichern, wird ein Umstieg von einer fossil basierten auf eine biobasierte Wirtschaft, die sogenannte Bioökonomie, angestrebt. Der Bioökonomierat, der die Bundesregierung in Bezug auf die Umsetzung ihrer entsprechenden Strategien berät, definiert die Bioökonomie als „die Erzeugung und Nutzung biologischer Ressourcen (auch Wissen), um Produkte, Verfahren und Dienstleistungen in allen wirtschaftlichen Sektoren im Rahmen eines zukunftsfähigen Wirtschaftssystems bereitzustellen“ (Bioökonomierat, 2019). In ihrer Anfang dieses Jahres veröffentlichten Nationalen Bioökonomiestrategie setzt sich die Bundesregierung hierzu eine Reihe von Zielen, die unter den beiden Leitlinien stehen, zum einen auf Basis biologischen Wissens und verantwortungsvoller Innovationen eine nachhaltige, klimaneutrale Entwicklung zu erreichen und zum anderen eine nachhaltige, kreislauforientierte Wirtschaft auf Basis biogener Rohstoffe (BMBF/BMEL 2020). Deutschland soll so zu einem Vorreiter der Bioökonomie werden.

2 Herausforderungen und mögliche Beiträge der Biomasse

2.1 Aktuelle Biomassepotentiale in Deutschland

Den Vorteilen einer biobasierten Wirtschaft steht als eine große Herausforderung systemischer Art entgegen, dass ihre Rohstoffe zwar an sich erneuerbar sind, also dieselbe Fläche immer wieder zu ihrer Erzeugung genutzt werden kann, dass aber die Flächen selbst, auf denen Biomasse angebaut werden kann, begrenzt sind. Daraus folgt, dass zwar beliebig lange, aber nicht beliebig viel Biomasse zur selben Zeit produziert werden kann und es sich ergo um eine volkswirtschaftlich begrenzte Ressource handelt.

Aktuell steht in Deutschland eine land- und forstwirtschaftliche Nutzfläche von 28,1 Mio. ha zur Verfügung (FNR 2019, siehe Abbildung 1). Von den 16,7 Mio. ha landwirtschaftlicher Fläche werden ca. 60 % für die Produktion von Futtermitteln genutzt und 22 % für diejenige von Nahrungsmitteln. 14 % (2,37 Mio. ha) werden momentan zur Produktion von Bioenergie verwendet. Lediglich 2 % (0,3 Mio. ha) dienen dem Anbau von Industriepflanzen; allerdings sind zusätzlich 11,4 Mio. ha in Form von Waldfäche verfügbar, deren Produkte aktuell fast zur Hälfte stofflich genutzt werden, so dass die Gesamtfläche, die primär stofflich genutzte Produkte hervorbrachte, insgesamt erheblich größer ist als diejenige für primär energetische Nutzung.

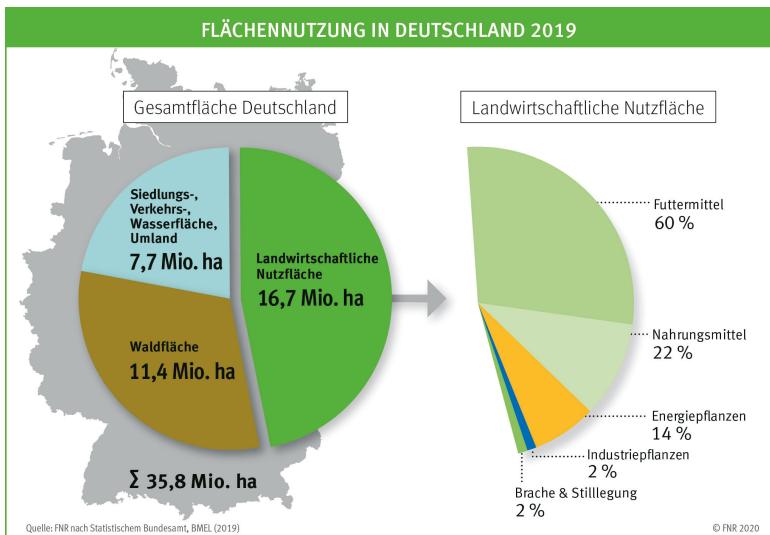


Abb. 1: Flächennutzung in Deutschland (FNR 2020)

Es ist aber darauf hinzuweisen, dass die Zahlen in dieser Ausschließlichkeit nicht die tatsächlichen Stoffströme wiedergeben, da es in vielen Fällen zur Nutzung von Koppel- und Nebenprodukten kommt, z.B. Rapspresskuchen als Nebenprodukt der Biodieselherstellung, das gleichzeitig ein wertvolles Tierfutter darstellt, oder, als Nebenprodukt der Wertholzproduktion, Durchforstungsholz als Brennholz.

Ebenso sind landwirtschaftliche Flächen nicht deziert einem Anbauziel zugeordnet. Welcher Verwendung ein Rohstoff zukommt, entscheidet sich in vielen Fällen erst zur oder nach der Ernte, z.B. aufgrund von Nachfrage- (bzw. Preis-) und Qualitätsschwankungen. Überdies weist die FNR in ihren entsprechenden Studien auf Unschärfe durch Schätzungen, oben erwähnte Koppelproduktion etc. hin (FNR 2020).

Die Einsatzmengen landwirtschaftlicher Biomasse für stoffliche Nutzung in Deutschland belaufen sich aktuell (Stand 2017, s. FNR 2019) auf ca. 3,7 Mio. t; dazu kommen ca. 63 Mio. m³ nicht energetisch genutztes Holz.

2.2 Nachhaltigkeit und Ressourceneffizienz

Die Nutzung von Biomasse anstelle fossiler Ressourcen hat das Potential, THG-Emissionen zu vermeiden. Der gezielte Anbau von Pflanzen für die energetische Nutzung allerdings wirft eigene Probleme in Bezug auf Nachhaltigkeit auf, so die oft genannte „Tank-Teller“-Diskussion, d.h. die Flächenkonkurrenz mit anderen Landnutzungsarten. Dies betrifft nicht nur die Nahrungsmittelproduktion, sondern z.B. auch den Naturschutz, wenn Dauergrünland umgebrochen bzw. gene-

rell Brache in Nutzung genommen wird. Vor allem lokal begrenzt können weitere Probleme wie verringerte Biodiversität durch Monokulturen („Vermaisung“) oder Geruchsbelästigungen (Biogasanlagen) ebenfalls negative Effekte auf Ökologie und v.a. auch Akzeptanz in der Bevölkerung haben.

Thrän, Schaubach et al. (2020) weisen daher auf das Erfordernis einer fortlaufend zu überprüfenden und anzupassenden Regulierung der Biomasseproduktion und -nutzung in Bezug auf Nachhaltigkeitskriterien hin. Eine solche Regulierung, die sie am Beispiel des in Deutschland seit über 15 Jahren etablierten Biogasmarktes beschreiben, muss der Reife des jeweiligen Marktes ebenso angepasst werden wie wissenschaftlichen Erkenntnissen zu den Regulierungseffekten und der gesellschaftlichen Diskussion, und sollte alle Formen der Biomassenutzung einschließen.

Auf wissenschaftlicher sowie politischer Ebene besteht mittlerweile Konsens über eine bevorzugte Verwendung von Biomasse in sogenannten Nutzungs-kaskaden, um Ressourcen durch eine effizientere Nutzung der Anbauflächen zu schonen. Fehrenbach et al. (2017) definieren die Kaskadennutzung von Biomasse als Prozess, in dem ein biogener Rohstoff zu einem biobasierten Endprodukt verarbeitet und dieses Endprodukt mindestens ein weiteres Mal (d.h. mindestens zunächst einmal stofflich und zuletzt einmal energetisch, bei mehrstufigen Kaskaden mindestens zweimal stofflich und einmal energetisch) genutzt wird. Das Führen von Biomasseströmen in solchen Kaskaden ist erklärtes Ziel auch der Bundesregierung und wird als solches bereits im Aktionsplan zur stofflichen Nutzung nachwachsender Rohstoffe (2009), der Nationalen Forschungsstrategie Bioökonomie (2010) und aktuell in der Nationalen Bioökonomiestrategie (2020) mit Verweis auf ökonomische, ökologische und auch soziale Vorteile benannt. Die Bundesregierung sieht in der Kaskadennutzung eine der Voraussetzungen für die Umsetzung der Bioökonomie und damit für die angestrebte Treibhausgasneutralität bis zum Jahr 2050. Fehrenbach et al. weisen allerdings darauf hin, dass es etablierte, v.a. mehrstufige Kaskaden bislang nur in wenigen Bereichen – am erfolgreichsten im Papiersektor – gibt. Entsprechend wird in den Strategiepapieren dezidiert auf Forschungs- und Entwicklungsbedarf zur Kaskadennutzung verwiesen.

Da also Anbaubiomasse primär stofflich genutzt werden sollte, ist es folgerichtig, den Fokus künftiger Bioenergie-Inputstoffe auf Rest- und Abfallstoffe zu legen und hier weitere, bislang ungenutzte Potentiale zu heben.

Brosowski et al. untersuchten 2019 die in Deutschland verfügbaren Potentiale an Rest- und Altholz sowie Sägenebenprodukten, landwirtschaftlichen Nebenprodukten, Siedlungsabfällen incl. Klärschlamm, an industriellen und an sonstigen Reststoffen, z.B. aus der Landschaftspflege. Unter Berücksichtigung von 77 verschiedenen Einzelbiomassen (Bezugsjahr 2015) kommen Brosowski et al. auf ein theoretisches Biomassepotential aus Rest- und Abfallstoffen von 238,3 Mio. t Trockenmasse, davon 107,6 Mio. t aus der Landwirtschaft und

72,4 Mio. t aus Forst- und Holzwirtschaft (s. Abb. 2). Allerdings können 126,1 Mio. t TS aufgrund unterschiedlicher Beschränkungen nicht genutzt werden, und 83,4 Mio. t TS, d.h. gut 74 % des verbleibenden technischen Potentials, werden bereits (stofflich oder energetisch) genutzt.

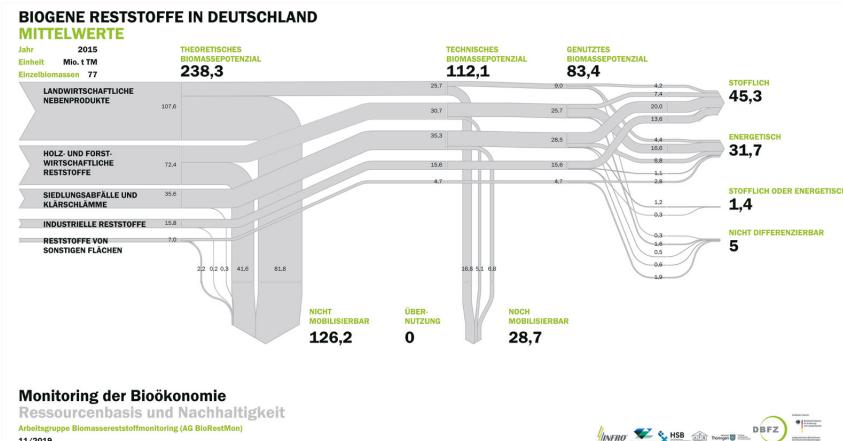


Abb. 2: Potential an Rest- und Abfallstoffen in Deutschland, Brosowski et al. 2019

Dies bedeutet aber immerhin 28,7 Mio. t TS an Rest- und Abfallstoffen, die momentan ungenutzt bleiben – vor allem tierische Exkremente, Getreidestroh und Waldrestholz. Zudem gibt es bei der direkten thermischen Verwertung zum Teil Optimierungsbedarf, so dass Klepper/Thrän (2019) davon ausgehen, dass – falls das Ziel der Bundesregierung, den Primärenergieverbrauch bis 2050 auf 7,2 Exajoule/Jahr zu senken, erreicht wird – Rest- und Abfallstoffe bis zu 17 % dieses Primärenergiebedarfs decken könnten. Das Potential ist also beachtlich, v.a. unter Berücksichtigung der Tatsache, dass auf die Bioenergie insgesamt, also inklusive aller Anbaubiomassen, momentan ca. 8 % des Primärenergieverbrauchs entfallen.

2.3 Systemintegration und Effizienz: Flexibilisierung der Bioenergiebereitstellung

Die aus oben genannten Gründen begrenzten Mengen an Biomasse möglichst effizient einzusetzen, ist also ein wichtiges Ziel der Bioökonomie. Neben dem Vorrang für stoffliche Nutzung wird es bis 2050 auch darum gehen, die energetische Nutzung zu optimieren. Eine Stärke des Energieträgers Biomasse ist seine Speicherfähigkeit, eine andere die große Bandbreite der möglichen Nutzungsarten (Wärme, Strom und Kraftstoffe) in unterschiedlichen Produkten und Aggregatzuständen (fest, flüssig, gasförmig).

Auf Basis dieser Vielfalt sehen Klepper/Thrän eine weiterhin bedeutende Rolle der Bioenergie im gesamten Energiesystem, gehen aber von signifikanten

Änderungen des Biomasseeinsatzes in den nächsten 30 Jahren aus. Unter der Prämisse, dass Bioenergie dort eingesetzt werden soll, wo andere Erneuerbare (Wind, Solar, etc.) Schwächen haben oder ungeeignet sind, muss in den kommenden Jahren und Jahrzehnten ein Schwerpunkt auf der Integration der Bioenergie in das gesamte Energiesystem liegen.

In der Stromproduktion geht es vor allem darum, die Volatilität von Wind- und Sonnenenergie auszugleichen. Dazu ist eine flexible anstatt konstante Fahrweise der Anlage nötig, was bei Kraft-Wärme-Kopplungs-Anlagen, Blockheizkraftwerken und Biogasanlagen gut möglich ist, aber die Weiterentwicklung und Etablierung neuer Konzepte und Systeme erfordert. Ansätze, wie dies gelingen bzw. verbessert werden kann, finden sich z.B. bei Barchmann et al. (2018), die die Flexibilität des gesamten Biogas-Erzeugungsprozesses untersuchten, insbesondere hinsichtlich einer bedarfsgenauen Regelung der Gasproduktion bei gleichbleibend hoher Stabilität des biologischen Prozesses sowie hinsichtlich der Gasspeicherung (siehe Abb. 3).

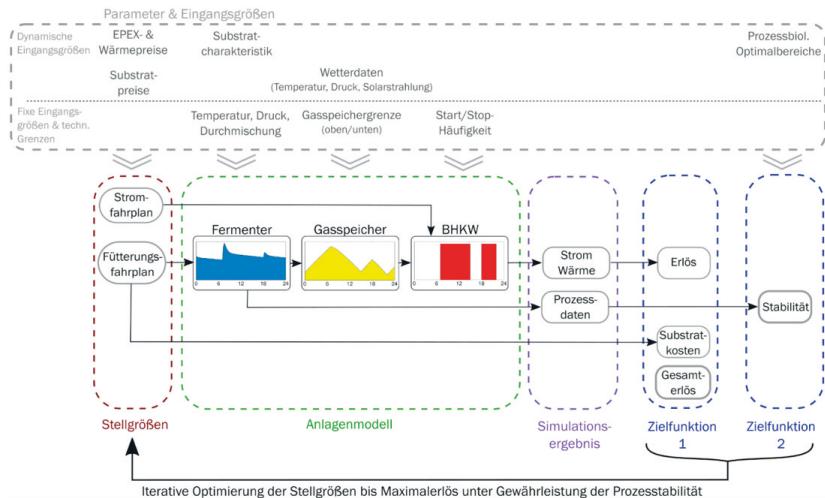


Abb. 3: Steuerungsmodell für Biogasanlage zur größtmöglichen Flexibilität und Effizienz (DBFZ, 2017)

Die hier gezeigten Stellgrößen, die unterschiedlichen „Fahrpläne“, bedürfen ausgereifter Informations- und Kommunikationstechnologie (IKT) für Bedarfsprognosen und zur Steuerung der Anlage. Selbiges gilt ebenso für weitere Anwendungen, wie Thrän et al. (2019) beschreiben: In KWK-Anlagen im Gebäude- und Quartiersbereich trägt IKT dazu bei, CO₂-Emissionen und Betriebskosten kleiner Strom-Wärme-Systeme, z.B. von PV-KWK-Systemen, zu minimieren. In komplexen industriellen Systemen mit verschiedenen Energieformen (Wärme, Kälte, Strom) verbessert IKT die Betriebsführung durch fortlaufende Modellierung und Regelung im Hinblick auf mehrere, z.T. widersprüchliche, Ziele. Und schließlich

erfordert die oben genannte Integration der Bioenergie in ein gesamtes, zunehmend auf erneuerbaren Energieträgern basierendes System die Regelung von und Kommunikation zwischen einer stark erhöhten Anzahl von Anlagen, die auch sehr unterschiedlich regelbar sind. Die heutige, hierarchische Steuerung durch den Netzbetreiber wird unter diesen Gesichtspunkten nicht mehr sinnvoll sein.

Thrän et al. schlagen stattdessen zwei Alternativen vor, zum einen ein Schwarmkonzept, in dem die Anlagen untereinander mit dem Ziel maximaler Netzstabilität kommunizieren, zum anderen ein System, in dem jede Anlage selbst das Netz überwacht und ihre Fahrweise dessen Bedarf anpasst. In letzterem Fall sehen die Autoren zusätzliche Anreize für systemdienlichen Betrieb als notwendig an; in jedem Fall erfordern beide Modelle aber eine ausgereifte Steuerung über IKT.

Ein Schwerpunkt der energetischen Biomassenutzung in 2050 wird nach übereinstimmender Aussage einer Reihe von Studien der Kraftstoffsektor in Bereichen sein, die nicht oder kaum elektrifizierbar sind, d.h. der Flug-, marine Schiffs- sowie Langstrecken-Schwerlastverkehr. Hier wird es darauf ankommen, die Entwicklung fortschrittlicher Biokraftstoffe aus lignozellulosehaltigen Rohstoffen soweit voranzutreiben, dass sie zu marktfähigen Preisen produziert werden können, in entsprechende Anlagen, die als Bioraffinerien konzipiert werden und somit (Vor-) Produkte für die chemische Industrie, z.B. Methanol, ebenso liefern wie synthetische Kraftstoffe (s. auch Klepper/Thrän).

2.4 Wohin mit dem CO₂? Biomassebasierte Lösungsansätze

Da CO₂ nicht das einzige, aber das wichtigste THG darstellt, steht seine Konzentration in der Atmosphäre im Zentrum der Klimaschutzdebatte und -ziele. Neben einer Reduzierung des Verbrauchs fossiler Ressourcen durch die Umstellung auf eine biobasierte Wirtschaft sowie durch Konsumverzicht wird es zur Einhaltung des Ziels, die Erderwärmung auf 1,5 °C zu begrenzen, nötig sein, der Atmosphäre aktiv CO₂ zu entziehen (Sonderbericht des IPCC, Intergovernmental Panel on Climate Change, 2019).

Es gibt eine Reihe von nicht-biobasierten Ansätzen eines dauerhaften Kohlenstoffentzugs aus der Atmosphäre, z.B. direkte Abscheidung aus der Luft (DACS, direct air capture and storage) oder Verwitterungsverstärkung/mineralische Karbonisierung (enhanced weathering/mineral carbonisation, EW/MC). Aber auch biobasierte Optionen wie die Aufforstung nicht (mehr) bewaldeter Flächen, die Herstellung von Biokohle und deren Einarbeitung in den Boden, oder die Kombination von Bioenergie mit CO₂-Abscheidung und -speicherung (bioenergy with carbon capture and storage, BECCS) werden hier diskutiert.

Bei BECCS würde die energetische Nutzung von Biomasse mit der Abscheidung des dabei entstehenden CO₂ und dessen dauerhafter Speicherung im Untergrund – in salzhaltigen Grundwassereleitern oder erschöpften Öl- oder Erdgaslagerstätten – verbunden (Kemper, 2017). Der Kohlenstoff wäre somit dem

Kreislauf entzogen und negative Emissionen entstünden. Aktuell gibt es allerdings in Deutschland keinerlei Anreize, die Technologie weiter zu entwickeln, und auch EU-weit wurden Pilotprojekte gestoppt, da in der öffentlichen Wahrnehmung das Thema negativ besetzt war.

Klepper/Thrän betonen daher das Erfordernis einer – zeitnahen – gesellschaftlichen Diskussion zur Rolle von BECCS in der künftigen Klimaschutzstrategie. Um in Szenarien für 2050 Berücksichtigung zu finden, wäre es ihnen zufolge aber notwendig, zwischen 2020 und 2030 erste BECCS-Anlagen kommerziell in Betrieb zu nehmen. Dies ist aufgrund fehlender Transport- und Lagerinfrastrukturen und einem noch unzureichenden Stand der technischen Entwicklung derzeit nicht absehbar.

Nicht in Konkurrenz, sondern in Ergänzung zum Ansatz der Abscheidung und Speicherung steht derjenige einer Nutzung von CO₂ als Rohstoff (carbon capture and use, CCU). Wie Billig et al. (2019) feststellten, wird sich diese Rohstoffbasis in den kommenden Jahrzehnten verändern: Standen 2015 noch 498,2 Mt CO₂/a aus fossilen Quellen für CCU in Deutschland zur Verfügung, so wären es 2050 bei Erreichen des 80%-Ziels (je nach Szenario) zwischen 66 und < 117 Mt CO₂/a. Das theoretische Potential biobasierten CO₂s allein auf Basis von Biogas/Biomethan (d.h. ohne Syngas-Optionen und ohne nicht-fossiles, nicht-biobasiertes CO₂) läge dagegen aktuell bei knapp 12 Mt, während der Bedarf der Industrie sich auf etwas über 5 Mt beläuft. Das heutige Potential von CO₂ aus Biomasse übertrifft also den industriellen Bedarf um mehr als das Doppelte. Hierbei ist allerdings festzuhalten, dass es wenig gesicherte regionale Zahlen und keinerlei Prognosen gibt. Global gesehen, gehen Billig et al. von einer Steigerung der Nachfrage an CO₂ sowohl für die chemische Industrie als auch für Kraftstoffe aus. In jedem Fall bestehen hier weitere Optionen zu einer zumindest temporären Speicherung sowie des Ersatzes fossiler Rohstoffe, die technisch bereits heute möglich sind.

2.5 Rahmenbedingungen

Allen in den vorhergehenden Abschnitten beschriebenen Ansätzen und Konzepten ist gemein, dass ihre erfolgreiche Umsetzung stark von politischen bzw. rechtlichen Rahmenbedingungen abhängig ist. In einigen Fällen wurden mit den genannten Strategien der Bundesregierung sowie Umsetzung von EU-Richtlinien in nationales Recht bereits die Weichen gestellt, so in Bezug auf eine Bevorzugung stofflicher Nutzung von Anbaubiomasse und einer Förderung der Entwicklung von Nutzungskaskaden. Auch in der den Energiesektor betreffenden Gesetzgebung hat Deutschland in den letzten 15 Jahren, wie von Thrän et al. am Beispiel des EEG und des Biogassektors gezeigt, wirksame Werkzeuge für die Entwicklung und das Monitoring geschaffen und eingesetzt. Allerdings wird gerade an diesem Beispiel auch deutlich, dass zum einen Monitoringsysteme im Hinblick auf die Bewertung der Nachhaltigkeit noch verbessert werden können und sollten, und dass es zum anderen dringend erforderlich ist, die Gesetze-

bung und das Monitoring in unterschiedlichen Bereichen – hier speziell Energie und Landwirtschaft – besser auf einander abzustimmen. Beides, die Entwicklung eines transparenten Nachhaltigkeits-Monitorings und die Anpassung der rechtlichen Rahmenbedingungen, sollte unter Einbeziehung gesellschaftlicher Akteure wie NGOs erfolgen, um die öffentliche Akzeptanz zu stärken.

Auch der Bioökonomierat, in dem das DBFZ ebenfalls vertreten ist, weist in seinem Appell an die Politik (2019) darauf hin, dass zur Implementierung der Bioökonomie weitere Anreize und rechtliche Rahmenbedingungen geschaffen werden müssen, um die gesteckten Ziele aus den einschlägigen Strategiepapieren zu erreichen, und dass dies vor allen Dingen ressortübergreifend geschehen muss.

In Bezug auf den Verkehrssektor weisen Meisel et al. (2019) darauf hin, dass eine Einhaltung lediglich der durch die europäische Erneuerbaren-Energien-Richtlinie 2018/2001, RED II, festgelegten Mindestanforderungen nicht ausreichen wird, um die Klimaschutzziele der Bundesregierung zu erreichen. Es ist daher notwendig, den Endenergieverbrauch für den Verkehr deutlich zu reduzieren und gleichzeitig, unter Nutzung praktisch aller verfügbaren erneuerbaren Optionen, eine deutlich stärkere THG-Reduzierung der verwendeten Kraftstoffe zu erreichen. Dies wird voraussichtlich nur möglich sein, wenn weitere Anreize geschaffen werden.

Auch in Bezug auf BECCS steht – nach grundlegenden politischen Entscheidungen – die Schaffung rechtlicher und ökonomischer Rahmenbedingungen an, welche Technologien zur CO₂-Abscheidung fördern. Die derzeitigen Bedingungen bieten, wie Klepper/Thrän betonen, keine Anreize, die Technologie weiterzu - entwickeln.

Im Stromsektor kann Bioenergie, wie oben beschrieben, bis 2050 eine Position als „Lückenfüller“ in Ergänzung zu anderen Erneuerbaren einnehmen, wenn sich ihr Einsatz hochflexibel gestalten lässt. Lauer et al. (2019) weisen allerdings darauf hin, dass diese Flexibilisierung, so wünschenswert sie aus systemischen Gründen ist, aus ökonomischer Sicht nur realisiert werden kann, wenn weitere Bedingungen erfüllt werden wie z.B. eine Monetarisierung des gesellschaftlichen Nutzens von Biogasanlagen und ein schneller und vollständiger Ausstieg aus der Kohleverstromung.

3 Fazit: Erforderliche Weichenstellungen für eine systemdienliche Biomassenutzung in 2050

Die Nutzung von Biomasse ist unerlässlich, um nationale und internationale Klima- und Ressourcenschutzziele zu erreichen. Die Rohstoffe der Bioökonomie sind nachwachsend und können bei nachhaltiger Nutzung einen wichtigen Anteil einer CO₂-neutralen Wirtschaft ausmachen. Voraussetzungen für einen

maximalen gesellschaftlichen, ökologischen und ökonomischen Beitrag bis 2050 sind folgende Weichenstellungen in der unmittelbaren Zukunft:

- Neue Produkte und Nutzungskaskaden müssen für die Bioökonomie entwickelt und bestehende Prozesse angepasst werden.
- Eine gesellschaftliche Diskussion zur Umsetzung der Bioökonomie ist notwendig – z.B. hinsichtlich BECCS, aber auch anderer Bereiche, in denen öffentliche Akzeptanz oder Bewusstsein aktuell schwach ausgeprägt sind.
- In Bezug auf eine energetische Biomassenutzung soll rohstoffseitig der Fokus auf Rest-/Abfallstoffe sowie anwendungsseitig auf Schwachstellen anderer Erneuerbarer gelegt werden.
- Im Bereich Strom/Wärme ist eine hohe Flexibilisierung der Anlagen und damit bessere Systemintegration von KWK, BHKW und Biogasanlagen unter Nutzung von IKT anzustreben.
- Im Verkehrssektor müssen praktisch alle zur Verfügung stehenden Kraftstoffoptionen genutzt, holzbasierte Bioraffinerien zur Marktreife gebracht und der Verbrauch insgesamt deutlich reduziert werden.
- Auf der Regulierungsseite ist es essentiell, auf Bioenergie bezogene und andere landwirtschaftlich relevante Gesetzgebung gemeinsam zu betrachten und abgestimmt zu entwickeln. Zusätzlich bedarfes eines transparenten, regelmäßigen Monitorings der Nachhaltigkeit und der Anpassung der Rahmenbedingungen unter Einbeziehung gesellschaftlicher Akteure wie NGOs.

Literatur/Quellen

- Barchmann, T., Mauky, E., Kornatz, P., Rensberg, N., Kretschmar, J. (2018): Neues aus der Forschung: Forschungsvorhaben GAZELLE – ganzheitlich flexibler Betrieb. Vortrag auf der Messe energy decentral – FlexForum, Hannover.
- Billig, E., Decker, M., Benzinger, W., Ketelsen, F., Pfeifer, P., Peters, R., Stolten, D., Thrän, D. (2019): Non-fossil CO₂ recycling — the technical potential for the present and future utilization for fuels in Germany. Journal of CO₂ Utilization 30 (2019) 130 – 141.
- Bioökonomierat (2019): Der Bioökonomierat –Ausblick in eine nachhaltig gestaltete Zukunft. Appell an die Politik. https://www.biooekonomierat.de/fileadmin/Publikationen/empfehlungen/Empfehlung_Ausblick_final_2.pdf, abgerufen am 02.05.2020.
- BMBF/BMEL (2020): Nationale Bioökonomiestrategie – Kabinettsvorlage, Berlin.
- BMBF (2010): Nationale Forschungsstrategie BioÖkonomie 2030 – unser Weg zu einer bio-basierten Wirtschaft, Bonn.
- BMELV (2009): Aktionsplan der Bundesregierung zur stofflichen Nutzung nachwachsender Rohstoffe, Berlin.
- Brosowski, A., Krause, T., Mantau, U., Mahro, B., Noke, A., Richter, F., Raussen, T., Bischof, R., Hering, T., Blanke, C., Müller, P., Thrän, D. (2019): How to measure the impact of biogenic residues, wastes and by-products: Development of a national resource monitoring based on the example of Germany. Biomass and Bioenergy, Volume 127, 105275.

- Bundesregierung (2019): Projektionsbericht 2019 für Deutschland gemäß Verordnung (EU) Nr. 525/2013, Berlin.
- Fehrenbach, H., Köppen, S., Breitmayer, E., Essel, R., Baur, F., Kay, S., Wern, B., Bienge, K., Geibler, J. von, Kauertz, B., Detzel, A., Wellenreuther, F., Carus, M. (2017): Biomassekaskaden. Mehr Ressourceneffizienz durch stoffliche Kaskadennutzung von Biomasse – von der Theorie zur Praxis, Dessau-Roßlau.
- FNR (2020): Anbau und Verwendung nachwachsender Rohstoffe in Deutschland, Gülzow-Prüzen.
- FNR (2019): Basisdaten biobasierte Produkte 2019, Gülzow-Prüzen.
- Klepper, G./Thrän, D. (2019): Biomasse im Spannungsfeld zwischen Energie- und Klimapolitik. Potenziale – Technologien – Zielkonflikte (Schriftenreihe Energiesysteme der Zukunft), München.
- Lauer, M., Leprich, U., Thrän, D. (2020): Economic assessment of flexible power generation from biogas plants in Germany's future electricity system. Renewable Energy 146 (2020) 1471 – 1485.
- Meisel, K., Millinger, M., Müller-Langer, F., Majer, S., Thrän, D. (2019): Future renewable fuels mixes in transport in Germany under RED II and climate protection targets. Energies (2020) 13, 1712.
- Thrän, D., Lenz, V., Liebetrau, J., Wille-Haußmann, B., Krautkremer, B., Kneiske, T., Dreher, A., Dahmen, M., Yang Shu, D., Bau, U., Kolb, T., Lehneis, R. (2019): Flexibler Einsatz von KWK, BHKW, Biogas-Anlagen durch moderne Informations- und Kommunikationstechnik. FVEE-Themen 2018: Die Energiewende – smart und digital, Berlin.
- Thrän, D., Schaubach, K., Majer, S., Horschig, T. (2020): Governance of sustainability in the German biogas sector—adaptive management of the Renewable Energy Act between agriculture and the energy sector. Energy, Sustainability and Society (2020) 10:3.
- Vereinte Nationen (2015): Übereinkommen von Paris. Englischer Originaltext: https://unfccc.int/files/essential_background/convention/application/pdf/english_paris_agreement.pdf, deutsche Übersetzung (Veröffentlichung der Bundesregierung): https://www.bmu.de/fileadmin/Daten_BMU/Download_PDF/Klimaschutz/paris_abkommen_bf.pdf. Abgerufen jeweils 23.04.2020.

Kontakt

*Prof. Dr. Michael Nelles, Wiss. Geschäftsführer DBFZ –
Deutsches Biomasseforschungszentrum gGmbH*

Torgauer Straße 116, 04347 Leipzig
① +49 (0)341.2434-112 | ☎ michael.nelles@dbfz.de | 🌐 www.dbfz.de und

Universität Rostock, Agrar- und Umweltwissenschaftliche Fakultät
Professur Abfall- und Stoffstromwirtschaft
Justus-von-Liebig-Weg 6, 18059 Rostock
① +49 (0)381.498-3400 | ☎ michael.nelles@uni-rostock.de

Bioenergie 2030 – Ziele und notwendige Maßnahmen

Zusammenfassung: In Bezug auf die Produktion Erneuerbarer Energie ist Bioenergie sektorenübergreifend gesehen aktuell der wichtigste Pfeiler der Energiewende. Gleichzeitig ist die Bioenergie durch die gegenüber PV und Wind höheren Kosten in Bedrängnis geraten. So sind die EEG'S seit 2012 nicht mehr hinreichend auskömmlich für eine nennenswerte Anzahl neuer Bioenergieprojekte und die Wärme- und Verkehrswende gerät ebenfalls ins Stocken. Zusätzlich gibt es durch die Bioenergie neben der reinen Energieproduktion eine Reihe von energiewirtschaftlichen (z.B. kostengünstige Bereitstellung von Flexibilisierung) und externen Effekten, wie z.B. die Kostenreduktion in der Entsorgungswirtschaft sowie die THG-Minderungen im Agrarsektor, die es aus makroökonomischer Sicht sinnvoll erscheinen lassen, Bioenergie auch weiterhin im Energiesystem zu unterstützen. Die Nutzungspfade für Bioenergie werden sich dabei verändern, da mittelfristig mit einer stärkeren Nachfrage z.B. im Industriesektor zu rechnen ist.

Abstract: Regarding the production of renewable energy, bioenergy is currently the most important pillar of the energy transition across all sectors. At the same time, bioenergy has come under pressure due to the higher costs compared to PV and wind. Since 2012, the feed-in tariffs have no longer been sufficient for a significant number of new bioenergy projects, and the transition in the heating and transport sector is also stalling. In addition, there are a number of energy-related (e.g. cost-effective provision of flexibility) and external effects, such as e.g. the cost reduction in the waste disposal industry and the GHG reductions in the agricultural sector, which make it appear sensible from a macroeconomic perspective to continue to support bioenergy in the energy system. The paths of use for bioenergy will change, as medium-term demand increases, e.g. in the industrial sector.

Ausgangssituation

Im Jahr 2019 war die gesamte Biomasse mit 20,6 % an der erneuerbaren Bruttostromerzeugung beteiligt und stellte damit – nach Wind an Land – den zweithöchsten Anteil. Allein Biogas stellte 12,0% [BMWi 2020, S. 11]. Am Endenergieverbrauch Wärme hatten die erneuerbaren Energien einen Anteil von 14,5 % wovon 86,1 % auf Biomasse basiert. Der überwiegende Anteil der Biomassebasierten Wärmebereitstellung resultiert dabei aus Festbrennstoffen in den verschiedenen Sektoren (z.B. Holzverbrauch in privaten Haushalten: 39,0 %). Auf Biogas (inkl. Biomethan, Klär- und Deponiegas) entfielen 10,9 % [BMWi 2020, S. 25]. Im Verkehrssektor wurden 85,9 % der Erneuerbaren Energieträger durch Biomasse gestellt, deren Anteil am Endenergieverbrauch bei 5,6 % lag [BMWi 2020]. Bioenergie ist somit ein Leistungsträger in allen Sektoren.

Gleichwohl ist die Bioenergie seit einigen Jahren zunehmend in die Kritik geraten. Aus ökonomischer Sicht werden dabei in diesem Kontext aufgrund der vergleichsweise hohen Vergütungen durch das Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG) Zweifel an der Kosten-Effizienz der Bioenergie geäußert. Kritikpunkte auf Basis agrarwirtschaftlicher und naturschutzfachlicher Kriterien sowie weiterer Aspekte der Landnutzung richten sich vor allem gegen die direkte Nutzung von Anbaubiomasse/Energiepflanzen.

Nicht zuletzt vor diesem Hintergrund hat der Gesetzgeber mit den EEG-Novellen 2012, 2014 und 2017 die Rahmenbedingungen für Bioenergie signifikant geändert. Durch die Reduktion der Vergütungssätze für Neuanlagen und die verpflichtende Einführung von Ausschreibungen für Anlagen über 150 kW installierter Leistung sind die Inbetriebnahmen neuer Anlagen im Biogassektor stark zurückgegangen. Unter der Annahme, dass die aktuellen Rahmenbedingungen fortgeschrieben werden, ist auch zukünftig mit nur wenigen neu errichteten Anlagen im Rahmen des EEG-Regimes zu rechnen. Aufgrund des Auslaufens der EEG-Vergütung wird der Gesamtbestand an Biogasanlagen in den kommenden 20 Jahren sehr wahrscheinlich schrittweise abnehmen, wenn für die betroffenen Bestandsanlagen nach Auslaufen der EEG-Vergütungsdauer keine wirtschaftlichen Anschlussperspektiven gefunden werden.

Im Bereich der Festbrennstoffe wurde im Jahr 2012 über eine Änderung in der Biomasseverordnung (BiomasseV) die EEG-Förderung für neue Altholzanlagen eingestellt. Grund hierfür waren – gemäß den Untersuchungen zum Erfahrungsbericht des EEGs [DBFZ 2011, S. 101] – ausgeschöpfte Altholzpotenziale in Deutschland, weshalb keine zusätzlichen Anreize für eine energetische Altholznutzung mehr gesetzt werden sollten. Auch hier stellt sich daher die Frage, auf welcher Basis der vorhandene bzw. angepasste Kraftwerkspark nach Auslaufen des 20-jährigen EEG-Vergütungszeitraumes weiter betrieben werden kann.

Reine Wärmeerzeugungsanlagen haben nach wie vor Probleme, gegen günstige fossile Brennstoffe zu konkurrieren. Zudem sind die Waldholzpotenziale – mit regionalen Unterschieden – nahezu erschöpft, so dass weitere Nutzungsansätze insbesondere in den – qualitativ schlechteren – Landschaftspflegehölzern sowie im Grüngut zu suchen sind [Fehrenbach et al 2019]. Wichtig in diesem Zusammenhang ist der zu führende Diskurs im Kontext der Argumente, dass eine Energieholznutzung aus dem Wald grundsätzlich positiv für das Klima ist [Schulze et al. 2020] und der Wald hinsichtlich der Klimaschutzeffekte generell sogar zu wenig genutzt wird [Hennig et al. 2017].

Die mögliche Entwicklung von Anlagenkapazitäten nach dem Auslaufen des 20-jährigen EEG-Vergütungszeitraumes wurde bereits in verschiedenen Studien skizziert. Die nachfolgenden Betrachtungen basieren auf zwei exemplarischen Szenarien aus den Studien „Makrobiogas“ (gefördert durch die FNR) und „Altholz quo vadis“ (gefördert durch das BMWi), an denen die Autoren beteiligt waren.

Für den Biogas-Sektor wird in der nachfolgenden Abb. 1 beispielhaft ein Szenario dargestellt, welches das derzeitige Ausschreibungs-Regime hypothetisch forschreibt (Szenario „Ausschreibungsdesign“). Dabei wird von einer Ausschöpfung der sog. Flexibilitätsprämie („Flexdeckel“) und einem Neubau von insg. 12 MW/a Güllekleinanlagen und Abfallvergärungsanlagen ausgegangen. Dies entspricht dem Durchschnitt der letzten Jahre. Gemäß den geltenden Regelungen wurden für die Jahre 2017-2019 je 150 MW brutto ausgeschriebener Leistung und ab 2020 jährlich 200 MW brutto angenommen, die bis 2035 hypothetisch fortgeschrieben wurden [siehe Matschoss et al 2019, S. 107]. Zudem wurden weitere Regelungen berücksichtigt (Übertragung nicht bezuschlagter Mengen auf die nächste Periode etc.), um den Ausschreibungspfad möglichst realistisch abzubilden [vgl. Matschoss et al. 2019, S. 104-106]. Dadurch ergibt sich der in Abb. 1 dargestellte Verlauf.

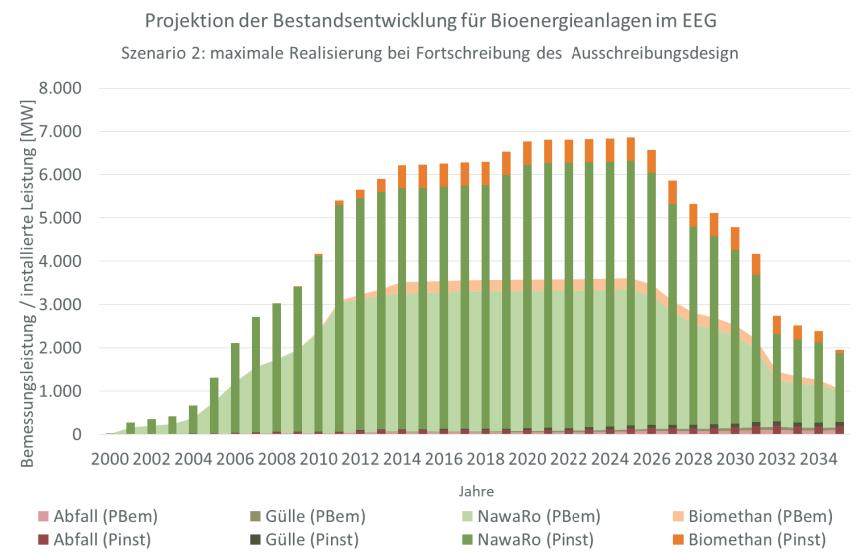


Abb. 1: Mögliche Entwicklung von Biogasanlagen bis 2035,
entnommen aus Matschoss et al. (2019), S. 107

Es zeigt sich ein Bild, in welchem die Kapazitäten bis Mitte der 2020er Jahre ein Plateau bilden, das danach abfällt. Im Jahr 2035 bleiben durch die Ausschreibungen schließlich rund 1.000 MW_{el} Bemessungs-, bzw. knapp 2.000 MW_{el} installierter Leistung erhalten.

Für den – mit einem Entsorgungsauftrag verbundenen – Altholzsektor wurde im Rahmen des Projektes Altholz quo vadis [vgl. Baur et al. 2019] ein mögliches Szenario entwickelt, welches das Altholzaufkommen (siehe Abb. 2, obere rote Linie) und die potenziellen Nutzungskapazitäten zusammenführt. Für die stoffliche Nutzung wurde dabei angenommen, dass diese aktuell 1,5 Mio. Tonnen

Altholz einsetzt (violette Fläche) und eine weitere zukünftige Aufnahmekapazität auf der Grundlage der aktuellen Rahmenbedingungen von weiteren 0,5 Mio. Tonnen Altholz (violett-gestreifte Fläche) aufweist. Marktberichte gehen darüber hinaus davon aus, dass MDF-Werke¹ in Zukunft ebenfalls Altholz einsetzen können. Dies würde dann einen Altholzeinsatz von 3 Mio. t bedeuten. Diese Entwicklung bleibt jedoch abzuwarten.

Daneben wurden die bestehenden EEG Altholzkraftwerke mit einer installierten Leistung von 765 MW_{el} in die Übersicht als Abnehmer von derzeit 5,2 Mio. Tonnen (2019: zusätzliche 0,2 Mio. Tonnen durch das in Planung befindliche Werk Hürth-Knapsack) mit – entsprechend der EEG Auslauflinie verringerten Tonnagen bis 2030 – aufgenommen. Mantau et al. (2016) beziffern zudem die verbrauchten Altholzmengen außerhalb des EEGs auf knapp 2 Mio. Tonnen im Jahr 2016 (orange Fläche). Als weitere Abnehmer von Altholzmengen wurden Müllverbrennungs- und EBS-Anlagen identifiziert. Diese besitzen nach (Mantau, 2016) jedoch lediglich eine Aufnahmekapazität von maximal 1,3 Mio. Tonnen.

Die grau schraffierte Fläche stellt letztendlich im Szenario die überschüssigen Altholzmengen dar, für die – unter der Voraussetzung eines Abschaltens der EEG-Altholzkraftwerke nach Auslaufen des EEG-Vergütungszeitraumes – keine Verbrennungskapazitäten verfügbar wären.

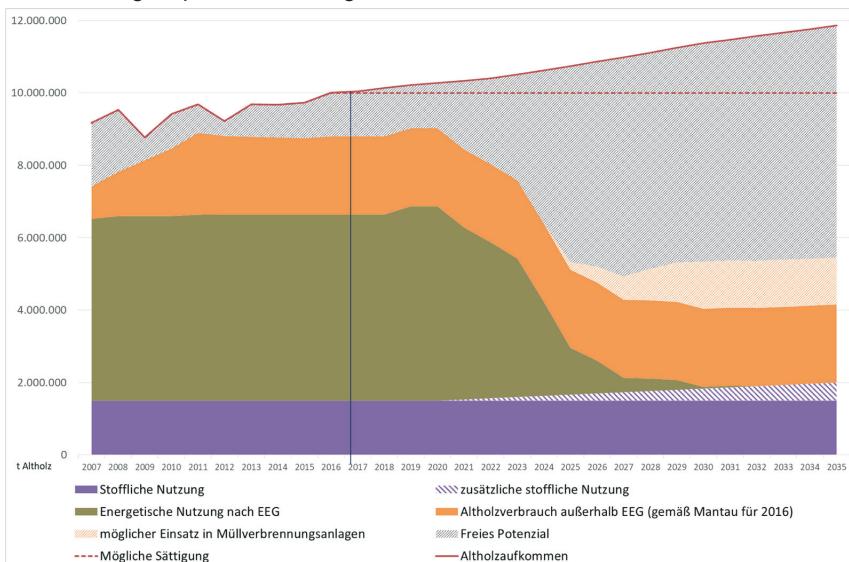


Abb. 2: Altholzmengen und Altholzverbräuche von 2006 bis 2035,
entnommen aus Baur et al. 2019, S. 326

¹ MDF bedeutet Mittelfeste Faserplatte und ist ein Holzwerkstoff, der bisher nur Waldholz eingesetzt hat. Bisher konnte Altholz nur in der Spanplatte stofflich verwertet werden.

Mit Blick auf die oben skizzierten Szenarien und die erwähnten Beiträge der Bioenergie zur erneuerbaren Strom- und Wärmeerzeugung stellt sich energiepolitisch die Frage, wie die Beiträge der Bioenergie zu ersetzen sind, wenn sie sich – auch in einer gegebenenfalls abgeminderten Form – wie oben skizziert entwickeln und wenn die Ausbauziele für erneuerbare Energien nicht aufgegeben werden sollen².

Diesbezüglich wurde im Rahmen des Projektes Makrobiogas eine Abschätzung des zusätzlichen Ausbaubedarfs von Wind- und PV-Kapazitäten vorgenommen, die zur Kompensation der wegfallenden erneuerbaren Strom- und Wärmemengen des auslaufenden Bioenergiebestands (hier Biogas) notwendig wären. Da Bioenergie auch steuerbare Leistung zur Verfügung stellt, die als Flexibilitätsoption genutzt werden kann, wurde als Ersatz auch ein notwendiger Bedarf an Batteriespeichern in Ansatz gebracht. Um hier eine direkte Vergleichbarkeit zu ermöglichen, wird ein Verhältnis zwischen Wechselrichterleistung und installierter Batteriekapazität (C-Rate) von 1/8 angesetzt, der einer täglichen bedarfsgerechten Stromproduktion (bei einer dreifach überbauten Biogasanlage) von 8 h entspricht. Unter Berücksichtigung der getroffenen Annahmen³ ergibt sich – kumuliert bis 2035 – ein zusätzlich – d. h. zu den ohnehin notwendigen Ausbauvolumina – erforderlicher Wind- und PV-Ausbau von ca. 6,1 GW Wind an Land und ca. 19,7 GW PV. Zur Einordnung ist dies im Vergleich zur installierten Leistung im Jahr 2019 von 53,3 GW Wind an Land und 49,0 GW PV [BMWi 2020, S. 16 und 18] zu sehen. Des Weiteren wäre schätzungsweise ein zusätzlicher Bedarf an Speicherleistung von 4,8 GW sowie ca. 38 GWh Speicherkapazität erforderlich. Dies ist im Vergleich zur installierten Leistung von Pumpspeicheranlagen in Deutschland im Jahr 2018 von 6,4 GW und einer Speicherkapazität von 39 GWh zu sehen [Matschoss et al. 2019, S. 115-118].

Ziele

Angesichts der oben skizzierten Situation, geht es – als wesentliches Ziel – aktuell um die Sicherung und Weiterentwicklung eines effizienten und verstärkt an Nachhaltigkeitskriterien ausgerichteten Anlagenparks, um die EE-Ausbauziele nicht zu gefährden. Darüber hinaus sind die derzeit noch nicht erfassten Potenziale im Reststoff-Bereich zu mobilisieren.

Die bislang rein auf die EEG-Vergütung ausgerichtete Kostendiskussion bei Bioenergieanlagen ist dabei zu differenzieren, da Bioenergieanlagen – im Vergleich zu sonstigen EE-Anlagen – in einer wesentlich stärkeren systemischen Funktion in vielfältige Dienstleistungsbereiche eingebunden sind. Diese Funktionen bestehen nicht nur in den oben genannten Dienstleistungen im Strommarkt als

² Der eher theoretische Fall, dass durch verstärkte Energieeinsparungen der Strom- und Wärmebedarf soweit sinkt, dass der Anteil erneuerbarer Energien trotz wegfallender Bioenergiemengen gehalten würde, wird hier nicht betrachtet.

³ Strom: 50 % Wind an Land und 50 % PV; Wärme: Wärmepumpe (Jahresarbeitszahl = 2,5)

steuerbare Energie (plus spezifischer Systemdienstleistungen, wie etwa Regelernergie), sondern – wie Abb. 3 zeigt – auch in Leistungen jenseits des Energiesektors. Dabei handelt es sich um zusätzliche Aspekte, z.B. der Landschaftspflege, des Naturschutzes, der Agrarstruktur, der Entsorgungs- und Ressourcenpolitik oder des Emissionsschutzes, die (teilweise durch spezielle Boni) in den bisherigen EEG's adressiert und über die Umlage zur Refinanzierung von Erneuerbarem Strom mit finanziert wurden. Somit bestehen vielfältige Schnittstellen zu Prozessen abseits der Strommärkte, welche teilweise jeweils für sich über eigene Finanzierungsmechanismen verfügen.

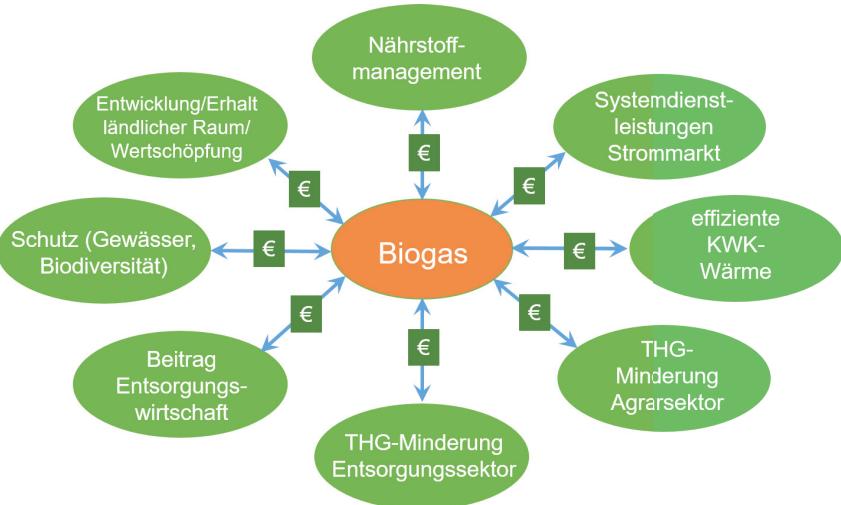


Abb. 3: Mögliche Funktionen der Bioenergie, eigene Bearbeitung

Das Hauptfinanzierungsinstrument – gerade bei Biogasanlagen – ist mit dem EEG jedoch ein Instrument des Strommarkts, wodurch die Diskussion um Biogasanlagen meistens auf die Energiepolitik (überwiegend auf den Strommarkt) fokussiert bleibt. Während die Bedeutung der Bioenergieanlagen neben dem Wärmemarkt auch für den Verkehrssektor und die Sektorenkopplung langsam in den Blick rückt, werden deren Bedeutung in den oben dargestellten, sonstigen Wirkbereichen (und deren Wechselwirkung mit der Energiepolitik) weiterhin wenig beachtet.

So führen die bisherigen EEG-Vergütungen z.B. zu einer Minderung der Entsorgungspreise im Altholzsektor. Ähnlich verhält es sich bei den Bioabfällen. Hier ermöglicht die EEG-Einspeisevergütung die Vorschaltung von Vergärungsstufen und somit eine hochwertige Verwertung gemäß § 8 Abs. 1 KrWG (Vergärung mit anschließender Kompostierung). Für Bioabfall ist unter Annahme bekannter Gaserträge von einer Kostenreduktion von ca. 35 €/t Bioabfall für die Bürger auszugehen, was bei einer Hochrechnung für die insgesamt in Deutschland

über die Biotonne erfassten Mengen (4,9 Mio. t) einer Gesamteinsparung im Bereich der Entsorgungskosten von ca. 170 Mio. € gleichkäme.

Bioenergieanlagen leisten zudem Beiträge in der nicht-energetischen THG-Vermeidung. Während es sich bei der energetischen THG-Vermeidung um die Verdrängung fossiler Energieträger durch die Bioenergieproduktion handelt, handelt es sich bei der nicht-energetischen THG-Vermeidung um die Senkung der Emissionen aus landwirtschaftlichen Reststoffen. Diese werden z.B. über den Biogasprozess reduziert, weil sie die längste Zeit in einem gasdichten Raum (Fermenter) verweilen. Insgesamt haben Biogasanlagen im Jahr 2017 durch die Verwertung von Gülle und Mist 1,98 Mio. t CO₂-Äq an nicht-energetischen THG vermieden [Matschoss et al 2019, S. 96] – dies entspricht gut 80 % der THG Emissionen des inländischen Flugverkehrs im Jahr 2016 [vergleichen UBA 2019, S. 21; eigene Berechnung]. Mit einem Börsenpreis von 25 €/t CO₂ bewertet, entspräche dies einer Inwertsetzung am Markt von rund 50 Mio. €. Wird hingegen der untere Wert der globalen Schadkosten der Methodenkonvention 3.0 des Umweltbundesamtes von 180 €/t CO₂ angesetzt, ergeben sich 356 Mio. €. Da diese Emissionen überwiegend durch die Viehhaltung und damit durch den Fleischkonsum (und den Konsum von Molkereiprodukten) hervorgerufen werden, werden die Einsparungen durch die Zahler*innen der EEG-Umlage für diese Konsumentengruppen erbracht.

Bioenergieanlagen könnten zudem weitere Dienstleistungen erbringen, wenn dafür Anreize existierten (die derzeit vorhandenen Anreizmodelle liefern diesbezüglich jedoch keine zusätzlichen Refinanzierungsbeiträge). Beispiele hierfür wären der Grünlandeinhalt (durch die Grasnutzung), die Landschaftspflege (z.B. Offenhaltung von Magerwiesen), der Gewässerschutz (durch einen gewässerschonenden Substratanbau), der Erosionsschutz (durch einen erosionsmindernen Substratanbau) und die Biodiversität (durch die Nutzung von Blühpflanzen als Anbaubiomasse). Darüber hinaus können Biogasanlagen als Schnittstelle für ein überregionales Nährstoffmanagement fungieren, indem über eine entsprechende Gärrestaufbereitung ein Ausgleich zwischen Nährstoff-Überschuss mit Nährstoff-Mangelregionen erfolgt.

Unter Berücksichtigung der obigen Zusammenhänge erscheint daher eine gesamtökonomische Betrachtung erforderlich, welche zudem die energiewirtschaftlichen Leistungspotenziale betrachtet. Hier ist im Stromsektor – neben der reinen Stromproduktion – der Einsatz von – vorrangig – Biogas als Flexibilitätsoption relevant. Auf der Grundlage aktueller Modellierungen im Projekt BE20plus [Gouya & Eltrop 2019] sind dabei durch ein Repowering und eine Flexibilisierung des Anlagenparks Kostenreduktionen des Stromsystems möglich. Langfristig sind dabei die Gesamtkosten des Stromsystems in einer 90 % defossilisierten Welt niedriger, wenn Biomasse Teil des Stromsystems ist. Sinkt dagegen der Anteil von Bioenergie, werden nach derzeitiger Einschätzung insbesondere neue Erdgaskapazitäten zugebaut, was dem Ziel einer Dekarbonisierung widerspricht.

Auch die Altholzheizkraftwerke haben neben ihrer Funktion im Entsorgungssektor eine wesentliche Aufgabe in der regenerativen Strom- und Wärmeproduktion. So erzeugen sie erneuerbaren Strom (1-2 % der gesamten bundesdeutschen Stromproduktion) und erneuerbare Wärme, die z.B. in Fernwärmennetzen sehr gut als Grundlast einsetzbar ist.

Im energiewirtschaftlichen Kontext ist generell über neue bzw. ergänzende Nutzungspfade für Biomasse zu diskutieren. Hier kommt insbesondere der lange vernachlässigte Wärmemarkt ins Spiel. Die Bioenergie liefert zwar bereits – vorrangig über Festbrennstoffe für Raumwärme – über 86 % der regenerativ bereitgestellten Wärme [BMWi 2020, S. 25], im Bereich der EEG-Anlagen sind jedoch noch weitreichende Potenziale zur Wärmevermarktung vorhanden. Steubing et al. [2020] haben in ihren Untersuchungen zu EEG-Anlagen ausgewiesen, dass 52 % der Biogasanlagen ihre Wärme über ein Wärmenetz mit einem technischen Absatzpotenzial von 153 TWh_{th}/a vermarkten könnten, wirtschaftlich machbar unter den derzeitigen Bedingungen erscheinen noch 16,3 bis 19,1 TWh_{th}. 2/3 davon ist dem industriellen Sektor und 1/3 der Raumwärme zuzuordnen. Gerade der Wärmeabsatz ist jedoch zukünftig von essentieller Bedeutung für den wirtschaftlichen Fortbestand von Bioenergieanlagen, er kann die Wirtschaftlichkeit sowie die Gesamteffizienz und damit die Nachhaltigkeit deutlich steigern. Die Untersuchungsergebnisse aus dem Projekt „Altholzquo vadis“ zeigen, dass Altholzheizkraftwerke bei einem signifikanten Wärmeabsatz auch ohne EEG-Vergütung wirtschaftlich tragfähig sind. Wärme leistet z.B. bereits heute einen höheren Refinanzierungsbeitrag als die Flexibilisierung. Und gleichzeitig ist der Wärmesektor neben dem Verkehrssektor das Sorgenkind der Energiewende. Es liegen hier zwar Lösungen vor, jedoch wird ohne einen effizienten Einsatz von Bioenergie die Wärmewende nur schwer möglich sein [Wern et al. 2020].

Um Biogasanlagen im Hinblick auf zukünftige Nutzungspfade flexibel auszurichten, erscheint – auch im Kontext zukünftiger CO₂-Preise – eine Aufbereitung zu Biomethan sinnvoll. Dort, wo sich bei kleineren Biogasanlagen eine direkte Aufbereitung nicht lohnt, ist ein Zusammenschluss von mehreren Anlagen im Sinne eines Anlagen-Clusters über eine Rohbiogasleitung eine interessante und wirtschaftliche Alternative zur bisherigen Vor-Ort-Verstromung. So wurde – auch im Rahmen des BE20plus-Projekts – mittels GIS-Analyse eine Clusterbildung vorgenommen⁴. Es konnte gezeigt werden, dass ca. 20 % des Biogasanlagenbestands zur Clusterbildung grundsätzlich geeignet ist [Steubing & Pertagnol 2019]. Die Gasverwertung kann dann wahlweise im KWK-, Wärme- und Treibstoffsektor erfolgen. Interessant sind hier insbesondere Anwendungen in Bereichen mit heizwertreichen Brennstoffen, welche schwer zu defossilisieren sind. Zudem lässt sich das bei der Aufbereitung gewonnene CO₂ im Sinne einer CCU-Anwendung verwerten.

⁴ alle Anlagen mit min. 375 kWel inst. Leistung, innerhalb von 10 km um einen Einspeisepunkt; Cluster-Auswahl min 5 MWel

Eine politisch delikate Zielsetzung kann zudem in der Umwidmung bereits genutzter Biomasse-Potenziale gesehen werden. Hier sind in erster Linie die Holzmengen zu adressieren, welche aktuell – teilweise über Einzelöfen – zur Bereitstellung von Raumwärme genutzt werden. So sind derzeit 11,2 Mio. Holzeinzelraumfeuerungen in Wohnhäusern verbaut [ZIV 2018], die im Sinne des Klimaschutzes eigentlich nach und nach durch andere intelligenter Heizungsoptionen und -konzepte ersetzt werden müssten. Angesichts der zunehmenden Sanierungen des Gebäudebestandes sowie der gleichzeitig zunehmenden Nachfrage des Industriesektors nach biogenen Brennstoffen – v.a. nach Prozessenergieanwendungen die durch andere erneuerbare Energien schwer zu bedienen sind – sind Lenkungsinstrumente erforderlich, welche einen sukzessiven Ausstieg aus der Bereitstellung häuslicher Holzwärme ermöglichen um entsprechende Potenziale für den industriellen Bereich zur Verfügung zu stellen. Dies wäre aus Sicht der exergetischen Ausnutzung der Biomasse ein wertvoller Beitrag zur Defossilisierung des Energiesystems [Fehrenbach et al. 2019].

Die Zielvorgaben lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Der aktuell vorhandene Bioenergie-Anlagenpark ist unter Berücksichtigung der effizienten Anlagen auch nach Auslaufen des EEG-Vergütungszeitraumes zu sichern und weiterzuentwickeln.
- Ein verstärkter Einsatz von biogenen Reststoffen ist dabei anzustreben.
- Der Einsatz der Bioenergie bedarf dabei einer gesamtkonomischen Analyse.
- Die Dienstleistungspotenziale der Bioenergie sind weder im energetischen, noch im nicht-energetischen Bereich ausgeschöpft.
- Die Nutzung von Bioenergie als Flexibilitätsoption im Strommarkt ist auszubauen, konkurrierende Nutzungspfade sind dabei jedoch im Blick zu behalten.
- Eine Optimierung der Wärmeauskopplung durch regionale Nutzungsstrategien sowie durch technische Modifikationen ist erforderlich.
- Eine mittel- bis langfristige Anpassung der Bioenergie-Nutzungspfade im Sinne einer Versorgung der Industrie mit Prozesswärme ist vorzubereiten.
- Biomethan sollte als Lösung für flexible Nutzungspfade ausgebaut werden.
- Es ist ein Diskussionsprozess zur Umwidmung von Biomasse-Potenzialen in Gang zu setzen.

Fazit

Bioenergie sollte aus Sicht der Autoren auch weiterhin eine tragende Rolle im Rahmen der Energiewende einnehmen. Die derzeit – aufgrund der aktuellen Rahmenbedingungen – absehbare Verringerung des Bioenergieanlagenbestandes ignoriert nicht nur ihren derzeit hohen Beitrag zur erneuerbaren Energieerzeugung und somit zum Klimaschutz. Eine Bestandsverringerung ignoriert außerdem die zahlreichen anderen Leistungen außerhalb des Energiesystems, die eine solche auch aus makroökonomischer Perspektive bedenkenswert erscheinen lassen. Allerdings werden die oben genannten Beiträge jenseits des

Energiesystems bisher durch die EEG-Zahler*innen quersubventioniert. Eine ökologischere Ausrichtung des Finanzierungsregimes könnte diese Beiträge noch erhöhen. Wenn die dadurch entstehenden Kosten nicht ausschließlich über das EEG finanziert werden sollen, müsste alternativ ein Mix aus lenkenden Finanzierungsmechanismen die Refinanzierung der Bioenergieanlagen sichern. Die letztendliche Kostenallokation (sektorenweise oder alleine im Strommarkt) ist dabei politisch zu bewerten.

Insbesondere ist auch die Frage zu beantworten, welchen Wert – neben dem generellen Beitrag zur Treibhausgasvermeidung – die Flexibilisierungsmöglichkeiten v.a. der Biogasanlagen haben. Aus Sicht der Autoren sollte in einem künftigen Strommarktdesign die flexible Stromerzeugung auch eine angemessen hohe monetäre Bewertung haben. Dieses ist u.a. nach den Ergebnissen des Projektes BE20plus [Gouya & Eltrop 2019] in einer defossilisierten Welt bzgl. der Gesamtsystemkosten immer noch günstiger als ein Stromsystem ohne Biomasse.

Der Dritte wesentliche Punkt von Maßnahmenentwicklungen ist die Beantwortung der Frage, wie denn die Transformation von der heutigen in eine künftige Bioenergiewelt aussehen könnte. Dies muss für alle Sektoren systemisch beantwortet werden. Im Wärmesektor sollte Holz verstärkt in der Industrie eingesetzt werden. Doch wie ist dies angesichts der Beliebtheit der häuslichen Holzverbrennung umzusetzen? Normative Änderungen sind hier politisch eher nicht gewollt. Förderungen und Überzeugen scheinen dagegen ein guter Weg [Wern et al. 2020]. Im Mobilitätssektor stellt sich die Frage, wie vor dem Hintergrund der RED II derzeitige Biokraftstoffe ohne Verlust der dahinterliegenden Industrie und ohne Verlust des Beitrages zu Treibhausgaseinsparungen auf neue Treibstoffe umgestellt werden kann. Im Stromsektor ist dagegen die Frage der weiteren Refinanzierung von Anlagen ungeklärt. Alle diese Fragen der Transformation haben eine normative, eine technische, eine wirtschaftliche und eine soziale Dimension, die von Politik, Wissenschaft und Wirtschaft gleichermaßen beantwortet werden und mit konkreten Handlungsempfehlungen hinterlegt werden müssen.

Literatur/Quellen

- Baur, F.; Vogler, C.; Scholl, F. (2019): Altholz in Deutschland – Mengen, Kosten, Wirtschaftlichkeit und Perspektiven. Conference Paper. Kasseler Abfallforum, Witzenhausen.
- BMWi (2020): Erneuerbare Energien in Zahlen. Hg.: BMWi, Berlin, Februar 2020
- DBFZ (2011): Vorhaben Ila Biomasse. Endbericht, Vorbereitung und Begleitung der Erstellung des Erfahrungsberichtes 2011 gemäß § 65 EEG, im Auftrag des BMU
- Fehrenbach, H; Giegrich, J.; Köppen, S.; Wern, B.; Pertagnol, J.; Baur, F.; Hünecke, K.; Dehoust, G.; Bulach, W.; Wiegmann, K. (2019): BioRest – Verfügbarkeit und Nutzungsoptionen biogener Abfall- und Reststoffe im Energiesystem (Strom-, Wärme- und Verkehrssektor), FKZ 3716 43 102 0. Abschlussbericht, UBA 115/2019

- Gouya, S., Eltrop, L. (2019): BE20plus [Systemperspektive] Auswirkungen auf den Stromsektor mit Berücksichtigung der klimapolitischen Ziele. Präsentation, Abschluss-Workshop „Folgekonzepte für die Post-EEG-Phase von Bioenergieanlagen“, Berlin, 19.02.2020
- Hennig, P.; Schnell, S.; Riedel, T. (2017): Produktivität der Wälder. AFZ-DerWald 14/2019, S. 28 ff
- Mantau, U.; Döring, P; Weimar, H. (2016): Rohstoffmonitoring Holz. Energieholzverwendung in privaten Haushalten 2014 - Marktvolumen und verwen-dete Holzsortimente – Abschlussbericht: Universität Hamburg, Zentrum Holzwirtschaft, Arbeitsbereich Ökonomie der Holz- und Forstwirtschaft: Hamburg
- Matschoss, P.; Pertagnol, J.; Wern, B.; Bur, A.; Baur, F.; Dotzauer, M.; Oehmichen, K.; Koblenz, B.; Khalsa, J.; Korte, K.; Purkus, A.; Thrän, D.; Gawel, E.; Bulach, W. (2019): Analyse der gesamtökonomischen Effekte von Biogasanlagen. Wirkungsabschätzungen des EEG (Makrobiogas). DOI: 10.13140/RG.2.2.13184.17920, Endbericht, gefördert von der FNR, ausgearbeitet durch IZES, UFZ und DBFZ, Saarbrücken und Leipzig.
- Schulze, E.D.; Sierra, C.A.; Egenolf, V.; Woerdehoff, R.; Irslinger, R.; Baldamus, C.; Stupak, I.; Spellmann, H. (2020): The climate change mitigation effect of bioenergy from sustainably managed forests in Central Europe. <https://doi.org/10.1111/gcbb.12672>, Global Change Biology Bioenergy, Vol. 12, Issue 3, March 2020
- Steubing, M., Dotzauer, M. Zakaluk, T., Wern, B., Noll, F., Thraen, D. (2020): Bioenergy plants' potential for contributing to heat generation in Germany. Energy, Sustainability and Society 10, 14, S. 1-23.
- Steubing, M., Pertagnol, J. (2019): BE20plus – räumliche Analyse für Wärmeabsatz und Biomethaneispeisung. Präsentation, Abschluss-Workshop „Folgekonzepte für die Post-EEG-Phase von Bioenergieanlagen“, Berlin, 19.02.2020
- UBA (2019): Projektionsbericht 2019 für Deutschland – Zusammenfassung in der Struktur des Klimaschutzplans. Climate Change 33 / 2019. Umweltbundesamt. Dessau-Roßlau.
- Wern, B.; Lenz, V.; Sperber, E.; Saadat, A.; Schmidt, D.; Engelmann, P.; Hering, D.; Xhonneux, A.; Giovannetti, F.; Schmidt, F.; Jordan, M.; Strunz, S.; Ebert, H.-P. (2020): Wärmebereitstellung in Privathaushalten – Lösungen für eine CO₂-freie Energiebereitstellung. In Tagungsband der FVEE Tagung „Lösungsbeiträge zur Energiesystemtransformation“, Hrsg.: Fachverband Erneuerbare Energien, Berlin
- ZIV (2018): Erhebungen des Schornsteinfegerhandwerks. Bundesverband des Schornsteinfegerhandwerks – Zentralinnungsverband (ZIV) 2018, Sankt Augustin

Kontakt

Prof. Dipl.-Ing. Frank Baur, Bernhard Wern, Dr. Patrick Matschoss

Institut für ZukunftsEnergie- und Stoffstromsysteme (IZES gGmbH)

✉ baur@izes.de | Ⓛ: www.izes.de

Aktuelle Überwachungs- und Stilllegungspraxis der Immissionsschutzbehörden – Anspruch und Wirklichkeit beim Betrieb von Biogasanlagen

Zusammenfassung: Der Beitrag beschäftigt sich mit der Differenz zwischen Anspruch und Wirklichkeit beim Betrieb von Biogasanlagen in Deutschland und geht insbesondere auf die, tendenziell immer strikter werdende, Überwachungs- und Stilllegungspraxis der zuständigen Immissionsschutzbehörden ein. Es werden zunächst die allgemeine Situation der Biogasbranche in Deutschland dargestellt und die rechtlichen Rahmenbedingungen erläutert. Im Anschluss werden dann die möglichen Auslöser und Gründe für die behördlichen Eingriffsmaßnahmen ermittelt, um schließlich entsprechende (rechtliche) Lösungsansätze vorzustellen.

1 Biogasanlagen – Allgemeine Situation und Einordnung

1.1 Zahlen und Fakten

Eine durchschnittliche Biogasanlage mit einer elektrischen Leistung von 190 kW versorgt etwa 450 Haushalte mit Strom und 100 mit Wärme. Auf diesem Weg werden zudem jährlich 700 t CO₂ und 20 t mineralischer Dünger eingespart.

Insgesamt gibt es aktuell in Deutschland knapp 10.000 Biogasanlagen, dies entspricht ca. 4.200 MW elektrischer Leistung. Die bestehenden Anlagen sorgen so für eine Einsparung von 20 Millionen Tonnen CO₂, haben ein Umsatzvolumen von 9,4 Milliarden Euro und schaffen 46.000 Arbeitsplätze (Stand 2016).

Seit dem Jahr 2008 bis zu dem Jahr 2019 ist ein enormer Zubau der Anlagen zu verzeichnen, die Zahl der Anlagen stieg innerhalb dieses Zeitraumes von 3.891 Anlagen auf 9.523. Die Biogasanlagen machen mittlerweile 11 % des Anteils der Erneuerbaren Energien in Deutschlands aus.¹

Neben ihrem Beitrag zur Energiewende bieten Biogasanlagen aber auch etliche Vorteile für die landwirtschaftlichen Betriebe selbst. Durch die Anlagen können die landwirtschaftlichen Betriebe ohnehin anfallende Abfallprodukte zur Erzeugung von grünem Strom verwerten, auf diesem Weg die Bodenbelastung reduzieren, insbesondere in Hinblick auf die kürzlich verschärfte DüngeVO, Gerüche reduzieren und dezentrale Erzeugung fördern. Zusätzlich sind Biogasanlagen aus betriebswirtschaftlicher Sicht auch eine große ökonomische Chance für Landwirte.

¹ <https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/erneuerbare-energien/erneuerbare-energien-in-zahlen#überblick> (Stand: 08.05.2008)

1. 2 Genehmigungsvoraussetzungen

Neben all diesen Vorteilen für die Betriebe und die Umwelt gibt es jedoch regelmäßig auch mehr oder weniger strenge (rechtliche) Voraussetzungen, die für den sorgenfreien Betrieb einer Biogasanlage zu erfüllen sind. Diese sind grundsätzlich einzelfallabhängig und nicht selten auch von der Gunst der zuständigen Behörde abhängig.

Es kann eine immissionsschutzrechtliche Genehmigung erforderlich sein, wenn die Biogasanlage unter eine der in Anhang 4. BlmSchV genannten Fallgruppen fällt. Also die Anlage in Abhängigkeit von Feuerwärmeleistung errichtet wird, die Anlage zur biologischen Behandlung von Abfällen dienen soll oder die Anlage eine Nebeneinrichtung einer nach BlmSchG genehmigungsbedürftigen Anlage ist (z.B. Tierhaltungsbetrieb und Anlage zur Lagerung von Gülle).

Des Weiteren gibt es noch einige typische Fälle, die dem immissionsschutzrechtlichen Genehmigungsverfahren unterliegen. Darunter fallen z.B. Anlagen, die ausschließlich unter Einsatz von nachwachsenden Rohstoffen betrieben werden oder Anlagen die alleine durch den Einsatz von Gülle oder zusammen mit nachwachsenden Rohstoffen betrieben werden etc.

Außerdem kann für die geplante Anlage eine Umweltverträglichkeitsprüfung erforderlich sein. Eine standortbezogene Vorprüfung ist erforderlich bei Anlagen ab 10 MW bis zu 50 MW Fernwärmeleistung oder bei der Verwertung und Beseitigung von Abfällen und sonstigen Stoffen bei einem Tagesdurchlauf von 10 t bis weniger als 50 t. Eine allgemeine Vorprüfung hingegen ist für Anlagen mit 50 MW oder mehr Feuerungsleistung oder bei Verwertung und Beseitigung von Abfällen und sonstigen Stoffen bei einem Tagesdurchlauf von 50 t oder mehr erforderlich.

Ansonsten ist grundsätzlich eine Baugenehmigung erforderlich, bei der insbesondere die Anforderungen des § 35 BauGB relevant sind, da es sich bei den Biogasanlagen grundsätzlich um Vorhaben im Außenbereich handelt. Im Falle des Erfordernisses einer immissionsschutzrechtlichen Genehmigung ist die Baugenehmigung aufgrund der von dieser ausgehenden Konzentrationswirkung mitenthalten.

Biogasanlagen sind dann als privilegiertes Vorhaben gemäß § 35 Nr. 6 BauGB zu qualifizieren, wenn sie der energetischen Nutzung von Biomasse im Rahmen eines land- bzw. forstwirtschaftlichen Betrieb oder einem Betrieb der gartenbaulichen Erzeugung, sowie dem Anschluss solcher Anlagen an das öffentliche Versorgungsnetz dienen und folgende Voraussetzungen erfüllten:

Sie müssen in einem räumlichen-funktionalen Zusammenhang mit dem Betrieb stehen, die Biomasse muss überwiegend aus dem Betrieb selbst stammen, je Hofstelle oder Betriebsstandort darf nur eine Anlage betrieben werden und die Kapazität der Anlage zur Erzeugung von Biogas darf nicht 2,3 Millionen Norm-

kubikmeter Biogas pro Jahr überschreiten und die Feuerungswärmeleistung anderer Anlagen nicht 2,0 Megawatt überschreiten.

Zudem sind für die Genehmigung und den Betrieb der Anlage diverse (Rechts-)Materien zu beachten, bspw. das Immissionsschutzrecht, das Störfallrecht und der Arbeitsschutz. In rechtlicher Hinsicht ergeben sich somit hohe Anforderungen an den Betriebsinhaber/ die Betriebsinhaberin.

Hinzu kommt erschwerend, dass die Regelungen schon in der Genehmigungspraxis nicht eindeutig sind bzw. dem Eingriffsermessen der jeweiligen Behörde unterliegen und daher schon die Genehmigungsvoraussetzungen unvorhersehbar und teilweise sogar willkürlich sind. Ein gewisses Maß an Abhilfe können diesbezüglich entsprechende Leitfäden bieten, jedoch kommt es bei diesen zu großen regionalen Unterschieden und teilweise auch hier zu Umsetzungsschwierigkeiten.

1.3 Kompetenzen zur Überwachung und Stilllegung

Aufgrund der soeben erläuterten hohen Genehmigungsanforderungen sind seitens der Behörden auch ebenso einschneidende Überwachungs- und Sanktionsmaßnahmen möglich. Den Behörden obliegt die Möglichkeit der Überwachung im Sinne von § 52 BlmSchG, einer sicherheitstechnischen Prüfung gem. § 29a BlmSchG oder einer nachträgliche Anordnung nach § 17 BlmSchG. Als ultima ratio dient die Stilllegung der Anlage nach § 20 BlmSchG.

1.4 Zuständigkeiten

Für die Überwachungs- und Sanktionsmaßnahmen ist im Regelfall die Genehmigungsbehörde zuständig. Jedoch gibt es eine höchst unterschiedliche behördliche Organisation auf Landes- und Kreisebene, beispielsweise ist in Brandenburg das Landesamt für Umwelt zuständig, in Sachsen-Anhalt das Landesverwaltungsaamt und in Mecklenburg-Vorpommern das Staatliche Amt für Landwirtschaft und Umwelt.

2 Auslöser und Gründe für behördliche Eingriffsmaßnahmen

2.1 Auslöser für behördliches Handeln

Auslöser für das behördliche Handeln können Anwohnerbeschwerden wegen Lärm- und Geruchsbelästigungen, CC-Kontrollen im Rahmen des Agrarrechts oder Überwachungsmaßnahmen nach § 52 BlmSchG bzw. § 29a BlmSchG sein.

Allerdings sind auch oftmals die Motive oder Auslöser einer Kontrolle oder der ständigen Überwachung nicht nachvollziehbar und legt die Annahme behördlicher Willkür nahe.

2.2 Gründe für behördliches Handeln

Als Grund für dieses behördliche Handeln kommt zum einen das fehlende Verständnis über Betriebsabläufe und Funktionsweise von Biogasanlagen der Behörden in Betracht, welches häufig durch die Vermischung von zwei selbstständig nebeneinanderstehenden Betrieben (Landwirtschaftsbetrieb als Zulieferer und gesonderter Biogasanlagenbetrieb) hervorgerufen wird. Dies führt einerseits teilweise zur Zuständigkeit verschiedener behördlicher Stellen, andererseits zu einer vertieften gesellschaftsrechtlichen Betrachtung verbundener Unternehmen.

Zum anderen kommt als Grund für das behördliche Handeln die bestehende politische Gemengelage in Betracht, welche durch bevorstehende Kommunalwahlen, ungünstige Mehrheitsverhältnisse, persönliche Befindlichkeiten und/oder wechselnde Akteure begünstigt wird. Hierdurch wird stetig willkürliche Überwachung, konfrontative und unsachliche Verfahren und ungerechtfertigte Nachforderungen und Nachfragen ausgelöst.

Einen Sonderfall stellt das Fehlen eines Bebauungsplans dar, da daraus grundsätzlich die fehlende Privilegierung größerer Anlagen folgt, denn im Außenbereich sind gemäß § 35 Abs. 1 BauGB nur „kleine“ und im Rahmen von land- oder forstwirtschaftlichen Betrieben oder einem Betrieb der gartenbaulichen Erzeugung dienende Anlagen möglich. In diesem Rahmen ist darauf hinzuweisen, dass eine Schweinemastanlage die Futtermittel zukauft kein landwirtschaftlicher Betrieb im Sinne des BauGB ist.²

2.3 Folgen der behördlichen Überwachung

Die Folgen der behördlichen Überwachungspraxis sind schwerwiegend und bremsen den generellen Trend der energetischen und dezentralen Nutzung von Gülle aus. Aus ihr resultieren außerdem enorme, nicht mehr zu bewältigende Pflichtenkataloge, in Form von unzähligen Nebenbestimmungen.

Die Behörden verpflichten häufig die Betreiber/-innen zur permanenten Dokumentation von Emissionswerten, der Schulung des Personals nach regelmäßig wechselnden Vorschriften, dem Leisten von unverhältnismäßigen naturschutzrechtlichen Kompensationsmaßnahmen und legen ihnen etliche Nachweispflichten und Betriebsbestimmungen auf. Die Befolgung dieses umfangreichen Pflichtenkatalogs ist zwar meist irgendwie zu bewerkstelligen, jedoch werden insbesondere kleinere Betriebe von den ständigen Nachfragen der Behörden stark belastet, was immer mehr zu einer Marktverzerrung führt.

² BVerwG, Beschluss v. 14.11.1989 (Az. 4 B 194.89)

2.4 Folgen der ultima ratio (Stilllegung)

Besonders schwerwiegend sind die Folgen der Stilllegung, denn durch diese kommt es zu einer verstärkten Geruchsimmission durch die Gülleausbringung auf die Felder und einer erhöhten Belastung des Grundwassers durch das Nitrat. Im Ergebnis verursacht die Stilllegung daher weit mehr Nachteile für die benachbarte Umgebung als der Betrieb der eigentlichen Anlage selbst.

Für den Betreiber/die Betreiberin der Anlage ist die Stilllegung meist existenzbedrohend. Denn mit der Stilllegung geht der Verlust der EEG-Vergütung, ggf. die Gefährdung von EU-Subventionen durch Verstöße gegen die Nitratrichtlinie und ein Gewerbeaufsichtsverfahren gem. § 35 GewO einher.

3 Lösungsansätze

3.1 Unverhältnismäßigkeit

Häufig ist die Behördenpraxis unverhältnismäßig und die willkürlichen, belastenden Überwachungsmaßnahmen stellen nicht selten einen Verstoß gegen Art. 3 Abs. 1 GG dar. Zudem sind die Mittel, die die Behörde wählt, oft ungeeignet oder es sind eigentlich milder Mittel vorhanden von denen sie keinen Gebrauch macht. Es kommt so zu vielen unangemessenen Belastungen von „kleinen“ Anlagenbetreibern/-innen, die drakonische Eingriffsmaßnahmen in Art. 12 Abs. 1 und 14 Abs. 1 GG darstellen und oft sogar gemäß § 44 Abs. 2 Nr. 4 o. 5 VwVfG nichtig sind.

3.2 Gerichtlicher Rechtsschutz

Eine Möglichkeit sich gegen die behördlichen Maßnahmen zu wehren bietet der gerichtliche Rechtsschutz. Gegen die behördliche Verfügung kann zunächst Widerspruch oder Eilrechtsschutz gegen die Anordnung der sofortigen Vollziehung gemäß § 80 Abs. 5 VwGO eingelegt werden. Im weiteren Verlauf des Verfahrens kommt eine Anfechtungsklage gegen die Stilllegungsanordnung bzw. die nachträgliche Anordnung gemäß § 42 Abs. 1 VwGO in Betracht. Problematisch ist dieses Vorgehen zu beurteilen, wenn die Gerichte nicht schnell genug arbeiten, weil dann kein effektiver Rechtsschutz gewährleistet ist.

3.3 Fachaufsichtsbeschwerden

Außerdem gibt es noch die Möglichkeit das unverhältnismäßige Handeln der Behörde durch eine Fachaufsichtsbeschwerde (teilweise auch Sonderaufsichtsbeschwerde) abzustrafen. Eine Fachaufsichtsbeschwerde ist ein formloser Rechtsbehelf, der sich an die Aufsichtsbehörde richtet und diese die Rechtmäßigkeit und die Zweckmäßigkeit der Entscheidung überprüft. Hierbei steht der Fachaufsichtsbehörde ein Weisungsrecht zu.

Die Anträge an die jeweilige Fachaufsichtsbehörde richten sich nach den Fachvorschriften und Gemeindeordnungen der Länder. Die Begründung der Fachaufsichtsbeschwerde erfolgt je nach Einzelfall und dem einschlägigen Fachrecht.

Für die Fachaufsichtsbeschwerde spricht, dass sie oftmals schneller und effektiver als gerichtlicher Rechtsschutz wirken kann, da im verwaltungsgerichtlichen Verfahren lange Verfahrensdauern zu erwarten sind.

3.4 Ausblick

Abschließend lässt sich feststellen, dass auf rechtlicher Ebene noch ein hohes Maß an Unsicherheit besteht wegen uneinheitlichen Regelungen und einem Mangel an richtungsweisender Rechtsprechung. Es besteht daher dringender Handlungsbedarf auf politischer Ebene, aber auch die Betreiber/-innen sind in der Pflicht entschlossen gegen die rigide Behördenpraxis vorzugehen.

Kontakt

Prof. Dr. Martin Maslaton

MASLATON Rechtsanwaltsgeellschaft mbH

Holbeinstraße 24, 04229 Leipzig

✉ leipzig@maslaton.de

FORUM A

KRAFTSTOFF/TRANSPORT

Die Rolle der Bioenergie im Energie- und Mobilitätssystem in Deutschland – Ergebnisse einer modellgestützten Systemanalyse

Zusammenfassung: Obwohl Bioenergie aktuell unter den erneuerbaren Energien in Deutschland die bedeutendsten Beiträge zur Versorgung liefert, werden ihre Technologien in modellbasierten Systemanalysen häufig nur ungenau abgebildet. So werden beispielsweise Biogasanlagen regelmäßig nur als Grundlastanlagen modelliert und ihre möglichen Flexibilitätsbeiträge stark vereinfacht. Um dieses Problem zu adressieren, wurde ein Modell zur Optimierung des Strom- und KWK-Wärmemarktes, an den der Transportsektor angegliedert wurde, verwendet und damit analysiert, welche Konsequenzen eine unflexible Abbildung von Biogasanlagen und die künftige flexible Stromnachfrage aus dem Transportsektor auf die Rolle der Bioenergie in diesem System haben. Erstes sorgt den Analysen nach dafür, dass besonders flexibilisierte Biogasanlagen unterbewertet werden und in entsprechenden Studien künftig nicht mehr eingesetzt werden, obwohl sie eigentlich ein hohes Potential zur Flexibilitätsbereitstellung aufweisen. Weitere Rechnungen zeigen, dass auch eine variablere Stromnachfrage durch intelligentes Laden von E-Autos und eine angebotsgesteuerte Wasserstoffproduktion dieses Potential nicht negieren. Weitere interessante Ergebnisse können im Projekt OptiSys (FKZ 03KB129B) entwickelten Methodenhandbuch eingesehen werden.

Abstract: Although bioenergy currently makes the most significant contributions to the supply of renewable energies in Germany, its technologies are often only represented inaccurately in model-based system analyses. Biogas plants, for example, are regularly only modelled as base-load plants and their potential flexibility contributions are greatly simplified. In order to address this problem, a model for the optimization of the electricity and CHP heat market, to which the transport sector was attached, was used to analyze the consequences of an inflexible modelling of biogas plants and the future flexible electricity demand from the transport sector on the role of bioenergy in this system. The former, according to the analyses, ensures that particularly flexible biogas plants are undervalued and will therefore not be used in corresponding studies in the future, although they actually have a high potential for providing flexibility. Further calculations show that even a more variable demand for electricity through intelligent charging of electric cars and supply-driven hydrogen production does not negate this potential. Further interesting results can be seen in the method handbook developed in the OptiSys project (FKZ 03KB129B).

1 Stand des Wissens der Rolle der Bioenergie aus Sicht der Systemanalyse

Bioenergie ist aktuell unter den erneuerbaren Energien in Deutschland die bedeutendste Technologie, da es erhebliche Beiträge zur Energieversorgung in allen drei Teilbereichen: der Strombereitstellung, Wärmeversorgung und auch dem Transportsektor, leistet (BMWi 2018). Bioenergie steht jedoch nicht für sich allein, sondern leistet seine Beiträge im Zusammenspiel aller anderen erneuerbaren und bestehenden konventionellen bzw. fossilen Energietechnologien.

Durch die vielseitigen Einsatzmöglichkeiten der Biomasse entstehen Konkurrenzsituationen und ein Allokationsproblem zwischen den Nutzungen in den drei Sektoren. Bekannt ist, dass der flexible Einsatz von Bioenergie bei hohen Anteilen Erneuerbarer Energien im Strom- und Wärme-System kostensenkend wirkt (Fleischer Dissertation in Veröffentlichung). Dies aber nur unter Berücksichtigung der hohen zeitlichen Flexibilität der Stromproduktion flexibilisierter Biogasanlagen. In Energiesystemstudien, die diese Fragestellung untersuchen, werden häufig pauschale Annahmen zu Eigenschaften von Biogasanlagen (z.B. Vollaststunden) unterstellt, oder eine vereinfachte zeitliche Auflösung genutzt (Kost et al. 2018). Dies erfolgt häufig, um den Rechenaufwand gering zu halten, aber entgegen einer großen Vielgestaltigkeit der Biogasanlagen. In diesem Vortrag sollen daher unter nachfolgenden Fragestellungen Ergebnisse des Projektes Opti-Sys aufgezeigt werden:

1. Welchen Einfluss hat eine differenzierte Abbildung der Eigenschaften von Biogasanlagen auf die Modellierungsergebnisse zur Rolle der Biogasanlagen im Strom-Wärme-System?
2. Welche Auswirkung hat die Nutzung der Biomasse für die Verkehrswende auf den Stromsektor und die Rolle der Bioenergie als Ganzes?
3. Abbildung der Biogasanlagen in Systemmodellen und deren Auswirkungen

Zur Analyse der Effekte im Strom- und Wärmesystem, sowie der Rückwirkungen vom Verkehrssystem, werden die spezifischen Eigenschaften der Technologien modelltechnisch abgebildet und variiert. Dabei wird eine stündliche Auflösung des Stromsektors berücksichtigt, da bei hohen Anteilen fluktuierender Erneuerbarer Energien die Diskrepanz zwischen Angebot und Nachfrage steigt. Dazu wird auch die Auskopplung von KWK-Wärme untersucht. Die dabei benötigte Flexibilität kann auch durch Biogas-BHKWs bereitgestellt werden und wird daher explizit berücksichtigt. Zur Analyse und Bewertung wird das lineare Elektrizitätsmarkt- und Fernwärmemodell E2M2 verwendet. Die Ankopplung des Verkehrssektors erfolgt dabei exogen über dem Modell vor- und nachgelagerte Prozesse.

Referenzszenario

Der ökonomische Anreiz zur Flexibilisierung bietet die seit 2012 im EEG verankerte Flexibilitätsprämie (Altanlagen bis August 2014) bzw. der Flexibilitätszuschlag (Neuanlagen ab August 2014). Der Fördermechanismus Flexibilitätsprämie schafft Anreize für Anlagen mit einem Flexibilitätsfaktor (auch Flexfaktor) zwischen 1,1 und 5. Dieser repräsentiert das Verhältnis von installierter zu Bemessungsleistung. Mit dem Flexibilitätszuschlag werden Anlagen ab einem Flexfaktor von 2 gefördert. Ältere Bestandsanlagen erhielten durch die feste EEG-Einspeisevergütung Anreize für einen möglichst durchgehenden Betrieb. Mit dem Auslaufen der 20-jährigen EEG-Vergütungsphase (für die ersten Anlagen gilt dies ab 2020) verlieren diese Grundlastanlagen zukünftig an Relevanz, da die Teilnahme an der 10-jährigen Anschlussförderung an einen minimalen Flexfaktor von 2 geknüpft ist (BMWi 2017).

Dies sorgt dafür, dass für unsere Analysen sowohl ein Flexfaktor von 1,1 (unflexibilisierte Anlagen), einer von 2 und eine maximale Überbauung von 5 angenommen wird. Im Referenzfall werden alle Optionen zugelassen und dann in den weiteren Szenarien in Abb. 1 immer weiter eingeschränkt. Untersucht werden soll dabei die Auswirkung der Flexibilisierungsmöglichkeiten auf die Rolle der Biogasanlagen, bzw. ob unflexible Biogasanlagen überhaupt noch relevant für das System sind.

Auswirkung einer unflexiblen Abbildung von Biogasanlagen in Energiesystemmodellen

Häufig werden Biogasanlagen jedoch in Systemmodellen nicht flexibel, sondern nur als Grundlastanlage abgebildet, wie viele heute eingesetzt werden. Doch welche Konsequenzen folgen daraus für die Ergebnisse und die Rolle der Bioenergie?

Eine unflexible Abbildung von Biogasanlagen führt, wie rechts in Abb. 1 zu sehen ist, zu einem kompletten Rückgang der Biogasnutzung. Durch die Beschränkung auf Grundlastanlagen ohne großartige Flexibilisierung, erfahren die Biogasanlagen die strikte zeitliche Vorgabe zu 90% der Stunden eines Jahres einspeisen zu müssen, was ihren Wert, der durch die Flexibilität herröhrt, drastisch senkt. Die gleichzeitig sehr teuren Gestehungskosten der Grundlastanlagen sorgen dafür, dass mit sinkenden Flexibilitätsgraden die Anzahl und damit die installierte Leistung der Biogasanlagen sinkt. Ersetzt werden diese durch mehr fluktuierende Erneuerbare zur Erfüllung der Vorgabe von 50% EE-Anteil und mehr Erdgaskapazitäten, für die Bereitstellung der wegfallenden Flexibilität aus Biomasse.

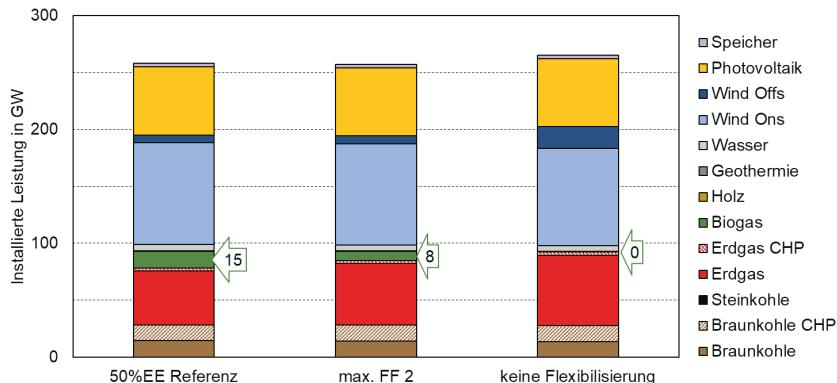


Abb. 1: Installierte Leistung - Referenz mit maximalem Flexfaktor 5 vs. reduzierter maximaler Flexibilisierungsgrad bei 50% EE-Anteil

Aus Abb. 2, die die Bruttostromerzeugung zeigt, wird ersichtlich, dass die reine Betrachtung der installierten Leistung jedoch für eine Beurteilung nicht ausreicht. Selbst bei maximal doppelter Überbauung, also einer Halbierung der Vollaststunden, wird fast das volle zur Verfügung gestellte, energetische Potential von 38 MWh ausgenutzt. Lediglich ohne nennenswerte Flexibilisierung werden im Modell keine Biogasanlagen installiert.

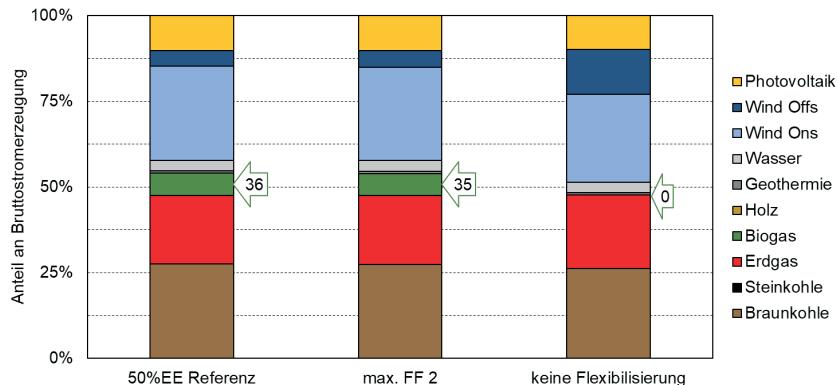


Abb. 2: Bruttostromerzeugung – Referenz mit maximalem Flexfaktor 5 vs. reduzierter maximaler Flexibilisierungsgrad bei 50% EE-Anteil

Obwohl 5-fach flexibilisierte Anlagen spezifisch höhere Gestehungskosten aufweisen als 2-fache flexibilisierte Anlagen, werden sie im Referenzszenario im Rahmen der Modellierung berücksichtigt (siehe ausgefüllte Flächen in Abb. 3). Dies kann mit einem hohen Wert der Flexibilität aus Biogasanlagen fürs Energiesystem bewertet werden.

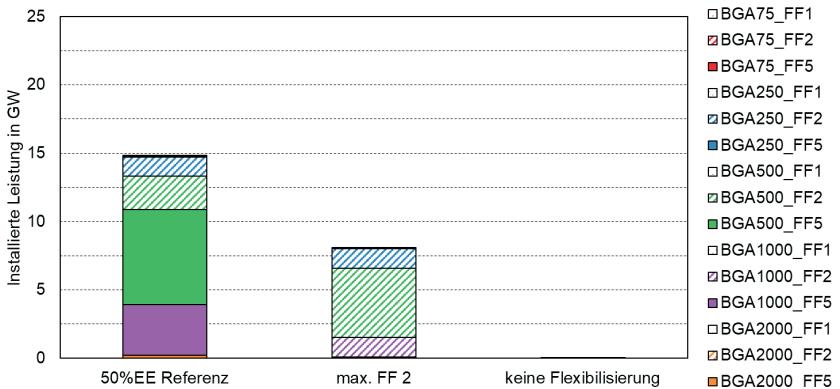


Abb. 3: Aufteilung der installierten Biogasleistung nach Cluster - Referenz mit maximalem Flexfaktor 5 vs. reduzierter maximaler Flexibilisierungsgrad bei 50% EE-Anteil

Insgesamt zeigt sich, dass sich der maximal zulässige Flexibilisierungsgrad von Biogasanlagen sehr sensiv auf die Rolle bzw. Wertigkeit von Bioenergie im Energiesystem auswirkt. Die Eigenschaft der flexiblen Fahrweise von Biogasanlagen darf in Energiesystemanalysen nicht vernachlässigt werden, da sie einen sehr hohen Einfluss auf die Rolle der Bioenergie im Energiesystem hat. Dieser an sich schon hohe Einfluss verstärkt sich mit zunehmendem Anteil erneuerbarer Energien im Stromsektor. Im Extremfall hat ein reiner Grundlastbetrieb von Biogasanlagen in einem kostenoptimierten Stromsystem mit hohen Anteilen fluktuierender Erneuerbarer keinen Nutzen mehr. Eine Vereinfachung zu Grundlastanlagen oder wenig flexiblen Anlagen führt zu einer starken Unterbewertung der realen Freiheitsgrade von Bioenergieanlagen im Strom- und KWK-Wärme-System.

Weitere Analyseergebnisse im Rahmen des Projektes OptiSys (im Rahmen dieser Veröffentlichung nicht dargestellt) zeigen, dass der Einfluss des Leistungszubaus (Biogasflexibilisierung) bei den Stromgestehungskosten von Biogasanlagen nicht vernachlässigbar ist und besonders im Leistungsbereich unter 2 MW Bemessungsleistung die Kostenstruktur individuell für jede Flexibilisierungsstufe festgelegt werden sollte. Vereinfachungen mit einheitlichen Stromgestehungskosten für alle Flexibilisierungsstufen können zu verfälschten Ergebnissen in der Bewertung von Anlagenkonzepten im Gesamtsystem führen. So würden beispielsweise immer die maximal flexibilisierten Anlagen vom Modell gezogen werden, da sie bei gleichen Kosten mehr Flexibilität dem System zur Verfügung stellen können.

3 Interaktion zwischen Bioenergie im Stromsektor und der Dekarbonisierung des Transportsektors

Bioenergie nimmt eine gesonderte Stellung innerhalb von Strom, Wärme und Transport ein, da sie überall einen Beitrag zur Emissionsreduktion und Erreichung der Klimaziele leisten kann. Innerhalb des Stromsektors ist die Rolle der Bioenergie hauptsächlich, wie gezeigt, im Bereich der Flexibilitätsbereitstellung anzusiedeln. Hier steht sie besonders in Konkurrenz zu billigeren und effizienteren Stromspeichern sowie lastseitigen Ausgleichsoptionen (PtX). Besonders durch den sich wandelnden Transportsektor kann in Form von E-Mobilität (zusätzlicher Strombezug) und Wasserstoffproduktion (zusätzlicher Strombezug durch Elektrolyseanlagen), die zukünftig eine Verschiebung der Last ermöglichen könnten, Flexibilität ins Stromnetz kommen. Dies kann dafür sorgen, dass die stark dargebotsabhängige Stromversorgung über Sonne und Wind auch ohne den Einsatz flexibel betriebener Biogas-BHKW ausgeglichen werden kann. Daher ist die Abbildung dieser konkurrierenden Technologieoptionen zur Flexibilitätsbereitstellung in Energiesystemmodellen relevant, die Aussagen über künftige Entwicklungspfade des Systems treffen wollen.

Abbildung der Flexibilität aus dem Transport- für das Stromsystem

Hierfür muss ein Modell, hier E2M2-Bio, im Vorfeld ertüchtigt werden, diese Flexibilität aus dem Transport auch detailliert abzubilden, bevor eine Aussage zur Rolle der Bioenergie im Strom- und KWK-Wärme-System getroffen werden kann. Auf folgende Weisen wurden die beiden angesprochenen Flexibilitätsquellen im Modell integriert:

Elektrofahrzeuge

Bei der Abbildung von Elektroautos existieren zwei verschiedene Abbildungsweisen, z.B. beschrieben bei (Michaelis et al. 2015). In der ersten wird das Auto dann geladen, sobald es ans Netz angeschlossen wird. Dabei wird unterstellt, dass Nutzer immer dann laden, wenn sie eine Wegstrecke absolviert haben und zusätzlich keine Anreize erhalten, ihr Ladeverhalten zu ändern. Dies ist bei uns die Referenz.

Die zweite ist etwas komplizierter umzusetzen als eine reine datentechnische Anpassung: Autos werden dann geladen, wenn es dem Stromsystem dienlich ist. Die hier als flexibles Laden beschriebene Fähigkeit sorgt dafür, dass eine Lastverschiebung der bisherigen addierten Lastkurve möglich wird. Das erlaubt dem Solver, eine gewisse Menge der Nachfrage auf spätere Stunden zu verteilen. Dies ähnelt der methodischen Abbildung der konventionellen Maßnahmen des Demand-Side-Managements (DSM). Da es besonders bei Elektroautos die zeitliche Struktur nicht zulässt, die Nachfrage über mehrere Tage hinweg zu verteilen, wird eine Grenze eingeführt, an der die Nachfrage der E-Autos gedeckt sein muss. Oder weniger abstrakt: zu einem bestimmten Zeitpunkt (z.B.

typischer Arbeitsbeginn) müssen alle E-Autos geladen sein. Die täglich geforderte Stromnachfrage zum Laden der E-Autos kann also vom Solver zu einem systemdienlichen Zeitpunkt gedeckt werden und muss lediglich innerhalb von 24 Stunden (6 Uhr bis 6 Uhr des Folgetages) vollständig erbracht sein. Dieser Zeitpunkt sollte modellendogen ermittelt werden – es muss also eine Veränderung im Code erfolgen. Dies repräsentiert eine interne Steuerung der Autos, zu niedrigen Spotmarktpreisen zu laden. Eine schematische Darstellung der modelltechnischen Adaption findet sich in der nachfolgenden Abb. 4.

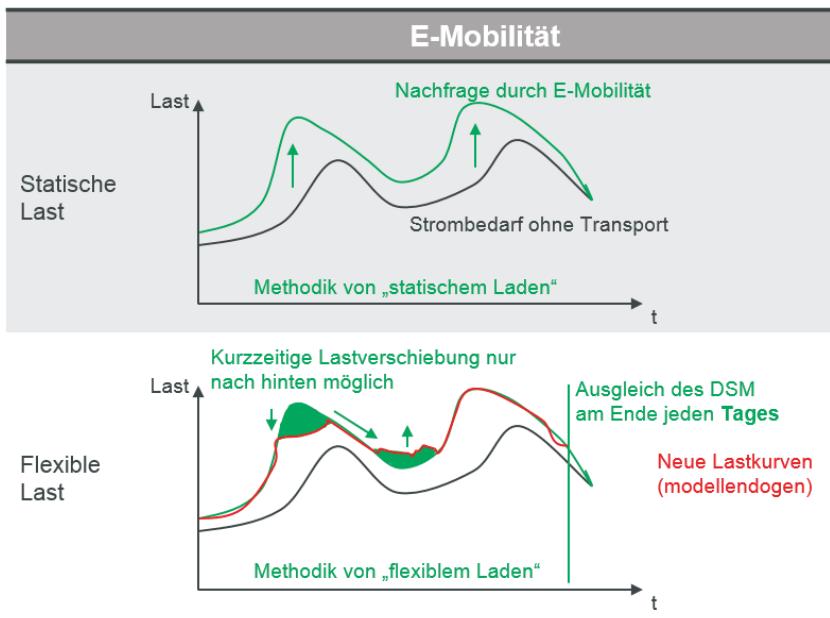


Abb. 4: Methodik der Abbildung von flexiblem Laden von E-Autos

Wasserstofffahrzeuge

Eine andere Quelle an Flexibilität kommt zusätzlich aus flexibel laufenden Elektrolyseanlagen. Diese folgen einem ähnlichen Schema der Modellintegration. Die ursprünglich glatte Lastkurve kann nun vom Modell endogen verschoben werden. Wichtig dabei ist, dass die Last nicht wie bei den Elektroautos nach 24 Stunden ausgeglichen sein muss. Wasserstoffanlagen können durchaus auch mehrere Tage nicht laufen und diese verpassten Stunden dann zu einem späteren Zeitpunkt nachholen. Es wird also unterstellt, dass die so verschobene Last erst zum Jahresende ausgeglichen sein muss.

Heutige Elektrolyseanlagen sind jedoch geprägt von hohen Kapital- und niedrigen variablen Kosten. Das hat zur Folge, dass sie eigentlich zur finanziellen Rentabilität so viele Stunden wie möglich laufen müssten. Durch starke Schwan-

kungen in der Einspeisung von Sonne und Wind und die resultierenden großen Schwankungen der Spotmarktpreise kann sich dies ändern. Zwar wird in dieser Analyse unterstellt, dass Elektrolyseanlagen nur 50 % der Zeit laufen, ob sich das als realistisch erweist bleibt abzuwarten. Eine schematische Darstellung ist in Abb. 5 zu sehen.

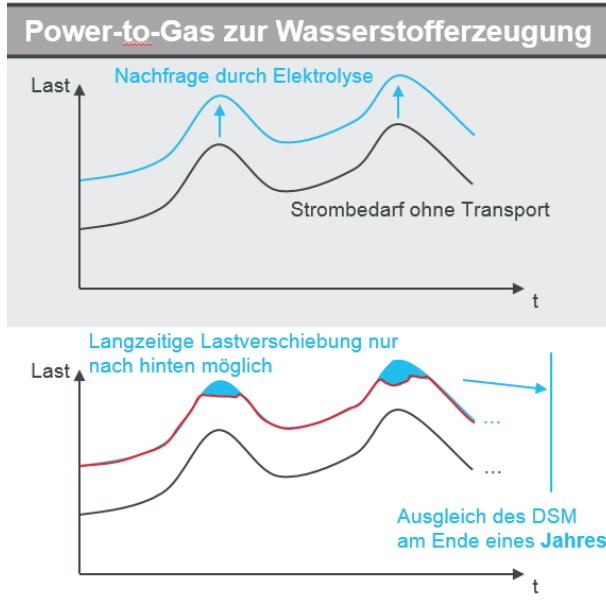


Abb. 5: Methodik der Abbildung von flexibler Wasserstoffproduktion

Einfluss auf die Rolle der Biogasanlagen

Dadurch, dass ein Teil der Last des flexiblen Ladens von E-Autos und auch der Wasserstoffproduktion verschiebbar ist, reduziert das verschiedene Dinge:

- Bedarf an Flexibilität durch Speicher
- Bedarf an Flexibilität durch Erdgas
- Installierte fEE-Kapazität durch weniger Einspeisemanagement

Wie dies in das Modell implementiert wurde, wurde bereits im vorherigen Absatz beschrieben. Da Biogas nicht nur Flexibilität bereitstellt, sondern auch flexiblen EE-Strom und -Wärme produziert, kann hierdurch fEE-Kapazität eingespart werden. Dies ist ein deutlicher Vorteil gegenüber anderen Flex-Optionen, wie Speichern und Erdgas, wodurch Biogas nicht am oberen Ende der Merit-Order der Flexibilitäten steht.

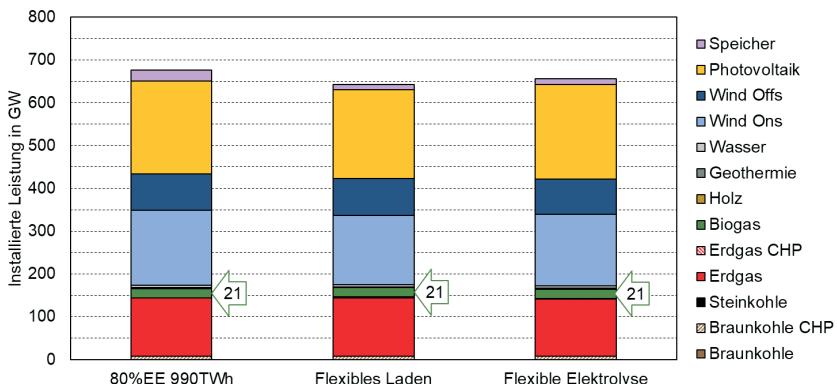


Abb. 6: Installierte Leistung - Mobilitätsreferenz vs. veränderte Flexibilitätsbereitstellung durch zeitlich veränderbare Stromnutzung

Auch wenn Einfluss dieser Abbildung von Lastverschiebung in Abb. 6 gering anmutet, sollte diese bei einer Modellierung auf Landesebene nicht vernachlässigt werden. Da insbesondere der Effekt in anderen Modellen vorher nicht bestimmbar ist, bleibt die Auswirkung auf das System durchaus respektabel. Durch den steigenden Strombedarf aus dem Transportsektor und die zusätzliche Flexibilitäten bleibt Biomasse Teil des kostenoptimalen Systems und wird bis zur Potentialgrenze ausgeschöpft. Die Potentiale der Bioenergie blieben somit unberührt, da sie nicht nur Flexibilität bereitstellt, sondern auch erneuerbaren Strom produzieren, der in das EE-Ziel hineinzählt und dadurch Kapazitäten von Wind und PV substituiert.

4 Fazit und Ausblick

Die Ergebnisse, die auch im projekteigenen Methodenhandbuch ausführlichen beschrieben werden, zeigen, dass besonders der Grad der Flexibilisierung sowie die Zielanteile an CO₂-Reduktion bzw. EE-Anteil einen Einfluss auf die Rolle der Biogasanalagen im Strom- und KWK-Wärmesystem haben. Wird keine Überbauung der Biogasanalagen zugelassen, werden sie für ein kostenoptimales Strom- und Wärmesystem nicht eingesetzt. Die installierte Leistung an BGAs beträgt also 0 MW. Lässt man eine Flexibilisierung zu, bieten Biogasanalagen eine kostengünstige Lösung, um Residuallastschwankungen auszugleichen. Bereits ab 50 % EE-Anteil wird in diesem Fall das vollständige Biomassepotential ausgeschöpft und mit bis zu 5-fach überbauten BHKWs zu Strom und Wärme gewandelt.

Im Transportsektor lässt sich anderes erkennen. Die Flexibilität, die aus der Verschiebung von Lasten des Verkehrs kommt, verdrängt zunächst Stromspeicher. Das liegt daran, dass die Stromproduktion von Biogasanalagen zum einen zeitlich flexibel ist, als auch als Erneuerbare Energiequelle zählt, die Teile der EE-Restriktion erfüllt. Daher sind sie von einer stärkeren Flexibilität der Stromnachfrage

nicht betroffen. Biogasanlagen haben also auch bei einer theoretischen flexiblen Ladestruktur und Wasserstoffproduzenten einen hohen Wert im Strom- und KWK-Wärmesystem – unter der Bedingung, dass eine vermehrte Stromerzeugung aus erneuerbaren Quellen erzielt werden soll.

Weitere untersuchte Faktoren und mehr Details zu Annahmen und Auswirkungen werden in dem künftig im Rahmen der Schriftenreihe „Energetische Biomassenutzung“ veröffentlichten Methodenhandbuch „Bioenergie als Flexibilitätsoption im System“ beschrieben. Dies ist im Rahmen des Projektes OptiSys (FKZ 03KB129B), gefördert durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, entstanden.

Literatur/Quellen

- BMWi (2017): Gesetz für den Ausbau erneuerbarer Energien. EEG. Online verfügbar unter https://www.gesetze-im-internet.de/eeg_2014/, zuletzt geprüft am 24.04.2020.
- BMWi (Hg.) (2018): Zeitreihen zur Entwicklung der erneuerbaren Energien in Deutschland. unter Verwendung von Daten der Arbeitsgruppe Erneuerbare Energien-Statistik (AGEE-Stat) (Stand: Februar 2018). Arbeitsgruppe Erneuerbare Energien-Statistik (AGEE-Stat). Dessau-Roßlau. Online verfügbar unter https://www.erneuerbare-energien.de/EE/Redaktion/DE/Downloads/zeitreihen-zur-entwicklung-der-erneuerbaren-energien-in-deutschland-1990-2017.pdf;jsessionid=8186EB778D0A0D9CA8D92413539851EE?__blob=publicationFile&v=15, zuletzt geprüft am 10.07.2018.
- Fleischer, Benjamin (Dissertation in Veröffentlichung): Systemeffekte von Bioenergie in der Elektrizitäts- und Fernwärmewirtschaft. Eine modellgestützte Analyse langfristiger Energiewendeszenarien in Deutschland. Dissertation. Universität Stuttgart, Stuttgart. Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung (IER)
- Kost, Christoph; Shammugam, Shivenes; Jülich, Verena; Nguyen, Huyen-Tran; Schlegl, Thomas (2018): Stromgestehungskosten erneuerbare Energien. Fraunhofer ISE, zuletzt geprüft am 18.06.2019.
- Michaelis, Julia; Helms, Hinrich; Noeren, Dominik; Dallmer-Zerbe, Kilian; Gnann, Till; Haendel, Michael et al. (2015): Energie und Umwelt - Elektromobilität in Baden-Württemberg im Jahr 2030. Projektübergreifende Forschung im Schaufenster Elektromobilität Baden-Württemberg. Unter Mitarbeit von Fraunhofer ISI und Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg (ifeu).

Kontakt

Dipl. Wirt.-Ing. Sylvio Nagel, Wissenschaftlicher Mitarbeiter

Universität Stuttgart, Institut für Energiewirtschaft
und Rationelle Energieanwendung (IER)

① +49(0)711.685-60760 | ✉ sylvio.nagel@ier.uni-stuttgart.de

⌚ <https://www.ier.uni-stuttgart.de/>

Philip Rüschen, Tobias Röther, Fabian Gievers

Erzeugung von Bio-LNG aus dezentralen Biogasanlagen – Eine ökobilanzielle Bewertung der Treibhausgasminderung

Zusammenfassung: Die technischen Verfahren zur Umwandlung von gasförmigen in flüssige Stoffe zur Erhöhung der Transportwürdigkeit (Dichte-Zunahme) sind seit Mitte des 20. Jahrhunderts bekannt und werden bisher vor allem im großtechnischen Maßstab für die Umwandlung von Erdgas zu LNG (eng. Liquefied Natural Gas) eingesetzt.

Die Adaption dieser großtechnischen Verflüssigungstechnologie an kleinvolumige Biogasströme ist eine der Herausforderungen, um diese Technologie als zukünftige Option für ca. 9.000 Biogasanlagen in Deutschland zu etablieren. Bereits vorhandene Bio-LNG Anlagen in Schweden, Norwegen, Irland und Groß-Britannien verfolgen unterschiedliche technische Ansätze der Biomethanverflüssigung.

Ob die Produktion von Bio-LNG aus einer Biogasanlage im Vergleich zu konventionellen Kraftwerken ökologisch vorteilhaft ist, lässt sich mit Hilfe einer Klimagasbilanz beurteilen. Diese betrachtet den Einfluss einer Technologie auf den Treibhauseffekt, sowohl qualitativ als auch quantitativ, und bildet die Grundlage, um verschiedene Energieerzeugungsformen hinsichtlich ihres Treibhauspotenzials zu vergleichen.

Die dezentrale Produktion von Bio-LNG aus Abfallbiogas erzeugt in den betrachteten Szenarien so geringe Treibhausgasemissionen, dass die Reduktionsziele nach RED II erreicht werden können.

Abstract: The technical processes for converting gaseous to liquid substances to increase their transportability (increase in density) have been known since the middle of the 20th century and have so far been used primarily on an industrial scale for the conversion of natural gas to LNG (liquefied natural gas).

The adaptation of this large-scale liquefaction technology to small-volume biogas streams is one of the challenges to establish this technology as a future option for approximately 9,000 biogas plants in Germany. Existing Bio-LNG plants in Sweden, Norway, Ireland and Great Britain are pursuing different technical approaches to biomethane liquefaction.

Whether the production of Bio-LNG from a biogas plant is ecologically advantageous compared to fossil fuels according to the European Renewable Energy Directive (RED II) can be assessed with the help of a climate gas balance. This considers the influence of a technology on the greenhouse effect, both qualitatively and quantitatively, and forms the basis for comparing different forms of energy production with regard to their greenhouse gas potential.

In the scenarios considered, the decentralized production of Bio-LNG from waste biogas generates such low greenhouse gas emissions that the reduction targets under RED II can be achieved.

1 Einleitung

Um die ökologischen Auswirkungen der Kraftstoffbereitstellung aus biologisch erzeugtem Biomethan mittels beispielhafter, in Planung befindlicher Bio-LNG-Verflüssigungsanlage und einer real existierenden Abfallvergärungsanlage gegenüber konventionellen fossilen Kraftstoffen darzustellen, bietet sich die Erstellung einer Klimagasbilanz an. Untersucht wird, ob die Bio-LNG-Erzeugung aus vorhandenem Biogas bzw. Biomethan ein höheres Treibhausgasminderungspotenzial (THG-Minderungspotenzial) aufweist als fossile Kraftstoffe gemäß der europäischen erneuerbaren Energien Richtlinie (Renewable Energy Directive II).

Die Berechnungen sind an die Anforderungen der ISO 14040/44 angelehnt und berücksichtigen sowohl die Beschreibung des Untersuchungsrahmens als auch die die Ergebnisse der Wirkungsabschätzung für das Klimagaspotenzial sowie deren Auswertung

1.1 Untersuchungsrahmen

Bei dem Produktionssystem handelt es sich um eine mengenmäßig optimierte Biogasbereitstellung aus einer bestehenden (Abfall-)Biogasanlage mit nachgeschalteter, in Planung befindlicher Bio-LNG-Verflüssigungseinheit. Besonderheit dieses Systems ist die kombinierte Aufbereitung und Verflüssigung des Rohbiogases zu Bio-LNG, welche vom Hersteller als Komplett paket angeboten und so bereits an anderen Standorten betrieben wird.

Der Bedarf an Strom, Heiz- und Prozesswärme für die angeschlossenen Industriebetriebe und Wohneinheiten wird von der Biogasanlage volumänglich erfüllt. Überschüssiges Biogas, welches theoretisch zur Stromerzeugung nach EEG eingesetzt werden würde, wird für die Bio-LNG-Erzeugung genutzt. Hinzu kommt eine mögliche Steigerung der Biogaserzeugung durch vorhandene freie Kapazitäten in der Biogasanlage, die durch eine lineare Steigerung des Substratmixes erreicht wird.

Die interne Aufbereitung zu Biomethan erfolgt mittels Aminwäsche. Die thermische Energie für die Regeneration der Adsorptionsflüssigkeit wird aus einem Gaskessel, der mit einem europäischen Erdgasmix betrieben wird, bereitgestellt. Um nicht nur die Bio-LNG-Produktion, sondern auch das „Best-Practice“-Gesamtsystem mit externer Strom- und Wärmenutzung abzubilden, wurden zwei Szenarien, mit und ohne Gutschriften für die regenerative Strom- und Wärmeerzeugung, bilanziert.

Da es um die Bereitstellung eines Kraftstoffes geht, wird als Lebensweg sowohl die Herstellung der Biogase als auch der Betrieb der Aufbereitungs- und Verflüssigungsanlage berücksichtigt.

Zeitlich ist das System durch die Lebensdauer der Anlage sowie die gewählte Wirkungskategorie „GWP 100“ festgelegt und umfasst den Zeitraum von 100 Jahren. Geografisch berücksichtigt das System zwar globale Auswirkungen, bezieht aber europäische Bereitstellungspfade für z.B. Strom und Diesel in Anlehnung an die RED II mit ein.

1.2 Methodik

Bei der betrachteten Biogasanlage handelt es sich um eine Bestandsanlage, die im Wesentlichen Schlachtabfälle einsetzt und über ein Wärmenutzungskonzept verfügt. Das Biogas, das bereits in Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) verstromt wird und Industrie- und Privatkunden mit Wärme versorgt, steht für eine Aufbereitung zu Bio-LNG nicht zur Verfügung. Es werden ausschließlich freie Biogasmengen für die Aufbereitung eingesetzt.

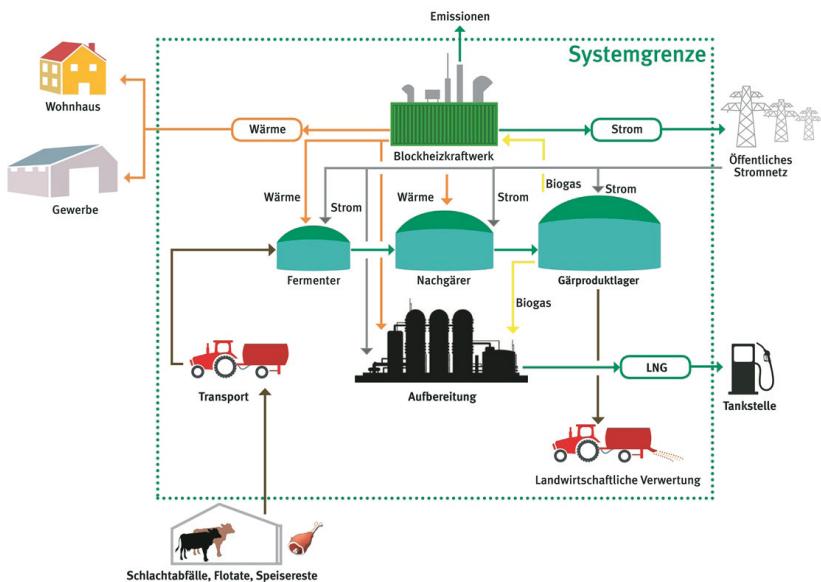


Abb. 1: Einfache Systemgrenze zum Lebensweg der Bio-LNG Bereitstellung aus Abfall-Biogas (rote Kästen: Erweiterte Systemgrenze mit Gutschriften für Strom und Wärme)

Die Systemgrenze berücksichtigt die direkt mit der Bereitstellung von Bio-LNG verbundenen Prozesse (siehe Abb. 1). Die Bereitstellung der Substrate beinhaltet nur den Transport der Substrate zu der Biogasanlage und nicht deren Erzeugung, da diese als Abfallstoffe in anderen Produktsystemen anfallen. Die Strom-

und Wärmenutzung der Biogasanlage beschränkt sich nur auf den Anteil, der für den Biogasanlagenbetrieb benötigt wird. Externe Strom- und Wärmenutzung wird für die Bio-LNG-Breitstellung auf der Abfallbiogasanlage in Anlehnung an das Bioraffinerie-Konzept (RED II) nicht berücksichtigt. Das Lebensende bzw. die Verwendung des Energieträgers wurde nicht bilanziert, um eine Vergleichbarkeit mit der RED II zu gewährleisten.

Um nicht nur die Vergleichbarkeit mit der RED II, sondern auch das „Best-Practice“-Beispiel der Beispielbiogasanlage mit gutem Wärmekonzept darzustellen, wird in einem weiteren Szenario die externe Wärme- und Stromnutzung als Gutschrift bilanziert (erweiterte Systemgrenzen).

Die Wirkungsabschätzung fasst die Ergebnisse der Sachbilanz (bilanzielle Darstellung der Stoff- und Energieflüsse) zusammen und gewichtet die entstandenen Emissionen entsprechend ihres Beitrags zu der betrachteten Umweltwirkungskategorie anhand ihres spezifischen Wirkungspotenzials. Bei der Wirkungskategorie handelt es sich hierbei um den Beitrag zum Klimawandel. Um die Vergleichbarkeit mit der RED II herzustellen, wurde eine Wirkungsabschätzungs-methode gewählt, welche dieselben Umrechnungsfaktoren beinhaltet. Die benutzte Wirkungsabschätzungs-methode ist: „Global Warming Potential (GWP 100)“ nach CML 2016.

Als Datenquellen stehen primär Realdaten der Biogasanlage zur Verfügung, die für ein beispielhaftes Betriebsjahr ausgewertet wurden. Anlagendaten zur Verflüssigungstechnik werden auf Basis eines vorliegenden Angebotes bilanziert, welches auf langjähriger Betriebserfahrung des Anbieters beruht und sämtliche Betriebsmittel, Energieflüsse und Emissionen der Anlage erfasst. Darüber hinaus stehen Daten aus der ecoinvent 3.5 (Wernet et. al, 2016) sowie der GaBi-Datenbanken (thinkstep GmbH, Version 9.2, 2019) zur Verfügung.

2 Ergebnis

Die Auswertung der Lebenszyklusanalyse in der Wirkungskategorie „Global Warming Potential (GWP)“ für die dezentralen Bio-LNG Erzeugung beinhaltet zum einen das Bioraffineriekonzept nach RED II (einfache Systemgrenzen) mit Allokation der biogasanlagenseitigen Emissionen bzw. Gutschriften und zum anderen das Best-Practice-Beispiel der betrachteten Biogasanlage aus Betreibersicht einschließlich aller externen Strom- und Wärmegutschriften (erweiterte Systemgrenzen). Um die Vergleichbarkeit mit anderen Biogasbereitstellungspfaden zu gewährleisten, wurde zudem ein Literaturwert für ein Biogasmisch aus Wirtschaftsdünger und Bioabfall (50 % / 50 %) herangezogen, welches zu Biomethan aufbereitet und ins Erdgasnetz eingespeist wird (vgl. Abb. 2).

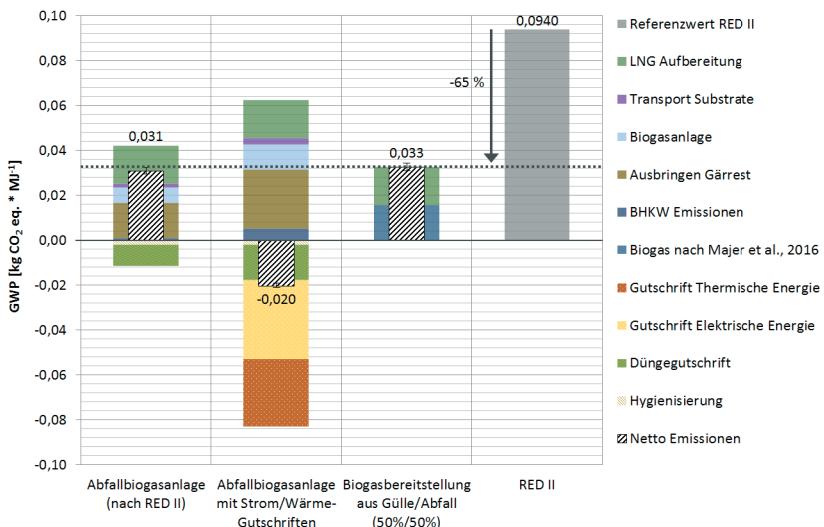


Abb. 2: Wirkungsabschätzung in der Kategorie „Klimawandel“ (GWP) verschiedener Small Scale-LNG-Bereitstellungspfade im Vergleich zum RED II-Referenzwert für fossile Kraftstoffe

Die Auswertung der Wirkungskategorie „Klimawandel“ für die drei betrachteten Szenarien zeigt, dass die Biogasanlage die Bewertungskriterien nach RED II erfüllt, wenn auch nur knapp ($31 \text{ g CO}_2\text{eq./ MJ Bio-LNG}$). Die Bilanzierung mit Literaturdaten für ein Biogasmisch liefert ähnliche Werte ($33 \text{ g CO}_2\text{ eq. pro MJ Bio-LNG}$), liegt aber oberhalb des Reduktionsziels von 65 %, wobei die Unsicherheitsspanne $31\text{--}35 \text{ g CO}_2\text{ eq. pro MJ Bio-LNG}$ beträgt. Betrachtet man das Best-Practice-Szenario mit Strom- und Wärmegutschriften, so liegen die Netto-Emissionen mit $-20 \text{ g CO}_2\text{ eq. pro MJ Bio-LNG}$ sogar im negativen Bereich. Es werden demnach mehr Emissionen eingespart, als freigesetzt werden.

Die Aufteilung der Emissionsanteile zeichnet folgendes Bild: Bei den Szenarien ohne externe Strom- und Wärmegutschriften liegen die Emissionen aus der Biogaserzeugung und der Aufbereitung sowie Verflüssigung zu Bio-LNG auf einem ähnlichen Niveau. Hauptinflussfaktoren sind die Gärrestverbringung mit deren direkten Emissionen (Lachgas, Ammoniak) und entsprechende Gutschriften für die Substitution mineralischer Düngemittel, die direkten Emissionen aus der Biogasanlage und den BHKW (hauptsächlich Methanschlupf). Die Substratbereitstellung hat trotz der teils großen Transportentfernung nur einen geringen Effekt auf die Gesamtemissionen genauso wie die Gutschriften für die Hygienisierung.

3 Ausblick

Flotten neuer schwerer Nutzfahrzeuge müssen beginnend mit dem Jahr 2025 ihre CO₂-Emissionen gegenüber dem Referenzzeitraum 2019/2020 um 15 % mindern. Ab dem Jahr 2030 steigt diese Anforderung auf 30 %. Werden die Ziele nicht erreicht, müssen LKW-Hersteller Strafzahlungen je verfehltes Gramm CO₂ leisten.

Aufbereitetes Biogas kann als eine Alternative zu fossilem Diesel eingesetzt werden. Es steht in komprimierter Form als Bio-CNG und in verflüssigter Form als Bio-LNG zur Verfügung. Durch seine hohe Energiedichte ist Bio-LNG besonders für den Langstrecken- und Schwerlastverkehr prädestiniert.

Das Ergebnis zeigt in einer Berechnung mit Allokation der CO₂-Äquivalente auf das Produkt Bio-LNG, basierend auf der Methodik der RED II, dass die Emissionsreduktionziele erreicht werden können. In einer zweiten Berechnung der CO₂-Äquivalente des Gesamtsystems „Biogasanlage“ mit den Produkten Strom, Wärme und Bio-LNG zeigt sich, dass durch eine Betrachtung des Gesamtsystems die Emissionen sogar negativ ausfallen können.

Das 3N Kompetenzzentrum Niedersachsen Netzwerk Nachwachsende Rohstoffe und Bioökonomie e.V. unterstützt Biogasanlagenbetreiber bei der Berechnung des Treibhausgasminderungspotenzials für den Einsatz von Biogas (Bio-CNG und Bio-LNG) im Kraftstoffmarkt.

Diese Forschung wurde im Rahmen des EU INTERREG V A Projektes „LNG-Pilots“ gefördert durch:



Niedersachsen



Ministerie van Economische Zaken

Ministerium für Wirtschaft, Energie,
Industrie, Mittelstand und Handwerk
des Landes Nordrhein-Westfalen



PROVINCIE FLEVOLAND

provincie
Gelderland

provinsje frysln
provincie frysln

provincie Overijssel

provincie
groningen

provincie Drenthe

Provincie Noord-Brabant

Literatur/Quellen

- Wernet, G.; Bauer, C.; Steubing, B.; Reinhard, J.; Moreno-Ruiz, E.; Weidema, B. (2016): The ecoinvent database version 3 (part I): Overview and methodology. *Int. J. Life Cycle Assess* 2016, 21, 1218–1230.
- Florio, C.; Fiorentino, G.; Corcelli, F.; Ulgiati, S.; Dumontet, S.; Güsewell, J.; Eltrop, L. (2019): A Life Cycle Assessment of Biomethane Production from Waste Feedstock Through Different Upgrading Technologies. *Energies* 2019, 12, 718.
- Majer, S.; Oehmichen, K.; Kirchmeyr, F.; Scheidl, S. (2016): Projektbericht Biosurf D5.3: Calculation of GHG emission caused by biomethane. <http://www.biosurf.eu/wordpress/wp-content/uploads/2015/07/BIOSURF-D5.3.pdf>

Kontakt

Philipp Rüschen

Tobias Röther

3N Kompetenzzentrum Niedersachsen Netzwerk
Nachwachsende Rohstoffe und Bioökonomie e.V.

① (0)5951.9893-29 | ☎ rueschen@3-n.info | 🌐 www.3-n.info

Fabian Gievers

HAWK Hochschule für Angewandte Kunst und Wissenschaft
Fakultät Ressourcenmanagement, Fachgebiet NEUTec

Doktorand Universität Rostock – Agrar- und Umweltwissenschaftliche Fakultät

Bio-LNG – eine erneuerbare und emissionsarme Alternative im Straßengüter- und Schiffsverkehr

Zusammenfassung: Die Verflüssigung von Biomethan (Bio-LNG) ist ein Verfahren, das in großtechnischem Maßstab bereits seit vielen Jahren bei der Verflüssigung von Erdgas (Liquified Natural Gas LNG) angewandt wird. Es hat die gleichen Verbrennungseigenschaften wie LNG, ist jedoch erneuerbar und vermeidet damit deutlich mehr Treibhausgasemissionen. Bio-LNG ist folglich ein Energieträger, der zwei der drängendsten Herausforderungen im Verkehr adressiert: Senkung der verkehrsbedingten Treibhausgasemissionen um 40-42 % bis 2030 und Einhaltung der Feinstaub- und Stickoxidgrenzwerte in den Städten bzw. der Schwefeldioxidgrenzwerte in Nord- und Ostsee.

Aufgrund der hohen Energiedichte eignet sich Bio-LNG für den Straßenschwerlastverkehr und die Schifffahrt, wo für die Elektromobilität eine geringere Marktdurchdringung bis 2030 zu erwarten ist. Der seit dem vergangenen Jahr spürbare Markthochlauf von LNG-Lkw in Deutschland und anderen europäischen Staaten bestätigt die Bedeutung von LNG im Straßenverkehr. Auch immer mehr Reeder steigen auf LNG um. Es wird davon ausgegangen, dass LNG-Lkw und LNG-Antriebe in der Schifffahrt deutlich zunehmen werden und folglich die LNG-Nachfrage auf 35-117 PJ in 2030 steigt.

Diese Nachfrage kann vollständig durch Bio-LNG gedeckt werden, da das erschließbare Biogaspotenzial 424-697 PJ beträgt. Davon sind 20-30 % noch unerschlossene Abfall- und Reststoffe. Zwischen 131-151 PJ können aus rund 2.000 bestehenden Biogasanlagen mobilisiert werden, die in den nächsten 10-15 Jahren ihren Anspruch auf EEG-Vergütung verlieren und sich aufgrund der Anlagengröße für eine Umrüstung auf Biomethan bzw. Bio-LNG besonders gut eignen. Neben einer Erhöhung des Anteils an Rest- und Abfallstoffen ist auch der Einsatz von mehrjährigen Energiepflanzen wie der Durchwachsenen Silphie interessant, die gegenüber Mais ökologische Vorteile und eine bessere Treibhausgasbilanz besitzt. Für die Zeit ab 2030 ist damit zu rechnen, dass auch aus erneuerbarem Strom synthetisch erzeugtes LNG (PtLNG) wirtschaftlich werden könnte und das Potenzial an erneuerbaren Gasen erhöht.

Eine erfolgreiche Etablierung von Bio-LNG im Straßengüterverkehr und in der Schifffahrt könnte rund 7 Mio. t CO₂-äq (rund 10 % der erforderlichen THG-Vermeidung) bis 2030 einsparen und einen wichtigen Beitrag zur Senkung lokaler Emissionen leisten. Zur Erreichung des in der Erneuerbare-Energien-Richtlinie festgelegten Anteils von 1,75 % fortschrittlicher Kraftstoffe in 2030 ist Bio-LNG eine wichtige Option, da viele andere fortschrittliche Kraftstoffe heute noch nicht marktreif sind.

Um das Potenzial von Bio-LNG zur Treibhausgasminderung zu heben, ist die THG-Quote ein zentrales Instrument, weil diese unabhängig von der Entwicklung einzelner alternativer Antriebe zu einer Steigerung des Anteils erneuerbarer Energien beiträgt.

Damit zusätzliche CO₂-Emissionen eingespart werden können, ist eine Anhebung der THG-Quote bis 2030 notwendig, die sowohl die Erhöhung des Volumens von Biokraftstoffen als auch den anvisierten Ausbau der Elektromobilität berücksichtigt. Um den ambitionierten, aber schwer prognostizierbaren Ausbau der Elektromobilität abzubilden, könnte die Quotenhöhe jährlich entsprechend dem Ausbau der Elektromobilität im Vorjahr zuzüglich eines Ausbaupfades für Biokraftstoffe erhöht werden.

Die THG-Quote könnte zusätzlich dazu genutzt werden, Biokraftstoffe und später auch synthetische erneuerbare Kraftstoffe in der Schifffahrt zu etablieren, indem das Inverkehrbringen von Biokraftstoffen in der Schifffahrt auf die Quotenverpflichtung der Mineralölunternehmen angerechnet wird. Für die Schifffahrt wäre der Einsatz von Biokraftstoffen kostenneutral, für die Mineralölwirtschaft eine zusätzliche Option, fortschrittliche Biokraftstoffe wie Bio-LNG auf die THG-Quote anzurechnen.

Ein weiteres Instrument zur Senkung der Emissionen im Straßenschwerlastverkehr ist die Ergänzung der Mautgebühren um eine THG-Komponente. Dabei müsste die Höhe der THG-Komponente so ausgestaltet werden, dass sich der administrative Aufwand auch bei kleineren Spediteuren lohnt. Bis die Einführung einer THG-Komponente durch EU-Recht möglich ist, sollte die Mautbefreiung für emissionsarme Lkw beibehalten werden, um den Markthochlauf von LNG-Lkw zu unterstützen.

Die verpflichtende Verringerung der durchschnittlichen CO₂-Flottengrenzwerte für neu zugelassene schwere Nutzfahrzeuge um 30 % bis 2030 ist ambitioniert. Wenn die Anzahl der Neuzulassungen von Elektro-Lkw und Effizienzmaßnahmen nicht im erforderlichen Maße erfolgt, stellt die Anrechnung von erneuerbaren Kraftstoffen, wie Bio-LNG und PtLNG, eine Option dar. Dies muss bei der Überprüfung durch die Europäische Kommission im Jahr 2022 berücksichtigt werden.

Um kurzfristig die Erzeugung von Bio-LNG anzukurbeln, ist auf Erzeugerseite mehr Investitionssicherheit erforderlich. Dies ist einerseits durch eine Befreiung von der EEG-Umlage für die Herstellung von erneuerbarem LNG möglich. Die Produktionskosten können so um 4-9 % gesenkt werden und ein Level-Playing-Field für die energieintensive Erzeugung und Verflüssigung von Biomethan und synthetischen Gasen mit Standorten außerhalb Deutschlands hergestellt werden. Investitionszuschüsse oder eine zeitlich und mengenmäßig begrenzte Ausschreibung von Bio-LNG-Produktionsmengen würde ebenfalls Investitionen anreizen und die Produktion von Bio-LNG beschleunigen.

Abstract: The liquefaction of biomethane (bio-LNG) is a process that has already been used on an industrial scale in the liquefaction of natural gas (Liquified Natural Gas LNG) for many years. It has the same combustion properties as LNG, but is renewable and thus avoids significantly more greenhouse gas emissions. Bio-LNG is consequently an energy source that addresses two of the most pressing challenges in transport: reducing traffic-related greenhouse gas emissions by 40–42 % by 2030 and compliance with the particulate matter and nitrogen oxide limit values in cities respectively the sulfur dioxide limit values in the North and Baltic Sea.

Due to the high energy density, bio-LNG is suitable for heavy-duty transport and shipping, where a lower market penetration is expected by 2030 for electromobility. The noticeable rise of LNG trucks in Germany and other European countries since last year confirms the importance of LNG in road traffic. More and more shipowners are switching to LNG. It is assumed that LNG trucks and LNG power units in shipping will increase significantly. Therefore, also the LNG demand will increase to 35–117 PJ till 2030.

This demand can be fully met by bio-LNG, since the market potential of biogas is 424–697 PJ. Of these, 20–30 % are still undeveloped in form of waste and residues. Between 131–151 PJ can be mobilized from around 2,000 existing biogas plants, which will lose their claim to EEG remuneration in the next 10–15 years and are particularly well suited for converting to biomethane or bio-LNG production. In addition to an increase in the proportion of residues and waste materials, the use of multi-year energy crops such as the Mixed Silphie are also interesting, as they have ecological advantages and a better greenhouse gas balance compared to maize. For the period from 2030 onwards, LNG synthetically generated from renewable electricity (PtLNG) could also become profitable and increase the potential for renewable gases.

Successful establishment of bio-LNG in heavy-duty transport and shipping could save around 7 million t CO₂eq (around 10 % of the required GHG abatement) by 2030 and could make an important contribution to reduce local emissions. Additionally, bio-LNG is an important option for achieving the proportion of 1.75 % advanced fuels specified in the Renewable Energy Directive in 2030, since many other advanced fuels are not marketable yet.

The GHG quota is a central instrument of increasing the potential of bio-LNG to reduce GHG, because it contributes to an increase in the share of renewable energies regardless of the development of individual alternative power units. In order to save additional CO₂ emissions, an increase of the GHG quota by 2030 is necessary, which takes into account both the increase in the volume of biofuels and the envisaged expansion of electromobility, which is hard to predict. In order to reflect the expansion of electromobility, the quota could be increased annually based on expansion of electromobility and biofuels in the previous years.

The GHG quota could also be used to establish biofuels and later also synthetic renewable fuels in shipping by crediting the placing of biofuels in shipping on the quota obligation of the oil companies. The use of biofuels would be cost-neutral for shipping, and an additional option for the petroleum industry to count advanced biofuels such as bio-LNG against the GHG quota.

Another instrument for reducing emissions in heavy-duty road traffic is to add a GHG component to the tolls. The amount of the GHG component has to have an administrative effort which is worthwhile even for smaller forwarders. Until the introduction of a GHG component is possible through EU law, the toll exemption for low-emission trucks should be maintained to support the successful market launch of LNG trucks.

The mandatory reduction of the average CO₂ fleet limit values for newly registered heavy-duty vehicles by 30 % by 2030 is ambitious. If the number of new registrations of electric trucks and efficiency measures are not taken to the required extent, the inclusion of renewable fuels such as bio-LNG and PtLNG are an option. This must be taken into account in the review by the European Commission in 2022.

In order to boost the production of bio-LNG in the short term, more investment security is required for producers. This is possible through an exemption of EEG surcharges for the production of renewable LNG. That way the production costs can be reduced by 4–9 % and a level playing field for the energy-intensive production and liquefaction of biomethane and synthetic gases can be produced with locations outside of Germany. Investment grants or a tender for bio-LNG production quantities limited in time and quantity would also stimulate investments and accelerate the production of bio-LNG.

1 Chancen und Herausforderungen

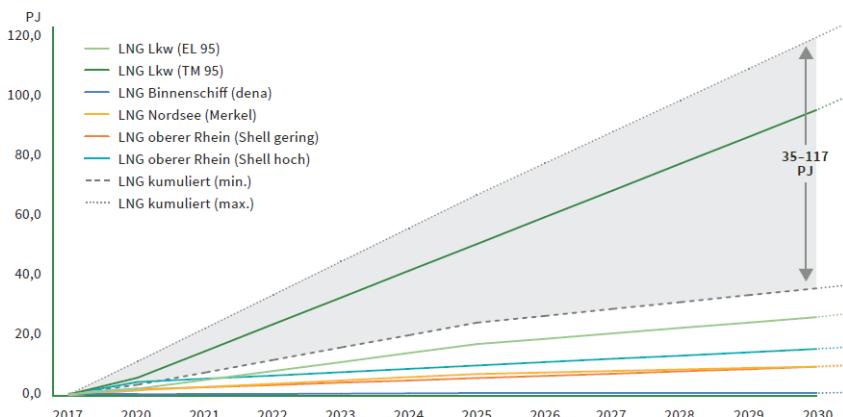
1.1 Rechtliche Rahmenbedingungen

Die THG-Emissionen von neu zugelassenen schweren Nutzfahrzeugen müssen in 2030 im Schnitt 30 % niedriger sein als bei heute zugelassenen Fahrzeugen. Ob und wie erneuerbare Kraftstoffe auf diesen Zielwert angerechnet werden können, soll bis Ende 2022 von der Europäischen Kommission geprüft werden. In 2018 wurde die Anschlussregelung für die Erneuerbare-Energien-Richtlinie (Renewable Energy Directive RED2) beschlossen, welche bis 2021 in nationales Recht implementiert werden muss. Demnach soll der Anteil von erneuerbaren Energien im Verkehrssektor zwischen 2020 und 2030 von 10 auf 14 % ansteigen. Im selben Zeitraum soll auch der Anteil von sogenannten fortschrittlichen Kraftstoffen, dabei handelt es sich um Kraftstoffe, die aus ausgewählten biogenen Rest- und Abfallstoffen hergestellt werden, von 0,05 auf 1,75 % steigen.

Die Vorgaben der RED werden in Deutschland bislang durch die THG-Quote umgesetzt. Diese verpflichtet Unternehmen aus der Mineralölindustrie, die durch den Einsatz von Diesel- und Ottokraftstoffen im Straßenverkehr verursachten THG-Emissionen um 4 % zu senken. In 2020 stieg dieser Wert auf 6 % an und wird um eine Unterquote für fortschrittliche Kraftstoffe in Höhe von 0,05 % ergänzt. Zur Verringerung der THG-Emissionen können erneuerbare Kraftstoffe in Verkehr gebracht werden, wenn diese Nachhaltigkeitsanforderungen einhalten.

Bei der langfristigen Senkung der THG-Emissionen können LNG-Antriebe in der Schifffahrt und im Straßenschwerlastverkehr eine wichtige Rolle spielen. Die Einführung eines Zuschusses für die Anschaffung von LNG-betriebenen Lkw und die Befreiung von der Maut in den Jahren 2019 und 2020 haben so dazu geführt, dass in diesem Zeitraum schätzungsweise 100-200 LNG-Lkw zugelassen worden sind. Die Schifffahrt hat beim Thema LNG ebenfalls Fahrt aufgenommen.

men. Im Vergleich zum Straßenverkehr verläuft die Entwicklung jedoch deutlich langsamer, was vor allem daran liegt, dass Schiffe oft über mehrere Jahrzehnte betrieben werden und damit der Wechsel von Antrieben lange Zyklen durchlaufen kann. Dennoch wurden mehrere Förderbescheide für die Umrüstung auf LNG-Antrieb und die Anschaffung von LNG-Schiffen 2018 an Reedereien vergeben. Abb. 1 illustriert hierbei den LNG-Bedarf im Straßen- und Schiffsverkehr, der im Jahr 2030 eine Bandbreite von 25-117 PJ betragen wird, wobei der Großteil der Nachfrage auf den Straßenschwerlastverkehr zurückgeht. Der Anteil der Sattelzugmaschinen mit LNG-Antrieb müsste demnach von heute 0,25 auf 10-35 % in Bezug auf den gegenwärtigen Fahrzeugbestand zunehmen, was sehr ambitioniert ist. Internationale Container- und Kreuzfahrtschiffe machen den Großteil des Kraftstoffbedarfs in der Schifffahrt aus. Entsprechend sind dort internationale Abkommen, aber auch lokale Anforderungen an die Emissionen wichtige Faktoren, welche die Umstellung auf LNG-Antriebe begünstigen.



Quellen: dena 2018; Merkel et al. 2017; Shell 2019

Abb. 1: Szenarienvergleich LNG-Bedarf im Straßen- und Schiffsverkehr 2017-2030 in PJ

1.2 Bio-LNG als Kraftstoff

Bio-LNG (verflüssigtes Biomethan) ist ein flüssiger, geruchsloser und ungiftiger Kraftstoff mit einer hohen Energiedichte. Der Unterschied zu komprimiertem Erdgas (Compressed Natural Gas CNG) und komprimiertem Biomethan liegt im Wesentlichen in der höheren Energiedichte von (Bio-)LNG. Dies ist vor allem im Straßenfernverkehr und in der Schifffahrt relevant, wo längere Strecken ohne Tankunterbrechung bewältigt werden. Mit Bio-LNG und LNG betriebene Fahrzeuge haben gegenüber Dieselfahrzeugen durch deutlich geringere Emissionen vielfältige Vorteile: so kann Lärm um rund 50 %, die Freisetzung von Feinstaub um ca. 95 % und der Ausstoß von Schwefel und Stickoxiden fast vollständig reduziert werden (dena 2018b).

Das für die Verflüssigung notwendige Methan kann neben biogenen Quellen auch synthetisch aus erneuerbarem Strom erzeugt werden. Bereitgestellt wird Bio-LNG je nach Struktur der Abnehmer, lokaler Produktionskosten, Transportdistanzen und Verfügbarkeit der Gasnetzinfrastruktur hierbei entweder durch Verflüssigung von Biomethan am Standort der Biogasproduktion oder durch massenbilanzielle Entnahme von Biomethan aus dem Gasnetz mit Verflüssigung beim Verbraucher. Das erste Konzept bietet den Vorteil, dass die Kosten für die Einspeisung ins Gasnetz entfallen. Zudem können Regionen mit Bio-LNG versorgt werden, die in größerer Entfernung zu LNG-Terminals und zum Gasnetz liegen. Lange Transportwege von (Bio-)LNG können so vermieden werden. Eine massenbilanzielle Entnahme von Biomethan könnte sich dahingegen beispielsweise in Tiefseehäfen eignen, wo in unregelmäßigen Abständen Container- und Kreuzfahrtschiffe bebunkert und Lkw betankt werden.

Aufkommenspotentiale von Bio-LNG

Je nachdem ob die Nutzung von Grünland mit betrachtet wird und welche Annahmen zur Entnahme von Stroh vom Acker getroffen werden, liegen die Biogaspotenziale zwischen 579 und 848 PJ in 2030. Davon werden aktuell 314-343 PJ zur Biogaserzeugung eingesetzt. Aus Energiepflanzen wie Mais, Roggen und Zuckerrüben wird der Großteil des Biogases hergestellt, jedoch häufig in Kombination mit landwirtschaftlichen Reststoffen wie Gülle oder Mist. Abzüglich der bereits in Biogasanlagen genutzten Substrate sind zukünftig noch zwischen 256 und 516 PJ Biogas zusätzlich erschließbar. Das Potenzial an Substraten, die nach Anhang IX Teil A RED2 zur Herstellung von fortschrittlichen Kraftstoffen verwendet werden können, beträgt 168-218 PJ und ist zu einem großen Teil noch nicht erschlossen. Dabei handelt es sich u. a. um Gülle, Festmist, kommunale Bioabfälle und Stroh, aber auch zahlreiche Reststoffe aus der Milchverarbeitung sowie der Papier- und Zellstoffproduktion.

Tab 1: Biogaspotenziale 2030 in PJ

	Technisches Biogaspotenzial		Davon bereits genutzt (Stand 2016)		Zusätzlich erschließbares Biogaspotenzial	
	Min.	Max.	Min.	Max.	Min.	Max.
Gülle und Festmist	128,8	128,8	38,9	42,2	86,6	89,9
Energiepflanzen (mit/ohne Grünland)	346,7	573,1	259,5	275,7	87,2	297,4
Stroh (Getreide)	41,8	69,1	0,3	0,3	41,5	69,1
kommunale Reststoffe (mit/ohne Organik im Restabfall)	26,9	42,2	5,5	8,1	21,4	34,1
industrielle Abfälle und Reststoffe	35,0	35,0	9,7	16,2	18,8	25,3
Summe	579,2	848,1	313,9	342,5	255,6	515,7

Quellen: Fraunhofer IEE & DBFZ & DBI & dena 2019; Zeller et al. 2011

Die zusätzlichen inländischen, wirtschaftlichen Potenziale zur Erzeugung von synthetischem Methan aus erneuerbarem Strom hängen stark von rechtlichen Rahmenbedingungen und der Technologieentwicklung (z. B. Lernkurveneffekte) ab. Vor diesem Hintergrund ist die Marktdurchdringung von Methan zur Erzeugung von PtLNG kurzfristig nicht in großem Maßstab zu erwarten, könnte aufgrund der erneuerbaren Stromerzeugungspotenziale in Deutschland und Europa (dena/LBST 2017) aber bis 2050 durchaus Relevanz erlangen. Denn durch die Nutzung von Überschussstrom und den Zubau von insbesondere Wind- und Solarenergie könnten 240-532 PJ Methan synthetisch in 2050 erzeugt (DVGW 2018) und u. a. für die Verflüssigung zu LNG genutzt werden. Hinzu kommt, dass durch die an der deutschen Nord- und Ostseeküste geplanten LNG-Terminals zukünftig auch der Import von PtLNG aus Regionen mit relativ günstigen Produktionsbedingungen für erneuerbare Gase möglich wird.

Treibhausgasminderungspotenziale von Bio-LNG

Unter der Annahme der besten verfügbaren Technik bezüglich der Minimierung von Methanverlusten weist fossiles LNG aus der konventionellen Erdgasförderung rund 20 % geringere THG-Emissionen als die fossile Referenz auf. Die THG-Minderung von Biodiesel (FAME) aus Altspeisefetten und -ölen erreicht nahezu 90 %. Gülle schneidet bei Bio-LNG am besten ab, da durch die Güllevergärung Methanemissionen vermieden und den THG-Emissionen gutgeschrieben werden. Bioabfälle und Reststoffe besitzen ebenfalls eine hohe THG-Minderung von rund 80 %. Der Anbau von mehrjährigen Pflanzen wie der Durchwachsenen Silphie hat in Bezug auf die THG-Emissionen den Vorteil, dass über den Anbauzyklus betrachtet weniger Dünger eingesetzt werden muss. Bio-LNG, welches aus der Durchwachsenen Silphie erzeugt wurde, erreicht eine THG-Minderung von rund 65 %. Durch eine Mischung mit Gülle oder anderen landwirtschaftlichen Reststoffen kann die THG-Minderung so verbessert werden, dass die Grenzwerte auf jeden Fall eingehalten werden. Damit erfüllt Bio-LNG die Anforderung von biogenen Kraftstoffen gegenüber fossiler Referenzwerte ab 2012 mindestens eine THG-Minderung von 65 % aufzuweisen.

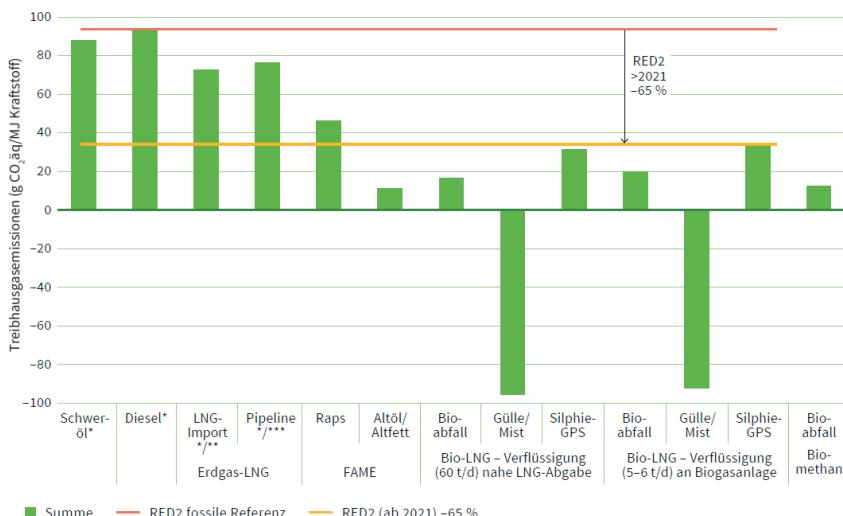


Abb. 2: Well-to-Tank-Treibhausgasemissionen nach RED2-Methode (Berechnungen von LBST)

2 Maßnahmen für den Markthochlauf

THG-Quote dynamisch entsprechend dem Ausbau der Elektromobilität anpassen

Bei der zukünftigen Ausgestaltung der THG-Quote legt die RED2 die Nachhaltigkeitsstandards für Biokraftstoffe und den Mindestanteil an fortschrittlichen Kraftstoffen (Teil A, Anhang IX) fest. Für die Festlegung der Höhe der THG-Quote empfiehlt sich allerdings eine Orientierung an der bis 2030 anvisierten THG-Minderung im Verkehrssektor, die zusätzlich durch erneuerbare Kraftstoffe und den Ausbau der Elektromobilität erreicht werden kann. Dabei muss darauf geachtet werden, dass der Ausbau der Elektromobilität nicht auf Kosten der bereits durch Biokraftstoffe erzielten THG-Minderung erfolgt. Dies könnte dadurch realisiert werden, dass der Zubau der Elektromobilität bei der Anpassung der Quotenhöhe so berücksichtigt wird, dass gleichzeitig eine Erhöhung des Biokraftstoffvolumens bewirkt wird. Die THG-Quote müsste folglich dynamisch an die Entwicklung der Elektromobilität angepasst werden. Dadurch würde sowohl für die Quotenverpflichteten als auch für die Produzenten von Biokraftstoffen Planungs- und Investitionssicherheit hergestellt.

THG-Quote für Einstieg von erneuerbaren Kraftstoffen im Schiffsverkehr

In der Schifffahrt werden bislang keine erneuerbaren Kraftstoffe eingesetzt. Außerhalb der ECA-Zone ist es sogar üblich, mit Schweröl zu fahren. Die Anrechnung von Biokraftstoffen, die in der Schifffahrt eingesetzt werden, mit dem Faktor 1,2 ist daher ein erster Versuch, erneuerbare Kraftstoffe in der euro-

päischen Schifffahrt zu etablieren. Bio-LNG eignet sich hierfür insbesondere, weil es im Vergleich zu konventionellen Schiffskraftstoffen über ein hohes THG-Minderungspotenzial verfügt und deutlich niedrigere Partikel- und Schwefeldioxidemissionen verursacht. Damit erste Schritte zur THG-Vermeidung in der Schifffahrt flankiert werden, sollten erneuerbare Kraftstoffe in der Binnen- und Seeschifffahrt mit dem Faktor 1,2 auf die THG-Quote der Quotenverpflichteten angerechnet werden.

Lkw-Maut um THG-Komponente ergänzen

Die bis einschließlich 2020 geltende Mautbefreiung für emissionsarme Lkw (Gas- und Elektro-Lkw) trägt zur positiven Absatzentwicklung von LNG-Lkw bei. Um neben den Umwelt- zukünftig auch die Treibhausgasvorteile zu berücksichtigen, sollten die Mautgebühren um eine THG-Komponente erweitert werden. Damit diese THG-Komponente einen Anreiz zum Einsatz von erneuerbaren Energien (erneuerbarem Strom bei Elektro-Lkw und erneuerbaren Kraftstoffen für Verbrennungsmotoren) bietet, muss sie ausreichend hoch dimensioniert werden. Das heißt, die THG-Minderung muss deutlich über dem Wert liegen, der mit emissionsarmen, fossilen Kraftstoffen erreicht werden kann. Zum anderen muss die damit verbundene Mautreduzierung so hoch sein, dass sich der erforderliche administrative Aufwand für Spediteure lohnt. Die Nachweise zur Verringerung von THG-Emissionen durch den Einsatz von erneuerbaren Kraftstoffen könnten analog zur THG-Quote über das Hauptzollamt (Biokraftstoffquotenstelle) erfolgen. Die Nachhaltigkeitsanforderungen an die erneuerbaren Kraftstoffe müssten denen der RED2 entsprechen. Eine THG-bezogene Mautreduzierung könnte beispielsweise in Höhe von 5 ct/km gewährt werden, wenn die THG-Minderung gegenüber Diesel mindestens 50 % beträgt. Um einen Fadenriss bei den Neuzulassungen von emissionsarmen Lkw zu vermeiden, sollte die Mautbefreiung für emissionsarme Lkw bis zur Einführung einer THG-Komponente fortgeführt werden.

Bio-LNG zur Einhaltung der CO₂-Grenzwerte für neue schwere Lkw

Wie bei Pkw werden zukünftig auch für neu zugelassene schwere Lkw Grenzwerte für den maximalen durchschnittlichen CO₂-Ausstoß (Tank-to-Wheel) festgelegt. 2025 muss der durchschnittliche CO₂-Ausstoß von neuen schweren Lkw 15 % niedriger als 2019 sein. In 2030 wird dieser Wert auf 30 % angehoben. Bei Nichterfüllung müssen die Fahrzeughersteller Strafen zahlen. Einen Vorschlag zur Anrechnung erneuerbarer gasförmiger und flüssiger Kraftstoffe auf diese CO₂-Grenzwerte soll die Europäische Kommission bis Ende 2022 vorlegen. Die Einhaltung von Nachhaltigkeitsanforderungen nach RED2 wäre unabdingt erforderlich (Europäischer Rat 2019). Im Zusammenhang mit der Anrechnung von erneuerbaren Kraftstoffen auf die CO₂-Grenzwerte für schwere Lkw wäre der Vorteil von Bio-LNG, dass es unbegrenzt beigemischt werden kann. Wenn also Elektro-Lkw und flüssige erneuerbare Kraftstoffe noch nicht im nötigen Umfang wirtschaftlich verfügbar sind, kann dies durch einen entsprechend hohen Anteil von Bio-LNG ausgeglichen werden. Erreicht ein Fahrzeughersteller in 2030 durchschnittlich 25 % CO₂-Minderung, dann könnte er die fehlenden

5 % je nach Anteil der LNG-Lkw an den Neuzulassungen durch einen Bio-LNG-Anteil von 16 bis 63 % am Kraftstoffverbrauch der Lkw erreichen.

Bio-LNG-Produktion mittels Marktanreizen beschleunigen

Die zuvor beschriebenen Maßnahmen sind mit einigen Unsicherheiten verbunden, weshalb nur einzelne Pläne für Bio-LNG-Anlagen bekannt sind. Um dennoch die Marktentwicklung rechtzeitig anzuschieben und die Investitionsrisiken für die Pioniere zu verringern, sollte kurzfristig ein befristetes Markteinführungsprogramm aufgelegt werden. Dieses könnte durch einen Investitionszuschuss für die Verflüssigung von Biomethan und synthetischem LNG erfolgen. Alternativ ist auch eine zeitlich und mengenmäßig begrenzte Ausschreibung von Bio-LNG-Produktionsmengen denkbar.

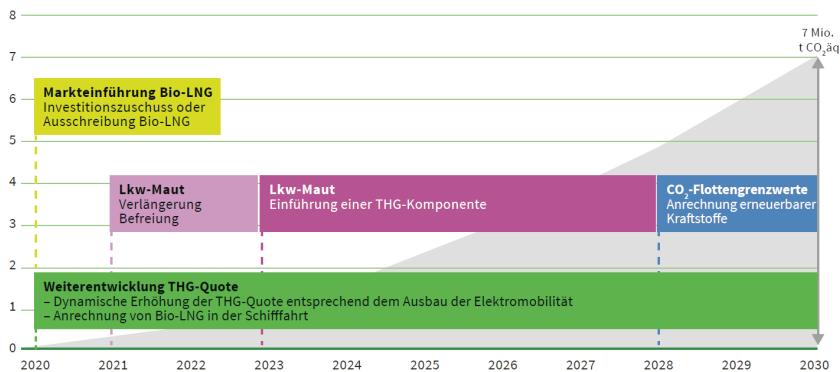
Befreiung von EEG-Umlage schafft Level-Playing-Field für Bio-LNG aus Deutschland

Die Elektrolyse von Wasserstoff, aber auch die Verflüssigung von Biomethan und synthetisch aus erneuerbaren Energien erzeugtem Methan sind stromintensiv. Die Stromkosten von Bio-LNG liegen je nach Anlagenkonzept und Aufbereitungstechnologie zwischen 8 und 18 %. Davon macht die EEG-Umlage – ähnlich wie bei PtG-Anlagen – nahezu 50 % der Kosten aus (dena 2018a). Das bedeutet, die Erzeugungskosten von Bio-LNG könnten um ca. 4 bis 9 % verringert werden, wenn Bio-LNG-Anlagen nicht als Letztverbraucher, sondern als Anlagen zur Erzeugung von erneuerbaren Kraftstoffen definiert würden. Bei PtG-Anlagen wäre die Kostenreduktion durch eine Befreiung von der EEG-Umlage deutlich höher. Um die internationale Wettbewerbsfähigkeit einer heimischen Produktion von erneuerbarem LNG in Zukunft sicherzustellen, sollte die Herstellung von erneuerbaren Kraftstoffen von der EEG-Umlage befreit werden.

Eine Verdopplung des Volumens von Biokraftstoffen ist möglich

Eine Verdopplung des Volumens von erneuerbaren Kraftstoffen auf rund 220 PJ ist durch die Mobilisierung der vorhandenen Biogaspotenziale und den Einsatz von Bio-LNG realisierbar. Dadurch könnten 7 Mio. t CO₂äq zusätzlich bis 2030 eingespart werden. Zudem könnte der Anteil von Biokraftstoffen aus Rest- und Abfallstoffen gegenüber dem heutigen Stand deutlich erhöht, die lokalen Emissionen verringert und die regionale Wertschöpfung gesteigert werden. Es gibt mehrere vielversprechende Ansätze, wie der Einsatz von Biokraftstoffen und strombasierten Kraftstoffen in den kommenden Jahren gesteigert werden kann. Die THG-Quote ist dabei das wichtigste Instrument, weil es sich um einen bewährten und technologieoffenen Mechanismus handelt, der kurzfristig angepasst werden kann. Die THG-Quote setzt dabei Anreize, Biokraftstoffe mit einer hohen THG-Vermeidung zu verwenden. Darüber hinaus kann sie dazu genutzt werden, erneuerbare Kraftstoffe im Schiffs- und Flugverkehr zu etablieren, wo es bisher keine effektiven Anreize für den Einsatz von erneuerbaren Kraftstoffen gibt. Um die Entwicklung von Bio-LNG in Gang zu setzen, benötigen Investoren und Akteure Planungssicherheit. Mit einem Investitionszuschuss für den Bau von Bio-LNG-Anlagen oder einer auf wenige Jahre befristeten Ausschrei-

bung von Bio-LNG-Produktionsvolumen könnte die Marktentwicklung bis Mitte der 2020er-Jahre entscheidend angeschoben werden. Der Anteil von fortschrittlichen Kraftstoffen könnte dadurch beschleunigt und die Verfügbarkeit von Bio-LNG für in der Zukunft liegende Maßnahmen wie die Einführung einer THG-Komponente in der Lkw-Maut oder eine Anrechnung von erneuerbaren Kraftstoffen auf die CO₂-Flottenziele vorbereitet werden. Für alle Maßnahmen gilt, dass einheitliche Nachhaltigkeitsstandards für Biokraftstoffe nach RED2 gelten müssen. Weiterhin ist es wichtig, dass die Maßnahmen gut aufeinander abgestimmt sind und keine Zielkonflikte dadurch entstehen, dass unterschiedliche Akteure um dieselben limitierten Ressourcen konkurrieren.



Quelle: eigene Darstellung

Abb. 3: Schematische Darstellung der möglichen Abfolge verschiedener Instrumente zur Treibhausgasminderung durch Bio-LNG

Literatur/Quellen

- dena (2018a): Power to X: Strombezug. Berlin.
- dena (2018b): LNG als alternativer Kraftstoff im Straßengüterverkehr: Handlungsempfehlungen zur Beschleunigung der Marktentwicklung. Berlin.
- dena/LBST (2017): E-Fuels – Study: The potential of electricity-based fuels for low emission transport in the EU. Berlin, München.
- DVGW (2018): Die Rolle von Gas im zukünftigen Energiesystem. Köln.
- Europäischer Rat (2019): Proposal for a Regulation of the European Parliament and of the Council setting CO₂ emission performance standards for new heavy-duty vehicles – Final compromise text approved by Coreper. Brüssel, 22.02.2019.

Kontakt

Toni Reinholtz, Teamleiter Bioenergie

Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena) | Chausseestr. 128 a, 10115 Berlin

✉ reinholtz@dena.de | ⚡ www.dena.de

*Ulrike Schümann, Fanny Langschwager,
Karsten Schleef, Tim Schulzke, Volker Heil,
Martin Peters, Nils Rettenmaier*

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Maritime Kraftstoffe durch Pyrolyse biogener Reststoffe und Veresterung mit biobasierten höheren Alkoholen – PyroMar

Zusammenfassung: Die IMO (International Maritime Organization) hat im April 2018 in ihrer Resolution MEPC.304 ihre Strategie zur Verringerung schiffsbasierter Treibhausgasemissionen festgehalten. Danach sollen die jährlichen THG-Gesamtemissionen bis 2050 um 50 % im Vergleich zu 2008 reduziert werden. Aufgrund der langen Lebenszyklen von Schiffen und ihrer Antriebsanlagen liegt der Schlüssel zur Erreichung dieser ambitionierten Ziele in der Defossilisierung der Kraftstoffe. Einen Lösungsansatz hierfür stellt die Verwendung reststoffbasierter „Drop-in-Fuels“ für den Betrieb von Hochseeschiffen insbesondere in Emission Control Areas (ECAs) dar. Hierzu sollen im Projekt „PyroMar“ vollständig aus biogenen Reststoffen bestehende Kraftstoffkomponenten als Zusätze zu schwefelarmen Rückstandsölen bzw. zu Schweröl erzeugt und im Motor angewendet werden. Die Verwendung von Beimischkomponenten anstelle rein biogener Kraftstoffe ist dabei das Vorgehen der Wahl, da nur so das Mengengerüst für die betriebswirtschaftlich notwendige Nutzung der vorhandenen Tankinfrastruktur erzielt werden kann. Mit dem Aufzeigen eines kostengünstigen Verfahrenskonzepts zur Herstellung defossilierten Blendkomponenten soll ein Beitrag zur Reduzierung von CO₂- und SO_x-Emissionen in diesem Verkehrssektor geleistet werden.

Abstract: In April 2018, the IMO (International Maritime Organization) set out its strategy for reducing ship-based greenhouse gas emissions in Resolution MEPC.304. According to this strategy, CO₂ emissions are to be reduced by 40 % by 2030 and by 70 % by 2050 (compared to 2008). Due to the comparatively long life cycles of ships and their propulsion systems, the key to achieving these ambitious goals lies in the defossilization of fuels. One approach solving this problem is the use of residual-based drop-in fuels for the operation of ocean-going ships, especially in Emission Control Areas (ECAs). In the project "PyroMar" fuel components consisting entirely of biogenic residues are produced as blend components to low-sulfur residual oils or heavy fuel oil for use as drop-in-fuels and applied in the engine. The use of admixture components instead of purely biogenic fuels is the procedure of choice, as only in this way the quantity structure for the economically necessary use of the existing tank infrastructure can be achieved. By demonstrating a cost-effective process concept for the production of defossilized blend components, a contribution to the reduction of CO₂ and SO_x emissions in this traffic segment is to be made.

1 Status Quo – Klimaschutz in der Seeschifffahrt

Laut Klimaschutzplan 2050 der Bundesregierung soll der Verkehrssektor bis zum Jahr 2030 seine Emissionen auf 98 - 95 Mio. t CO₂-Äq. senken. Das entspricht einer Minderung von 40 - 42 % gegenüber dem Stand von 1990. Im Vergleich zu den Emissionen im Jahr 2017 von 168 Mio. t CO₂-Äq. besteht somit ein Reduktionsbedarf von 70 - 73 Mio. t CO₂-Äq. bzw. in den verbleibenden Jahren bis 2030 eine jährliche Minderung um 5 - 6 Mio. t CO₂-Äq. Da konkrete Pläne zur Umsetzung bisher immer noch ausstehen, sprechen alle Anzeichen dafür, dass die für 2020 angestrebten Energiewendeziele im Verkehrsbereich noch nicht einmal im Jahr 2030 erreicht sein werden. Eine grundlegende Trendumkehr muss dementsprechend so schnell wie möglich eingeleitet werden [1].

Der internationale Schiffsverkehr ist als einzige Verkehrsart bisher von der Verpflichtung der Europäischen Union zur Treibhausgasreduzierung ausgenommen. Aber auch hier besteht akuter Handlungsbedarf. Die dritte Treibhausgasstudie der IMO aus dem Jahr 2014 geht je nach gewähltem Entwicklungsszenario von einer möglichen Zunahme des Seeverkehrs bis 2050 um 50 - 250 % im Vergleich zu 2012 aus [2]. Neben Maßnahmen zur Verbesserung der Energieeffizienz und Erfassung der CO₂-Emissionen [3] sind daher vor allem Maßnahmen zur Reduktion von CO₂-Emissionen aus dem Seeverkehr in Verbindung mit einem Minderungsziel für den Sektor erforderlich. Andernfalls nimmt der Druck auf andere Sektoren entsprechend zu. Zudem besteht im Seeverkehr ein hohes Potenzial, die CO₂-Emissionen, zum Beispiel durch technische und betriebliche Maßnahmen, alternative Antriebe und Kraftstoffe zu mindern. Die Bundesregierung unterstützt den Klimaschutz im internationalen Seeverkehr, beispielsweise durch die nationale Umsetzung der europäischen MRV-Verordnung (2015/757 EU) [4] sowie durch die Förderung der Um- bzw. Ausrüstung von Seeschiffen auf bzw. mit klimaschonenderen Kraftstoffalternativen, beispielsweise auf LNG-Antrieb [3].

Hinzu kommen tiefgreifende Umbrüche und neue Herausforderungen im marinen Kraftstoffmarkt. Seit 2020 ist eine weltweite Reduzierung des Schwefelgehaltes für Marine Rückstandskraftstoffe von bisher 3,5 %(m/m) auf nur noch 0,5 %(m/m) in Kraft getreten (Sulfur Cap) [5]. Neben einer Vielzahl von neuen Kraftstoffkomponenten aus den Raffinerieprozessen, deren Betriebsverhalten z.T. problematisch ist, sehen sich die Reeder steigenden Betriebskosten gegenüber. Die Reederei Hapag-Lloyd beziffert die Kosten für den hochwertigeren Kraftstoff auf etwa 1 Mrd. US-\$ jährlich [6]. Die alternative Nachrüstung eines Scrubbers zur Abgasnachbehandlung wird pro Schiff auf etwa 7 - 10 Mio. US-\$ geschätzt. Durch die höheren Kosten für das erdölstämmige Low Sulfur Fuel Oil (LSFO) werden Biokraftstoffe in diesem Segment wettbewerbsfähig.

Biogene Kraftstoffkomponenten in Marineanwendungen haben darüber hinaus das Potenzial Kraftstoffeigenschaften wie die Mischungsstabilität sowie die Zündwilligkeit von Rückstandskraftstoffen zu verbessern und können allein durch die Beimischung den Schwefelgehalt senken.

Vor diesem Hintergrund ergeben sich aus Sicht des LKV zahlreiche neue Forschungsaufgaben für die kommenden Jahre.

2 Kraftstoffoptionen für die Seeschifffahrt – ein Überblick

Um die klimapolitischen Ziele zu erreichen, werden in der Zukunft große Mengen an CO₂-neutralen Kraftstoffen benötigt. Erreicht werden soll dies durch die steigende Produktion synthetischer Kraftstoffe. E-Fuels werden z.B. nach dem CWTL-Verfahren mittels erneuerbarer Energie aus Wasser und CO₂ hergestellt. Im Hinblick auf die Seeschifffahrt werden sowohl flüssige E-Fuels wie Methanol, Fischer-Tropsch-Diesel und Oxymethylenether (OME) als auch gasförmige synthetische Kraftstoffe wie Wasserstoff, Methan und Ammoniak diskutiert [7]. Ein Vorteil der E-Fuels ist, dass diese „Designer-Fuels“ optimal auf die spezielle Anwendung zugeschnitten werden können. Allerdings werden für die Synthese flüssiger Kraftstoffe mehr Prozessschritte benötigt als für gasförmige E-Fuels, wodurch die Produktionskosten entsprechend höher sind [7]. Die Vorteile flüssiger Kraftstoffe liegen in der einfacheren und kostengünstigeren Kraftstoffinfrastruktur sowie ihrer höheren Energiedichte.

Die großtechnische Produktion vieler synthetischer Kraftstoffe ist meist sehr kostenintensiv und für eine derzeitige Anwendung noch nicht ausgereift [8]. Das Mengengerüst in der Seeschifffahrt und konkurrierenden Sektoren wie dem Luftverkehr, stehen einem zeitnahen und flächendeckenden Einsatz solcher Kraftstoffe in diesem Sektor entgegen. Eine alternative Lösung können biogene Kraftstoffe wie reine Pflanzenöle, Biodiesel (FAME), hydrierte Pflanzenöle (HVO) und Biomethan (LNG) darstellen [9] [10]. Eine Sonderstellung nehmen hierbei Pyrolyseöle (Biocrudes) ein. Diese Öle wurden bisher aufgrund ihrer besonderen Kraftstoffeigenschaften (hohe Säurezahl, hoher Wasser- und Aschegehalt) nur in Stationärmotoren (BHKW) eingesetzt. Sie könnten aber auch unter bestimmten Voraussetzungen als schwefelarme Drop-in-Komponenten in Marine Rückstandsölen Verwendung finden.

Biokraftstoffe stehen bereits jetzt in erheblichen Mengen zur Verfügung und können konventionellen, fossilen Kraftstoffen in größeren Mengen als „Drop-in-Fuels“ beigemischt werden. Biokraftstoffblends stellen somit eine Brückentechnologie dar, um kurz- und mittelfristig Treibhausgasemissionen nachhaltig zu reduzieren [11]. Die folgende Abbildung zeigt einen Überblick der für die Seeschifffahrt diskutierten biogenen und synthetischen Kraftstoffoptionen.

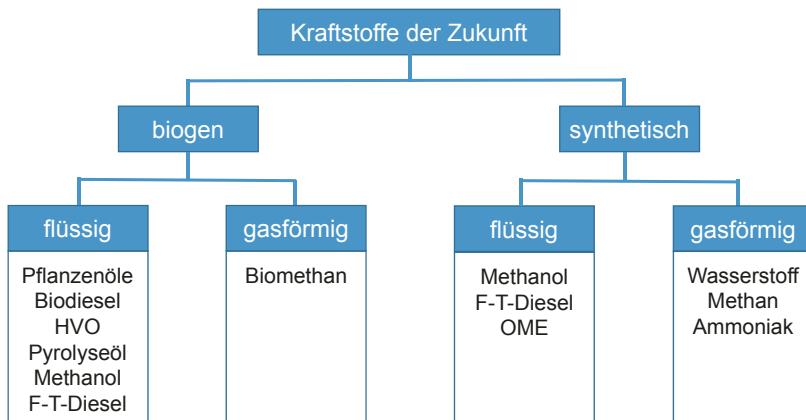


Abb. 1: Marine Kraftstoffoptionen der Zukunft

Methanol kann sowohl biogen als auch synthetisch als E-Fuel gewonnen werden. Methanol ist der einfachste Alkohol, welcher bei ambienten Temperaturen und Drücken flüssig vorliegt. Bei der Verbrennung von Methanol entstehen Kohlenstoffdioxid und Wasser, daneben treten keine weiteren Emissionen wie SO_x , NO_x oder Partikel auf [12] [13]. Wenn 10 % der weltweiten Schiffsflotte auf Methanol umstellen würde, wären ca. 80 Mio. t/a Methanol nötig, was der jährlichen Produktionskapazität von Methanol im Jahr 2019 entspricht. Damit die Industrie Methanol als alternativen Kraftstoff einführen kann, wird eine Weiterentwicklung der biobasierten Herstellung von erneuerbarem Methanol eine bedeutende Rolle spielen [13]. Als Nachteilig müssen jedoch die akute Toxizität von Methanol und die hohen sicherheitstechnischen Anforderungen eingeschätzt werden.

Neben der Nutzung von E-Fuels als Hauptenergiequelle für den Antrieb gibt es weitere Kopplungsoptionen um regenerativ erzeugten Strom an Bord von Schiffen nutzbar zu machen, wie z.B. die Landstromversorgung und Batterien zur Propulsionsunterstützung und Optimierung.

Batterieelektrische Antriebe sind aus unserer Sicht nur für den Kurzstreckenbetrieb geeignet, da die Speicherkapazitäten der Batterien für die langen Strecken nicht ausreichend sind. Für Fähren sind hybride Antriebe bereits realisiert worden.

3 Verbundvorhaben PyroMar

Seit Jahresbeginn 2020 arbeitet ein vom BMWi gefördertes Forschungskonsortium aus den Partnern Fraunhofer UMSICHT (Oberhausen), dem ifeu - Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg GmbH und dem Lehrstuhl für Kolbenmaschinen und Verbrennungsmotoren der Universität Rostock an der Entwicklung neuer CO_2 -neutraler Kraftstoffkomponenten für die Seeschifffahrt auf der Basis von biogenen Reststoffen. Motiviert durch die notwendigen Pro-

zesse zur Defossilisierung in der Schifffahrt und die derzeit ungewissen Entwicklungen auf dem Kraftstoffmarkt nach dem „Sulfur Cap“, ist es das Ziel des Vorhabens PyroMar, ein Verfahrenskonzept zur kostengünstigen Herstellung von Beimischkomponenten für Marinekraftstoffe aus biogenen Reststoffen aufzuzeigen. Dabei sollen insbesondere „defossilierte“ Drop-in-Fuels für den Betrieb von Hochseeschiffen in Emission Control Areas (ECAs) entstehen. Die Verwendung von Beimischkomponenten anstelle rein biogener Kraftstoffe ist dabei das Vorgehen der Wahl, da nur so das Mengengerüst für die betriebswirtschaftlich notwendige Nutzung der vorhandenen Tankinfrastruktur erzielt werden kann.

Kern des Vorhabens ist es, CO₂-neutrale Kraftstoffkomponenten aus biogenen Reststoffen wie Stroh, Laub, Waldrestholz, Strauchschnitt und Landschaftspflegeheu zu erzeugen. Abb. 2 zeigt das PyroMar-Verfahrenskonzept. Durch die Verwendung von Reststoffen wird die aus anderen Mobilitätsbereichen bekannte „Teller-Tank-Diskussion“ vermieden.

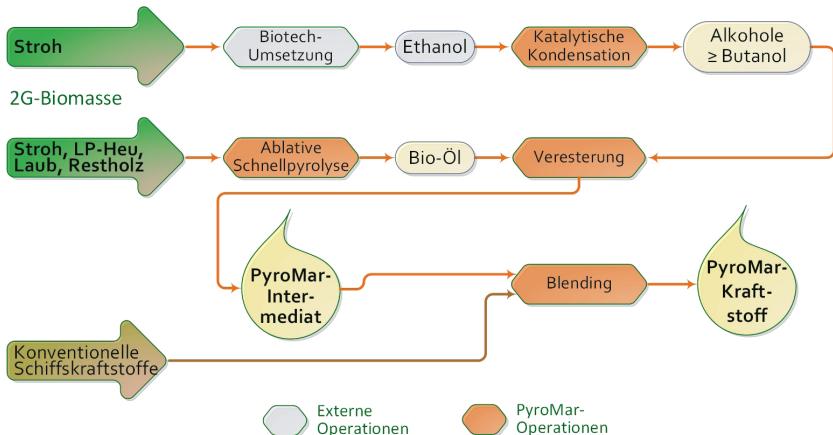


Abb. 2: Das PyroMar-Verfahrenskonzept – Blockfließbild (LP-Heu: Landschaftspflegeheu; Kondensation: chemische Reaktion unter Wasserabspaltung)

In einem ersten Schritt werden im PyroMar-Prozess Pyrolyseöle erzeugt, welche anschließend mit längerkettenigen Alkoholen verestert werden. Dadurch werden die Säurezahl und die Mischbarkeit mit fossilen Kraftstoffen deutlich verbessert. Im Projekt soll die Verfahrenskette erstmals als Ganzes in einem kleintechnischen Maßstab realisiert werden, der die Herstellung von Produktmustern in den für Motortests erforderlichen Mengen ermöglicht. Die katalytische Herstellung der längerkettenigen Alkohole aus strohstämmigem Ethanol wurde bei Fraunhofer UMSICHT entwickelt [14].

Allen erzeugten Bio-Kraftstoffkomponenten ist dabei gemein, dass sie als Beimischungen zu schwefelarmen fossilen Kraftstoffen angewendet werden sollen, sodass die erzeugte Mischung in einer späteren Nutzung an Bord allen gelten-

den Normen entspricht und direkt ohne weitere technische Adaptierungen verwendet werden kann. Um hierfür den Nachweis zu führen, sollen im Kraft- und Schmierstofflabor des LKV an der Universität Rostock umfangreiche Analysen und Langzeittests der Blends erfolgen. Die aussichtsreichsten Kandidaten werden dann an einem repräsentativen Einzylinder-Forschungsmotor hinsichtlich Wirkungsgrad und Emissionsverhalten vergleichend zu kommerziellen Marienkraftstoffen (LSFO) untersucht. Die Anwendung in einem Realversuch an Bord eines Schiffes unter Begleitung der Motorenforscher könnte das Ziel eines Folgevorhabens sein.

Projektbegleitend werden ökologische und ökonomische Nachhaltigkeitsbewertungen unter der Federführung des ifeu vorgenommen. Weiterhin werden Biomassepotenziale und Absatzmärkte analysiert, rechtliche Rahmenbedingungen untersucht und Ansätze für den Weg in eine privatwirtschaftliche Realisierung des PyroMar-Ansatzes erarbeitet.

Basierend auf Berechnungen des ifeu konnte das THG-Emissionseinsparpotenzial von PyroMar-Kraftstoffen für den Einsatzstoff Stroh überschlägig abgeschätzt werden. Nach Zeller et al. [15] beträgt das nachhaltig verfügbare Strohpotenzial in Deutschland 8 - 13 Mio. t_{FM}/a. Daraus ließen sich nach einer Abschätzung von Fraunhofer UMSICHT im typischen Fall jährlich rund 1,6 Mio. t PyroMar-Intermediate als Blendstock für Schiffs kraftstoffe herstellen (Bandbreite 1 - 2,3 Mio. t). Im Durchschnitt der Jahre 2016 und 2017 wurden in Deutschland rund 2,5 Mio. t Schweröl (HFO) in der Seeschifffahrt verbraucht [16]. Aufgrund des geringeren Heizwerts des PyroMar-Intermediates (31 MJ/kg) gegenüber Schweröl (41 MJ/kg) könnten im typischen Fall mit umgerechnet rund 1,2 Mio. t/a knapp 50 % des in Deutschland durch Seeschiffe verbrauchten HFO ersetzt werden (Bandbreite 30 - 70 %). Dadurch ließen sich im typischen Fall THG-Emissionen in Höhe von rund 9 Mio. t CO₂-Äq./a vermeiden (Bandbreite 5-13 Mio. t CO₂-Äq./a), was rund 1 % der gesamten deutschen THG-Emissionen des Jahres 2018 in Höhe von 869 Mio. t CO₂-Äq. (Bandbreite 0,5 - 1,5 %) bzw. rund 5 % der verkehrsbedingten THG-Emissionen in Deutschland entspräche.

Dieses allein für Stroh dargestellte Mengengerüst wäre mehr als ausreichend, um die im Projektantrag angedachten Blending-Anteile von 15-20 %V/V zu erreichen. Darüber hinaus sind – wie oben dargestellt – noch weitere Einsatzstoffe angedacht, allerdings wird insbesondere bei Stroh zukünftig eine Konkurrenz durch andere stoffliche und energetische Nutzungen erwartet, so dass nicht davon auszugehen ist, dass das gesamte nachhaltig verfügbare Strohpotenzial für PyroMar zur Verfügung steht. Nichtsdestotrotz zeigt die obige Berechnung, dass es sich um relevante Größenordnungen handelt.

Die Einbindung von Industrieunternehmen und Industrieverbänden in das Vorhaben PyroMar wird durch einen projektbegleitenden Ausschuss realisiert, in dem Vertreter verschiedener Mineralölverarbeiter, Additivhersteller und relevanter übergeordneter Organisationen aus dem Biokraftstoffbereich mitarbei-

ten. Im weiteren Projektverlauf ist ein Workshop mit kommerziellen/industriellen Entsorgern (für die Rohstoffbasis), Chemiefirmen/Raffinerien (für die Fertigung) und Reedereien/Hafenbetreibern (für die Anwendung) geplant um gemeinsam anwendungsnahe nachfolgende Schritte zu erarbeiten.

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wird mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages unter dem Förderkennzeichen 03EI5412A gefördert. Das Projektkonsortium bedankt sich beim Bundesministerium für Wirtschaft und Energie für die Förderung des Projektes.

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

Literatur/Quellen

- [1] Löschel, A.; Erdmann, G.; Staiß, F.; Ziesing, H.-J. (2019): Stellungnahme zum zweiten Fortschrittsbericht der Bundesregierung für das Berichtsjahr 2017, Expertenkommission zum Monitoring-Prozess „Energie der Zukunft“
- [2] BMU, Seeverkehr, <https://www.bmu.de/themen/luft-laerm-verkehr/verkehr/seeverkehr/>
- [3] Bundesregierung (2019): Projektionsbericht 2019 für Deutschland gemäß Verordnung (EU) Nr. 525/2013
- [4] Europäische MRV-Verordnung (2015/757 EU) <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:32015R0757&from=EN>
- [5] <http://www.imo.org/en/MediaCentre/HotTopics/GHG/Documents/2020%20sulphur%20limit%20FAQ%202019.pdf>
- [6] <https://www.hapag-lloyd.com/de/about-us/sustainability/imo-2020.html>
- [7] Wolfgang, M. (2019): Zukünftige Kraftstoffe – Energiewende des Transports als ein weltweites Klimaziels, ATZ/MTZ-Fachbuch
- [8] Backhaus, R. (2017): Alternative Kraftstoffe CO₂-neutral in die Zukunft, ATZ 117
- [9] Tyrovola, T.; Dodos, G. S.; Kalligeros, S.; Zannikos, F. (2017): The Introduction of Biofuels in Marine Sector, 15th International Conference on Environmental Science and Technology
- [10] Wojcieszek, M.; Kroyan, Y.; Larmi, M.; Kaario, O.; Zenger, K. (2019): Effect of alternative fuels on marine engine performance, SAE
- [11] Kalghatgi, G.; Levinsky, H.; Colket, M. (2018): Future transportation fuels, Progress in Energy and Combustion Science
- [12] Paulauskiene, T.; Anne, O.; Viederyte, R.; Abele, L. (2019): Alternative solutions for marine fuel's composition towards Marine Strategy Directive performance, ECO-BALTICA - Series: Earth and Environmental Science 390
- [13] Liu, M.; Li, C.; Koh, E. K.; Ang, Z.; Lam, J. S. L. (2019): Is methanol a future marine fuel for shipping?, MTEC/ICMASS – Series: Journal of Physics: Conf. Series, 1357
- [14] EP2582650B1; Kraft, Axel; Menne, Andreas; Katalytische Konversion von Alkoholen und Aldehyden, Anmeldedatum 05.05.2011, Anmelder: Fraunhofer-Gesellschaft

- [15] Zeller, Vanessa et al.: Basisinformationen für eine nachhaltige Nutzung landwirtschaftlicher Reststoffe zur Bioenergiebereitstellung. DBFZ 2011, <https://bit.ly/2GLJCKE>
- [16] Marinekommando Jahresbericht 2018, Fakten und Zahlen zur maritimen Abhängigkeit der Bundesrepublik Deutschland, 31. Auflage, S. 245 <https://deutscher-marinebund.de/wp-content/uploads/2018/11/Jahresbericht-Marinekommando-2018.pdf>

Kontakt

Dr. rer. nat. Ulrike Schümann, Wissenschaftliche Mitarbeiterin

Dr. rer. nat Fanny. Langschwager, Wissenschaftliche Mitarbeiterin

Karsten Schleef, Wissenschaftlicher Mitarbeiter

Lehrstuhl für Kolbenmaschinen und Verbrennungsmotoren

Fakultät für Maschinenbau und Schiffstechnik

Albert-Einstein Str. 2, D 18059 Rostock

①+49(0)381.498-9156 | ✉ ulrike.schuemann@uni-rostock.de

🌐 www.lkv.uni-rostock.de

Tim Schulzke, Dr.-Ing. Volker Heil, Martin Peters

Fraunhofer UMSICHT, Oberhausen

Nils Rettenmaier

IFEU Heidelberg GmbH, Heidelberg

Charakterisierung der Mischbarkeit von regenerativen Kraftstoffen

Zusammenfassung: Das Mischen unterschiedlicher regenerativer Kraftstoffe stellt bei großen Polarität-sunterschieden eine Herausforderung dar. Ein bekanntes Beispiel ist die Ent-mischung von hydriertem Pflanzenöl (HVO) und Polyoxydimethylether (OME). An dieser Stelle ist eine erfolgsversprechende Idee die Nutzung ternärer Gemische, bei denen der Zusatz von Rapsölmethylester (RME) als Lösungsvermittler genutzt wird. Im Detail werden ternäre Mischungen aus HVO, RME und OME auf ihre Mischbarkeit untersucht. Die Charakterisierung der Mischbarkeit erfolgt hier zum einen basierend auf der Hansen-Theorie und wird durch einen weiterentwickelten Algorithmus ergänzt. Die Mischbarkeit ist nach der Hansen-Theorie durch eine relative Energiedistanz RED kleiner als eins gegeben. Je weiter die RED sich an 0 annähert desto besser wird die Mischbarkeit der untersuchten Verbindungen. Mit dieser Theorie kann das nicht mischbare System aus HVO und OME beschrieben werden ($RED = 1$) und die Rolle einer RME Zugabe als Lösungsvermittler ausgewertet werden (RED wird bei steigender RME Zugabe stetig kleiner).

Darüber hinaus wird für die Untersuchung neuer, zum Teil leichtflüchtiger Kraftstoffe ein neues Alterungsverfahren angewendet, um das veränderte Mischungsverhalten durch die Kraftstoffalterung bestimmen zu können. Die durch die Hansen-Theorie erfassbaren Polaritätsunterschiede der ungealterten Kraftstoffe und der daraus resultierenden Polarität der gesamten Lösung kann das Entmischungsverhalten näher beschrieben werden. Die gezeigten Ergebnisse stellen den ersten Schritt dar, um sicherzustellen, dass bei einer Quotenerhöhung und steigender Vielfalt an regenerativen Kraftstoffen, eine stabile Kraftstoffformulierung eingesetzt werden kann.

Abstract: The mixing of regenerative fuels can be challenging in the case of high polarity differences. A well-known example is the separation of hydrogenated vegetable oil (HVO) and polyoxymethylidemethyl ether (OME). At this point, a promising idea is the use of ternary mixtures, in which the addition of rapeseed oil methyl ester (RME) is used as a solubilizer. Ternary mixtures of HVO, RME and OME are examined in detail for their miscibility. The miscibility is characterized here based on the Hansen theory and is supplemented by a further developed algorithm. According to the Hansen theory, the miscibility is given by a relative energy distance RED of less than one. The closer the RED approaches 0 the better the miscibility of the investigated compounds. With this theory, the immiscible system of HVO and OME could be described ($RED = 1$) and the role of an RME addition as a solubilizer could be evaluated (RED increases steadily with increasing RME addition).

In addition, a new aging process is used for the investigation of new, partially volatile fuels in order to determine the changed mixing behaviour due to fuel aging. The segregation behaviour can be described in more detail by the differences in polarity of the unaged fuels and the resulting polarity of the entire solution. The results shown

represent the first step in ensuring that a stable fuel formulation can be used in the event of a quota increase and an increasing variety of renewable fuels.

1 Einleitung

Die Nutzung regenerativ erzeugter Kraftstoffe ist ein Kernaspekt nachhaltiger Mobilitätsentwicklung [1, 2, 3, 4, 5]. Um aber den Energiebedarf der individuellen Mobilität decken zu können, werden nach aktuellem Stand der Technik verschiedene Alternativkraftstoffe gleichzeitig im Markt genutzt werden müssen. Aus dieser gleichzeitigen Nutzung unterschiedlicher Kraftstoffarten entsteht das technische Problem, dass es bei ungünstigen Kraftstoffkombinationen zu ungewollten Entmischungs- und Alterungsprozessen im Tank kommen kann.

In dieser Publikation wird die Mischbarkeit unterschiedlicher Kraftstoffe (HVO, RME und OME) [6, 7] durch die Anwendung von Lösungsparametern untersucht. Der sogenannten Hansen Parameter beschreibt die Mischbarkeit von Verbindungen durch die unterschiedlich stark auftretenden Wechselwirkungen der Moleküle. Dies ermöglicht neben der Beurteilung der Mischbarkeit auch eine Vorhersagemöglichkeit und stellt ein Werkzeug dar, um eine phasenstabile Kraftstoffmischung sicherzustellen. Erweitert werden die Möglichkeiten durch die Betrachtung der Kraftstoffalterung im Gemisch. Durch die Untersuchung der chemischen Veränderung während der Kraftstoffalterung und der daraus resultierenden Änderung der auftretenden Wechselwirkungen der Moleküle untereinander können Grenzen definiert werden, die die Kraftstoffe für ein phasenstabiles Alterungsverhalten einhalten müssen.

2 Theorie der Hansenparameter

Die Theorie der Hansenparameter besagt, dass verschiedene Flüssigkeiten nur dann ohne Phasentrennung in Mischung gehen, wenn sich die Reinstoffe in spezifischen Eigenschaften nicht signifikant voneinander unterscheiden. Die in der Hansen Theorie als relevant betrachteten Eigenschaften sind Wasserstoffbrückenbindung, Dipol-Dipol-Wechselwirkungen und London Wechselwirkungen der einzelnen Stoffe, die im Folgenden einzeln beschrieben werden.

- Wasserstoffbrückenbindungen:

Anziehende Wechselwirkung eines kovalent gebundenen Wasserstoffs mit einem freien Elektronenpaar. Das Wasserstoffatom muss dafür polar gebunden sein.

- Dipol-Dipol-Wechselwirkung:

Kräfte zwischen Molekülen mit permanentem elektrischem Dipolmoment. Die Stärke der Wechselwirkung liegt über den London-Wechselwirkungen.

- London-Wechselwirkung:

Schwache Anziehungskräfte zwischen unpolaren und polaren Molekülen, die durch die Ausbildung von spontanen und induzierten Dipolen entstehen.

Die Theorie der Hansenparameter beruht auf der Betrachtung der kohäsiven Energiedichte (δ) (Gl. 1). Mit der idealen Gaskonstante (R), dem molaren Volumen (V_m), der Temperatur (T) und der Verdampfungsenthalpie (ΔH_v) beschreibt die kohäsive Energiedichte die nötige Energie, um ein bestimmtes Volumen an Molekülen von dessen benachbarten Molekülen zu unendlicher Trennung zu bewegen.[8][9]

$$\delta = \sqrt{\frac{\Delta H_v - RT}{V_m}} \quad (1)$$

Die Hansenparameter unterteilen, entsprechend der drei beschriebenen intermolekularen Wechselwirkungen, die kohäsive Energiedichte in die Anteile der drei Parameter Londonwechselwirkungen (δD), polaren Wechselwirkungen (δP) und Wasserstoffbrückenbindungen (δH) (Gl. 2).

$$\delta = \delta D + \delta P + \delta H \quad (2)$$

Das Maß, in dem sich zwei zu mischenden Flüssigkeiten ohne Entmischung unterscheiden können bzw. wenn sich ein Feststoff vollständig im Lösungsmittel löst, wird durch den relativen Entmischungsradius nach Formel (3) und (4) beschrieben.

$$R_a^2 = 4 (\delta D_1 - \delta D_2)^2 + (\delta P_1 - \delta P_2)^2 + (\delta H_1 - \delta H_2)^2 \quad (3)$$

$$RED = R_a / R_0 \quad (4)$$

In Formel (3) sind die Londonwechselwirkungskräfte δD , Dipolwechselwirkungen δP und Wasserstoffbrückenbindungen δH von Flüssigkeit 1 und 2 eingetragen. Es ist zu erkennen, dass die entsprechenden Parameter der beiden Flüssigkeiten subtrahiert, die einzelnen Differenzen quadriert und die Quadrate der einzelnen Differenzen aufsummiert werden. Geometrisch bedeutet dies, dass in einem 3-dimensionalen Koordinatensystem der Abstand zwischen Punkten im Raum bestimmt wird und somit R_a als Radius einer Kugel interpretiert werden kann. Dieser Radius beschreibt die Summe aller Parameterunterschiede und repräsentiert damit die Kräfte, die zu einer Entmischung führen können. Der Faktor 4 an den Londonwechselwirkungskräfte in Formel (3) ist empirisch bestimmt und beschreibt den überproportional hohen Anteil dieser Kräfte an Mischungsprozessen.

Zum Schluss der Berechnungen wird der Wert R_a mit einem empirisch bestimmten Parameter R_0 abgeglichen (Gl. 4), der beschreibt, bis wann eine Mischung vorliegen kann. Das resultierende Verhältnis von R_a und R_0 wird als relative

Energiedistanz (RED) bezeichnet, wobei die Grenze zwischen Mischung und Entmischung bei $RED = 1$ definiert ist.[8][9]

- | | |
|----------|-----------------------|
| RED < 1: | vollständige Mischung |
| RED = 1: | teilweise Mischung |
| RED > 1: | keine Mischung |

3 Numerische Entmischungsuntersuchungen

Auf Basis der erzeugten Hansenparameter können im Folgenden die Entmischungsstabilitäten unterschiedlicher ternärer Gemische aus HVO, OME und RME berechnet werden. Hierbei sei darauf hingewiesen, dass in den Auswertungen zunächst die Mischungen von HVO und OME und anschließend die Zumischung von RME berechnet wird, da die Ergebnisse dieser Rechenweise die besten Übereinstimmungen mit experimentellen Ergebnissen liefert.

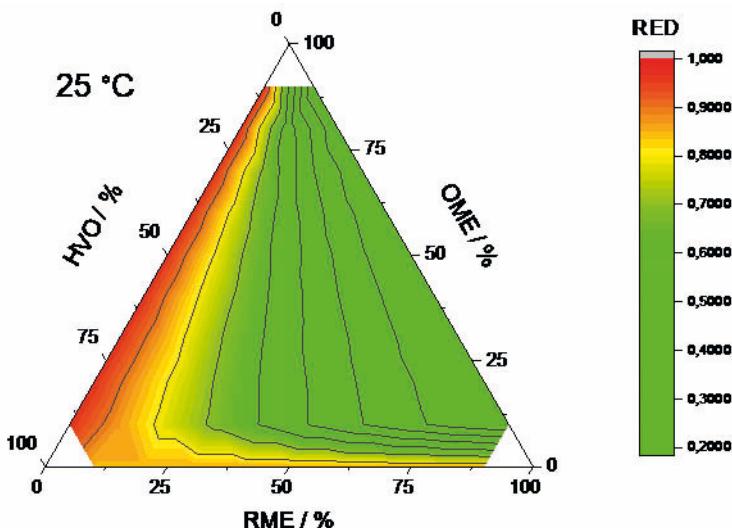


Abb. 1: Relative Energiedistanz (RED) für Mischungen aus ungealterten RME, OME und HVO 25 °C.

In Abb. 1 sind die Ergebnisse der Hansenberechnungen von OME, HVO und RME Gemischen bei 25 °C in so genannten Simplexdiagrammen dargestellt. Bei diesen Simplexdiagrammen entspricht jede Seite des Dreiecks einer Achse, die die jeweilige Beimischung der Komponenten von 0 bis 100 vol% darstellt. An den Ecken des Dreiecks sind damit die jeweiligen Reinkraftstoffe, die im Rahmen dieser Simulationen nicht berücksichtigt sind und daher auch nicht farblich hinterlegt sind. Die Zusammensetzung eines Punktes im Simplex erfolgt über eine gedachte Weiterführung der angestellten Achsenmarkierungen. Auf diesen gedachten Linien liegen alle Punkte mit dem gleichen Anteil der Komponente

der jeweiligen Achse. In der Mitte des Dreiecks ist die Mischung mit jeweils 33,3 vol% der drei Komponenten dargestellt und am linken Rand des Dreiecks die Mischungen mit geringen RME Anteilen. Die Farbskale, die rechts in Abb. 1 gezeigt ist, skaliert von Rot bei $\text{RED} \sim 1$, was einer Entmischung entspricht, zu grün mit $\text{RED} < 0,75$, bei denen keine Entmischungstendenz mehr gegeben ist.

Die berechneten Ergebnisse in Abb. 1 zeigen anhand der rot dargestellten Bereiche am linken Rand des Diagramms, dass bei keiner bzw. niedrigen RME Beimischungen eine hohe Gefahr von Phasentrennungen besteht. Darüber hinaus ist in Abb. 1 zu erkennen, dass erhöhte RME Beimischungen zu einer Reduzierung des RED Wertes und damit zu einer Verbesserung des Mischungsstabilität führen. Das bedeutet, dass RME in Gemischen aus OME, HVO und RME als Lösungsvermittler fungiert. Die beschriebene Theorie basierend auf den Hansenparameter bietet eine theoretische Grundlage zur Beschreibung des Lösungsvermittlereffekts, wohingegen das Experiment lediglich eine Mischung oder Entmischung beschreiben kann. Diese Auswertung stellt eine Voranalyse der Mischbarkeit neuer Kraftstoffe basierend auf der Bestimmung der Hansenparameter (Tab. 1) der zu untersuchenden Kraftstoffe dar. Zur genauen Beschreibung der Mischbarkeit ist die Einbeziehung von experimentellen Stichproben zur Validierung der Berechnung und Optimierung auf das zu untersuchende ternäre Gemisch notwendig, bietet dann jedoch eine Vorhersage aller möglicher Zusammensetzung der ternären Mischungen. Unter bestimmten Umständen ist es jedoch noch nicht ausreichend nur die Mischbarkeit im ungealterten Zustand zu beschreiben.[10]

Tab. 1: Hansenparameter der ungealterten.

Probe	Temperatur	δD	δP	δH	R_0
HVO unadd	25 °C	16,8	0	0	11,5
RME unadd	25°C	15	7,5	7	6,2
OME unadd	25 °C	16,2	9,3	7	12,2

4 Alterung ternärer Kraftstoffmischungen

Bei zukünftig steigenden Anteilen an Plug-in Hybrid Fahrzeugen (PHEV) kommt der Alterungsstabilität von Kraftstoffen eine größere Bedeutung zu. Je nach Fahrverhalten kann mit PHEV rein elektrisch gefahren werden, wodurch der Kraftstoff im Tank deutlich längere Verweilzeiten aufweist. Für zukünftige regenerative Kraftstoffmischungen kommt erschwerend hinzu, dass die Polaritätsdifferenzen der einzelnen Komponenten und die über die Alterungsdauer zunehmende Polarität durch Oxidation eine Untersuchung der Mischbarkeit erforderlich macht. Aus diesem Grund werden hier Alterungsuntersuchungen der ternären Gemische von unadditiviertem RME, HVO und OME durchgeführt. Die Additivierung wird an dieser Stelle bewusst weggelassen, um Quer-

einflüsse verschiedener Additivpakete und selektive Auswirkungen auf nur eine Mischungskomponente ausschließen zu können.

Im Rahmen dieser Untersuchungen wird eine, an der Hochschule Coburg entwickelte Alterungsapparatur verwendet, die eine gleichzeitige Alterung großer Mengen leicht flüchtiger Kraftstoffe ermöglicht. Diese Alterungsapparatur ist in Abb. 2 schematisch dargestellt und gliedert sich in drei Teile. Im ersten Teil der Apparatur (Abb. 2 links) befindet sich eine Luftzufuhr mit definierter Volumenstromregelung. Diese Regelung ist auf konstant 10 L/h Luftzufuhr eingestellt, um Quereinflüsse durch variierende Luftvolumenströme ausschließen zu können. Teil 2 der Alterungsapparatur (Abb. 2 mittig) beinhaltet eine Luftentfeuchtung, die aus einem Wasserabscheider, einem Molekularsieb und einem Kaliumhydroxidfilter besteht. Diese Luftentfeuchtung ist notwendig, um den Eintrag und damit den Einfluss der zugeführten Luftfeuchtigkeit definiert einstellen zu können. In diesem Aufbau kann die relative Luftfeuchtigkeit (r.H.) der durchströmenden Luft bei 25 °C Eintrittstemperatur von 50 auf 15 % absenkt werden.

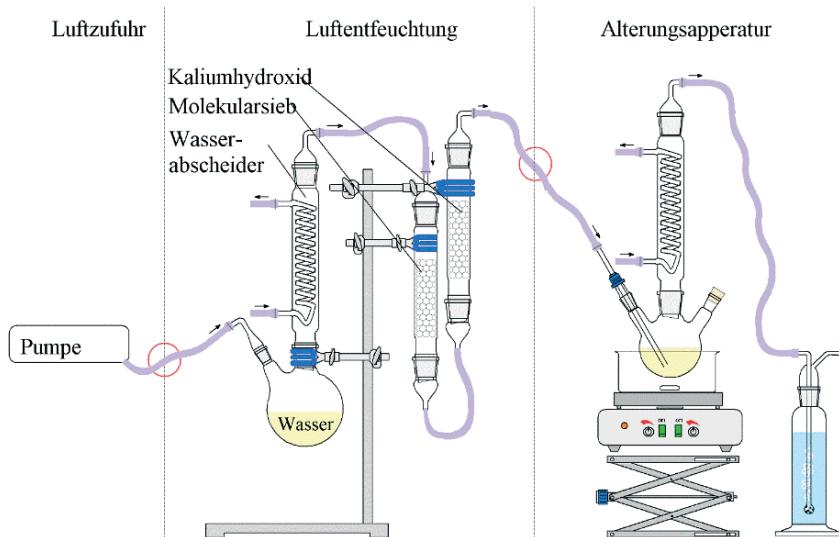


Abb. 2: Skizze der Alterungsapparatur mit Luftentfeuchtung.

Im dritten Abschnitt des Alterungsaufbaus, der in Abb. 2 rechts dargestellt ist, befindet sich die eigentliche Alterungsapparatur, die an das Rancimat Alterungsverfahren angelehnt ist. In diesem Aufbau werden Kraftstoffproben erhitzt und gleichzeitig mit dem entfeuchteten Luftvolumenstrom durchmischt. Die Kraftstoffprobe wird an dieser Stelle für eine definierte Dauer von 120 Stunden, erhöhten Temperaturen von 110 °C und Luftdurchströmung von 10 L/h ausgesetzt, um die Probe künstlich zu altern. Um zu verhindern, dass leichtflüchtige Komponenten aus dem System ausdampfen, ist der Auslass der Alterungs-

apparatur mit einem Rückflusskühler versehen. Falls leichtflüchtige Kraftstoffkomponenten ausdampfen, werden diese an dem Rückflusskühler kondensiert und tropfen wieder zurück in die Probe. Die beschriebene Apparatur ermöglicht damit eine kontrollierte Probenalterung unter definierten Randbedingungen von Dauer, Temperatur, Luftfeuchtigkeit auch von leichtflüchtigen Verbindungen und ist somit die Grundlage der folgenden Experimente. Die Nutzung der gezeigten Alterungsapparatur ist notwendig, da in den Standardmethoden wie z.B. dem Rancimat-Verfahren nur deutlich kleinere Probenvolumina und keine leichtflüchtigen Verbindungen gealtert werden können. Im Rahmen der hier vorstellten Untersuchungen werden in dem gezeigten Aufbau Proben mit 220 mL gealtert.

In Abb. 3 sind die neun untersuchten Kraftstoffzusammensetzungen im Simplexdiagramm und in Tabellenform dargestellt. Drei Proben enthalten 7 vol% RME und spiegeln aktuell marktrelevante Kraftstoffmischungen wieder. Da die Untersuchungen mit den Hansenparametern eine verbesserte Mischungsstabilität mit erhöhter RME Beimischung zeigen, weiterhin erhöhte RME Beimischungen von bis zu 50 vol% berücksichtigt. Diese Untersuchungen sollen zeigen, ob den positiven Effekten der verbesserten Mischungsstabilität negative Alterungseffekte bei erhöhter RME Beimischung entgegenstehen.

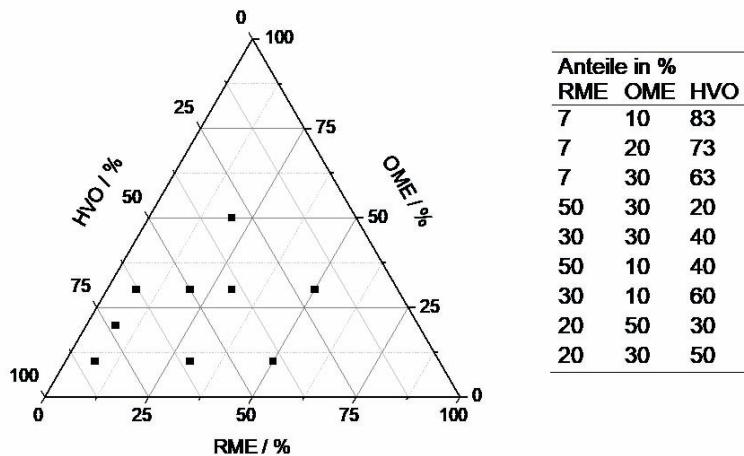


Abb. 3: Zusammensetzung der gealterten Kraftstoffmischungen.

Die Ergebnisse zeigen, dass durch die Oxidation während der Alterung die Mischbarkeit der Kraftstoffmischungen neu beurteilt werden muss. So treten mit einer Ausnahme bei allen gealterten Proben bei 110 °C und einer Alterungsdauer von 120 h Phasentrennungen auf. Bei ausreichend hoher Polarität der ungealterten Kraftstoffmischung, wie es bei der Probe mit 50 % RME, 30 % OME und 20 % HVO der Fall ist, kann keine Phasentrennung beobachtet werden.

Dies gilt für den Fall, dass während der Alterung der Wassereintrag in dem Kraftstoff geringgehalten wird (Abb. 4).

Die neue Alterungsapparatur ist ein System, das Wasser in erheblichem Maß in die gealterten Proben eintragen kann. Um den Einfluss des Wassers auf die Alterung zu untersuchen, wird für jede Probe eine weitere Alterung durchgeführt, bei der die Luft vorgetrocknet wird. Der höhere Wassergehalt in den Proben führt bei hoher Polarität (bei Proben mit 30 % OME Beimischung) zu einem deutlichen Eintrag von Wasser über die Alterungsdauer. Der Grad der Alterung, abgeleitet von der Carbonylschwingung im Infrarotspektrum, wird nur leicht beeinflusst. Bei allen Proben kommt es in der unteren Phase zu einer Anreicherung der Alterungsprodukte, wohingegen die obere Phase sich nur gering von den ungealterten Proben im IR-Spektrum unterscheidet. Dieser geringe Unterschied ist durch zwei Vorgänge zu erklären. Der polare ungealterte OME Anteil reichert sich bei einer Phasentrennung in der unteren Phase an, wodurch die Polarität der oberen Phase sinkt. Oxidationsprodukte mit nur geringer Polarität gehen zum Teil in die obere Phase über, wodurch sich deren Polarität wiederum erhöht. Unter humiden Bedingungen wird folglich während der Alterung Wasser in der unteren Phase angereichert.

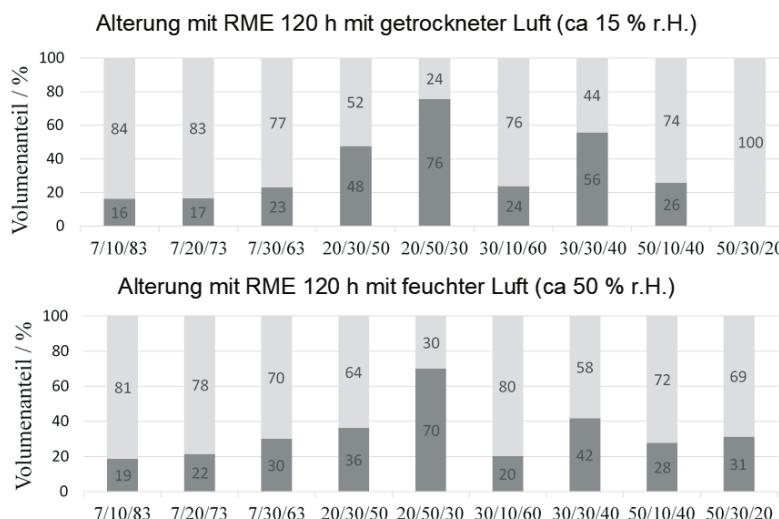


Abb. 4: Volumenanteile der jeweiligen Phasen der RME bzw. C18:0/OME/HVO Proben nach 120 h Alterung. Die schraffierten Proben liegen als Feststoff vor.

Für die Charakterisierung des Alterungszustandes der Proben müssen wegen der auftretenden Phasentrennung, diese berücksichtigt werden. Dafür werden die FTIR-Spektren im Wellenzahlbereich der Carbonylbande von 1580 bis 1880 cm^{-1} integriert. Der integrierte Bereich der FTIR-Messungen wird mit dem

jeweiligen Volumenanteil der gemessenen Phase multipliziert und der Wert der ungealterten Probe subtrahiert (Gl. 5 und 6). Auf diese Weise wird die Alterung der oberen und unteren Phase bestimmt (Abb.5).

$$\text{Alterungindex obere Phase} = (\text{FTIR obere Phase} - \text{FTIR}_{\text{OH}}) \cdot \varphi_{\text{obere Phase}} \quad (5)$$

$$\text{Alterungindex untere Phase} = (\text{FTIR untere Phase} - \text{FTIR}_{\text{OH}}) \cdot \varphi_{\text{untere Phase}} \quad (6)$$

Diese Auswertung ermöglicht einen Vergleich der einzelnen Proben (Abb. 5), auch wenn diese unterschiedliche Volumenanteile der oberen und unteren Phase aufweisen. Der Wert der Alterung ist hier als relativer Parameter zu sehen, der es erlaubt die hier untersuchten Proben untereinander zu vergleichen.

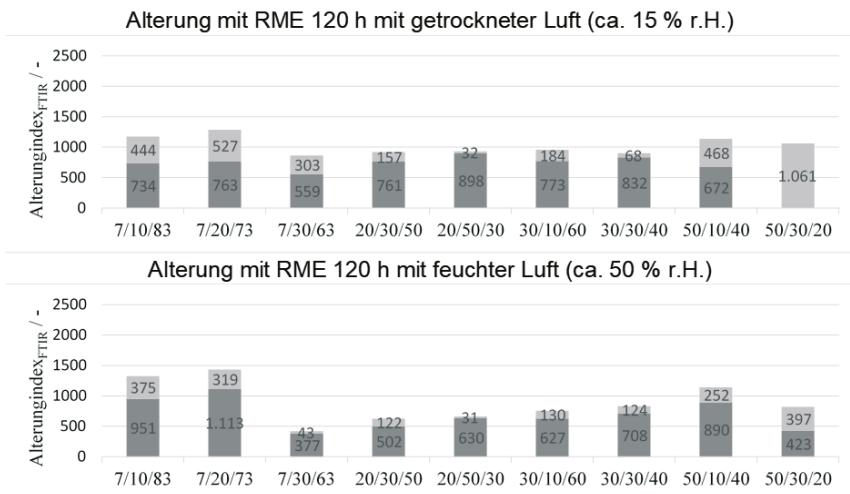


Abb. 5: Auswertung der Alterung mithilfe der FTIR-Spektren, die entsprechend Gl. 9 und 10 im Wellenzahlbereich der Carbonylbande von 1580 bis 1880 cm⁻¹ integriert und mit dem jeweiligen Volumenanteil der Phase multipliziert wird.

Bei den Proben mit 7 % RME Anteil bewirkt eine Erhöhung des OME Anteils eine Abnahme der Alterung. Mischungen mit höherem RME Anteil (7 % bis 30 %) und gleichzeitigem hohen OME Anteil zeigen in diesen Untersuchungen die geringsten Alterungsveränderungen gemessen an der Carbonylschwingung im FTIR Spektrum. Wird jedoch neben einer geringen Alterung der Kraftstoffe zusätzlich das Kriterium der Mischungsstabilität berücksichtigt zeigen erst Zusammensetzungen mit 50 % RME und 30 % OME bei geringer r.H. keine Entmischungsscheinungen. In diesem Fall ist die Kraftstoffmatrix durch den hohen Anteil polarer Kraftstoffe wie RME und OME entsprechend polar um Alterungsprodukte in Lösung zu halten. Die höhere Mischbarkeit spiegeln auch die Hansenparameter Untersuchungen wieder, die bei höherem RME Anteil mit zusätzlich hoher OME

Beimischung die niedrigsten RED Werte aufweisen und somit eine gute Mischbarkeit zeigen.

5 Zusammenfassung

Das Mischungsverhalten neuer regenerativer Kraftstoffe ist ein wichtiger Aspekt für die grüne Mobilität von morgen. Aus diesem Grund wurde an einer Methode geforscht, die eine Abschätzung der Mischbarkeit ermöglicht. Durch die Hansenparameter können Kraftstoffe entsprechend ihrer intermolekularen Wechselwirkungen eingeordnet werden. Basierend auf den ermittelten Hansenparametern konnte mittels eines Algorithmus die Mischbarkeit von RME, OME und HVO erfasst und interpretiert werden. So hat RME in diesem ternären Gemisch eine Lösungsvermittlerrolle inne. Durch Zugabe von RME zu Mischungen aus OME und HVO wird eine Entmischung unterbunden. Durch eine spezielle Alterungsapparatur, die das Altern von leichtflüchtigen Komponenten ermöglicht, konnte zudem überprüft werden, ob im gealterten Zustand eine entmischungstabile Kraftstoffformulierung vorliegt. Die Ergebnisse konnten zeigen, dass bei einer Zusammensetzung von 50 % RME, 30 % OME und 20 % HVO selbst nach starker Alterung keine Entmischung auftritt. Zudem beeinflusst die Zusammensetzung der untersuchten Proben das Alterungsverhalten, wodurch gezielt Kraftstoffformulierungen mit günstigen Eigenschaften ausgewählt werden können.

Danksagung

Wir bedanken uns bei der Union zur Förderung von Oel- und Proteinpflanzen e.V. für das Ermöglichen dieser Untersuchungen im Rahmen des Forschungsprojekts „Biodiesel als integraler Bestandteil zukunftsweisender Kraftstoffe“.

Literatur/Quellen

- [1] Bhardwaj, O. P.; Kolbeck, A. F.; Kkoerfer T.; Honkanen, M. (2013): Potential of Hydrogenated Vegetable Oil (HVO) in Future High Efficiency Combustion System SAE International Journal of Fuels and Lubricants, Vol. 6, No. 1, pp. 157-169.
- [2] Pflaum, H.; Hofmann, P.; Geringer, B.; Weissel, W. (2010): "Potential of Hydrogenated Vegetable Oil (HVO) in a Modern Diesel Engine," SAE Technical Paper 2010-32-0081.
- [3] Härtl, M.; Gaukel, K.; Pélerin, D.; Wachtmeister, G. (2017): Oxymethylenether als potenziell CO₂-neutraler Kraftstoff für saubere Dieselmotoren; MTZ 78, 2, 52–58.
- [4] Lumpp, B.; Rothe, D.; Pastötter, C.; Lämmermann, R.; Jacob, E. (2011): Oxymethylenether als Dieselkraftstoffzusätze der Zukunft; MTZ 72, 198–202.
- [5] Garbe, T.; Höning, M.; Kaszas, W.; Klose, J.; Bröker, H.; Pott, E. (2018): Influence of Power to Liquid Fuels on the Emissions of modern Passenger Cars. 10th Int. AVL Exhaust Gas and Particulate Emissions Forum.
- [6] Pham, J. E. M.; Zhao, D.; Deng, Y.; Le, D.; Zuo, W.; Zhu, H.; Liu, T.; Peng, Q.; Zhang, Z. (2017): Effect of different technologies on combustion and emissions of the diesel engine fuelled with biodiesel: A review; Renew Sust Energy Rev. 620–647.

- [7] Othman, M. F.; Adam, A.; Najafi, G.; Mamat, R. (2017): Green fuel as alternative fuel for diesel engine: A review; Renew Sust Energy Rev. 694–709.
- [8] Hansen, C. M. (1969): The universality of the solubility parameter; Ind. Eng. Chem. Prod. Res. 8, 1, 2-11.
- [9] Nielsen, T. B.; Hansen, C. M. (2005): Elastomer swelling and Hansen solubility parameters; Polymer Testing, 24, 1054–1061.
- [10] Uglert, M.; Proschke, S.; Kröner, G.; Schröder, O.; Jakob, M. (2019): Biodiesel als integraler Bestandteil zukunftsweisender Dieselkraftstoffe, Abschlussbericht, UFOP-Projekt 540/183.

Kontakt

Martin Uglert, Wissenschaftlicher Mitarbeiter

Technologietransferzentrum Automotive der Hochschule Coburg

Friedrich-Streib-Str. 2, 96450 Coburg

✉ martin.uglert@hs-coburg.de | Ⓛ www.tac-coburg.de

*Franziska Müller-Langer, Niels Dögnitz, Christian Marquardt,
Dietmar Posselt, Tobias Schripp, Stefan Majer, Nils Bullerdiek,
Alexander Zschocke, Ann-Marlen Halling, Joachim Buse*

Einsatz von Multiblend JET A-1 in der Praxis Einblicke und Ergebnisse aus dem Projekt DEMO-SPK

Zusammenfassung: Heute sind bereits unterschiedliche Herstellungsverfahren für erneuerbare Flugkraftstoffe zugelassen. Mittelfristig ist zu erwarten, dass Flughäfen in Deutschland mit Kerosin beliefert werden, das solche Kraftstoffe unterschiedlicher Art in variablen Anteilen enthält. Vorrangiges Ziel des Projekts war es daher, das Verhalten von Gemischen aus mehreren erneuerbaren Kerosinen unter realistischen Bedingungen in der Versorgungsinfrastruktur eines Großflughafens zu untersuchen. Hierzu galt es, bislang international erstmals den Einsatz von Multiblend JET A-1 in der allgemeinen Kraftstoffversorgungsinfrastruktur erfolgreich zu demonstrieren. Neben Analysen zu den Kerosineigenschaften erfolgten Emissionsmessungen, Lebenszyklusanalysen, praktikable Nachhaltigkeitsdokumentationen sowie Untersuchungen zur Nachweisführung und Anrechnung der erneuerbaren Kraftstoffe im europäischen Emissionshandel.

Es konnte gezeigt werden, dass die Bereitstellungskette von Multiblend JET A-1 technisch machbar und der Einsatz ohne Abweichung vom Normalbetrieb möglich ist. Verifiziert wurde auch, dass durch den Einsatz von Multiblend JET A-1 die Partikelemissionen im Bodenlauf um rund 30 bis 60 Prozent sowie CO₂-Äquivalente-emissionen um rund 35 Prozent gegenüber reinem fossilen JET A-1 reduziert werden können.

Abstract: Today, various sustainable aviation fuel-manufacturing processes have already been approved. In the medium term, airports are expected to be supplied with jet fuel containing varying proportions of different types of these fuels. The primary objective of the project was to investigate and verify the behavior of mixtures of several renewable jet fuels under realistic conditions, within the supply infrastructure of a major airport. The aim was to demonstrate the deployment of the multiblend JET A-1 in the general fuel supply infrastructure. In addition to analyzing the properties of the jet fuel, the project measured emissions, conducted life cycle analyses, analyzed the sustainability documentation and studied verification and credit allowances for the renewable fuels as part of European emissions trading.

The model project has been the first of its kind to succeed in supplying nearly 600 tons of multiblend JET A-1 and utilizing this in flight operations. Also it has been proofed a reducing of particle emissions in ground runs by approx. 30 to 60% and CO₂ equivalent emissions by approx. 35% through the use of multiblend JET A-1 in aircraft instead of pure fossil-based JET A 1 fuel.

1 Einführung

Das Forschungs- und Demonstrationsvorhaben zum Einsatz von erneuerbarem Kerosin am Flughafen Leipzig/Halle (kurz DEMO-SPK) (BMVI 2019) wurde als Modellvorhaben der Mobilitäts- und Kraftstoffstrategie (MKS) (IFOK GmbH 2013) initiiert und durch das Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI) finanziert.

1.1 Motivation

In der MKS ist für die deutsche Luftfahrt die Notwendigkeit der Emissionsminderung und -vermeidung festgeschrieben. Neben technisch-operativen Maßnahmen zur Emissionsminderung liegt ein Fokus auf der Substitution des konventionellen fossilen Flugkraftstoffs durch erneuerbare Flugkraftstoffe (sog. synthetisches Kerosin, SPK). Hierfür kommen anstelle der herkömmlichen Erdölaufladbereitung und -verarbeitung neuartige Herstellungsverfahren zur Anwendung, die in einer internationalen ASTM-Norm spezifiziert sind. Da sich abhängig vom Verfahren die SPK-Zusammensetzung von der konventionellen fossilen Kerosins unterscheiden kann, erfolgt das Inverkehrbringen unter Auflagen. So dürfen SPKs beispielsweise bisher nicht in Reinform in den Verkehr gebracht werden, sondern müssen zuvor jeweils mit erdölbasiertem Kerosin JET A-1 gemischt werden (sog. „Blending“).

Da innerhalb der Versorgungsinfrastruktur eines Flughafens einzelne Kerosinchargen unterschiedlicher Herkunft üblicherweise gemeinschaftlich transportiert und gelagert werden, erfolgt keine physische Trennung der eingelieferten Chargen, wodurch es zwangsläufig zur Vermischung kommt. Da nur spezifikationskonformes JET A-1 eingesetzt werden darf, ist dies formal zulässig. Allerdings wurde das Mischungsverhalten und die Verträglichkeit von JET-A-1-Blends, die verschiedenartige SPK in variablen Anteilen enthalten („Multiblending“), bislang weder in Deutschland noch international untersucht.

1.2 Ablauf

Vorrangiges Ziel war es, das Verhalten von Gemischen aus mehreren erneuerbaren Kerosinen unter realistischen Bedingungen in der Versorgungsinfrastruktur eines Großflughafens zu untersuchen und zu verifizieren. Hierzu galt es, bislang international erstmals den Einsatz von Multiblend JET A-1 in der allgemeinen Kraftstoffversorgungsinfrastruktur von der Beschaffung bis zur Betankung im Flugzeug erfolgreich zu demonstrieren. Neben Analysen zu den Kerosineigenschaften erfolgten entsprechend der Übersicht in Abb. 1 zudem Emissionsmessungen, Lebenszyklusanalysen, praktikable Nachhaltigkeitsdokumentationen sowie Untersuchungen zur Nachweisführung und Anrechnung der erneuerbaren Kraftstoffe im Europäischen Emissionshandel. Weiterhin galt es, rechtliche Fragestellungen zu klären und organisatorische Rahmenbedingungen zu schaffen.

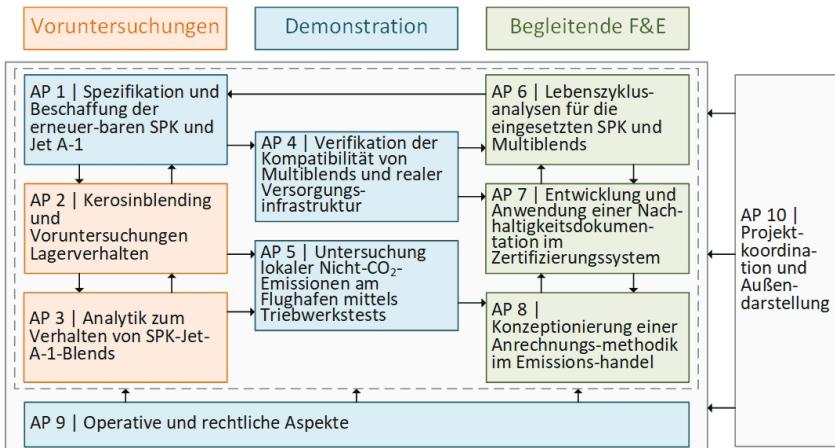


Abb. 1: Struktur des Forschungs- und Demonstrationsvorhabens DEMO-SPK

2 Voruntersuchungen und Demonstration

2.1 Produktion von Multiblend JET A-1

Unter einem Multiblend JET A-1 ist eine Mischung („Blend“) von konventionellem fossilem JET A-1 gemäß ASTM D1655 und mindestens zwei weiteren („multi“) erneuerbaren Kerosinen gemäß ASTM D7566 zu verstehen.

Im DEMO-SPK-Vorhaben wurden für die Wahl der erneuerbaren Kerosine und deren Lieferanten zwei wesentliche Kriterien berücksichtigt: (i) die aktuell gültige Fassung der ASTM-Zulassung sowie (ii) Verfügbarkeit auf dem internationalen Markt zum Zeitpunkt der Voruntersuchungen und der geplanten Demonstration am Flughafen Leipzig/Halle (LEJ). Für die Demonstration konnten schließlich als erneuerbare Kerosine HEFA-SPK und ATJ-SPK verwendet werden, die jeweils nur in den USA verfügbar waren.

Eine große Herausforderung bestand darin, dass die geltenden Spezifikationen zu Gemischen mit synthetischem Kerosin auf den Fall der Erzeugung binärer Gemische abzielen. Die Erzeugung von Multiblends mehrerer synthetischer Kerosine mit fossilem Kerosin wird nicht explizit geregelt. In den Regelungen wird nur berücksichtigt, dass nach der Herstellung eines binären Gemisches mit der Möglichkeit gerechnet werden muss, dass anschließend eine zweite Vermischung erfolgt. Dieser Fall ist explizit zugelassen. (ASTM D7566-19, Abschnitt 1.2.1) In diesem Falle erfolgt die Mischung mit den verschiedenen alternativen Kerosinen aber sukzessive; eine simultane Mischung mit mehreren alternativen Kerosinen wird hingegen nicht geregelt.

Um sich definitiv im Rahmen der geltenden Vorschriften zu bewegen, wurden bei der Erstellung des Multiblend-JET-A-1 für den Flughafen LEJ die synthe-

tischen Kerosine nacheinander dem fossilen Kerosin beige mischt und nach jedem Mischvorgang eine Probe genommen. Der hiermit verbundene höhere Aufwand wurde in Kauf genommen, um die Einhaltung der Spezifikation auch formal sicherzustellen.

2.2 Kraftstoffeigenschaften

Zunächst wurden die chemisch-physikalischen Parameter der reinen Mischungskomponenten bestimmt, die Mischungsverhältnisse für spezifikationsgerechte binäre Mischungen mit maximalen synthetischen Anteilen berechnet und diese hergestellt. Auf Basis der binären Mischungen erfolgte die Konzipierung der Multiblends. Nach Herstellung der Multiblends im Labormaßstab und Überprüfung auf Spezifikationskonformität wurden diese im Technikumsmaßstab hergestellt und ausgelagert. Zu Beginn und Ende der sechsmonatigen Auslagerungsperiode wurden die chemisch-physikalischen Parameter der Kraftstoffe bestimmt, um Aussagen über eventuelle Veränderungen der Kraftstoffqualität zu treffen. Um das nicht plausible Auftreten einer Entmischung auszuschließen, wurden periodisch entnommene Proben aus unterschiedlichen Füllhöhen der Kraftstoffmischungen untersucht. Darüber hinaus überprüfte man die Genauigkeit der Berechenbarkeit chemisch-physikalischer Eigenschaften von Multiblends indem die experimentell erhaltenen Messwerte mit den berechneten verglichen wurden.

Im Rahmen der Voruntersuchungen konnte gezeigt werden, dass sich spezifikationsgerechte teilsynthetische Flugturbinenkraftstoffe gemäß ASTM D7566 aus mehreren unterschiedlichen synthetischen Kraftstoffen herstellen lassen. Eine Reihe chemisch-physikalischer Kennwerte von Multikomponentenmischungen lassen sich mit guter Präzision berechnen, sofern man die Kennwerte der reinen Mischungskomponenten und das Mischungsverhältnis kennt. Die im Labor bestimmten chemisch-physikalischen Kennwerte stimmen mit den berechneten gut überein. Über eine Lagerperiode von 6 Monaten findet keine Entmischung oder Veränderung der Eigenschaften statt; die Qualität der teilsynthetischen Kraftstoffmischungen wurde durch die halbjährige Lagerung nicht gemindert.

2.3 Demonstrierte Lieferlogistik

In Abb. 2 ist schematisch die durchgeführte Bereitstellungskette dargestellt. Hierbei sind für die unterschiedlichen Kerosine verschiedene Transportwege und -arten gewählt worden. Dies ist insbesondere dem Umstand geschuldet, dass die eingesetzten Kerosine an unterschiedlichen Orten hergestellt wurden. Das fossile Kerosin wurde mittels Kesselwagen über den Schienenweg zum Mischstandort transportiert. Die erneuerbaren Kerosine wurden in ISO-Tankcontainern über den Seeweg zum Hamburger Hafen und weiter (teils über einen Containerterminal) zum Mischstandort geliefert. Nach dem Mischen wurde das Multiblend-JET-A-1 wiederum in Kesselwagen verladen und über den Schienengang zum Flughafen LEJ gebracht.

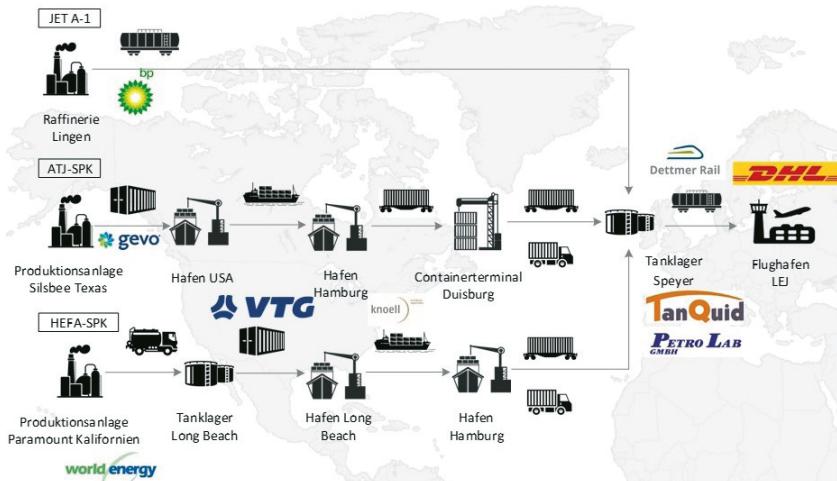


Abb. 2: Vereinfachte schematische Darstellung der durchgeföhrten Bereitstellungskette für die Bereitstellung des Multiblend-JET-A-1 an den Flughafen LEJ

2.4 Turbinenemissionen

Durchgeführt wurden vergleichende Emissionsmessungen an einer Flugzeugturbine in einem Triebwerksprobelaufstand am Flughafen LEJ. Dies erfolgte durch zwei Bodenläufe anhand eines festgelegten Messprotokolls für eine Referenzmessung mit fossilem JET A-1 und anschließend eine Messung mit dem Multiblend JET A-1. Nachgewiesen werden konnte durch den Einsatz des Multiblend JET A-1 die erwartete Rußminderung bezogen auf die Partikelmasse bei ca. 30 bis 60% für unterschiedliche Betriebspunkte wie in Abb. 3 ersichtlich wird. Dargestellt sind verschiedene Betriebspunkte mit unterschiedlichem Verbrauch und die jeweiligen Partikelmassen in den Emissionen der beiden Kraftstoffe. Die Rußminderung ist nicht mit der Verschlechterung („trade-off“) anderer Emissionsparameter verbunden.

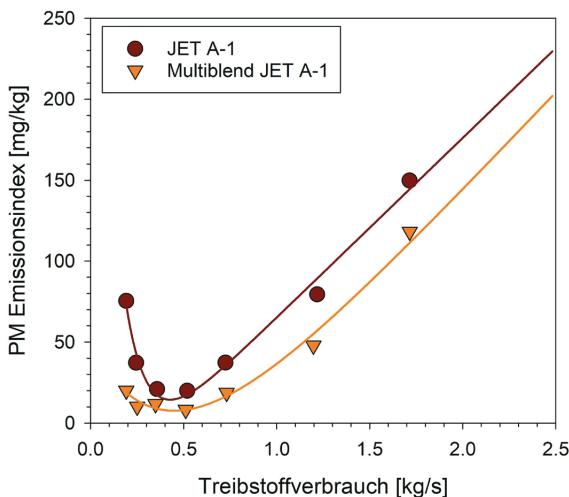


Abb. 3: Emittierte Partikelmasse in Abhängigkeit des Kerosinverbrauchs

Zusätzliche Messungen am Strömungsrohrreaktor zeigen eine Verminderung der Rußvorläuferspezies bei der Umsetzung des Multiblends. Durch diese Auswahl an Untersuchungen konnte daher nachgewiesen werden, dass die Emissionsveränderung nicht auf spezifische Triebwerkseffekte in der verwendeten Flugzeugturbine, sondern auf fundamentale Aspekte des Multiblends zurückzuführen ist.

3 Begleitende Forschung

3.1 Nachhaltigkeitsthemen und Chain-of-Custody-Systeme

Die ökologische Bewertung und hier im Speziellen die Bewertung der Gesamt-THG-Emissionen ergab deutliche Vorteile auf Seiten der Multiblends. Mit den hier betrachteten Mischungen können bis zu 35 % der THG-Emissionen im Vergleich mit konventionellem fossilen JET A-1 Kerosin vermieden werden. Da der größte Teil der THG-Emissionen durch die Verbrennung des fossilen Kerosins verursacht wird, kann der fossile Anteil im Multiblend-JET-A-1 als der wesentliche Treiber der Gesamt-THG-Emissionen identifiziert werden.

3.2 Kosten Kraftstoffproduktion und Lieferkette

Aus den Kostenbetrachtungen geht die Herstellung der Kraftstoffkomponenten als wesentlicher Einflussfaktor auf die Lebenszykluskosten des Multiblend-JET-A-1 hervor. Sie bildet damit auch einen Bestandteil, der wesentlich über die Wettbewerbsfähigkeit und den Nutzen der Verwendung von Multiblends bzw. erneuerbaren Flugkraftstoffen mitentscheidet.

Die hohen Bereitstellungskosten des Multiblends in DEMO SPK sind insbesondere den geringen Kraftstoffmengen sowie der Kurzfristigkeit des Kraftstoffbezugsgeschuldet. Die Kostenbetrachtungen zeigen, dass hier durch eine Optimierung der Bereitstellungskette ein wesentliches Potenzial zur Reduktion der Bereitstellungskosten vorliegt und für eine weitere Bereitstellung eines Multiblend-JET-A-1 oder erneuerbarer Flugkraftstoffe allgemein unbedingt umgesetzt werden sollte.

3.3 Nachhaltigkeitszertifizierung von Flugkraftstoffen

Es ist Konsens, dass auch für die Luftfahrt nur nachhaltige erneuerbare Kerosine zum Einsatz kommen. In der Praxis einzuhaltende und entsprechend per Zertifikat nachzuweisende Nachhaltigkeitskriterien sind in der Europäischen Union fest in der Erneuerbaren-Energien-Direktive (RED) verankert. Neben Vorgaben zum einzusetzenden Rohstoff sind auch Methoden und Mindestanforderungen in Bezug auf das Treibhausgasminderungspotenzial gegenüber der fossilen Referenz festgelegt. Nach diesen Standards wurden ebenso für die in DEMO-SPK eingesetzten erneuerbaren Kerosine sog. Lebenszyklusanalysen durchgeführt. Ihre jeweils spezifische Treibhausgasminderung lag in Größenordnungen von 57 bis 96%, im Multiblend JET A-1 mit fossilem Kerosin immerhin noch bei 35%.

Weiterhin wurde nachgewiesen, dass für den Einsatz von erneuerbaren Kerosinen in Multiblend JET A-1, die bereits in der Praxis derzeit insbesondere für Biokraftstoffe für den Straßenverkehr angewendeten Kriterien einer Nachhaltigkeitsdokumentation im Zertifizierungssystem übertragbar sind. Die Arbeiten in DEMO-SPK zeigen auch, dass sich die Nachhaltigkeitsanforderungen und -standards global teilweise deutlich unterscheiden. Dies kann bei einem wachsenden globalen Markt für erneuerbare Kerosine zu zusätzlichen administrativen Anforderungen für die Marktbeteiligten führen. Ein Lösungsansatz, dem zu begegnen, liegt in der gegenseitigen Anerkennung bestehender Systeme und in der Entwicklung so genannter Metastandards.

3.4 Vorgeschlagene Schritte für die zukünftige Integration

Ein weiterer wichtiger Punkt für die Marktimplementierung von erneuerbaren Kerosinen stellt die Schnittstelle zwischen der Nachhaltigkeitszertifizierung und -dokumentation mit ihrem Massenbilanzsystem einerseits und der Anrechnung erneuerbarer Kerosine im Europäischen Emissionshandelssystem andererseits dar. Eine Nachweisführung und Anrechnung auf Basis des derzeit rechtlich geltenden Ansatzes ist mit hohen administrativen und operativen Aufwänden verbunden, was zu einer eingeschränkten Anrechenbarkeit erneuerbarer Flugkraftstoffe führt und damit Anreize zum Einsatz von erneuerbarem Kerosin weiter verringert. Vor diesem Hintergrund wurden im Rahmen von DEMO-SPK daher verschiedene Ansätze zur verbesserten Anrechnung im Europäischen Emissionshandel konzeptioniert. Diese sind in Abb. 2 im Einzelnen dargestellt

die Ansätze lauten „Track and Trace“ bzw. Massenbilanzierung und „Book and Claim“ bzw. Zertifikatlösung und ihre grundsätzliche Funktionalität konnte bestätigt werden. Die entwickelten Verfahren und Ansätze gilt es in einem weiteren Schritt über die Erfahrungen in DEMO-SPK hinaus praktisch zu validieren und somit weitere Maßnahmen für ihre zukünftige Operationalisierung zu identifizieren.

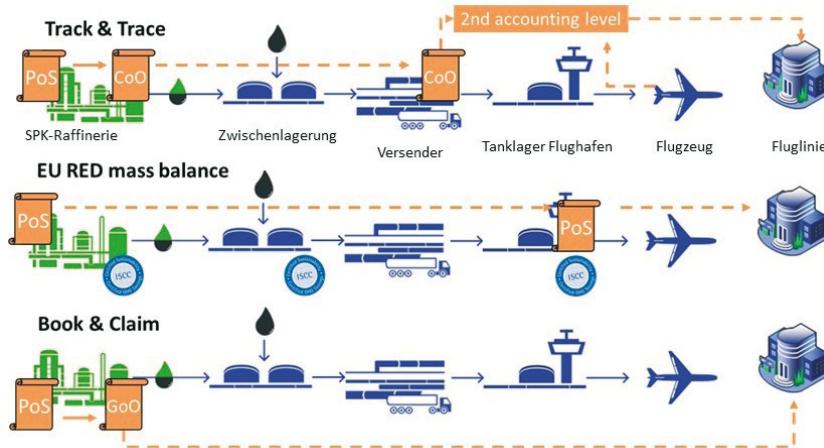


Abb. 4: Veranschaulichung von „Track and Trace“ bzw. Massenbilanzierung und „Book and Claim“ bzw. Zertifikatlösung

3.5 Handlungsempfehlungen

Aus den Erfahrungen des Modellvorhabens lassen sich nicht nur zahlreiche Hinweise für das operative Projektmanagement ableiten, sondern auch konkreter Klarstellungsbedarf, welcher für eine erfolgreiche breitere Marktimplementierung wichtig ist. Dazu zählen u.a. die Erweiterung der ASTM D7566 um die Option der simultanen, also zeitgleichen Herstellung von Multiblend JET A-1, die vereinfachte REACH-Registrierung für erneuerbare Kerosine und die Ergänzung im Energiesteuergesetz über das sog. Ähnlichkeitsprinzip nach §2, Abs.4 EnergieStG.

Darüber hinaus wurden gezielt Empfehlungen für die internationalen Institutionen (ASTM, JIG, ETS usw.) abgeleitet und an diese zur Berücksichtigung bei der Weiterentwicklung der jeweiligen Spezifikationen und Leitlinien übermittelt. (Bullerdiek et al. 2019b) Damit wirkt DEMO-SPK über das eigentliche Vorhaben hinaus und gibt Empfehlungen, international den operativen Umfang mit erneuerbaren Kerosinen als Teil von Multiblendkerosin zu erleichtern und damit die Marktimplementierung zu ermöglichen.

Ungeachtet der erfolgreichen Untersuchungen im MKS-Modellvorhaben DEMO-SPK bleibt die Tatsache, dass es neben den o.g. Empfehlungen für eine breite Marktimplementierung von erneuerbaren Kerosinen des massiven Ausbaus an Produktionskapazitäten sowie der Erweiterung von infrastrukturellen Gegebenheiten (z.B. zur Herstellung von Multiblend JET A-1) bedarf. Nur dann wird es möglich sein, die identifizierten und am Beispiel DEMO-SPK verifizierten positiven Effekte in Bezug auf Minderungspotenziale von Schadstoffemissionen und Treibhausgasen zu ermöglichen.

4 Ergebnisse

Im Projekt DEMO-SPK ist es dank des Engagements von mehr als 20 internationalen Partnern aus Wirtschaft und Wissenschaft weltweit erstmalig gelungen knapp 600 Tonnen Multiblend JET A-1 bereitzustellen und am Flughafen LEJ im Flugbetrieb zu nutzen. Außerdem konnte durch den Einsatz von Multiblend JET A-1 im Flugzeug gegenüber reinem fossilen JET A-1 die Partikelemissionen im Bodenlauf um ca. 30 bis 60% reduziert werden und die CO₂-Äquivalent-Emissionen um ca. 35 % reduziert werden. Weitere Informationen können dem ausführlichen Endbericht entnommen werden. (Bullerdiek et al. 2019a)

Literatur/Quellen

- ASTM D7566-19 (2019): Standard Specification for Aviation Turbine Fuel Containing Synthesized Hydrocarbons.
- Bullerdiek, N.; Buse, J.; Dögnitz, N.; Feige, A.; Halling, A.-M.; Hauschild, S., Hawig-horst, P.; Kaltschmitt, M.; Kuchling, T.; Kureti, S.; Majer, S.; Marquardt, C.; Müller-Langer, F.; Neuling, U.; Oehmichen, K.; Pechstein, J.; Posselt, D.; Scheuermann, S.; Schripp, T.; Stein, H.; Zschocke, A. (2019): DEMO-SPK Endbericht. Online verfügbar unter https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Anlage/G/MKS/demo-spk-endbericht.pdf?__blob=publicationFile, zuletzt geprüft am 02.04.2020
- Bullerdiek, N.; Buse, J.; Kaltschmitt, M.; Pechstein, J. (2019): DEMO-SPK Recommendation Paper. Online verfügbar unter https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Anlage/G/MKS/demo-spk-recommendation-paper.pdf?__blob=publicationFile, zuletzt geprüft am 02.04.2020.
- Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (2019): Forschungs- und Demonstrationsvorhaben zu erneuerbarem Kerosin (DEMO-SPK). Online verfügbar unter <https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Artikel/G/MKS/demo-spk.html>, zuletzt geprüft am 02.04.2020
- IFOK GmbH (2013): Die Mobilitäts- und Kraftstoffstrategie der Bundesregierung (MKS). Energie auf neuen Wegen. Hg. v. Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS). Berlin. Online verfügbar unter https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Anlage/MKS/mks-strategie-final.pdf?__blob=publicationFile

Kontakt

M.Sc. Niels Dögnitz, Wissenschaftlicher Mitarbeiter

DBFZ - Deutsches Biomasseforschungszentrum gGmbH

① +49 (0)341.2434-427 | ☎ Niels.Doegnitz@dbfz.de | ⌂ www.dbfz.de

FORUM B

BIOGAS

OPTIMIERTE KONZEPTE UND ANLAGEN

*Ines Wilkens, Roland Bauböck, Robert Ißler,
Marianne Karpenstein-Machan, Jan Kelch, Peter Schmuck*

Wie sieht die Zukunft der Bioenergiedörfer nach dem Auslaufen der 20 Jahre EEG-Förderung aus?

What are possible future perspectives for bio-energy villages after the 20-year EEG-subvention (EEG = renewable energy act)?

Zusammenfassung: Die Zukunft der ca. 160 Bioenergiedörfer (BED) ist ungewiss, da sich die Rahmenbedingungen für Bioenergie deutlich verschlechtert haben und die EEG-Förderung für viele in den nächsten 5 bis 10 Jahren ausläuft. Forschung und Unternehmen beschäftigen sich zurzeit mit verschiedenen Vermarktungsoptionen, um aufzuzeigen wie Biogasanlagen nach dem Auslaufen ihrer 20-jährigen EEG-Vergütung weiter betrieben werden können. Sind diese Ansätze auch sinnvoll für BED dessen verantwortliche Akteure in den Dörfern Wärmenetze für ihre ca. 25.000 Haushalte zu versorgen haben?

Um die Zukunftschancen von BED auszuloten und Handlungsoptionen zu erarbeiten, ist das Forschungsprojekt „Innovative Konzepte und Geschäftsmodelle für zukunfts-fähige Bioenergiedörfer – klimafreundlich, demokratisch, bürgernah“ im Februar 2019 an den Universitäten Kassel und Göttingen gestartet. Mit zwei Partnerbioenergiedörfern und einem Expertenbeirat werden verschiedene Zukunftsoptionen auf Praxistauglichkeit bewertet sowie technische und wirtschaftliche Post-EEG Szenarien mit Hilfe von speziell für die BED erarbeiteten Kalkulationswerkzeugen aufgezeigt.

Eine Auswertung der im Internet verfügbaren Informationen, Interviewstudien in 22 BED und eine Fragebogenaktion lieferten erste Ergebnisse zum Status quo in Bezug auf technische Ausstattung, technische und soziale Herausforderungen sowie Vorbereitungen der Dörfer im Hinblick auf die Zukunft ihrer Energieanlagen. Die Ergebnisse werden vorgestellt und vor dem Hintergrund durchführbarer, zukunfts-fähiger Handlungsoptionen diskutiert.

Abstract: The future for the approx. 160 bio-energy villages (BED) in Germany is uncertain because of increasingly deteriorating frame conditions and an end of the EEG subsidy period for many of the villages in the coming 5-10 years. Researchers and companies are currently investigating different marketing options to find out what needs to be done to continue an economic operation of BED beyond the 20-year EEG-period. And moreover, do these options also make sense for villages whose players have to guarantee the heat supply for a total (all BED) of 25.000 households?

In order to find out future chances for BED and options for action the research project "Innovative Konzepte und Geschäftsmodelle für zukunftsfähige Bioenergiedörfer – klimafreundlich, demokratisch, bürgernah" was launched as a cooperation of the Universities Kassel and Göttingen in Feb. 2019. With the help of two partner-bioenergy-villages and an expert advisory council different future perspectives are being tested and rated for their practical capability. Furthermore, technical and economical post-EEG scenarios will be developed with the help of specially designed calculation tools.

By the evaluation of freely available information, an interview-study done in 22 BED and a questionnaire survey, first results concerning the technical layout, technical and social challenges as well as the state of preparation of the villages for future times have been obtained so far. First results are presented in this essay and are discussed before the background of feasible and sustainable options for action.

1 Einleitung und Hintergrund

In den vergangenen 15 Jahren sind in Deutschland über 160 Bioenergiedörfer entstanden. Allen gemeinsam ist das Wärmenetz. Mit Bioenergiedörfern und dezentralen Biomasse-Heizwerken haben Nahwärmenetze Einzug in ländliche Regionen gehalten. Bisher wurden vornehmlich in städtischen Bereichen Fernwärmenetze verlegt. Der Großteil (86 %) der Wärmenetze ist lt. einer Studie des Deutsch-Französischen Büros für die Energiewende (DFBEW 2020) länger als 100 km.

In ländlichen Regionen mit vielen Fachwerkhäusern und Altbauten ist die Nahwärmeversorgung mit Netzlängen oft unter 10 Kilometern ein gangbarer Weg zur klimafreundlichen Energieversorgung, denn der Gebäudebestand ist auch bei großen Aufwand oft nur auf eine „schwache“ Energiesanierung anzuheben. Anders als in vielen städtischen Fernwärmenetzen wird in Bioenergiedörfern die Wärme zu fast 100 % aus erneuerbaren Energien (EE) erzeugt.

Gemäß der Neufassung der Erneuerbaren-Energien-Richtlinie müssen EU-Mitgliedstaaten ab 2020 bis 2030 in Wärmenetzen eine Erhöhung des EE-Anteils um jährlich 1 % anstreben. Diese Bestrebungen werden auch im Nationalen Energie- und Klimaplan (NECP) übernommen. Der Anteil EE in deutschen Wärmenetzen ist daher für 2030 mit 30 % festgelegt (BMWi 2019).

Um diese Ziele zu erreichen, ist es wichtig, das Konzept der Bioenergiedörfer zu erhalten und auf die Zukunft nach der EEG-Förderphase vorzubereiten. Im ländlichen Raum fallen diverse Biomassen an und sind gut verfügbare Energieträger, die in Kombination mit Wind- und Sonnenenergie die Energiewende auf dem Land weiter voranbringen können. Bioenergiedörfer sind ein Anfang und Modell für eine Verknüpfung der EE auf dem Lande auf dem Weg zu Energiewendedörfern.

In diesem Artikel wird ein Überblick über die bestehenden Bioenergiedörfer in Deutschland gegeben. Schwerpunkte sind hierbei die technische Ausstattung für die Wärmenetze, genutzte Substrate sowie die Vorbereitung auf den Wegfall der EEG Vergütung nach 20 Jahren.

2 Methode und Datenbasis

Als Datenbasis wurden Datenblätter genutzt, die bei der Fachagentur nachwachsende Rohstoffe (FNR) unter <https://bioenergiedorf.fnr.de/> verfügbar sind. Zum Stand 21.04.2020 waren 163 BED sowie 45 Dörfer, die sich auf dem Weg zum BED befinden, bei der FNR gelistet. Diese „Anwärter-BED“ sind noch nicht fertiggestellt oder erfüllen die Kriterien bspw. dass 50 % des gesamten Wärmebedarfs des Dorfes durch regional erzeugte Bioenergie gedeckt werden muss, nicht. Die Auswertungen in diesem Artikel beziehen sich ausschließlich auf die 163 BED. Ergänzend zu den Datenblättern wurde die Internetauftritte der Bioenergiedörfer sowie das Markstammdatenregister ausgewertet.

Weiterhin wurde eine Interviewstudie in 22 BED durchgeführt. Die Auswahl der BED ist nach verschiedenen technischen, sozialen und landwirtschaftlichen Kriterien (u.a. Vielfalt der Wärmeerzeuger, Schwerpunkt nachhaltige Biomassenutzung, technische Innovationen wie z.B. Flexibilisierung, absehbare Restlaufzeit) durchgeführt worden. Schwerpunkte der Befragung lagen auf den Erfolgs- und Hemmnisfaktoren der Projekte sowie auf den Zukunftsperspektiven der BED nach Auslaufen der EEG-Förderung. Weiterhin wurde ein Fragebogen an die restlichen Bioenergiedörfer sowie die Anwärter-BED gesandt und als online-Befragung zur Verfügung gestellt. Hier wurden 28 Fragebögen ausgefüllt, fünf davon durch Anwärter-BED.

Die nachfolgende Abbildung gibt einen Überblick über die BED, die entweder interviewt wurden oder einen Fragebogen zurückgesandt haben. Rot hervorgehoben sind die Praxispartner des Projektes, die Bioenergiedörfer Wollbrandshausen-Krebeck und Altenmellrich-Anröchte.

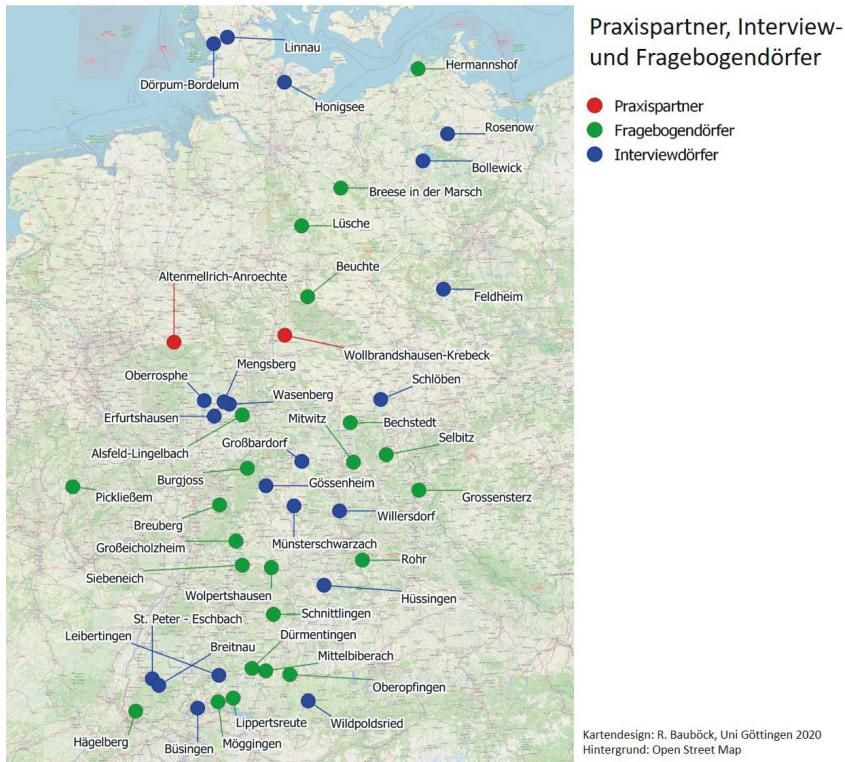


Abb. 1: Übersicht der befragten Dörfer

3 Ergebnisse

3.1. Technische Daten - Auswertungen aus der Internetrecherche

Nachfolgend werden die genutzten Technologien und Leistungen der Wärmebereitstellung, die eingesetzten Substrate und die Überbauung der BHKWs vor gestellt.

Technologien der Wärmebereitstellung

Angereizt durch das EEG basiert die Technik der Bioenergiedörfer vorwiegend auf einer Biogasanlage mit einem oder mehreren BHKW. Holzkessel werden vielfach eingesetzt als redundante Wärmequelle zum Biogas-BHKW oder in Kombination mit anderen Wärmequellen wie Spitzenlastölkessel, Solarthermie oder Holzvergaser. Die Kombination des technischen Systems zur Absicherung der vollständigen Wärmeversorgung der Wärmekunden wird vielfältig gestaltet, wie Abb. 2 zeigt. Aber auch sonstige Kombinationen mit innovativer Technik, wie z.B. Power-to-Heat, ORC-Anlagen und Miscanthus- Heizkessel kommen zur Anwendung.

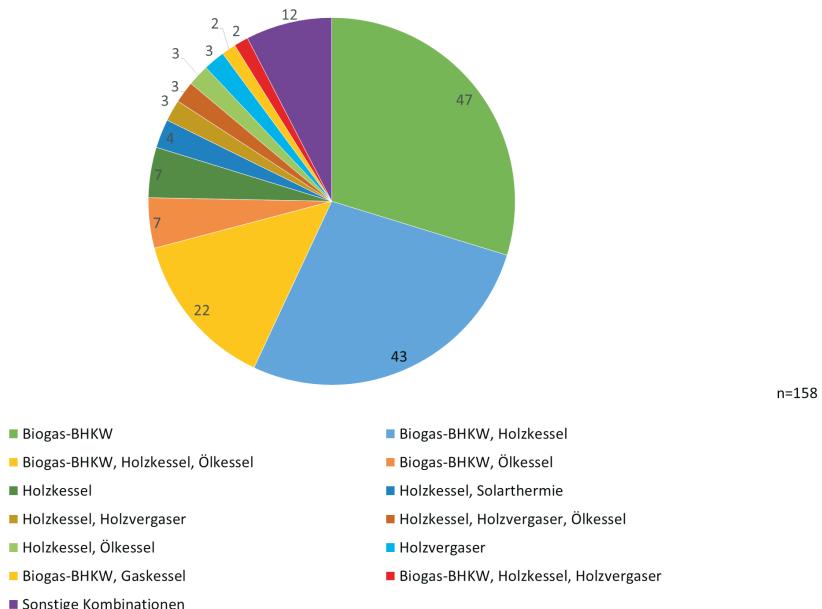


Abb. 2: Kombination der Wärmequellen

Thermische Leistung und Nahwärmenetzlängen

Die 163 BED haben zusammen eine installierte thermische Leistung von 232,59 MW¹.

Die Streuung der thermischen Leistungen liegt zwischen 60 und 11.000 kW mit einem Schwerpunkt zwischen 400 und 1.500 kW; in diesem Bereich liegen 76 % der BED.

¹ In Fällen in denen die Angabe der thermischen Leistung fehlte, wurde angenommen, dass die thermische Leistung der elektrischen bzw. der Bemessungsleistung des Marktstammdatenregisters entspricht.

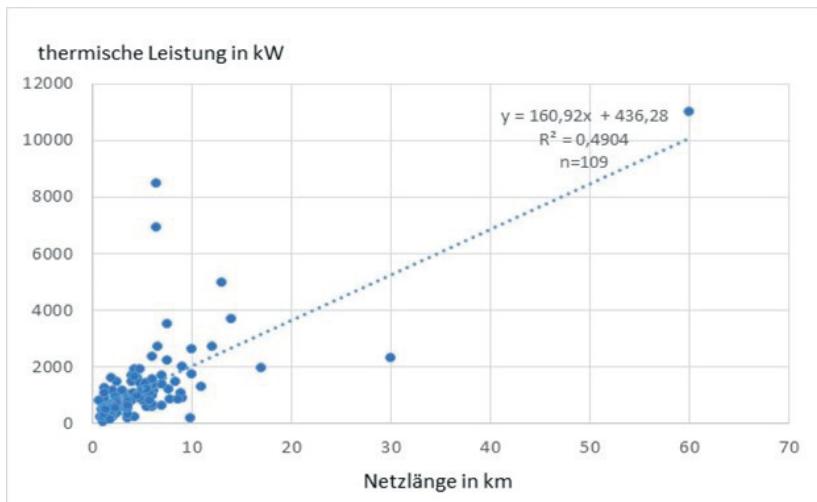


Abb. 3: Korrelation zwischen Netzlänge und thermischer Leistung

Angaben zur Netzlänge sind in 112 Bioenergiedörfern verfügbar, die zusammen 593 km Wärmeleitungen verlegt haben. Überträgt man diese durchschnittliche Netzlänge von 5,3 km auf die 163 Bioenergiedörfer, erhält man eine abgeschätzte gesamte Netzlänge von 863 km.

In Abb. 3 ist eine Korrelationsbeziehung zwischen den Werten der Nahwärmetzlängen und der thermischen Leistung dargestellt, die paarig verfügbar sind. Sie zeigt eine Häufung der Werte unter 10 Kilometern Netzlänge und unter 2.000 kW thermischer Leistung. Die Trendkurve weist einen linearen Verlauf mit relativ hohem Bestimmtheitsmaß (49 %) auf, welches jedoch in erster Linie durch einzelne extrem hohe Werte in der Netzlänge und der thermischen Leistung ausgelöst wird.

Umstellung der Substrate notwendig durch Maisdeckel und verringerte Vergütung und steigende Nawaro-Preise. Welche Substrate werden aktuell eingesetzt?

In den meisten BGA werden Wirtschaftsdünger (Gülle/Mist) in Kombination mit NawaRo-Substraten eingesetzt. Auch in den Kombinationen tauchen Mais und Wirtschaftsdünger am häufigsten in den Nennungen der Einsatzstoffe auf. Mais mit Gülle (83 %), und Mais mit Mist (62 %). Bei den reinen NawaRo-Kombinationen liegt Mais kombiniert mit Gras bei 74 % aller Nennungen, gefolgt von Mais mit GPS (64 %), Mais mit Gras und GPS (50 %), Mais mit sonstigen, (vorwiegend Getreide) (31 %) und (Mais mit Rüben 17 %). Rest- und Abfallstoffe sind als Einsatzstoffe an Bioenergiedorf-BGA nur in geringem Maße von Bedeutung und werden nur in Kombination mit Mais (2 %) oder mit Wirtschaftsdüngern eingesetzt (2 %). Die vorliegenden Daten lassen keine Beurteilungen hinsichtlich der Massenverteilungen zu. Es kann jedoch davon ausgegangen werden, dass Silo-

mais und Wirtschaftsdünger die höchsten Massenanteile aller Einsatzstoffe in den 135 BED mit Biogasanlage aufweisen.

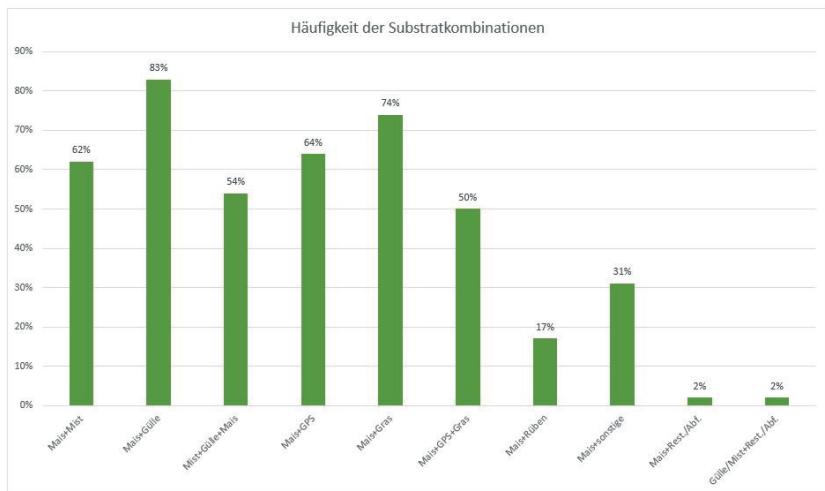


Abb. 4: Kombination der Substrate in den 163 BED

Flexibilisierung der BHKWs

Das im EEG 2017 verankerte Ausschreibungsverfahren für Bioenergie ermöglicht bestehenden Biogasanlagen für 10 Jahre eine Einspeisevergütung von derzeit maximal 16,39 Ct/kWh² zu erhalten. Hierbei ist zu beachten, dass die im Ausschreibungsverfahren erzielte Einspeisevergütung „nur für 50 % der Strommenge, die bei durchgängigen Vollastbetrieb mit der bezuschlagten Leistung jährlich erzeugt werden könnte“, gezahlt wird (Daniel-Gromke et al. 2019). Für einen wirtschaftlichen Betrieb ist somit i.d.R. mindestens eine doppelte Überbauung (Zubau von 100 % der BHKW-Leistung) oder eine Halbierung der Bemessungsleistung in Form der passiven Flexibilisierung notwendig. Eine Auswertung der Daten des Markstammdatenregisters in Abb. 5 gibt einen Überblick, wie stark der Zubau bereits von den Bioenergiedörfern genutzt wurde.

² maximale Gebotshöhe für die Ausschreibung in 2020 gem. (EEG 2017 § 39f Absatz 5 Nr. 3)

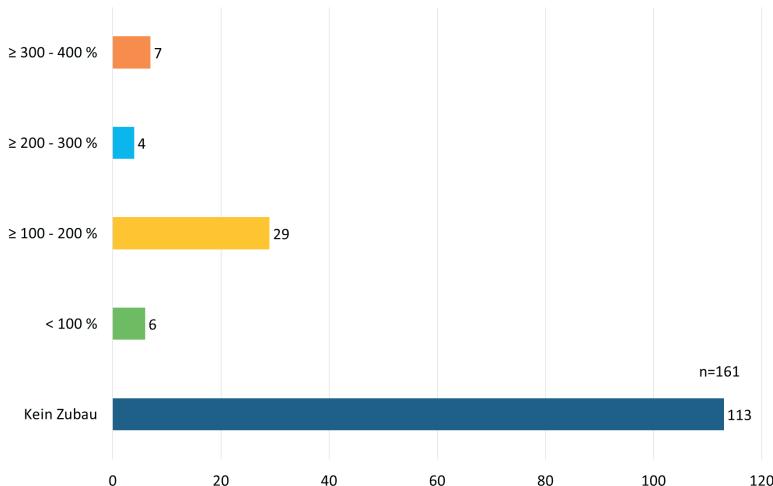


Abb. 5: Zubau der BHKW-Leistung in den BED

3.2. Auswertungen der Interviews und Fragebögen

Nachfolgend werden ausgewählte Ergebnisse der Interviewstudie und der Fragebögen dargestellt. Der Schwerpunkt liegt auf Fragen, die die Ideen und Einschätzungen für Zukunftsperspektiven der Bioenergiedörfer adressieren.

Auslauf EEG-Vergütung für Biogasanlagen – und wie weiter?

Sensibilisierung der Wärmekunden

Von den 45 befragten Dörfern können 33 relevante Angaben für diese Fragestellung ausgewertet werden, da nicht in allen Konzepten eine EEG geförderte Anlage genutzt wird. Es gaben davon 17 Dörfer an, die Wärmekunden noch nicht für das Thema sensibilisiert zu haben, also gut 51 %. In 13 Dörfern wurde das Thema besprochen und man ist zuversichtlich, eine auskömmliche Vermarktung des Stroms oder gegebenenfalls neue Wärmequellen auf den Weg zu bringen. In drei Dörfern hat man sich mit der Thematik befasst und es herrscht eine pessimistische Sicht in die Zukunft.

Sind Veränderungen der Geschäftsmodelle im Blick?

In 25 von 37 Bioenergiedörfern wurden konkrete Ideen genannt, die nachfolgend aufgelistet werden:

Tab. 1: Ideen der BED für zukünftige Geschäftsmodelle

Ideen für zukünftige Geschäftsmodelle	Nennungen
Verknüpfung mit anderen erneuerbarer Energien	18
Regionale Vermarktung von Grünstrom oder Nachbarschaftsstrom (Nutzung öffentliches Netz)	9
Biomethanherstellung (auch für Tankstellenbetrieb)	6
Sommerwärme nutzen (Kältebereitstellung, Gewächshäuser heizen, Samen trocknen)	4
Eigenes neues Stromnetz und Stromdirektlieferungen	4
Eigenstromnutzung	3
Elektromobilität	2
Power-to-Heat, Wasserstoffherstellung, Strom direkt an der Börse vermarkten, flexible Fahrweise; Netzrückkauf, Gründung von Gemeindewerken; Vermarktung von Asche; Brennstoffzelle mit Biogas betreiben; Kraftstoff aus Bioabfall herstellen; Betrieb großer Stromspeicher; Wärmegeführte BHKWs; Power-to-Gas; Vermarktung von separiertem Gärrest	jeweils 1 Nennung

Zur Umsetzung der Ideen wurden unter anderem intensive Beratungen in den bestehenden Partnernetzwerken und externe Moderation genannt.

Was brauchen/erwarten Sie von der Politik für die Sicherung der Zukunft von Bioenergiedörfern?

In den meisten Dörfern wurden konkrete Erwartungen genannt. In vier Dörfern überwog der Ärger über aktuelle politische Regelungen für die regionale Energiewende, so dass man sich nicht äußern wollte. Die Erwartungen in den anderen Dörfern wurden folgenden Kategorien zugeordnet.

- Eine stabile auskömmliche Förderung von Bioenergiedörfern als wichtiger Baustein der Wärmewende sowie Anreize zur Teilnahme, z.B. unbürokratische Nutzung von regionaler Gülle; Förderung der Regelleistungsfähigkeit der Biogasanlagen; ein höherer CO₂-Preis; der Ersatz konventioneller Heizungen (24 Nennungen).
- Unkomplizierte Nutzung vor Ort von Strom und Wärme, um die dezentrale Energiewende zu ermöglichen, klare einfache Regelungen (10 Nennungen).
- Bürokratische Hürden abbauen (12 Nennungen).
- Unterstützung des Ehrenamts und der Gemeinden zur Umsetzung der Wärmewende im ländlichen Raum (5 Nennungen).
- Engere Zusammenarbeit der lokalen Akteure mit den Netzbetreibern durch z.B. Stadt- oder Gemeindewerke (5 Nennungen).
- Stabile und Verlässliche gesetzliche Rahmenbedingungen (4 Nennungen).
- Vertrauen in die Bürger und Praktiker vor Ort (2 Nennungen).

4 Diskussion

Bedeutung der BED für die Wärmewende

Der Anteil der Fernwärme an der Nettowärmeerzeugung beträgt in Deutschland annähernd 14 %. Die installierte thermische Leistung der etwa 1.450 Netze mit einer Länge von rund 21.700 Kilometern liegt bei gut 51.500 MW (DFBEW 2020; AGFW 2019). Nur 13,6 % der eingespeisten Wärme aus dem Jahr 2016 stammte aus EE wie z.B. Biomasse und biogene Siedlungsabfälle (DFBEW 2020). Mit einer installierten thermischen Leistung von gut 232 MW können die überwiegend mit EE betriebenen Wärmenetze der BED einen modellhaften Beitrag zur Wärmewende im ländlichen Raum leisten. Mit Wärmenetzen von ca. 870 km decken sie knapp 4 % der bestehenden Fernwärmennetze ab. Der Anteil im ländlichen Raum wird jedoch höher liegen, da auch Wärmenetze von Energiegenossenschaften und anderen Gesellschaften betrieben werden, die sich nicht Bioenergiedorf nennen. Um hierzu Aussagen zu kommen, bedarf es einer besseren Datenbasis zur räumlichen Verteilung der Wärmenetze.

Technologisch sind die BED sehr vielfältig aufgestellt (siehe Abbildung 2). Ausgehend von der Ausgangskonstellation des ersten BED in Deutschland in Jühnde mit Biogas-BHKW - Holzheizkessel und Spitzenlastkessel als redundante Wärmequellen zur Sicherstellung der vollständigen Wärmeversorgung - sind viele weitere Technologien und Kombinationen in BED umgesetzt worden. Mit der Einbindung von Solarthermie oder Windenergie in Form von Power-to-Heat zeigen die BED innovative Wege auf, die über die Bioenergie hinausgehen. Ebenso sind innovative Technologien wie ORC-Anlagen und Holzvergaser in einzelnen Dörfern vorzufinden, die einer gewissen Lernkurve bedurften und nicht immer zu voller Zufriedenheit der Betreiber liefen.

Nicht alle BED scheinen auf redundante Wärmequellen zurückzugreifen. Siebenundvierzig Betreiber gaben lediglich BHKWs als Wärmequelle an. Dabei ist davon auszugehen, dass mehrere BHKWs vorhanden sind, die bei evtl. Störungen oder Wartungszeiten die Wärmeversorgung sicherstellen. Möglicherweise sind auch Notkessel auf Ölbasis oder mobile Kessel vorhanden, auf die man zurückgreifen kann, die aber von den Betreibern nicht erwähnt wurden. Karpenstein-Machan et al. (2013) beschreiben in ihrer Studie mit 20 BED, dass in zwei Dörfern mit nicht vorhandenen redundanten Wärmequellen der Wärmepreis entsprechend niedrig war, da eine Vollversorgung der Wärmekunden nicht garantiert werden konnte.

In Interviews wurde deutlich, dass in der Ertüchtigung des Nahwärmennetzes noch Optimierungspotenzial vorhanden ist. Eine Verdichtung des Netzes durch Zugewinn von weiteren Wärmekunden würde Netzverluste verringern und höhere Einnahmen generieren.

Die Umstellung auf eine wärmegeführte Fahrweise und Fütterung der Biogasanlage bietet Möglichkeiten Substrate einzusparen und die Wärme bedarfsgerechter (hoher Bedarf im Winter, geringer Bedarf im Sommer) bereitzustellen.

Falls eine bedarfsgerechte Stromerzeugung umgesetzt oder geplant ist, sollte die wärmegeführte Fahrweise mit dieser kompatibel sein. Zusätzliche Wärmespeicher könnten zur Lösung beitragen.

Ist die Wärmequelle nicht auf Dauer durch eine Biogasanlage zu sichern, weil z.B. der Betreiber die Biogaserzeugung aufgibt, muss nach Alternativen gesucht werden. Solarthermie in Verbindung mit Holzverbrennung, saisonalen Wärmespeichern oder auch Verbundsysteme mit Windkraftanlagen (Power-to-heat) könnten neue Wärmequellen darstellen, die den Bestand von BED sichern.

Bedeutung der BED für den Stromsektor

Das im EEG 2017 verankerte Ausschreibungsverfahren ermöglicht bestehenden Biogasanlagen für 10 Jahre eine Einspeisevergütung zu erhalten. Für einen wirtschaftlichen Betrieb ist hierfür i.d.R. mindestens ein Zubau an 100 % der Leistung (doppelte Überbauung) oder eine Halbierung der Bemessungsleistung in Form der passiven Flexibilisierung notwendig. Die Auswertung der Daten des Markstammdatenregisters zeigt, dass diese Voraussetzung der doppelten Überbauung bis jetzt nur knapp 25 % der BED erfüllen. Eine wesentliche Änderung des Zubaus ist in den nächsten Monaten nicht zu erwarten. Der Flexdeckel von 1000 MW wurde am 31.08.2019 erreicht ([BNetza 2020]). Anlagenbetreiber können zwar noch bis zum 31.11.2020 zusätzliche, flexible Leistung installieren, aufgrund der notwendigen Vorlaufzeiten ist es aber unwahrscheinlich, dass in 2020 noch Biogas-Flexibilisierungsprojekte geplant, genehmigt und umgesetzt werden.

Eine verbleibende Möglichkeit eine vergütete, flexible Fahrweise zu erreichen, wäre die Reduzierung der Bemessungsgrenze, die passive Flexibilisierung. Plant ein Biogasanlagenbetreiber diese zu nutzen, muss der Betrieb darauf vorbereitet werden, dass nur maximal 50 % der theoretisch produzierbaren Strommenge die bezuschlagte Einspeisevergütung erhalten, was eine Halbierung der BHKW-Betriebsstunden bedeutet. Diese Betriebsstundenreduzierung führt wiederum zu einer Halbierung der verfügbaren Abwärme aus den BHKWs. Hier bedarf es intelligenter Konzepte, die einen wirtschaftlichen Weiterbetrieb der Biogasanlage und des Wärmenetzes ermöglichen. Aus den Interviews und Fragebögen wird deutlich, dass schon ein großer Anteil der Befragten konkrete Ideen für solche neuen Geschäftsmodelle sammeln (siehe Tabelle 1). In 27 von 37 Dörfern wird sich schon mit neuen Geschäftsmodellen befasst. In 13 von 33 Befragten hat man bereits die Wärme Kunden über die Notwendigkeit, neue Wege zu finden informiert und ist optimistisch, dass es weitergehen wird. Trotzdem gibt es auch einige Bioenergiedörfer, die hierzu noch keine Vorbereitungen treffen.

In welche Richtungen können diese neuen Konzepte und Geschäftsmodelle gehen? Ein klares Bild zeigen die Ideen für neue Geschäftsmodelle in der Interviewstudie. Am häufigsten wird dort die Verknüpfung mit weiteren erneuerbaren Energieträgern genannt. Hier bietet es sich an, über eine Verknüpfung mit Solarthermie nachzudenken. Wenn im Sommer nur wenig Wärme not-

wendig ist, könnte diese Wärme solarthermisch zur Verfügung gestellt werden und die BGA nutzt bei einer flexiblen Fahrweise die eingesparte Stromproduktion für Nachfragespitzen im Winter. Bei Reduzierung der Bemessungsgrenze der Biogasanlage könnte überhängiges Biogas, welches nicht verstromt werden darf, zu Biomethan aufbereitet und eine Tankstelle betrieben werden.

Auch weit oben auf der Agenda der Bioenergiedörfer steht die Nutzung und Vermarktung von Grünstrom. Dies zeigt sich zum einen bei den Ideen für Geschäftsmodelle, aber auch bei den Erwartungen gegenüber der Politik. Hier reichen die Angaben der Befragten von Nutzung des Stroms für den Eigenbedarf, über die Verlegung eigener Stromleitungen bis hin zur Vermarktung des Stroms über das öffentliche Netz. Bei erfolgreicher Teilnahme an einer Biomasseausschreibung ist aufgrund des Eigenversorgungsverbotes (EEG 2017 §27a) die Eigennutzung des, mittels Biomasse erzeugten, Stromes nur in wenigen Ausnahmenfällen möglich. Deshalb wird im Projekt die Nutzung von PV- und Windstrom, vorzugsweise aus Post-EEG-Anlagen, als Möglichkeit zur Senkung der Stromkosten betrachtet. Bei ausreichender Verfügbarkeit von günstigem Post-EEG Strom kann der Aufbau von Power-To-Heat-Anwendungen (bspw. Wärmepumpen oder Heizstab) eine lukrative Ergänzung der Wärmeversorgung darstellen. Bei Verlegung von eigenen Stromleitungen zu ortsnahen Dritten könnten diese aus den zuvor genannten Stromquellen versorgt und damit Zusatzeinnahmen generiert werden. Im Vergleich zu den zwei vorherigen Stromnutzungsoptionen besitzt die Vermarktung über das öffentliche Netz deutlich geringere Margen und höheren Verwaltungsaufwand. Allerdings sind viel mehr Stromabnehmer erreichbar und mittels eines geeigneten Vermarktpartners, welcher die energierechtlichen Aufgaben übernimmt, kann eine weitere Einnahmequelle aufgebaut werden.

Biogasanlagen erzielen nach den jetzigen EEG-Fassungen den größeren Teil ihrer Erlöse aus dem Stromverkauf. Je unsicherer die Vergütung des Stroms wird, desto wichtiger wird eine Anpassung der Substratseite sein. Für den Fall, dass nach dem Ende der 20-jährigen EEG-Vergütungsperiode mit erheblich geringeren Einnahmen aus dem Verkauf von Strom aus Biogas gerechnet werden muss, können BGA z.B. durch Kosteneinsparungen bei den Inputstoffen eine höhere Wirtschaftlichkeit erzielen. Da Anbaubiomasse meist mit hohen Substratpreisen verbunden ist, könnte dies durch eine bessere Ausschöpfung von vorhandenen Potenzialen im Bereich der Rest- und Abfallstoffe, aber auch durch eine vermehrte Gülle/Mist-Vergärung erreicht werden.

5 Fazit

Bioenergiedörfer leisten bereits jetzt einen wichtigen Beitrag zur Wärmewende auf dem Lande. Diverse Biomassen sind im ländlichen Raum verfügbar, die als Energiequelle genutzt werden können. Der Trend zur ressourcenschonenden Verwendung von Wirtschaftsdünger und Reststoffen hat in den BED begonnen und wird weiter zunehmen. Einzelne BED zeigen schon beispielhaft, wie eine Verknüpfung mit anderen EE, z.B. Wind- und Sonnenenergie gelingen kann. Es

zeichnen sich viele technische Möglichkeiten ab, wie BED in der Zukunft Strom, Wärme, Kraftstoffe, Dünger und Wertstoffe für die Industrie bereitstellen und damit maßgeblich zur Bioökonomie beitragen könnten. Die Techniken sind weitgehend verfügbar. Um diese Chancen zu verwirklichen, benötigen BED unbürokratische, klare Regelungen und zielgerichtete Förderungen. Damit die mit viel Bürgerengagement entstandenen Strukturen in BED erhalten bleiben, müssen die entsprechenden politischen Rahmenbedingungen jetzt geschaffen werden, bevor es zu einem „Ausverkauf“ der Energieanlagen in den Dörfern kommt. Geschehe dies, würde die Politik viel Vertrauen der Bürger im ländlichen Raum verspielen und eine dezentrale Energiewende, die von den Bürgern getragen wird, aufs Spiel setzen.

In vielen BED schauen die Aktiven noch optimistisch in die Zukunft und wollen auch über die EEG-Zeit hinaus ihre Anlagen erhalten. Um den Optimismus weiter zu stärken und die notwendigen Investitionen in die Zukunft zu tätigen, braucht es jetzt klare politische Signale.

Literatur/Quellen

- AGFW 2019: AGFW–Hauptbericht 2018, Frankfurt am Main 2019, verfügbar unter <https://www.agfw.de/zahlen-und-statistiken/agfw-hauptbericht/>, Zugriff am 24.04.2020
- BMWi 2019, Entwurf des integrierten nationalen Energie- und Klimaplans, verfügbar unter <https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Textsammlungen/Energie/necp.html>, Zugriff am 24.04.2020
- BNetzA 2020: Pressemitteilung Bundesnetzagentur vom 31.08.2019 - Förderdeckel für zusätzlich installierte Biomasseanlagen erreicht, verfügbar unter https://www.bundesnetzagentur.de/SharedDocs/Pressemitteilungen/DE/2019/20190831_Biomassedekel.html, Zugriff am 24.04.2020
- Daniel-Gromke, J.; Kornatz, P; Dotzauer, M.; Stur, M.; Denysenko, V.; Stelzer, M.; Hahn, H.; Krautkremer, B.; von Bredow, H.; Antonow, K. (2019): Leitfaden Flexibilisierung der Strombereitstellung von Biogasanlagen (Abschlussbericht), verfügbar unter https://www.dbfz.de/fileadmin/user_upload/Referenzen/Studien/20191108_LeitfadenFlex_Abschlussbericht.pdf, Zugriff am 24.04.2020
- EEG, 2017. Gesetz für den Ausbau erneuerbarer Energien (Erneuerbare-Energien-Gesetz - EEG 2017), verfügbar unter <https://www.buzer.de/gesetz/11230/a188365.htm>, Zugriff am 22.04.2020
- Müller-Lohse, L. (2020): Wärmenetze in Deutschland und Frankreich: Bestandsentwicklung, Förderprogramme, Planung und Akteure, verfügbar unter https://energie-fr-de.eu/files/dfaenr/04-notes-de-synthese/02-acces-libre/05-efficacite-chaleur/2020/DFBEW_Waermenetze_2001.pdf, Zugriff am 22.04.2020
- Karpenstein-Machan, M., Wüste, A. und Schmuck, P. (2013): Erfolgreiche Umsetzung von Bioenergiedörfern in Deutschland - Was sind die Erfolgsfaktoren? Berichte über Landwirtschaft, 91, Heft 2, S. 1 - 25. verfügbar unter <http://buel.bmelv.de/index.php/buel/article/view/21/karpenstei-machan-html>, Zugriff am 24.04.2020

Acknowledgement

Projekt „Innovative Konzepte und Geschäftsmodelle für zukunftsfähige Bioenergiedörfer – klimafreundlich, demokratisch, bürgernah (gefördert durch: Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft aufgrund eines Beschlusses des deutschen Bundestags, FKZ 22405817 und 22405218)

Kontakt

Dr. Ines Wilkens, Projektkoordination

Universität Kassel, Fachgebiet Volkswirtschaftslehre
mit Schwerpunkt dezentrale Energiewirtschaft

⌚ (0)561.804-7949 | ✉ ines.wilkens@uni-kassel.de
↗ [/energiewendedörfer.de/](http://energiewendedörfer.de/)

Biogasanlagen neu denken – technisch-ökonomische Charakterisierung für die Einbindung in die modellgestützte Systemanalyse

Zusammenfassung: In Energiesystemanalysen werden Biogasanlagen auch heute noch häufig als Grundlastanlagen modelliert und ihre technischen Potenziale stark vereinfacht. Um flexible Biogasanlagen mit Vor-Ort-Verstromung in Systemanalysen adäquat abbilden zu können, wird im Forschungsprojekt OptiSys (FKZ 03KB129B) untersucht, welche technischen und ökonomischen Eigenschaften hierfür herangezogen werden sollten. Dazu wird analysiert wie hoch die Einflussstärke einzelner Parameter auf die Ergebnisse der Stromgestehungskosten und die Rolle von Biogasanlagen im Gesamtsystem ist. Mit Sensitivitätsanalysen wird das Ziel verfolgt, die Bedeutung einzelner Parameter herauszuarbeiten. Mit den Ergebnissen wurden die Möglichkeiten und die Bedeutung flexibler Biogasanlagen als erneuerbare Flexibilität im Strom-Wärme Sektor visualisiert. Für eine vereinfachte Abbildung in der Systemanalyse können flexible Biogasanlagen auf die Parameter elektrische Nenn- bzw. Bemessungsleistung, Vorgabe eines Flexfaktors bzw. Vollaststunden, elektrischer Wirkungsgrad, Rohbiogaskosten, Investitionsausgaben, variable und fixe Betriebskosten reduziert werden.

Abstract: In energy system analyses, biogas plants are still frequently modelled in base load operation, their technical potential is also greatly simplified. In order to adequately model flexible biogas plants with on-site electricity generation in system analyses, the research project OptiSys (FKZ 03KB129B) examines which technical and economic characteristics should be used for this purpose. To this end, the influence of individual parameters on the results of electricity production costs and the role of biogas plants in the overall system are analysed. Sensitivity analyses are used to work out the importance of individual parameters. The results were used to visualise the possibilities and the importance of flexible biogas plants as renewable flexibility in the electricity and heat sector. For a simplified representation in the system analysis, flexible biogas plants can be reduced to the following parameters: electrical nominal or rated output, specification of a flex factor or full load hours, electrical efficiency, raw biogas costs, investment expenditure, variable and fixed operating costs.

1 Motivation und Zielsetzung

1.1 Motivation

Biogasanlagen mit Vor-Ort-Verstromung leisten aktuell, sowohl nach Anlagenanzahl als auch nach Energiemenge, den größten Beitrag zur Stromerzeugung aus Biomasse (BMWi 2020). Auch in den Zukunftsszenarien kommt vor allem den flexibel betriebenen Biogasanlagen eine große Bedeutung zu (Eltrop 2019), weshalb nachfolgend auf diese Anlagen fokussiert wird.

1.2 Status-Quo der modelltechnischen Adaption von Biogasanlagen in Energiesystemstudien

Der aktuelle Anlagenpark zur energetischen Nutzung von Biomasse im Bereich der Strom- und Wärmeerzeugung ist sehr heterogen. Die Heterogenität äußert sich in der Vielfalt von Anlagentypen und Verfahrenskonzepten, sowie Leistungsklassen und Betriebsformen. Um diese Vielgestaltigkeit der Bioenergie mit ihren anlagenspezifischen Parametern in der Systemanalyse zu berücksichtigen, müssen grundlegende Vereinfachungen und Typisierungen getroffen werden.

Die meisten Energiesystemstudien berücksichtigen die Bioenergie nur auf Basis des Energieträgers Biomasse und unterstellen einen Anlagenpark mit einheitlichen Anlagen, der durch die technisch-ökonomischen Parameter nur eines Technologietyps repräsentiert wird (siehe z.B. in Kost et al. (2018)). Hierfür werden meist Biogasanlagen im Grundlastbetrieb oder maximal einem Flexfaktor von 2 (= doppelte Überbauung) (siehe Tab. 1) herangezogen. Dies wird den technischen Möglichkeiten aktuell und in Zukunft, sowie der Bedeutung einer hohen zeitlichen Flexibilität der Stromproduktion von Biogasanlagen jedoch nicht gerecht. Zum Beispiel wird häufig vereinfacht von einer Anlagengrößenklasse (als Durchschnitt des aktuellen Anlagenbestandes) mit festen Eigenschaften und Kennwerten ausgegangen. Die Tab. 1 zeigt die Differenzierung der Anlagentypen in Leistungsklassen und Flexibilisierungsstufen in verschiedenen Energiesystemstudien. Eine umfangreiche Analyse wird im Forschungsprojekt Opti-Sys (FKZ 03KB129B) durchgeführt, auf dessen Arbeiten diese Veröffentlichung beruht.

Tab. 1: Häufigkeit der berücksichtigten Anzahl an Leistungsklassen und Flexibilisierungsstufen (= Grad der Überbauung) von Bioenergieanlagen in verschiedenen Energiesystemstudien

		Flexibilisierungsstufe					↓ sehr detailliert
		1	2	3	4	5	
Anzahl Leistungsklassen	1	7	7	1	2	1	wenig
	2	1	2	0	1	0	
	3	1	0	0	0	0	
	4	1	0	0	0	0	
	5	1	1	0	0	1	
	6	2	1	0	0	0	
		→ sehr flexibel					

Die Veröffentlichung der technisch-ökonomischen Parameter von Biogasanlagen zeigt in vielen Studien wenig Transparenz auf. Die in diesen Studien bereitgestellten Datensätze weisen teils große Lücken auf oder zeigen lediglich eine geringe Parametervielfalt, wie Tab. 2 deutlich macht. Außerdem sind sie meist stark vereinfacht und gelten entweder spezifisch für eine Größenklasse und

einen Flexibilisierungsgrad oder nennen eine sehr große Bandbreite. Die diesen Studien entnehmbaren Daten repräsentieren dadurch oftmals nicht den vielfältigen Anlagenbestand und können nicht oder nur eingeschränkt auf andere Leistungsklassen übertragen werden. In der Literatur finden sich meist folgende veröffentlichten Parameter um den Anlagenpark zu beschreiben: elektrische Nennleistung, elektrischer Wirkungsgrad, Investitionsausgaben, Betriebskosten und der Flexfaktor (= Grad der Überbauung) bzw. die Vollaststundenzahl (siehe Tab. 2).

Tab. 2: Bandbreite der veröffentlichten technischen und ökonomischen Parameter in verschiedenen Energiesystemstudien

	Parameter	Anzahl der Veröffentlichung
Techn. Parameter	el. Maximalleistung	13
	el. Mindestleistung	3
	max. el. Wirkungsgrad	13
	min. el. Wirkungsgrad	2
	Startrampe	4
	pos. Leistungsräte	4
	neg. Leistungsräte	3
	Mindestbetriebszeit	1
	Mindeststillstandszeit	1
	Flexfaktor	9
Ökon. Parameter	Energieinhalt Gasspeicher	4
	Investitionsausgaben	11
	Variable Betriebskosten	7
	Fixe Betriebskosten	10
	Investitionsausgaben Gasspeicher	4

1.3 Zielsetzung

Mit dem Anspruch auf transparente Dokumentation und Skalierbarkeit der Parameter wird im Forschungsprojekt OptiSys ein einheitlicher Datensatz zur Modellierung flexibler Biogasanlagen für die Systemanalyse geschaffen.

Um den Umfang des Datensatzes auf ein hinreichend komplexes Maß zu reduzieren, wird in der vorliegenden Arbeit untersucht, welche technischen und ökonomischen Eigenschaften zur adäquaten Modellierung flexibler Biogasanlagen notwendig sind. Dazu wird analysiert wie hoch die Einflussstärke einzelner Parameter auf die Ergebnisse der Stromgestehungskosten und die Rolle von Biogasanlagen im Gesamtsystem ist.

2 Methodik zur Identifikation der Einflussfaktoren

2.1 Erstellung eines einheitlichen Datensatzes zur Modellierung flexibler Biogasanlagen

Aus verschiedenen Literaturquellen werden die spezifischen Parameter zu einem vergleichbaren Datensatz für Biogasanlagen mit Vor-Ort-Verstromung zusammengestellt. Mittels einer Regressionsanalyse werden die Zusammenhänge zwischen den abhängigen und unabhängigen Variablen analysiert. Die so ermittelten Regressionsfunktionen werden für alle technischen und ökonomischen Parameter in Abhängigkeit der elektrischen Leistung angegeben. Der Datensatz lässt sich somit auf ein breites Leistungsspektrum und verschiedene Flexibilitätsgrade für Biogasanlagen skalieren. Die Übertragbarkeit auf verschiedene Anlagenkonfigurationen wird damit ermöglicht. Die verwendete Datengrundlage wird im Rahmen des Projekts OptiSys jeweils transparent dargestellt und veröffentlicht. Die Parameter bzw. die Datenauswahl wurden im Projekt OptiSys durch Branchen-Experten aus Wissenschaft, Wirtschaft und Politik validiert und verifiziert.

2.2 Das Prinzip „Ceteris paribus“ zur Identifikation von Einflussfaktoren

Um Aussagen zur Einflussstärke einzelner Parameter zu treffen, wird das Prinzip „Ceteris paribus“ („unter sonst gleichen Bedingungen“) angewendet. Dazu werden zum einen die Methoden der Parametervariation und Sensitivitätsanalyse herangezogen, bei der die Werte einzelner Anlagenparameter variiert werden. Und zum anderen werden Änderungen einzelner Eigenschaften in der modelltechnischen Implementierung vorgenommen. In beiden Fällen werden die Ergebnisse aus der Variation mit den Ergebnissen des Referenzfalls verglichen, um die Wirkung der Variation ableiten zu können.

2.3 Definition der Referenzanlagen und Rechnungsgrundlagen

Mit Hilfe des skalierbaren Datensatzes werden Anlagenkonfigurationen zusammengestellt, um Referenzanlagen zu generieren. Die Referenz repräsentiert Biogasanlagen mit Vor-Ort-Verstromung und der Flexibilisierungsmaßnahme des Leistungszubaus. D.h. durch den Zubau eines größeres BHKW wird die Nennleistung am Standort erhöht und die Betriebszeiten so angepasst, dass die Jahresdurchschnittsleistung (=Bemessungsleistung) gleichbleibt. Das Verhältnis von Nennleistung zur Bemessungsleistung wird als Grad der Überbauung oder Flexibilisierung (kurz Flexfaktor FF) bezeichnet. Als Referenz werden fünf verschiedene BGA-Leistungsklassen definiert, welche jeweils in drei unterschiedlichen Flexibilisierungsgraden vorliegen (siehe Tab. 3).

Tab. 3: gewählte Leistungsklassen und Flexibilisierungsgrade der Biogasanlagen als Referenz

Bezeichnung	Bemessungsleistung [kW]	Flexfaktor (FF) bzw. Grad der Überbauung		
BGA75	75	1,1	2	5
BGA250	250	1,1	2	5
BGA500	500	1,1	2	5
BGA1000	1.000	1,1	2	5
BGA2000	2.000	1,1	2	5

Die Modellsimulation wird nach dem Greenfieldansatz durchgeführt. Um die Stromgestehungskosten verschiedener Technologien vergleichbar zu machen und eine rein kostenoptimale Betrachtung durchführen zu können, werden daher Fördermechanismen, sowie Steuern und Umlagen nicht berücksichtigt. Zur Berechnung der Stromgestehungskosten (Levelized Costs of Electricity LCOE) wird folgende Formeln verwendet.

$$LCOE_{el} =$$

$$\frac{\sum_{t=0}^n \frac{i_t * P_{Bem} * FF + i_{t,BGS} * E_{t,BGS} + b_{t,var} * P_{Bem} * 8.760h + b_{t,fix} * P_{Bem} * FF + b_{t,BG} * \frac{P_{Bem} * 8.760h}{\eta_{el}}}{(1+p)^t}}{\sum_{t=0}^n \frac{P_{Bem} * 8.760h * (1-e)}{(1+p)^t}}$$

$LCOE_{el}$ Stromgestehungskosten [ct/kWh (el)]

i_t Spez. Investitionsausgaben im Jahr t [k€/MW]

P_{Bem} Elektrische Bemessungsleistung [MW]

FF Flexfaktor bzw. Grad der Überbauung [-]

$i_{t,BGS}$ Spez. Investitionsausgaben Biogasspeicher [k€/MWh (H_t)]

$E_{t,BGS}$ Maximaler Energieinhalt des Biogasspeichers [MWh (H_t)]

$b_{t,var}$ Spez. variable Betriebskosten im Jahr t [€/MWh]

$b_{t,fix}$ Spez. fixe Betriebskosten im Jahr t [k€/MW]

$b_{t,BG}$ Spez. Rohbiogaskosten im Jahr t [€/MWh (H_t)]

η_{el} Elektrischer Wirkungsgrad [-]

t Jahr der Nutzungsperiode/ des Betrachtungszeitraums (0, 1, 2, n)

p Realer kalkulatorischer Zinssatz [-]

e Eigenstromanteil [-]

n Wirtschaftliche Nutzungsdauer/Betrachtungszeitraum [a]

Für die detaillierte Analyse wird die Referenzanlage mit einer Bemessungsleistung von 500 kW und Flexfaktor 2 herangezogen (BGA500_FF2). Über diese Vorgaben werden die angewendeten Parameter für die Referenzanlage in Tab. 4 bestimmt.

Tab. 4: Parametersatz für Biogas- Referenz-Anlage mit 500 kW Bemessungsleistung, Flexfaktor 2

Referenz (BGA500_FF2)		
Spez. Investitionsausgaben	1.295	k€/MW
Spez. Gasspeicherkosten	10,37	k€/MWh (H_i)
Gasspeichergröße	9,61	MWh (H_i)
Spez. var. Betriebskosten	8,7	€/MWh
Spez. fix. Betriebskosten	33,1	k€/MW
Spez. Rohbiogaskosten	48,44	€/MWh (H_i)
el. Wirkungsgrad	0,42	-
Eigenstromanteil	0,038	-
kalk. Zinssatz	0,05	-
Betrachtungszeitraum	27	a

3 Einflussfaktoren auf die Abbildung von Biogasanlagen in Energiesystemstudien

Einfluss der Parameter auf die Stromgestehungskosten

Abb. 1 zeigt die Ergebnisse aus der Sensitivitätsanalyse. Es wurden die Parameter aus Tab. 4 als Einflussfaktoren auf die Stromgestehungskosten variiert. Die Bemessungsleistung und der Flexfaktor sind über die Anlagendefinition bestimmt und unveränderlich (in der Berechnung der LCOE Grau markiert). Die Stromgestehungskosten beziehen sich auf die ins Stromnetz eingespeiste elektrische Energie und werden in ct/kWh_{el} angegeben. Als Referenz gelten die berechneten Stromgestehungskosten aus den getroffenen Annahmen in Tab. 4. Die Wirkung der Einflussfaktoren ist in Abb. 1 auf der y-Achse relativ in Bezug zum Absolutwert der Referenz angegeben.

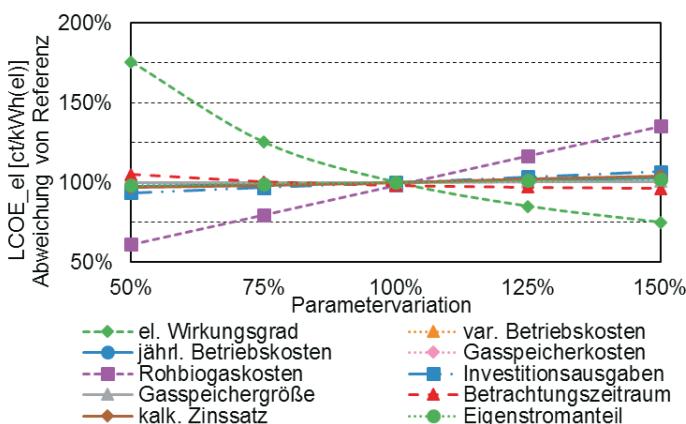


Abb. 1: Sensitivitätsanalyse der Einflussfaktoren auf die Stromgestehungskosten für Referenz aus Tab. 4

Abb. 1 stellt die Einflussstärke einzelner Parameter auf die Stromgestehungskosten in folgender Reihenfolge heraus: elektrischer Wirkungsgrad, Rohbiogaskosten, Betrachtungszeitraum, Investitionsausgaben, variable und jährliche Betriebskosten. Alle anderen Parameter weisen einen vernachlässigbar kleinen Einfluss auf (unter +/- 6 %).

Die Rohbiogaskosten stehen in linearer Abhängigkeit zu den Stromgestehungskosten. Sinken die Rohbiogaskosten um 1 %, so sinken die Stromgestehungskosten um 0,8 %. Der Wirkungsgrad zeigt auf Grund des mathematischen Zusammenhangs (siehe Berechnung LCOE in Kapitel 2.3) keine lineare Proportionalität zu den Stromgestehungskosten. Der Einfluss einer Wirkungsgrad-Reduktion größer ist als die Erhöhung des Wirkungsgrades (siehe Abb. 1).

Bei der Bewertung der Einflussgrößen sollte auch die reale Bandbreite der Absolutwerte berücksichtigt werden. So schwankt real der elektrische Wirkungsgrad je nach verwendeter Literaturquelle bzw. Hersteller lediglich um wenige Prozent, was die mögliche Variationsbreite dieses Parameters in der Realität entsprechend einschränkt. Dies relativiert zwar den Einfluss, führt aber nicht dazu, dass er vernachlässigt werden kann.

Einfluss des Flexibilisierungsgrad von Biogasanlagen auf das Gesamtsystem

Nach Tab. 3 werden im Referenzfall die fünf (Bemessungs-)Leistungsklassen jeweils in drei Flexibilisierungsstufen unterteilt. Vom Referenzfall ausgehend werden zwei Änderungen durchgeführt: zum einen wird die höchstmögliche Flexibilisierungsstufe mit dem Flexfaktor 2 vorgegeben, im anderen wird nur mit Grundlastanlagen gerechnet (maximaler Flexfaktor 1,1). Das Optimierungs-Tool kann frei zwischen den verfügbaren Flexibilisierungsstufen innerhalb der Leistungsklassen wählen. Das heißt im Referenzszenario kann zwischen drei Flexibilisierungsstufen (Flexfaktor 5, 2 und 1,1) und in der Variation 1 zwischen zwei gewählt werden (Flexfaktor 2 und 1,1). Für die Variante 2 stehen nur die Grundlastanlagen (Flexfaktor 1,1) zur Wahl.

Die nachfolgenden Abbildungen zeigen die Simulationsergebnisse des Gesamtsystems für die politischen Zielanteile von 50 % Erneuerbare Energien am Bruttostrom. Auf der x-Achse sind jeweils die Ergebnisse für den Referenzfall (ganz links), sowie für die Variation 1 und 2 nebeneinander aufgetragen.

In Abb. 2 ist auf der y-Achse die Summe der installierten Leistung aller Erzeuger nach Energieträger zu sehen. Wie der rechte Balken in Abb. 2 zeigt, führt eine unflexible Abbildung von Biogasanlagen zu einem kompletten Rückgang der Biogasnutzung. Durch die Beschränkung auf den Flexfaktor 1,1, erfahren die Biogasanlagen die strikte zeitliche Vorgabe zu 90 % der Stunden eines Jahres einspeisen zu müssen, was den Wert ihrer Flexibilität drastisch senkt. Die gleichzeitig sehr hohen Gestehungskosten der Grundlastanlagen sorgen dafür, dass mit sinkenden Flexibilitätsgraden die Anzahl und damit die installierte Leis-

tung der Biogasanlagen sinkt, welche die Simulation einsetzt um ein kostenoptimale Versorgung der Last zu erzielen.

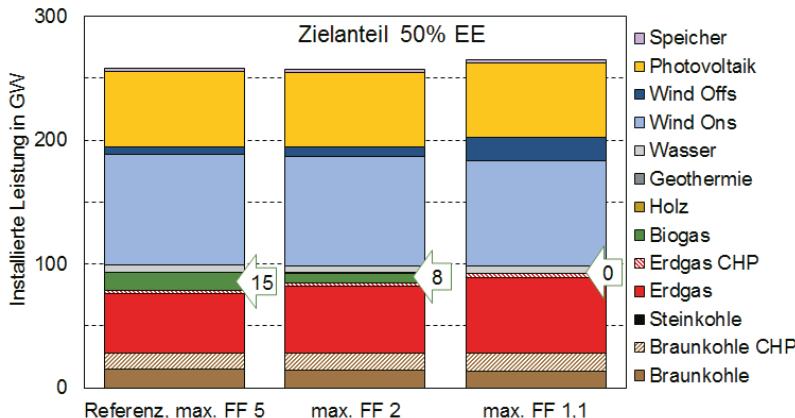


Abb. 2: Installierte Leistung im Gesamtsystem - Referenz mit maximalem Flexfaktor 5 vs. reduzierter maximaler Flexibilisierungsgrad für Biogasanlagen

In Abb. 3 ist auf der y-Achse die Summe der installierten Leistung aller Biogas-Referenz-Anlagen aufgetragen. Die Farben repräsentieren hierbei die (Bemessungs-)Leistungsklasse und die Schattierung (ausgefüllt, schraffiert oder gepunktet) die Flexibilisierungsstufe. Obwohl 5-fach überbaute (flexibilisierte) Anlagen spezifisch höhere Gestehungskosten aufweisen als 2-fach flexibilisierte Anlagen, werden sie im Referenzszenario des Modells berücksichtigt (siehe ausgefüllte Flächen in Abb. 3). Dies kann mit einem hohen Wert der Flexibilität aus Biogasanlagen fürs Energiesystem bewertet werden.

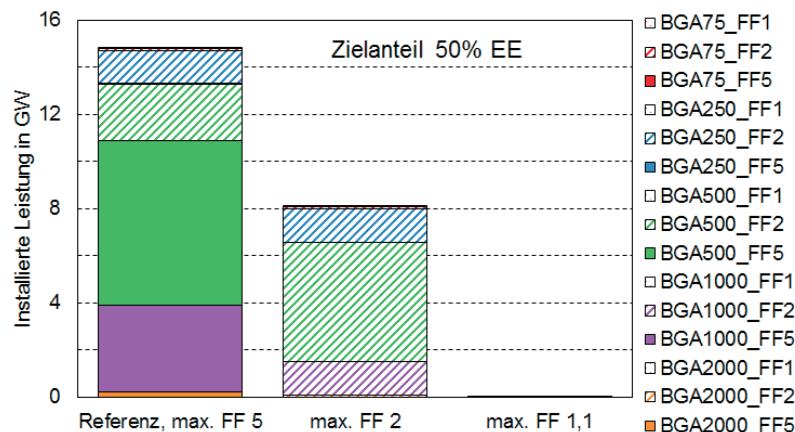


Abb. 3: Aufteilung der installierten Biogasleistung nach Leistungsklasse - Referenz mit maximalem Flexfaktor 5 vs. reduzierter maximaler Flexibilisierungsgrad

Mit einem Anteil von 80 % erneuerbarer Energien in der Zukunft (z.B. Zieljahr 2050) an der Bruttostromerzeugung, verstärkt sich dieser Einfluss. Ein höherer Bedarf an erneuerbarem Strom und eine damit verbundene verstärkte Einspeisung fluktuierender Energieträger sorgen für einen steigenden Flexibilitätsbedarf, welcher durch flexible Biogasanlage zum Teil gedeckt werden kann und andere Flexibilitätsoptionen, wie Erdgas-KWK oder Stromspeicher, weniger notwendig machen (siehe Abb. 2).

Insgesamt zeigt sich, dass die Flexibilisierung sehr sensitiv auf die Rolle bzw. Wertigkeit von Biogasanlagen im Energiesystem wirkt. In Dotzauer et al. (2019) wird der große Einfluss des Leistungsquotienten (entspricht Flexfaktor) zur Beschreibung der Flexibilität von Biogasanlagen bestätigt.

4 Fazit und Ausblick

Die Analyse zeigt, dass die Flexibilisierung von Biogasanlagen einen großen Einfluss auf die Rolle der Biogasanlagen im Rahmen von Energiesystemanalysen hat. Flexible Biogastechnologien können dennoch für eine einfache Abbildung in Energiesystemmodellen auf einige wenige, aber technisch und ökonomisch relevanten Parameter reduziert werden: elektrische Nenn- bzw. Bemessungsleistung, Vorgabe eines Flexfaktor bzw. Vollaststunden, elektrischer Wirkungsgrad, Rohbiogaskosten, Betrachtungszeitraum, Investitionsausgaben, variable und fixe Betriebskosten. Diese konnten in der quantitativen Sensitivitätsanalyse als ergebnisbestimmenden Einflussfaktoren identifiziert werden. Zudem entsprechen sie den meist veröffentlichten Parametern aus der Literaturrecherche (vgl. Tab. 2 in Kapitel 1.2). Sie sollten daher besonders intensiv recherchiert werden, um stärker belastbare Simulationsergebnis zu erzielen. Alle anderen Parameter können für eine vereinfachte Betrachtung vernachlässigt werden, da sie im Vergleich zu den aufgeführten Eigenschaften einen sehr geringen Einfluss auf die Stromgestehungskosten aufweisen.

Der im Rahmen des Projektes OptiSys erarbeitete Datensatz (Veröffentlichung als open data vermutlich Herbst 2020) liefert die Möglichkeit, die entsprechenden Parameter je nach Leistungsklasse (elektr. Bemessungsleistung) und Flexibilisierungsgrad (elektr. Nennleistung) zu skalieren und somit die spezifischen Inputparameter für Energiesystemmodelle zu liefern.

Ist zur Beantwortung der wissenschaftlichen Fragestellung eine detailliertere Abbildung der Biogasanlagen notwendig (z.B. Leistungsgradienten oder Teillastfähigkeit), so sind grundsätzlich detailliertere Daten von Biogasanlagen in das Modell zu integrieren. Außerdem können grundsätzliche Änderungen des Modells wie z.B. kürzere Zeitintervalle (z.B. 15-Minuten) oder eine nichtlineare Optimierung notwendig sein. Bei der Wahl der Detailtiefe, sollte darauf geachtet werden, dass alle Technologien (auch Konkurrenz zu Bioenergie) in einem ähnlichen Detailgrad abgebildet werden sollten, da sie sonst nicht untereinander vergleichbar sind.

Literatur/Quellen

- BMW (2020): Entwicklung der erneuerbaren Energien in Deutschland im Jahr 2019. Grafiken und Diagramme unter Verwendung aktueller Daten der Arbeitsgruppe Erneuerbare Energien-Statistik (AGEE-Stat). Online verfügbar unter https://www.erneuerbare-energien.de/EE/Redaktion/DE/Downloads/entwicklung-der-erneuerbaren-energien-in-deutschland-2019.pdf?__blob=publicationFile&v=29, zuletzt geprüft am 28.03.2020.
- Dotzauer, Martin; Pfeiffer, Diana; Lauer, Markus; Pohl, Marcel; Mauky, Eric; Bär, Katharina et al. (2019): How to measure flexibility – Performance indicators for demand driven power generation from biogas plants. In: Renewable Energy 134, S. 135-146. DOI: 10.1016/j.renene.2018.10.021.
- Eltrop, Ludger (2019): Wertigkeit der Flexibilisierung von Biogasanlagen im Energiesystem. BIOGAS Convention & Trade Fair 2019. Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung der Universität Stuttgart. Nürnberg, 11.12.2019.
- Kost, Christoph; Shammugam, Shivenes; Jülich, Verena; Nguyen, Huyen-Tran; Schlegl, Thomas (2018): Stromgestehungskosten erneuerbare Energien. Fraunhofer ISE, zuletzt geprüft am 18.06.2019.

Kontakt

*M.Sc. Tanja Mast, Wissenschaftliche Mitarbeiterin
im Bereich Energiesystemtechnik*

Institut für neue Energiesysteme (InES)
Technische Hochschule Ingolstadt (THI)

① (0)841.9348-6498 | ☎ tanja.mast@thi.de | ↗ www.thi.de/go/energie

*Dr. Ludger Eltrop, Abteilungsleiter SEE – Systemanalyse und
erneuerbare Energien*

Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung (IER)
Universität Stuttgart

Hessbrühlstrasse 49a, 70569 Stuttgart

① +49 (0)711.685-87816 | ☎ Ludger.eltrop@ier.uni-stuttgart.de

Repoweringmaßnahmen hinsichtlich zukünftiger Aufgaben von Biogasanlagen

Ergebnisse aus dem Projekt REzAB

Keywords: Biogas, Repowering, Konzepte, Bestandsanlagen, Weiterbetrieb

Zusammenfassung: Mit dem Ende der Förderperiode 1 stehen Anlagenbetreiber vor der Entscheidung, ob ein Weiterbetrieb nach 20 Betriebsjahren unter technischen und wirtschaftlichen Gesichtspunkten sinnvoll ist.

Im REzAB-Projekt wurden an 14 repräsentativen Bestandsbiogasanlagen vorbereitende Schritte für den Weiterbetrieb erarbeitet und Repoweringkonzepte, unter der Betrachtung von technischen, (sozio-)ökonomischen und ökologischen Einflüssen, entwickelt. Die im Rahmen der zukünftigen Aufgaben von Biogasanlagen geeigneten Konzeptvarianten wurden identifiziert und bewertet. Neben der Teilnahme am Ausschreibungsverfahren bieten die Kraftstofferzeugung, der Neubau einer Gülle-Kleinanlage nach EEG 2017 sowie der Eigenverbrauch und die Direktlieferung von erzeugtem Strom alternative Zukunftsoptionen. Eine rohgasseitige Bündelung mehrerer lokaler Biogasanlagen oder der Betreiberzusammenschluss zum Betrieb einer Gemeinschaftsanlage steigern die Umsetzungsmöglichkeiten der Zukunftsoptionen. Die rohstoffliche Nutzung von Biomasse durch die Integration einer Bioraffinerie in die bestehende Betriebsstruktur bildet einen weiteren interessanten Ansatzpunkt, dessen Zukunftsfähigkeit von der Entwicklung marktfähiger Technologien abhängig ist.

In der konzeptionellen Bewertung der Repoweringmaßnahmen zeigt sich der positive ökologische Einfluss eines verstärkten Wirtschaftsdüngereinsatzes in den entwickelten Zukunftskonzepten. Zusätzlich lassen sich die Anlageneffizienz und somit die Wirtschaftlichkeit durch die anlagen- und betriebsorganisierenden Repoweringmaßnahmen steigern (Grösch et al. 2020).

Abstract: With the end of the remuneration period, biogas plant operators are facing the decision to continue the plant operation by evaluating technical conditions and economic perspectives.

In total, 14 representative biogas plants were examined in the REzAB-project to reveal process steps for a prospective plant operation and to develop plant concepts considering the technical, (socio-)economic and ecological impacts. In terms of the future-oriented purposes of biogas plants, the following appropriate concepts were identified and evaluated. In addition to taking part in a bidding process, the use of biogas as fuel for transportation, the construction of a small scale biogas plant with focus on manure digestion and the own consumption and distribution of electricity represent alternative options. Both, the collection of biogas from local biogas plants and the merger of biogas plant operators to manage one biogas plant contribute the

sustainability of existing plants. Besides, the creation of bio-based raw materials in a biorefinery constitutes a promising approach, which is depending on the development of marketable technologies. An evaluation of the developed future-oriented concepts results in ecological and economical insights. The input of livestock manure and dung has a positive ecological effect on the greenhouse gas emissions.

Developed technical measures and optimization of the operational organisation increase the plant efficiency and profitability (Grösch et al. 2020).

Zielsetzung/-stellung im Projekt REzAB

Durch die Teilnahme an Ausschreibungen bietet die im EEG 2017 eingeführte An schlussförderung für Bestandsbiogasanlagen die Möglichkeit, zusätzliche Vergütungen über einen Zeitraum von 10 Jahren nach dem Ende der Förderperiode 1 in Anspruch zu nehmen (EEG 2017).

Die Perspektive, die Bestandsbiogasanlagen zukünftig unter den novellierten förderpolitischen Rahmenbedingungen weiterzubetreiben, stellt Anlagenbesitzer und Betreiber vor technische und wirtschaftliche Fragestellungen.

Die wesentliche Herausforderung besteht dabei in der Schaffung einer belastbaren Informationsgrundlage zu dem Anlagenzustand und dem resultierenden Aufwand, die Bestandsanlagen entsprechend den Anforderungen der Ausschreibungen zu ertüchtigen. Des Weiteren können alternative Betriebskonzepte außerhalb der förderpolitischen Leitlinie unter Berücksichtigung der spezifischen Anforderungen mögliche Optionen für den Weiterbetrieb bieten.

Vor dem Hintergrund dieser Fragestellungen wurden im Rahmen des Verbundprojekts: „Repoweringmaßnahmen hinsichtlich zukünftiger Aufgaben von Biogasanlagen (REzAB)“, gefördert durch das Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft, ausgewählte Bestandsbiogasanlagen in Bayern und Nordrhein-Westfalen untersucht. Das übergeordnete Forschungsziel des Projekt konsortiums, bestehend aus der Technischen Hochschule Ingolstadt, der FH Münster und dem C.A.R.M.E.N. e.V., bestand darin, zukunftsfähige Anlagenkonzepte für den Weiterbetrieb nach dem Ende der Förderperiode 1 auf der Grundlage von Repoweringmaßnahmen zu erarbeiten und unter den wesentlichen technischen, ökologischen und (sozio-)ökonomischen Rahmenbedingungen zu bewerten.

Methodik

Im Zuge der Vorbereitung für die Durchführung der Anlagenuntersuchungen wurde eine Auswahl von 14 Biogasbestandsanlagen vorgenommen, die einen repräsentativen Querschnitt der bestehenden Biogasanlagen in Deutschland abbildet. Die erforderlichen Spezifikationen zur weitreichenden Deckung des bundesweiten Anlagenbestands wurden in einer Kriterienmatrix zusammenge-

fasst, welche im Rahmen des Projekts auf der Grundlage von Anlagenbestandsdaten und bis dato veröffentlichten Studien erstellt wurde.

Im Anschluss erfolgte eine Erfassung des IST-Stands der ausgewählten Bestandsbiogasanlagen anhand einer umfassenden Betreiberbefragung und Anlagenbegehung. Begleitet wurde die Anlagendokumentation durch labortechnische Analysen zur Bestimmung der Restgasbildungspotenziale, die messtechnische Erfassung anlagenspezifischer Eigenstromverbräuche, die Detektion von Methanleckagestellen und eine Abschätzung der Wärmenutzungspotenziale durch Identifikation von lokalen Wärmesenken. Für die Bewertung des sicherheits- und bautechnischen Zustands wurden die ausgewählten Bestandsbiogasanlagen gemeinsam mit einem nach §29b BlmSchG zertifizierten Sachverständigen begutachtet, sowie umfassende Betonuntersuchungen an vier Biogasfermentern durch zertifizierte sachkundige Planer für Betoninstandhaltung durchgeführt.

Auf der Grundlage der in der IST-Stand-Analyse erarbeiteten Anlagendokumentationen wurden an den untersuchten Bestandsbiogasanlagen die Schwachstellen in den Handlungsfeldern Technik, Ökonomie, Ökologie und Sozio-Ökonomie identifiziert und bewertet.

Basierend auf den gewonnenen Erkenntnissen und der Definition von Anforderungen an mögliche Zukunftsoptionen wurden zielführende Repoweringmaßnahmen formuliert und zu Gesamtkonzepten zusammengefasst, die Zukunftsperspektiven für bestehende Biogasanlagen aufzeigen. Darauf aufbauend wurde eine Methodik erarbeitet, die den Anlagenbetreibern den Weg von der Zustandsbewertung der eigenen Anlage zur Ableitung der vorbereitenden Generalüberholungsmaßnahmen bis zur Auswahl eines geeigneten Zukunftskonzeptes beschreibt. Neben den Maßnahmen zur Umsetzung der zukunftsfähigen Gesamtkonzepte wurden konzeptübergreifende und konzeptspezifische Effizienzsteigerungsmaßnahmen aus der Schwachstellenanalyse mit dem Ziel abgeleitet, die Gesamteffizienz der Zukunftsoptionen zu steigern. Die generierten Konzepte und Maßnahmen wurden gemeinsam mit der entwickelten Methodik als Handlungsempfehlungen in einem Leitfaden formuliert und zusammengeführt.

Ergebnisse

Die Bestandsbiogasanlage auf den Weiterbetrieb vorbereiten:

Im Rahmen der Projektarbeit stellte sich heraus, dass die sicherheits- und bautechnischen Prüfungen an den Bestandsbiogasanlagen vorbereitende Maßnahmen auf den Weiterbetrieb identifizieren und den Investitionsbedarf für die anstehende Generalüberholung abschätzen lassen. In der Tabelle 1 ist der Prüfumfang der beiden Begutachtungen dargestellt.

Tab. 1: Prüfumfang der sicherheits- und bautechnischen Begutachtung (Grösch et al. 2020)

	Sicherheitstechnische Prüfung	Bautechnische Prüfung
Prüfer:	Zertifizierter Sachverständiger nach §29b BlmSchG	Zertifizierter sachkundiger Planer für Betoninstandhaltung
Kosten:	1.500 – 3.000 €, je Anlagengröße und Genehmigungssituation	3.000-3.500 €, je Behälter zzgl. Anfahrt
Zeitraum:	5 Jahre vor Ende der Förderperiode 1	5 Jahre vor Ende der Förderperiode 1
Was es zu beachten gilt:	Ersetzt keine Prüfung nach: §29a BlmSchG, AwSV, BetrSichV, DGUV V3	Im Zuge anstehender Behälterrevisionen durchführen
Umfang:	Anlagen- und sicherheitstechnisches Konzept Einhaltung Genehmigungskonformität Vollständigkeit Anlagendokumentation Ermittlung Generalüberholungsbedarf für zukünftigen Anlagenbetrieb	Betonzustand der Gärbehälter Abklopf- und Ritzprüfungen Karbonatisierungstiefe Sulfatgehalt im Beton Betondeckung und Betonschutz

Die sicherheitstechnische Prüfung, deren Inhalte individuell an die geltenden und zukünftigen einschlägigen Regelwerke abgestimmt sind, ermöglicht eine Bedarfsermittlung an sicherheitsrelevanten Maßnahmen für den Weiterbetrieb. Die bautechnische Prüfung wird an den Gärbehältern durchgeführt und dient der Bewertung des Behälterzustands, konkret den Betonzustand. Bautechnische Sanierungsmaßnahmen werden identifiziert, um die Standsicherheit der Gärbehälter für den Weiterbetrieb zu gewährleisten.

Nachfolgend ist ein beispielhafter Auszug der im Projekt erarbeiteten Maßnahmen für eine Generalüberholung der Bestandsbiogasanlagen dargestellt. Dabei wird die Notwendigkeit der Maßnahmen in kurzfristig (rot), mittelfristig (gelb) und langfristig (grün) differenziert.

Tab. 2: Generalüberholungsbedarf ermittelt aus REZAB-Projektuntersuchungen (Grösch et al. 2020)

1. Substratlager	2. Gärbehälter - Zustand
Dichtes und standsicheres Fahrsilo mit Leckageerkennung	Sanierung Gasraum und Erneuerung Betonschutz
3. Gärbehälter - Messtechnik	4. Gärbehälter - Sicherheitskonzept
Sicherheits- und Überwachungseinrichtungen (Füll-, Überfüll-, Feuchte-, Unterdrucksensoren)	Havariekonzept
5. BHKW	6. Anlagendokumentation
Emissionsarme Verbrennung (z.B. Nachrüstung SCR-Katalysator)	Aktualisierung der Betreiberdokumentation

Geeignete Zukunftskonzepte für den Weiterbetrieb

Neben der Teilnahme am Ausschreibungsprozess als wesentliche förderpolitische Zukunftsoption eröffnen sich durch alternative Vermarktungswege von Biogas und technische Innovationen in der Branche neue Perspektiven für den zukünftigen Weiterbetrieb. In den Projektuntersuchungen ließen sich die gesetzlichen und förderpolitischen Rahmenbedingungen an den zukünftigen Anlagenbetrieb, die lokalen und regionalen Situationen, sowie die technischen Voraussetzungen evaluieren und bilden die Grundvoraussetzungen für die nachfolgend gelisteten entwickelten Zukunftskonzepte.

Die vorgestellten Konzeptvarianten erfordern unterschiedliche Voraussetzungen und Anforderungen an die Bestandsbiogasanlage, weshalb eine Bewertung der aktuellen Umsetzungs- und Zukunftsfähigkeit vorgenommen wurde.

Tab. 3: Repoweringkonzepte für den zukünftigen Anlagenbetrieb (Grösch et al. 2020)

Nr.	Zukunftskonzept	Konzeptbeschreibung	Bewertung
1	Teilnahme an Ausschreibung	Verstromung von Biogas im flexiblen Anlagenbetrieb und Erhalt einer Vergütung durch die erfolgreiche Teilnahme an der Ausschreibung	Gut
2	Bereitstellung von Kraftstoff (Bio-CNG-Tankstelle)	Biogas auf Kraftstoffqualität aufbereiten und durch eine öffentliche Tankstelle für den Verkehrssektor bereitstellen oder über eine Hoftankstelle den eigenen Fuhrpark versorgen	Befriedigend
3	Neubau einer Gülle-Kleinanlage	Stilllegung und Erhalt von Komponenten der Bestandsanlage. Neubau und Inbetriebnahme einer Gülle-Kleinanlage am Standort	Gut
4	Eigenverbrauch und Direktlieferung	Eigenverbrauch im eigenen Betrieb oder direkte Lieferung des erzeugten Stromes an Stromkunden über ein eigenes Stromnetz	Befriedigend
5	Rohgasseitige Bündelung mehrerer Biogasanlagen	Zusammenschluss mehrerer lokaler Biogasanlagen zur Lieferung von Biogas über ein Rohgasnetz an einen zentralen Knotenpunkt zur gemeinsamen Vermarktung	Befriedigend
6	Zusammenschluss der Anlagenbetreiber und Weiterbetrieb einer Gemeinschaftsanlage	Betrieb einer gemeinsamen Biogasanlage durch Zusammenschluss lokaler Anlagenbetreiber. Verbleibende Biogasanlagen werden mit dem Auslaufen der Förderperiode 1 stillgelegt	Befriedigend
7	Stoffliche Nutzung durch Umbau der Biogasanlage auf Bioraffinerie	Synthetisieren von Grundchemikalien und Lignin für Industrieanwendungen durch Integration einer Bioraffinerie und Aufbereitung von Biogas aus dem Gärprozess für technische Anwendungen und Prozesse	Zukunfts-vision

Allgemeingültige Aussagen zur Eignung der aufgelisteten Zukunftsoptionen zu treffen ist aufgrund der vielseitigen Konzeptvarianten der Bestandsbiogasanlagen nicht möglich. Dennoch ließen sich im Rahmen der Projektarbeit konzeptspezifische Voraussetzungen ableiten, die es zu erfüllen gilt, um die Zukunfts- und Umsetzungsfähigkeit der einzelnen Repoweringkonzepte zu steigern. Diese wurden in einer Entscheidungshilfe zusammengefasst. Erfüllen Bestandsbiogasanlagen die Anforderungen an ein potenzielles Zukunftskonzept, bestehen gute Voraussetzungen, den Weiterbetrieb wirtschaftlich darzustellen.

Tab. 4: Auszug von ausgewählten Voraussetzungen aus der Entscheidungshilfe (Grösch et al. 2020)

Teilnahme an Ausschreibung
Flexibilisierung – mindestens doppelte Überbauung der geplanten Bemessungsleistung realisierbar
150 Tage gasdichte Verweildauer besteht bzw. ist zukünftig umsetzbar
Bereitstellung von Kraftstoff (Bio-CNG-Tankstelle)
Hoher Reststoffanteil mit langfristiger Versorgungssicherheit umsetzbar (Quotenhandel nach RED II)
Standortnahe Abnehmer für Biometankraftstoff vorhanden (eigener Fuhrpark, Bundesstraße etc.)
Neubau einer Gülle-Kleinanlage
Vorbehaltlose Zusage des Netzbetreibers für eine nach EEG förderfähige Neuanlage erzielbar
Hoher Wirtschaftsdüngeranteil mit langfristiger Versorgungssicherheit erreichbar
Eigenverbrauch und Direktlieferung
Vermarktungsweg für Strom und Wärme in räumlicher Nähe vorhanden
Bereitschaft als Stromlieferant über Direkteleitungen zu agieren
Rohgasseitige Bündelung mehrerer Biogasanlagen
Biogasanlagen mit ähnlichem Inbetriebnahmedatum in räumlicher Nähe vorhanden
Bereitschaft mit anderen Betreibern ein Gemeinschaftsprojekt umzusetzen besteht
Zusammenschluss der Anlagenbetreiber und Weiterbetrieb einer Gemeinschaftsanlage
Biogasanlage als Sondernutzungsgebiet bereits genehmigt
Bereitschaft mit anderen Betreibern ein Gemeinschaftsprojekt umzusetzen besteht

Bewertung der erarbeiteten Repoweringkonzepte unter Be trachtung der ökonomischen und ökologischen Aspekte:

An den untersuchten Beispielanlagen und an einer 500 kW_e-Standardanlage wurden für die entwickelten Repoweringkonzepte die Gestehungskosten und Gesamtkapitalrentabilitäten berechnet, um somit die Zukunftsfähigkeit ökonomisch abzuschätzen. Grundsätzlich spiegeln die Berechnungsergebnisse wider, dass insbesondere Biogasanlagen, welche möglichst eine Vielzahl der konzeptspezifischen Voraussetzungen aus der formulierten Entscheidungshilfe

erfüllen, eine höhere Gesamtkapitalrentabilität im jeweiligen Zukunftskonzept erreichen.

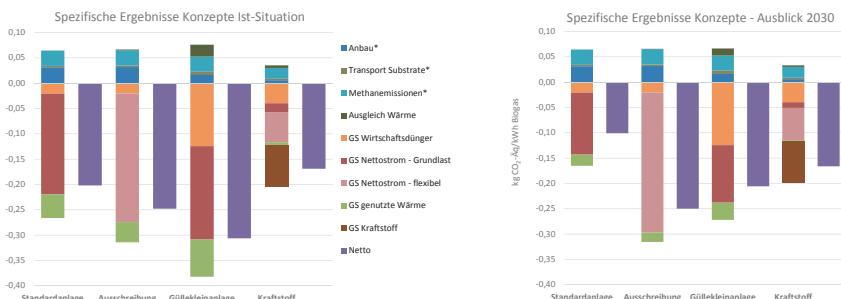
Die Wirtschaftlichkeit der Standardanlage lässt sich bei drei betrachteten Konzeptvarianten darstellen, wobei die Teilnahme an der Ausschreibung mit einer Gesamtkapitalrentabilität von 13,2 % im Vergleich zur Bereitstellung als Kraftstoff mit 10,3 % und dem Neubau einer Gülle-Kleinanlage mit 11,8 % am höchsten ist. Die weiteren Zukunftskonzeptvarianten ließen sich aufgrund der Varianz in den Standortannahmen und der teils fehlenden Praxisreife nicht repräsentativ abbilden und werden deshalb nicht in der Wirtschaftlichkeit berücksichtigt. Die in Tabelle 5 gelisteten Grunddaten der Standardanlage bilden die Basis für die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung und die Bewertung des Klimaschutzbeitrags.

Tab. 5: Grunddaten der 500 kW_{el}-Standardanlage zur Betrachtung der Wirtschaftlichkeit und ökologischen Einflüsse (Grösch et al. 2020)

	Standardanlage	Ausschreibung	Güllekleinanlage	Kraftstoff
Substrateneinsatz [t/a]	12.620	14.990	5.090	12.600
Anteil WD [%]	30 %	32 %	84 %	87 %
Methanertrag [kWh/a]	10.085.024	11.464.433	1.799.316	10.059.460
Nettostrom [kWh/a]	3.556.447	3.812.707	589.861	1.097.693
Anteil flexible Stromeinspeisung	0 %	100 %	0 %	70 %
Verkaufte Wärme [kWh/a]	1.451.990	1.400.000	404.846	168.102
Ausgleich für Wärme [kWh/a]	-	51.990	1.047.144	1.283.888
durch		100 % Spitzenlastölkessel	10 % Öl, 90% Holz-HW	10 % Öl, 90% Holz-HW
Kraftstoffsubstitution [kWh/a]				2.624.437

Eine Einschätzung der möglichen Klimaschutzbeiträge kann ebenfalls nur für die drei Konzeptvarianten ermittelt werden. Für die gegenwärtige Situation sind die Zukunftskonzepte gegenüber der Standardanlage umso vorteilhafter umso umfassender eine flexible Stromerzeugung realisiert werden kann, durch die fossile Reservekraftwerke entlastet werden. Demgegenüber ist eine Kraftstoffnutzung in der Ist-Situation noch etwas im Nachteil. Mit dem 10-Jahreshorizont (Ausblick 2030) ändert sich dies jedoch durch die zunehmende Dekarbonisierung der Stromerzeugung. Eine „Standardanlage“, die in Grundlast fährt, erzielt dann geringere Entlastungspotenziale. Durchweg vorteilhaft ist das Konzept der Gülle-Kleinanlage durch die Vermeidung von Methanemissionen aus der Lagerung von Rohgülle. Dieser Aspekt bleibt auch bestehen, wenn im Jahr 2050

Treibhausgasneutralität erreicht ist. Aus Klimaschutzsicht bieten die Zukunfts-konzepte mittelfristig, die Vergärung von Wirtschaftsdüngern und Reststoffen auch langfristig einen relevanten Beitrag. Aus Naturschutzsicht sind zudem Synergien zwischen Biogaserzeugung und ökologischem Landbau möglich.



*) mit Pauschalwerte berechnet

Repowering hinsichtlich technischer und organisatorischer Effizienzsteigerung

Es bestehen vielzählige Möglichkeiten die Anlageneffizienz sowohl konzeptübergreifend als auch konzeptspezifisch zu steigern. Die bereits beschriebenen durchgeführten anlagen- und labortechnischen Analysen ermöglichen die Ableitung von Maßnahmen zur Steigerung der Wirtschaftlichkeit im Hinblick auf den Anlagenbetrieb und den Fermentationsprozess. Es zeigte sich, dass vorwiegend die regelmäßigen Untersuchungen der Substrat- und Prozessparameter wesentliche Optimierungspotenziale identifizieren. Hierbei sind regelmäßige Restgaspotenzialanalysen gute Indikatoren für die Gesamtbewertung der anaeroben Vergärung. Besteht ein hohes Restgasbildungspotenzial, so sind die Ursachen, beispielweise in der Substratverwertung oder Stabilisierung des Gärprozesses zu suchen. Dementsprechend lassen sich die notwendigen Maßnahmen, wie die Erhöhung der hydraulischen Verweildauer, die Integration einer geeigneten Voraufschlusstechnik, die Optimierung der Substratlagerung, die Anpassung der Prozessparameter oder der Einsatz von Prozesshilfsstoffen ableiten.

Analysen der Strom- und Wärmenutzung, sowie die Messung und Überwachung der Eigenbedarfe an Bestandsbiogasanlagen decken ebenfalls Einsparpotenziale auf. Ein hoher Eigenstrombedarf lässt sich durch die gezielte Optimierung der Einbring- und Rührtechnik maßgebend senken. Wird zusätzlich das laufende BHKW regelmäßigen Wartungen unterzogen und findet in regelmäßigen Abständen eine Generalüberholung statt, beziehungsweise werden alte BHKW rechtzeitig ausgetauscht, so werden die Stromeinsparpotenziale an Bestandsbiogasanlagen in der Regel ausgeschöpft.

Untersuchungen auf vorhandene Wärmesenken in der Region um die Biogasanlage lassen in Zusammenhang mit der konzeptionellen Zukunftsplanung die Gesamteffizienz der Biogasanlage steigern, wenn durch den Wärmeverkauf marktübliche Einnahmen erzielt werden.

Die Begehung der Biogasanlage mit einem Methanschnüffler, welcher bereits mit einem Einkaufspreis von 500 € zu erwerben ist, deckt Methanleckagen auf, die sich überwiegend mit wenig Aufwand und geringen Investitionen beheben lassen. Treibhausgasemissionen werden gesenkt und die Anlageneffizienz erhöht. Die Steigerung des Wirtschaftsdüngeranteils im Substratmix bringt neben den ökologischen Vorteilen auch positive wirtschaftliche Aspekte. Im Zukunftskonzept „Bereitstellung von Kraftstoff (Bio-CNG-Tankstelle)“ erhöht der Wirtschaftsdüngereinsatz die Anrechenbarkeit an dem Quotenhandel nach RED II und die damit verbundenen Erlöse. Die Grundlage stellt die Umsetzung der RED II in deutsches Recht dar, welche bis Ende 2020 erfolgen muss (EU 2018).

Die Messtechnik an der Biogasanlage ist neben der Anlagenüberwachung ein wesentliches Instrument zur Einschätzung der Gesamteffizienz, vorausgesetzt, dass die gemessenen Daten entsprechend dokumentiert und ausgewertet werden. Werden die Messdaten in das Betriebstagebuch eingebunden lassen sich Langzeiteffekte abbilden.

Ausblick

Biogasanlagen werden auch in Zukunft einen systemrelevanten Beitrag zum Energiesystem und Klimaschutz leisten können. Die im REzAB-Projekt erarbeiteten Ergebnisse und die Formulierung einer Handreichung sollen dazu beitragen, die Anlagenbetreiber bei der Umstellung der Bestandsbiogasanlagen entsprechend den Anforderungen für den Weiterbetrieb zu unterstützen und die Erarbeitung von konzeptionelle Zukunftsmöglichkeiten selbstständig zu ermöglichen. Beratungsinitiativen, Sachkundige und Experten sind in der Planungs- und Umsetzungsphase dennoch stets hinzuzuziehen.

Die Vielseitigkeit der vorgestellten Konzeptvarianten für den zukünftigen Anlagenbetrieb verdeutlicht die Flexibilität der Biogastechnologie, nicht nur im Hinblick auf die Stromerzeugung, sondern auch auf das Potenzial, alternative Vermarktungswege zu erschließen. Hierbei gilt es, die dafür notwendigen Vermarktsstrukturen regional aufzubauen. Der Weiterbetrieb trägt zum Erhalt der bestehenden lokalen Wertschöpfungsketten und Infrastrukturen, die durch die Biogasbranche in den letzten 20 Jahren aufgebaut wurden, bei.

Neben der bedarfsgerechten Stromerzeugung als Ausgleich volatiler Erzeugungskapazitäten bieten der Biomethan- und Kraftstoffsektor technisch darstellbare und aussichtsreiche Zukunftsoptionen für Bestandsbiogasanlagen. Ergänzend können durch den vermehrten Einsatz von Wirtschaftsdüngern und Reststoffen in landwirtschaftlichen Biogasanlagen die Treibhausgasemissionen

im Agrarsektor weiter reduziert werden. Ein Zusammenschluss von Biogasanlagen und -betreibern bündelt nicht nur die Erzeugungskapazitäten, sondern auch das über die Jahre gesammelte wertvolle Know-how. Die Herstellung von Grundchemikalien und Nutzung der Produkte im Industriesektor ist bisher noch eine Zukunftsvision und bedarf technischer Innovationen, die jedoch gute Perspektiven für zukünftige Aufgaben von Biogasanlagen bieten kann.

Die zielführende Erschließung der bestehenden Potenziale lässt sich dabei durch gezielte förderpolitische Anreizprogramme für die Entwicklungen der Biogasbranche steuern.

Im Rahmen der Projektarbeit wurde deutlich, dass die Zukunftsfähigkeit der erarbeiteten Repoweringkonzepte maßgebend durch die Schaffung eines konstruktiven, auf die Rahmenbedingungen und Lebenswirklichkeit ausgerichteten Förderrahmens entscheidend gestärkt werden kann.

Literatur/Quellen

EEG 2017 Erneuerbare-Energien-Gesetz vom 21. Juli 2014 (BGBl. I S. 1066), das zuletzt durch Artikel 1 des Gesetzes vom 17. Dezember 2018 (BGBl. I S. 2549) geändert worden ist.

Grösch et al. 2020 Grösch, N., Saidi, A., Grüner, V., Baumkötter, D., Brügging, E., Glötzl, M., Kilburg, U., Gleich, J., Wagner, R., Vogt, R., Wetter, C., Zörner, W.: Biogas nach dem EEG – (wie) kann's weitergehen?, 1. Auflage, Stoltz Druck GmbH, Mitterfels, 2020

EU 2018 Europäische Union (EU): RICHTLINIE (EU) 2018/2001 DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTS UND DES RATES vom 11. Dezember 2018 zur Förderung der Nutzung von Energie aus erneuerbaren Quellen (Neufassung), Amtsblatt der Europäischen Union, 21.12.2018, L 328/82.

Kontakt

M.Sc. Norbert Grösch, Wissenschaftlicher Mitarbeiter

Technische Hochschule Ingolstadt, Institut für neue Energie-Systeme

Esplanade 10, 85049 Ingolstadt

① +49(0)841.9348-6458 | ☎ norbert.groesch@thi.de

Stickstoffreduktion und Prozessoptimierung durch Erhöhung der Proteinverfügbarkeit in BGAs mittels Enzymen aus Feststofffermentation

Zusammenfassung: Unter bestimmten Umständen kann es in Biogasanlagen trotz ausreichend hoher Versorgung mit Gesamt-Stickstoff aus dem Fütterungssubstrat zu einer Stickstoffunversorgung kommen. Die gesamten Mikroorganismen im Biogasprozess können nicht optimal arbeiten, wenn sie nicht über ausreichend viel nutzbaren Stickstoff verfügen können. Erkennbar wird die Unterversorgung des für Bakterien verfügbarem Stickstoff anhand eines geringen NH₄-Gehalts von unter 0,1 % in der Frischmasse. Grund ist dabei sehr häufig eine schlechte Verfügbarkeit des Stickstoffs für die Mikroorganismen. Die Verwertung von Stickstoff aus schwer zugänglichen Proteinbestandteilen im Biogasprozess konnte durch Zugabe gezielter Enzyme optimiert werden. Bei den dabei eingesetzten Enzymen handelt es sich nicht um reine Proteasen, sondern um eine Enzymmischung welche vorrangig die Gerüstsubstanzen, die das Protein ummanteln, zersetzt und einen Abbau des Proteins erst ermöglicht. Damit wäre man in der Lage in rund 19 % aller Biogasanlagen eine Verbesserung der Stickstoffversorgung zu erzielen und auf die sonst notwendige, sowie übliche Fütterung von zusätzlichen Stickstoffquellen (Harnstoff) zu verzichten. Die Düngebilanz könnte durch Reduzierung der gesamten Stickstoffgehalte im Biogasgärrest optimiert werden.

Abstract: Under certain aspects a nitrogen shortage might occur in biogas plants despite a sufficiently high supply of total nitrogen from the feeding substrate. All micro-organisms in the biogas process cannot work in the best possible way, if there is not enough nitrogen available. A very low NH₄-N content of under 0.1 % in the fresh mass shows the deficit of available nitrogen for bacteria. This is very often due to poor nitrogen availability for micro-organisms. The use of nitrogen from badly accessible protein components of the biogas process could be optimized by feeding tailored enzymes. The added enzymes are not pure proteases, but an enzyme blend, which primarily destroys the structural substances, which are coating the protein and thus allow the degradation of proteins himself. So it would be able to achieve an improvement of nitrogen supply of about 19 % in all biogas plants and to abandon the otherwise necessary and usual feeding of additional nitrogen sources (urea). The balance of total nitrogen in fertilization could be optimized by reducing the total nitrogen content in the biogas digester residues.

1 Die Bedeutung von verfügbarem Stickstoff in Biogasanlagen

Für die Produktion von Biogas in einer Biogasanlage ist das Vorhandensein, die Aktivität, das Wachstum und die Vermehrung von verschiedenen Bakterien notwendig. Die Geschwindigkeit des Bakterienwachstums hängt von genetischen, aber auch von umweltbedingten Faktoren, wie Nährstoffverfügbarkeit oder Wachstumshemmer, ab.

Die folgende Übersicht von Herrn Peter Weiland [1] zeigt die notwendigen Bedingungen und Einflussgrößen für verschiedene Stufen des Biogasprozesses, die relativ ähnliche Ansprüche an den Nährstoffbedarf haben.

Einflußgröße	Hydrolyse/Versäuerung	Methangärung
Temperatur	25 - 35 °C	mesophil: 32 - 42 °C thermophil: 50 - 58 °C
pH-Wert	5,2 - 6,3	6,7 - 7,5
C:N-Verhältnis	10 - 45	20 - 30
Feststoffgehalt	< 40 %TS	< 30 % TS
Redox-Potential	+400 - -300 mV	< -250 mV
Nährstoffbedarf C:N:P:S	500 : 15 : 5 : 3	600 : 15 : 5 : 3
Spurenelemente	keine spez. Ansprüche	essentiell: Ni, Co, Mo, Se

FAL - TB Weiland	Milieuanforderungen für die Vergärung von Roh- und Reststoffen	W0104134 CDR
------------------	--	-----------------

Das C:N-Verhältnis liegt zwischen 10 und 45, und zeigt die Wichtigkeit einer ausreichenden Menge an Stickstoff für den mikrobiologischen Prozess. Tatsächlich ist jedoch für einen optimalen Biogasprozess die analytische Zusammensetzung aus Kohlenstoff : Stickstoff (C:N zwischen 10 und 45) nicht ausreichend. Untersuchungen haben vielmehr ergeben, dass eine Verschlechterung des Biogasertrages mit einer Verringerung des Ammonium-Stickstoffes einhergeht, welchen die an der Biogaserzeugung beteiligten Mikroorganismen für den Stoffwechsel benötigen. Es gibt Fälle bei denen zwar der Gesamt-Stickstoff in dem Fermenterschlamm ausreichend hoch ausfällt und auch das C:N –Verhältnis passt, dennoch jedoch zu wenig Ammonium-Stickstoff vorhanden ist und der Prozess instabil läuft.

Es konnte in Versuchen gezeigt werden, dass für einen optimalen Biogasprozess mit einer Faulraumbelastung zwischen 2,5 bis 7,0 kg organischer Trockenmasse je m³ Fermenterschlamm und Tag mindestens 0,05 % besser noch 0,1 % NH₄-N in der Frischmasse des Fermenterschlamms erforderlich sind. Wird dieser Wert unterschritten, wird der Biogasprozess zunehmend instabil und die Methanbildung geht zurück. Außerdem steigt im Fermenterschlamm die Konzentration der organischen Säuren an, der pH-Wert sinkt und der Puffer reduziert sich deutlich.

Das bedeutet, es gibt in Substraten mehr oder weniger viele Proteinverbindungen, die für die Mikroorganismen quasi nicht verdaulich sind und somit nicht den Mikroorganismen im Biogasprozess zur Verfügung stehen. Angezeigt wird dies an einem verhältnismäßig geringen NH₄-N-Gehalt im Fermenterschlamm.

2 Kontinuierlicher Biogasversuch mit schwerverfügbarem Stickstoff im Fütterungssubstrat (Oliventrester)

In einem umfangreichen Biogasversuch in mehreren kontinuierlich betriebenen Biogasermentern der ISF GmbH wurde im Jahr 2013 ein Versuch zur Vergärung von Oliventrester -dem feste Reststoff aus der Olivenölgewinnung- durchgeführt. In verschiedenen Literaturquellen ist beschrieben, dass die Vergärung von Oliventrestern als Monosubstrat nach etwa einer Verweilzeit zum Erliegen kommt. Als Ursache wird unter anderem die Vergiftung durch nicht abbaubare Polypheole genannt [2].

In dem Versuch konnte gezeigt werden, dass durch Zugabe von essentiell notwendigen Spurenelementen [3] aber auch durch Zugabe von hoch verfügbarem Stickstoff in Form von Harnstoff der Biogasprozess dauerhaft stabilisiert werden konnte.

Versuchsaufbau: zwei Fermenter mit je 18 ltr aktiv gerührten Fermenterschlamm

Fütterung mit Oliventrester (TS-Gehalt ~ 35 %)

Faulraumbelastung 4,0 kg o.TM / m³ / Tag

Optimale Spurenelementergänzung nach vorheriger Analyse des Gehaltes im Faulschlamm

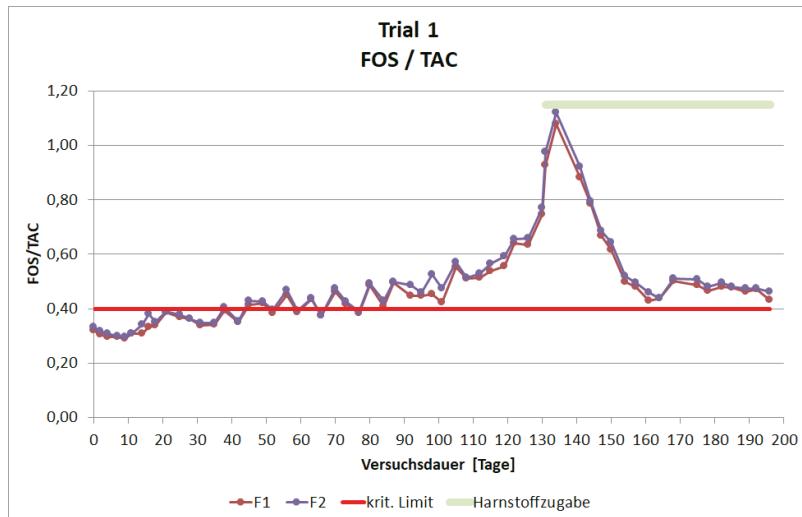


Abb. 1: Entwicklung des FOS/TAC-Wertes im Laufe der Versuchsdauer in zwei kontinuierlich betriebenen Biogasfermentern (F1 + F2) bei Harnstoffzugabe.

Die Abb. 1 zeigt den Verlauf des FOS/TAC-Wertes, der als Richtmaß eines stabil laufenden Biogasprozesses betrachtet werden kann, in zwei komplett identisch gefütterten Biogasversuchsfermentern über insgesamt 200 Versuchstage. Es ist zu erkennen, dass sich mit der täglichen Zugabe von Harnstoff (64 g Harnstoff je m^3 Fermenterschlamm je Tag) ab Versuchstag 128 der FOS/TAC-Wert kontinuierlich in beiden Fermentern verbesserte und sich der Biogasprozess stabilisierte. Mit der Zugabe von Harnstoff erhöhte sich auch der Ammonium-stickstoffgehalt, also der Anteil an verfügbarem Stickstoff. Die Faulraumbelastung wurde stets konstant gehalten, auch während des drastischen Anstieg der FOS/TAC-Werte.

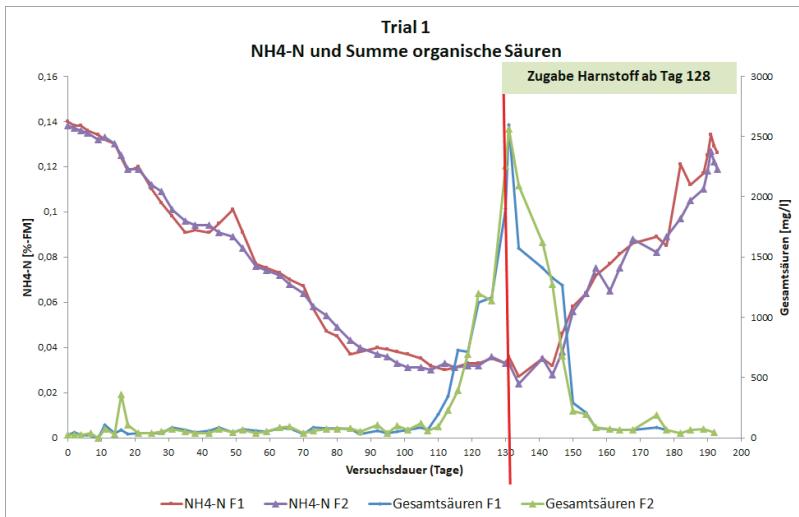


Abb. 2: Entwicklung der Summe der organischen Säuren sowie des $\text{NH}_4\text{-N}$ -Gehaltes in zwei kontinuierlich betriebenen Biogasfermentern (F1 + F2) bei Harnstoffzugabe.

Die Abb. 2 zeigt den Gehalt der Summe an organischen Säuren in den beiden Versuchsfermentern, die sich parallel zu den FOS/TAC-Werten in Abb. 1 verhalten. Ebenfalls ist zu erkennen, wie der $\text{NH}_4\text{-N}$ -Gehalt in beiden Versuchsfermentern über den Versuchsverlauf zunächst stark abnimmt und mit der kontinuierlichen Zugabe des Harnstoffs ab Versuchstag 128 wieder deutlich ansteigt. Gleichzeitig mit der Zugabe des Harnstoffs und des Anstiegs an $\text{NH}_4\text{-N}$ kann eine sehr deutliche Reduzierung der organischen Säuren erkannt werden. Die Zugabe des frei verfügbaren Stickstoffs in Form von Harnstoff hat einen sehr positiven Einfluss auf den Biogasprozess. Die Ergebnisse dieses Versuches konnten anschließend unter identischen Bedingungen wiederholt werden. Es konnte auch gezeigt werden, dass ein mit Harnstoffzugabe stabilisierter Prozess nach der Einstellung der Harnstoffzugabe nach etwa einer halben Verweilzeit wieder in ein $\text{NH}_4\text{-N}$ Defizit kam und auch wieder begann instabil zu laufen.

Überraschend bei dieser Monovergärung von Oliventrester war, dass der Gesamt-Stickstoffgehalt in dem Biogasfermenterschlamm mit 0,35-0,42 % in der Frischmasse bzw. 2,9-3,5 % in der Trockenmasse als durchaus ausreichend angesehen werden kann. Dennoch war offenbar nicht genügend verfügbarer Stickstoff für einen optimalen Biogasprozess vorhanden.

In Anbetracht der Herausforderungen der Biogasbranche künftig vermehrt günstige biogene Rest- und Abfallstoffe als Substrate in Biogasanlagen zu nutzen, ist davon auszugehen, dass es vermehrt zu Problemen aufgrund eines hohen Anteils an schwer verfügbarem Stickstoff in Biogassubstraten kommen wird.

Aber auch beim Einsatz von typischen landwirtschaftlichen Biogas-Substraten kann es zu einem Mangel an verfügbarem Stickstoff kommen.

3 Praxiserhebung zur Versorgung von Biogasanlagen mit Stickstoff

Im Rahmen der Beratung und Betreuung von Biogasanlagen werden in der ISF jährlich ca. 2.500 unterschiedliche Biogasanlagen aus Deutschland und Europa auf verschiedenste Parameter und Inhaltsstoffe untersuchen. Neben FOS/TAC, organische Säuren, pH-Wert, Mengen- und Spurenelemente wird auch der Ammonium-Stickstoffgehalt ermittelt. Eine Auswertung der Prozessparameter dieser Biogasanlagen der letzten 3 Jahre hat gezeigt, dass rund 19 % der Anlagen einen zu geringen Anteil an verfügbarem Stickstoff aufzeigen. Diese Anlagen werden mit verfügbarem Stickstoff versorgt, um deren Biogasprozess zu optimieren.

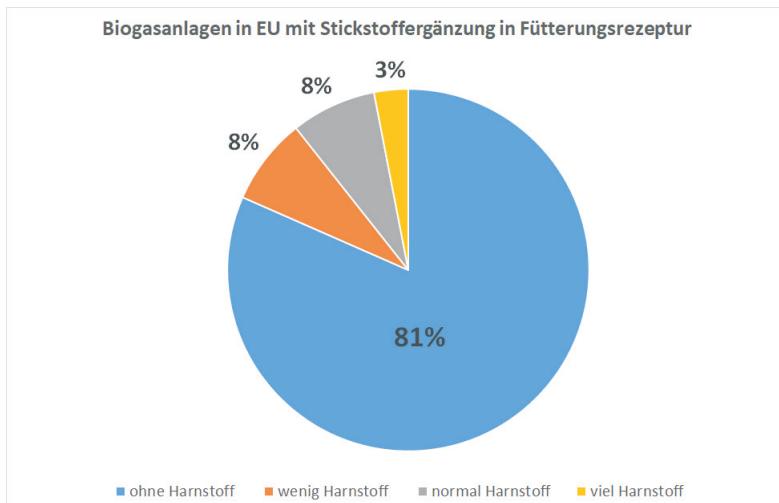


Abb. 3: Darstellung des Anteils von Biogasanlagen, die durch Zugabe von verfügbarem Stickstoff optimiert werden.

Zumindest ein Teil dieser Anlagen verfügt über eine normalerweise ausreichende Menge an verfügbarem Stickstoff, der aber ganz offensichtlich nicht für den mikrobiologischen Prozess genutzt werden kann.

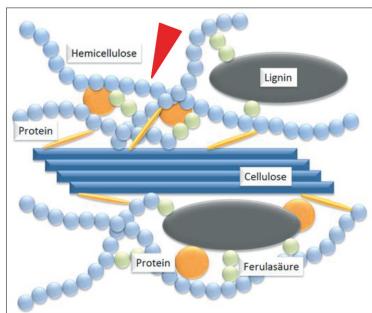
4 Enzyme aus der Feststofffermentation zur Verbesserung der Verfügbarkeit des Stickstoffs in Biogassubstraten und Fermenterschlämmen

Durch die Zugabe von zusätzlichem Stickstoff wird zwangsläufig der Stickstoffgehalt im Gärrest der Biogasanlagen erhöht. Der Gedanke liegt nahe, an stelle dessen, den Anteil an schwer verfügbaren Stickstoff zu verringern und auf eine Zugabe von zusätzlichen Stickstoff zu verzichten.

In der Tierernährung wird in der Fütterung von Monogastricern ein Wirkstoff zur Öffnung der pflanzlichen Fasermatrix eingesetzt, der durch eine Feststofffermentation kurz SSF (solid state fermentation) hergestellt wird. Der Einsatz dieses Wirkstoffes ermöglicht den Tieren einen deutlich höheren Anteil an Proteinen aus dem Futter verwerten zu können. Damit können rund 1 %-Punkt an Protein in der Ration eingespart werden, ohne die Stickstoff- bzw. Proteinversorgung der Tiere zu verschlechtern, was einer Reduzierung des Proteingehaltes im Futter um 5-7 % absolut entspricht. Automatisch reduziert sich damit auch der Anteil des Stickstoffs in der Gülle.

Als Weiterentwicklung daraus wurde von der Firma Senzyme ein Enzymkomplex (Wirkstoff E4N) zur Stabilisierung der anaeroben Vergärung durch Feststofffermentation pflanzlicher Rohstoffe mit Pilzen entwickelt. Der Enzymkomplex E4N kann auf verschiedene Weise positiv auf die Verbesserung der Verfügbarkeit pflanzlicher Proteine im Biogasprozess wirken: 1) durch einen hydrolytischen Aufschluss der Pflanzenzellen, ähnlich einer enzymatischen Extraktion, wodurch cytoplasmatische Proteine besser verfügbar werden, 2) durch die Freisetzung fasergebundener Proteine aus der Kohlehydratmatrix der pflanzlichen Zellwände (wie zum Beispiel Extensine oder Enzyme, die beim Aufbau der Zellwand dort eingeschlossen wurden), 3) durch den Abbau von Oligosacchariden auf der Oberfläche pflanzlicher Proteine, welche den Zugang von Proteasen erschweren und 4) durch den Aufschluss von Kohlehydraten in Protein-Kohlehydrat-Verbindungen, wie sie vermutlich neu während des Biogasprozesses entstehen können. Durch alle diese Effekte wird die Wirksamkeit der bakteriellen Proteasen im Fermenter verstärkt und die Abbaurate von Proteinen erhöht.

Proteinfreisetzung aus der Zellwand



Auflösung neu entstandener Zucker-Protein-Verbindungen im Biogasfermenterschlamm

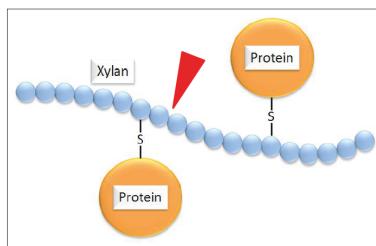


Abb. 4+5: Schematische Darstellung der Proteinfreisetzung aus der Zellwand und der Auflösung von Zucker-Protein-Verbindungen durch Enzymwirkung (roter Pfeil)

5 Bestimmung der Verfügbarkeit von Stickstoff anhand des UDPs mit und ohne Zugabe des Enzymkomplex E4N.

Um die Effekte des Enzymkomplex E4N auch im Biogasbereich zu testen und zu erkennen, ob es eine Verbesserung der Stickstoffverfügbarkeit gibt, wurden zunächst Versuche zur Verbesserung der Rohproteinfraktionierung durchgeführt. Die Untersuchung der Rohproteinfraktionierung nach dem „cornell net carbohydrate and protein system“ dient zur Einschätzung der Proteinqualität und -verfügbarkeit für den Wiederkäuer. Bei dieser Methode wird das Protein in die Fraktionen A (NPN-Verbindung), B1, B2 und B3 (Reinprotein mit unterschiedlicher Verfügbarkeit) unterteilt. Die Fraktionen B1 bis B3 sind schnell bis schwer abbaubar, Fraktion C gilt grundsätzlich als unverdaulich [4].

Tab. 1: Proteinfraktionen nach Licitra et al. 1996 [6]

Fraktion	Definition	Enzym. Abbau
A	NPN	-
B1	Pufferlösliches Reinprotein	Schnell
B2	Pufferunlösliches Reinprotein	Variabel
B3	Zellwandgeb. löslich. Reinprotein	Variabel bis langsam
C	Zellwandgeb. unlöslich. Reinprotein	Unverdaulich

Die einzelnen Fraktionen werden relativ zum gesamten Protein berechnet in %Protein von Gesamt Protein. Die Summe aus Fraktion A und B1 wird als lösliches Protein bezeichnet, wogegen die Summe aus Fraktion B3 und C als schwer abbaubares Protein bezeichnet wird. Beide Summen sind damit wichtige Kennparameter zur Beurteilung der Proteinfraktionen.

Es wurden insgesamt 6 verschiedene Biogassubstrate sowie 5 Biogasfermenterproben mit aktiven Enzymen oder mit abgetöteten Enzymen zur Reaktion gebracht.

Ergebnisse:

Tab. 1: Ergebnisse der Rohproteinfraktionen und Proteinverfügbarkeiten nach Behandlung mit aktiven (A) und abgetöteten (T) Enzym.

Probenart	Roh-Protein (RPr) [g/kg TS]	A [% des RPr]	B1 [% des RPr]	B2 [% des RPr]	B3 [% des RPr]	C [% des RPr]	lösliches Protein Summe A+B1	stabiles Protein Summe B3+C
BGA 1 A	146	18,5	7,8	24,2	18,5	31,1	26,3	49,5
BGA 1 T	147	16,6	5,6	25,7	24,3	27,9	22,1	52,1
Diff. A-T in %rel.	-0,8	11,4	40,1	-6,0	-23,9	11,5	18,6	-5,0
BGA 2 A	153	10,7	4,0	30,7	24,0	30,6	14,7	54,6
BGA 2 T	158	11,4	0,7	31,3	21,4	35,1	12,1	56,6
Diff. A-T in %rel.	-2,7	-6,5	458,6	-1,9	11,8	-12,8	21,0	-3,5
BGA 3 A	168	23,4	10,8	18,6	19,6	27,6	34,2	47,2
BGA 3 T	171	20,1	7,3	20,6	22,7	29,4	27,4	52,1
Diff. A-T in %rel.	-1,6	16,7	47,9	-9,6	-13,6	-6,0	25,0	-9,3
BGA 4 A	166	15,8	2,7	34,7	11,2	35,5	18,6	46,7
BGA 4 T	166	10,6	4,7	34,6	9,4	40,7	15,2	50,2
Diff. A-T in %rel.	0,0	49,8	-41,3	0,4	19,1	-12,9	22,0	-6,9
BGA 5 A	146	17,2	4,2	24,3	13,4	40,9	21,4	54,3
BGA 5 T	145	14,4	3,5	26,3	13,4	42,5	17,9	55,8
Diff. A-T in %rel.	0,7	19,8	19,0	-7,4	0,4	-3,8	19,6	-2,8
Grassilage 1.-ter S. A	186	9,5	62,4	19,0	5,1	4,0	71,9	9,1
Grassilage 1.-ter S. T	187	9,1	60,7	20,6	5,3	4,3	69,8	9,6
Diff. A-T in %rel.	-0,5	4,4	2,8	-7,8	-3,8	-7,0	3,0	-5,2
Grassil. extensiv A	143	6,9	35,8	29,2	20,6	7,5	42,7	28,1
Grassil. Extensiv T	142	5,4	32,6	30,1	22,3	9,6	38,0	31,9
Diff. A-T in %rel.	0,7	27,8	9,8	-3,0	-7,6	-21,9	12,4	-11,9
Maissilage A	98	12,6	61,4	20,1	3,0	2,9	74,0	5,9
Maissilage T	96	11,3	60,7	20,4	3,2	4,4	72,0	7,6
Diff. A-T in %rel.	2,1	11,5	1,2	-1,5	-6,3	-34,1	2,8	-22,4
Traubentrester A	146	18,6	8,3	14,2	13,8	45,1	26,9	58,9
Traubentrester T	147	10,4	9,6	15,2	14,7	50,1	20,0	64,8
Diff. A-T in %rel.	-0,7	78,8	-13,5	-6,6	-6,1	-10,0	34,5	-9,1
DDGS A	279	14,9	4,1	36,7	26,3	18,0	19,0	44,3
DDGS T	285	16,8	0,5	37,8	25,5	19,4	17,3	44,9
Diff. A-T in %rel.	-1,9	-11,1	771,6	-3,0	3,2	-7,4	10,1	-1,4
Oliventrester A	96	22,4	2,3	13,0	12,5	49,8	24,7	62,2
Oliventrester T	84	8,2	7,6	11,0	13,6	59,6	15,8	73,2
Diff. A-T in %rel.	15,4	172,0	-69,3	18,4	-7,9	-16,6	56,4	-15,0

Versuchsaufbau: Jeweils 15 g Probenmaterial (trocken und auf 1,0 mm vermahlen) mit 120 ml Pufferlösung (pH 7,75) sowie entweder Variante A mit 15 ml Enzymlösung aktiv (1 %-iger Extrakt aus aktivem Enzymgemisch) oder alternativ Variante T mit 15ml abgetöteter Enzylösung (1 %-iger Extrakt aus hitzenaturiertem Enzymgemisch) in einen 250ml große Schottflasche gemischt. Die so angesetzten Proben wurden anschließend für 24 h bei 38 °C auf einem

Schüttler (180 rpm) bewegt. Danach wurde der komplette Inhalt aller Flaschen bei 65 °C getrocknet, in einem Mörser zerrieben und auf deren Proteinfraktionen untersucht.

Es ist zu erkennen, dass bei allen Proben der Variante mit aktivem Enzymzusatz (A) im Vergleich zum inaktiven Enzym (T) sich der Anteil an löslichen Protein gesteigert und sich der Anteil an schwerverfügbarem Protein reduziert hat. In den Biogasfermenterschlämmen wurde der lösliche Anteil des Proteins um 18,6 bis 25,0 % vom gesamten Rohprotein gesteigert und der schwerverfügbare Anteil des Proteins um 2,8 bis 9,3 % vom gesamten Rohprotein reduziert. Bei den Biogassubstraten sind die Veränderungen zum Teil noch gravierender ausgefallen. So konnte in dem Oliventrester der lösliche Anteil des Proteins um 56,4 % gesteigert werden und der schwerverfügbare Anteil des Proteins um 15 % vom gesamten Rohprotein reduziert werden.

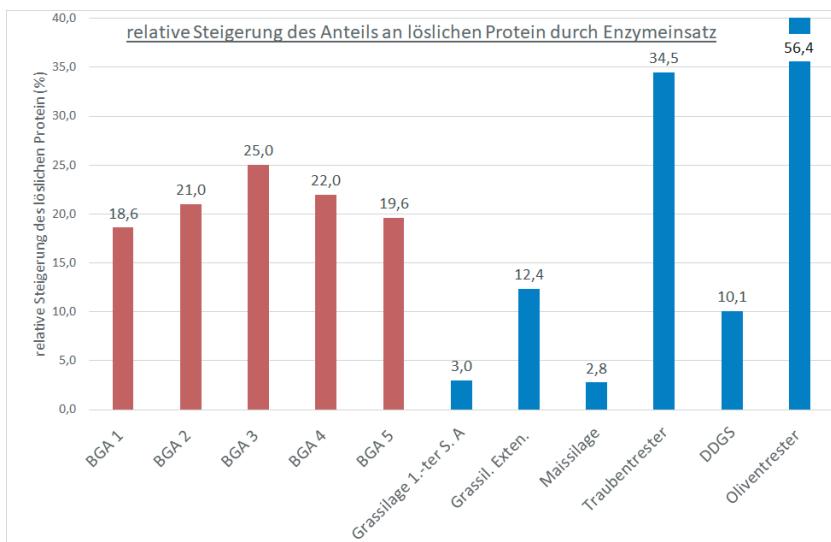


Abb. 6: Darstellung der relativen Steigerung des löslichen Proteins durch Einsatz des Enzymkomplex E4N in verschiedenen Fermenterschlämmen und Substraten

Ebenfalls gut zu erkennen ist, dass die Erhöhung des löslichen Proteinanteils in den Biogassubstraten Maissilage und Grasslage (erster Schnitt) mit knapp 3 % relativ gering ausfallen. Dies ist nicht verwunderlich, da bei diesen Substraten die Löslichkeit bzw. Verfügbarkeit des Proteins von hause aus sehr gut ist und somit eine weitere Verbesserung kaum mehr möglich.

Die deutliche Verbesserung der Proteinverfügbarkeit in den Biogasfermenterschlämmen zeigt, dass sich offenbar in den Biogasfermentern der Anteil der schlecht verfügbaren Proteine anreichert, bzw. konzentriert hat und nun mit Enzymen ein großes Verbesserungspotential ausgenutzt werden kann.

Sollten sich diese Effekte in Praxisanlagen übertragen lassen, könnte man auf eine zusätzliche Fütterung von verfügbarem Stickstoff komplett verzichten und den Gesamt-Stickstoffgehalt in den Biogasanlagen reduzieren. Dies hätte einen direkten vorteilhaften Einfluss auf die Düngemittelbilanz bezüglich der Ausbringung an Stickstoff über die Düngung mit Gärrestmaterial (siehe Abschnitt 7)

6 Effekte des Enzymeinsatzes auf die Verbesserung des Biogasprozesses und der Biogasbildung

Da sich durch den Einsatz des Enzymkomplexes sehr deutliche Effekte sowohl im Biogasfermentermaterial als auch in den Biogassubstraten gezeigt haben, wurden anschließend Batch- und kontinuierliche Biogasversuche durchgeführt, um zu überprüfen, in wie fern sich diese Effekte auch auf einen aktiven Biogasfermenterschlamm übertragen lassen.

6.1 Biogasbatchversuch

Es wurde ein Biogasbatchversuch mit Biogasfermenterschlamm aus einer kontinuierlich betriebenen Biogasversuchsanlage, die mit Weizenpülppe in Monofermentation gefüttert wurde, angesetzt. Die Weizenpülppe hat eine sehr schlechte Proteinverfügbarkeit, so dass der Biogasprozess nur mit Zugabe von Harnstoff – als gut verfügbare Stickstoffquelle – stabil lief. Für den Batchversuch wurde Fermenterschlamm ohne vorherige Zugabe von Harnstoff verwendet. Es wurde in jeweils dreifacher Wiederholung in 1litr. Batchsysteme nach dem ORGA-Gasmesssystem [7] gearbeitet.

Es gab folgende Behandlungen:

1. Kontrolle ohne Enzymzusatz
- 2.-5. Zusatz von 200 / 600 / 1000 / 2000 ppm inaktives Enzym
- 6.-9. Zusatz von 200 / 600 / 1000 / 2000 ppm aktives Enzym

Um das Eigengaspotential des Enzyms zu berücksichtigen, wurde die Differenz zwischen dem Gasertrag der Behandlung mit dem aktiven Enzym und dem inaktiven Enzym gebildet. Es zeigte sich, dass mit steigendem Enzymanteil auch der Gasmehrertrag größer ausfiel, jedoch bereits mit einer geringen Dosierung von 200 ppm Wirkstoff E4N die Biogasbildung um fast 2 % gesteigert werden konnte.

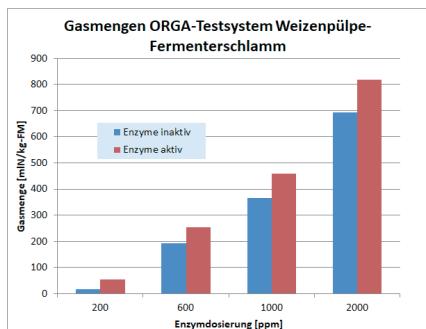


Abb. 7: Biogasbildung im ORGA-Testsystem mit aktiven und inaktiven Wirkstoff E4N in verschiedenen Dosierungen (Mittelwert aus $n=3$)

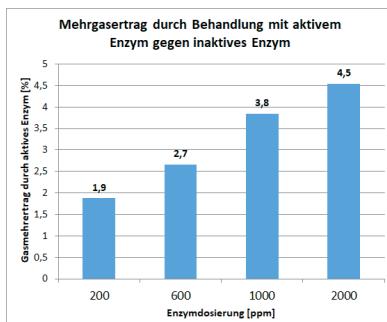


Abb. 8: Steigerung des Gasertrag im ORGA-Testsystem durch Einsatz des aktiven Wirkstoffes E4N. (Mittelwert aus $n=3$)

6.2 Biogasversuche mit kontinuierlichen Biogasfermentern

Ebenfalls wurde ein Biogasversuch mit kontinuierlich betriebenen Biogasfermentern angesetzt. Alle Varianten wurden in dreifacher Wiederholung in 18 Liter großen, regelmäßig (alle 20 min) gerührten Fermentern durchgeführt. Da Traubentrester gemäß der Ausführungen in Abschnitt 5 eine schlechte Proteinverdaulichkeit aufzeigte, die mit Einsatz von E4N deutlich verbessert werden konnte, sollte in dem kontinuierlichen Biogasversuch gezeigt werden, ob es auch Effekte bezüglich der Biogasbildung und/oder der Stickstoffverfügbarkeit beim Einsatz von Traubentrester gibt. Die Fütterung betrug – bezogen auf die organische Trockenmasse – 2/3 Maissilage und 1/3 Traubentrester und erfolgte täglich zu zwei Tageszeitpunkten. Neben der Biogasmenge und der -zusammensetzung wurden regelmäßig Analysen auf pH-Wert, FOS/TAC, Summe organische Säuren, Ammoniumstickstoff und Gesamt-Stickstoff durchgeführt. Die Versorgung mit Spuren- und Mengenelementen wurde gemäß EU Patent [3] optimal eingestellt. Die Faulraumbelastung betrug 5,5 kg o.TM je m^3 und Tag, was grundsätzlich einer hohen Faulraumbelastung entspricht.



Abb. 9: kontinuierliche Biogasversuche in der 38°C Wärmekammer, 18ltr. Systemen der ISF

Es wurden jeweils drei Fermenter mit folgenden Varianten gefahren:

1. 10 ppm inaktive Enzyme pro Tag (F1-F3)
2. 10 ppm aktive Enzyme pro Tag (F4-F6)
3. 100 ppm inaktive Enzyme pro Tag (F7-F9)
4. 100 ppm aktive Enzyme pro Tag (F11,F14,F15)

Bei beiden Dosierungen zeigte sich, dass die Biogasbildung in den Behandlungen mit aktivem Enzym gegenüber den Behandlungen mit inaktivem Enzym sich kontinuierlich verbesserte. Im Durchschnitt über alle Versuchstage zeigte die Dosierung mit 10 ppm Enzym 1,25 % mehr Biogas und die Dosierung mit 100 ppm 2,33 % mehr Biogas gegenüber der jeweiligen Behandlung mit inaktivem Enzym. Es ist sehr gut zu erkennen, dass die Verbesserung der Biogasbildung über den Versuchsfortschritt zunimmt, und bei Betrachtung der letzten 10 Tage des Versuches die Steigerung der Biogasbildung bis zu 6 % betrug. Es kann mit Fortschreiten des Versuches mit noch größeren Steigerungen der Biogasbildung gerechnet werden.

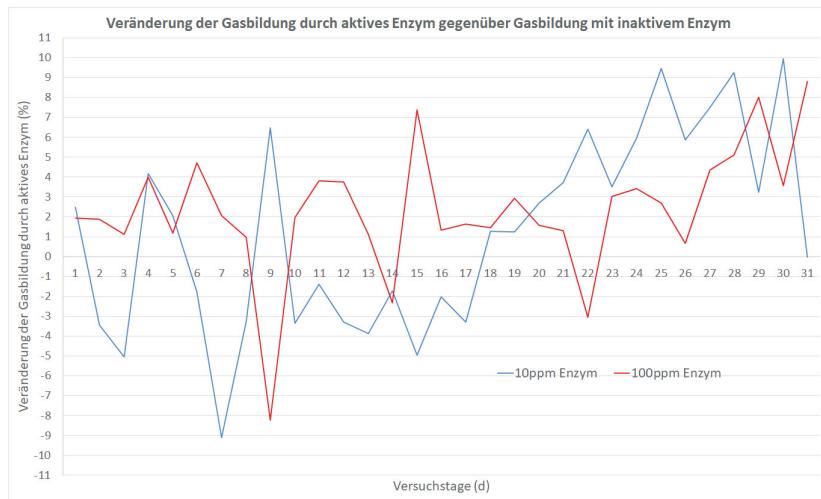


Abb. 10: Darstellung der Veränderung der Gasbildung durch den Einsatz von aktivem Enzym gegenüber der Behandlung mit inaktivem Enzym über den Versuchszeitraum von 31 Tagen.

Trotz des Einsatzes von Enzymen konnten innerhalb der ersten 31 Versuchstage keine signifikanten Effekte bezüglich eines höheren NH₄-N-Gehaltes gefunden werden. Es kann vermutet werden, dass die Steigerung des verfügbaren Stickstoffs automatisch zu einer gesteigerten Bildung von Bakterien führt. Dies geht mit gleichzeitigem Verbrauch von NH₄-N einher, wodurch die Effekte einer verbesserten Stickstoffversorgung nicht am NH₄-N-Gehalt im Fermenter erkannt werden kann. Aus diesem Grund ist geplant den Biogasfermenterschlamm nach verschiedenen Versuchsabschnitten, wie unter Abschnitt 5 beschrieben, auf die Proteinfaktionierung zu untersuchen, um darüber die Effekte des Enzymwirkstoffs zu einer verbesserten Stickstoffverfügbarkeit erkennen zu können.

7 Einsparungspotential an Stickstoff durch Enzym-einsatz

Wie in Abschnitt 2 bereits gezeigt wird in einer großen Anzahl von Biogasanlagen Stickstoff in einer hochverfügbaren Form eingespart werden könnte. Die insgesamt 19 Prozent der Biogasanlagen die verfügbaren Stickstoff zuführen müssen, setzen bei einer 500kW Biogasanlage durchschnittlich täglich 2,2 kg Harnstoff zu. Dies bedeutet, das über das ganze Jahr 800 kg Harnstoff bzw. 370 kg zusätzlicher Stickstoff in den Gärrest einer 500 kW Biogasanlage gelangen. Hochgerechnet auf ganz Deutschland mit insgesamt 5 Giga Watt installierter elektrischer Leistung wäre, bezogen auf 19 % der Anlagen, ein jährliches Einsparpotential von 700 t Stickstoff gegeben.

In Anbetracht der Herausforderungen der Biogasbranche vermehrt günstige biogene Rest- und Abfallstoffe als Substrate in Biogasanlagen zu nutzen, ist davon auszugehen, dass es vermehrt zu Problemen aufgrund eines hohen Anteils an schwerverfügbarem Stickstoff in Biogassubstraten kommen wird. Es ist mit einem weitaus größeren Bedarf an gut verfügbarem Stickstoff zu rechnen und somit auch mit einem noch größeren Einsparungspotentials durch den Einsatz von Enzymen zur Erhöhung der Proteinverfügbarkeit.

Literatur/Quellen

- [1] Peter Weiland, 02.04.2003 ZNR Biogastagung, Bad Sassendorf-Ostinghausen,
- [2] Andreoni V, Ferrai A, Ranaldi G, Sorlini C.; 1986 The influence of some phenolic acids present in oil wastes on microbial groups for methanogenesis. In: Simposio International Sobre Valoriazcion de Olivar: Alpechiny Orujo;.
- [3] Hans Oechsner, Andreas Lemmer, Dietmar Ramhold, Edmund Mathies, Elisabeth Mayrhuber, Daniel Preissler (08.03.2008) Verfahren zur Biogaserzeugung aus Biomasse in einem Biogasreaktor, bei dem mindestens ein Richtwert für die Konzentration mindestens eines Spurenelementes in einem Biogasreaktor für eine effektive Biogaserzeugung bereitgestellt wird... Europäisches Patent EP1997901A3;
- [4] Gruber, L., G. Stögmüller, K. Taferner, L. Haberl, B. Steiner, A. Steinwidder, A. Schauer und W. Knaus (2005): Protein- und Kohlenhydrat-Fraktionen nach dem Cornell-System... Übers. Tierernährung. 33, S. 129-143
- [5] Licitra, G., T.M. Hernandez und P.J. van Soest (1996): Standardization of procedures for nitrogen fractionation of ruminant feeds; Anim. Feed. Sci. Techn. 57, S.347-358
- [6] Dr. J. Lenz; 2019-07-11 Präsentation CERAVITAL XP, NatuPig-Vorstellung in Magdeburg
- [7] Dr. Nils Engler (November 2013); 6.1 Versuchsbeschreibung zum Oberhausen-Rostock-Göttinger Aktivitätstest (ORGA-Test); Messmethoden-sammlung Biogas Methoden zur Bestimmung von analytischen und prozessbeschreibenden Parametern im Biogasbereich.

Kontakt

Dietmar Ramhold, Geschäftsführung

ISF GmbH, Schaumann Forschung, Wiesenweg 32, 23812 Wahlstedt

① +49 (0)4554.9993300 | ☎ Dietmar.ramhold@is-forschung.de
✉ www.is-forschung.de

Dr. Jürgen Lenz, Geschäftsführung

Senzyme GmbH, Gierlichsstraße 6, D-53840 Troisdorf

① +49 (0)2241.9715-2000 | ☎ info@senzyme.de | ✉ <http://www.senzyme.de>

Düngewirkung von Gärresten steigern

Gefördert durch das Ministerium für Landwirtschaft, Umwelt und Verbraucherschutz im Rahmen des Konzepts zur Minderung der diffusen Nährstoffeinträge aus der Landwirtschaft in die Oberflächengewässer und in das Grundwasser.

Zusammenfassung: Es wurden zwei Maßnahmen untersucht, die Ammoniakemissionen reduzieren sollen. Dadurch soll das Risiko von Stickstoffverlusten während der Ausbringung von Gärresten minimiert und die Düngewirkung gesteigert werden. Eine Maßnahme ist die Ansäuerung der Gärreste bei Ausbringung mit Schleppschläuchen. Es konnten hierdurch im Winterraps Mineraldüngeräquivalente von 90 % erreicht werden. Im Winterweizen sorgte der gesteigerte Wirkungsgrad für signifikant höhere Rohproteingehalte gegenüber der unbehandelten Gärrestdüngung. In der als Ganzpflanze zur Silierung geernteten Wintertriticale war ebenfalls eine Steigerung des Wirkungsgrades nachweisbar. Dies reichte jedoch nicht aus, um die Stickstoffausnutzung bei der Wintertriticale auf ein vertretbares Niveau zu heben. Die zweite untersuchte Maßnahme war das Strip-Till Verfahren mit Depotdüngung. Im Silomais konnte durch die unterirdische Ablage der Gärreste eine höhere Ausnutzung des Stickstoffs gegenüber der oberirdischen Schleppschlauchausringung nachgewiesen werden. Der N-Saldo ließ sich durch die Maßnahmen um 10 kg N/ha reduzieren. Deutlich mehr Einfluss hatte jedoch die Reduzierung der Gärrestmenge, ohne dabei maßgebliche Ertragseinbußen zu verursachen.

Abstract: Two pathways were investigated to reduce ammonia emissions to minimize the risk of nitrogen losses while spreading of digestates and to increase the fertilizing effect. The first pathway is the acidification of the digestate while spreading with drag hoses. As a result, mineral fertilizer equivalents of 90 % might be achieved in winter rape. In winter wheat, the increased efficiency ensured significantly higher protein contents compared to the untreated digestate. An increase in efficiency was also evident in winter triticale harvested as a whole plant for ensiling. However, this was not enough to raise nitrogen utilization to an acceptable level. The second pathway examined was the strip tillage method with a depot of digestate. In maize the underground storage of the digestate showed a higher utilization of nitrogen compared to the drag hose application. The N balance surplus could be reduced by the pathways by 10 kg N / ha. However, the reduction in the amount of digestate had a significantly greater impact, without causing significant yield losses.

1 Einleitung

Die organische Düngung steht auf Grund des Verlustpotentials von Nährstoffen in der Kritik. Unsicherheiten hinsichtlich der Düngewirkung und Befürchtungen einer Verschlechterung von Gewässern und Umwelt zu provozieren sind die Gründe. Um das Verlustpotenzial so gering wie möglich zu halten, sind einige Faktoren zu beachten. Die Wasserhaltefähigkeit der Böden sowie Nieder-

schlags- und damit verbundene Sickerwassermenge können Auswaschungen begünstigen, lassen sich jedoch nicht direkt beeinflussen. Die Ausbringungsbedingungen, dazu gehören auch Temperatur und Windgeschwindigkeit, müssen als Ganzes betrachtet und bei der Ausbringung beachtet werden, um Nährstoffverluste so gering wie möglich zu halten. Darüber hinaus bestehen betriebspezifische Maßnahmen, die Verluste zu vermindern können. Dazu zählen die Anpassung der Düngung, Bodenbearbeitung oder der angebauten Kulturen, um das Verlustrisiko und Bilanzüberhänge so gering wie möglich zu halten. Eine Maßnahme beim Düngen kann die Reduzierung der Ammoniakemissionen während der Ausbringung von flüssigen organischen Düngern sein. Mit dem Ziel diffuse Stickstoffeinträge zu minimieren, wurde daher von der Landesforschungsanstalt für Landwirtschaft und Fischerei Mecklenburg-Vorpommern ein Versuch etabliert, in dem die Effekte der Ansäuerung von Gärresten und des Strip-Till Verfahrens mit Depotdüngung untersucht werden. Erwartet wurden gesteigerte Dünge-Wirkungsgrade und dementsprechend Ertragszuwächse, niedrigere N-Überhänge und somit ein optimierter

2 Material und Methoden

Der bis dato fortgeführte Dauerversuch wurde 2015 am Standort Gülzow-Prüzen etabliert. Auf dem ca. einen Hektar großen Versuchsfeld werden auf vier Teilschlägen die Fruchfolge Winterraps - Winterweizen - Zwischenfrucht - Silomais - Wintertriticale angebaut. Die Fruchfolge ist repräsentativ für vielhaltende Betriebe und Mecklenburg-Vorpommern. Die Gärreste aus den Substraten Rindergrüle und nachwachsenden Rohstoffen hatten im Mittel einen Nt-Gehalt von 4,4 kg/m³, davon ca. 50 % als Ammonium, bei einem TS-Gehalt von ca. 6 %. Mit Ausnahme der Depotdüngung wurden die Gärreste mit Schleppschläuchen (praxisüblich) ausgebracht. Der Versuch beinhaltet 12 Düngungsvarianten. Vier rein mineralische N-Steigerungsvarianten dienen zur Einordnung der drei Frühjahrs- und zwei Herbst-Gärrestvarianten. Zusätzlich werden eine rein mineralische Herstdüngungsvariante und je eine Variante ohne Düngung im Frühjahr bzw. Herbst geprüft. Alle Düngegaben orientieren sich an den Vorgaben der Düngeverordnung.

2.1 Emissionsmindernde Maßnahmen

Eine emissionsmindernde Maßnahme ist das aus Dänemark stammende und mittlerweile auch in Deutschland eingesetzte Verfahren zur Güllebehandlung und wird vorrangig von Lohnunternehmern angeboten. Durch die Zugabe von Säure, praxisüblich ist Schwefelsäure, wird der pH-Wert der Gülle auf 5,5-6 abgesenkt. Das Dissoziationsgleichgewicht zwischen Ammonium (NH_4^+) und Ammoniak (NH_3) im Gärrest wird dadurch in Richtung NH_4^+ verschoben und Ammoniak kann nicht mehr ausgasen. Der Stickstoff bleibt nun potentiell pflanzenverfügbar im Gärrest erhalten. Grundsätzlich lässt sich die Gülle im Stall, Lager oder während der Ausbringung ansäuern. Im Versuchsdesign simulierten wir eine Ansäuerung im Lager. Grundsätzlich ist das Emissionsminimierungspo-

tential am größten, wenn bereits im Stall angesäuert wird. Die Maßnahme wird im Versuch zu Winterraps, Winterweizen und Wintertriticale eingesetzt. Eine weitere Maßnahme ist das Strip-Till Verfahren mit Depotdüngung. Durch die namengebende streifenförmige Bodenbearbeitung als Kompromiss zwischen Mulch- und Direktsaat wird bereits Gewässerschonung betrieben. Da durch die reduzierte Bodenbearbeitung die Verdunstung im Oberboden und die Anregung von Nährstoffumsetzungen verhindert sind, werden die Wasser- und Bodenhaushalte weniger gestört als bei einer reinen Mulchsaat oder gar tiefgründiger Bodenbearbeitung zu erwarten wäre. Die eigentliche emissionsmindernde Maßnahme ist jedoch die Ablage der Gärreste als Depot in einer Tiefe von 10-15 cm. Diese direkte Einarbeitung reduziert N-Verluste in Form von Emissionen. Die Gärreste wurden im Strip-Till Verfahren mit Nitrifikationshemmern ausgebracht, um Auswaschungen vorzubeugen. Wir setzten die Depotdüngung zu Silomais ein.

3 Ergebnisse und Diskussion

3.1 Wirkungsgradsteigerung

Wie in Abb.1 zu sehen ist, konnte in allen Kulturen eine Dünger-Wirkungsgradsteigerung durch die emissionsmindernden Maßnahmen von 18-44 Prozentpunkten nachgewiesen werden. Die durch die Rohproteinerträge ermittelten, teils hohen Mineraldüngeräquivalente sind auf einen relativ schlechten Wirkungsgrad der Mineraldüngung, vor allem im Jahr 2018, zurückzuführen. Unbeeinflusst davon bleibt die bereits erwähnte Höhe der Wirkungsgradsteigerung. Diese fiel am höchsten bei der Depotdüngung im Strip-Till Verfahren zu Silomais aus. Die geringste Steigerung mit 18 Prozentpunkten zeigte die Ansäuerung der Gärreste zur Wintertriticale. Der N-Saldo konnte im Jahresmittel der Fruchtfolge um 13 % (entspricht ca. 10 kg N/ha) reduziert werden. Die hohen MDÄe im Raps und Mais zeigen deren gute Eignung für organische Düngung. Die Gärreste sind hier, vor allem emissionsmindernd ausgebracht, eine gute Alternative zu Mineraldüngern. Im Winterweizen konnte die praxisübliche Ausbringung nur mäßige Wirkungsgrade erreichen. Durch die Ansäuerung konnte dieser jedoch auf ein vertretbares Maß angehoben werden. Die sehr schlechte Verwertung der Gärreste durch die Wintertriticale zeigt die Schwäche dieses Getreides bei sehr früher Nutzung, verursacht durch die kurze Vegetationszeit. Selbst emissionsmindernd ausgebracht, ist hier von der organischen Düngung abzuraten.

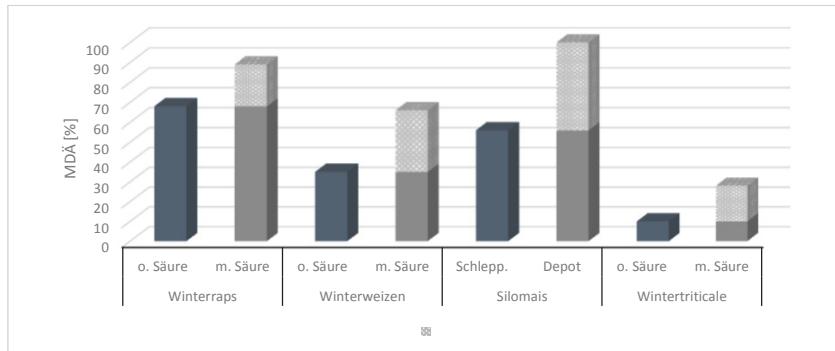


Abb. 1: Mineraldüngeräquivalente und Wirkungsgradsteigerung der Gärreste durch die emissionsmindernden Maßnahmen je Kulturart; o. Säure = ohne Säure; m. Säure = mit Säure; Schlepp. = Ausbringung mit Schleppschlauchverteiler; Depot = Depotdüngung im Strip-Till Verfahren

3.2 Effekte der emissionsmindernden Maßnahmen

Es zeigten sich kulturartspezifische Effekte, die zu einer effizienten Fruchtfolgegestaltung und Düngeplanung genutzt werden können, um die anfallenden Gärreste optimal einzusetzen. Die Abb. 2 zeigt das generell hohe Niveau der N-Salden. Der Grund dafür sind nicht erfüllte Ertragserwartungen, vor allem aus dem Dürrejahr 2018. Wie bereits erwähnt, lässt sich der N-Saldo im Mittel der Fruchtfolge um 13 % (ca. 10 kg N/ha) reduzieren, wenn die Gärreste emissionsmindernd ausgebracht werden. In Verbindung mit der Reduzierung der Gärrestmenge wurde so ein Saldo erreicht, welcher dem der rein mineralischen Düngung entspricht..

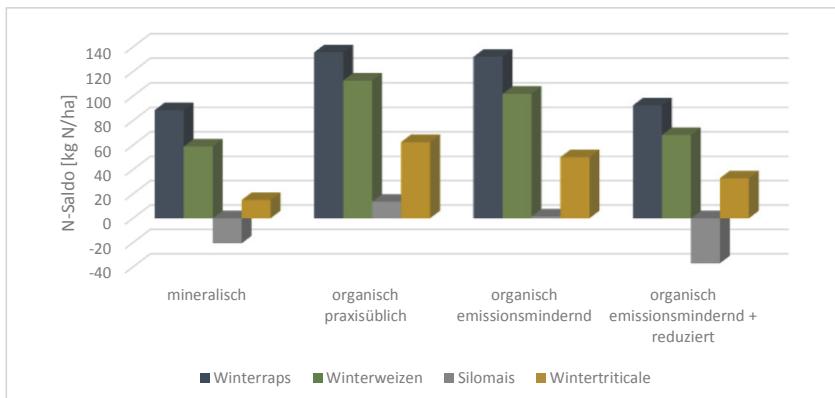


Abb- 2: N-Saldo in Abhängigkeit von Düngung und Kulturart bei gleichem N-Dügenniveau der Varianten mineralisch, organisch praxisüblich und organisch emissionsmindernd

Winterraps

Ein gesteigerter Kornertrag konnte im Raps nicht statistisch bestätigt werden. Die Übersicht in Tab. 1 zeigt jedoch, dass die organische Düngung zu einem signifikant höherem Ölertrag führte. Die zu den höheren MDÄen führenden tendenziell gesteigerten Proteinerträge in der emissionsmindernden Variante sind das einzige Indiz für die Wirkung der Ansäuerung im Winterraps. Die damit zu erwartenden höheren Proteingehalte im Rapskuchen sollten den Aufwand und die Kosten jedoch nur schwer ausgleichen können. Ertraglich scheint die Ansäuerung im Winterraps somit nicht zielführend, da auch die höheren Ölerträge der praxisübliche Gärrestausbringung nicht weiter gesteigert werden konnten. Um Nährstoffverluste zu vermeiden, sollten die zu erwartenden höheren N-Salden mit Hilfe der Ansäuerung und/oder Anpassung der Gärrestmenge reduziert werden. Dies zeigt die Variante, in der die Menge des angesäuerten Gärrestes um 10 m³ verringert wurde, ohne dabei die mineralische N-Düngung zu erhöhen. Im Versuch führte dies zu einem Rückgang des N-Saldo in Höhe von > 40 kg N/ha. Trotz der Düngung unter dem errechneten N-Bedarf des Raps wurden dadurch, auch im Vergleich zur rein mineralischen Düngung, sehr gute Erträge erzielt.

Winterweizen

Der A-Weizen (im Versuch Sorte Julius) kann durch die Dünge-Wirkungsgradsteigerung von 30 Prozentpunkten den Proteingehalt signifikant steigern. Die Schleppschlauchausbringung von 25 m³ Gärresten ohne Säurezugabe erbrachte einen Protein-Gehalt von 12,8 %. Mit angesäuertem Gärrest, ebenfalls mit dem Schleppschlauch ausgebracht, wurde hingegen ein Protein-Gehalt von 13,6 % erreicht. Der Proteinertrag konnte dadurch jedoch nicht signifikant gesteigert werden.

Der N-Saldo sinkt durch die Ansäuerung jedoch um 10 kg N/ha. Den weitaus größeren Effekt hat jedoch auch hier die Reduzierung der Gärrestmenge. Wie im Raps konnte auch im Winterweizen der N-Saldo um ca. 40 kg N/ha durch die Reduzierung der Gärrestmenge um 10 m³ vermindert werden. Der Rohprotein-Gehalt fiel dadurch deutlich ab, der Proteinertrag jedoch nicht. Als vorläufiges Ergebnis zeigt sich somit, dass die Effekte der Ansäuerung sowohl auf den N-Saldo als auch auf den Proteinertrag nur marginal sind, jedoch nicht unbedeutend.

Silomais

Der TM-Ertrag zeigte mit 160 -166 dt/ha keine signifikanten Ertragsunterschiede zwischen den Düngungsvarianten. Es ließen sich jedoch Unterschiede im N-Saldo nachweisen. Ähnlich wie beim Winterweizen sorgte die emissionsmindernde Maßnahme (hier Strip-Till mit Depotdüngung) von 40 m³ Gärresten dafür, dass 10 kg N/ha mehr vom Mais aufgenommen wurden. Da der Mais jedoch selbst bei 40 m³ in der Schleppschlauchvariante vertretbare N-Salden von ca. 13 kg N/ha aufwies, ist der Aufwand dem Nutzen gegenüberzustellen. Ein Gärrestdepot von 30 m³ Gärrest führte zu stark negativen Salden, die, wenn sie nicht in der Fruchfolge ausgeglichen werden, auf lange Sicht zur Verschlech-

terung der Böden beitragen können. Es zeigten sich keine Unterschiede zwischen Schleppschlauch und Depotdüngung, hier lag die Verdaulichkeit der organischen Substanz im Erntegut bei 69,3-71 %. Lediglich ohne Düngung war die Verdaulichkeit der organischen Substanz im Vergleich zu allen anderen Varianten leicht herabgesetzt. Der Einfluss auf den Rohprotein gehalt scheint erwartungsgemäß höher, ließ sich jedoch ebenfalls nicht statistisch bestätigen. Die Biogasausbeute zeigte auch keine signifikanten Unterschiede. Durch die Depotdüngung konnten somit keine Ertragseffekte nachgewiesen werden. Lediglich leicht erhöhte Protein-Gehalte deuten auf einen höheren Anteil verfügbaren Stickstoff im Gärrest.

Wintertriticale

Die zur Ganzpflanzensilierung geerntete Wintertriticale zeigte keine signifikanten Unterschiede zwischen den Varianten. Dennoch ließ sich auch hier der N-Saldo durch die Ansäuerung um ca. 10 kg N/ha verringern. Dies ist auf den leicht erhöhten Proteinertrag zurückzuführen. Die allgemein schlechte Gärrestverwertung lässt jedoch nur den Schluss zu, auf die organische Düngung zu verzichten.

Tab. 1: Ertragsleistung der Kulturen

Ertragsleistung	Düngung nach N-Bedarf		
	mineralisch	Gärrest	
		(mineralisch ergänzt)	
		praxisüblich	emissions-mindernd
Winterraps	194 kg N/ha	30m³/ha	30m³/ha
Kornertrag bei 91%	36,3	38	38
Ölgehalt [%]	44,9	45,4	45,3
Ölertrag [dt/ha]	15,6	16,6*	16,7*
RP-Gehalt in TM [%]	18,3	17,8	18,1
RP-Ertrag [dt/ha]	6,3	6,4	6,6
Winterweizen	193 kg N/ha	25m³/ha	25m³/ha
Kornertrag bei 86%	65,5	65,2	64,5
RP-Gehalt in TM [%]	13,6	12,8	13,6**
RP-Ertrag [dt/ha]	8,3	7,8	8,2
Silomais	141 kg N/ha	40m³/ha	40m³/ha
TM-Ertrag [dt/ha]	160	166	165
EoS in TM [%]	70,2	69,3	71
RP-Gehalt in TM [%]	7,9	7,6	8,1
Wintertriticale	172 kg N/ha	25m³/ha	25m³/ha
TM-Ertrag [dt/ha]	124	121	123
RP-Ertrag [dt/ha]	10,1	9	9,8

*signifikant höher als mineralisch; ** signifikant höher als GR praxisüblich ausgebracht

4 Schlussfolgerung

Nährstoffverluste bei der Ausbringung von organischen Düngern sind unumgänglich, lassen sich jedoch mit neuer Technik noch reduzieren. Die emissionsmindernden Maßnahmen haben dabei nur bedingt Einfluss auf den Ertrag, können aber positiv auf Qualitätsmerkmale wirken. Da der N-Saldo gegenüber der praxisüblichen Ausbringung reduziert werden konnte, sollte, wenn möglich, die Ansäuerung bzw. Depotdüngung genutzt werden, um unnötige Stickstoffverluste zu vermeiden. Erheblich mehr Einfluss zeigte die Anpassung der Gärrestmenge, welche jedoch zu leichten Ertragseinbußen führen kann. Es ist jedoch eine Gegenüberstellung der Umweltleistung und Ertragseinbußen notwendig, um einzelbetriebliche Entscheidungen zu treffen. Silomais hat sich wie erwartet als Kultur erwiesen, die hohe Mengen organische Dünger verwerten kann. Bilanzen über die Fruchfolge lassen sich mit Mais auf ein vertretbares Niveau absenken, da hohe Überhänge wie aus dem Winterweizenanbau ausgeglichen werden können. Für früh zur Einsilierung geerntetes Getreide sollte hingegen auf Grund der schlechten Verwertung auf die Gärrestapplikation verzichtet werden.

Kontakt

David Bugłowski, Projektbearbeiter WRRL

Landesforschungsanstalt für Landwirtschaft und Fischerei
Mecklenburg-Vorpommern

Dorfplatz 1, OT Gützow, 18276 Gützow-Prüzen

① +49 (0)3843.789 -237 | ☎ d.bugłowski@lfa.mvnet.de

Nutzung von Wasserstoff im System Biogas

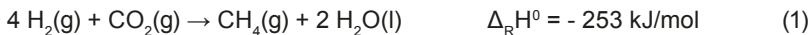
Zusammenfassung: Die politisch und gesellschaftlich angestrebte Energiewende stellt das Energieversorgungssystem vor zunehmende Herausforderungen. Besonders die fluktuierende Bereitstellung von Solar- und Windstrom ist problematisch. (Bio)Methan hingegen kann als chemischer Energiespeicher ins Erdgasnetz eingespeist und zum Lastausgleich flexibel eingesetzt werden. Die vorhandene Infrastruktur ermöglicht einen Transport durch die Bundesrepublik und eine Zwischenspeicherung in vorhandenen Erdgasspeichern. (Bio)Methan kann mittels biologischer Methanisierung gewonnen werden. Kohlenstoffdioxid, beispielsweise aus Biogas, wird hierfür mit regenerativem Elektrolyse-Wasserstoff durch Archaeen umgesetzt [Graf et al.]. Am DBI in Freiberg laufen zu dieser Thematik seit mehreren Jahren F&E-Arbeiten um die biologische Methanisierung in der Blasensäule zu etablieren [Dietrich et al., Manig et al.]. Gesamtzielstellung des aktuell laufenden Projektes „BioStore“ ist die Entwicklung eines reaktionskinetisch angepassten Reaktordesigns mit optimierter Gasinjektion zur Steigerung des Eduktgasumsatzes und des CH₄-Gehaltes im Produktgas sowie der Methanbildungsr率e. Hierfür bringt der Projekt-partner Fraunhofer IKTS sein Knowhow in der Prozesstomographie ein. Aktuell werden bis zu 95 % der Eduktgase im kontinuierlichen Prozess umgesetzt.

Abstract: The balance between production and consumption of electricity is one of the major challenges of the energy industry caused by the increasing feed-in of volatile renewable wind and solar power. Conversion of electrical energy into a chemical energy carrier is a possibility to handle the storage problem. Hydrogen, generated by electrolysis, has to be converted into methane. Feeding the methane into the natural gas grid provides an approach to dealing with fluctuating renewable energy types. Therefor methanogenic archaea converts carbon dioxide from biogas and hydrogen from electrolysis into methane [Graf et al.]. At the DBI in Freiberg, biological methanation in bubble columns has been investigated for several years in order to establish a continuous process for the production of methane [Dietrich et al., Manig et al.]. The project "BioStore" aims to develop a reactor design that is adapted to the reaction kinetics. Gas injection is optimized to increase reactant gas conversion and CH₄ content in the product gas, as well as the methane formation rate. The project partner Fraunhofer IKTS contributes its know-how in process tomography. Up to 95 % of educt gases are currently converted in a continuous process.

1 Technologische Beschreibung

1.1 Biologische Aspekte

Bei der biologischen Methanisierung handelt es sich um eine biochemische Reaktion bei der Wasserstoff und Kohlenstoffdioxid in Methan und Wasser umgesetzt wird (siehe Gleichung (1)):



Dieser exotherme Prozess wird von hydrogenotrophen Archaeen am thermodynamischen Limit katalysiert. Die hydrogenotrophe Methanogenese läuft im letzten Schritt der „konventionellen“ Biogasbildung ab (siehe Abb. 1).

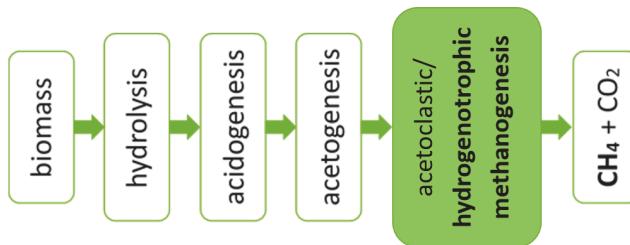


Abb. 1: schematische Darstellung des Biogasprozesses

1.2 Verfahrenstechnische Aspekte

Am DBI wird für die biologische Methanisierung das Reaktorkonzept Blasensäule bevorzugt. Neben dem geringen Eigenenergiebedarf ist die gute Skalierbarkeit dieses Verfahrens vorteilhaft. Die grundlegenden Bestandteile sind die Gasversorgung, bestehend aus MFCs und der Gasinjektion, sowie die beheizte Blasensäule. Das am Säulenkopf kontinuierlich entweichende Produktgas wird qualitativ und quantitativ gemessen und kann dann einer Nutzung zugeführt werden. Damit steht ein im Prinzip einfaches Verfahren zur biologischen Methanisierung zur Verfügung (Schema in Abb. 2).

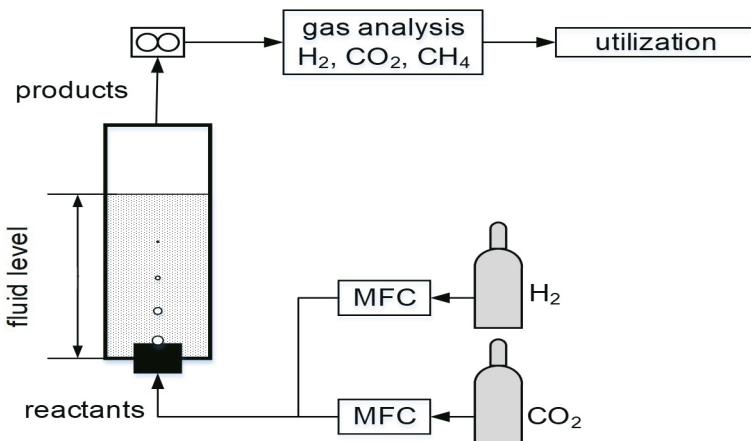


Abb. 2: Prinzip der biologischen Methanisierung in der Blasensäule

Im Projekt „BioStore“ wird dieser Ansatz um zwei weitere technologische Schritte erweitert. Zum einen wird der Einfluss einer Substratumwälzung auf die biologische Methansierung untersucht. Zum anderen wird der Einsatz einer Kaskade von Blasensäulen getestet. Hierfür wurde einen Versuchsstand im Labormaßstab mit drei 1,5-m-Blasensäulen errichtet sowie eine bestehende Pilotanlage mit einer 4-m-Blasensäule ertüchtigt (siehe Abb. 3). Der Fokus der Forschungsarbeiten liegt auf Steigerung der Leistungsparameter Methangehalt, Umsatz und Methanbildungsraten. Die grundlegenden allgemeinen Prozessparameter sind in Tab. 1 dargestellt.

Tab. 1: Allgemeine Prozessparameter der Versuchsstände zur biologischen Methanisierung am DBI

Parameter	Labormaßstab	Pilotmaßstab
Prozesstemperatur	thermophil (55-70 °C)	thermophil (55-70 °C)
Reaktorvolumen	5 l	80 l
Reaktorhöhe	1,5 m	4 m
Reaktordruck	1-10 bar	1-10 bar
Inokulum	Klärschlamm	Klärschlamm



Abb. 3: links und Mitte: Versuchsanlage im Labormaßstab, rechts: Pilotanlage

1.3 Gasinjektionssysteme

Hinsichtlich der biologischen Verfügbarkeit der Eduktgase Wasserstoff und Kohlenstoffdioxid müssen diese in der wässrigen Kulturflüssigkeit gelöst werden. Am DBI wurden hierfür verschiedene Injektortypen bezüglich Blasenverteilung und -größe untersucht (Abb. 4). Die kleinsten mittleren Blasendurchmesser mit 0,85 mm weisen die verwendeten Glaskeramiken auf. Nachteilig ist deren

geringe mechanische Stabilität (Bruchgefahr im Versuch). Die derzeit favorisierten Edelstahlsinter sind hier wesentlich robuster bei mittleren Blasendurchmesser von 1,4 mm.

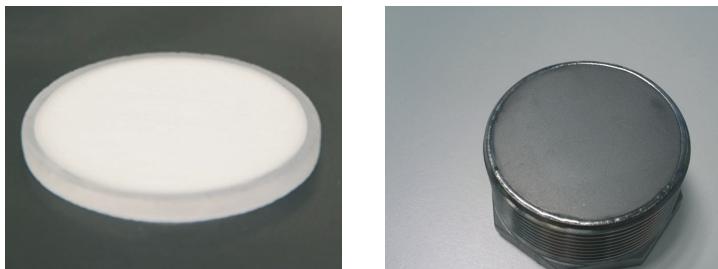


Abb. 4: Gasinjektoren: links Glaskeramik, rechts Edelstahlsinter

2 Ergebnisse

2.1 Ergebnisse im Labormaßstab

In vorangegangenen F&E-Arbeiten wurden mit der Anlage im Labormaßstab bei Verwendung der Glaskeramiken als Gasinjektor Umsätze von 90 % im kontinuierlichen Prozess erreicht. Mit dem Gasinjektor aus Edelstahlsinter konnten 60 % Umsatz dargestellt werden [Manig et al.]. Versuche mit der Säulenkaskade innerhalb des Projektes „BioStore“ stehen noch aus.

2.2 Ergebnisse im Pilotmaßstab

Im laufenden Projekt „BioStore“ wurde in der Pilotanlage hinsichtlich der Prozesssicherheit ein Gasinjektor aus Edelstahlsinter verwendet. Zusätzlich wurde eine Substratumwälzung integriert, wodurch der Umsatz auf 95 % gesteigert werden konnte. Die Methanbildungsrate beträgt dabei ca. $1,5 \text{ dm}^3/(\text{dm}^3 \cdot \text{d})$. Derzeit laufende Experimente zielen auf eine Erhöhung der Methanbildungsrate unter Beibehaltung des hohen Umsatzes.

3 Ausblick

Die biologische Methanisierung stellt eine mögliche zukünftige Kopplungstechnologie der Sektoren Strom und Gas dar. Die Verwendung von Blasensäulenreaktoren hat Vorteile aufgrund des geringen Eigenenergiebedarfs sowie der guten Skalierbarkeit dieses Systems. In vorangegangenen F&E-Arbeiten wurden im Labormaßstab Umsätze bis zu 90 % erreicht. Im laufenden Projekt „BioStore“ konnte in der Pilotanlage der Umsatz auf 95 % im kontinuierlichen Prozess gesteigert werden. Weitere Optimierungen des Verfahrens der biologischen Methanisierung in der Blasensäule erfolgen durch die prozesstomographische Untersuchung dieses Systems.

4 Danksagung

Das Vorhaben »„BioStore“ (FKZ.: 100310024) wird gefördert durch die SAB Sächsische Aufbaubank – Förderbank – (SAB) im Rahmen des europäischen Fonds für regionale Entwicklung (EFRE).

Literatur/Quellen

- Graf, F.; Krajete, A.; Schmack, U. (2014): Techno-ökonomische Studie zur biologischen Methanisierung bei Power-to-Gas-Konzepten, Abschlussbericht, DVGW, Bonn.
- Manig, R.; Erler, R.; Krause, H.; (2019): ENERGY-EFFICIENT BIOLOGICAL METHANATION IN BUBBLE COLUMN, Poster & Tagungsbandbeitrag, REGATEC, Malmö.
- Dietrich, R.; Manig, R.; Birkner, C.; Erler, R.; Krause, H.; (2017) Energy-efficient conversion of green hydrogen and carbon dioxide to methane, Poster & Tagungsbandbeitrag, IGRC, Rio de Janeiro.

Kontakt

Dipl.-Ing. (FH) Robert Manig, Projektleiter/stellv. Fachgebietsleiter

DBI – Gastechnologisches Institut gGmbH Freiberg
Halsbrücker Straße 34, D-09599 Freiberg

① +49 (0)3731.4195-337 | ☎ robert.manig@dbi-gruppe.de
✉ www.dbi-gruppe.de

FORUM B

BIOGAS

ANLAGENOPTIMIERUNG

Johan Grope, Frank Scholwin, Michael Nelles

Modellbasierte Prozessüberwachung in großtechnischen Biogasanlagen

Zusammenfassung: Mit einer Finanzierung aus dem Europäischen Fonds für regionale Entwicklung hat das Institut für Biogas, Abfallwirtschaft und Energie ein Instrument zur Verbesserung der Effizienz und Prozessüberwachung von Biogasanlagen auf der Grundlage eines täglichen genauen Soll-Ist-Vergleichs des Biogasertrags entwickelt. Um die tägliche Biogasproduktion (Sollwert) zu simulieren, wird ein Modell verwendet, das auf einem Reaktionsmodell 1. Ordnung basiert. Die simulierte tägliche Biogasproduktion wird mit den tatsächlich gemessenen Biogasmengen (Ist-Wert) verglichen. Durch diese tägliche Effizienz- und Prozessüberwachung von Großbiogasanlagen können Störungen der Prozess- und Anlagentechnik wesentlich zuverlässiger und zeitnauer erkannt werden als durch die heute übliche Überwachung auf Basis einer Monatssumme und von Durchschnittswerten. Dadurch können Gegenmaßnahmen wesentlich schneller umgesetzt und somit Systemausfälle sowie Effizienzverluste reduziert werden.

Abstract: With a funding from the European Regional Development Fund, the Institute for Biogas, Waste Management and Energy has developed a tool to improve efficiency and process monitoring of biogas plants based on a daily accurate target-actual comparison of the biogas yield. In order to simulate the daily biogas production (target value) a model, based on a 1st order reaction model, is being used. The simulated daily biogas production is being compared with the actual measured biogas quantities (actual value). Through this daily efficiency and process monitoring of large-scale biogas plants disturbances of the process and equipment technology can be identified much more reliable and timely as by the monitoring based on a monthly sum and average values, which is common practice today. This allows the implementation of countermeasures much more quickly and therefore to reduce system failures as well as efficiency losses.

1 Modellbasierte Vorhersage der Biogasproduktion

Das Prozessmodell basiert auf einem Reaktionsmodell 1. Ordnung und unterscheidet zwischen unterschiedlich schnell abbaubaren Fraktionen der im Substrat insgesamt abbaubaren Organik, d.h. der fermentierbaren organischen Trockensubstanz (fOTS).

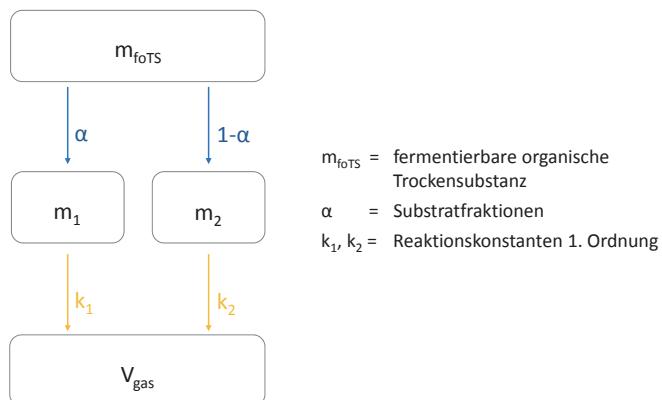


Abb. 1: Schematische Darstellung des Prozessmodells 1. Ordnung, nach Weinrich,S. 2017

Im Fall der diskontinuierlichen Anlagenfütterung beschreibt die folgende Formel die von der Zeit (t), dem Biogasbildungspotenzial (V_{max}), dem Anteil schnell abbaubaren Substrates im Verhältnis zum insgesamt abbaubaren Substrat (α) und den Reaktionskonstanten 1. Ordnung für die Abbaugeschwindigkeiten der schnell und langsam abbaubaren Organik (k_1 und k_2) abhängige Biogasmenge:

$$V_{gas}(t) = V_{max} \times (1 - \alpha \times e^{-k_1 \times t} - (1 - \alpha) \times e^{-k_2 \times t}) \quad \text{Formel (1)}$$

Mit Hilfe des ANKOM-Versuchs¹ wurden die substratspezifischen Biogasbildungskurven messtechnisch ermittelt und aus diesen regressiv die Kinetikparameter (V_{max} , α , k_1 und k_2), welche den Kurvenverlauf der Biogasbildung für jedes der in der Testanlage eingesetzten Substrate bestmöglich beschreiben, berechnet.

Für den semikontinuierlichen Betrieb einer Biogasanlage lässt sich die Biogasbildung anhand der gleichen Kinetikparameter mit Hilfe folgender Differentialgleichungen beschreiben:

$$\frac{dm_1}{dt} = \dot{m}_{OM,in} \times \alpha - \dot{m}_{1,out} - k_1 \times m_1 \quad \text{Formel (2)}$$

$$\frac{dV_{Biogas}}{dt} = V_{max} \times k_1 \times m_1 \quad \text{Formel (3)}$$

Auf Basis dieser mathematischen Beschreibung der substratspezifischen dynamischen Biogasbildung wurde ein Modell in Matlab-Simulink implementiert, wel-

¹ Der ANKOM-Versuch ist ein von der Universität Rostock entwickelter Batch-Versuch zur Ermittlung des Biogasbildungspotenzials im Miniaturmaßstab – wobei die Änderung der Gasproduktion in sehr kleinen Zeitintervallen automatisch erfasst wird. Dies ermöglicht eine relativ genaue Erfassung des Verlaufs der Biogasbildung und der Ableitung der Abbaukinetik des jeweils untersuchten Substrats in Kombination mit dem verwendeten Inkubum. Das Verfahren ist ausführlich in der Messmethodensammlung Biogas beschrieben (Liebetrau, J 2013).

ches die Biogasbildung auf Basis der täglichen Fütterungsmengen differenziert nach den Einzelsubstraten beschreibt.

Mit Hilfe von Simulink können die anlagenspezifischen Konfigurationen (Fermenteranzahl, Fermentergröße, Schaltungsvarianten) variiert werden. Die folgende Abbildung zeigt das Simulink-Modell für die als Testanlage genutzte großtechnische landwirtschaftliche Biogasanlage mit zwei parallel geschalteten Hauptfermentern und zwei in Reihe geschalteten Nachgärem.

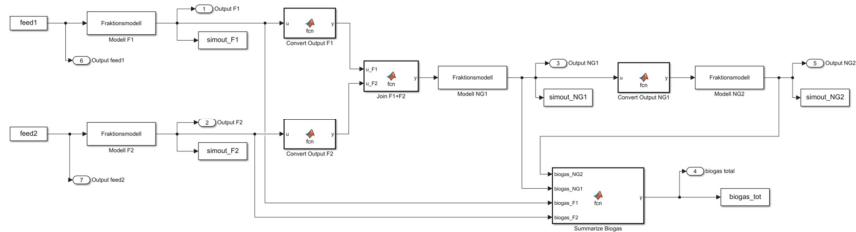


Abb. 2: Blockschaltbild des in Matlab-Simulink implementierte Modell zur Simulation der Biogaserzeugung in der Test-Biogasanlage

2 Datenerhebung

Um das Prozessmodell in der praktischen Anwendung zu testen, wurden die Daten aus dem realen Anlagenbetrieb einer großtechnischen landwirtschaftlichen Biogasanlage verwendet. Die Biogasanlage wird mit bis zu sieben verschiedenen Substraten gefüttert (Maissilage, Roggen-Ganzpflanzensilage, Grassilage, Gertreidekorn, Kartoffeln, Stroh und Hühnertrockenkot, Schweine- und Rindergülle), wobei Maissilage das Hauptsubstrat darstellt (siehe Abb. 3).

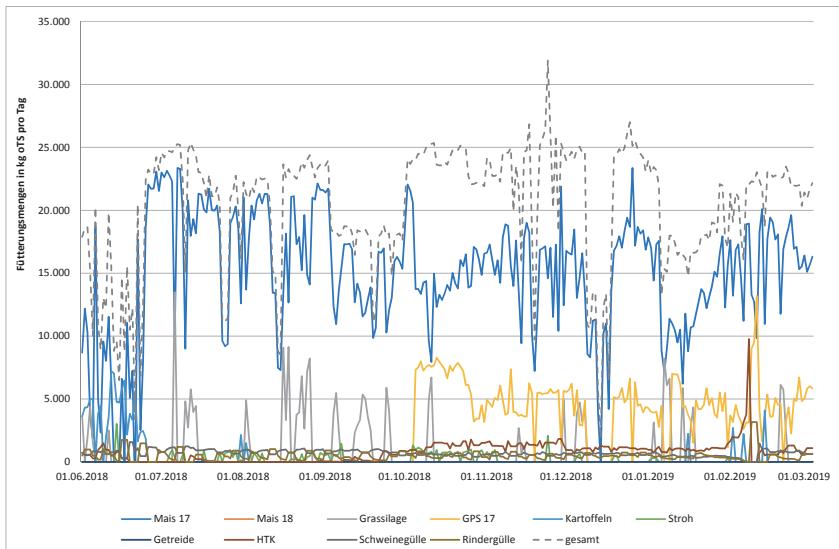


Abb. 3: Fütterungsmengen nach Substraten in kg_{oTS} pro Tag in der für den Modelltest betrachteten Biogasanlage

Für den Praxistest der modellbasierten Prozessüberwachung wurden folgende Daten erhoben und auf das Modell angewendet:

- Substratproben (Mehrfachbeprobung über einen Zeitraum von ca. 6 Monaten) zur Ermittlung von: V_{\max} , α , k_1+k_2 , Trockensubstanzgehalt (TS), Gehalt an organischer Trockensubstanz (oTS)
- Fermenterinhalte (als Inokulum für die ANKOM-Tests und zur Verifizierung des Modells auf Basis der Änderung der oTS-Gehalte in den Fermentern)
- Tägliche Fütterungsmengen je Substrat in t_{FM}
- Gasmengen (sowohl messtechnisch über ein thermisches Messverfahren, als auch rechnerisch über die erzeugten Energiemengen und Gasspeicherfüllstände)

3 Simulationsergebnisse

Auf Basis der erhobenen Anlagendaten und Laboranalysen konnten mit Hilfe des in Matlab-Simulink implementierten Modells die Biogasproduktion in der Beispielanlage für einen Zeitraum von sechs Monaten simuliert werden. Abb. 4 zeigt das Simulationsergebnis und im Vergleich dazu die aus den messtechnisch erfassten Gas- bzw. Energiemengen ermittelte Biogasmenge, welche tatsächlich in der Biogasanlage erzeugt wurden.

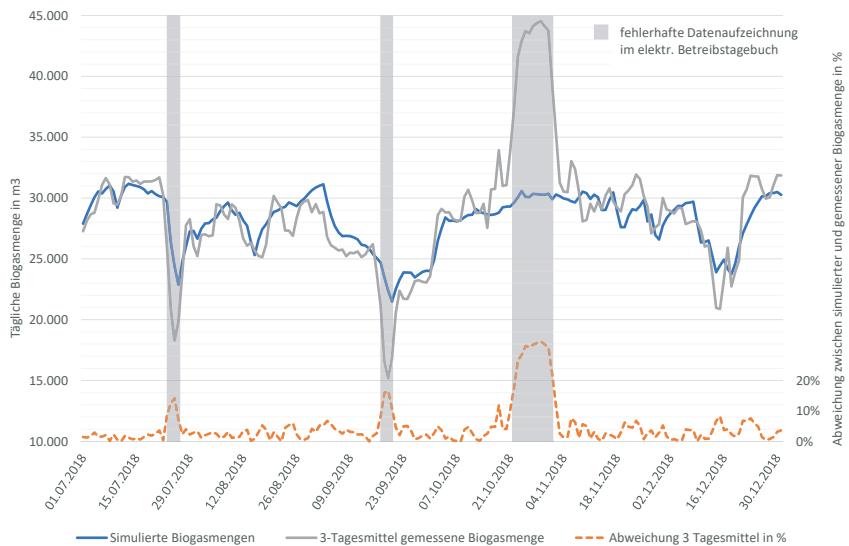


Abb. 4: Simulierte und messtechnisch erfasste tägliche Biogasmengen sowie deren Abweichung voneinander für den Zeitraum von sechs Monaten

Das Ergebnis zeigt, dass die Biogasproduktion in der großtechnischen Biogasanlage mit Hilfe des implementierten Modells grundsätzlich simuliert werden kann. Allerdings weichen die simulierten täglichen Biogasmengen zeitweise relativ deutlich von den messtechnisch erfassten Biogasmengen ab. Für drei Zeiträume, in denen diese Abweichung besonders ausgeprägt ist, lässt sich dies mit einer fehlerhaften Datenaufzeichnung im elektronischen Betriebstagebuch der Biogasanlage begründen.

Abb. 5 zeigt die Häufigkeitsverteilung der Abweichungen zwischen den simulierten und den messtechnisch erfassten Biogasmengen, ausgenommen der Werte in den Zeitenräumen fehlerhafter Datenaufzeichnung. Der Mittelwert der täglichen Abweichungen liegt bei 6,7 % mit einer Standartabweichung von 6 %.

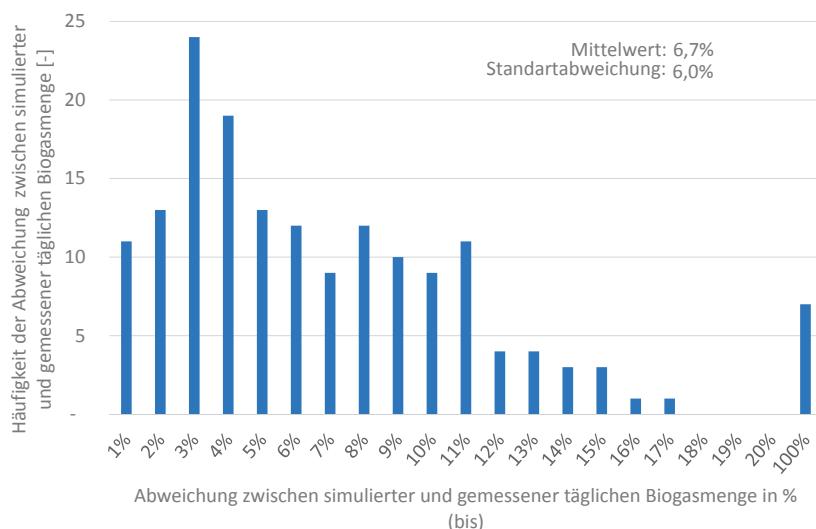


Abb. 5: Häufigkeitsverteilung, Mittelwert und Standardabweichung der Abweichungen zwischen täglich simulierter und messtechnisch erfasster Biogasmenge, ausgenommen der Werte in Zeiten fehlerhafter Datenaufzeichnung

4 Fehleranalyse

Um den Gründen für die Abweichungen zwischen den simulierten und messtechnisch erfassten Biogasmengen nachzugehen, wurde eine Fehleranalyse durchgeführt. Dazu wurden zunächst die wesentlichen Einflussgrößen auf einerseits das Simulationsergebnis und andererseits die messtechnisch in der Biogasanlage erfassten Gasmengen bzw. aus messtechnisch erfassten Energiemengen rechnerisch ermittelten Gasmengen identifiziert. Für die einzelnen Einflussgrößen wurden die Ungenauigkeiten ermittelt, um anschließend die Simulation der Biogasmengen bzw. die messtechnisch erfassten Biogasmengen auf Basis der Ungenauigkeit jeder betrachteten Einflussgröße neu zu bestimmen. Daraus wurde wiederum die neue Abweichung zwischen dem Simulationsergebnis und dem Ergebnis der messtechnisch erfassten Biogasmengen bestimmt. Tab. 1 zeigt die berücksichtigten Einflussgrößen, deren Ungenauigkeit und dessen Einfluss auf die durchschnittliche Abweichung zwischen täglich simulierter und messtechnisch erfasster Biogasmenge.

Tab. 1: Einflussgrößen auf das Ergebnis des Soll-Ist-Vergleichs zwischen simulierten und messtechnisch erfassten Biogasmengen, deren Ungenauigkeiten und die mittlere Abweichung des Soll-Ist-Vergleichs, aus Rodriguez, E. 2019

	Einflussgröße	Ungenauigkeit der Einflussgröße in %	mittlere zusätzl. Abweichung in %
Einflussgrößen auf die Simulation	Erfassung täglicher Substratmengen in kg FM	+/- 1 % Feststoffe (Waage) +/- 0,02 % Flüssig (Pumpe)	+ 0,95%
	oTS -Gehalt in g _{OTS} je g _{FM}	+/- 1,1 % bis 6,5 % (Mais als Hauptsubstrat: +/- 1,4%) ²	+ 1,59 %
	Biogasbildungspotenzial in m ³ /kg _{OTS}	+/- 6 bis 33 % (Mais als Hauptsubstrat: +/8 %) ³	+ 11,05 %
Einflussgrößen auf die messtechnisch erfasste Biogasmengen	Gasspeicherfüllstände in m ³	+/- 12,5 %	+13,42 %
	Rohgasmessung vor Biogas-aufbereitungs-anlage in m ³	+/- 1 %	
	Biogasmengen aus Stromproduktion im BHKW in m ³	+/- 1 % elektr. Wirkungsgrad zzgl. +/- 1 % Methangehalt	+1,95 % ⁴
	Biogasmenge im Heizkessel in m ³	+/- 0,01 % Temperaturbest. zzgl. +/- 1 % Methangehalt	

² Variationskoeffizient der Laboranalysen von 5 bis 15 Proben je Substrat

³ Variationskoeffizient der Biogasbildungspotenziale nach KTBL 2015

⁴ Resultiert aus der Summe der Ungenauigkeiten der Gasmengenerfassung vor der Biogasaufbereitungsanlage in den BHKWs und im Biogas-Heizkessel

Nicht berücksichtigt werden konnten die Ungenauigkeiten der im Labor ermittelten Kinetikparameter im ANKOM-Versuch und des ebenfalls aus diesen Versuchen abgeleitete substratspezifische maximale Biogasbildungspotenzial, da hierzu je Substrat nur eine Substratprobe analysiert werden konnte. Um trotzdem eine Idee vom Einfluss des Biogasbildungspotenzials und dessen Ungenauigkeit auf das Ergebnis des Soll-Ist-Vergleichs zu bekommen, wurden die substratspezifischen Biogasbildungspotenziale und als Ungenauigkeit der jeweilige Variationskoeffizient aus der KTBL-Versuchsreihe „Gasausbeuten in landwirtschaftlichen Biogasanlagen“ (KTBL 2015). für die Fehleranalyse einer ungenauen Bestimmung des Biogasbildungspotenzials verwendet. Diese Untersuchung gibt ein Bild davon, welchen Einfluss diese Ungenauigkeit haben kann, spiegelt aber nicht die im Vorhaben praktisch verwendeten Daten und deren Einfluss auf das Ergebnis wieder.

Die Ergebnisse der Fehleranalyse zeigen, dass unter den berücksichtigten Einflussgrößen die Ungenauigkeit der Gasspeicherfüllstände und des Biogasbildungspotenzials die mit Abstand größten Einflüsse auf den potenziellen Fehler des Soll-Ist-Vergleichs zwischen simulierter und messtechnisch erfasster Biogasmenge haben.

Aus der Tatsache, dass eine ungenaue Bestimmung des substratspezifischen Biogasbildungspotenzials einen relativ großen Einfluss auf die Genauigkeit des Soll-Ist-Vergleichs hat, lässt sich die Empfehlung ableiten, für das jeweils eingesetzte Substrat diese individuell bestimmen zu lassen, anstatt auf Literaturwerte zurückzugreifen. Bei stark schwankender Qualität einzelner eingesetzter Substrate sollte ggf. in gewissen Abständen oder bei Kenntnis über Qualitätsschwankungen wiederholt eine Bestimmung des Biogasbildungspotenzials erfolgen.

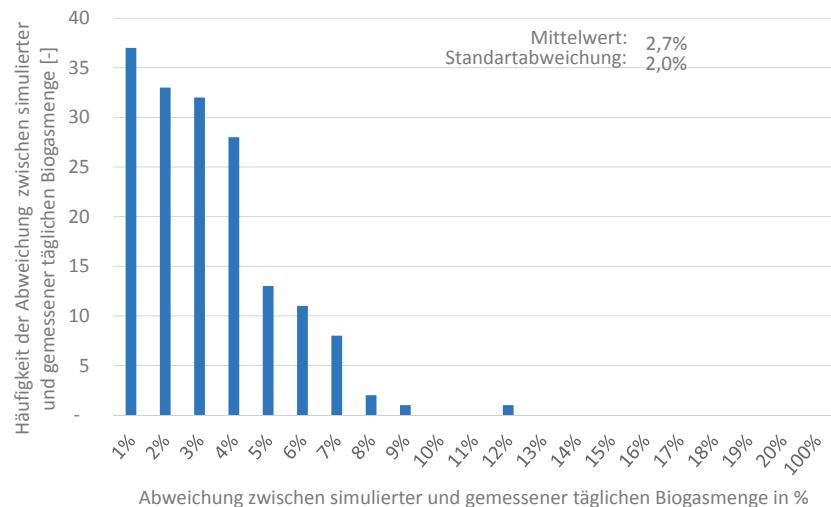


Abb. 6: Häufigkeitsverteilung, Mittelwert und Standartabweichung der Abweichungen zwischen simulierter und messtechnisch erfasster Biogasmenge (im 3-Tages-Mittel)

Die große Ungenauigkeit der Gasspeicherfüllstände resultiert aus dem groben Messprinzip in der Testanlage, welches nur vier Zustände des Gasspeichers (max: 75-100 %, mittel: 50-75 %, min: 25-50 % und leer: 0-25 %) erfasst. Um den Fehler aus der Ungenauigkeit der Erfassung der Gasspeicherfüllstände zu minimieren wurde der Soll-Ist-Vergleich auf der Basis von drei, anstatt einem Tag durchgeführt. Dies hat zur Folge, dass die absolute produzierte Gasmenge die Biogasanlage um den Faktor 3 steigt, während die gespeicherte Gasmenge gleichbleibt. So verringert sich die relative Ungenauigkeit der Gasspeicherfüllstände um durchschnittlich 1/3. Im Ergebnis verbessert sich die Abweichung zwischen der simulierten Biogasmenge und der messtechnisch erfassten Biogasmenge im Mittel von 6,7 % (vgl. Abb. 4) auf 2,7 %, bei einer Standartabweichung von 2 % (vgl. Abb. 6).

5 Fazit und Ausblick

Die Untersuchungen zeigen, dass die modellbasierten Prozessüberwachung mittels Soll-Ist-Vergleichs der simulierten und messtechnisch erfassten Biogas-

menge mit Hilfe des vom Institut für Biogas, Kreislaufwirtschaft & Energie entwickelten Tools grundsätzlich möglich ist. Eine hauptsächlich durch die in der für die Validierung genutzten großtechnischen Biogasanlage grobe Erfassung der Gasspeicherfüllstände begründeten teilweise großen Abweichung zwischen simulierten und messtechnisch erfassten Biogasmengen konnte durch eine Ausweitung des Bilanzierungszeitraums von einem auf drei Tage minimiert werden.

Es ist Ziel weiterer Untersuchungen, die Anwendbarkeit des Tools auf einer noch breiteren Datenbasis, d.h. an weiteren großtechnischen Biogasanlagen zu validieren. Hierbei können die bisherigen Erkenntnisse insbesondere der Einflüsse ungenauer Eingangsdaten von Beginn an berücksichtigt werden. Darüber hinaus soll über die Nutzung historischer Anlagendaten (Fütterungsdaten und Gasproduktionsdaten) mit Hilfe mathematischer Optimierungsverfahren die substrat- und anlagenspezifischen Parameter (Biogasbildungspotenzial und Kinetikparameter) ermittelt werden. Dies kann zum einen der Optimierung dieser Parameter dienen und zum anderen den Aufwand für die Ermittlung der Parameter in aufwendigen Laboranalysen reduzieren.

Literatur/Quellen

- KTBL, 2015. In: R. Ursula, P. Mark & W. Sebastian, Hrsg. Gasausbeute in landwirtschaftlichen Biogasanlagen. Darmstadt: Druckerei Silber Druck oHG, pp. 6-15.
- Liebetrau, J.; Pfeiffer, D.; Thräni, D.: Messmethodensammlung Biogas - Methoden zur Bestimmung von analytischen und prozessbeschreibenden Parametern im Biogasbereich, Mai 2013
- Rodriguez, E.: Optimierung der Datengrundlage für eine modellbasierte Überwachung von Praxisbiogasanlagen, Masterarbeit an der Universität Rostock, Oktober 2019, Gutachter: Dr. Gert Morscheck und Prof. Dr.-Ing. Frank Scholwin, fachlicher Betreuung: Johan Grope
- Weinrich, S. (2017): Praxisnahe Modellierung von Biogasanlagen - Systematische Vereinfachung des Anaerobic Digestion Model No. 1 (ADM1), Rostock 2017

Kontakt

Johan Grope, Fachleitung Strategie und Anlagentechnik

Institut für Biogas, Kreislaufwirtschaft & Energie

① +49 (0)172-577 0415 | ☎ grope@biogasundenergie.de
 ⌂ www.biogasundenergie.de

Sven Annas, Michael Elfering, Hans-Arno Jantzen,
Jürgen Scholz, Uwe Janoske, Andreas Heller, Lukas Buntkiel

Rühr- und Mischvorgänge in Biogasanlagen: Potentiale und Erfolgsschancen

Zusammenfassung: Im Rahmen des Forschungsvorhabens NeoBio wird die Problematik des optimalen Mischprozesses in Biogasanlagen aufgegriffen, um praktikable Lösungsansätze für die optimale Auslegung des Mischvorgangs zu finden.

In diesem Zusammenhang steht die Bestimmung instationärer Geschwindigkeitsfelder in Biogasanlagen über in der Fermentersuspension mitschwimmende Funktionsensoren im Fokus, welche ihre Position über Laufzeitmessungen detektieren. In Kombination mit Inertialsensoren können Bewegungen auch unterhalb des Flüssigkeitsspiegels bestimmt werden. Die ermittelten Geschwindigkeitsdaten werden für die Auslegung von Rührwerksgeometrien, -korrespondenzen und die Validierung von Modellversuchen genutzt.

In modellmaßstäblichen Untersuchungen an einem Fermenter mit Paddelrührwerk (Maßstab 1:40) konnte bereits gezeigt werden, welchen Einfluss alternative Rührwerkspositionen auf den Mischprozess haben. Eine Verringerung von Totzonen sowie die Reduzierung der Rühr- bzw. Mischzeit um bis zu 85 % sind erreichbar. Dabei sind die notwendigen Anpassungen überschaubar und somit in der Praxis leicht zu realisieren.

Diese Erkenntnisse werden bereits in aktuellen Anlagen umgesetzt und sind ein Baustein bei der Wirkungsgradsteigerung. Um das Optimierungspotential sicher bewerten zu können, müssen die Ergebnisse noch im Originalmaßstab validiert werden. In diesem Zusammenhang soll die beschriebene Messtechnik eingesetzt werden.

Abstract: The research project “NeoBio” addresses the problem of insufficient mixing processes in biogas plants in order to find practicable solutions for the design of mixing strategies.

In this context, novel wireless-networked sensors floating in the fermenter suspension are used to determine the transient velocity fields in biogas plants. Here, the sensors detect their position via time of flight measurements. In combination with inertial measurement units, movements can also be determined below the liquid surface. The determined velocity data are used for the design of agitator geometries, correspondences and for the validation of experiments at lab-scale.

Experiments at lab-scale (fermenter with paddle agitator, scale 1:40) have already shown the influence of alternative agitator positions on the mixing process. A reduction of dead zones as well as a reduction of the stirring and mixing time by up to 85 % can be achieved. The necessary adjustments are manageable and therefore easy to implement in practice.

These findings are already being implemented in current plants and can improve the efficiency significantly. In order to evaluate the optimization potential reliably, the results must be validated at full scale. In this context, the described measurement technology will be applied.

1 Stand der Technik

Für eine hohe Ausbeute an Methangas in Biogasanlagen ist eine gute Durchmischung notwendig. Dies wird in den meisten Fällen über Rührsysteme realisiert. Hierbei kommen unterschiedliche Rührwerkstypen zum Einsatz, die je nach Anforderungsprofil (Feststoffgehalt, Fütterungszusammensetzung etc.) entsprechend ausgewählt werden müssen. Aufgrund der schlechten Zugänglichkeit sowie der opaken Fermentersuspension ist eine Bewertung dieser Mischvorgänge bisher nur mit sehr hohem Aufwand möglich. Dies führte in der Vergangenheit zu einer empirischen Auslegung der eingesetzten Rührwerke, bei deren Optimierung die scherverdünnenden und hochviskosen Fluideigenschaften der Fermentersuspensionen eine große Herausforderung darstellen.

Abhilfe können hierbei Untersuchungen im Labormaßstab sowie neue Messtechniken liefern, die im Folgenden vorgestellt werden sollen. Im Fokus der Arbeit steht dabei zunächst die Charakterisierung der Mischvorgänge von mit Paddelrührwerken durchmischteten Fermentern im Modellmaßstab. In diesem Zusammenhang wurde auf eine korrekte Maßstabsübertragung geachtet, sodass Drehzahlen und Viskositäten passend zum Originalmaßstab in den Modellanlagen berücksichtigt wurden.

Die Ergebnisse sollen anschließend mit Hilfe einer funkbasierten Messtechnik im Originalmaßstab validiert werden. Die beschriebenen Arbeiten sind Bestandteil des Forschungsvorhabens NeoBio, an dem die FH Münster, das HZDR Dresden sowie die Fa. Budelmann GmbH eine Effizienzsteigerung von Anlagen erforschen (FKZ: 22032518).

2 Methodik

2.1 Rührsystem

Paddelrührwerke werden in bis zu jeder vierten Anlage eingesetzt [1] und zählen zu den Langsamläufern. Sie werden meist oberflächennah eingebaut, um Schwimmschichten zu vermeiden und eingebrachtes Futter effizient einzurühren. Nach [2] führt der Einsatz von Langsam- und Schnellläufern zu vergleichbaren Mischvorgängen, allerdings können mit Langsamläufern bis zu 70 % der Stromkosten eingespart werden.

Hieraus leitet sich die Bedeutung von Paddelrührwerken für die Durchmischung von Biogasanlagen ab. Für die durchgeföhrten Untersuchungen wurde ein Modellmaßstab von 1:40 gewählt. Um allerdings die gewonnenen Ergebnisse auf

den Originalmaßstab übertragen zu können, müssen zunächst Übertragungsge-setze definiert werden.

2.2 Maßstabsübertragung

In vorangegangenen Arbeiten [3] wurde die Maßstabsübertragung für Strö-mungs- und Mischvorgänge in Biogasanlagen bereits an Hand von numerischen Untersuchungen analysiert. Hierbei wurden über eine Dimensionsanalyse Kennzahlen ermittelt, die in verschiedenen Maßstäben konstant sein müssen. Die wesentlichen Kennzahlen sind die Reynolds- und Newton-Zahl Re und Ne sowie die Kennzahl Q . Diese Kennzahlen werden über die Rührwerksdrehzahl n , den Rührwerksdurchmesser d , die dynamische Viskosität η , die Rührwerksleis-tung P , die Dichte ρ sowie die Scherrate $\dot{\gamma}$ charakterisiert.

$$Re = \frac{n \cdot d^2 \cdot \rho}{\eta} \quad Ne = \frac{P}{n^3 \cdot d^5 \cdot \rho} \quad Q = \frac{\dot{\gamma}}{n}$$

Aus den drei beschriebenen Kennzahlen können die Anpassung der Drehzahl und Viskosität im Original (Index o) und Modellmaßstab (Index m) bestimmt wer-den. Diese ergeben sich zu

$$\frac{\eta_m}{\eta_o} = \frac{D_m}{D_o} \cdot \sqrt{\frac{\rho_m}{\rho_o}} \quad \frac{n_m}{n_o} = \frac{D_o}{D_m} \cdot \sqrt{\frac{\rho_o}{\rho_m}}$$

Diese Anpassung führt zu gleichen Geschwindigkeitsfeldern in unterschiedli-chen Maßstäben, sowie zu um den Maßstabsfaktor geänderten Mischzeiten t und Leistungseinträgen pro Volumen.

$$\frac{P_m/V_m}{P_o/V_o} = \frac{D_m}{D_o} \cdot \sqrt{\frac{\rho_o}{\rho_m}} \quad \frac{t_m}{t_o} = \frac{D_m}{D_o} \cdot \sqrt{\frac{\rho_o}{\rho_m}}$$

2.3 Bestimmung von Geschwindigkeitsfeldern und Mischzeiten

Auf Basis der Maßstabsübertragung wurde eine Modellanlage im Maßstab 1:40 (Abb. 1) mit einem Fermenterdurchmesser von $D=0,49$ m sowie einem Rühr-werksdurchmesser von $d=0,105$ m konstruiert. Mit Hilfe des optischen Mess-verfahrens der Particle-Image-Velocimetry (PIV) wurden anschließend die Geschwindigkeitsfelder analysiert. Bei der PIV werden üblicherweise einzelne Ebenen mit einem Laser ausgeleuchtet, und das von in der Strömung mitgeföhrt-en Tracern reflektierte Laserlicht wird mit Hilfe einer Kamera aufgenommen. Die durch die Reflektionen entstehenden Helligkeitsmuster können anschließend für die Bestimmung der Strömungsrichtung und -geschwindigkeit genutzt werden.

Im Rahmen der Untersuchungen wurde das Stromfeld bei sechs Drehzahlen, drei verschiedenen Rührwerkspositionen, fünf Fluiden auf drei unterschiedli-chen Ebenen analysiert. Voruntersuchungen [4,5] ergaben bei alternativen

Rührwerkspositionen (Pos. 2 und 3) eine signifikante Steigerung der mittleren Geschwindigkeit und eine Reduzierung der Totzonen. Die verwendeten Drehzahlen im Modell wurden mit $n_m = 100,200 \dots 600 \text{ min}^{-1}$ so gewählt, dass sie sich im gängigen Drehzahlbereich von Originalanlagen um $n_o = 10 \text{ min}^{-1}$ befinden.

Neben der Bestimmung der Geschwindigkeitsfelder wurden ebenfalls die Mischzeiten mit Hilfe von Leitfähigkeitsmessungen für die beschriebenen Systeme untersucht. In diesem Zusammenhang erfolgte eine Zugabe einer NaCl-Lösung oberhalb des Rührwerks über eine Dosierpumpe. Die Änderung der Leitfähigkeit wurde mit Hilfe von drei Leitfähigkeitssonden bestimmt. Das Zeitintervall von der Tracerzugabe bis zum Erreichen einer konstanten elektrischen Leitfähigkeit aller Sonden wurde als Mischzeit t_m definiert.

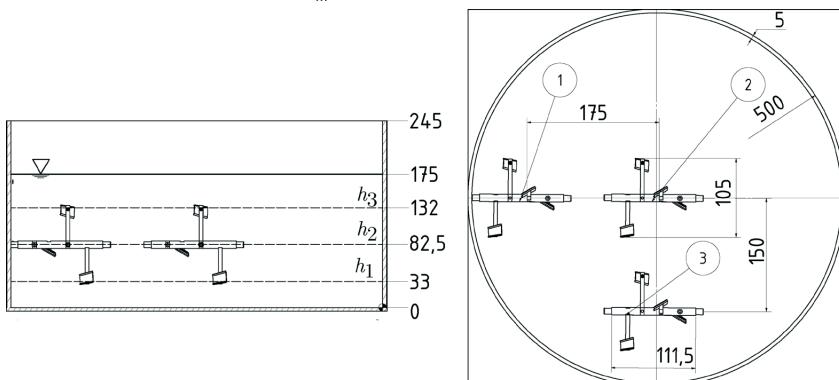


Abb. 1: Modellanlage im Maßstab 1:40 aus Fermenter und Paddelrührwerk. Geschwindigkeitsfelder wurden neben der Standardpositionen (1) für zwei weitere Rührwerkspositionen sowie drei Auswerteebenen bestimmt.

Bei der Charakterisierung der Misch- und Strömungsvorgänge wurden auf Basis der Maßstabsübertragung sowie der rheologischen Untersuchung typischer Fermentersuspensionen mit Hilfe eines Rohrviskosimeters [4] fünf Modellfluide ausgewählt. Hierbei handelt es sich um wässrige Lösungen mit CMC (0,4; 0,6 und 0,8 %), Xanthan (0,3 %) und Glycerin. Die CMC-Lösungen weisen dabei ein rein scherverdünnendes Materialverhalten auf, welches im mittleren Scherratenbereich über ein Potenzgesetz mit dem Konsistenzfaktor k und dem Fließindex m beschrieben werden kann. Je kleiner der Fließindex ist, desto stärker sind die scherverdünnenden Eigenschaften, wohingegen für $m=1$ keine Scherverdünnung und Newtonsches Viskositätsverhalten vorliegt.

$$\eta = k \cdot \dot{\gamma}^{m-1}$$

Bei kleinen Scherraten findet keine Scherverdünnung mehr statt, sodass sich konstante Viskositäten η_o einstellen. Im Gegensatz zu CMC weist Xanthan eine Fließgrenze τ_0 auf, bis zu dessen Überschreitung sich das Fluid wie ein

elastischer Festkörper verhält. Die rheologischen Kenndaten der verwendeten Modellfluide sind in Tab. 1 abgebildet.

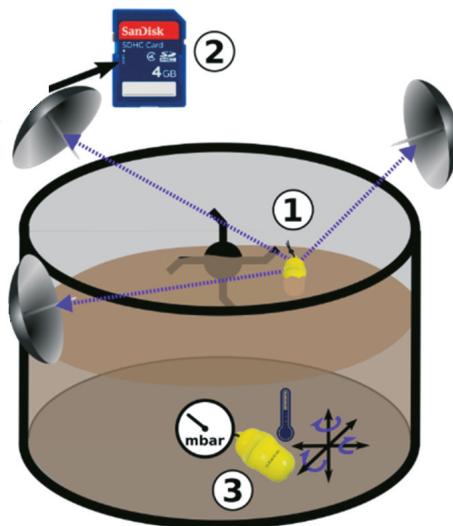
Tab. 1: Rheologische Kenndaten der verwendeten Modellfluide

	η_0 in Pa s	k in Pa s ^m	m	τ_0 in Pa	ρ in kg m ⁻³
CMC04	0,12	0,27	0,64	-	1000
CMC06	0,39	0,91	0,54	-	1000
CMC08	1,04	1,94	0,48	-	1000
Gly	0,48	0,48	1	-	1240
X03	-	0,85	0,37	0,6	1000

2.4 Bestimmung von Geschwindigkeitstrajektorien im Originalmaßstab

Im Rahmen des NeoBio-Forschungsvorhabens wird die Entwicklung einer neuen Messtechnik zur Bestimmung von dreidimensionalen Partikeltrajektorien verfolgt. Hierbei wird ein Sensorsystem basierend auf an der FH Münster erforschten Funkbojen [6,7] und am HZDR Dresden entwickelten Strömungsfolgern [8–12] entwickelt.

Im Detail ist die Bestimmung instationärer Geschwindigkeitsfelder über in der Fermentersuspension mitschwimmende Funksensoren (Abb. 2) möglich, welche ihre Position über Laufzeitmessungen detektieren (1). In Kombination mit Inertialmesseinheiten können Bewegungen unterhalb des Flüssigkeitsspiegels bestimmt werden (3).



Die während einer Tauchfahrt aufgenommenen Daten können bei Rückkehr an die Oberfläche per Funk übertragen und mit Hilfe der Laufzeitmessung auf ihre Validität geprüft werden (2).

Die neue Messtechnik ermöglicht so die Auslegung von Rührwerksgeometrien sowie -korrespondenzen und kann zur Validierung von Modellversuchen genutzt werden.

Abb. 2: Funktionsprinzip der zu entwickelnden Messtechnik

3 Ergebnisse

3.1 Strömungsvorgänge

Die mit Hilfe der PIV ermittelten Geschwindigkeitsfelder für die untersuchten Positionen zeigt Abb. 3 bei einer Drehzahl von $n=400 \text{ min}^{-1}$ auf der Ebene h_3 . Deutlich erkennbar handelt es sich bei Paddelrührwerken um radial-tangential fördernde Rührwerk ohne nennenswerten axialen Förderimpuls. Dies resultiert je nach Rührwerksposition in unterschiedlichen Geschwindigkeitsfeldern im Fermenator. Für die Standardposition (Pos. 1) ergeben sich große Bereiche geringer Strömungsgeschwindigkeiten, besonders für hochviskose Fluide.

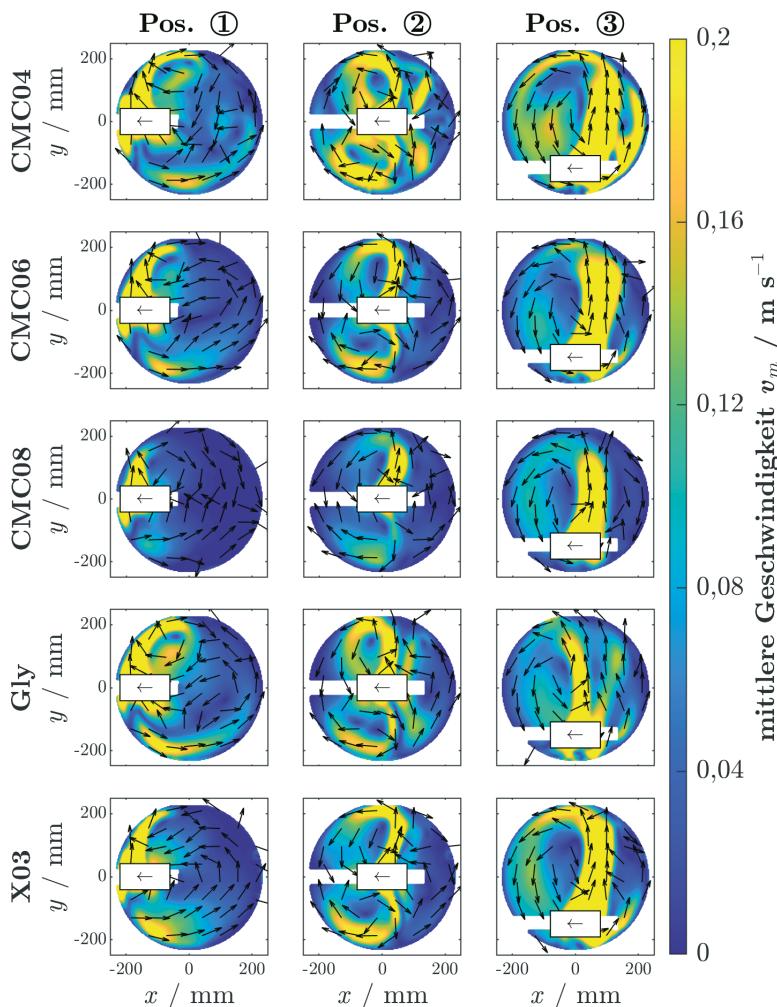


Abb. 3: Geschwindigkeitsfelder auf der Höhe h_3 bei einer Drehzahl von $n=400 \text{ min}^{-1}$

Mit Hilfe eines Geschwindigkeitskriteriums von $v < 0,05 \text{ m s}^{-1}$ können Totzonen identifiziert werden [13]. Entsprechend zeigt sich, dass die Ausbildung ausgeprägter Totzonen für die Standardpositionen sehr relevant ist. Durch eine geänderte Rührwerkslage kann dies in vielen Bereichen des Fermenters vermieden werden. Vielmehr ist sogar eine nahezu komplettete Umrührlung der Anlage auch für hochviskose Substrate möglich (Pos. 3).

Eine detaillierte Charakterisierung ermöglicht die Betrachtung der mittleren Geschwindigkeit im Modellfermenter (Abb. 4). So wird ersichtlich, dass eine geänderte Rührwerkslage die mittleren Geschwindigkeiten deutlich erhöhen kann. Beispielsweise steigt die mittlere Geschwindigkeit für CMC08 (vergleichbar einer Fermentersuspension mit einem TS-Gehalt von ca. 12 %) um knapp 30 %. Lediglich für das als Newtonsches Vergleichsmedium gewählte Glycerin ist keine signifikante Änderung zu identifizieren.

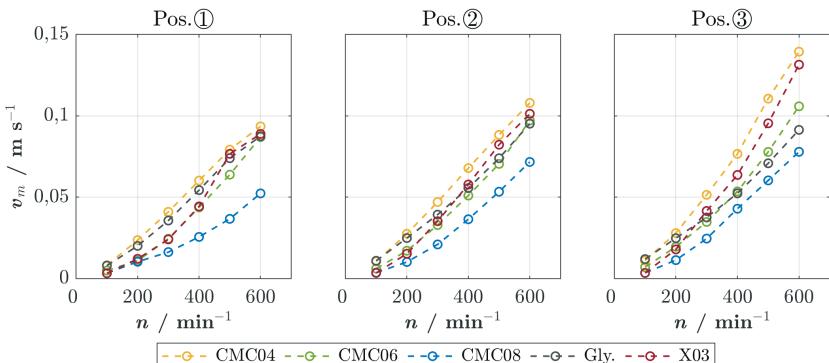


Abb. 4: Verlauf der mittleren Geschwindigkeit im Fermenter für die unterschiedlichen Rührwerkspositionen und Fluide

Des Weiteren steigt bei Pos. 3 die mittlere Geschwindigkeit bei höheren Drehzahlen stärker an. Dies lässt sich durch die raumfüllend zirkulierende Strömung erklären, sodass der eingetragene Rührwerksimpuls für eine Förderung des Fluids zum Rührwerk ausreicht. Eine abschließende Quantifizierung des Optimierungspotentials durch eine geänderte Rührwerksposition kann allerdings erst über die Bestimmung von Mischzeiten erfolgen.

3.2 Mischvorgänge

Die für die untersuchten Systeme bestimmten Mischzeiten sind in Abb. 5 dargestellt. Mit steigenden Drehzahlen sinken die Mischzeiten prinzipiell für alle Fluide, allerdings stellen sich für hochviskose Fluide insgesamt höhere Mischzeiten ein. Vor allem für Xanthan zeigt sich, dass eine Erhöhung der Drehzahl nicht zu einer weiteren Reduzierung führen muss. Ausschlaggebend hierfür kön-

nen Kavernen sein, wie sie für hochviskose und stark scherverdünnende Fluide üblich sind. Nichtsdestotrotz können die Mischzeiten um bis zu einer Größenordnung (CMC08, ca. 85 %) reduziert werden.

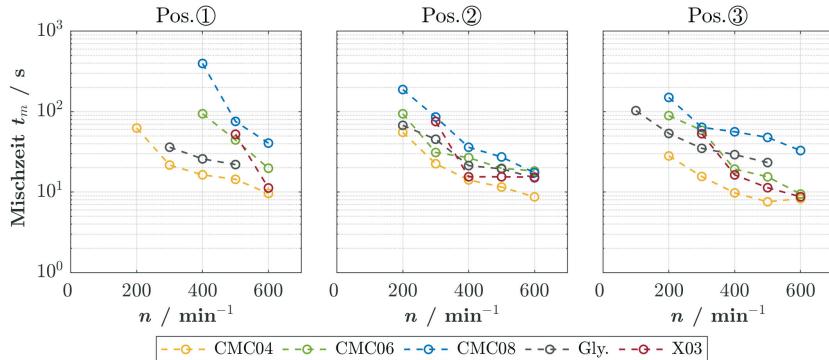


Abb. 5: Verlauf der Mischzeiten für die untersuchten Fluide und Rührwerkpositionen. Alternative Rührwerkpositionen sowie eine Drehzahlsteigerung verringern die Mischzeiten, während hochviskose Fluide sie erhöhen.

Im Hinblick auf die Bestimmung von Einsparpotentialen können die Mischzeiten entsprechend verwendet werden. In diesem Zusammenhang wurden die Kosten für einen Rührvorgang über die benötigte Leistung, die Mischzeit und die EEG-Vergütung pro kWh bestimmt und auf den Originalmaßstab umgerechnet. Hierbei wird ersichtlich, dass vor allem Mischprozesse bei kleinen Drehzahlen aufgrund des deutlich geringeren Energieintrages kosteneffizient sind. Gleichermaßen steigt allerdings auch die Gefahr einer unvollständigen Durchmischung.

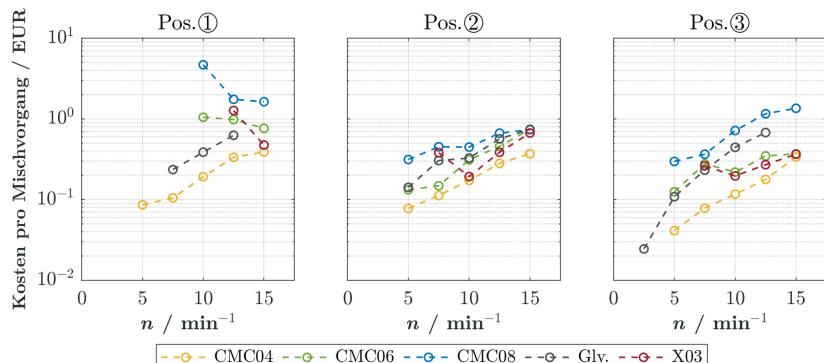


Abb. 6: Resultierende Kosten pro Mischvorgang auf Basis der ermittelten Leistungseinträge, Mischzeiten und der entsprechenden Vergütung. Längere Mischzeiten bei niedrigen Drehzahlen sind im Vergleich zu kürzeren Mischzeiten bei höheren Drehzahlen auf Grund des geringeren Leistungseintrags kosteneffizienter.

3.3 Messtechnik

Im Hinblick auf Geschwindigkeitsmessungen in der Originalanlage konnten zum jetzigen Zeitpunkt die über Laufzeitmessung arbeitenden Funkbojen unter Realbedingungen eingesetzt werden. Erste Messungen an einem Gütelager (Abb. 7) können dabei bereits die Tauglichkeit verdeutlichen. Besonders bei der Datenverarbeitung können über die Implementierung von Filtern Fehlmessungen korrigiert und die Genauigkeit gesteigert werden. Die Erprobung der Kopplung mit Inertialmesseinheiten findet zum jetzigen Zeitpunkt noch an einem Drehtisch (Abb. 8) statt, zeigt aber, dass sich rotatorische Bewegung mit Hilfe des gewählten Verfahrens zielführend rekonstruieren lassen. Der aktuelle Stand der Forschung wurde unter anderem in [6–8] veröffentlicht.

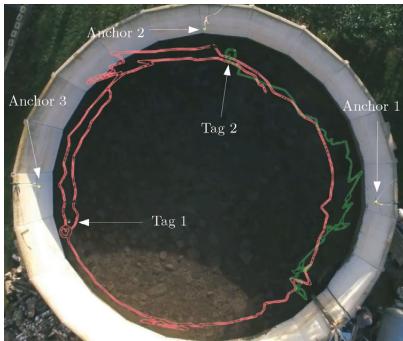


Abb. 7: Bestimmung von Stromfeldern mit Hilfe von Laufzeitmessungen [7]



Abb. 8: Test der Beschleunigungskopplung am Drehtisch

3 Zusammenfassung und Ausblick

Die Untersuchungen haben gezeigt, dass Mischzeiten und somit Kosten selbst mit bestehenden Rührsystemen signifikant reduziert werden können. Besonders für hochviskose Medien kann eine geänderte Rührwerksposition Totzonen verringern und die mittlere Geschwindigkeit erhöhen. Dies führt im Endeffekt zu Kosteneinsparungen von bis zu 85 %. Mit Hilfe der neuen Messtechnik steht dem Forschungsverbund demnächst eine Methodik zur Verfügung, mit der diese Optimierungspotentiale auch im Originalmaßstab validiert werden können. In diesem Zusammenhang wird bereits eine Anlage mit einer geänderten Rührwerksposition aufgebaut.

Des Weiteren können die in der Originalanlage ermittelten Geschwindigkeitsfelder auch bei der Validierung der numerischen Auslegungsverfahren helfen. Hierbei müssen im Rahmen des aktuellen Forschungsprojektes allerdings zunächst Fragestellungen der korrekten numerischen Modellierung des Materialverhaltens oder von Turbulenzeffekten beantwortet werden.

Literatur/Quellen

- [1] Johann Heinrich von Thünen-Institut (vTI), Biogasmessprogramm II, 1st ed., FNR, 2009.
- [2] A. Lemmer, H.-J. Naegele, et al., Energies, 2013, 6 (12), 6255–6273. DOI: 10.3390/en6126255.
- [3] S. Annas, H.-A. Jantzen, et al., Chem. Eng. Technol., 2018, 41 (4), 739–746. DOI: 10.1002/ceat.201700447.
- [4] S. Annas, M. Elfering, et al., Chem. Ing. Tech., 2019, 91 (7), 969–979. DOI: 10.1002/cite.201800116.
- [5] M. Elfering, Forschungsreihe der FH Münster, 2018. DOI: 10.1007/978-3-658-22486-8.
- [6] A. Heller, L. Horsthemke, et al., GNSS based Automatic Anchor Positioning in Real Time Localization Systems, in Proceedings IESS 2019.
- [7] A. Heller, L. Horsthemke, et al., Design, Implementation, and Evaluation of a Real Time Localization System for the Optimization of Agitation Processes, in Proceedings IESS 2019.
- [8] L. Buntkiel, S. F. Reinecke, et al., 3.5 - Inertiale Lage- und Bewegungsverfolgung für instrumentierte Strömungsfolger zur Strömungscharakterisierung, in Dresdner Sensor-Symposium (Ed: Dechema e.V.), 2019.
- [9] S. Thiele, M.J. Da Silva, et al., Meas. Sci. Technol., 2010, 21 (8), p. 85201. DOI: 10.1088/0957-0233/21/8/085201.
- [10] S.F. Reinecke, U. Hampel, J. Sens. Sens. Syst., 2016, 5 (1), 213-220. DOI: 10.5194/jsss-5-213-2016.
- [11] S.F. Reinecke, K. Jobst, et al., Chem. Ing. Tech., 2017, 89 (4), 464-469. DOI: 10.1002/cite.201600153.
- [12] S.F. Reinecke, A. Deutschmann, et al., Chem. Eng. Res. Des., 2017, 118, 1-11. DOI: 10.1016/j.cherd.2016.12.002.
- [13] K. Jobst, A. Lomtscher, et al., Optimierter Betrieb von Rührsystemen in Biogasanlagen, in Biogas in der Landwirtschaft (Ed: KTBL), 2015.

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Ernährung
und Landwirtschaft



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Kontakt

*Sven Annas, M.Eng, wissenschaftlicher Mitarbeiter (FH Münster)
und Promovend (BUW)*

① +49 (0)2551.962-770 | ☎ s.annas@fh-muenster.de
✉ www.fh-muenster.de/stroemungstechnik

Sven Annas^{1,2}, Michael Elfering^{1,2}, Hans-Arno Jantzen¹, Jürgen Scholz¹, Uwe Janoske², Andreas Heller¹, Lukas Buntkiel³

¹FH Münster, ²Bergische Universität Wuppertal, ³HZDR Dresden

*Eric Mauky, Mathias Stur, Christian Krebs, Manuel Winkler,
Jörg Kretzschmar*

Gasspeichermanagement für einen optimierten bedarfsgesteuerten Betrieb von anaeroben Vergärungsanlagen

Zusammenfassung: Biogasanlagen müssen zunehmend bedarfsgerecht betrieben werden. Ein Teil der Lösung kann ein flexibles Fütterungsmanagement sein. Dies erfordert eine präzise Messung der resultierenden variablen Gasflussraten und eine Regelung durch ein präzises, anlagenweites Gasmanagement, das die Auslastung der vorhandenen Speicherkapazität optimiert. Insbesondere beim flexiblen Anlagenbetrieb ist eine zuverlässige Überwachung des Gasspeicherfüllstandes die entscheidende Aufgabe eines Gasmanagements, da es die Schaltpunkte für BHKWs und die Gasfackel vorgibt. Darüber hinaus müssen die Gasnutzungsstrategien an die sich ändernden Witterungsbedingungen angepasst werden. Ein Effekt von ungenauen Messungen kann eine Überschätzung des verfügbaren Speichervolumens und damit das unbeabsichtigte Abblasen von Biogas durch die Überdrucksicherung bei Überschreiten des maximalen Füllstandes sein. Auf Basis der Witterungsbedingungen (z.B. Temperatur, Windstärke und Sonneneinstrahlung) wurde ein thermodynamisches Gasspeichermodell entwickelt, um den Gasspeicherfüllstand vorherzusagen und in einem übergreifenden Modellansatz zur Anlagenregelung zu verwenden.

Abstract: Biogas plants have to operate increasingly according to energy demands. Demand-driven feeding management can be part of the solution. This requires precise measurement of the variable gas flow rates and control through precise, plant-wide gas management that optimizes the utilization of the available storage capacity. Especially in flexible plant operation, reliable monitoring of the gasholder filling level is the decisive task of a gas management system, as it determines the switching points for CHPs and the gas flare. In addition, gas utilization strategies must be adapted to changing weather conditions. One effect of inaccurate measurements can be an overestimation of the available storage volume and thus blowing off biogas by the overpressure relief valve when the maximum filling level is exceeded. Based on the weather conditions (e.g. temperature, wind speed and solar radiation) a thermodynamic gas storage model was developed to predict the real gasholder filling level and to use it in a comprehensive model approach for plant control.

1 Einleitung

Landwirtschaftliche Biogasanlagen sind in Deutschland überwiegend für einen konstanten Energieoutput ausgelegt. Um Energie aus Biogasanlagen bedarfsoorientiert bereit zu stellen, stehen mehrere technische Optionen zur Verfügung, wie beispielsweise ein Ausbau der Speicher- und Verstromungskapazitäten. Ein weiterer Teil der Lösung kann ein flexibles Fütterungsmanagement sein. Dies erfordert eine präzise Messung der resultierenden variablen Gasflussraten

und eine Regelung durch ein präzises, anlagenweites Gasmanagement, das die Auslastung der vorhandenen Speicherkapazität optimiert. Insbesondere beim flexiblen Anlagenbetrieb ist eine zuverlässige Überwachung des Gasspeicherfüllstandes die entscheidende Aufgabe eines Gasmanagements, da es die Schaltpunkte für BHKWs und die Gasfackel vorgibt. Darüber hinaus müssen die Gasnutzungsstrategien an die sich ändernden Witterungsbedingungen angepasst werden. Ein Effekt von ungenauen Messungen kann eine Überschätzung des verfügbaren Speichervolumens und damit das unbeabsichtigte Abblasen von Biogas durch die Überdrucksicherung bei Überschreiten des maximalen Füllstandes sein. Dies hat nicht nur negative Auswirkungen auf die Wirtschaftlichkeit einer Anlage, sondern es werden auch Treibhausgasemissionen (THG-Emissionen) freigesetzt.

Im Rahmen der Flexibilisierung von Biogasanlagen kann eine gezielte Fütterungsgestaltung aber auch dazu genutzt werden, vorrangig in den Zeiträumen Gas zu produzieren, in denen die Verstromung des BHKW konzentriert werden soll. Es entstehen dabei gegenüber einer konstanten Gasproduktion vor allem größere Spielräume in der Fahrplangestaltung, da der Gasverbrauch und die Gaserzeugung synchronisiert werden können. Es zeigt sich, dass mit einem Fütterungsmanagement auch auf kurzfristige Bedarfsschwankungen reagiert werden kann [1]. Um den Verlauf der Gasbildungsrate entsprechend des Bedarfes prognostizieren und manipulieren zu können, bedarf es einer vorausschauenden Regelung. Eine solche Regelung wurde am DBFZ entwickelt und erfolgreich an der DBFZ-Forschungsbiogasanlage und an der Biogasanlage „Unterer Lindenhof“ der Uni Hohenheim getestet [2,3]. Hierbei konnte die notwendige Gaspeicherkapazität um bis zu 45 % reduziert werden. Bei einer solchen flexiblen Prozessführung ist eine verlässliche Gasspeicherfüllstandmessung und -prognose von entscheidender Bedeutung.

Der vorliegende Beitrag soll daher den Einfluss der Witterungsbedingungen auf den Gasspeicher aufzeigen und eine Möglichkeit der Prognose vorstellen, um somit eine vorausschauende Optimierung der Speicherausnutzung und Rationsgestaltung zu unterstützen.

2 Material und Methoden

Durchgeführt wurden die Untersuchungen an der DBFZ-Forschungsbiogasanlage in Leipzig [2]. Abb. 4a zeigt den untersuchten Doppelmembrangasspeicher am DBFZ. Um die Auswirkungen von Temperaturschwankungen auf das Gasvolumen im Biogasspeicher zu prognostizieren, muss die Gastemperatur in Abhängigkeit von Wetterdaten berechnet werden können. Die zur Bilanzierung zu nutzenden Wetterdaten wurden über eine installierte Wetterstation (Abb. 1; Pyranometer und Kombi-Wettermessstation) ermittelt. Für Prognosezwecke wurde darüber hinaus auf online verfügbare Wetterdaten des Deutschen Wetterdienstes (Klimadaten des DWD über <https://opendata.dwd.de>) für den nahegelegenen Standort Leipzig/Holzhausen zurückgegriffen. Zur Erstellung von thermo-

grafischen Bildern wurde eine Infrarotkamera IC 0120 V (Trotec, Deutschland) verwendet.

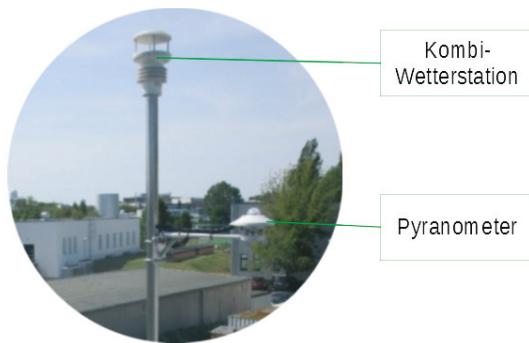


Abb. 1: Verwendete Wetterstation, bestehend aus (im Bild links) Pyranometer und (im Bild oben) Kombi-Wettermessstation

3 Gasspeichermodell

Der Fokus im vorliegenden Projekt war die Abbildung und Prognose der Netto-Gasspeicherkapazität, um damit vorrausschauend Substrateinsatzplanung und Verstromungsfahrpläne abzustimmen. Die Prognose der Netto-Gasspeicherkapazität erfolgt dabei anhand von Wetterdaten (Temperatur, Druck, Windschwindigkeit, Solarstrahlung, relative Luftfeuchtigkeit), welche auf ihre Relevanz hin untersucht wurden, da besonders wetterbedingte Temperatur- und Druckschwankungen die real verfügbare Speicherkapazität beeinflussen und zu Fehlinterpretationen des technischen Gasspeicherfüllstands führen können.

Zentrale Komponente ist die Bilanzierung des Gasspeichers und damit die Vorausberechnung der für die Vorhersage des Gasspeicherfüllstandes benötigten Temperatur- und Druckverhältnisse im Gasspeicher. Die Abb. 2 zeigt schematisch die in der Gasspeichermodellierung berücksichtigten Wärmeströme. Die gelben Pfeile beschreiben dabei die im Modell (Bilanzgrenze rot gestrichelt) berücksichtigten Energieströme. Die grauen Pfeile zeigen der Vollständigkeit halber weitere Energieströme an einem Fermenter, welche jedoch im gewählten Ansatz nicht benötigt werden. Da die Fermenterflüssigkeit eine große Wärmekapazität besitzt und als großer Wärmespeicher fungiert (Temperaturnessungen in der Flüssigphase haben gezeigt, dass zwischen Tag und Nacht keine Temperaturänderungen festgestellt werden konnten – nichtgezeigte Daten), ist diese Vereinfachung berechtigt. Der Bildausschnitt 1 in Abb. 2 zeigt die Wärmeübertragungsvorgänge, welche im Modell berücksichtigt wurden. Diese finden zum einen zwischen Gärmedium und Mediumsoberfläche statt, aber auch zwischen Mediumsoberfläche und Biogas. Da es sich um strömende Medien handelt (u.a. erzwungene Konvektion durch Rührwerk, freie Konvektion des Bioga-

ses), sind diese instationären Teilvergänge separat zu berücksichtigen. Abb. 2 Teilausschnitt 2 zeigt schematisch die Wärmeübertragungsvorgänge zwischen Biogas und Umgebung über die Fermenterwand oberhalb des Flüssigkeitsfüllstandes. Dabei sind die Wärmeleiteigenschaften der Materialien der Fermenterwand einzubeziehen. Abb. 2 Teilausschnitt 3 zeigt die Wärmeübertragungsvorgänge zwischen Biogas und Umgebung über das Fermenterdach, welches sich im vorliegenden Fall (Doppelmembrangasspeicher) aus Gasspeichermembran, Tragluftspalt und Schutzmembran zusammensetzt. Die entsprechenden Berechnungsvorschriften sind dem VDI-Wärmeatlas [4] entnommen. In Abb. 2 Teilausschnitt 4 sind schematisch die berücksichtigten Übertragungsvorgänge der photothermischen Wandlung aus absorbiert Strahlungswärme und reflektierter Strahlung dargestellt (Berechnungsmethoden wurden den Grundlagen zur solarthermischen Energiewandlung entlehnt [5]).

Die beschriebenen Vorgänge und Effekte wurden mathematisch beschrieben, zu einem Speichermodell zusammengefügt und in der Softwareumgebung Matlab/Simulink umgesetzt.

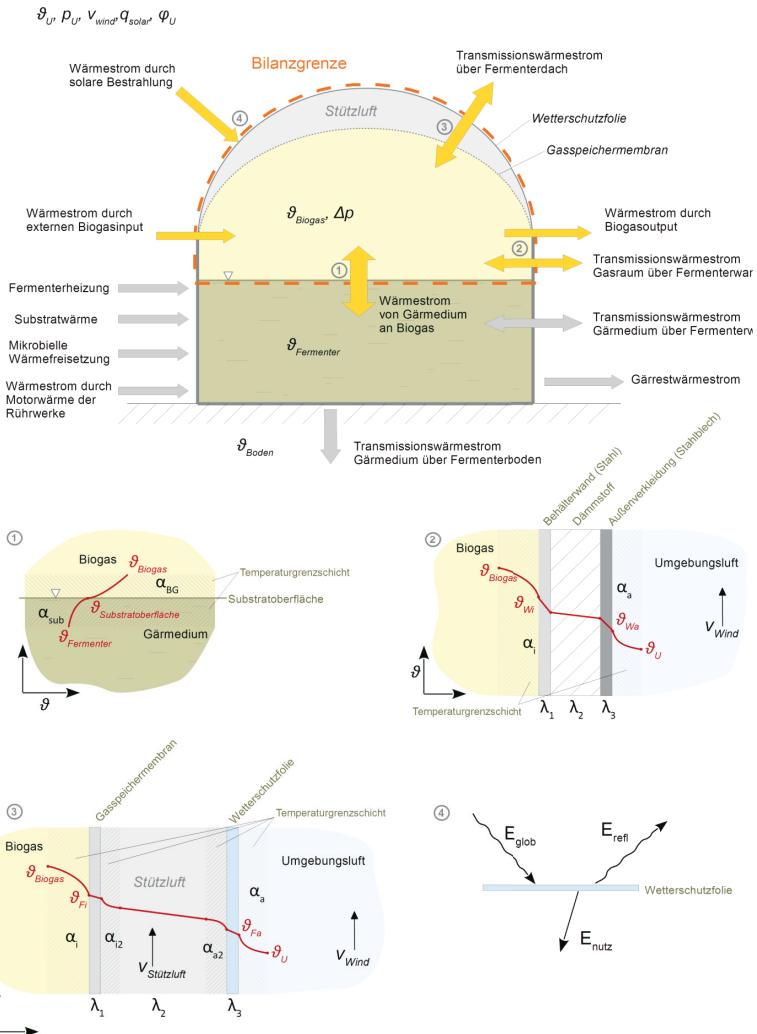


Abb. 2: Übersicht zu den berücksichtigten Wärmeströmen zur Gasspeicherbilanzierung:
 Gelbe Pfeile beschreiben die im Modell (Bilanzgrenze rot gestrichelt) berücksichtigten Energieströme. Graue Pfeile beschreiben weitere Energieströme an einem Biogasfermenter, welche jedoch im Ansatz nicht benötigt werden. Die Bildausschnitte zeigen die Wärmeübertragungsvorgänge in 1: zwischen Gärmedium und Biogas; in 2: zwischen Biogas und Umgebung über Fermenterwand oberhalb Flüssigkeitsfüllstand; in 3: zwischen Biogas und Umgebung über Fermenterdach; in 4: Übertragung der Strahlungswärme der Sonne

3 Ergebnisse

Abb. 3 verdeutlicht die Abhängigkeit der Netto-Gasspeicherkapazität von einer sich ändernden Gasspeicherinnentemperatur in einem rechnerischen Beispiel, um die Bedeutung der Temperaturen für den Gasspeicherfüllstand abzubilden. Es ergibt sich bspw. bei einer Temperaturänderung von 30 K im Gasspeicherinnenraum während des Verlaufes eines Tages eine Reduzierung der Netto-Gasspeicherkapazität um bis zu 20 %. Diese Temperaturänderungen von 30 K sind realistisch und konnten durch Messungen an der DBFZ-Forschungsbiogasanlage an Sommertagen belegt werden.

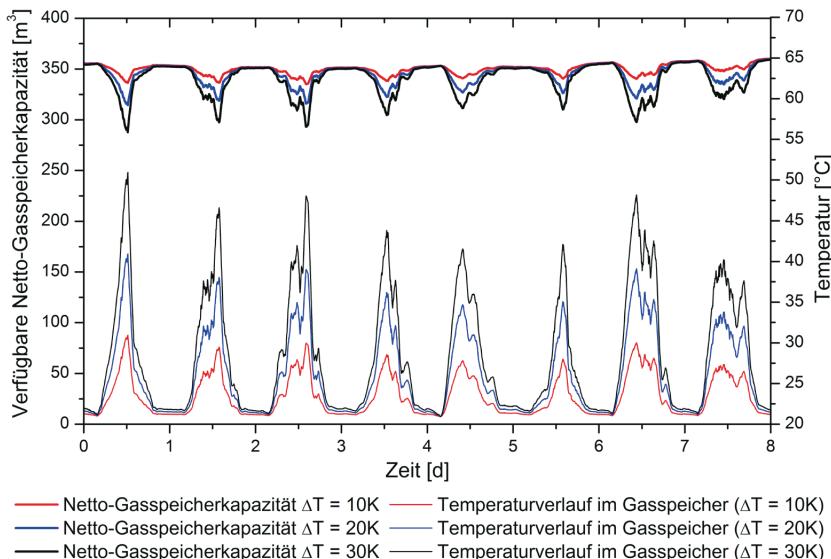


Abb. 3 Darstellung des Einflusses der Gasspeicherinnentemperatur auf die verfügbare Netto-Gasspeicherkapazität

Weiterhin wurden mittels IR-Kamera Temperaturmessungen an der Außenseite der Schutzmembran der DBFZ-Forschungsbiogasanlage durchgeführt (Abb. 4b, c und d). Dabei wurden bei direkter Sonneneinstrahlung Oberflächentemperaturen von bis zu ca. 68 °C ermittelt (Abb. 4c).

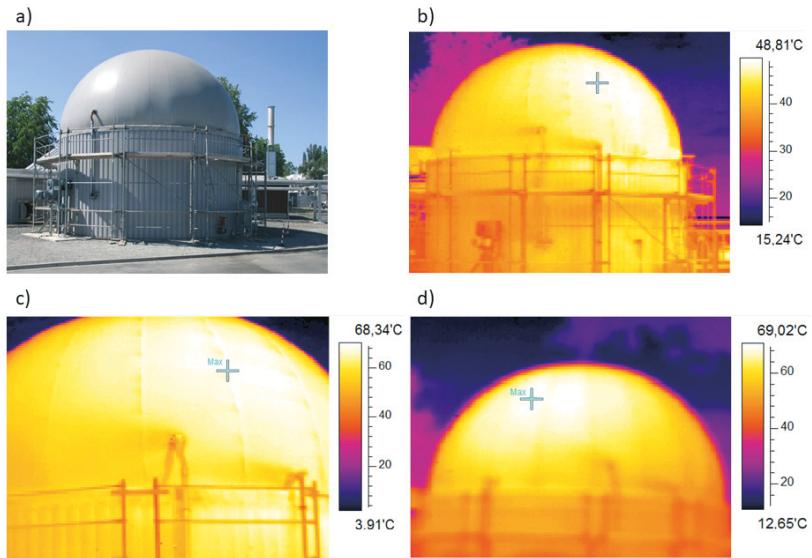


Abb. 4 Einfluss der Sonneneinstrahlung auf den Gasspeicher der DBFZ-Forschungsbiogasanlage
a) Gesamtansicht mit normalem Kameramodus und b, c, d): Visualisierung der Oberflächentemperatur, gemessen mit Infrarotkamera; Kreuz zeigt die Lage des jeweiligen Maximalwertes

Unter bestimmten Betriebszuständen können diese Wettereinflüsse bei einer Praxisanlage zu einem ungeplanten Erreichens eines technisch-vollen Gaspeichers führen und damit zum Auslösen der Fackel oder der Überdrucksicherung. Dies zeigt, dass insbesondere das gezielte Management des Gaspeichers zu einer Verminderung der Verluste durch Abfackeln oder Abblasen potentieller Gasüberproduktionen beiträgt.

Mit dem vorgeschlagenen Modellansatz können nun auf Basis von Wetterprognosen präzisere Empfehlungen zur vorausschauenden Anpassung des Fütterungs- oder Verstromungsregimes zur Vermeidung von Unter-/ Überproduktionen durchgeführt werden. Abb. 5 zeigt die Verläufe der berechneten Biogastemperatur im Gasspeicher anhand der verfügbaren Wetterdaten gegenüber der gemessenen. Es konnte eine hohe Übereinstimmung realisiert werden.

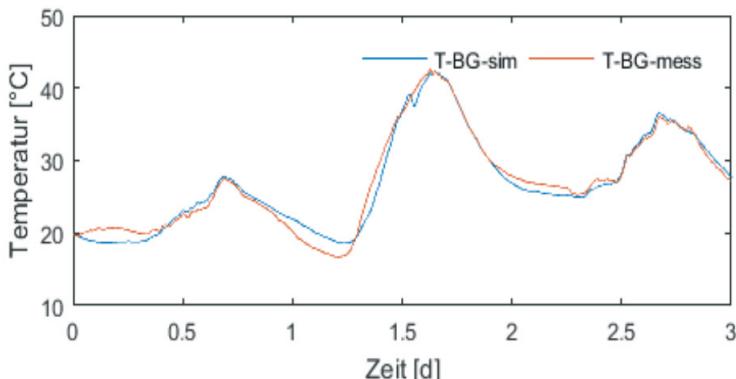


Abb 5: Verlauf der simulierten Gasspeicherinnentemperatur gegenüber der gemessenen

5 Fazit und Ausblick

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass Witterungseinflüsse erheblichen Einfluss auf die Gasspeicherauslastung haben, insbesondere bei bedarfsgerechtem Betrieb der Anlage. Daher wird ein Gasmanagement immer wichtiger. Es können reale Füllstandmessdaten und Kapazitätsangaben mit dem voraussichtlichen witterungsbedingt verfügbaren Speichervolumen (basierend auf Wetterprognosen) abgeglichen und entsprechend als Kontrollmöglichkeit des Biogasspeichersystems genutzt werden. Je nach Gasspeicherbauform (Tragluftdach oder Gassack) und messtechnischer Ausstattung (mit oder ohne Gasmengenmessung) sind die methodischen Szenarien zur verbesserten Gasspeicherfüllstandbestimmung weiter anzupassen.

Im Projekt GAZELLE („GAZELLE – Ganzheitliche Regelung von Biogasanlagen zur Flexibilisierung und energetischen Optimierung“ (SAB-Sächsische Aufbaubank, FZK 100267056)) wurde eine modellgestützte Regelung zur bedarfsgerechten Fütterung um das umfassende Gasspeichermanagement erweitert. So konnten Substrate bei größtmöglicher Flexibilität und hoher Umsatzeffizienz eingesetzt werden. Die großtechnischen Validierungsversuche dazu werden momentan durchgeführt. Der ganzheitliche Ansatz schließt dabei sowohl die optimale Strom- und Wärmebereitstellung als auch die Überwachung der ökonomischen und energetischen Anlageneffizienz in die Optimierung der Betriebsweise mit ein.

Literatur/Quellen

- [1] Mauky, E., Jacobi, H.F., Liebetrau, J., Nelles, M., 2015. Flexible biogas production for demand-driven energy supply – Feeding strategies and types of substrates. Bioresour. Technol. 178, 262-269.
- [2] Mauky, E., 2019. A model-based control concept for a demand-driven biogas production. Dissertation, Universität Rostock

- [3] Mauky, E., Weinrich, S., Jacobi, H.F., Neagele, H.J., Liebetrau, J., Nelles, M., 2016. Model predictive control for demand-driven biogas production in full-scale. Chem. Eng. Technol. 39, 4, 652-664
- [4] VDI-Wärmeatlas, 2013, 11., bearbeitete und erweiterte Auflage, Springer-Verlag Berlin Heidelberg
- [5] Drück Harald, Solarthermie I - Manuskript zur Vorlesung, Abruf am 12.07.2017 über www.itw.uni-stuttgart.de/dokumente/Lehre/solarthermieI_solvo_teil1.pdf

Acknowledgement

Die Untersuchungen und Entwicklungen erfolgten im Rahmen des Projektes „ManBio – Entwicklung von technischen Maßnahmen zur Verbesserung des Gasmanagements von Biogasanlagen“ (BMW1, FKZ-Nummer: 03KB094) und wurden im Projekt „GAZELLE - Ganzheitliche Regelung von Biogasanlagen zur Flexibilisierung und energetischen Optimierung“ (SAB-Sächsische Aufbaubank, FZK 100267056) weitergeführt und validiert.

Kontakt

Dr.-Ing. Eric Mauky

DBFZ - Deutsches Biomasseforschungszentrum gemeinnützige GmbH

Torgauer Straße 116, 04347 Leipzig,

① +49 (0)341.2434-745 | ☐ eric.mauky@dbfz.de

Vortex Extraction Digester(VED)

Zusammenfassung: Seit 2008 arbeitet die Bioenergy Concept GmbH daran die Fermenter-Geometrie zu optimieren, um die auftretenden Probleme mit den anfallenden Sinkstoffen speziell in Gülle- und Entsorgungsanlagen zu beheben.

Durch die Substrat- Einbringung von Gülle und organischen Reststoffen gelangen kontinuierlich anorganische Stoffe in den Fermenter und lagern sich am Boden ab.

- Dadurch verringert sich mit der Zeit das Volumen des Fermenter
- Der Energieverbrauch steigt durch einen erhöhten Rühraufwand.
- Die Ausfallzeiten der Anlagen erhöhen sich
- Abnutzungen oder Schäden an Rührwerken
- Entfernung von Sinkschichten, z.B. Sanddünen und Ablagerungen
- Probleme mit der Heizung
- Innenrevision der Behälter im Rahmen der Prüfpflichten des anlagenbezogenen Gewässerschutzes

Das alles bringt deutliche Einbußen in der Wirtschaftlichkeit und Effizienz der Anlagen mit sich.

Um den Problemen mit Störstoffen vorzubeugen, entwickelte die Bioenergy Concept GmbH das VED System.

Abstract: Since 2008, Bioenergy Concept GmbH has been working on optimizing the fermenter geometry in order to solve the problems that occur with the resulting sediments, especially in liquid manure and waste disposal systems.

Due to the substrate introduction of liquid manure and organic residues, inorganic substances continuously enter the fermenter and are deposited on the bottom.

- This reduces the volume of the fermenter over time
- The energy consumption increases due to an increased stirring effort.
- The downtimes of the systems increase
- Wear or damage to agitators
- Removal of sink layers, e.g. Sand dunes and deposits
- Problems with the heating
- Internal inspection of the containers as part of the inspection requirements for plant-related water protection

All of this brings significant losses in the economy and efficiency of the systems.

1 Einleitung

In 2016 hat die Bioenergy Concept GmbH mit Sitz in Lüneburg das Patent DE 10 2016 218 051 A1 2018.03.22 beim Deutschen Marken und Patentamt angemeldet.

Bei dem VED (Vortex Extraction Digester) handelt es sich um ein Verfahren, um in anaeroben Vergärungsanlagen (Biogasanlagen) zur Behandlung organischer Reststoffe und der Erzeugung von erneuerbarer Energie betriebsschädliche Sinkstoffe kontinuierlich aus dem Fermenter (engl.: Digester) auszutragen. So werden Ausfallzeiten im Anlagenbetrieb minimiert. Gleichzeitig ermöglicht das Konzept, den Energieverbrauch der Anlage zu reduzieren. Darüber hinaus werden die anfallenden Wartungsarbeiten vereinfacht und reduziert.

Folge: Betriebskosten sinken, die Wirtschaftlichkeit der Anlage wird erheblich optimiert.

2 Detailbeschreibung der innovativen Anlagentechnik und des Vorhabens Fachliche Projektbeschreibung Stand der Technik

Die Erzeugung und Nutzung von Biogas hat sich in den letzten Jahren zu einem wesentlichen Eckpfeiler der Energiewende in Deutschland entwickelt. Sie bietet vielen landwirtschaftlichen Betrieben eine wichtige Einkommensquelle. Biogas entsteht aus der Vergärung geeigneter Biomassen wie Energiepflanzen, organischen Reststoffen oder Gülle. In Deutschland gibt es derzeit rund 10.500 Biogasanlagen, ca. 9.500 dieser Biogasanlagen wurden im Zuge des Erneuerbaren Energie Gesetzes (EEG) seit 2001 errichtet.

Das Prinzip der Biogaserzeugung ist einfach, die Technik weit verbreitet: Gülle, organische Reststoffe und Energiepflanzen werden in einem Gärbehälter (Fermenter) zu Biogas vergoren, das direkt vor Ort für die Produktion von Strom und Wärme genutzt oder nach Aufreinigung als Bio-Erdgas/Biomethan in die bestehenden Gasnetze eingespeist werden kann.

Zusätzlich entsteht dabei durch die Stabilisierung der Nährstoffe ein werthaltiger Dünger für die Landwirtschaft und trägt damit zu einer nachhaltigen Kreislaufwirtschaft bei. (<https://www.fnr.de>)

In Deutschland und anderen Industrieländern hat sich eine Anlagentechnik verbreitet, die darauf abzielt, möglichst viele Anlagen in kurzer Zeit zu bauen.

Die Optimierung der betrieblichen Abläufe, die Wartungsfreundlichkeit und die energetische Optimierung der betrieblichen Prozesse stand dabei jedoch im Hintergrund.

Ein großer Nachteil der sich daraus entwickelten und gegenwärtig etablierten Anlagentechnik ist, dass sich auf dem flachen Behälterboden des Fermenters Sand, Kies und andere Störstoffe absetzen und anreichern. Dadurch verringert sich mit der Zeit der Faulraum im Fermenter, der Energieverbrauch steigt durch einen erhöhten Rühraufwand. Die Ausfallzeiten der Anlagen erhöhen sich. Das alles bringt deutliche Einbußen in der Wirtschaftlichkeit der Anlagen mit sich.

„Für die Betreiber von Biogasanlagen kann es verschiedene Gründe geben, um einen oder mehrere Fermenter zu öffnen und eine Leerung bzw. Reinigung durchführen zu lassen. Dazu gehören z.B.

- Abnutzungen oder Schäden an Rührwerken
- Entfernung von Sinkschichten, z.B. Sanddünen und Ablagerungen
- Probleme mit der Heizung
- Innenrevision der Behälter im Rahmen der Prüfpflichten des anlagenbezogenen Gewässerschutzes

Besonders organische Reststoffe aus der Tierhaltung und aus der kommunalen Sammlung beinhalten einen großen Anteil von Sink- und Störstoffen. Da gerade diese Einsatzstoffe in letzter Zeit an Bedeutung gewinnen, erhöht sich der Aufwand, einen störungsfreien Betrieb zu gewährleisten. Des Weiteren führen Sink- und Störstoffe zu erheblichen Ausfallzeiten im Anlagenbetrieb.

Innovative Konzepte zur betrieblichen Optimierung sind für den Ausbau der Biogastechnologie zur Reduzierung von klimaschädlichen Treibhausgasen notwendig. Kosten im Anlagenbetrieb können erheblich reduziert und der wirtschaftliche Betrieb der Anlagen kann erheblich verbessert werden.

3 Gesundheits- und Unfallgefahren der gegenwärtigen Technik

Das Begehen oder Reinigen eines Fermenters birgt darüber hinaus Gefahren für Leib und Leben. Um diesen Gefahren angemessen zu begegnen, sind umfangreiche Kenntnisse und eine spezielle Ausrüstung erforderlich. Solche Arbeiten müssen in Deutschland daher grundsätzlich an einen Fachbetrieb nach Wasserhaushaltsgesetz (WHG)/Verordnung über Anlagen zum Umgang mit wassergefährdenden Stoffen (AwSV) vergeben werden.

Um eine sichere und angepasste Technologie aus Deutschland zur Behandlung organischer Reststoffe, zur Produktion von erneuerbarer Energie und zur Reduzierung von Treibhausgasen in Schwellen- und Entwicklungsländer exportieren zu können, müssen für die Zielmärkte angepasste neue Konzepte erarbeitet, getestet und demonstriert werden.



Abb. 1 Sandberg im Fermenter

Die VED-Technologie ist ein Konzept mit dem diese Vorgaben umgesetzt werden können.

Bei Fermentern, die mit Mais und Gülle gefüttert werden, hat sich herausgestellt, dass sich ca. 150-250 m³ Sand, feste Gärreste und Steine nach 8-10 Jahren angesammelt haben.

Bei sandigen Böden und Fütterung mit Grassilage ist dann auch ein Sandberg unter dem Futtereintrag möglich (siehe Abb. 1).

Für die konventionelle Fermenter-Reinigung ist es notwendig, die Anlage für mehrere Tage stillzulegen. Dann erfolgt die Reinigung i.d.R. durch Saugbagger, Behälterbagger, Luftförderanlagen oder Pumpentechnik (siehe Abb. 2)“

Das Wiederanfahren des Gärprozesses kann nach der Revision Wochen und Monate in Anspruch nehmen.

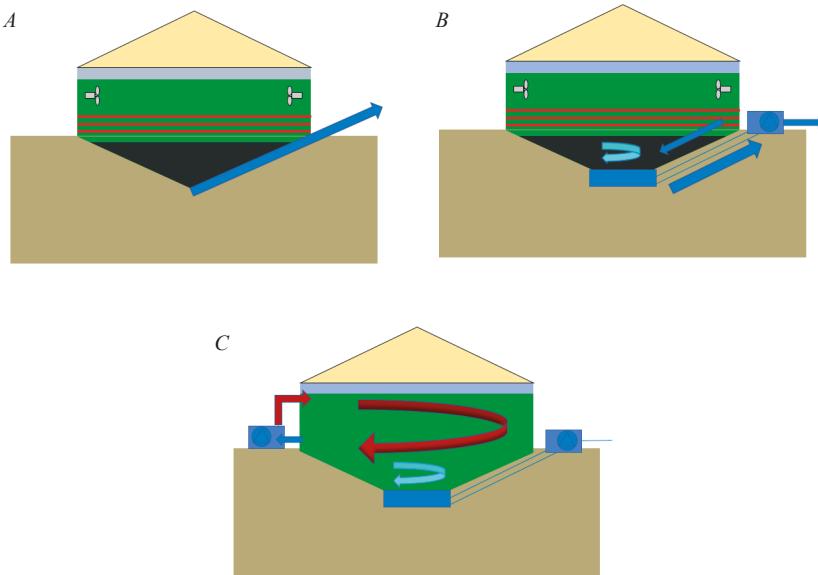


Abb. 2 Fermenter-Reinigung in einer Biogasanlage

Um den steigenden Kosten und Energiebedarf bei der Biogasproduktion zu begegnen, muss die Anlagentechnik weiter optimiert werden. Dies kann in vielerlei Hinsicht geschehen, u.a. durch Steigerung der Effizienz, indem Ausfallzeiten (durch Fermenter-Reinigung) verringert werden und durch Erweiterung des Substratspektrums, z.B. durch Gülle, was naturgemäß zu einem höheren Verschmutzungsgrad durch Sinkstoffe im Fermenter führt. Mit dem von der Bioenergy Concept GmbH patentierten Verfahren des Vortex-Extraction-Digester, (VED) werden Revisionsintervalle erheblich verlängert, das gesundheitliche Gefährdungspotenzial verringert und Energiekosten eingespart.

4 Ziel der Arbeit, Innovationsgehalt

Seit mehreren Jahren arbeitet Bioenergy Concept GmbH an der Entwicklung eines wartungsarmen Fermenters, um Investitionskosten zu senken, die Wartung der Biogasanlage zu vereinfachen, den Energiebedarf des Fermenters zu senken und die Gestehungskosten zu minimieren. Die vorgestellte Innovation beruht zunächst auf einem neuen Design des Fermenterbodens, der konisch ausgelegt ist. Dadurch werden Sinkstoffe durch Gravitation dazu bewegt, sich im unteren Teil des Behälters anzusammeln. So können sie kontinuierlich und im laufenden Betrieb der Anlage entnommen werden. Die Rückführung eines Teilstroms des Substrats im Konus des Behälters erzeugt einen Strudel (Vortex) am Fermenterboden, der die Sinkstoffe zusätzlich löst und in der Schwebe hält. Dieses innovative Verfahren ermöglicht es, den Rühraufwand zu verringern, und so den Eigenenergieverbrauch der Anlage zu reduzieren. Darüber hinaus werden Wartungsarbeiten stark vereinfacht. Ausfallzeiten der Anlage werden auf ein Minimum reduziert.



*Abb: 3 (A) & (B) - Konvektionsfermenter mit Sedimentation Probleme
(internes Rührwerk & Wärmetauscher)
(C) - Konstruktion und Prozessdesign des Vortex-Extracion-Digester (VED)
(externes Rührwerk & Wärmetauscher)*

Aus dieser Konfiguration ergeben sich diverse Vorteile des VED Systems:

- keine Probleme mit Sedimenten,
- keine bewegten Teile mehr im Fermenter,
- keine Heizelemente innerhalb des Fermenters,
- weniger und vereinfachter Wartungsaufwand.

Das Ziel des vorgestellten Vorhabens besteht in der Realisierung des patentierten VED Konzeptes, um:

- die Praxistauglichkeit der beschriebenen Ziele und Vorgaben zu überprüfen,
- die Technik und Bauprozesse zu optimieren,
- neues Personal, Techniker und Ingenieure ausbilden zu können,
- die Bauabläufe für den Export des Verfahrens zu optimieren,
- die Bauabläufe für den deutschen und niedersächsischen Markt zu optimieren,
- die Anlage für in- und ausländische Kunden als Demonstrationsanlage vorführen zu können,
- an der Demonstrationsanlage langfristig weitere Forschungen ausführen zu können.

Das Verfahren ist eine Neuheit in der Bundesrepublik Deutschland und ist von großer Bedeutung für die Biogasbranche: nicht nur in Deutschland, sondern auch im globalen Kontext, woraus sich enorme Exportchancen eröffnen.

5 Relevanz des Vorhabens Niedersachsen/Deutschland

Die anaerobe Behandlung von tierischen Exkrementen birgt einige positive umweltrelevante Aspekte, die gerade für Niedersachsen einen hohen Stellenwert besitzen.

- Reduzierung von Treibhausgasen aus der Tierhaltung/Landwirtschaft
- Stabilisierung von Nährstoffen aus der Tierhaltung (Reduktion von Nitrat im Grundwasser)
- Produktion von erneuerbarer Energie aus landwirtschaftlichen Reststoffen
- Reduzierung von Geruchsemissionen

Biogasanlagen zur Behandlung von tierischen Exkrementen sind, trotz der positiven Aspekte, in Deutschland mit den gegenwärtig bestehenden Rahmen- und Förderbedingungen weitestgehend unwirtschaftlich. Das VED-Verfahren eröffnet die Möglichkeit, auch bisher unwirtschaftliche Biogasanlagen zur Behandlung von tierischen- und organischen Abfällen, wirtschaftlich errichten und betreiben zu können, und so erheblich zu der Entwicklung einer kreislaufbasierten Landwirtschaft beitragen.

6 Europa/Weltweit

Bioenergy Concept GmbH plant und betreut seit ihrer Gründung in 2007, den Bau und Betrieb von Biogasanlagen zur Behandlung vielfältiger organischer Abfälle weltweit.

Projekte an deren Realisation bzw. Planung das Unternehmen maßgeblich beteiligt war und ist, sind unter anderem in:

- Kalifornien, USA
- Irland
- Costa Rica
- Südafrika
- Indien

Gerade die Vergärung, Behandlung und Stabilisierung von organischen Reststoffen, wie sie in Schwellenländern, aber auch in hoch entwickelten Industrienationen anfallen, benötigen neue innovative Konzepte, um den langfristigen, wirtschaftlichen und nachhaltigen Betrieb der Anlagen zu gewährleisten, und die Investitionskosten und die Eigenenergieverbräuche der Anlagenprozesse weiter zu optimieren.

Das VED-Verfahren ist ein wichtiger Baustein für einen wartungs- und energie-optimierten Betrieb von Biogasanlagen. Diese innovative Anlagentechnik „Made in Germany“ birgt ein erhebliches Potenzial zum Export einer zukunftsweisen-den Technologie „Made in Niedersachsen“. Mit der VED Technologie können auch in Entwicklungs- und Schwellenländern Vergärungsanlagen wirtschaftlich gebaut und betrieben werden. Gerade in Schwellenländern werden Anlagen zur Abfallbehandlung, zur Erzeugung von erneuerbarer Energie und zur Reduzierung von Treibhausgasen dringend benötigt.

Deutschland pflegt bilaterale Vereinbarungen mit Schwellen- und Entwicklungsländern für den Transfer von Technologien zur Erzeugung von erneuerbaren Energien und zur Reduzierung von klimaschädigenden Treibhausgasen. Bioenergy Concept GmbH arbeitet derzeit an der Planung von sieben Anlagen für die Vergärung von Rindergülle in Kalifornien. Die Anlagen sind aufgrund von hohen Sandkonzentrationen in der Rindergülle nur mit dem VED Fermenter-Konzept langfristig wirtschaftlich zu betreiben.

In Indien gründet die Bioenergy Concept GmbH derzeit eine Tochtergesellschaft. Der Bedarf für die Erzeugung von erneuerbaren Energien aus Reststoffen, die Stabilisierung von Nährstoffen und die Produktion von klimafreundlichen Düngemitteln für die Versorgung der Landwirtschaft ist enorm hoch. Zudem ist die Produktion politisch gewollt und leistet einen relevanten Beitrag zur Entwicklung einer nachhaltigen Kreislaufwirtschaft.

Das beschriebene Vorhaben ist für Bioenergy Concept GmbH auch wichtig, um neue Techniker und Ingenieure in Deutschland ausbilden und vorbereiten zu können. Denn nur so kann die Baubetreuung im Inland und im Ausland optimal gewährleistet und ausgeführt werden.

Des Weiteren können eventuell auftretende Probleme durch das Vorhaben im Vorhinein minimiert werden. Bau- und Installationsprozesse für die Installation der Anlagen im Ausland können überdies bereits im Vorfeld optimiert werden.

Kontakt

Christoph Eusterbrock

Geschäftsführer Bioenergy Concept GmbH

Munstermannskamp 1, 21335 Lüneburg

① +49 (0)4131.7572715 | ☎ mail@bioenergy-concept.com

↗ www.bioenergy-concept.com

*Tim Kuhlow, Katrin Schönherr, Jörg Burgstaler, Denny Wiedow,
Norbert Kanswohl*

Kaltes Plasma und Ultraschall – Eine Synergie als nächste Generation der Biomassedesintegration?

Dieses Projekt wird kofinanziert von der Europäischen Union aus dem Europäischen Fonds für regionale Entwicklung. Operationelles Programm Mecklenburg-Vorpommern 2014-2020 – Investitionen in Wachstum und Beschäftigung



EUROPÄISCHE UNION
Europäischer Fonds für
regionale Entwicklung



Zusammenfassung: Die Nutzung von Synergien ist ein innovativer Ansatz im Sinne der Nachhaltigkeit. Die Kooperationspartner des Projektes KombiMax, bestehend aus der Power Recycling Energieservice GmbH (PRE) in Neubrandenburg, dem Leibniz-Institut für Plasmaforschung und Technologie e.V. (INP) in Greifswald und der Professur für Agrartechnologie und Verfahrenstechnik an der Universität Rostock, nehmen diesen Gedanken auf und vereinen zwei innovative Technologien miteinander. Zur Verbesserung der Effizienz von Biogasanlagen wird durch diese Kombination eine Erhöhung der Desintegrationsrate von Biomassen erwartet. Bei den Verfahren handelt es sich um Ultraschall und Kaltes Plasma. Als Plasmaquellen dienen Mikrowellen- und Funkenentladungen. Vorstudien belegen den Erfolg beider Verfahren im Bereich der Desintegration und der Energieeffizienz an Methylenblau in wässrigen Lösungen (TAKAHASHI et al., 2014). Zu erwartende Ergebnisse zielen darüber hinaus auf die Optimierung der Hydrolyse und einer Verringerung des Restgaspotentials ab. Durch Kavitation und Radikalbildung wird die Aufspaltung von Zellwänden und Ligninverbänden angestrebt. Dies führt zu einer Bereitstellung vorher nicht abbaubarer organischer Verbindungen für den Biogasbildungsprozess.

Abstract: The use of synergies is an innovative approach in terms of sustainability. An association consisting of Power Recycling Energieservice GmbH (PRE) in Neubrandenburg, the Leibniz Institute for Plasma Science and Technology e.V. (INP) in Greifswald and the professorship for agricultural technology and process engineering at the University of Rostock, are taking up this idea in the KombiMax project and combine two innovative technologies. To improve the efficiency of biogas plants, this combination is expected to increase the disintegration rate of biomass. The processes involved are ultrasound and cold plasma. Microwave and spark discharges serve as plasma sources. Preliminary studies proved the success of both processes in the field of disintegration and energy efficiency on methylene blue in water solutions (TAKAHASHI et al., 2014). Expected results also aim at the optimization of hydrolysis and a reduction of the residual gas potential. The splitting of cell walls and lignin clusters is targeted by cavitation and radical formation. This leads to the availability of previously non-degradable organic compounds for the biogas formation process.

Einleitung

Das theoretische Biogas- und Methanpotential von Substraten für die Biogasproduktion wird durch einen unvollständigen Aufschluss und Abbau der organischen Substanzen nicht ausgeschöpft. Verschiedene Faktoren beeinflussen die fermentativen Prozesse in einer Biogasanlage. Einen wesentlichen Einflussfaktor stellt die Verfügbarkeit von fermentierbaren stofflichen Verbindungen dar, welche wiederum in Abhängigkeit zur Beschaffenheit des Substrates stehen (KALTSCHEMANN et al., 2016). Im Rahmen des Verbundprojektes KombiMax wird die Wirkung des Substrataufschlusses aus der kombinierten Applikation von Ultraschall und Kaltem Plasma untersucht. Zur Plasmaerzeugung wird die Funken- und Mikrowellenentladung genutzt und deren Einfluss auf die Biomassedesintegration miteinander verglichen. Der synergetische Effekt aus Ultraschall und Kaltem Plasma soll den Substrataufschluss und die damit verbundene Effizienz der Biogasanlagen verbessern. Für den Nachweis der Wirksamkeit beider Verfahren allein und in Kombination werden verschiedene Laboranalysen herangezogen, die eine physikalische und chemische Umsetzung des Materials belegen. Auf diese Weise werden prozessbestimmende Parameter erarbeitet, die als Indizes eines erfolgreichen Aufschlusses dienen.

Kaltes Plasma und Ultraschall – Stand der Wissenschaft

Plasma ist der vierte Aggregatzustand der Materie, dessen Anwendungsfeld in den Material- und Umweltwissenschaften sowie in der Medizin bereits verbreitet ist. Nicht-thermale Plasmen ($T < 60^{\circ}\text{C}$) können durch unterschiedliche Verfahren erzeugt werden, beispielsweise durch Funken-, Barriere- oder Mikrowellenentladungen. Die Generierung kalter Plasmen in flüssigen Medien ist eine relativ neue Art der Plasmaapplikation, welche mehr und mehr in den Fokus von Wissenschaft und Praxis gerät. Dabei sind die Eigenschaften des Kalten Plasmas abhängig von den chemischen und physikalischen Eigenschaften des umgebenden Mediums (WANG et al., 2013; MISRA et al., 2016).

Die Zündung des Plasmas erfolgt nicht im flüssigen Medium selbst, sondern innerhalb von Gasblasen in unmittelbarer Nähe zur Elektrode. Es gibt mehrere Möglichkeiten Gasblasen zu erzeugen. Zum einen wird der enorme Temperaturanstieg der Elektrode genutzt, um das Medium zum Verdampfen zu bringen, zum anderen können Gasblasen, vorzugsweise aus Argon, künstlich in den Reaktionsraum injiziert werden (LEBEDEV, 2017). Der Prozess der Plasmaerzeugung bedarf hoher Spannungen bis zu 3000 V. Die Desintegration der Kohlenwasserstoffe im flüssigen Medium wird durch die Absorption der freiwerdenden Energie durch kohlenstoffhaltige Strukturen begleitet. Diese unterdrücken die Ausbreitung des Plasmas, was zu Erosionen und Deformationen der Elektrode führt. Studien konnten belegen, dass die Schaffung von Unterdruckbereichen um die Elektrode dieses Problem lösen kann (ISHIJIMA et al. 2007; SAITO et al. 2011; LEBEDEV, 2017).

Ultraschall ist ein etabliertes physikalisches Aufschlussverfahren in der Abwasser-, Klärschlamm- und Biomassevorbehandlung, welches genau diese Unterdruckbereiche erzeugen kann. Dabei wird die zu behandelnde Suspension idealerweise mit weichen akustischen Wellen einer geringeren Frequenz von circa 20 kHz beschallt. Geringe Frequenzintensitäten führen zur Bildung wasser dampfgefüllter Kavitationsblasen mit einem Durchmesser von circa 300 µm, die durch ihre Instabilität innerhalb weniger Nanosekunden kollabieren und Jet-streams mit starken Scherkräften erzeugen. Des Weiteren entstehen lokale Hot-spots mit Temperaturen von circa 5000 K sowie Druckareale mit bis zu 100 MPa (SUSLICK und SKRABALAK, 2008; ASHOKKUMAR, 2011; LUO et al., 2014). Diese dynamischen Prozesse führen zu einer Dispergierung und Emulgierung von Agglomeraten in Suspensionen auf makroskopischer Ebene sowie über die Reduzierung des Polymerisationsgrades von Lignocellulose auf mikroskopischer Ebene (MASON und PETERS, 2002). Darüber hinaus wird eine Zerstörung von Zellwänden erreicht, was zu einer Freisetzung organischer Inhaltsstoffe in das umgebende Medium führt. Untersuchungen ergaben diesbezüglich eine signifikante Steigerung der biologischen Abbaubarkeit von Biomassen und eine Erhöhung der lytischen Aktivität von Mikroorganismen im Fermenter (TIEHM et al., 2001).

Die Applikation von Ultraschall stellt die dritte Variante dar, Gasblasen über Kavitation im Reaktionsraum zu erzeugen (LEBEDEV, 2018). Die Plasmaentladung erfolgt auf der Innenfläche dieser Gasblasen, welche als Minireaktoren dienen. Auf diese Weise wird ein hoher Influx an Kohlenwasserstoffmolekülen aus dem Medium in das Plasma ermöglicht und physikochemische Prozesse unter Beteiligung reaktiver Teilchen (Radikale, Ionen, Elektronen) in Gang gesetzt. Dies führt zu komplexen molekularen Umstrukturierungen stofflicher Verbindungen im flüssigen Medium, wie zum Beispiel Lignin (LEBEDEV, 2017). Wissenschaftliche Untersuchungen zur Behandlung lignocellulosereicher Biomassen mit Kaltem Plasma, konnten einen Anstieg des sauer löslichen Lignins in Suspensionen feststellen, was mit einer Erhöhung der Konzentration freier Zuckermoleküle nach der enzymatischen Hydrolyse einherging (WRIGHT et al., 2018).

Die kombinierte Applikation von Mikrowellenplasma und Ultraschall wird „Sono-plasma“ genannt, welches die chemischen Reaktionsprozesse des Plasmas mit den physikalischen Aufschluseigenschaften des Ultraschalls vereint. Untersuchungen unter Kombination von Mikrowellenplasma und Ultraschall konnten belegen, dass die Zersetzungsraten organischer Verbindungen im Wasser steigt (Abb. 1). Darüber hinaus konnte eine viermal höhere Energieeffizienz aus der Kombination von Kaltem Plasma und Ultraschall im Vergleich zur alleinigen Behandlung mit Mikrowellenplasma verzeichnet werden (Abb. 2). Diesbezüglich wird davon ausgegangen, dass die durch Ultraschall erzeugten Unterdruckareale wesentlich zur Energieeffizienz des Systems beitragen (TAKAHASHI et al., 2014).

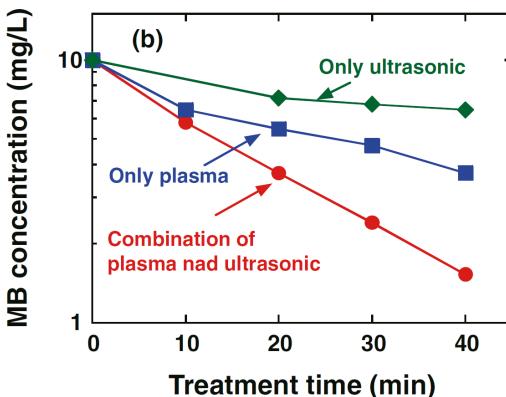


Abb. 1: Entwicklung der Methylblau (MB) Konzentration in Abhängigkeit zur Behandlungsdauer mit Ultraschall, Mikrowellenplasma und deren Kombination (nach TAKAHASHI et al., 2014)

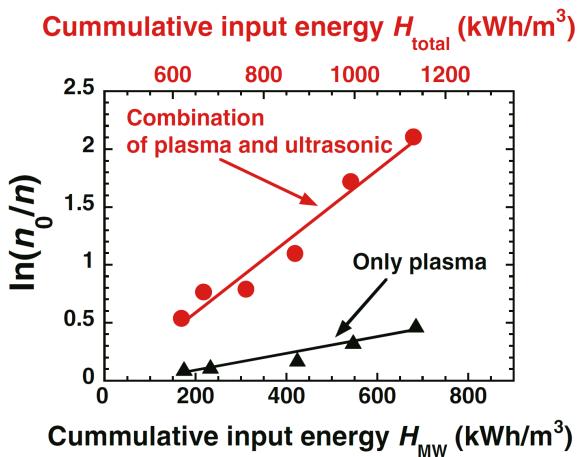


Abb. 2: Abbau von Methylblau als Funktion des kumulierten Energieeintrags $\ln(n_0/n)$ mit und ohne Ultraschall in kWh/m³ (nach TAKAHASHI et al., 2014)

Versuchsdesign und Methodiken

In den Experimenten werden Gärreste einer Biogasanlage aus Mecklenburg-Vorpommern im Modellmaßstab mit Ultraschall, Mikrowellenplasma und deren Kombination behandelt. Die Versuche verlaufen unter kontinuierlichem Fluss des Substrates durch einen Reaktionsraum, in welchem Ultraschall und Plasma frequenzsynchrone appliziert werden. Die durch den Ultraschall vorherrschenden Unterdruckbereiche erleichtern die Erzeugung eines stabilen Plasmas. Im Zentrum des circa 200 cm³ umfassenden Reaktionsraumes befinden sich das Sonotrodenhorn und die Plasmaelektrode in einem Abstand von 1 cm zueinander (Abb. 3).

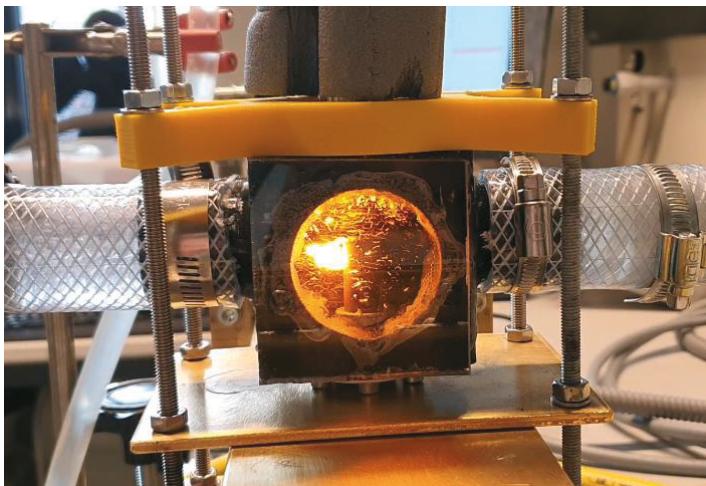


Abb. 3: Reaktionskammer mit Entladung des Mikrowellenplasmas in Salzwasser.
Substratfluss von rechts nach links (Kuhlow, 2020)

Das Plasma wird in Richtung des Substratflusses entladen, was zu einer Reduktion des Leistungsaufwands von 1268 W auf 585 W führt. Der Substratfluss selbst fungiert als Kühlungssystem für den Reaktionsraum sowie Elektrode und Koppler. Die Erzeugung der Mikrowellenstrahlung erfolgt über einen Magnetron mit nachgeschaltetem Waveguide. Ein Waveguide ist ein spezifisches Bauteil, welches in der Lage ist, elektromagnetische Wellen mit minimalem Energieverlust in eine spezielle Richtung zu leiten. In den Waveguide ragt eine Wolfram-elektrode, welche die Energie absorbiert und als Plasma in den Reaktionsraum entlädt.

Die Einstellung der Parameter für die Generierung des Plasmas erfolgt in Anlehnung an Methodiken vorrangegangener Studien von TAKAHASHI et al., 2014. Die Mikrowelle besitzt eine gepulste Frequenz von 2,45 GHz mit Leistungsspitzen von < 1,5 kW und einer Impulsfolgefrequenz von 20 Hz. Die relative Frequenzbelegungsdauer beträgt vorerst 30 %. Damit ergibt sich eine maximale Leistungsdichte von circa 25 MW/m². Eine Variation dieser Parameter im Zuge der Ermittlung energieeffizienter Konditionen für die Applikation von Mikrowellenplasma und Ultraschall gilt es in weiterführenden Experimenten zu testen. Die Beschallung erfolgt mit einer Frequenz von 20 kHz. Die Leistung und Leistungsdichte der Ultraschallquelle beträgt 700 W, beziehungsweise 350 kW/m².

Die Beprobung erfolgt in definierten Zeitpunkten bis zu einer Behandlungsdauer von 70 min aus einer Grundgesamtheit homogenisierten Gärrestes. Im Laufe der Experimente wird ein kontinuierliches Prozessmonitoring über die Erfassung der Substrattemperatur (35–37 °C) und des pH-Wertes durchgeführt. Da es durch das Mikrowellenplasma zu einer Erwärmung des Substrates kommt, wurde ein zusätzliches Kühlungssystem installiert.

Die Laboranalysen des Substrates belaufen sich auf physikalische und chemische Parameter, um Neuformierungen von Reaktionsprodukten nachzuweisen. Die Analysen umfassen die Bestimmung der Viskosität, Partikelfraktionierung, Trockensubstanz, organische Substanz, elektrische Leitfähigkeit, Hemicellulose, Cellulose, Lignin, chemischer Sauerstoffbedarf (CSB), flüchtige Fettsäuren, Gesamtstickstoffgehalt, Ammoniak und Ammonium. Darüber hinaus erfolgt die Erfassung der Gasmengen und Methanausbeuten über Batch- und kontinuierliche Versuche.

Ausblick

Unter Betrachtung der Resultate vorrangegangener Studien und der Ergebnisse der Vorversuche, ist eine Desintegration der Biomasse durch die Behandlung mit Ultraschall und Kaltem Plasma zu erwarten. Ob es sich bei den beiden Technologien um einen synergetischen oder additiven Effekt handelt, steht im Fokus weiterer Experimente. Des Weiteren liegt ein wesentlicher Schwerpunkt in der Erschließung von Veränderung hochmolekularer und schwer abbaubarer Verbindungen wie dem Lignin. Durch den erhöhten Abbaugrad der Biomasse, ist von einer Verringerung des Restgaspotentials, mit entsprechender Emissionsreduktion klimarelevanter Gase bei der Gärrestausbringung auf den Feldern, auszugehen. Zudem wird eine Reduktion des pH-Wertes, was zu einer Optimierung der Hydrolyse in der anaeroben Fermentation führt, erwartet. Dies bedingt eine Stickstoffbindung über das gebildete Ammoniumnitrat und gleichzeitig eine Verringerung der Nitratauswaschung auf den Äckern. Einen nicht zu vernachlässigen Schritt stellt die Energiebilanzierung unter Erfassung des Energieinputs in Relation zum Mehrgewinn an Biogas und Methan dar.

Literatur/Quellen

- Ashokkumar, M. (2011). The characterization of acoustic cavitation bubbles – An overview. In: *Ultrasonics Sonochemistry*; 18: 864–872.
- Ishijima, T., Hotta, H., Sugai, H. & Sato, M. (2007). Multibubble plasma production and solvent decomposition in water by slot-excited microwave discharge. In: *Applied Physics Letters*; 91 (12): 121501.
- Kaltschmitt, M., Hartmann, H. & Hofbauer, H. (Hrsg.) (2016). *Energie aus Biomasse – Grundlagen, Techniken und Verfahren*. 3. Aufl. Berlin Heidelberg: Springer Vieweg. ISBN: 978-3-662-47437-2.
- Lebedev, Y. A. (2017). Microwave discharges in liquid dielectrics. In: *Plasma Physics Reports*; 43 (6): 685-695.
- Lebedev, Y. A., Averin, K. A., Borisov, R. S., Garifullin, A. R., Bobkova, E. S. & Kurkin, T. S. (2018). Microwave Discharge in Liquid Hydrocarbons: Study of a Liquid Hydrocarbon after Exciting the Discharge. In: *High Energy Chemistry*; 52 (4): 324-329.
- Luo, J., Fang, Z. & Smith Jr, R. L. (2014). Ultrasound-enhanced conversion of biomass to biofuels. In: *Progress in Energy and Combustion Science*; 41: 56-93.

- Mason, T. J. & Peters, D. (2002). Practical sonochemistry: Power ultrasound uses and applications. 2. Aufl. Chichester, UK: Horwood Publishing Ltd. ISBN: 978-1-898-56383-9.
- Misra, N. N., Schlüter, O. & Cullen, P. J. (2016). Plasma in Food and Agriculture. In: Misra, N. N., Schlüter, O. & Cullen, P. J.. Cold Plasma in Food and Agriculture – Fundamentals and Applications. 1. Aufl. London: Elsevier. ISBN: 978-0-12-801365-6.
- Saito, R., Sugiura, H., Ishijima, T. & Toyoda, H. (2011). Influence of temperature and pressure on solute decomposition efficiency by microwave-excited plasma. In: Current Applied Physics; 11 (5): 195-198.
- Suslick, K. S. & Skrabalak, S. E. (2008). Sonocatalysis. In: Ertl, G., Knözinger, H., Schüth, F. & Weitkamp, J. (Hrsg.). Handbook of heterogeneous catalysis. 2. Aufl. Weinheim: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KG. ISBN: 978-3-527-31241-2.
- Takahashi, T., Takada, N. & Toyoda, H. (2014). Synergistic effect of microwave plasma and ultrasonic wave on decomposition of organic compounds in water. In: Japanese Journal of Applied Physics; 53 (7S): 07KE01.
- Tiehm, A., Nickel, K., Zellhorn, M. & Neis, U. (2001). Ultrasonic waste activated sludge disintegration for improving anaerobic stabilization. In: Water research; 35 (8): 2003-2009.
- Wang, B., Sun, B., Zhu, X., Yan, Z., Liu, Y. & Liu, H. (2013). Effect of reactor parameters on matching properties of microwave discharge in liquid. In: Journal of Physics: Conference Series; Vol. 418, No. 1, p. 012099.

Kontakt

M. Sc. Tim Kuhlow, Wissenschaftlicher Mitarbeiter

Professur für Agrartechnologie und Verfahrenstechnik
Agrar- und Umweltwissenschaftliche Fakultät der Universität Rostock

① +49 (0)381.498-3353 | ☎ tim.kuhlow@uni-rostock.de
✉ www.auf.uni-rostock.de

FORUM B

BIOGAS

NEUE SUBSTRATE

Kontinuierliche Gärversuche mit Bioabfall und Co-Substraten

Zusammenfassung: Die Schwierigkeit zur Abschätzung der Biogasmenge aus der anaeroben biologischen Bioabfallbehandlung besteht neben dem Einfluss der jahreszeitlich schwankenden Abfallqualität zusätzlich in der inkongruenten Zugabe von Co-Substraten, deren Einfluss und Wechselwirkung auf den Vergärungsprozess nicht oder nur unzureichend in der Fachliteratur beschrieben wird.

Durch dieses Faktum motiviert, führte die Universität Rostock im Jahr 2019 kontinuierliche Gärversuche durch. Ziel der Versuche war dabei, den Einfluss landwirtschaftlicher und industrieller Reststoffe auf Stoffwechselprozesse der anaeroben Vergärung zu untersuchen. Für die kontinuierliche Vergärung wurde ein Versuchszeitraum von acht Wochen gewählt. Um den Einfluss der Raumbelastung zu eruieren, wurde alle zwei Wochen die Substratzufuhr stufenweise gesteigert. Der Co-Substratanteil im Substratinput blieb dabei unverändert und betrug je nach Versuchsgruppe null Prozent bis 13 Prozent. Die zugeführte Frischmasse war dabei in jeder Prozessstufe identisch. Ausgehend vom Nullversuch (Monovergärung Bioabfall), sind zusätzlich neben Bioabfall praxisübliche Reststoffe aus Landwirtschaft (Kaff) und Industrie (Ketchup) als Co-Substrate eingesetzt worden. Als Parameter zur Einschätzung der Prozessstabilität dienten dabei unter anderem Trockenmasse, organische Trockenmasse, Abaugrade, pH-Wert, FOS/TAC sowie die spezifische Biogasproduktion.

Die gewählte Untersuchungsmethodik erlaubt den Vergleich zwischen Bioabfall-monovergärung und Co-Vergärung.

Abstract: The difficulty in estimating the amount of biogas from anaerobic biological biowaste treatment consists of not only the influence of the seasonally fluctuating waste quality but also of the incongruent addition of co-substrates, whose influence on and interaction with the fermentation process is not or only insufficiently described in the scientific literature.

Motivated by this fact, the University of Rostock carried out continuous fermentation experiments in 2019. The aim of the experiments was to investigate the influence of agricultural and industrial residues on the metabolic processes of anaerobic digestion. For the continuous fermentation an eight-week trial period was set. In order to determine the influence of the room load, the substrate supply was gradually increased every two weeks. The co-substrate proportion in the substrate input remained constant and was between zero percent and 13 percent depending on the test group. The fresh matter input was identical in each process stage.

Starting from the blank test (mono-fermentation of biowaste) the two test trials consist of not only biowaste but also common residues from agriculture (chaff) and industry (ketchup) as co-substrates. Parameters used to evaluate the process stabi-

lity included dry mass, organic dry mass, degree of degradation, pH value, VOA/TAC and specific biogas yield.

The chosen investigation methodology allows the comparison between biowaste mono-fermentation and co-fermentation.

1 Einführung

Die Vergärung von Bioabfällen und biogenen Reststoffen spielt in Deutschland nach den bekannten Änderungen in den Vergütungsstrukturen der Anlagenbetreiber eine immer wichtigere Rolle. Schüch et al. (2020) stellten fest, dass die Aufgaben von energieeffizienten Bioabfallbehandlungsanlagen nicht nur in der Erfüllung ihrer Entsorgungs- und Verwertungsfunktion liegen sollten, sondern auch darin, Strom bedarfsgerecht zu liefern und Sektoren wie Verkehr und Wärme optimal miteinander zu verknüpfen.

Der eingesetzte Bioabfall unterliegt vielfältigen Einflussfaktoren (Sprafke et al. 2020). Diese Einflussfaktoren resultieren in starken Schwankungen in Qualität und Quantität von Bioabfall. Unter Qualitätsschwankungen sind dabei insbesondere der volatile spezifische Gasertrag für den Anlagenbetrieb und der Anlagenplanung von großer Bedeutung. Durch den Gesetzgeber ist der Einsatz von mindestens 90 Gew.-% Bioabfällen, im jeweiligen Kalenderjahr, gemäß Abfallschlüssel Nummer 20 02 01, 20 03 01 und 20 03 02 vorgeschrieben, um eine mögliche (EEG-)Maximalvergütung von 14,88 Cent pro Kilowattstunde bei einer maximalen Bemessungsleistung von 500 Kilowatt zu erhalten (Bundesamt für Justiz 2014). Durch dieses Faktum sind betroffene Anlagenbetreiber bestrebt, nach Möglichkeit Co-Substrate einzusetzen, die die folgenden Parameter vorweisen:

1. Sie haben keinen negativen Einfluss auf die Biozönose im Fermenter.
2. Durch den Einsatz wird der spezifische Gasertrag der Gesamtinputs gesteigert.
3. Die zusätzlichen Einnahmen steigern die Wirtschaftlichkeit der Anlage.
4. Es sollten sich keine Stör- und Fremdstoffe im Co-Substrat befinden.
5. Durch die Co-Substrate soll es nicht zur Prozessstörung durch Hemmung bzw. Toxizität kommen.

Um den Einfluss von Co-Substraten auf relevante Prozessparameter der Biogasproduktion zu untersuchen, soll von einem industriellen und einem landwirtschaftlichen Co-Substrat auf ausgesuchte Prozessparameter (Trockenmasse, organische Trockenmasse, Abaugrade, pH-Wert, FOS/TAC, spezifische Biogasproduktion) untersucht werden.

2 Material und Methoden

Im Rahmen der Versuchsdurchführung kamen drei Versuchseinheiten mit vier identischen Fermentern pro Einheit, mit einem Gesamtvolumen von 20 l und einem Arbeitsvolumen von rund 10 l zum Einsatz. Jeder Fermenter ist mit einem Milligaszähler (Ritter MGC 1) ausgestattet und die Messdaten wurden kontinuierlich erfasst. Darüber hinaus wurde das Biogas in Gassammelbeuteln gesammelt sowie die Gaszusammensetzung täglich im Kopfraum gemessen (EHEIM Visit 03). Gemessen werden die Biogaskomponenten CH_4 , CO_2 , H_2S und O_2 . Die Prozesstemperatur unter mesophilen Bedingungen wird durch die Zirkulation von Frischluft um die Fermenter aus einem Heizgerät geregelt. Alle Fermenter sind durch ein Isolationssystem gekapselt. Die Flüssigphase des Fermenters wird halbkontinuierlich durch ein Ankerrührwerk mit einer variablen Umdrehung pro Minute und Rührintervallen gerührt. Jede Einheit wurde mit einer definierten Menge Biogut beziehungsweise einer Mischung aus Bioabfall und Co-Substrat beschickt. Die Beschickung des Fermenters erfolgte täglich von Hand über ein von oben nach unten verlaufendes Beschickungsrohr, überschüssige Gärreste wurden ebenfalls manuell über ein Kugelventil am Boden entfernt. Alle Fermenter wurden quasi kontinuierlich beschickt (inkl. Wochenende) um den Einfluss einer Fütterungspause auf die Biozönose auszuschließen.

Einmal wöchentlich wurden die Substratproben aufgetaut und die täglichen Fütterungsrationen für jeden einzelnen Fermenter für die kommende Woche vorbereitet. Anschließend wurden die täglichen Fütterungsrationen in einer Kühlkammer (-20 °C) eingefroren. Diese Einzelportionen wurden zum jeweiligen Fütterungszeitpunkt bei 4 °C in einer temperierten Kühlkammer aufgetaut und in den entsprechenden Fermenter der jeweiligen Versuchsgruppe gegeben.

Als Inokulum wurde Klärschlamm einer kommunalen Abwasserbehandlungsanlage genutzt. Nach der Probenahme wurde der Klärschlamm ohne weitere Vorbehandlung verwendet.

Das Hauptsubstrat für die kontinuierlichen Versuche war eine Bioabfallmischprobe von urban und rural geprägten Regionen der Landeshauptstadt Schwerin. Die Ausgangsproben entstammen dabei der getrennten Sammlung. Aus der Mischprobe wurden für jeden Versuchstag ggf. zusammen mit den Co-Substraten die Einzelproben für die tägliche Fütterung vorbereitet.

In der Fermentergruppe B wurde neben Bioabfall als Hauptsubstrat ein handelsüblicher Tomatenketchup als industrielles Co-Substrat eingesetzt. Der Ketchup entstammt einer nicht näher definierten Fehlproduktion und entspricht weitestgehend der Zusammensetzung eines verzehrfertigen Curry-Ketchups. Der oTM-Anteil in der Substratmischung wurde auf 5 % eingestellt was einen Co-Substranteil von 12,3 % in der Frischmasse entspricht.

Das zweite eingesetzte Co-Substrat ‚Kaff‘ ist ein landwirtschaftliches Produkt, das sich auf die beim Dreschen von Feldfrüchten entstehende Spreu bezieht

und als Agrarreststoff anfällt. Die in der Schweriner Bioabfallanlage verwendete Kaff-Mischung enthält neben der Spreu von Getreide und Raps auch teilweise Getreidekörner sowie ölhaltige Rapssamen, welche als besonders ertragsreich bei der Biogasbildung gelten. Der oTM-Anteil in der Substratmischung wurde auf 30 % eingestellt was einem Co-Substratanteil von 13,0 % in der Frischmasse entspricht.

Der Frischmasse-Co-Substratanteil von mehr oder weniger 10 % entspricht den üblichen Praxisbedingungen im kontinuierlichen Anlagenbetrieb. Im Normalbetrieb ist eine durchgehende Fütterung mit 10 % Co-Substraten in Abhängigkeit der verfügbaren Co-Substrate technisch schwer realisierbar und führt zu Schwankungen im Co-Substratanteil der Gesamtmasse aus Bioabfall und Co-Substrat.

Die eingesetzte tägliche Probemenge war in allen Versuchsgruppen identisch.

Eigenschaften der Substrate und Substratmischungen

In Tab. 1 sind die Kennwerte der eingesetzten Substrate inkl. Inokulum der täglichen Fütterung aufgelistet. Eindeutig ist zu erkennen, dass Kaff einen hohen Anteil organischer Trockenmasse in Trocken- und Frischmasse aufweist. Ebenfalls ist der Wasseranteil im Co-Substrat Kaff im Vergleich mit den anderen Substraten bedeutend geringer. Die organische Trockenmasse im Ketchup ist verglichen mit Bioabfall und Kaff deutlich geringer.

Die Trockenmassen und organische Trockenmassen wurden aufgrund der Inhomogenität der Substrate in Dreifachbestimmung ermittelt. Die Trockenmassebestimmung erfolgte im Trockenschrank bei 105 °C und die Veraschung der Proben zur Bestimmung des Gehaltes an organischer Trockenmasse im Muffelofen bei 550 °C.

Tab. 1: Kennwerte der eingesetzten Substrate bei der kontinuierlichen Vergärung

Substrat	Trockenmasse		Organische Trockenmasse
	[%FM]	[%TM]	[%FM]
Bioabfall	38,0	64,3	24,4
Inokulum	6,4	71,7	4,6
Kaff	87,4	79,7	69,7
Ketchup	30,2	27,6	8,3

Versuchsdurchführung

Die drei Versuchsgruppen wurden täglich mit der aufgetauten Probe zur gleichen Zeit gefüttert. Die täglich zugeführte Frischmasse sowie die organische Raumbelastung der Versuchsfermenter sind in Tab. 2 dargestellt. Die organi-

sche Raumbelastung wurde gemäß Versuchsplan alle 2 Wochen gesteigert bis im System kontinuierliche Prozessbedingungen herrschten.

Einmal wöchentlich wurde überschüssiger Gärrest über den Kugelhahn am Boden der jeweiligen Fermenter der Versuchsgruppe entfernt. Der Füllstand der Fermenter, die während der Woche leicht durch die Substratzufuhr ansteigen, werden dadurch auf dem vorgegebenen Nennwert gehalten. Die folgenden Analysen wurden jeweils je Fermentergruppe gemäß den geltenden Richtlinien durchgeführt:

- Trockenmasse (Mischprobe je Versuchsgruppe)
- Organische Trockenmasse (Mischprobe je Versuchsgruppe)
- FOS, TAC (Titration) (je Fermenter)
- pH-Wert (je Fermenter)

Mit den vorliegenden TM- und oTM-Gehalten der Substrate wurden die Substratmischungen berechnet. Ebenfalls wurden die TM- und oTM-Gehalte in den Gärresten bestimmt. In der Substratmischung wurde der absolute TM- und oTM-Gehalt berechnet und anschließend die relativen Gehalte.

3 Ergebnisse und Diskussion

Im folgenden Kapitel sind die Ergebnisse der kontinuierlichen Versuche zusammengestellt. Mit der beschriebenen Methodik wurde jede Versuchsgruppe ausgewertet. Soweit einzelne Fermenter aufgrund von Prozessstörungen ausfielen wurden Sie aus der Auswertung und der Beprobung ausgeschlossen.

Organische Raumbelastung

Aus den Daten der Fütterung der Fermenter lässt sich die tägliche Beschickungs menge mit organischer Trockenmasse ermitteln. Unter der Annahme, dass in allen Fermentern das Reaktorvolumen identisch ist kann die organische Raumbelastung berechnet werden (Tab. 2). Die organische Raumbelastung berechnet sich nach Gl. 1 folgendermaßen:

$$B_R = \frac{\dot{m} \times c_{oTM}}{V_R \times 100} \quad \left[\frac{\text{kg}_{oTM}}{\text{m}^3 \times \text{d}} \right] \quad (1)$$

B_R = Raumbelastung

\dot{m} = Zugeführte Substratmenge je Zeiteinheit [kg/d]

c_{oTM} = Konzentration der organischen Trockenmasse [%_{oTM}]

V_R = Reaktorvolumen [m^3]

Tab. 2: Organische Raumbelastung der Versuchsgruppen A, B und C

Zeitraum	Zugeführte Frischmasse	Gruppe A (Bioabfall)	Gruppe B (Bioabfall und Ketchup)	Gruppe C (Bioabfall und Kaff)
	[g _{FM}]	[kg _{oTM} m ⁻³ d ⁻¹]	[kg _{oTM} m ⁻³ d ⁻¹]	[kg _{oTM} m ⁻³ d ⁻¹]
I	31,7	0,76	0,69-0,70	0,91-0,92
II	37,0	0,87-0,88	0,79-0,80	1,06
III	42,3	0,97-0,98	0,91-0,93	1,21
IV	47,6	1,09-1,10	1,01-1,05	1,35-1,38

Die organische Raumbelastung ist bei der Substratmischung aus Bioabfall und Kaff am größten. Die Substratmischung aus Bioabfall und Ketchup hat die geringste Raumbelastung von allen Versuchsgruppen.

Trockenmasse und organische Trockenmasse

Es sind eindeutige Schwankungen im TM- und oTM-Output zu erkennen (Abb. 1). Diese Schwankungen sind durch den steigenden Trockenmassegehalt im Fermenter zu erklären, welcher typisch beim Einsatz von Bioabfall ist. Des Weiteren kann festgestellt werden, dass der Trockenmassegehalt im Output der Versuchsgruppe C zum Versuchsende um 8 % höher liegt als bei der Kontrollgruppe A. Die TM-Gehalte der Gruppe C sind zum Ende des Versuches um 6 % unter denen der Kontrollgruppe. Der TM-Gehalt nimmt kontinuierlich in allen Versuchsgruppen zu. Grund dafür ist, dass das Ausgangssubstrat einen hohen TM-Gehalt hat und sich dadurch im Fermenter akkumuliert. In allen Versuchsgruppen ist zu erkennen, dass sich der Gehalt an organischer Trockenmasse nach Erreichen von konstanten Betriebsbedingungen stabilisiert.

Der Gehalt an organischer Trockenmasse im Output unterscheidet sich nur geringfügig zwischen der Versuchsgruppe A und B. Der oTM-Gehalt von Gruppe C liegt während des gesamten Versuches über den von Gruppe A und B.

Der maßgebliche oTM-Abbaugrad von Gruppe A und B und liegt bei rund 78 % der von Gruppe C ist 2 % höher und liegt bei ca. 80 %. Der oTM-Abbaugrad einer Bioabfallvergärungsanlage liegt zwischen 50 und 80 % (Krassowski et al. 2013).

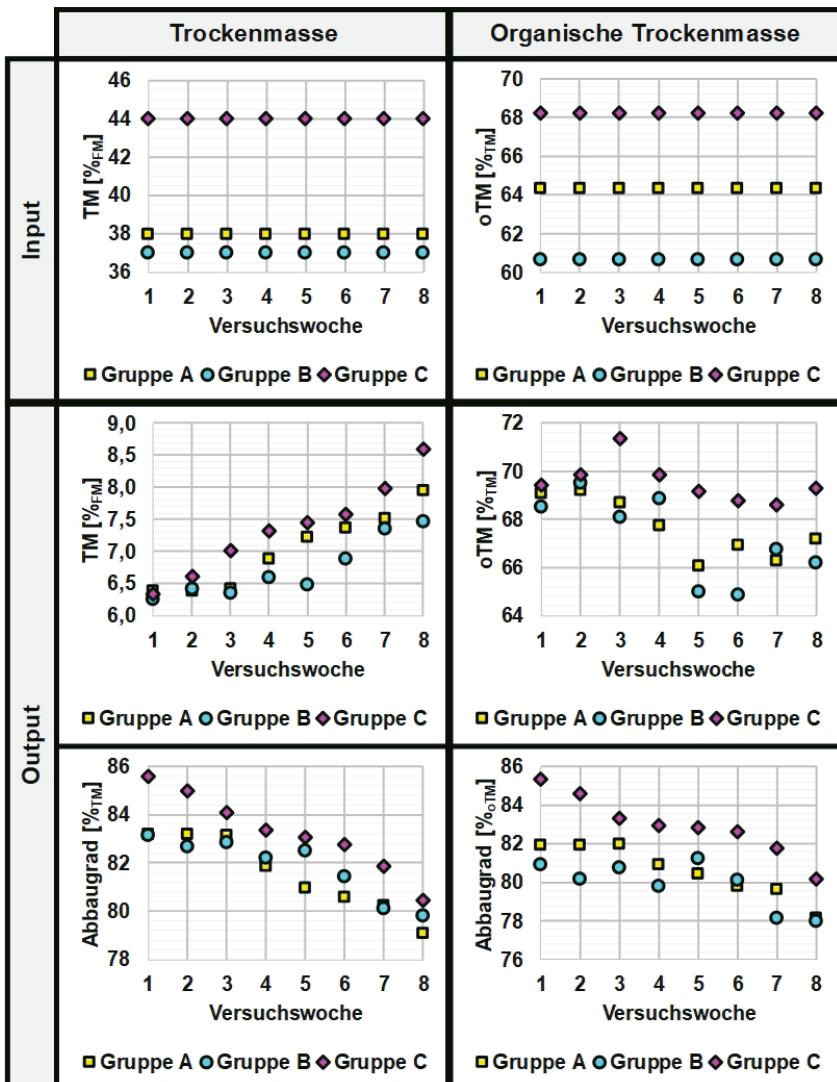


Abb. 1: Trockenmasse und organische Trockenmasse im In- und Output

Spezifischer Biogasertrag

Bei allen Gruppen wurde nach einer Einfahrphase von ca. 30 Tagen konstante Prozessparameter erreicht. Aus den Ergebnissen ist zu erkennen, dass die Mischung aus Bioabfall und Ketchup (Gruppe B) den höchsten spezifischen Biogasertrag in Bezug auf die eingesetzte organische Trockenmasse erzielt (Abb. 2). Das Substratgemisch aus Bioabfall und Kaff liefert ebenfalls höhere

spezifische Biogaserträge verglichen mit der Bioabfallmonovergärung. Unter Berücksichtigung der verschiedenen oTM-Gehalte der eingesetzten Substrate und der Substratmischungen ergibt sich für die verschiedenen Versuchsgruppen ein anderes Bild (Abb. 3). Der spezifische Biogasertrag liegt beim Einsatz von Kaff als Co-Substrat um mehr als 40 % über dem Gasertrag einer Bioabfallmonovergärung. Der spezifische Gasertrag der Mischung Bioabfall und Ketchup liegt um ca. 10 % höher als bei der Monovergärung. Dies ist zu erklären durch die verschiedenen Trockenmassegehalte der eingesetzten Co-Substrate (Tab. 1) und insbesondere durch den Anteil an fermentierbarer organischer Trockensubstanz (Weißbach 2009).

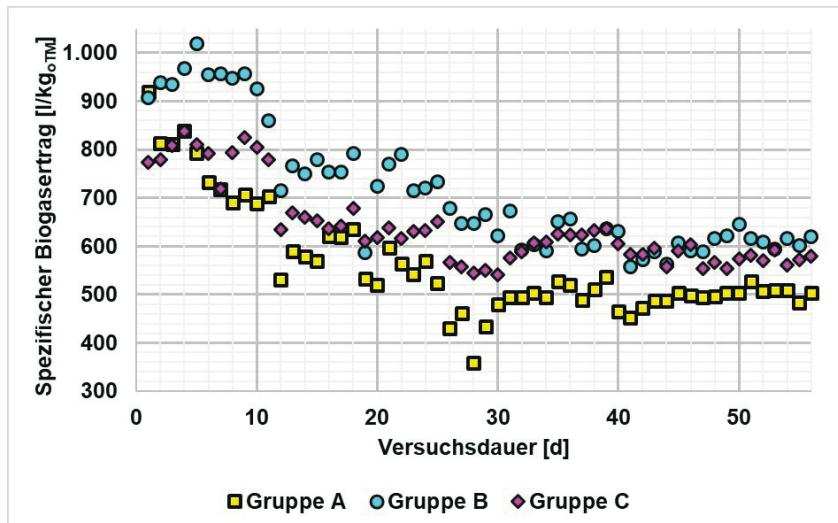


Abb. 2: Spezifischer Biogasertrag der Versuchsgruppen (Bezugsgröße: Organische Trockenmasse)

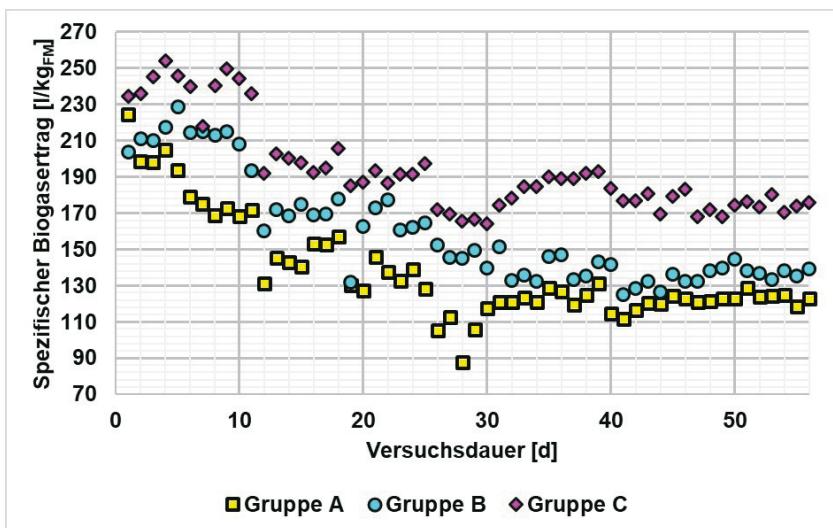


Abb. 3: Spezifischer Biogasertrag der Versuchsgruppen (Bezugsgröße: Frischmasse)

Der spezifische Biogasertrag der Versuchsgruppen nach Erreichen von stabilen Bedingungen ist in Tab. 3 dargestellt.

Tab. 3: Medianwerte der Versuchsgruppen A,B und C in Zeitraum IV

Spezifischer Biogasertrag	Gruppe A (Bioabfall)	Gruppe B (Bioabfall und Ketchup)	Gruppe C (Bioabfall und Kaff)
l/kg _{FM}	123	136	175
l/kg _{oTM}	498	607	580

Der berechnete spezifische Biogasertrag der eingesetzten Substrate ist in Tab. 4 dargestellt. Die berechneten Werte für Bioabfall und Kaff entsprechen weitestgehend den Literaturwerten (Weiβbach F. 2009; Bekker 2007) wohingegen der Biogasertrag von Ketchup verglichen mit anderen Substraten als äußerst hoch einzuschätzen ist. Vergleichbare Gaserträge bezogen auf organische Trockenmasse sind nur von Prozesswasser (3.000 bis 4.000 m³/toTM) bzw. Fruchtwasser (1.500 bis 2.000 m³/toTM) bekannt, deren Gaserträge aber bezogen auf Frischmasse um den Faktor 4 unter denen von Ketchup liegen.

Tab. 4: Substratspezifischer Biogasertrag der eingesetzten Substrate

Substrat-spezifischer Biogasertrag	Bioabfall	Ketchup	Kaff
l/kg _{FM}	123	229	523
l/kg _{OTS}	498	2.678	771

Der Methangehalt der Versuchsgruppen ist in Tab. 5 dargestellt. Der Einsatz von Co-Substraten hat keinen erkennbaren Einfluss auf den Methangehalt im Vergleich zu Bioabfall-Monovergärung.

Tab. 5: Methangehalt der Versuchsgruppen A,B und C in Zeitraum IV

Methangehalt	Gruppe A (Bioabfall)	Gruppe B (Bioabfall und Ketchup)	Gruppe C (Bioabfall und Kaff)
Vol.-%	50,8-61,7	48,8-60,6	50,6-62,1

Flüchtige organische Säuren, Pufferkapazität und pH-Werte

Die Konzentration an flüchtigen organischen Säuren (FOS) ist bei der Co-Vergärung von Bioabfall und Kaff am höchsten. Ebenfalls ist die Pufferkapazität bei Gruppe C am höchsten. Nach Voß et al. (2009) weist ein Anteil an organischen Säuren von > 10.000 mg/l auf einen unvollständigen Stoffwechsel hin. In allen Versuchsgruppen lag die Konzentration im gesamten Versuchszeitraum weit unter diesem Grenzwert, weshalb sich daraus auf einen vollständigen Stoffwechsel schließen lässt.

Die Pufferkapazität (TAC) (gemessen als Carbonatpuffer) ist das Vermögen des Prozesses, pH-Wertänderungen durch sauer oder basisch wirkende Substratbestandteile und Stoffwechselprodukte auszugleichen, welche zur Hemmung des Prozesses führen würden. Bei Überschreitung der Pufferkapazität ändert sich der pH-Wert rapide. Die Konzentration an FOS im Verhältnis mit der Pufferkapazität ist ein Parameter für die Prozessstabilität und wird als einheitsloser FOS/TAC-Wert angegeben. Zusätzlich zum Carbonatpuffer wirken noch andere Puffersysteme wie der Ammoniumpuffer sowie der Sulfatpuffer starken pH-Wertänderungen entgegen.

Die FOS/TAC-Werte in allen Gruppen liegen in einem Bereich von 0,17 bis 0,23. Voß et al. (2009) sagten aus, dass ein grober Anhaltswert für einen stabilen Prozess ein FOS/TAC-Verhältnis von 0,15 bis 0,45 ist. FOS/TAC-Werte unter 0,15 lassen dabei auf eine Alkalose verursacht durch Substratmangel schließen und Verhältnisse über 0,45 können Hinweise auf eine Azidose im Sinne von einer

Überanreicherung von organischen Säuren sein. In der Praxis kommt es aber häufig zu Veränderungen in der Spezies-Diversität und Adaption wodurch ein störungsfreier Betrieb mit höheren FOS/TAC-Werten ebenfalls möglich ist.

Der pH-Verlauf der Versuchsgruppen liegt im Versuchszeitraum zwischen 7,23 und 8,22. Bei Versuchsende liegt der pH-Wert in allen Versuchsgruppen zwischen 7,92 und 8,01. Nach Weinrich (2017) liegt der optimale Bereich für Methanbildner bei 7,00 bis 7,50 bei einstufigen Verfahren. Eine ungestörte anaerobe Bakteriengemeinschaft kann zwischen einen pH-Wert von 7 bis 8,2 vorliegen (Langhans et al. 2020). Da sich alle Versuchsgruppen bei Betrachtung der pH-Werte in einem stabilen Prozesszustand befunden haben, lässt sich auf ein pH-Optimum für die anaerobe Vergärung von Bioabfall bei einem pH-Wert von rund 8 schließen, der mit den Praxiswerten aus der Anlage übereinstimmt.

Die Schwankungen im pH-Verlauf lassen sich durch Anpassungsvorgänge in den Fermentern erklären, da noch keine Prozessstabilität in Phase I und III vorliegt. In allen Versuchsgruppen zeigen die pH-Werte ähnliche Verläufe an.

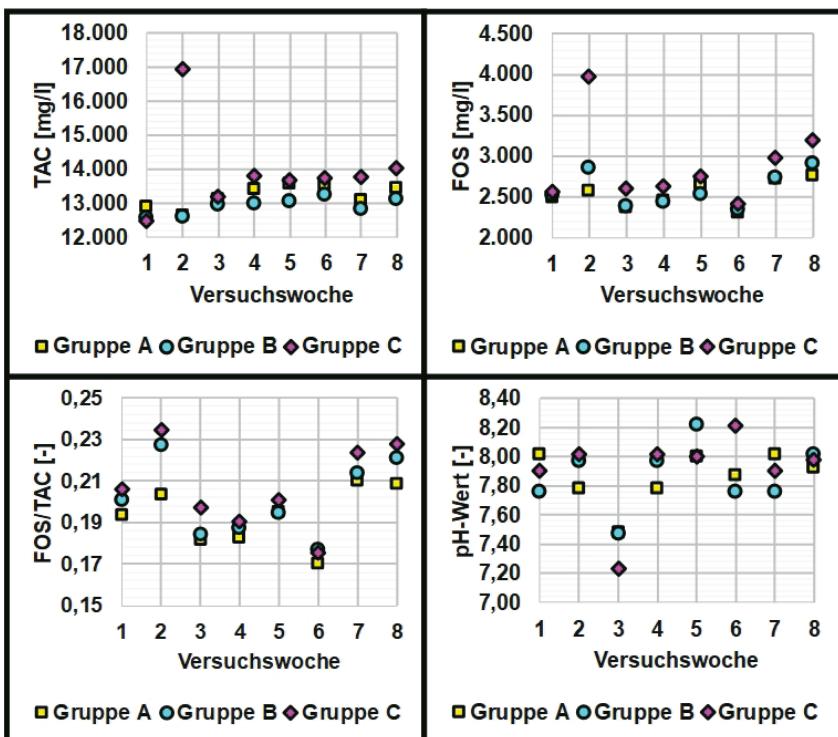


Abb. 4: Messdaten von TAC, FOS, FOS/TAC und pH-Wert im Versuchsverlauf

4 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

Die vorgelegte Arbeit beschäftigt sich mit dem Einfluss von Co-Substraten auf die Prozessparameter der Bioabfallvergärung. Es zeigte sich, dass der optimierte Einsatz von Co-Substraten essentiell ist für die Planung und den Betrieb von Bioabfallvergärungsanlagen. Im Vergleich zur Monovergärung von Bioabfällen ist festzuhalten, dass bei der Co-Vergärung der beiden untersuchten Co-Substrate ein höherer spezifischer Biogasertrag bezüglich Frischmasse und organischer Trockenmasse erzielt wurde. Des Weiteren wurde festgestellt, dass beim Einsatz von Co-Substraten der Anteil an organischer Trockenmasse in der Frischmasse des Co-Substrates maßgeblich für die kumulierte Biogasproduktion verantwortlich ist.

Bei der Verwendung von Kaff als Co-Substrat ist ein erhöhter Trockenmassegehalt im Fermenter festgestellt worden. Dieser erhöhte Trockenmassegehalt kann in Praxisanlagen zu einem erhöhten Prozesswasserbedarf führen. Ein geringerer Trockenmassegehalt im Vergleich zur Monovergärung wurde bei der Co-Vergärung von Ketchup festgestellt, welches in einem verringerten Prozesswasserbedarf resultieren würde.

Flüchtige organische Säuren, Pufferkapazität und FOS/TAC-Wert befinden sich in normalen Wertebereichen. Der pH-Wert in allen Fermentern ist etwas erhöht, befindet sich aber in den gängigen Bereichsgrenzen eines ungestörten Anlagenbetriebes.

Aufbauend auf den Ergebnissen kann, insbesondere im Rahmen der Planung und des Betriebes von Bioabfallvergärungsanlagen, der Einsatz von Co-Substraten sowie die damit verbundenen Auswirkungen auf das technische Betriebsmanagement besser eingeschätzt werden und die Effektivität der anaeroben Vergärung von Bioabfall optimiert werden.

Danksagung

Dieses Papier wurde im Rahmen des Forschungsprojekts „Netz-Stabil“ erstellt und vom Europäischen Sozialfonds (ESF/14-BM-A55-0021/16) finanziert. Diese Arbeit ist Teil des Qualifizierungsprogramms „Nachwuchsförderung in exzellenten Forschungsverbünden – Exzellenzforschungsprogramm des Landes Mecklenburg-Vorpommern“.

Literatur/Quellen

- Bekker, Marina (2007): Charakterisierung der anaeroben Abbaubarkeit von spezifischen organischen Stoffen. Zugl.: Karlsruhe, Univ., Diss, 2007. Karlsruhe: Verl. Siedlungswasserwirtschaft (Schriftenreihe / SWW, 125).
- Bundesamt für Justiz (2014): Gesetz für den Ausbau erneuerbarer Energien. Erneuerbare-Energien-Gesetz - EEG 2017, vom 20.11.2019.

- Krassowski, Joachim; Salazar Gómez, Jorge Iván; Fischer, Elmar: Bioabfallvergärung - Beiträge zur Prozessoptimierung und zur verbesserten Gasnutzung: Optimierungsbeiträge Bioabfallvergärung, gemeinsamer Schlussbericht der Projekte 03KB032A und 03KB032B. Berlin (BMU-Förderprogramm "Energetische Biomassenutzung". Schriftenreihe).
- Langhans, Gerhard; Scholwin, Frank; Nelles, Michael (2020): Handbuch zur Bilanzierung von Biogasanlagen für Ingenieure – Band I. Grundlagen und Methoden für die Bewertung und Bilanzierung in der Praxis. 1st ed. 2020. Online verfügbar unter <https://doi.org/10.1007/978-3-658-27339-2>.
- Schüch, Andrea; Sprafke, Jan; Nelles, Michael (2020): Role of biogenic waste and residues as an important building block towards a successful energy transition and future bioeconomy – results of a site analysis. In: Detritus In Press (0). DOI: 10.31025/2611-4135/2020.13919.
- Sprafke, Jan; Engler, Nils; Thabit, Qahtan; Nelles, Michael; Schuech, Andrea (2020): Volume 09 - March 2020. In: Detritus (9), S. 68–75. DOI: 10.31025/2611-4135/2020.13905.
- Voß, E.; Weichgrebe, D.; Rosenwinkel, K.-H (2009): FOS/TAC: Herleitung, Methodik, Anwendung und Aussage-kraft. Hg. v. Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL) (Schriftenreihe der Bayerischen Landesanstalt für Landwirtschaft, 17). Online verfügbar unter https://lfl.bayern.de/mam/cms07/publikationen/daten/schriftenreihe/p_37630.pdf#page=225, zuletzt geprüft am 24.05.2020.
- Weinrich, Sören (2017): Praxisnahe Modellierung von Biogasanlagen. Systematische Vereinfachung des Anaerobic Digestion Model No. 1 (ADM1). Rostock: Universität (Schriftenreihe Umweltingenieurwesen, Band 76).
- Weißbach F. (2009): Die Bewertung des Gasbildungspotenzials von nachwachsenden Rohstoffen. Hg. v. Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL) (Schriftenreihe der Bayerischen Landesanstalt für Landwirtschaft, 17). Online verfügbar unter https://lfl.bayern.de/mam/cms07/publikationen/daten/schriftenreihe/p_37630.pdf#page=225, zuletzt geprüft am 24.05.2020.

Kontakt

Jan Sprafke, Wissenschaftlicher Mitarbeiter

Professur Abfall- und Stoffstromwirtschaft der Universität Rostock

Justus-von-Liebig-Weg 6, 18059 Rostock

① +49(0)381.498-3416 | ☎ jan.sprafke@uni-rostock.de
✉ www.auf-aw.uni-rostock.de

Zukunftsprojekte für eine nachhaltige Energieversorgung und den Klimaschutz (Anbau von Steinklee)

Zusammenfassung: Das aus Mitteln des BMEL geförderte Projekt „Anbau von Steinklee - Wiedereinführung in die Praxis und Verbesserung der Anbau- und Saatgutsituation“ stützt sich auf Feldversuche und Literaturrecherche des vorangegangenen Projektes „Nachhaltige Erzeugung von Bioenergie auch auf trockenen Sandböden durch Erhöhung der Artenvielfalt (Anbau von Bokharaklee)“ und sollte das daraus erworbene Wissen auf Praxistauglichkeit prüfen.

Dazu wurde in Demonstrationsbetrieben im April 2017 mit dem Anbau von Steinklee begonnen. Der Anbau richtete sich nach den betrieblichen Gegebenheiten.

Aufgrund der häufig engen Fruchtfolgen und des einseitigen intensiven Anbaus von Marktfrüchten und Bioenergieläppen sowie durch die fortlaufend infrastrukturelle Erweiterung und den Städtebau hat die Biodiversität auf den Äckern sowie in der Landschaft große Einbußen zu verzeichnen.

Der Anbau von Steinklee sorgt für eine Aufweitung der Fruchtfolge, weist sehr gute Vorfruchtwirkungen auf, reichert Humus auf den Flächen an und kann, je nach Nutzung, als Lebensraum für Insekten und Vögel dienen. Die Funktion von Humus als ein guter Speicher für das klimarelevante Treibhausgas Kohlenstoffdioxid ist erwiesen. Unter anderem ist es daher notwendig die Humusanreicherung auf den landwirtschaftlichen Flächen Norddeutschlands durch den Anbau humusmehrender Pflanzen zu fördern. Zudem kann durch die Luftstickstoff-Fixierung der Knöllchenbakterien an den Wurzeln der Steinkleeflächen mineralischer Stickstoffdünger in der Nachfrucht eingespart werden. Stickstoff hat unter anderem einen Einfluss auf die THG-Emissionen und sorgt bei zu hohem Aufkommen für Umweltschäden.

Das Projekt sollte den Steinklee wieder in die Köpfe der Landwirte und auf die Flächen bringen. Zudem soll es aufzeigen, dass eine Aufweitung der Fruchtfolge mit positiven ökologischen Folgen einhergeht und somit auch langfristig mit ökonomischen Vorteilen. Letztendlich ist eine intakte Ökologie unersetzlich für die Landwirtschaft und somit für die Produktion von Lebensmitteln und Agrarrohstoffen.

Abstract: The project "Cultivation of sweet clover - reintroduction into practice and improvement of the cultivation and seed availability" is based on field tests and literature research of the previous project "Sustainable production of bioenergy also on dry sandy soils by increasing the biodiversity (cultivation of sweet clover)" and should check the results obtained for practicality.

For this purpose, the cultivation of sweet clover started in demonstration farms in April 2017. The cultivation was based on the operational conditions.

Due to the tight crop rotation and the one-sided intensive cultivation of bioenergy plants as well as the continuous infrastructural expansion and urban development, the biodiversity in the fields as well as in the landscape has suffered great losses. The biomass of flying insects has dropped extremely in parts of Germany since the 1980s. Field birds also have declining numbers.

The cultivation of sweet clover ensures an expansion of the crop rotation, shows very good pre-crop effects, enriches humus in the fields and, depending on the use, can serve as a habitat for insects and birds.

The function of humus as a good store for the climate-relevant greenhouse gas carbon dioxide has been proven. Therefore, it is necessary to promote the humus enrichment on the agricultural areas of Northern Germany by cultivating humus-multiplying plants.

In addition, the nitrogen fixation of the rhizobia at the roots of the sweet clover plants can save mineral nitrogen fertilizers in the offspring. Nitrogen has an impact on greenhouse gas emissions and causes environmental damage if it is too high.

The project was intended to bring the sweet clover back into the awareness of the farmers and on the fields. In addition, it should show that an expansion of crop rotation is accompanied by positive ecological consequences and thus also in the long term with economic advantages. Ultimately, an intact ecology is irreplaceable for agriculture and thus for the production of food and agricultural raw materials.

1 Einleitung

Das vor drei Jahren begonnene Demonstrationsprojekt „Anbau von Steinklee – Wiedereinführung in die Praxis und Verbesserung der Anbau- und Saatgutsituation“ läuft zum 31.05.2020 aus. Das Projekt wurde vom Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL) über die Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. gefördert.

Ziel war es die im vorausgegangenen Projekt „Nachhaltige Erzeugung von Bioenergie auch auf trockenen Sandböden durch Erhöhung der Artenvielfalt (Anbau von Bokharaklee)“ gewonnenen Erkenntnisse zum Anbau von Steinklee und zum Biogaspotential auf den Anbau in der Praxis zu übertragen und zu dokumentieren.

Der Schwerpunkt lag auf der Erprobung des Anbaus und der Nutzung von Steinklee unter verschiedenen Bedingungen sowie der Vermittlung von Wissen und der Vernetzung der Anbauer. Das Hauptanliegen bestand darin den Steinklee in der breiten Öffentlichkeit bekannter zu machen und seine Vorzüge zu verdeut-

lichen. Es wurden Daten zum Anbau und Erträgen sowie zu Biogaspotential und Treibhausgas-Emissionen gesammelt und aufbereitet. Innerhalb des relativ kurzen Projektzeitraumes konnte hier nur eine begrenzte Datengrundlage geschaffen werden. Im Folgenden werden einige der gesammelten Daten vorgestellt und teilweise mit den Daten aus dem vorherigen Projekt verglichen.

2 Anbau von Steinklee

2.1 Standortansprüche

Steinklee benötigt einen mindestens schwach sauren Boden, jedoch keinen sauren. Günstig ist ein pH-Wert ab 5,8. In der Jugendphase verträgt er Spätfröste von -3 bis -6 °C. Nach Ausbildung der Überwinterungsorgane ist er sehr winterhart. Temperaturen von unter -30 °C werden ohne weiteres überstanden. Außerdem ist er nässetolerant sowie nach der Etablierung sehrdürreverträglich und salztolerant. Auf Böden mit geringer Bodenfruchtbarkeit kann er beachtliche Bestände bilden. Auf reinen Sandböden ist der Anbau allerdings risikoreich.

2.2 Sortenwahl

Steinkleesorten sind nicht verfügbar. Es gibt einjährigen sowie zweijährigen Steinklee, welcher in Weiß (*Melilotus albus*) und in Gelb (*Melilotus officinalis*) vorkommt. Der zweijährige Steinklee zeigt die höhere Ertragsleistung und ist auch für sandige Böden wegen des hohen Maßes an Wurzelbildung vorteilhaft, da so der Humusgehalt des Bodens erhöht werden kann. Durch die Ansiedlung von Rhizobien wird mit dem Anbau von Steinklee Stickstoff im Boden angereichert, was den Einsatz von N-Düngern reduzieren kann. Steinklee ist cumarinhaltig und daher für die Tierernährung ungeeignet. Im Vergleich gilt der Weiße Steinklee allgemein als ertragreicher, der Gelbe Steinklee hingegen als trockenheitstoleranter.

2.3 Bodenbearbeitung und Aussaat

Steinklee ist kleinsamig (das TKG liegt bei 2 g). Für ein gleichmäßiges Auflaufen wird ein feines, abgesetztes Saatbett empfohlen. Bei Trockenheit während der Aussaat wird ein Anwalzen zur verbesserten Keimung angeraten. Die Drillsaat hat sich bewährt, jedoch ist eine Breitsaat auch möglich.

Große Trockenheit bei der Aussaat kann eine stark verminderte Keimung sowie Hartschaligkeit der Samen zur Folge haben. Zur Nachfrucht wird eine Minimalbodenbearbeitung empfohlen, damit die durch die Steinkleewurzeln aufgebrochenen Verdichtungen lebendverbaut bleiben.

Tab. 1: Angaben zur Aussaat

Angaben zur Aussaat	
Keimphase	9-12 Tage
Mindestkeimtemperatur	2 °C
Kornablagetiefe	1-3 cm*
Übliche Aussaatmenge (in Mitteleuropa)	15-25 kg/ha
Boden- oder Saatgutimpfung vor Erstaussaat des Steinklees empfohlen (Rhizobiengruppe 2, wie Luzerne)	
Mögliche Aussaattermine	
Frühe Frühjahrsaussaat (empfohlen)	Februar-März
Späte Frühjahrsaussaat (gleichwertig bei ausreichender Bodenfeuchte)	ggf. nach Futter- oder Wickroggen bis Mitte Mai
Späte Aussaat (sehr unsicher)	Vor Mitte August
*bei sandigen Böden und wenig Feuchte	

2.4 Düngung

Eine pH-Wert absichernde Kalkung kann zu den Vorfrüchten oder zur Saat stattfinden. Empfohlen wird eine zusätzliche Keimbettkalkung mit 20 dt/ha CaCO₃, da Steinklee in der Keimphase bis hin zur Jugendentwicklung empfindlich auf zu niedrige pH-Werte reagieren kann. Zur Förderung der Jugendentwicklung ebenso wie zur Förderung der Bildung von Knöllchenbakterien erfolgt die P-Gabe. Bei Bodennährstoffgehalten der Gehaltsklasse C ist eine Düngung je nach Nährstoffentzug durchzuführen. Nur bei bekanntem Mangel sind zur Deckung des Mikronährstoffbedarfs Mo, Bo und gegebenenfalls Co als Saatgutbehandlung oder als Blattdüngung zu verabreichen. Schwefel sollte zur Vorbeugung von Wachstumsdepressionen gegeben werden.

Bei einer Nutzung des Steinklees für die Biogasanlage werden N, P und K mit den Steinkleefpflanzen von der Fläche entnommen.

Eine mögliche Nährstoffabfuhr von der Steinkleefläche könnte dann wie folgt aussehen:

N [kg/dt TM]	P [kg/dt TM]	K [kg/dt TM]
18,62	0,32	2,51

Soll eine Grundnährstoffversorgung über organische Düngung erfolgen, muss beachtet werden, dass der Steinklee als Leguminose keinen oder nur einen sehr geringen Stickstoffbedarf besitzt.

2.5 Fruchfolge

Steinklee kann als Hauptfrucht (Frühjahrsblanksaat) sowie als Zweitfrucht nach einer Winterzwischenfrucht angebaut werden. Der Anbau ist eine gute Ergänzung zum Maisanbau. Von Vorteil sind die flexiblen Aussaat- und Erntezeitspannen (Abb. 1).

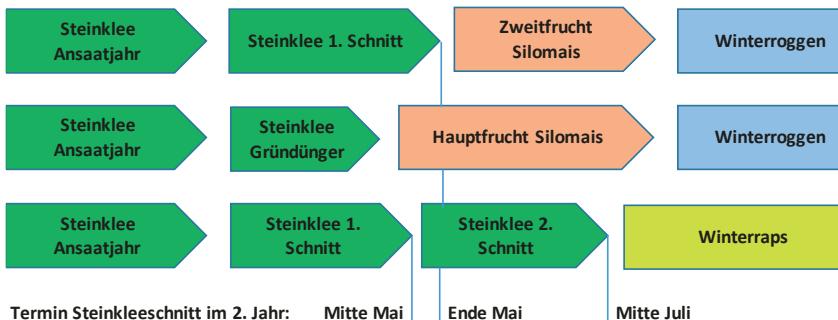


Abb. 1: Mögliche Einordnung d. Steinklees in die Fruchfolge

Quelle: Dr. Ines Bull, verändert durch Julia Schneider

2.6 Unkrautbekämpfung

Unkrautkonkurrenz kann in den ersten ca. 40-60 Tagen nach Auflaufen des Steinklees zur Ertragsminderung führen. Im zweiten Vegetationsjahr hingegen hat Steinklee eine beikrautunterdrückende Wirkung.

Tab. 2: Maßnahmen zur Beikrautregulation im Steinklee

Maßnahme	Wirkung
pflanzenbaulich	Nutzung einer Deckfrucht zur Unterdrückung des Beikrautes
mechanisch	Striegeln (3-4 Tage nach Aussaat), hoher Schröpf schnitt
chemisch	Einsatz leguminosenschonender Herbizide*

* grundsätzlich wird der Einsatz von Herbiziden nicht empfohlen. Herbizide, die für alle Kleearten zugelassen sind, lassen sich bei Bedarf einsetzen. Für alle anderen chemischen Anwendungen muss immer eine Sondergenehmigung beim zuständigen Pflanzenschutzdienst beantragt werden.

2.7 Ernte

Aussaattermin und Ernteverfahren beeinflussen, ob der Steinklee in einem Jahr zwei Mal genutzt werden kann. Um eine zweimalige Nutzung innerhalb eines

Jahres zu gewährleisten, müssen die vegetativen Stängelknospen erhalten bleiben. Daher ist ein Schnitt mit langen Stoppeln oberhalb der aktiven Achselknospen (11-20 cm) von großer Bedeutung. Dieser kann mit dem Mähwerk durchgeführt werden.

Tab. 3: Mögliche Erntetermine (Schnitzeit, Stoppellänge, Technik)

einschnittig												
1. Jahr												
2. Jahr												
zweischnittig												
1. Jahr												
2. Jahr												
Monat	Jan	Feb	Mär	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez

	Steinklee Wachstum
	lange Stoppel, Mähwerk
	kurze Stoppel, Mähwerk oder Feldhäcksler

Soll die folgende Nutzung jedoch erst nach der Überwinterung erfolgen, so kann der Steinklee nach Anfang Oktober (mit dem Feldhäcksler) auf kurze Stoppeln geschnitten werden. Auch im zweiten Anbaujahr muss ein erster Schnitt, nachdem ein Wiederaustrieb gewünscht wird, mit langen Stoppeln erfolgen. Der abschließende (zweite) Schnitt kann wieder bodennah durchgeführt werden.

2.8 Ertrag

In Abhängigkeit von Standort, Nutzungsform sowie Aussaatverfahren kann mit den Erträgen aus Tab. 4 kalkuliert werden.

Die Daten stammen aus den Ergebnissen des Vorprojektes. Im Demonstrationsprojekt wichen die Daten im Ansaatjahr und im Hauptnutzungsjahr von denen des Vorprojektes um einige dt/ha TM ab (Tab. 5). Aussaattermine, Wetterextreme und Flächenvoraussetzungen scheinen dafür der Grund gewesen zu sein.

Tab. 4: Ertragspotential von Steinklee in den verschiedenen Nutzungsjahren

		Ertrag in dt TM/ha
Ansaatjahr		25-90
2. Nutzungsjahr		50-150

Quelle: Dr. Ines Bull

3 Nutzungsmöglichkeiten von Steinklee

3.1 Biogasanlage

Durch die Fütterung einer Biogasanlage mit Steinklee oder mit Steinkleeanteilen konnten in wissenschaftlichen Versuchen des vorangegangenen Projektes „Nachhaltige Erzeugung von Bioenergie auch auf trockenen Sandböden durch Erhöhung der Artenvielfalt (Anbau von Bokharaklee)“ stabile Fermentationsprozesse erzielt werden.

Prozessstörungen, welche bei der alleinigen Vergärung von Mais auftraten, konnten durch die Substratmischung von Mais und Steinklee vermindert werden.

Es wurden keine Hemmungen im Biogasprozess durch den Cumaringehalt der Biomasse in den Konzentrationen, wie sie in den Pflanzen der cumarinreichen Herkünfte vorkommen (bis 0,6 % TS), beobachtet (Bull, 2013). Auch andere sekundäre Inhaltsstoffe des Steinklees oder hohe Ammonium- oder Schwefelwasserstoff-Gehalte aufgrund eines höheren Eiweißgehaltes im Vergleich zu Mais bewirkten keine Störung des Biogasprozesses. Eine Akkumulation der Hemmstoffe konnte in den Laborversuchen ebenfalls nicht beobachtet werden.

Mit einer Mais-Steinklee-Silage in einem Mischungsverhältnis von 2:1 wurden im Laborfermenter zwischen 87 % und 91 % des theoretischen Methanbildungspotenzials bei einer Raumbelastung von 4,5 g oTM_k l⁻¹ d⁻¹ erzielt. Mit einem Güllezusatz konnte die Raumbelastung auf 5 g oTM_k l⁻¹ d⁻¹ bei allerdings verringrigerter Substratausnutzung erhöht werden.

Das Entwicklungsstadium der Pflanzen beeinflusst die Methanausbeute stark. Steinklee enthält im Vergleich zu Silomais mehr Rohfaser. Durch verschiedene Aufschlussverfahren kann Lignin um die Zellulosefasern aufgebrochen werden. Damit wird erreicht, dass Zellulose für die Mikroorganismen zugänglich und so die Gasausbeute gesteigert wird. Der sich ergebende Nutzen solcher Verfahren rechtfertigt bisher jedoch nur selten den Energie- und Apparataufwand.

Der erzielbare Methanertrag von Steinklee liegt im Ansaatjahr zwischen 1200 und 2850 m³ CH₄/ha und bei 3000 m³ CH₄/ha im zweiten Vegetationsjahr (Bull, 2013). Die große Spannweite wird im ersten Jahr durch die hohen Ertragschwankungen verursacht. Im zweiten Jahr sind die Erträge stabiler (Bull, 2013).

Tab. 5: Ertrag bei Frühjahrsblanksaat, Anbau bis Juli im 2. Jahr (oben) und Ertrag von Steinklee im Demonstrationsprojekt - Erntezeitpunkte unterschiedlich- (unten)

Parameter	Einheit	Ansaatjahr	2. Vegetationsjahr	
			Knopenstadium	Vollblüte
Ergebnisse aus dem vorangestellten Projekt				
TM-Ertrag	dt/ha TM	50-80	100-150	
TS-Gehalt	%	25-30	15-18	25-30
CH4-Potential	IN/kg oTS	250-300	300-350	250-300
CH4-Ertrag	m³/ha CH4	1200-2100	2500-4000	
Ergebnisse aus dem Demonstrationsprojekt				
TM-Ertrag	dt/ha TM	27-44	16-95	
TS-Gehalt	%	29-34	22-43	
CH4-Potential	IN/kg oTS	257	240	
CH4-Ertrag	m³/ha CH4	811-1232	638-1380	

Quellen: I. Bull (2013) Daten in der Tabelle oben und J. Schneider (2020) Daten in der Tabelle unten

Die Tab. 5 (unten) zeigt die Werte, die im Projekt „Anbau von Steinklee – Wiedereinführung in die Praxis und Verbesserung der Anbau- und Saatgutsituation“ ermittelt wurden. Anders als im vorangestellten Projekt wurde kein Exaktversuch angelegt, sondern Demonstrationsflächen in landwirtschaftlichen Betrieben. Die Pflanzenbeprobungen fanden daher auch nicht zu vorher bestimmten Terminen statt, sondern orientierten sich an der vor Ort gegebenen Wuchsigkeit und am Entwicklungsstand des Steinklees, weshalb auch keine Unterteilung zwischen Knospenstadium und Vollblüte im 2. Vegetationsjahr stattgefunden hat. Zudem stellt die Tab. 5 (oben) Werte dar, die aus Literaturangaben und Ergebnissen aus den Exaktversuchen des vorangestellten Projektes abgeleitet wurden.

Der Trockenmasseertrag des Demonstrationsprojektes zeigt geringere Werte im Vergleich mit den Werten aus dem Vorprojekt. Die Methanerträge des Hauptnutzungsjahres fielen im Vergleich zu denen, die im vorangegangenen Projekt ermittelt wurden, geringer aus. Ein großer Einfluss findet sich vermutlich vorrangig in den trockenen Jahren des Projektzeitraumes (2017-2019) sowie in den im Vergleich abweichenden Ernteterminen zum Vorprojekt.

3.2 Ökologische Vorrangfläche

Laut „Umsetzung der EU-Agrarreform in Deutschland“, Ausgabe 2015 (Seiten 52, 53 und 113), fällt Steinklee unter die Rubrik „stickstoffbindende Pflanzen“. Die Pflanzen, welche in dieser Liste verzeichnet sind, können in Reinkultur sowie in Mischungen untereinander als ÖVF ausgewiesen werden. Dazu gelten jedoch bestimmte Auflagen, welche ebenfalls u.a. aus der oben genannten Quelle hervorgehen.

Um auf die Ökologischen Vorrangflächen anrechenbar zu sein, müssen sich die kleinkörnigen Leguminosen im Ansaatjahr mindestens vom 15. Mai bis zum 31. August auf der Fläche befinden. Hierbei ist zu beachten, dass der Zeitraum mit dem Tag der Aussaat beginnt.

Es besteht für den Steinklee und andere kleinkörnige Leguminosen die Möglichkeit der Schnittnutzung und Samengewinnung während dieses Zeitraums.

Nach den stickstoffbindenden Kulturen sind auf den Flächen Winterkulturen bzw. Winterzwischenfrüchte anzubauen, um Auswaschungen des gebundenen Nährstoffes entgegen zu wirken. Die Winterkulturen sind bis zum 15. Februar auf der Fläche zu belassen, wobei eine Verkürzung unter bestimmten Voraussetzungen bis max. 15. Januar beantragt werden kann.

3.3 Bienenweide

Als Bienennahrungs- und Nektarpflanze ist der Steinklee sehr wertvoll (Pätzold, 1961; Pritsch, 1958; Smith & Gorz, 1965; Simon, 1960a). Auch auf den Demonstrationsflächen im Zuge des Projektes wurde beobachtet (visuell und auditiv), dass die Steinkleeblüten hoch frequentiert von Bestäubern (Wild- und Honigbienen) besucht wurden.

Wird der Steinklee als Bienenweide genutzt, so schließt dies die Nutzung als Biogassubstrat weitgehend aus. Eine Ernte des Steinklees im Stadium der Blüte wäre eine Gefahr für die Bienen. Die Ernte nach der Blüte bietet eingeschränkte Qualitäten als Biogassubstrat, da die Pflanzen verholzen und die Biogasausbeute sinkt.

Durch einen Ernteschritt vor Blühbeginn kann die Zeit der Blüte gestaffelt werden. In Abhängigkeit von den Anbaubedingungen sowie von der Wuchsigkeit des Steinklees können pro Hektar 100-300 kg Honig gewonnen werden (Suvorov, 1950; Scheluto et al. 2007; Slapunov, 2008). Der Steinkleehonig ist hell, fest und qualitativ gut.

Nach Abblühen des Steinklees kann die Pflanze gemulcht und komplett in den Boden eingearbeitet werden und so als Gründünger zur Anreicherung organischer Substanz auf dem Feld genutzt werden.

Ein reiner Steinkleebestand wird derzeit nicht in Agrarumweltprogrammen als Bienenweide gefördert. Hierzu sind neben Steinklee mindestens vier weitere Pflanzenarten auf der Fläche zu etablieren. Ein Überdenken dieser Regelung wäre insofern sinnvoll, als dass auf sandigen Standorten wenige Pflanzenarten eine gute Wuchsigkeit aufweisen. Insofern ist gerade die Etablierung einer Bienenweide, wie sie zurzeit definiert ist, auf diesen Standorten schwierig. Eine Ausnahmeregelung für leichte Standorte in Bezug auf die zu etablierende Pflanzenartenzahl auf der „Bienenweide“ ist wünschenswert.

3.4 Gründüngung

Steinklee ist durch sein starkes Wurzelsystem besonders dazu geeignet (extreme) Verdichtungen im Boden aufzubrechen und die Nährstoffaufnahme und Wasserversorgung der Folgekulturen zu verbessern. Die Verdichtungen durchdringende Pfahlwurzel kann den Boden so auflockern, dass die nachfolgende Bearbeitungsintensität reduziert werden kann (Organic Agriculture Centre of Canada 2008). Er kann, wie für Leguminosen typisch, Luftstickstoff mithilfe von Rhizobien binden. Dies kann zu einer Verringerung des N-Düngungsbedarfes in der Nachfrucht führen. Die Anreicherung von organischer Bodensubstanz durch den Verbleib der Wurzeln im Boden nach der Ernte stellt einen weiteren boden sanitären Effekt dar. Mit dem Anbau von Steinklee kann die Humusbilanz deutlich verbessert werden. Auch inviehlosen Betrieben könnte so Biomasse auf Dauer zur Energiegewinnung ohne Beeinträchtigung der Humusbilanz erzeugt werden (Scheluto et al. 2007).

3.5 Vermehrungsanbau

Beim Steinklee gestaltet sich der Samenbau recht einfach. Eine vorherige Schnittnutzung oder der Anbau auf sandigem Boden verhindert, dass technische Probleme aufgrund der evtl. sehr hohen Bestände des Steinklees auftreten.

Tab. 6: Möglicher Samenertrag in Abhängigkeit vom Schnitt

	Samenertrag [dt/ha]
1. Schnitt	7-12 (max. 20)
2. Schnitt	4 -11

Quelle: Bull (2013) nach Specht (1939); Blecken (1948); Simon (1960a); Specht et al. (1960); Smith & Gorz (1965)

Zwar können eine ungleichmäßige Abreife und eine geringere Qualität der Samen mit der Gewinnung von Samen aus dem zweiten Schnitt verbunden sein (Skirde, 1957; Baskin & Baskin, 1988). Jedoch birgt eine hohe Wuchsigkeit auch das Potenzial eines zusätzlichen Ernteschritts und somit einen höheren Steinkleeertrag.

3.6 Silierung

Ergebnisse zur Silagequalität zeigen, dass Steinklee unter Beachtung der allgemeinen Silierregeln erfolgreich konserviert werden kann (Bull, 2013). Die sicherste Variante dabei ist die gemeinsame Konservierung mit einem kohlehydratreichen Material. Es wurde nachgewiesen, dass spezielle sekundäre Inhaltsstoffe im Steinkleesubstrat Fehlgärungen bei ungünstigen Silierbedingungen verhindern, ohne die Milchsäuregärung zu beeinträchtigen (Bull, 2013).

4 Teilnehmende Betriebe

Im Jahr 2017 nahmen sechs Betriebe am Projekt aus verschiedenen Regionen Deutschlands teil. Drei Betriebe kamen im Jahr 2018 zum Projekt hinzu. Außerdem konnte die Landesforschungsanstalt für Landwirtschaft und Fischerei MV eine Fläche für den Anbau von Steinklee zur Verfügung stellen. Von den sechs Betrieben, welche im Jahr 2017 ins Projekt eintraten, schieden zum Anfang des Jahres 2019 drei Betriebe vertragsgerecht aus. Im Jahr 2019 trat ein weiterer Betrieb zum Projekt hinzu. Dieser wurde durch einen Bodenkundler betreut.

5 Ergebnisse

Die reichliche Wasserversorgung im Ansaatjahr (ASJ) 2017 ließ eine gute Etablierung des Steinklees zu. Auch im sehr trockenen ASJ 2018 profitierte die Aussaat noch vom Wasser des Vorjahres. Steinkleebestände, für die das Jahr 2018 das Hauptnutzungsjahr (HNJ) war, konnten in der ersten Jahreshälfte gute Biomasseerträge erzielen, in der zweiten Jahreshälfte hingegen wuchs die Biomasse nach dem ersten Schnitt nur spärlich oder gar nicht nach und war sehr trocken.

5.1 Biomasseerträge

Die Tab. 7 stellt die Mittelwerte der erzielten Biomasseerträge der unterschiedlichen Schnittregime des Steinklee-Demonstrationsprojektes dar.

*Tab. 7: Biomasseerträge von Steinklee (verschiedene Schnittregime) zu unterschiedlichen Terminen an Demonstrationsstandorten im Zuge des Projektes **

Schnittrégime	Umfang	Ertrag		
		dt/ha FM	TS in %	dt/ha TM
ASJ einschnittig	1	136	32	44
ASJ 1. Schnitt	1	94	29	27
ASJ 2. Schnitt	1	91	34	31
HNJ einschnittig	4	151	34	50
HNJ 1. Schnitt	2	233	22	50
HNJ 2. Schnitt	1	57	43	24

Standortbonität: Ackerzahlen: 11 bis 50, Bodenarten: Sand, lehmiger Sand, Sandiger Lehm

5.2 Methanerträge

Die Daten bzgl. Biogas/ Methan, die durch die Pflanzenbeprobungen an den verschiedenen Standorten gewonnen werden konnten, wurden gemittelt und mit Werten für Mais verglichen. Die Daten für Mais entstammen den Ergebnissen der Landessortenversuche „Mais 2017“, „Mais 2018“ und „Mais 2019“ sowie Daten des LAIV. Die Methanausbeuten der verschiedenen Schnittregime des Steinklees lagen zwischen 26 und 30 m³/dt TM, beim Silomais lag sie bei 39 m³/dt TM.

Aus den Daten des Demonstrationsprojektes bezüglich der Steinklee-Probenahmen zu den verschiedenen Schnittregimen ergaben sich die in Abb. 2 dargestellten Methanerträge. Hierbei wurden die Methanausbeuten des Ansaatjahres und des Hauptnutzungsjahres gemittelt. Der Datenumfang, der als Basis der Berechnungen dient, ist sehr gering.

Im vorangegangenen Projekt wurde festgestellt, dass der erzielbare Methanertrag von Steinklee im Ansaatjahr zwischen 1200 und 2850 m³/ha CH₄ und bei 3000 m³/ha CH₄ im zweiten Vegetationsjahr liegt. Die große Spannweite wird im ersten Jahr durch die hohen Ertragsschwankungen verursacht. Im zweiten Jahr sind die Erträge stabiler (Bull, 2013).

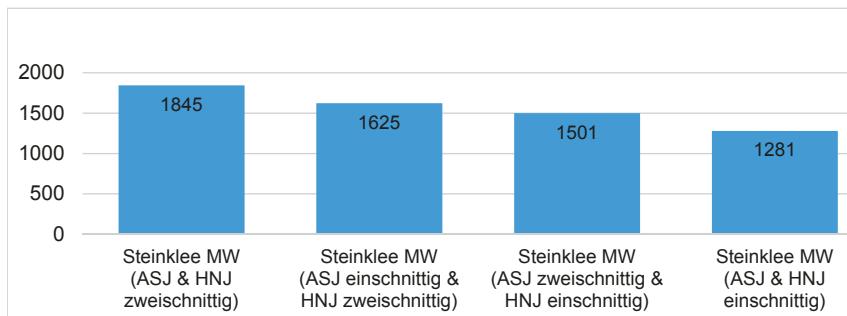


Abb. 2: Durchschnittliche Methanerträge (pro Anbaujahr) von Steinklee bei verschiedenen Schnittregimen

Die Tab. 5 (unten) zeigt die Werte, die im Projekt „Anbau von Steinklee – Wiedereinführung in die Praxis und Verbesserung der Anbau- und Saatgutsituation“ ermittelt wurden. Es handelte sich hierbei um Standorte mit den Bodenarten Sand, lehmiger Sand oder sandiger Lehm und um eine sehr geringe Datenbasis.

Anders als im vorangestellten Projekt wurde kein Exaktversuch angelegt, sondern Demonstrationsflächen in landwirtschaftlichen Betrieben zum Steinkleeanbau genutzt. Die Pflanzenbeprobungen fanden daher auch nicht zu vorher bestimmten Terminen statt, sondern orientierten sich an dem vor Ort gegebenen Entwicklungsstand des Steinklees.

Der Trockenmasseertrag des Demonstrationsprojektes zeigt geringere Werte im Vergleich mit den Werten aus dem Vorprojekt (Tab. 5). Die Methanerträge des Hauptnutzungsjahres fielen im Vergleich zu denen, die im vorangegangenen Projekt ermittelt wurden geringer aus. Ein großer Einfluss findet sich vermutlich vorrangig in den trockenen Jahren des Projektzeitraumes sowie in den im Vergleich abweichenden Ernteterminen zum Vorprojekt.

5.3 THG-Emissionen und Energieeffizienz

Für die Ermittlung der THG-Emissionen und der Energieeffizienz wurde das Programm MiLA (Model for integrated Life Cycle Assessment in Agriculture) verwendet, das vom Leibniz-Zentrum für Agrarlandschaftsforschung (ZALF) e.V. im Rahmen des EVA-Projektes entwickelt wurde.

Die THG-Emissionen und Energiebilanzen von Silomais und Steinklee sind Tab. 8 zu entnehmen.

Der EROI-Wert (Effizienz-Kennziffer) des einschnittig genutzten Steinklees unterscheidet sich im Ansaatjahr vom zweischnittig genutzten Steinklee um ca. 31 %, während ein Unterschied im Hauptnutzungsjahr kaum festgestellt werden konnte.

Der Unterschied zum Silomais fiel im Ansaatjahr extremer als im Hauptnutzungsjahr aus. Hier ist die Energieeffizienz des Steinklees im Vergleich zum Silomais deutlich geringer. Im Hauptnutzungsjahr beträgt der Unterschied zwischen Steinklee und Silomais im Schnitt ca. 30 %.

Tab. 8: THG und Energiebilanz von Steinklee (verschiedene Schnittregime)

Anbausystem		THG-Emission [kg CO ₂ Äq./ha]	Energieertrag [MJ CH ₄ /ha]	Energie- aufwand [MJ/ha]	Nettoener- gieertrag [MJ/ha]	Energie- effizienz (EROI)
einschnittig, mit Herbizid	ASJ	1.817	21.470	8.257	13.212	2,6
	HNJ	427	35.029	3.892	31.138	9,0
einschnittig, ohne Herbizid	ASJ	1.802	21.470	7.914	13.555	2,7
	HNJ	427	35.029	3.892	31.138	9,0
zweischnittig, mit Herbizid	ASJ	2.093	42.350	11.131	31.219	3,8
	HNJ	741	61.477	6.765	54.711	9,1
zweischnittig, ohne Herbizid	ASJ	2.078	42.350	10.788	31.562	3,9
	HNJ	741	61.477	6.765	54.711	9,1
Silomais		3.512	141.342	10.996	130.346	12,9

ASJ = Ansaatjahr, HNJ = Hauptnutzungsjahr,
EROI = Energy Returned on Energy Invested (Effizienz-Kennziffer)

5.4 Stickstofffixierung

Um den Vorfruchtwert des Steinklees zu verdeutlichen wurden in Tab. 9 N-Fixierungspotentiale von Steinkleepflanzen und Steinkleewurzeln abgebildet, die im Vorprojekt ermittelt werden konnten.

Auch im Demonstrationsprojekt hat sich bestätigt, dass der Nmin-Gehalt im Boden nach dem Absterben des Steinklees bzw. nach dem letzten Mulchen einen deutlichen Anstieg erfuhr. Dieser Effekt ist voraussichtlich auf die Mineralisierungsprozesse auf den Flächen zurückzuführen.

Tab. 9: N-Fixierungspotential von Steinklee

kg N/ha	ASJ Herbst	HNJ (FJ nach Überwinterung)	HNJ Sommer
Pflanzen gesamt	100-300	45-310	90-180
davon in den Wurzeln	75-110	20-100	15-55

Quelle: I. Bull (2013), verändert durch J. Schneider

6 Fazit

In dem Demonstrationsprojekt hat der Steinklee bewiesen, dass er als ökologisch wertvolle Fruchtart das Artenspektrum bereichern und vielfältig genutzt werden kann.

Für die Biogasgewinnung empfiehlt sich vor allem der zweijährige Steinklee, da sich mit ihm gute Biomasseerträge erzielen lassen. Die Flächen sind somit für zwei Anbaujahre mit dem Steinklee gebunden. Trotz der hohen Energieeffizienz des Silomaises ist der Steinklee eine alternative Möglichkeit für die Energiegewinnung in der Biogasanlage, vorzugsweise für den Anbau auf Flächen, die aufgrund ihrer geringen Ertragsleistung aus der Produktion genommen wurden. Hier bietet der Steinklee die Chance bodenverbessernde Eigenschaften mit Biomassegewinnung und Biodiversitätssteigerung zu verbinden.

Es ist jedoch zu vermeiden bisher nicht landwirtschaftlich genutzte Flächen für den Zweck des Steinkleeanbaus oder vergleichbarer Zwecke urbar zu machen, denn diese Flächen sind mitunter die letzten Rückzugsorte für Bestäuber (Wildbienen).

Die im vorangegangenen Projekt aufgezeigten Möglichkeiten zum Anbau und der Nutzung von Steinklee konnten im Demonstrationsanbau bestätigt werden. Vor allem war auffällig, wie wichtig die Einhaltung des Aussaatzeitpunktes für die erfolgreiche Etablierung des Steinklees auf den Flächen ist.

Wassermangel ließ den Steinklee (vor allem in der Jugendphase) leiden, dennoch erwies er sich als trockenheitstolerant.

Während der Steinkleeblüte im Hauptnutzungsjahr war auf den Flächen die hohe Frequentierung durch Bienen (Wild- und Honigbienen) sehr auffällig. Beprobungen mussten wegen des hohen Bestäuberaufkommens teilweise in die früheren Morgenstunden verlegt werden. Erntearbeiten, die während der Blüte stattfinden, sollten sich an den Flugzeiten der Bienen orientieren. Hierbei sind Imker zu informieren um die Honigbienen zu schützen und nach Möglichkeit auch Wildbienenexperten einzubeziehen.

Der Steinklee eignet sich für Bienen hervorragend als Pollen- und Nektarquelle, auch über die spätsommerliche Trachtlücke hinweg. Dies ist neben den Gründüngungseffekten, möglichen Einsparungen an mineralischem Stickstoff in der

Nachfrucht und der Nutzung für die Biogasanlage ein weiterer Grund, warum Steinklee auf die landwirtschaftlichen Flächen gehört.

Um den vom Steinklee hinterlassenen Stickstoff für die Nachfrucht zu nutzen, empfiehlt es sich, falls keine zeitige Nachfrucht wie Roggen vorgesehen ist, eine Zwischenfrucht auszusäen. So kann schon im Spätherbst der zur Verfügung stehende Stickstoff konserviert und für die Nachfrucht nutzbar gemacht werden. Ansonsten besteht die unmittelbare Gefahr, dass der wertvolle pflanzenverfügbare Stickstoff ausgewaschen wird und ins Grundwasser gelangt.

Literatur/Quellen

- Baskin, C. C. & Baskin, J. M. (1988): Seeds. Ecology, Biogeography, and Evolution of Dormancy and Germination. Academic Press, San Diego.
- Blecken, B. (1948): Der Bokharaklee. Eine wichtige Kultivierungs-, Gründüngungs- und Futter-Pflanze. Metta Kinau Verlag Nachf., Lüneburg.
- Bull, Ines (2013): Untersuchungen zum Anbau und zur Verwertung von Steinklee, Dissertation, Universität Rostock.
- Landesforschungsanstalt für Landwirtschaft und Fischerei MV, LFA (2008): Richtwerte und Deckungsbeiträge zur Pflanzenproduktion, <https://www.landwirtschaft-mv.de/Fachinformationen/Agrarökonomie/Planungsrichtwerte/?id=21&processor=processor.sa.lfaforenbeitrag>, Zugriff am 10.03.2020.
- Michel, V.; Bombowsky, B.; Zenk, A. (2017): Mais 2017. Ergebnisse Landessortenversuche Anbaugebiet „D-Nord/ MV-Süd“, LFA, Daten über frühe und mittelfrühe Sorten für die Standorte Vipperow und Gützkow.
- Michel, V.; Bombowsky, B.; Zenk, A. (2018): Mais 2018. Ergebnisse Landessortenversuche Anbaugebiet „D-Nord/ MV-Süd“, LFA, Daten über frühe und mittelfrühe Sorten für die Standorte Vipperow und Gützkow.
- Michel, V.; Bombowsky, B.; Zenk, A. (2019): Mais 2019. Ergebnisse Landessortenversuche Anbaugebiet „D-Nord/ MV-Süd“, LFA, Daten über frühe und mittelfrühe Sorten für die Standorte Vipperow und Gützkow.
- Organic Agriculture Centre of Canada (2008): Management of sweetclover for nitrogen supply, soil conservation and weed control. Interim Research Report W2008-43. University of Saskatchewan <http://www.organicagcentre.ca/TechnicalBulletin43web_clover.pdf> Zugriff am 18.08.2009.
- Ostermaier, M. (2017): Landwirtschaftliche Fläche als Lebensraum für Wildbienen, <https://orgprints.org/31762/1/Landwirtschaftliche%20Fl%C3%A4che%20als%20Lebensraum%20%C3%BCber%20Wildbienen.pdf>.
- Pätzold, H. (1961): Die Anbauwürdigkeit des Weißen Steinklees (*Melilotus albus* Med.) auf leichten Böden. In: DEUTSCHE AKADEMIE DER LANDWIRTSCHAFTSWISSENSCHAFTEN (Hrsg.): Beiträge zur Bewirtschaftung und Förderung leichter Böden. Akademie-Verlag, Berlin.
- Pritsch, G. (1958): Der Bokharaklee (*Melilotus albus*) als Futterpflanze der Bienenweide. Die deutsche Landwirtschaft 9 (6), 282-285.
- Scheluto, B.; Nikonorowitsch, I (2007): Die Zucht des weißen Steinklee (*Melilotus albus* L.) in Belarus. Unveröffentlichter Forschungsbericht.

- Scheluto, B.; Nikonorwitsch, I.; Makowski, N. & Dietze, M. (2007): Pionierpflanze für Sandböden. Steinklee steigert die Ertragsfähigkeit sandiger Böden. Neue Landwirtschaft (9), 50-51.
- Schmid-Egger, C. & Witt, R. (2014): Ackerblühstreifen für Wildbienen – Was bringen sie wirklich? AMPULEX 6|2014, https://www.zobodat.at/pdf/Ampulex_6_0013-0022.pdf.
- Simon, W. (1960): Luzerne, Klee und Kleegras. (Von der Saat bis zur Fütterung). VEB Deutscher Landwirtschaftsverlag, Berlin, 2. neubearbeitete Auflage.
- Skirde, W. (1957): Hinweise zur Samenernte von Rotklee, Weißklee und Steinklee. Mischurin Bewegung. Zeitschrift der landwirtschaftlichen Praxis 6, 743-749.
- Schlapunov, W.N. (2008): Donnick White ist ein Konkurrent von Luzerne und Klee. Belarusian Rural Farm - monatliche wissenschaftliche und praktische Zeitschrift 4, (Original: ШЛАПУНОВ, В. Н. (2008): Донник белый – конкурент люцерне и клеверу. Белорусское Сельчакое Хозяйство – ежемесячный научно-практический журнал 4 (72) <<http://agriculture.by/?p=445>> Zugriff am 16.12.2012).
- Smith, W. K. & Gorz, H. J. (1965): Sweetclover improvement. In: NORMAN, A. F. (Hrsg.): Advances in Agronomy, 163-231. Academic Press, New York.
- Specht, G. (1939): Beiträge zum Anbau und zur Züchtungsgrundlage von Steinklee (Melilotus). Dissertation, Universität Jena.
- Specht, G.; Görlitz, H. & Schmidt, K. (1960): Untersuchungen über den Anbau von weißem Steinklee. Albrecht-Thaer-Archiv 4 (7), 541-555.
- Suvorov, W.W. (1950): Donnick - Melilotus (Tourn.) Adans. Em. In: SINSINA, E.N. (Hrsg.): Mehrjährige Hülsenfrüchte 13 (1), 345-502, Moskau (Original: СУВОРОВ, В. В. (1950): Донник - Melilotus (Tourn.) Adans. Em. In: СИНСКАЯ, Е. Н. (Hrsg.): Многолетние бобовые травы 13 (1), 345-502, Москва.)

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Kontakt

Dr. agr. Andreas Gurgel, Leiter des Sachgebietes Nachwachsende Rohstoffe im Institut für Pflanzenproduktion und Betriebswirtschaft

Landesforschungsanstalt für Landwirtschaft und Fischerei
Mecklenburg-Vorpommern

⌚ +49 (0)3843.789.240 | 📩 a.gurgel@lfa.mvnet.de | 🌐 www.lfamv.de

Franziska Schäfer, Leandro Janke, Falko Niebling,
Alfons Himmelstoss, Jürgen Pröter

NovoHTK – Ein neuartiges Verfahren zur Monovergärung von Hühnertrockenkot

Zusammenfassung: Die Entwicklung eines neuartigen, zweistufigen Verfahrens zur Monovergärung von Hühnertrockenkot (HTK) soll es ermöglichen, die bisher in Deutschland noch unvollständig genutzten Potenziale von HTK und anderen stickstoffreichen Substraten in Biogasanlagen zu verwerten. Die erste Prozessstufe ist eine Feststoffvergärung in diskontinuierlich betriebenen Perkolations-Reaktoren. In der zweiten Prozessstufe wird das gewonnene Perkolat in einem Hochleistungs-Reaktor zu Methan umgesetzt. Die Vermeidung toxischer Ammoniak-Konzentrationen (die bei dem stickstoffreichen HTK zu erwarten sind) erfolgt durch Verschiebung des Ammoniak-Ammonium-Gleichgewichtes in Richtung des weniger toxischen Ammoniums durch pH-Reduktion. Die zentrale Komponente zur pH-Regulation ist die Erhöhung des CO₂-Partialdrucks in der zweiten Prozessstufe. Obwohl es Studien zur HTK-Vergärung in Perkolations-Reaktoren im Labormaßstab gibt, wurde die Minderung der Ammoniak-Hemmung auf Basis des CO₂-Partialdrucks bislang noch nicht betrachtet. Ist dieses Verfahren erfolgreich, hat es das Potenzial, nicht nur eines der Hauptprobleme bei der Vergärung stickstoffreicher Substrate zu lösen, sondern auch die prozessbedingte CO₂-Emissionen zu reduzieren, da biogenes CO₂ in situ zur Prozessregulierung nach dem CCU (Carbon Capture and Utilization)-Prinzip eingesetzt werden kann.

Dieses Konzept wird zusammen mit Industriepartnern entwickelt und vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) im Rahmen des Programms Energetische Biomassenutzung gefördert.

Abstract: The development of a novel two-step process for mono-digestion of chicken manure (CM) intends to demonstrate how CM and other nitrogen-rich wastes could be fully exploited as substrates in biogas plants. The first stage consists of dry anaerobic digestion (AD) by using parallel leach-bed reactors operated discontinuously. In the second stage the obtained leachate is converted to methane in a high-rate system. Free ammonia nitrogen (FAN) will be controlled by increasing CO₂ partial pressure in the second stage, thus marginally reducing the pH-value of the process. Thereby, allowing FAN shift towards less inhibitory form of ammonium. Even though the dry AD of CM has been previously investigated in lab-scale, the reduction of ammonia inhibition based on control of CO₂ partial pressure has never been reported. If successfully demonstrated, this process has the potential to not only solve the problem of AD of nitrogen-rich substrates, but also contribute to reduce CO₂ emissions according to the principle of in-situ CCU (Carbon capture and utilization). This concept is being developed together with industrial partners and is funded by the German Ministry for Economic Affairs and Energy (BMWi) under the program Energetische Biomassenutzung.

1 Einleitung

Aufgrund der stetig wachsenden Geflügelproduktion werden weltweit große Mengen an Hühnerdreck (HTK) produziert. Allein in Deutschland fallen jährlich rund 30 Mio t HTK und andere stickstoffreiche tierische Abfälle an (Brosowski et al., 2015). Die direkte Verwendung von HTK als Düngemittel in der Landwirtschaft oder die unsachgemäße Lagerung führt zu Umweltproblemen wie Grundwasserverschmutzung und der Freisetzung erheblicher Mengen von Methan und Lachgas in die Atmosphäre. Der Einsatz von HTK als Biogassubstrat reduziert nicht nur Abfallmenge und Umweltbelastung, sondern macht ihn gleichzeitig als Energiequelle nutzbar. Bislang kommt HTK in gewerblichen Biogasanlagen dabei nur als Cosubstrat zum Einsatz. Durch die steigenden Mengen an anfallendem HTK wird die Monovergärung jedoch zunehmend erforderlich. Die Substrateigenschaften, hoher Trockensubstanzgehalt/ Sandanteil und hoher Stickstoffgehalt, stellen dabei eine Herausforderung für Verfahrenstechnik und Prozessbiologie dar, für die adäquate Lösungen zum Einsatz im großtechnischen Maßstab immer noch fehlen. Die energetische Nutzung schwieriger Einsatzstoffe ist ein wichtiger Schritt, um Stoffkreisläufe zu schließen und ein Teil einer energieeffizienten Abfallwirtschaft.

Die Vergärung stickstoffreicher Substrate ist erfahrungsgemäß mit Schwierigkeiten verbunden, die mit der Umsetzung von organisch gebundenem Stickstoff (Protein, Harnstoff, Harnsäure) zu Ammonium-Ionen und Ammoniak einhergehen. Hohe Ammoniak- und Ammonium-Konzentrationen führen zu direkter Schädigung der am Biogasprozess beteiligten Mikroorganismen (insbesondere der Methanogenen mit vergleichsweise geringer Ammoniak-Toleranz) (Kayhani et al., 1999). Eine indirekte Hemmung entsteht durch Verringerung der Löslichkeit von Metallsalzen und damit der Bioverfügbarkeit von für den Biogasprozess essentiellen Spurenelementen, hervorgerufen durch die Erhöhung des pH-Wertes bei hohen Ammoniak-Konzentrationen (Ortner et al., 2015; Molaey et al., 2018). Beides bewirkt eine Hemmung der Methanbildung und verursacht dadurch die Akkumulation organischer Säuren. Sinkt der pH-Wert auf Grund der Säureakkumulation unter 6,5 (untere Grenze für Methanbildung), kann dies bis hin zum vollständigen Erliegen des Prozesses führen.

Zur Reduzierung der Ammoniak-Hemmung bei der Monovergärung stickstoffreicher Substrate finden bereits verschiedene Methoden Anwendung. Es gibt Verfahren zur Entstickung und Rezirkulation des Gärrestes (Ammoniak-Entfernung mittels Ultrafiltration und Umkehrosmose bzw. Stripping (Rückert NatUrgas®- (Rückert, 2004) und ANAstrip®-Verfahren (Bauermeister et al., 2009)). Bei der Membranextraktion von Ammoniak mittels Ultrafiltration und Umkehrosmose wird Ammoniak in Form von Ammoniumsulfat gebunden (Darestani et al., 2017). Die Ammoniak-Entfernung mittels Stripping erfolgt durch Einblasen von Luft verbunden mit einer Temperatur-Erhöhung. Als Absorber für Ammoniak wird üblicherweise Schwefelsäure verwendet (Huang et al., 2006). Zusätzlicher Chemikalieneinsatz und Energieaufwand schränken allerdings die Wirtschaftlichkeit ein. Untersuchungen im Labormaßstab zeigten, dass durch Adaptation der Mik-

roorganismen oder Bioaugmentation (Einbringen von Methanogenen mit hoher Ammoniak-Toleranz) die Ammoniak-Hemmung herabgesetzt und Vergärung bei relativ hohen Ammoniak-Gehalten ermöglicht werden kann (Li et al., 2017; Tian et al., 2018). Allerdings sind beide Verfahren zeit- und kostenintensiv und bislang noch nicht im technischen Maßstab in Anwendung (Fuchs et al., 2018).

Keines der Verfahren bietet derzeit aus technischer und/ oder ökonomischer Sicht eine umfassende Lösung, um die direkte nachteilige Wirkung von Ammoniak auf die Biogasproduktion in der Praxis zu kontrollieren. Das NovoHTK Verfahren soll die Monovergärung von HTK ohne zusätzlichen Chemikalieneinsatz und mit möglichst geringem technischen Aufwand ermöglichen. Neben der Verfahrensentwicklung im Labormaßstab ist auch eine Umsetzung des Konzeptes in einer Pilotanlage durch die Firma Großmann Ingenieur Consult GmbH (GICON) geplant.

2 NovoHTK – das Verfahren im Überblick

Zur Monovergärung von HTK wird ein zweistufiges Verfahrensprinzip gewählt. In der ersten Stufe kommt dabei ein Perkolationssystem zur Feststoffvergärung zum Einsatz, das die Sandabscheidung in einem zwischengelagerten Sedimentationsbehälter ermöglicht. Die hierbei gewonnene Flüssigkeit mit hohem Organik-Anteil (Perkolat) wird in der zweiten Prozessstufe in einem Hochleistungsreaktor (UASB (Upflow Anaerobic Sludge Blanket)-Reaktor, alternativ Festbett oder SBR (Sequencing Batch Reactor)) zu Methan umgesetzt (Abb. 1).

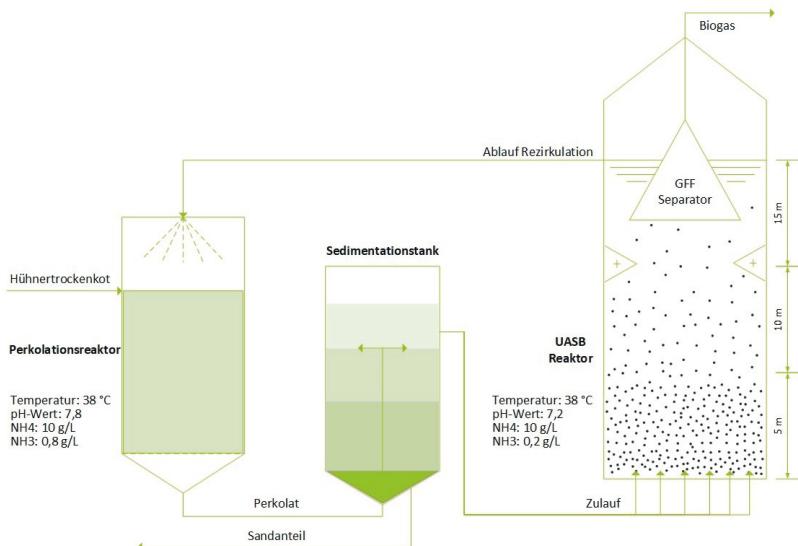


Abb. 1: Schematische Darstellung des NovoHTK Verfahrens
(Leandro Janke, DBFZ; GFF,gasförmig-flüssig-fest)

Da besonders methanbildende Mikroorganismen empfindlich auf hohe Ammoniak-Konzentrationen reagieren, sollen in der zweiten Prozessstufe toxische Ammoniak-Konzentrationen durch Verschiebung des Ammonium-Ammoniak-Gleichgewichts in Richtung der weniger toxischen Ammonium-Ionen vermieden werden. In der zweiten Prozessstufe sollen toxische Ammoniak-Konzentrationen durch Verschiebung des Ammonium-Ammoniak-Gleichgewichts in Richtung der weniger toxischen Ammonium-Ionen vermieden werden. In aquatischen Systemen befinden sich Ammoniak und Ammonium-Ionen in einem Dissoziationsgleichgewicht. Die Einflüsse auf dieses Gleichgewicht sind insbesondere in Biogasreaktoren vielseitig, wobei die bestimmenden Parameter Temperatur und pH-Wert des Prozesswassers sind (vgl. Gleichung 1 und 2). Mit dieser Berechnungsgrundlage kann ein System zur Vergärung stickstoffreicher Substrate entwickelt werden, bei dem die Ammoniak-Hemmung durch pH-Wert-Verschiebung (alternativ oder zusätzlich auch Temperaturanpassung) reduziert wird.

$$[NH_3] = \frac{0,9441 \cdot NH_4-N}{1+10^{(pK_s-pH)}} \quad (1)$$

$$pK_s = 0,0925 + \frac{2728,795}{T+273,15} \quad (2)$$

*NH₃ Ammoniak
NH₄-N Ammoniumstickstoff-Gehalt (Summe Ammonium und Ammoniak)
pK_s negativer dekadischer Logarithmus der Säurekonstante*

Für das zu entwickelnde Verfahrensprinzip wird als zentrale Komponente zur pH-Regulation Kohlendioxid genutzt, welches vor Ort verfügbar ist (Biogas, Biogasaufbereitung). Dies ermöglicht es aus einem für die Prozesshemmung relevanten Bereich der Ammoniak-Konzentration herauszukommen (untere Hemmgrenze: 0,2-0,4 g L⁻¹, Westerholm et al., 2016; obere Hemmgrenze: 0,6-0,9 g L⁻¹, Schäfer et al., 2017).

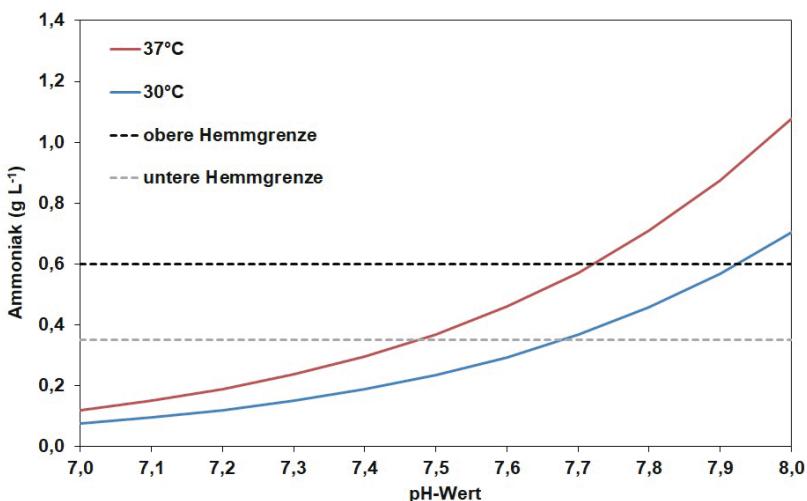


Abb. 2: Ammoniak-Konzentration im Gärrest aus der Monovergärung von HTK mit einer Ammoniumstickstoff-Konzentration von 10 g L⁻¹ in Abhängigkeit von pH-Wert und Temperatur

Die Reduzierung der Prozesstemperatur verstärkt den Effekt, indem das Gleichgewicht weiter zu Ammonium hin verschoben und die Ammoniak-Konzentration verringert wird (Abb. 2): Die Erhöhung des CO₂-Partialdrucks kann zum Beispiel über die Bauweise des Hochleistungsreaktors (Überdruck durch hohe Flüssigkeitssäule) erfolgen. Das Einleiten von CO₂-reichem Hydrolyse-Gas aus der ersten Prozessstufe bzw. einer Biogasaufbereitung kann optional zur Verstärkung des Effektes genutzt werden.

Neben dieser Beeinträchtigung auf prozessbiologischer Seite ist der hohe Anteil anorganischer Trockensubstanz (200-582 g pro kg Rohasche, Weißbach et al., 2012) ein weiterer Faktor, der bei der Verfahrensentwicklung berücksichtigt werden muss. Der hohe Anteil anorganischer Bestandteile (Sand) im HTK führt insbesondere bei Nassfermentern zu Ablagerungen am Fermenterboden, deren Entfernung mit hohem Zeit- und Kostenaufwand verbunden ist. Um dem entgegenzuwirken ist im vorgestellten Verfahrenskonzept eine Sandabscheidung zwischen den beiden Verfahrensstufen vorgesehen.

Zur Verfahrensentwicklung der zweistufigen HTK-Monovergärung werden zunächst in vorbereitenden Untersuchungen unterschiedliche HTK Qualitäten analysiert und bewertet. Ziel ist die Konditionierung/Modifikation für den Einsatz des Substrates im Perkolationssystem. Im nächsten Schritt erfolgt die Umsetzung im Labormaßstab zur Optimierung der Betriebsparameter, hierbei wird auch der Einfluss auf die mikrobielle Zusammensetzung untersucht, um die Ammoniak-Hemmung besser zu verstehen und damit neue Zielgrößen für die Prozessoptimierung zu definieren.

Schließlich findet ein Upscaling in den Pilotmaßstab und die Konzeptentwicklung für den Demonstrationsmaßstab statt. Dabei werden ökonomische und ökologische Aspekte berücksichtigt.

3 Laborversuche

Je nach Produktionsrichtung (Legehennen, Masthähnchen, Junghennenaufzucht) und Haltungsverfahren (Bodenhaltung, Käfighaltung, Freilandhaltung) unterscheiden sich Zusammensetzung und Struktur des HTK. Letzteres beeinflusst maßgeblich die Eignung des HTK für den Einsatz im Perkolationssystem. Anhand von zehn repräsentativen HTK Proben verschiedener Qualitäten wurden Untersuchungen zu Beschaffenheit und Modifikation des Ausgangsubstrats in Abhängigkeit der Typen der Geflügelhaltung vorgenommen. Ziel war es, die Eignung für den Einsatz im Perkolationssystem, der ersten Verfahrensstufe, zu prüfen.

Die Feststoffvergärung von HTK im Perkolationssystem wurde im Labormaßstab durchgeführt, um technische Gegebenheiten (Reaktorbauteile: Auflagesieb, Schlüche, Schlauchpumpen) und Analysemethoden zu testen und an das zu untersuchende Substrat anzupassen. Der Versuchsaufbau diente der Ermittlung der optimalen Betriebsparameter (u.a. Perkolations-Rate und Zyklusdauer), der Charakterisierung und Optimierung des Perkolats zum Einsatz in der Methanstufe (zweite Verfahrensstufe) sowie die Erfassung prozessbiologischer Grenzen bezüglich Ammoniak, Temperatur und pH-Wert im Labormaßstab.

3.1 Methoden

Zur Charakterisierung der Zusammensetzung von HTK Proben unterschiedlicher Geflügelhaltungsformen wurden Trockensubstanz (TS)- und organischer Trockensubstanz (oTS)-Gehalt, Säurespektrum, Ammoniumstickstoff-Gehalt und Gesamtstickstoff (TKN)-Gehalt ermittelt (Schumacher et al., 2019). Die Bestimmung des Säurespektrums in Feststoffen erfolgte im Eluat (Mühlenberg et al., 2015). Eine Futtermittelanalyse erfolgte nach Weender und van Soest (VDLUFA, 2007).

Zur Bewertung der Perkolierbarkeit der HTK-Proben wurde der kf-Wert (Durchlässigkeitsteilwert) in Anlehnung an DIN 18130 (1998) mittels Oedometer bestimmt. Die Nutzung des kf-Wertes als physikalischer Parameter zur Bewertung der Perkolationsfähigkeit erfolgte gemäß Wedwitschka et al. (2016). Die Wasserdurchlässigkeit der Proben wurde jeweils bei vorhandener Schüttdichte und unter Auflast (2, 3, und 4 bar) gemessen. Dadurch wurden differenzierte Einbauhöhen der Substrate im Reaktor simuliert, was zur Ermittlung der maximalen Haufwerkshöhe zur Feststoffvergärung im technischen Maßstab genutzt werden konnte.

Der Versuchsaufbau zur HTK Monovergärung orientierte sich am zweistufigen GICON-Verfahren zur Vergärung von Feststoffen (Abb. 3).

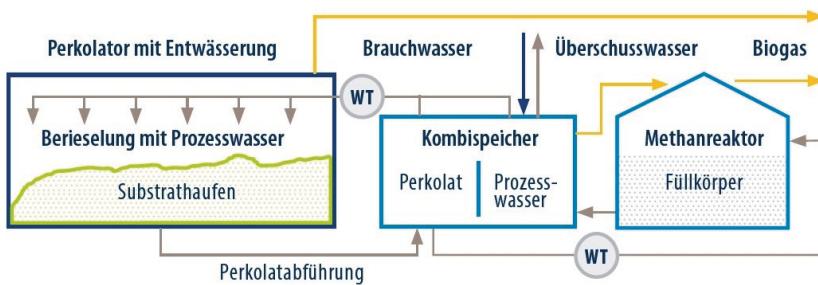


Abb. 3: Schematischer Ablauf des GICON®-Biogasverfahrens (GICON)

Als Substrat für die Feststoffvergärung im Perkolationssystem kam HTK (77 % TS, 71 % oTS), als Strukturmateriale kamen Holzhackschnitzel bzw. Weizenstroh zum Einsatz. Die Batch-Ansätze erfolgten mit jeweils 2 kg Feststoff (HTK + Anteil Strukturmateriale) und 7,6 L Inokulum (Gärrest eines mit HTK betriebenen Laborrektors und Hydrolysat aus der Maissilage-Vergärung) bei mesophilen Reaktionsbedingungen zwischen 35–39 °C. In Anlehnung an das GICON®-Biogasverfahren wurde mit einer Perkolationsrate von 660 mL h⁻¹ gearbeitet.

Zur Prozesskontrolle wurden zweimal wöchentlich pH-Wert, Gesamtmenge flüchtiger organischer Säuren (FOS) und Ammoniumstickstoff-Gehalt analysiert und die Analyse von TS und oTS erfolgten wie in Schumacher et al. (2019) beschrieben. Das Biogasvolumen wurde mittels Trommelgaszähler (Ritter TG 05, Dr.-Ing. Ritter Apparatebau GmbH & Co KG, Bochum) erfasst. Eine Übersicht der durchgeföhrten Batch-Ansätze ist Tab. 1 zu entnehmen.

Tab. 1: Übersicht der Batch-Ansätze zur Feststoffvergärung von HTK im Perkolationsreaktor ($\text{NH}_4\text{-N}$, Ammoniumstickstoff-Gehalt)

Batch	Strukturmateriale	Anteil % (m/m)	$\text{NH}_4\text{-N}$ (g L ⁻¹)*
I A	Holzhackschnitzel	5	0,85
II A	Holzhackschnitzel	10	1,6
II B	-	-	1,6
III A	Stroh	5	3,6
III B	Stroh	10	3,6
IV A	-	-	3,8
IV B	Holzhackschnitzel	10	3,8

* gemessen im Inokulum zu Versuchsbeginn

3.2 Ergebnisse und Diskussion

Die Zusammensetzung und Struktur des HTK wird durch Haltungsverfahren, Verwendung und Art der Einstreu und die Lagerung des Kots beeinflusst (Tab. 1). Der TS-Gehalt der untersuchten Proben stieg mit zunehmender Lagerungsdauer an (41 bis 77 %). Die Proben aus der Hühnermast wiesen die höchsten oTS-Anteile (> 80 % TS) und deutlich geringere Rohasche-Anteile (131-166 g kg TS⁻¹) auf als in den übrigen Proben nachgewiesen wurde (302-433 g kg TS⁻¹). Der Anteil an Rohprotein hatte eine Spannbreite von 193 bis 371 g kg TS⁻¹, der TKN-Gehalt von 33 bis 68 g kg TS⁻¹. Bei der Untersuchung der Säurezusammensetzung fiel wiederum auf, dass die HTK Proben aus der Hühnermast (Proben 5-7) von den übrigen Proben abwichen. Hier wurden deutlich höhere Milchsäurekonzentrationen gemessen (Abb.4).

*Tab. 2: Substratcharakterisierung verschiedener HTK Qualitäten
(unterschieden nach Produktionsrichtung und Haltungsform)*

Probe	Produktionsrichtung	Haltungsverfahren	TS %	oTS (% TS)	Rohasche (g kg TS ⁻¹)	Rohprotein (g kg TS ⁻¹)	TKN (g kg TS ⁻¹)
1	Legehennen	Bodenhaltung	51	70	302	371	68
2	Legehennen	Bodenhaltung	42	68	320	243	44
3	Legehennen	Freilandhaltung	56	83	170	329	56
4	Legehennen	Freilandhaltung	77	71	285	236	39
5	Hühnermast	Bodenhaltung	55	87	131	318	53
6	Hühnermast	Bodenhaltung	50	86	136	325	52
7	Hühnermast	Bodenhaltung	54	83	166	261	44
8	Elterntier	Bodenhaltung	53	57	433	306	54
9	Aufzucht	Bodenhaltung	77	60	397	199	33
10	Ökobetrieb	Bodenhaltung mit Auslauf	41	69	309	193	39

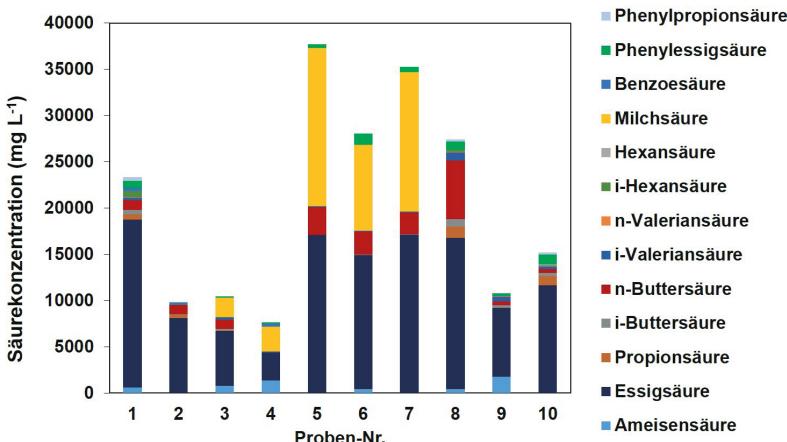


Abb. 4: Säurekonzentrationen der untersuchten HTK Proben
(gemessen im Eluat, Proben-Nr. entsprechend der Angabe in Tab. 2)

Die zum Teil großen Unterschiede in der Zusammensetzung in Bezug auf die Stickstofffracht, haben erheblichen Einfluss auf die Prozessführung und sind somit regelmäßig zu prüfen. Die durch TS-Gehalt und Einstreu bedingte unterschiedliche Struktur der Proben ließ einen Einfluss auf die für das Projekt relevante Eigenschaft der Wasserdurchlässigkeit vermuten.

Um die generelle Eignung von HTK für die Feststoffvergärung im Perkolationsreaktor festzustellen, wurde die Wasserdurchlässigkeit mittels Oedometer untersucht. Anhand eines Referenzmaterials (Maissilage), dessen Eignung zur Feststoffvergärung bekannt ist, wurde die Wasserdurchlässigkeit der untersuchten Proben bewertet (Wedwitschka et al., 2016). Die unterschiedlichen HTK-Proben variierten sehr stark in ihrer Durchlässigkeit und waren zum Teil gar nicht durchlässig bzw. war Strukturmaterial notwendig, um eine Durchlässigkeit zu erzielen. Am Beispiel einer HTK-Probe wurde gezeigt, dass die Durchlässigkeit der Probe mit zunehmendem Anteil an Strukturmaterial ansteigt. Unter Auflast von 3 bar (zur Simulation einer Haufwerkshöhe von 1,7 m) wurde die Wasserdurchlässigkeit durch Zugabe von 10 % (m/m) Holzhackschnitzel von $4,4 \cdot 10^{-5}$ auf $8,1 \cdot 10^{-5} \text{ m s}^{-1}$, unter Verwendung von 10 % (m/m) Weizenstroh auf $9,6 \cdot 10^{-5} \text{ m s}^{-1}$ gesteigert (Abb. 5). Durch die Mischung von HTK mit Strukturmaterial konnte somit eine zur Maissilage vergleichbare Wasserdurchlässigkeit erzielt werden.

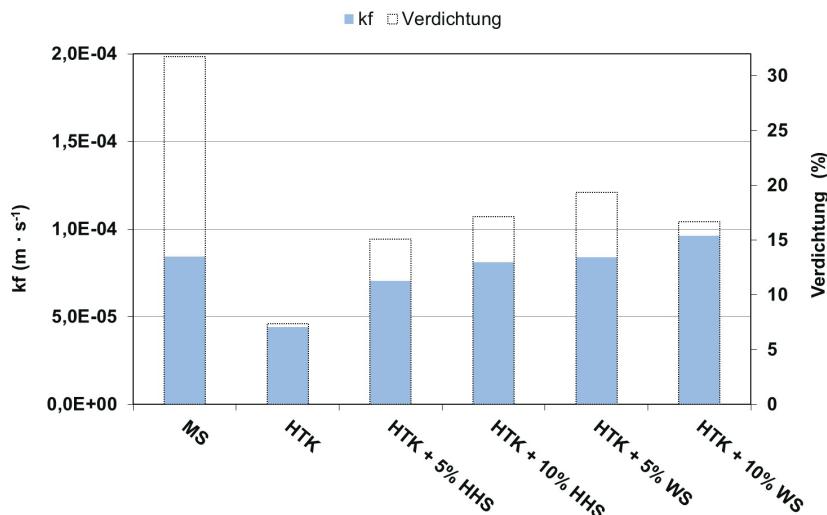


Abb. 5: k_f -Wert und Verdichtung der untersuchten HTK Proben mit unterschiedlichen Anteilen an Strukturmaterial gemessen bei einer Auflast von 3 bar (MS, Maissilage; HHS, Holzhackschnitzel; WS, Weizenstroh)

Die erste Prozessstufe (Perkolation) wurde im Labormaßstab untersucht, um optimale Betriebsparameter (Zyklusdauer, Einsatz von Strukturmaterial) zu ermitteln. Dabei wurde das Prozesswasser im Kreislauf geführt. Die Charakterisierung des Perkolats diente zudem dazu, Auswaschverhalten und -geschwindigkeit für Ammoniumstickstoff und organische Säuren für den weiteren Einsatz in der Methanstufe zu beurteilen und prozessbiologische Grenzen bezüglich Ammoniak, Temperatur und pH-Wert zu erfassen.

In Abb. 6 wird deutlich, dass der pH-Wert nicht die für eine 1. Prozessstufe im zweistufigen Verfahren (Hydrolyse) typischen Werte < 6-6,5 erreichte. Grund dafür war der substratbedingte hohe Ammoniumstickstoff-Gehalt, der als Puffer wirkte. Der pH-Wert und der Ammoniumstickstoff-Gehalt im Perkolat steigerte sich mit jedem neuen Batch-Durchlauf durch die Wiederverwendung des Perkolats als Inokulum für den Folgeversuch. Innerhalb jedes Batch-Ansatzes ist zudem durch die Auswaschung aus dem Substrat ein Anstieg des Ammoniumstickstoff-Gehalts zu verzeichnen.

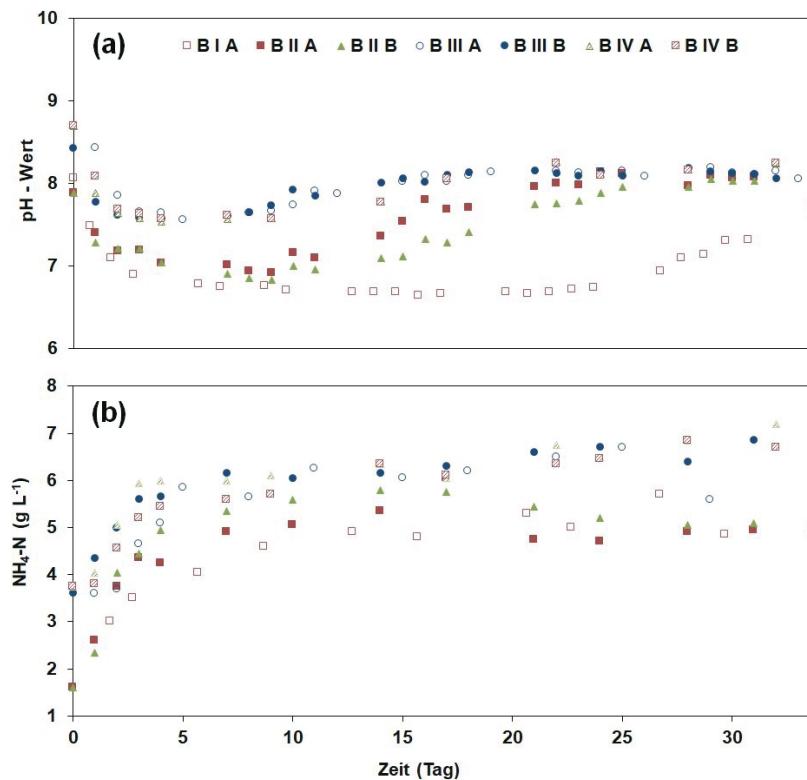


Abb. 6: pH-Wert und Ammoniumstickstoff ($\text{NH}_4\text{-N}$)-Gehalt des Perkolats bei der Feststoffvergärung von HTK im Perkolationsreaktor in Abhängigkeit der Versuchsdauer

Bei der Beurteilung der Prozessdaten hinsichtlich des Auswaschverhaltens der Säuren lässt sich schlussfolgern, dass ein Perkolationszyklus von 7 d geeignet wäre, da hier die höchste FOS-Akkumulation zu verzeichnen war (Abb. 7). Im weiteren Versuchsverlauf (> 8 d) wurden die organischen Säuren verstärkt abgebaut, verbunden mit einer Zunahme der Biogasproduktion.

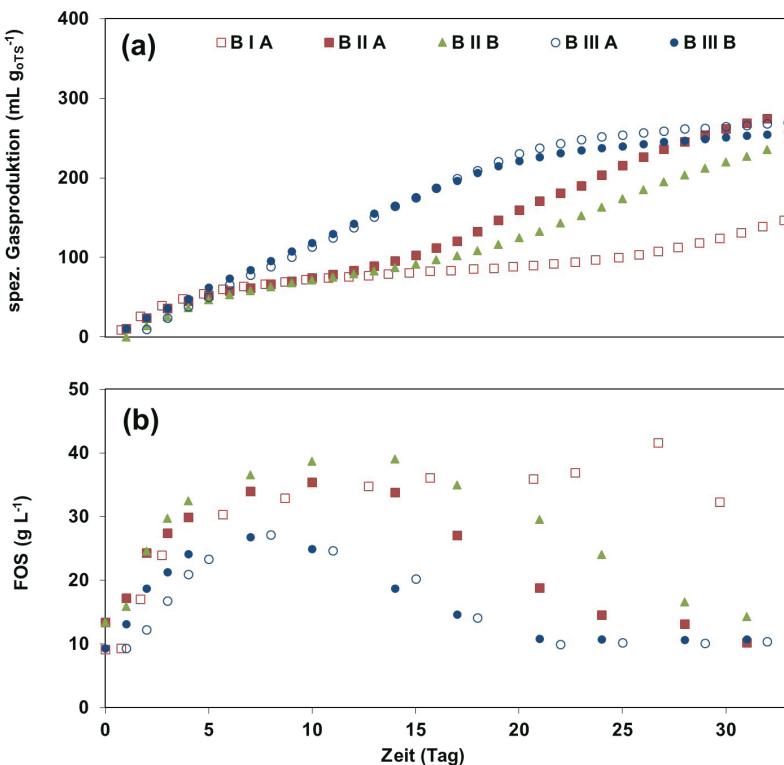


Abb. 7: Spezifische Gasproduktion (kumuliert) der Perkolationsreaktoren und FOS-Gehalt des Perkolats bei der Feststoffvergärung von HTK im Perkolationsreaktor (Batch I bis III)

Im Labormaßstab wurde durch Einsatz von Strukturmaterialien bei der Perkolation keine wesentliche Verbesserung bezüglich der Säure-Anreicherung erzielt, so dass für die weiteren Laborversuche im zweistufigen Betrieb darauf verzichtet wird. Die Kreislaufführung des Prozesswassers im zweistufigen GICON®-Biogasverfahren bleibt im Wesentlichen bei der Monovergärung von HTK erhalten. Durch das hohe Wasseraufnahmevermögen von HTK ist allerdings mit dem Austrag von Prozesswasser durch Gärrest zu rechnen. Dieser Wasseraustausch führt zu einer Gleichgewichtskonzentration bezüglich Ammoniumstickstoff. Auf Basis der in den Batch-Ansätzen ermittelten Daten wurde mit Hilfe einer Prognoserechnung die zu erwartende Ammoniumstickstoff-Akkumulation mit steigender Anzahl von Batch-Ansätzen berechnet. Darauf Bezug nehmend, ist mit einer Ammoniumstickstoff-Konzentration von 10 g L^{-1} in der ersten Prozessstufe zu rechnen. In vorangegangenen Untersuchungen wurde deutlich, dass im Rührkessel-Reaktor Ammoniumstickstoff-Konzentrationen bis 10 g L^{-1} (entsprach bei 30°C , pH 7,7 einem Ammoniak-Gehalt von $0,4 \text{ g L}^{-1}$) bei einem adaptierten Prozess möglich sind (Schäfer et al., 2017). Die Wirkung auf

die Prozessbiologie im Perkolations-Reaktor soll im weiteren Verlauf der Versuche eingehend betrachtet werden. Die gezielte Analyse der mikrobiellen Gemeinschaft ermöglicht es Zielgrößen für die weitere Prozessoptimierung (beispielsweise Temperatur) zu definieren.

4 Fazit und Ausblick

Die Versuche im Labormaßstab zeigen, dass HTK generell zur Feststoffvergärung geeignet ist. Bei der Anwendung des Versuchsaufbaus der ersten Prozessstufe im Pilotmaßstab wurde jedoch deutlich, dass hier weitere Anpassungen erforderlich sind, um den Einsatz von HTK als Substrat zu ermöglichen. Im nächsten Schritt folgt die Durchführung im zweistufigen Betrieb. Ein Schwerpunkt liegt dabei auf der Analyse und Bewertung des Einflusses auf die mikrobielle Zusammensetzung, um die Ammoniak-Hemmung in beiden Prozessstufen zu untersuchen und damit neue Zielgrößen für die Prozessoptimierung zu definieren.

Literatur/Quellen

- Bauermeister, U., Wild, A., & Meier, T. (2009). Stickstoffabtrennung mit dem ANAstrip-Verfahren System GNS. Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe eV (FNR)(ed) Gärrestaufbereitung für eine pflanzenbauliche Nutzung-Stand und F+ E-Bedarf, 30, 78-95.
- Brosowski, A., Adler, P., Erdmann, G., Stinner, W., Thrän, D., Mantau, U., Blanke, C., Mahro, B., Hering, T., Reinholdt, G. (2015): Biomassepotenziale von Rest- und Abfallstoffen Status Quo in Deutschland. Hrsg.: Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. (FNR), Gülzow-Prüzen, ISBN: 978-3-942147-29-3
- Darestani, M., Haigh, V., Couperthwaite, S. J., Millar, G. J., & Nghiem, L. D. (2017). Hollow fibre membrane contactors for ammonia recovery: Current status and future developments. *Journal of environmental chemical engineering*, 5(2), 1349-1359.
- Fuchs, W., Wang, X., Gabauer, W., Ortner, M., & Li, Z. (2018). Tackling ammonia inhibition for efficient biogas production from chicken manure: Status and technical trends in Europe and China. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 97, 186-199.
- Huang, J. C., & Shang, C. (2006). Air stripping. In Advanced physicochemical treatment processes (pp. 47-79). Humana Press.
- Kayhanian, M. (1999). Ammonia inhibition in high-solids biogasification: an overview and practical solutions. *Environmental technology*, 20(4), 355-365.
- Li, Y., Zhang, Y., Sun, Y., Wu, S., Kong, X., Yuan, Z., & Dong, R. (2017). The performance efficiency of bioaugmentation to prevent anaerobic digestion failure from ammonia and propionate inhibition. *Bioresource technology*, 231, 94-100.
- Molaey, R., Bayrakdar, A., Sürmeli, R. Ö., & Çallı, B. (2018). Influence of trace element supplementation on anaerobic digestion of chicken manure: Linking process stability to methanogenic population dynamics. *Journal of Cleaner Production*, 181, 794-800.

- Mühlenberg, J. (2015) Bestimmung von Zuckern und Glucose-Abbau Produkten. In: Messmethodensammlung Biogas, Hg. Liebetrau, J.; Pfeiffer, D. et al., Leipzig, DBFZ, S. 51-54
- Ortner, M., Rameder, M., Rachbauer, L., Bochmann, G., & Fuchs, W. (2015). Bioavailability of essential trace elements and their impact on anaerobic digestion of slaughterhouse waste. *Biochemical engineering journal*, 99, 107-113.
- Rückert, C. (2004). EP 1589095, Vorrichtung zur Erzeugung und Verwertung von Biogas (Rückert NatUrgas®-Verfahren)
- Schäfer, F., Müller, L., Reiter, R., Himmelstoss, A., Pröter, J. (2017). Mono-fermentation of chicken manure - competing with ammonia inhibition and a high content of inorganic solids, In Ek, Ehrnrooth et al. (Hrsg.) 2017 – Papers of the 25th European Biomass Conference, 516-520.
- Schumacher, B., Wedwitschka, H., Weinrich, S., Mühlenberg, J., Gallegos, D., Oehmichen, K., & Liebetrau, J. (2019). The influence of pressure swing conditioning pre-treatment of chicken manure on nitrogen content and methane yield. *Renewable Energy*, 143, 1554-1565.
- Tian, H., Fotidis, I. A., Mancini, E., Treu, L., Mahdy, A., Ballesteros, M., ... & Angelidaki, I. (2018). Acclimation to extremely high ammonia levels in continuous biomethanation process and the associated microbial community dynamics. *Bioresource technology*, 247, 616-623.
- VDLUFA, 7-Ergänzung. Die chemische Untersuchung von Futtermitteln, Verband Deutscher Landwirtschaftlicher Untersuchungs- und Forschungsanstalten e.V. (2007).
- Wedwitschka, H., Jenson, E., & Liebetrau, J. (2016). Feedstock characterization and suitability assessment for dry anaerobic batch digestion. *Chemical Engineering & Technology*, 39(4), 665-672.
- Weissbach, F. (2012). Das Gasbildungspotenzial von Hühnertrockenkot bei der Biogasgewinnung. *Landtechnik*, 67(4), 299-304.
- Westerholm, M., Moestedt, J., & Schnürer, A. (2016). Biogas production through syntrophic acetate oxidation and deliberate operating strategies for improved digester performance. *Applied energy*, 179, 124-135.

Kontakt

Dr. Franziska Schäfer, Dr. Leandro Janke, Dr. Jürgen Pröter
DBFZ Deutsches Biomasseforschungszentrum gemeinnützige GmbH
① +49 (0)341 2434-443 | franziska.schaefer@dbfz.de | www.dbfz.de

Dipl.-Ing. Falko Niebling
Großmann Ingenieur Consult (GICON) GmbH
① +49 (0)355.494967 20 | f.niebling@gicon.de | www.gicon.de

Dipl.-Ing. Alfons Himmelstoss
AEV Energy GmbH
① +49 (0)351.467 1301 | a.himmelstoss@aev-energy.de
www.aev-energy.de

*Daniela Gallegos Ibanez, Harald Wedwitschka, Lucie Moeller,
Nele Stabenau, Aline Bauer, Andreas Zehnsdorf, Walter Stinner*

The article is dedicated to Prof. Dr. Andreas Zehnsdorf's memory. He joined the research as leader of the joint project. Due to his early leave we miss his inspiration and spirit.

Feedstock suitability assessment of Elodea, wheat straw and mixed Elodea-wheat straw silages for biogas production

Abstract: "Aquatic macrophytes - ecologically and economically optimized use (AquaMak)", is a research project that provides novel evidence toward a feasible option of fossil resources replacement with bioresources. "Aquamak" aims to explore the potential of aquatic biomass to generate bioenergy, which would otherwise become waste through conventional disposal methods. The project results not only have implications on current knowledge of conservation techniques, substrate pre-treatment, biogas generation, but also economic, environmental and societal aspects, particularly as the future energy supply along with mitigation of greenhouse gas (GHGs) emissions become an increasingly pertinent issue worldwide. Provision of the findings from this research will also allow readers to consider its potential to be utilized for the recovery of nitrogen and phosphorus from eutrophicated waterways while simultaneously producing biomass with value-added biochemical components to generate biomethane. During this project several scientific reports were published in which the aforementioned subjects are discussed (see Publications). As part of the Aquamak project, ensiling of Elodea, wheat straw and a mixture of Elodea-wheat straw with three commercial silage additives used alone or in combination was investigated as a new technological approach for biogas production. Methane yields from 70 different silages analyzed in this study ranged from 166 to 280 mL g⁻¹ vs. Results showed that addition of inoculant combined with enzymes (He+EZ) to wheat straw silages increased methane yields by 2 %. Furthermore, addition of chemical additive (Ch) to Elodea silages increased methane yields by 15 %, while addition of enzymes combined with chemical additive (Ch+EZ) to mixed Elodea wheat straw silages by 16 %, although no significant differences were observed in those silages compared to controls. The most promising treatment SG1 and ESG2 without additive resulted in a production of 275 and 226 mL g⁻¹ vs. respectively. Therefore, addition of silages additive did not affect methane formation through its effects on ensiling.

Zusammenfassung: Das Forschungsprojekt „Aquatische Makrophyten – ökologisch und ökonomisch optimierte Nutzung (AquaMak)“, hatte zum Ziel das Potenzial aquatischer Biomasse als Rohstoff für die Bioenergieerzeugung näher zu untersuchen. Neben der Analyse der in Deutschland anfallenden Mengen geernteter Wasserpflanzen wurde die technische Machbarkeit sowie die Kosten und Akzeptanz verschiedener Nutzungspfade bewertet. Ein Arbeitsinhalt des Aquamak-Projekts war die Untersuchung der Haltbarmachung von Wasserpflanzen für die ganzjährige Nutzung als Biogassubstrat. Dafür wurden Silagen hergestellt aus Elodea (Wasserpest), Weizen-

stroh und einer Mischung aus Elodea und Weizenstroh als neuer technologischer Ansatz für die Wasserpflanzenkonservierung. Als Silierhilfsmittel kamen drei kommerzielle Additive zum Einsatz, die allein oder in Kombination verwendet wurden.

Das spezifische Methanpotential der 70 untersuchten Silagen reichte von 166 bis 280 mL g⁻¹ vs. Die Auswertung der Versuche zeigte z.B., dass der Zusatz von biologischen Silierhilfsmitteln in Kombination mit Enzymen (He+Ez) zu Weizenstrohsilage zu einer 2 % erhöhten Methanausbeute gegenüber der unbehandelten Probe führte. Die Zugabe von chemische Silierhilfsmitteln (Ch) zu Elodea-Silage führte zu einer 15 %-igen Steigerung der Methanausbeuten und die Zugabe von Enzymen in Kombination mit chemischen Silierhilfsmitteln (Ch+Ez) zu gemischten Elodea-Weizenstrohsilagen zu einer 16 %-igen Steigerung. Die besten Methanausbeuten wurden allerdings mit Silagen ohne Additivzusatz erzielt. Die Zugabe von Silierhilfsmitteln führte zu einer unterschiedlichen Zusammensetzung der Siliersäuremusters, ein direkter Zusammenhang zu den Methanbildungspotentialen konnte allerdings nicht nachgewiesen werden.

1 Problem definition and project approach

With growing socio-economic expansion, an urgent need exists for new substrate for the development of efficient sustainable methods for the production of biofuels such as biogas. To date, energy crops, mainly maize, is the biomass most commonly used as feedstock in agricultural biogas plants in Germany. Although maize exhibits high methane yields, its sustainability is debatable as it requires agricultural land and can compete with food and feed supply. Aquatic plants are ubiquitous around the world in natural waterways and their biomass does not compete with land-based food crops. Elodea genus has been characterized as being an invasive aquatic plant that is well adapted to varying environmental conditions. However, it can cause problems in hydroelectric power plants and lead to limitations in ship and boat traffic as well as recreational activities when overgrowth occurs. Harvesting of these plants is a measure to remove nitrogen and phosphorous from waterbodies thereby reducing eutrophication. Annually, large quantities of aquatic biomass are removed from waterways and water bodies and disposed of as organic waste without any further use. Several studies have demonstrated the potential of Elodea genus for biogas production with high nutrient concentration (see Moeller et al., 2018 for overview). Yet, due to its seasonal growth a preservation method is required to guarantee a year-round substrate availability. Owing to its high water and low content of water soluble carbohydrates (WSC) ensiling of Elodea is challenging. The goal of this study was to investigate the feasibility of preservation of Elodea genus by natural silage fermentation with and without wheat straw as well as the effect of three silages additives including chemical, enzymatic and biological additives used alone or in combination on silage quality and methane formation.

2 Materials and Methods

Elodea biomass was harvested in autumn 2015 at the Parthe river in Leipzig, Germany ($51^{\circ} 21' 53.2''$ N, $12^{\circ} 24' 51.2''$ E) and transported in plastic containers to the Deutsches Biomasseforschungszentrum (DBFZ, Leipzig, Germany). Wheat straw was provided by the Deutsches Biomasseforschungszentrum gGmbH (DBFZ, Leipzig, Germany). Prior to ensiling wheat straw was chopped and ground into about 2 cm and 0.2 cm of particle size, respectively, and stored in sealed plastic barrels under dry conditions at room temperature until its usage. The total solid (TS) and volatile solid (VS) contents of raw materials were measured as described by DIN EN 12880 and DIN EN 12879, respectively, and corrected according to Weißbach and Strubelt, 2008. Chemical compositions of raw Elodea and wheat straw were analyzed according to Dittrich-Zechendorf, 2016. Silages preparation was carried out as follows: SC1 and SC2 silages were prepared using chopped straw and adjusted to 30 and 45 % TS, respectively. SG1 and SG2 silages were prepared using ground straw and adjusted to 30 and 45 % TS, respectively. ESC1 and ESC2 silages were prepared using Elodea with chopped straw and adjusted to 30 and 45 % TS, respectively. ESG1 and ESG2 silages were prepared using Elodea with ground straw and adjusted to 30 and 45 % TS, respectively. All silages were treated with addition of three commercial silage additives including chemical, enzymes and inoculant used alone or in combination as follows: (1) Ez: enzymes containing a mixture of cellulase and hemicellulase, (2) Ch: Chemical additive containing formic acid, (3) Ch+Ez, chemical additive combined with enzymes, (4) Ch+He, chemical additive combined with inoculant, (5) Ch+He+Ez, chemical combined with inoculant and enzymes, (6) He+Ez, inoculant combined with enzymes and (7) He+Sg, inoculant combined with sugars. The ensiling method is described in detail in Gallegos et al., 2017. After 180 days of ensiling, each mini silo was opened for analyzing fermentation quality including organic acids, volatile fatty acids (VfAs) and alcohols in addition to pH as described by Apelt, 2016. Biomethane potential (BMP) tests were conducted at laboratory scale in accordance with VDI 4630 (VDI, 2014) using eudiometer devices (Neubert Glas GbR, Geschwenda, Germany) at 39°C to determine the specific methane yields of the ensiled material. Methane yields were standardized to 273.15 K and 101.32 kpa. Statistical analyses of the fermentation products, pH and methane yield data were obtained using the SAS v 10.0 software (SAS Institute INC., Cary, NC, USA) with tabulated results provided as least squares mean and standard error of mean (SEM). The data was analyzed as a completely randomized design, with the fixed effects being substrate type (Elodea and wheat straw), level of total solids (30 and 45 %), level of particle size (0.2 and 2 cm) and silage additive (alone or in combination). The experimental unit for all treatments was represented by the mini silo (bags) with three replicates per treatment, resulting in a total of 210 mini silos. Differences among means were determined using post-hoc least significant difference (LSD) test with the significance level for all data declared at $P \leq 0.05$.

3 Results

3.1. Effect of silage additives on silage quality of Elodea, wheat straw and mixed Elodea wheat straw

The concentrations of lactic and acetic acids significantly varied in the eight different silages, with the differences consistent across type of silage additives (Fig. 1 and 2). Results of VFAs of Elodea silages in addition to pH values are not shown (see Gallegos et al., 2020). Lactic acid varied between 0 and 2 % TS and between 8 and 15 % TS for acetic acid in Elodea silages. Addition of chemical additive (Ch) to Elodea silages increased lactic acid contents and lowered ($p < 0.05$) silage pH as compared to the control. However, the addition of chemical additive showed slightly higher butyric acid contents than those in the control, although statistically insignificant ($p > 0.05$). Addition of inoculant combined with sugars (He+Sg) resulted in higher ($p < 0.05$) acetic acid compared to the control. pH of Elodea silages ranged from 5 to 7 showing a very poor silage quality. In wheat straw and mixed Elodea-wheat straw silages concentrations of lactic acid ranged from 0 to 4 %TS and from 0 to 7 %TS, respectively. Addition of chemical additive combined with inoculant and enzymes (Ch+He+Ez) to wheat straw silages and addition of chemical additive combined with inoculant (Ch+He) to mixed Elodea-wheat straw silages resulted in higher ($p < 0.05$) lactic acid, as compared to controls. Acetic acid in wheat straw and mixed Elodea-wheat straw silages varied between 0 and 3 %TS and between 0 and 5 %TS, respectively. Addition of inoculant combined with sugars (He+Sg) to wheat straw silages and addition of chemical additive combined with inoculant and enzymes (Ch+He+Ez) to mixed Elodea-wheat straw silages resulted in higher ($p < 0.05$) acetic acid compared to controls. pH of both wheat straw and mixed Elodea-wheat straw silages ranged from 4 to 6, where addition of enzymes (Ez) to wheat straw silages and addition of inoculant combined with sugars (He+Sg) to mixed Elodea-wheat straw silages resulted in lower ($p < 0.05$) pH values as compared to controls. No butyric acid or only traces were found in wheat straw and mixed Elodea-wheat straw silages.

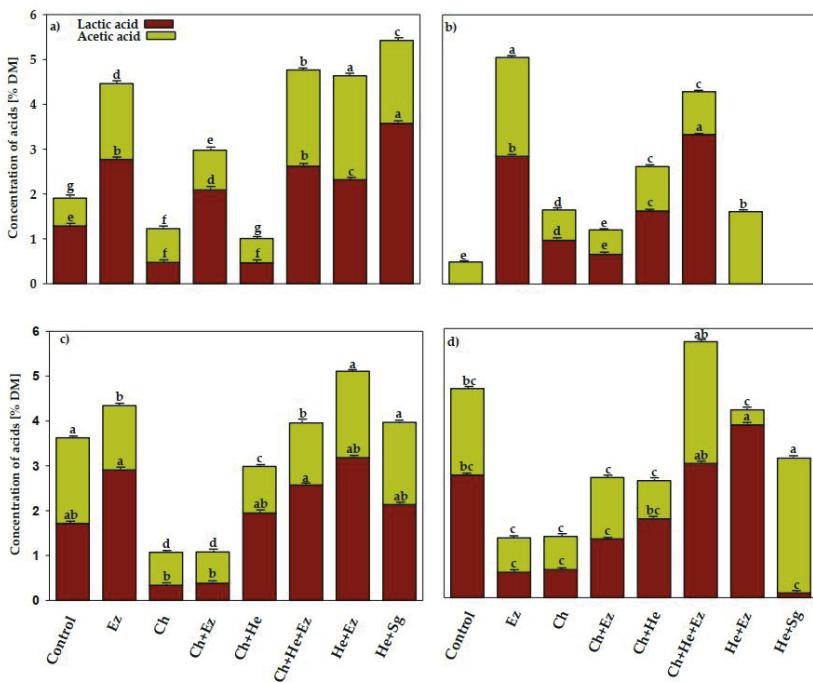


Fig. 1. Concentrations of lactic and acetic acids in wheat straw silages, (a) SC1: straw at 2 cm particle size at 30 % TS, (b) SG1: straw at 0.2 cm particle size at 30 % TS, (c) SC2: straw at 2 cm particle size at 45 % TS, and (d) SG2: straw at 0.2 cm particle size at 45 % TS. Ez (enzymes), Ch (chemical additive), Ch+Ez (chemical additive + enzymes), Ch+He (chemical additive + inoculant), Ch+He+Ez (chemical additive + inoculant + enzymes), He+Ez (inoculant + enzymes) and He+Sg (inoculant + sugars).

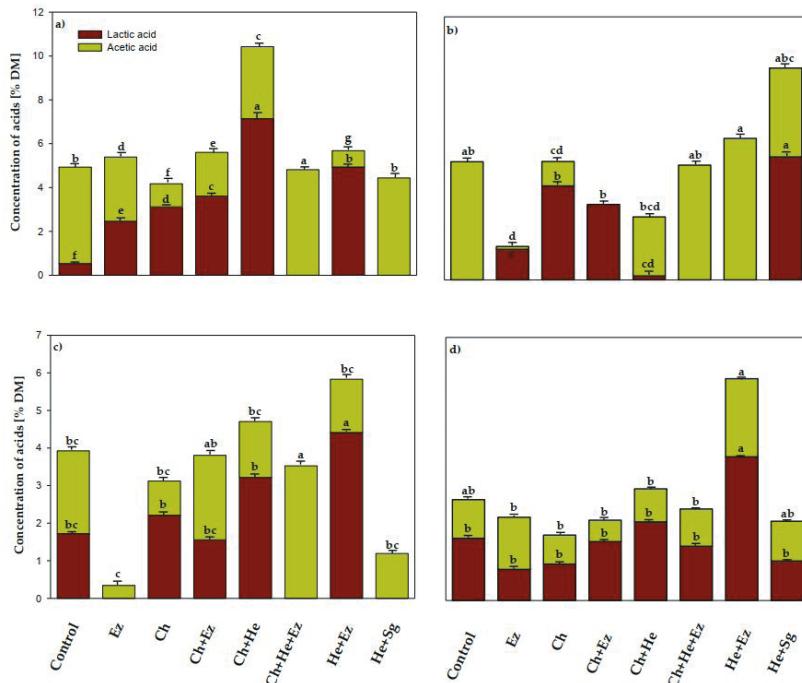


Fig. 2. Concentrations of lactic and acetic acids in mixed Elodea-wheat straw silages, (a) ESC1: Elodea-straw at 2 cm particle size at 30 % TS, (b) ESG1: Elodea-straw at 0.2 cm particle size at 30 % TS, (c) ESC2: Elodea-straw at 2 cm particle size at 45 % TS, and (d) ESG2: Elodea-straw at 0.2 cm particle size at 45 % TS; Ez (enzymes), Ch (chemical additive), Ch+Ez (chemical additive + enzymes), Ch+He (chemical additive + inoculant), Ch+He+Ez (chemical additive + inoculant + enzymes), He+Ez (inoculant + enzymes) and He+Sg (inoculant + sugars).

3.2 Effect of ensiling on methane yield

Methane yields varied greatly in the eight different silages with and without addition of silage additives (Fig. 3 and 4). Results of methane yields of Elodea silages are not shown (see Gallegos et al., 2020). Methane potentials ranged from 181 to 256 mL g⁻¹ vs in Elodea silages, where addition of chemical additive (Ch) increased numerically but not significantly ($p > 0.05$) methane yields. Methane yields of wheat straw and mixed Elodea wheat straw silages ranged from 198 to 280 mL g⁻¹ vs and from 166 to 263 mL g⁻¹ vs, respectively. Addition of inoculant combined with sugars (He+Sg) to wheat straw silages (Fig. 3c) and addition of inoculant combined with enzymes (He+Ez) to mixed Elodea wheat-straw silages (Fig. 4c) resulted in higher ($p < 0.05$) methane potentials as compared to controls. However, methane yields of those silages are below the highest value measured for wheat straw and mixed Elodea-wheat straw silages (280 and 263 mL g⁻¹ vs, respectively). Highest methane yields were found for wheat straw

silages containing inoculant combined with enzymes (He+Ez) (Fig. 3b) and for Elodea-wheat straw silages containing addition of enzymes combined with chemical additive (Ch+Ez) (Fig. 4d). Although no significant differences were observed as compared to controls. The most promising treatment SG1 and ESG2 without additive resulted in a production of 275 and 226 mL g⁻¹_{VS}, respectively. We concluded that addition of silages additive did not affect methane formation through its effects on ensiling.

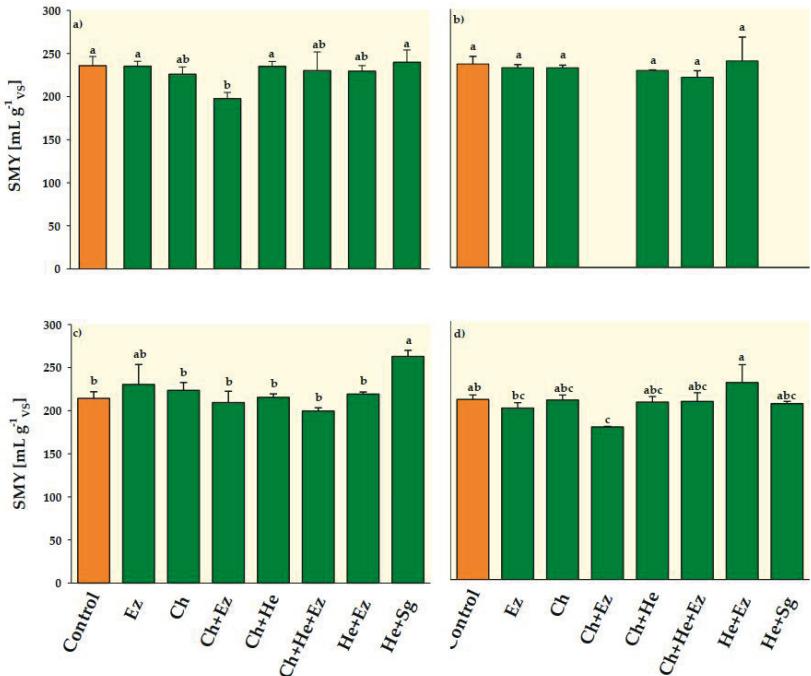


Figure 3. Effect of addition of silage additive in wheat straw silages on methane yields. (a) SC1: straw at 2 cm particle size at 30 % TS, (b) SG1: straw at 0.2 cm particle size at 30 % TS, (c) SC2: straw at 2 cm particle size at 45 % TS, and (d) SG2: straw at 0.2 cm particle size at 45 % TS. Ez (enzymes), Ch (chemical additive), Ch+Ez (chemical additive + enzymes), Ch+He (chemical additive + inoculant), Ch+He+Ez (chemical additive + inoculant + enzymes), He+Ez (inoculant + enzymes) and He+Sg (inoculant + sugars).

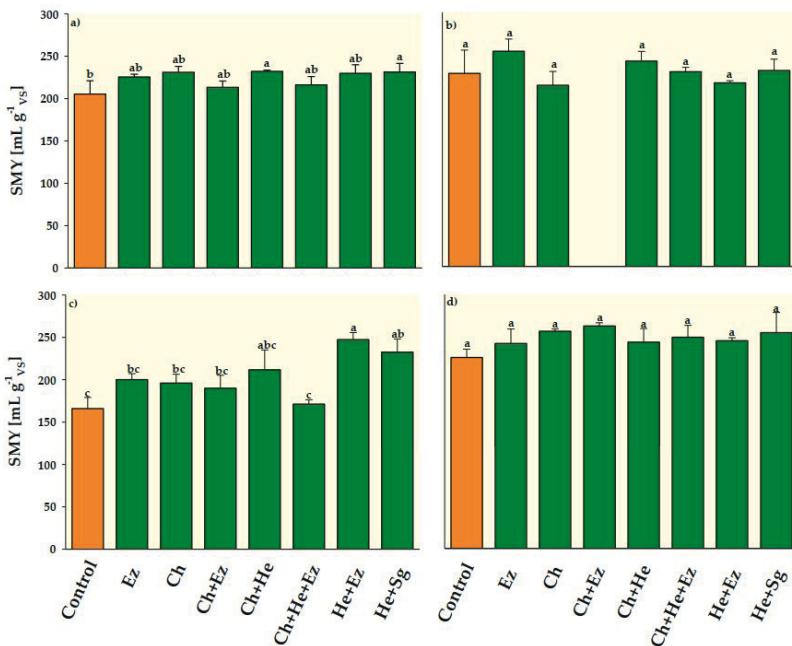


Figure 4. Effect of addition of silage additive in mixed Elodea-wheat straw silages on methane yields, (a) ESC1: Elodea-straw at 2 cm particle size at 30 % TS, (b) ESG1: Elodea-straw at 0.2 cm particle size at 30 % TS, (c) ESC2: Elodea-straw at 2 cm particle size at 45 % TS, and (d) ESG2: Elodea-straw at 0.2 cm particle size at 45 % TS; Ez (enzymes), Ch (chemical additive), Ch+Ez (chemical additive + enzymes), Ch+He (chemical additive + inoculant), Ch+He+Ez (chemical additive + inoculant + enzymes), He+Ez (inoculant + enzymes) and He+Sg (inoculant + sugars).

4 Conclusion and future perspectives

To adapt the characteristics of aquatic plants, particularly TS content, a mixture with straw prior ensiling is an adequate and practicable measure. Mixed silages from Elodea and wheat straw show suitable substrate characteristics for ensiling and biogas production and achieve high biogas yields. Although the experiments were only conducted at laboratory scale, for practical applications the mixture of Elodea with straw to a TS of approx. 30 % can be recommended. Significant limitations currently existed in the technical development of preservation of Elodea by ensiling for biogas production. Although macrophytes have been comparatively less studied than terrestrial plants, their physiological traits, growth characteristics and abundance of available freshwater media may make their further exploration worthwhile. On the experimental level with only small ensiling bags the stability of the silages under practical conditions could not be investigated. The lower risk of air integration and the higher amount of acetic acid lead to the recommendation for TS of around 30 %, but as the silage with lower moisture

showed lower pH likely due to reduced dilution, this should be investigated under practical conditions for future optimization. The strategic technological development of AD, with a biorefinery approach consideration, will allow more effective conversions and could lead to a significant increase in the value of aquatic macrophytes as a feedstock while absorbing CO₂ and producing an oxygenated water with the view of further encouraging sustainability in energy.

Acknowledgement

This project was funded by the German Federal Ministry of Food and Agriculture based on a decision of the German Bundestag with funds from the “Energy and Climate Fund” investment fund (grant number 22403013). The authors gratefully acknowledge the technical assistance of the staff at DBFZ laboratory. The authors also appreciate the financial support of the National Council for Science and Technology (CONACYT), Mexico, through grant number 291077 (PhD scholarship).

References

- Apelt M (2016) Determination of organic acids. In: Liebetrau J, Pfeiffer D, Thrän D (eds) Collection of methods for biogas. Series of the funding programme “biomass energy use” volume 7, ISSN online 2364-897X, pp 35–39
- DIN EN 12879 (2001) Characterization of sludges—determination of the loss on ignition of dry mass. DIN Deutsches Institut für Normung e. V, Berlin
- DIN EN 12880 (2001) Characterization of sludges—determination of dry residue and water content. DIN Deutsches Institut für Normung e. V, Berlin
- Dittrich-Zechendorf M (2016) Determination of total Kjeldahl nitrogen and crude protein, determination of crude fat, determination of crude fibre, process specification for the determination of ADF and ADL and determination of neutral detergent fibre (NDF). In: Liebetrau J, Pfeiffer D, Thrän D (eds) Collection of methods for biogas. Series of the funding programme “biomass energy use” volume 7, ISSN online 2364-897X, pp 57–66
- VDI 4630 (2014) Fermentation of organic materials - characterization of the substrate, sampling, collection of material data, fermentation tests, 2014-4th ed. Beuth Verlag, Berlin
- Weißbach F, Strubelt C (2008) Correcting the dry matter content of maize silages as a substrate for biogas production. Landtechnik Agric Eng 63(2):82–83. <https://doi.org/10.1515/lta.2008.779>
- Publications
- Zehnsdorf, A., Hussner, A., Eismann, F., Röncke, H., Melzer, A. Management options of invasive Elodea nuttallii and Elodea canadensis, Limnologica 51,1 (2015). <https://doi.org/10.1016/j.limno.2014.12.010>
- Bauer, A., Moeller, L., Wedwitschka, H. et al. Anaerobic digestion of mixed silage of waterweed biomass and wheat straw in a long-term semi-continuous biogas production process. Energ Sustain Soc 8, 4 (2018). <https://doi.org/10.1186/s13705-017-0145-9>

- Gallegos, D., Wedwitschka, H., Moeller, L. et al. Mixed silage of Elodea and wheat straw as a substrate for energy production in anaerobic digestion plants. *Energ Sustain Soc* 8, 7 (2018). <https://doi.org/10.1186/s13705-018-0148-1>
- Gallegos D, Wedwitschka H, Moeller L, Zehnsdorf A, Stinner W (2017) Effect of particle size reduction and ensiling fermentation on biogas formation and silage quality of wheat straw. *Bioresour Technol* 245:216–224. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.08.137>
- Moeller, L.; Bauer, A.; Wedwitschka, H.; Stinner, W.; Zehnsdorf, A. Crop Characteristics of Aquatic Macrophytes for Use as a Substrate in Anaerobic Digestion Plants - A Study from Germany. *Energies* 2018, 11, 3016.
- Muñoz Escobar, M., Voyevoda, M., Fühner, C. et al. Potential uses of *Elodea nuttallii*-harvested biomass. *Energ Sustain Soc* 1, 4 (2011). <https://doi.org/10.1186/2192-0567-1-4>
- Pörschmann J, Weiner B, Wedwitschka H, Zehnsdorf A, Köhler R, Kopinke F-D (2015) Characterization of biochars and dissolved organic matter phases obtained upon hydrothermal carbonization of *Elodea nuttallii*. *Bioresour Technol* 189:145–153. doi:10.1016/j.biortech.2015.03.146
- Zehnsdorf, A., Korn, U., Pröter, J., Naumann, D., Seirig, M., 2011. Western waterweed (*Elodea nuttallii*) as a co-substrate for biogas plants. *Agric. Eng.* 66 (2), 136-139.
- Zehnsdorf, A., Moeller, L., Stärk, H. et al. The study of the variability of biomass from plants of the *Elodea* genus from a river in Germany over a period of two hydrological years for investigating their suitability for biogas production. *Energ Sustain Soc* 7, 15 (2017). <https://doi.org/10.1186/s13705-017-0117-0>

Contact

Dr. Walter Stinner

Deutsches Biomasseforschungszentrum

Torgauer Str. 116, Leipzig

⌚ +49 (0)341.2434-524 | ⚡ Walter.Stinner@dbfz.de | 🌐 www.dbfz.de

*Britt Schumacher, Harald Wedwitschka, Bernd Nordzieke,
Peter Fischer, Jan Grundmann*

Holzvergärung zur Biogas- und Torfersatzstoffgewinnung

Zusammenfassung: Im Rahmen des vom Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL) über die Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe (FNR) geförderten Forschungsprojektes „Biomethan & Torfersatzstoff aus Pappelholz“ (FKZ 22038318) wird die fermentative Biomethanerzeugung aus Pappelholz (z.B. aus Kurzumtriebsplantagen – KUP) als innovativer Ansatz der energetischen Nutzung untersucht. Zudem erhöht sich dessen Innovationsgrad durch die Zielsetzung einer Kombination mit der stofflichen Nutzung des Holzfaseranteils nach der Gärrestseparation als Torfersatzstoff. Der Biogasprozess kann als vorgesetzter Konditionierungsschritt zur stofflichen Nutzung verstanden werden, der selbst Energie bereitstellt und bei entsprechender Substratkonservierung auch das Potenzial des Holzes an flüchtigen Stoffen ausschöpft.

Neben der Fasergewinnung als Torfersatzstoff für Gemüse- und Gartenbau stand das Biogaspotential der Pappelfasern im Vordergrund dieser Untersuchung. Im Ergebnis wurde festgestellt, dass Pappelholzfasern aus getrockneten Holzhackschnitzeln im Gärversuch im Labormaßstab ein Methanpotential von ca. 239 mL/g_{VS} bzw. 191 mL/g_{FM} aufwiesen. Als weiteres Ergebnis konnte gezeigt werden, dass fermentierte Pappelholzfasern je nach Behandlung höhere Konzentrationen an Pflanzennährstoffen enthalten und vergleichbare Eigenschaften wie biologische Düngemittel aufweisen. Damit ist die energetische und die nachfolgend stoffliche Nutzung möglich. Für die Entwicklung eines Torfersatzstoffes ist eine weiterführende Faserbehandlung zur Reduzierung der biologischen Aktivität erforderlich.

Abstract: Within the research project "Biomethane & peat substitute from poplar wood" (FKZ 22038318), funded by the Federal Ministry of Food and Agriculture (BMEL) via the Agency for Renewable Resources (FNR), the fermentative biomethane production from poplar wood (e. g. from short-rotation plantations - SRC) is being investigated as an innovative approach to energy use. In addition, its innovation is increased by the aim to combine the material use of the wood fibre content after fermentation residue separation as peat substitute. The biogas process can be understood as an upstream conditioning step for material use, which itself provides energy. With appropriate substrate conservation, it exploits the wood's potential of volatile substances too.

In addition to fibre production as a peat substitute for vegetable and horticultural crops, the biogas potential of poplar fibres was the focus of this study. As a result, it was found that poplar wood fibres from dried wood chips showed a methane potential of approx. 239 mL/g_{VS} or 191 mL/g_{FM} in fermentation tests on a laboratory scale. As a further result, it was shown that fermented poplar wood fibres, dependent on the treatment, contain higher concentrations of plant nutrients and could be used as

biological fertiliser. This enables the energetic and subsequent material use. For the development of a peat substitute, extra fibre treatment is necessary to reduce the biological activity.

1 Problemstellung und Projektansatz

Grundsätzlich kann Pappelholz aus Kurzumtriebsplantagen (KUP) als nachwachsender Rohstoff für die Gewinnung erneuerbarer Energien z.B. im Bereich der dezentralen Wärmeerzeugung zum Einsatz kommen. Die Anwendung von Holzheizungen im städtischen Bereich steht jedoch vor zahlreichen Hürden. Dabei sind Platzbedarf für Heizanlagen und Brennstofflager sowie der erforderliche Lieferverkehr oft unüberbrückbare Herausforderungen für die Umsetzung. Zudem ist die Feinstaubdiskussion ein zentrales Hindernis. Auch stellt sich die Frage, ob andere Nutzungskonzepte, die eine Kombination aus energetischen und stofflichen Nutzungen erlauben, eine sinnvolle Alternative zur alleinigen energetischen Nutzung darstellen können. Im Projekt „Biomethan & Torfersatzstoff aus Pappelholz“ (PapIGas) wird der Ansatz untersucht, das Energieholz nach vorgesetztem Aufschlussprozess in Biogas und anschließend in Biomethan umzuwandeln und über das Erdgasnetz räumlich und zeitlich entkoppelt auch im dicht besiedelten städtischen Gebiet verfügbar zu machen. Darüber hinaus soll im Rahmen des Projekts untersucht werden, ob Pappelholzfasern nach der Vergärung auch für den professionellen gärtnerischen Einsatz als Torfersatzstoffe nutzbar sind. Diese Prozesskette ist in Abb. 1 dargestellt.

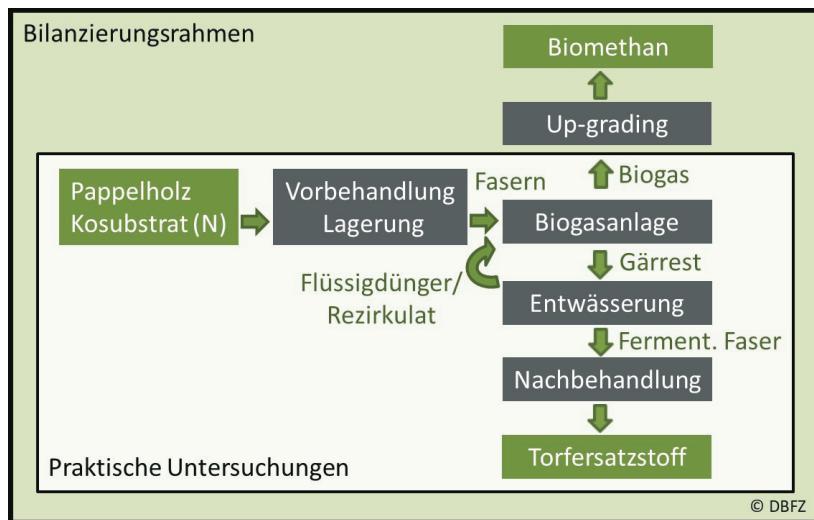


Abb. 1: Prozesskette

2 Ausgewählte Ergebnisse

Probenbeschreibung

Die untersuchte Holzprobe stammt von einer Pappel-Kurzumtriebsplantage in der Nähe von Berlin, die im März 2019 durch die Energy Crops GmbH geerntet wurde. Danach erfolgte über ca. acht Wochen eine Kaltbelüftung der Holzhackschnitzel (HHS; Qualität P31) am Leibniz-Institut für Agrartechnik und Bioökonomie (ATB) bis zu einem Wassergehalt auf Frischmassebasis (wb) von 10 % wb. Im Mai 2019 wurden die HHS 24 Stunden lang vor der mechanischen Zerkleinerung auf einen Wassergehalt von ca. 37 % wb eingestellt. Mit einem Doppelschneckenextruder (MSZK B90e, Schneckenaußendurchmesser 220 mm, elektrische Leistung 90 KW) erfolgte der Aufschluss der HHS (siehe Abb. 2). Der Trockensubstanzgehalt (TS) der Fasern nach der Extrusion betrug 82 % der Frischmasse (FM) und der Anteil der organischen Trockensubstanz (oTS) lag bei 98 % der TS. Die Pappelfasern wurden bis zum Beginn der Untersuchungen unter Luftabschluss in Kunststofffässern bei ca. 5 °C gelagert.

Biochemisches Methanpotenzial (BMP) von Pappelholzfasern

Die Pappelholzfasern wurden in diskontinuierlichen Gärtests (BMP-Test) im Labormaßstab nach der VDI-Richtlinie 4630 (2016)¹ jeweils als Dreifachansatz auf ihr Methanpotential untersucht. Zum Einsatz kamen AMPTS II-Geräte (Bio-processcontrol, Lund, Schweden, Temperatur 39 °C ±1°C). Als Inokulum wurde ein am DBFZ kontinuierlich kultivierter Impfschlamm verwendet. Das Abbruchkriterium des Gärtests war nach 53 Tagen erreicht, nachdem die Methanbildung über einen konsekutiven Zeitraum von drei Tagen unter 0,5 % der bis zu diesem Zeitpunkt gebildeten akkumulierten Methanmenge lag. Das Methanpotenzial ist auf die oTS bzw. FM bezogen und standardisiert (trockenes Gas; 273,15 K; 1013,25 hPa). Als Referenzsubstrat wurde mikrokristalline Cellulose (MCC) eingesetzt, die das erwartete Methanpotential von ca. 340 mL/g_{oTS} erzielte. Die erforderliche Qualität des verwendeten Impfschlamm und Versuchsaufbaus war somit gegeben.

Das Methanpotenzial der untersuchten Pappelfasern ist in Abb. 2 dargestellt und lag im Bereich von 239 mL/g_{oTS} bzw. 191mL/g_{FM}. Bezogen auf Frischmasse konnten mit Pappelholzfasern aus getrockneten HHS demnach höhere Methanpotenziale erzielt werden, als mit Energiepflanzensilage (Mais 340 mL/g_{oTS} bzw. 106 mL/g_{FM}²). Die Methanbildung war im diskontinuierlichen Gärversuch nach ca. 53 Tagen abgeschlossen.

¹ VDI-Richtlinie 4630: Vergärung organischer Stoffe - Substratcharakterisierung, Probenahme, Stoffdatenerhebung, Gärversuche. 2016-11

² https://www.fnr.de/fileadmin/allgemein/pdf/broschueren/Leitfaden_Biogas_web_V01.pdf, 7. Auflage, 2016

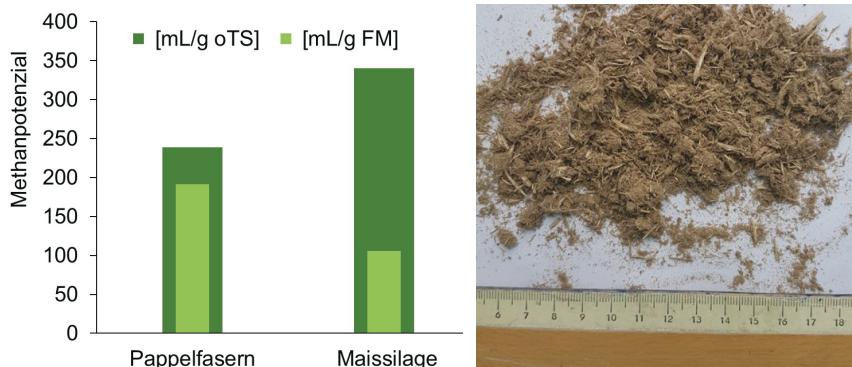


Abb. 2: Methanpotenzial und Beispieldfoto von Pappelholzfasern (Foto: Mause, DBFZ)

Diskontinuierliche Vergärung im Ppropfenstromreaktor zur Fasergewinnung

Zielstellung des Vergärungsversuchs im Ppropfenstromfermenter war die Gewinnung fermentierter Pappelholzfasern für die anschließende Untersuchung als Torfersatzstoff. Der Gärversuch wurde in einem Ppropfenstromfermenter mit ca. 200 L Reaktorvolumen durchgeführt. Das Reaktorkonzept besteht aus einem liegenden Fermenter mit einem horizontal angeordneten Rührwerk (siehe Abb. 3) und gilt als besonders geeignet für hochviskose Gärmedien mit höheren Trockensubstanzgehalten. Die Versuchstemperatur war ca. 37 °C. Als Impfslamm wurde Gärrest einer landwirtschaftlichen Biogasanlage verwendet.

Nach einer anfänglichen Zugabemenge von ca. 80 L (ca. 11 kg) extrudierten Pappelfasern erfolgte eine weitere Zugabe von jeweils 20 L (ca. 2,7 kg) Fasern nach 21 Tagen und 35 Tagen Versuchslaufzeit (siehe Abbildung 4). Eine gestufte Substratzugabe wurde gewählt, um eine mögliche Versäuerung des Biogasprozesses zu verhindern. Nach Substratzugabe setzte die Methanbildung zügig ein. Insgesamt sind 120 L Pappelfasern behandelt worden, wobei ca. 4,5 m³ Biogas mit einem Methananteil von ca. 52 % produziert wurden. Das spezifische Methanpotenzial aus Inokulum und Fasern lag im Bereich von ca. 128 mL/g_{oTS}. Der pH-Wert war über den gesamten Versuchszeitraum stabil, was auf eine gleichmäßige Biogasbildung der Pappelholzfasern hindeutet. Die anfängliche organische Startbelastung von ca. 6,6 g_{oTS}/L führte demnach nicht zu einer Versäuerung des Biogasprozesses.

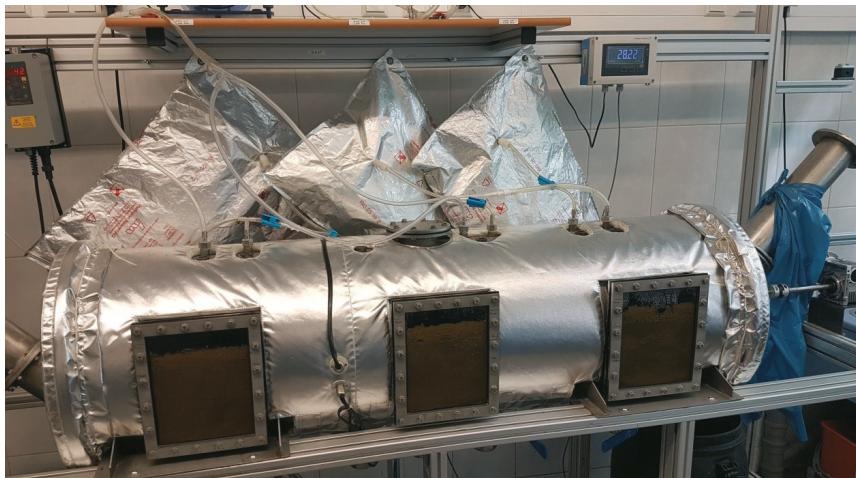


Abb. 3: Pfpfenstromreaktor (Foto: Mause, DBFZ)

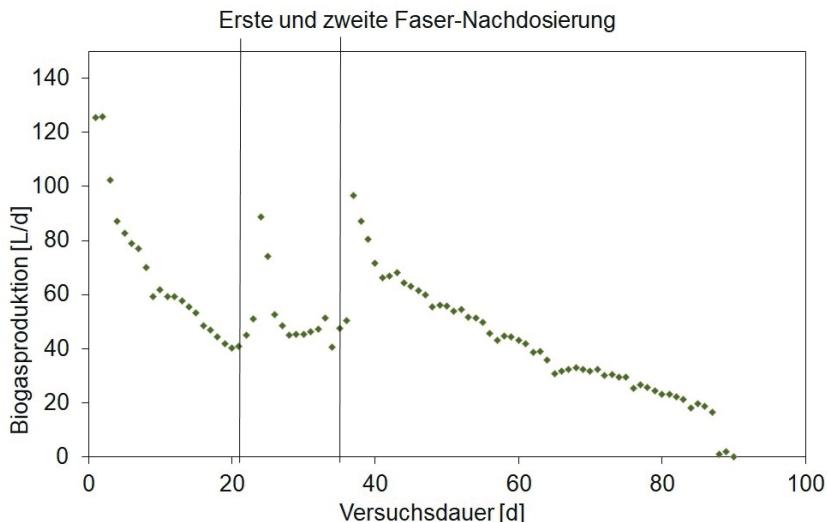


Abb. 4: Biogasbildungsverlauf des Pfpfenstromversuchs

Am Ende des Gärversuchs wurden die fermentierten Pappelholzfäsern nach einer Fest-Flüssig-Separierung mittels Vibrationssiebung (Maschenweite 0,5 mm) zurückgewonnen und die Eignung als Torfersatzstoff untersucht. In Abbildung 5 sind von links nach rechts aufgeführt: fermentierte Pappelholzfäsern, Gärrest und Siebdurchlauf.



Abb. 5: Darstellung der einzelnen Gärrestfraktionen (Foto: Masula, DBFZ)

Die Gewinnung von fermentierten Pappelholzfasern im halbtechnischen Maßstab in einem Ppropfenstromreaktor im Batch-Betrieb war mit Impfschlamm einer landwirtschaftlichen Biogasanlage stabil möglich. Auch bei größeren Faserzugabemengen (hohen Raumbelastungen) wurden keine negativen Beeinträchtigungen des Biogasprozesses festgestellt. Das Fasermaterial führte zu keinem Zeitpunkt des Versuchs, zu einer Versäuerung des Biogasprozesses.

Tests zur Eignung der fermentierten Fasern als Torfersatzstoff

a) Einsatz als Nährstofflieferant (Dünger)

Hier stehen die nutzbaren pflanzenverfügbaren Nährstoffe im Vordergrund, welche sofort und später zur Verfügung stehen. Die damit einhergehende Salzbelastung (zusätzlich kommen noch die als Schadsalze bekannten Salze Chlorid und Natrium) ist meist limitierender Faktor für den volumenmäßigen Einsatz als Torfersatzstoff.

b) Einsatz als Torfersatzstoff (Volumenzuschlagstoff)

Die Anforderungen bzgl. eines Torfersatzstoffes unterscheiden sich grundlegend von den Anforderungen eines Düngers. Ein geringes Schüttgewicht, ein möglichst niedriger pH-Wert, geringe Salzbelastung, niedrige Nährstofffrachten und eine Resistenz gegenüber der biologischen Degradation (Zersetzung) sind wichtige Kriterien für eine entsprechende Bewertung.

Da kaum ein Material die o.g. Anforderungen an einen Torfersatzstoff erfüllt, müssen Kompromisse gefunden werden, welche sich auf die Rezepturzusammensetzung entsprechender Substrate wiederspiegeln. So kann z. B. der Einsatz von Grünschnittkompost oder Holzfasern auf eine bestimmte Menge beschränkt werden, ohne dass negative Auswirkungen auf das Pflanzenwachstum sichtbar werden. Durch geschickte Kombination verschiedener Ausgangsmaterialien ist es möglich, den vorherrschenden Torf in manchen Bereichen des Gartenbaus zu ersetzen. Tab. 1 gibt eine Übersicht über die chemischen Parameter der geprüften fermentierten Pappelholzfasern wieder, die gewaschen, getrocknet und fraktioniert wurden. Das geringe Schüttgewicht, akzeptable Salzgehalte, eine relativ geringe Nährstofffracht (nach Waschung) sprechen für die weitere Prüfung hinsichtlich eines volumenmäßig einsetzbaren Torfersatz.

Tab. 1: Übersicht der chemischen Eigenschaften unterschiedlicher Behandlungsstufen von fermentierten Pappelholzfasern (PF) im Vergleich mit durchschnittlichen Werten von Grünschnittkompost bezogen auf die Pflanzenverfügbarkeit (chemische Analysen durchgeführt von der Lufa Oldenburg)

	Schüttidichte (trocken) [g/L]	pH (CaCl ₂)	Salz (H ₂ O) [g/L]	N (CaCl ₂) [mg/L]	NO ₃ -N (CaCl ₂) [mg/L]	NH ₄ -N (CaCl ₂) [mg/L]	P ₂ O ₅ (CaL) [mg/L]	K ₂ O (CaL) [mg/L]	Na (H ₂ O) [mg/L]	Cl (H ₂ O) [mg/L]
PF, feine Fraktion	80	7,4	0,47	<10	8	< 5	221	310	21	93
PF, grobe Fraktion	60	7,4	0,25	<10	< 5	< 5	156	204	11	41
Grünschnittkompost (Mittelwert, n=15)	400	7,9	2,0	205	16	190	810	2475	105	680

Für weitere Untersuchungen wurde die feine Fraktion der gewaschenen und getrockneten Fasern aus 2019 zur LVH Hannover-Ahlem eingesendet und hinsichtlich der biologischen Stabilität untersucht.

Die Fasern weisen eine hohe N-Immobilisierung von 337 mg N/L nach 20 Tagen auf. Der N-Haushalt ist somit instabil und die Fasern sind als Substratausgangsstoff nicht geeignet (Grenze für eine Nutzung von 10% v/v in Substraten liegt bei ~200 mg N/L). Der Ausschluss basiert auf der Erkenntnis, dass ein entsprechendes Substrat zu viel Stickstoff immobilisieren würde, sodass die Versorgung von Kulturpflanzen erschwert werden würde. Ein Ergebnis in dieser Höhe wurde jedoch erwartet, da die Fasern noch immer biologisch hoch aktiv sind: Es liegen viele C-Quellen vor, welche für diverse Mikroorganismen (Pilze und Bakterien) attraktiv sind. Erkenntnisse aus früheren Jahren lassen den Schluss zu, dass eine (Nach-) Behandlung der fermentierten Fasern notwendig und sinnvoll ist (z.B. Kompostierung).

3 Schlussfolgerungen und Ausblick

Zielstellung der Studie war es, das Methanpotenzial von Pappelholzfasern zu quantifizieren und fermentierte Holzfaseren auf ihre Eignung als Torfersatzstoff zu untersuchen. Im Labormaßstab konnte im diskontinuierlichen Gärtest mit Inokulum einer landwirtschaftlichen Biogasanlage ein Methanpotenzial von 239 mL/g_{OTS} bzw. 191 mL/g_{FM} erzielt werden. Das Methanpotenzial von Pappelfasern aus getrockneten Holzhackschnitzeln lag im vorgestellten Versuch bezogen auf die Frischmasse (bei TS 82 % der FM) sogar in einem höheren Bereich

als der Literaturwert für Maissilage (vergl. 340 mL/g_{GTS} bzw. 106 mL/g_{FM}³). Das spricht für eine gute Transportwürdigkeit der HHS bzw. Pappelfasern.

Die Untersuchungen zur Torfersatzstoffgewinnung haben ergeben, dass die biologische Aktivität der Holzfasern nach der Vergärung für den Einsatz als Torfersatzstoff gesenkt werden muss. Es ist davon auszugehen, dass der Verzicht auf Holztrocknung in der Prozessvorkette sowie längere Verweilzeiten im Biogasreaktor die spezifischen Biogaserträge der Fasern deutlich erhöhen und damit deren Biogaspotenzial besser ausschöpfen. Dadurch könnte ggf. auch die (beim Einsatz als Torfersatzstoff unerwünschte) biologische Aktivität der Fasern in Kombination mit einer Kompostierung verringert werden, so dass eine Verwendung als Torfersatz möglich ist. Weitere F&E-Arbeit im Bereich des Up-scaling der Fermentation sowie der vor- und nachgelagerten Prozesse ist notwendig.

Finanzierung

Das Forschungsprojekt PaplGas wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Ernährung und Landwirtschaft unter dem Förderkennzeichen 22038318 gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieses Beitrags liegt bei den Autoren.

Danksagung

Die Autoren danken Felix von Riess und Rico Knape von der Energy Crops GmbH, Stefanie Grade von der Klasmann-Deilmann GmbH für die Entwicklung bzw. Durchführung des Projektes PaplGas. Die Autoren bedanken sich bei Ralf Pecenka vom Leibniz-Institut für Agrartechnik und Bioökonomie (ATB) - Abteilung Nacherntetechnik, bei den Kollegen vom DBFZ-Labor sowie bei den Studierenden Johannes Mause und Sophie Masula für die wertvolle Unterstützung der Laborarbeiten.

Kontakt

Dr. Britt Schumacher

DBFZ Deutsches Biomasseforschungszentrum gemeinnützige GmbH
Torgauer Str. 116, D-04347 Leipzig

① +49 (0)341.2434-540 | ☎ Britt.Schumacher@dbfz.de | 🌐 www.dbfz.de

Bernd Nordzieke

Klasmann-Deilmann GmbH
Georg-Klasmann-Straße 2-10, D-49744 Geeste

① +49 (0)5937.31-239 | ☎ bernd.nordzieke@klasmann-deilmann.com
🌐 www.klasmann-deilmann.com

³ https://www.fnr.de/fileadmin/allgemein/pdf/broschueren/Leitfaden_Biogas_web_V01.pdf, 7. Auflage, 2016

Dr. Jan Grundmann

Vattenfall Energy Solutions GmbH
Überseering 12, D-22297 Hamburg

① +49 (0)40.2718-2280 | ☎ jan.grundmann@vattenfall.de
✉ <https://energy-solutions.vattenfall.de>

FORUM C

THERMISCHE NUTZUNG FESTER BIOENERGIETRÄGER

Energieträger *Sida hermaphrodita* – Bewertung umweltbezogener Nachhaltigkeit mittels Ökobilanzierung

Zusammenfassung: Im Kontext nachhaltiger Produkt- und Prozessentwicklung im Bereich erneuerbarer Energien und der Bioökonomie spielen Aspekte der Umweltwirkung eine wesentliche Rolle. Als eine von mehreren Säulen der umfassenden Bewertung der Nachhaltigkeit stellt die Ökobilanz den oftmals intendierten Bezug zur Umweltwirkung her.

Im Rahmen einer Ökobilanz wurden die Umweltwirkungen bei der energetischen Nutzung von *Sida hermaphrodita* (nachfolgend *Sida*) unterschiedlicher Verarbeitungsformen (Chips, Pellets, Briketts) untersucht. *Sida* ermöglicht eine energetische oder stoffliche Nutzung jenseits einer Flächenkonkurrenz-Diskussion.

Es wurden Produktions- und Nutzungspfade auf Basis von Daten aus mehrjährigen Feld- und Laborversuchen untersucht. Die Ergebnisse wurden mit weiteren biomasse-basierten Energieträgern (Holz, *Miscanthus*) verglichen. Kein *Sida*-Prozessweg war umweltseitig überlegen, jedoch zeigte sich, dass *Sida* mehrheitlich deutliche Vorteile gegenüber anderen Biomassen hinsichtlich seiner Umweltwirkung aufweist.

Abstract: With regard to sustainable product and process development in the area of renewable energies and bioeconomy, the aspect of environmental impacts plays an important role. Life cycle assessment addresses one of the pillars in an overall sustainability assessment.

Within an LCA for the energy use of *Sida hermaphrodita* (hereafter *Sida*) the environmental impacts of different types of the energy carrier (chips, pellets, briquettes) were investigated. *Sida* enables an energy or material use beyond a food or fuel discussion.

The production and utilization paths were studied based on data from long-time field and lab tests. For comparison, other biomass-based energy carriers (wood, *Miscanthus*) were considered. No *Sida* process chain was superior, but it was shown that *Sida* has clear advantages related to its environmental impacts against other biomasses.

1 Einleitung

In jüngster Vergangenheit wurde das Thema der nachhaltigen Zukunftsgestaltung auf politischer Ebene durch den “European Green Deal” (EC-COM640, 2019) und auf zivilgesellschaftlicher Ebene durch unterschiedlichste Akteure (z.B. Rankin, 2019) wieder verstärkt in den Vordergrund gerückt. Der Brutto-

endenergieverbrauch innerhalb der EU weist für 2018 einen Anteil von etwa 18 % an erneuerbaren Energien auf, wobei im Jahr 2015 ca. 50 % durch Biomasse abgedeckt wurde (Eurostat, 2020, 2017). Das europaweite Ziel liegt 2030 bei 32 % (EC, 2018), was eine stetige Verbesserung neuer Technologien und Prozesse notwendig macht. Durch geeignete Bewertungsverfahren lassen sich umweltseitig vorteilhafte Technologien und Verbesserungspotenziale ermitteln.

Als eine in Europa mit weniger als 1.000 ha (vergleiche NaWaRo in Deutschland gesamt: 2,65 Mio. ha) eher selten verbreitete Pflanzenart (Becker et al., 2019; Nahm et al., 2018) lässt sich das ursprünglich in Nordamerika beheimatete, im 19. Jhd. nach Europa eingeführte, mehrjährige Malvengewächs *Sida hermaphrodita* (im folgenden Sida) beschreiben. Gute Gründe zur Nutzung als Energiepflanze sind mögliche hohe flächenspezifische Ausbeuten bis zu 25 tTM/ha (Jablonowski et al., 2017), ihre Rolle als Pollenspender für Insekten oder die Fähigkeit der Schwermetallabsorption (Borkowska et al., 2003, 2006). Der im Vergleich zu Weiden-Kurzumtriebsplantagen halb so große Wasserbedarf (Borkowska et al., 2012), niedrige Nährstoffbedarfe und die Option der Marginalboden-Nutzung (Nabel, 2018) sprechen ebenso für den Anbau. Die Nutzung von Sida wurde im Forschungszentrum Jülich (IBG-2) in Bezug auf unterschiedliche Aspekte, wie bspw. Wachstum auf sandigen Marginalböden oder Symbiosen mit Leguminosen in langjährigen Labor- und Feldversuchen erforscht (Jablonowski et al., 2017; Nabel et al., 2018; Nabel et al., 2016).

Um eine Bewertung hinsichtlich der Umweltwirkungen bei der energetischen Nutzung von Sida vornehmen zu können, wurde eine Ökobilanz gemäß ISO 14040/14044 (ISO14040, 2006), (ISO14044, 2006) durchgeführt. Dabei sollte, als Teil einer holistischen Gesamtschau (vgl. (Jablonowski et al., 2020)), die Umweltwirkung unterschiedlicher Verarbeitungsrouten (Chips, Pellets und Briketts) ermittelt werden. Die Sachbilanz der entwickelten Prozessketten speist sich aus Daten durchgeföhrter Labor- und Feldversuche. Eine ausführlichere Darstellung generierter Ergebnisse kann in Jablonowski et al. (Jablonowski et al., 2020) und Schonhoff et al. (Schonhoff et al., 2020) abgerufen werden. Der vorliegende Beitrag zeigt Teilergebnisse zur Umweltwirkung von Sida. Weiterhin sollen Möglichkeiten, die sich durch die Nutzung von Ökobilanzen in der Entwicklung von Prozessen und Szenarien ergeben, jedoch nicht in quantitativer Form, dargestellt werden.

2 Material und Methoden

Die durchgeföhrte Ökobilanz beinhaltet die Schritte der Definition von Ziel und Untersuchungsrahmen, die Sachbilanzierung (Erfassung Material- und Energieströme), die Wirkungsabschätzung (Quantifizierung von Umweltwirkungen), sowie die Interpretation der Ergebnisse. Als Softwareanwendung wurde GaBi 9.2 (GaBi, 2020) gewählt. Nicht projektgegebene Daten wie Hintergrundprozesse (z.B. Bereitstellung von Strom) oder Vergleichsprozesse wie Wärmeproduktion mittels Holzpellets wurden aus den Datenbanken GaBi und ecoin-

vent 3.5 (ecoinvent-DB, 2020; GaBi, 2020) entnommen. Die Darstellung der Ergebnisse erfolgt in Wirkungs-spezifischen Einheiten wie bspw. CO₂-Äquivalenzen (Wirkungskategorie „Klimawandel“). Zur Vergleichbarkeit unterschiedlicher Umweltwirkungen werden normierte Ergebnisse in Form von sog. Personenäquivalenten (PE) mit Europa-Bezug (EU-27) ermittelt, wobei ein PE die jährlichen konsuminduzierten Emissionen eines durchschnittlichen Europäers repräsentiert (Hauschild et al., 2001). Als berücksichtigte Umweltwirkungen werden die, in den Empfehlungen der EU-Kommission genannten, herangezogen (ILCD; vgl. (Pennington et al., 2010)).

2.1 Ziel und Untersuchungsrahmen

Ziel der Untersuchungen ist die Identifizierung der Sida-Verarbeitungsform (Chips S1, Pellets S2, Briketts S3) zur thermischen Energieerzeugung mit den niedrigsten Umwelteffekten. Weiterhin soll ein Vergleich mit weiteren Energieträgern aus dem Biomassebereich (Holz-/Miscanthus-Pellets) mögliche Vorteile von Sida aufzeigen.

Die funktionelle Einheit wurde definiert als Bereitstellung von 100 GJ thermischer Energie, sodass es sich beim betrachteten System um ein sog. Cradle-to-gate-System handelt, das bis zur Bereitstellung der thermischen Energie alle Vorketten berücksichtigt (z.B. Energiebereitstellung, Transporte, Ernte, Pelletierung). Geographisch wurde auf die europäische oder deutsche Ebene Bezug genommen, wobei Daten, soweit möglich, nicht älter als 5 Jahre sind.

2.2 Systembeschreibung

Wie aus Abb. 1 hervorgeht, sind zur Gewährleistung der Vergleichbarkeit für alle betrachteten Prozessketten gleichartige Systemgrenzen und -inhalte definiert. Die Prozessstufe der „Biomasseproduktion“ beinhaltet Aufwendungen und Prozesse von der Einsaat, Landbearbeitungsmaßnahmen und begleitendem Pflanzenschutz etc., bis zur Biomasseernte und nachfolgender Logistik (Transport Feld zu Verarbeitungsstätte, 25 km). Als Inhalte der Prozessstufe „Produktion und Verarbeitung“ wurden die Lagerung der zu verarbeitenden Biomasse (bspw. Lagerhalle und Logistik) und der Konversionsprozess zu Pellets oder Briketts berücksichtigt. Eine technische Trocknung ist nicht vorgesehen, jedoch wurden entsprechende Wendeprozesse berücksichtigt. In der Prozessstufe der (Produkt-) „Lagerung und des Versands“ sind entsprechende Lagerkapazitäten (bspw. Pellet-Silo) und Transporte zum Verbraucher (z.B. Palettentransport Briketts) enthalten. Die Prozessstufe der „Feuerung“ schließt, neben Lagerkapazitäten beim Verbraucher, die Kleinfeuerungsanlagen ein. Diese wurden für Sida aufgrund nicht vorhandener spezifischer Datensätze entsprechend der in Labor-/Technikumsversuchen genutzten Feuerungsanlagen ausgewählt.

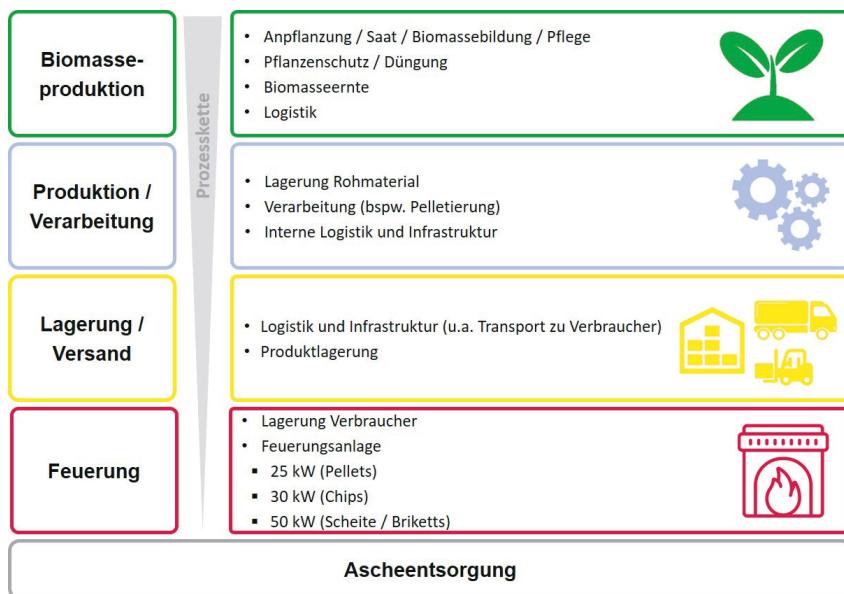


Abb. 1: Vereinfachte prozesskettenübergreifende Darstellung der berücksichtigten Prozessstufen und nachgeordneten Prozessinhalten

Genutzte Datensätze für Kleinfeuerungsanlagen bilden ein erweitertes Spektrum an Leistungsdaten ab (bspw. Peltofen 25 kW deckt den Bereich 20 kW-100 kW ab, (Bauer, 2007; ecoinvent-DB, 2020)). Als finale Prozessstufe ist die „Ascheentsorgung“ zu nennen, die in Übereinstimmung mit (DEPI, 2016) als Entsorgung über den Hausmüll angenommen wird.

2.3 Sachbilanzierung

Die in Tabelle 1 zusammengefassten Daten zeigen wesentliche ein- und ausgehende Material- und Energieströme der drei Sida-Prozessketten (S1, S2, S3) und einer Miscanthus-Pellets Prozesskette (M1). Aus den gezeigten Daten geht hervor, dass unterschiedliche initiale Biomasse-Mengen zur Produktion der 100 GJ thermische Energie nötig sind. Die zur Bereitstellung der 100 GJ benötigten Energieaufwendungen liegen bei etwa 22 % bis 27 % des Outputs und bedingen unterschiedliche Mengen Düngemittel. Die dargestellten Sachbilanzen unterscheiden sich je nach Energieträger durch unterschiedliche Biomasseverluste und Aschegehalte, deren Diversität durch unterschiedliche Heizwerte oder Feuchtegehalte zustande kommen.

Tab. 1: Reduzierte Sachbilanzdaten der betrachteten Prozessketten für Sida (basierend auf eigenen Daten) und Miscanthus (basierend auf Literatur- und Datenbankdaten)

Fluss	Einheit	S1 Chips	S2 Pellets	S3 Briketts	M1 Pellets
Inputs					
geernzte Biomasse	[kg/FU]	8.152	7.582	7.661	7.239
kumulierte Energie-Aufwendungen (Vordergrund- u. Hintergrundprozesse)	[MJ/FU]	22.683	25.166	26.522	22.079
Düngemittel	[kg/FU]	99,8	92,8	93,8	76,0
Zwischenprodukte					
Energieträgeräquivalent (Pellets, Chips, Briketts)	[kg/FU]	6.200	5.811	5.999	5.821
Outputs					
Thermische Energie	[MJ/FU]	100.000	100.000	100.000	100.000
Biomasseverluste	[kg/FU]	897	645	651	615
Asche	[kg/FU]	127	209	215	175
Parameter					
Heizwert	[MJ/kg]	16,1	17,2	16,7	17,2
Feuchtegehalt (Ernte)	[%]	24,1	24,1	24,1	-
Feuchtegehalt (Zwischenprodukt)	[%]	9,9	15,0	15,0	15,0

3 Ergebnisse und Diskussion

Neben der Gesamt-Umweltwirkung von Prozessketten, lassen sich auch die Beiträge einzelner Prozessstufen oder -module zu Umweltwirkungen sichtbar machen. Die nachfolgenden Diskussionen bilden somit nur einen Ausschnitt der vielfältigen Ergebnisse ab (Schonhoff, 2020).

3.1 Umweltwirkungen gesamt im Vergleich

Das erste Ergebnis stellt die summierten normalisierten Werte der 16 Wirkungskategorien in PE dar. Wie aus Abb. 2 hervorgeht, lässt sich bei der Gegenüberstellung unterschiedlicher Sida-Verarbeitungsformen kein signifikanter (< 1 %) Unterschied erkennen. Ein erweiterter Vergleich mit alternativen Prozessketten für holzartige Energieträger (A1 - Holzchips Industrie | 50 kW | CH (SOTA), A2 - Hartholzchips | 50 kW | CH, A3 - Holzpellets | 25 kW | CH (SOTA), A4 - Mix Scheitholz | 30 kW | RoW) zeigt, dass diese deutlich höhere Umweltwirkungen aufweisen, die zwischen 7 % und 47 % höher ausfallen, als der im Fall der Sida-Pellets beste erreichte Wert von 15,8 PE/100 GJ_{th}. Die Prozesskette für Miscanthus-Pellets (M1 - Miscanthus-Pellets | 25 kW | EU) ist 15 % besser als S2.

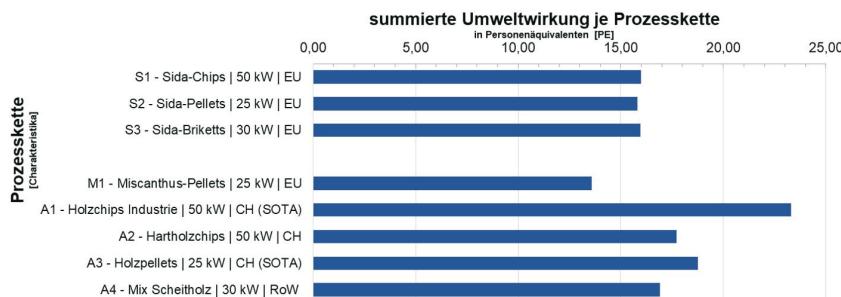


Abb. 2: Darstellung der summierten Umweltwirkung unterschiedlicher alternativer Prozessketten im Vergleich zu den Sida-Prozessketten in Personenäquivalenten (normalisierte Werte); Bezug: EU = Europa, CH = Schweiz, RoW = global; SOTA = State-of-the-art-Prozess 2014

Die Ergebnisse lassen sich auf die Ebene einzelner Prozessstufen oder -module aufschlüsseln. Dadurch lassen sich z.B. Hot-Spots in der Prozesskette ermitteln und somit potentielle Ansätze zur Prozessoptimierung identifizieren. Sensitivitätsanalysen der Ökobilanz (bspw. Variation der Ausbeuten oder Heizwerte) stellen eine weitere Möglichkeit der Identifizierung wirkungsstarker Prozessinhalte dar, werden an dieser Stelle jedoch nicht dargestellt. Zudem ist bei der Analyse einzelner Prozessmodule erkennbar, inwieweit eine Verringerung der Umweltwirkung im beeinflussbaren Bereich der Prozessentwicklung liegt. So lassen sich bspw. Düngemittelgaben reduzieren, die Umweltwirkung der eigentlichen Produktion von Düngemitteln jedoch nicht. Ergänzend ist hierbei anzumerken, dass die Qualität der Ergebnisse maßgeblich von der Qualität der einfließenden Daten abhängt, sodass bspw. zeitliche Bezüge und die Kontexte, in denen Datensätze erstellt werden, einen Einfluss auf Ergebnisse haben. Weiterhin spiegelt die Variation eines Parameters oftmals nur bedingt die Realität wider (Stichwort: Trade-Off-Effekt).

3.2 Umweltwirkungen nach Wirkungskategorien im Vergleich

Die in Abb. 3 gezeigten Werte für ausgewählte Wirkungskategorien zeigen, dass je Umweltwirkung mehr oder weniger deutliche Unterschiede der Prozessketten vorliegen. So sind bspw. hinsichtlich des Klimawandels minimale Vorteile beim Einsatz von Miscanthus erkennbar, während Sida-Pellets den geringsten Beitrag zur Ressourcenverknappung (mineralisch, fossil, erneuerbar) haben. Biogenes Kohlenstoffdioxid macht mit 85 - 90 % den größten Anteil der CO₂-Emissionen aus. Weitere fossile CO₂-Emissionen sind auf Produktionsprozesse wie bspw. die Maschinen-Herstellung oder die Elektrizitäts-Bereitstellung zurückzuführen. Sida- und Miscanthus-Pellets weisen bis zu 11 % weniger Umweltwirkungen als S1 und S3 auf. In der Kategorie „Ökotoxizität Süßwasser“ lässt sich ein bis zu 37 %-iger Vorteil für Miscanthus-Pellets feststellen. In der Kategorie der Ressourcenverknappung schlägt sich die Verwendung von Sida-Pellets anstelle von Sida-Briketts mit einer bis zu 46 % geringeren Umweltwirkung nieder.

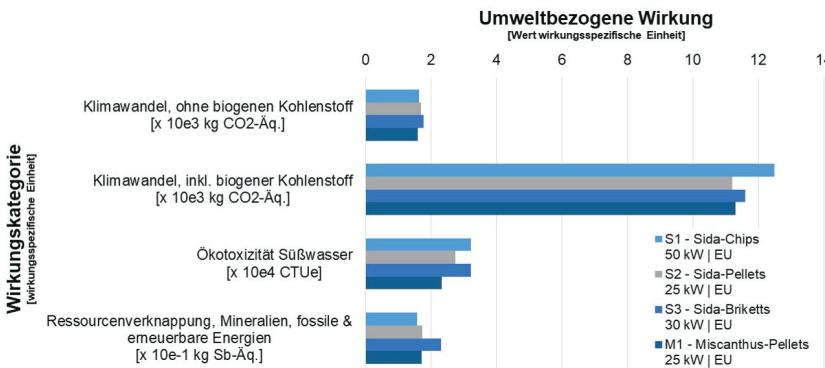


Abb. 3: Vergleichende Darstellung ausgewählter Wirkungskategorien für die Sida- und Miscanthus-Prozessketten in den jeweiligen Wirkungskategorie-spezifischen Einheiten; Bezug: EU = Europa

In einer erweiterten Betrachtung einzelner Wirkungskategorien (nicht dargestellt) lassen sich so, unter Zuordnung verursachender Prozessmodule (bspw. Stromerzeugung für den Betrieb der Pelletierung oder Produktion der Lagerkapazitäten), die jeweils verantwortlichen Elementarflüsse (z.B. Indium (Ressourcenverknappung) oder Stickstoff (Eutrophierung)) identifizieren. Durch die Variation definierter Parameter, wie bspw. des angenommenen Strommixes für den Betrieb einzelner Module, ist es möglich, den Effekt auf die Umweltwirkungen zu beobachten und somit deren Wirksamkeit abzuschätzen.

4 Fazit/Implikationen

Eine Identifizierung des umweltbezogenen vorteilhaftesten Verarbeitungsprozesses des Energieträgers Sida kann nicht eindeutig erfolgen, da eine entsprechende Signifikanz von Abweichungen fehlt. Wie der Vergleich der Sida-Prozessketten mit weiteren alternativen Biomassen zeigt, stellt sich die Umweltwirkung des Energieträgers Sida unabhängig von dessen Verarbeitungsform (Chips, Pellets, Briketts) meist als vorteilhaft dar. Hinsichtlich der Betrachtung einzelner Wirkungskategorien lässt sich grundsätzlich ein differenzierteres Bild feststellen, sodass im Falle einer Verengung des Bewertungsrahmens (bspw. CO₂-Fußabdruck) eindeutigere Aussagen getroffen werden könnten. Im Sinne einer ganzheitlichen Betrachtung ist dies jedoch nicht zielführend. Um die Unterscheidbarkeit der betrachteten Sida-Prozesse untereinander in zukünftigen Arbeiten zu schärfen, sind u.a. Anpassungen der Rahmenbedingungen oder Verschiebungen technischer oder zeitlicher Systemgrenzen realisierbar (bspw. Expansion oder Restriktion der Systemgrenzen oder zukünftige Szenarien). Für eine Einordnung in derzeitige Systeme wäre der Vergleich zu fossilen Energieträgern sinnvoll. Aus Sicht einer holistischen Bewertung der Prozessketten sind auch ökonomische wie soziale Betrachtungsweisen durch Methoden wie bspw. das „Life Cycle Costing“ oder das „Social Life Cycle Assessment“ notwendig. Auf Basis der bisherigen Arbeiten lässt sich feststellen, dass die Nutzung von

Sida hinsichtlich der Umweltwirkungen überwiegend Vorteile bietet und somit als sinnvolle Alternative zu etablierten biogenen Energieträgern wie bspw. Holzpellets angesehen werden kann.

Literatur/Quellen

- Bauer, C. (2007). ecoinvent report No. 6-IX - Holzenergie. In R. Dones (Ed.), Sachbilanzen von Energiesystemen: Grundlagen für den ökologischen Vergleich von Energiesystemen (...). Dübendorf: Swiss Centre for Life Cycle Inventories.
- Becker, A., Peters, D., & Kemnitz, D. (2019). Anbau und Verarbeitung nachwachsender Rohstoffe in Deutschland. Gülzow-Prüzen: FNR.
- Borkowska, H., Molas, R. (2012). Two extremely different crops, Salix and Sida, as sources of renewable bioenergy. In Biomass and Bioenergy, 36, 234-240.
- Borkowska, H., Styk, B., & Molas, R. (2006). Energiepflanze mit hohem Potenzial. In Erneuerbare Energien (7), 76-77.
- Borkowska, H., & Wardzinska, K. (2003). Some Effects of *Sida hermaphrodita* R. Cultivation on Sewage Sludge. Polish J. of Environmental Studies, 12(1), 119-122.
- DEPI. (2016). DEPI-Informationsblatt: Ascheentsorgung. Berlin.
- EC-COM640. (2019). Communication from the Commission (...) - The European Green Deal - COM(2019) 640 final (COM(2019) 640 final). Brusseles.
- EC. (2018). EU climate action.
Abgerufen von: https://ec.europa.eu/clima/policies/strategies/2030_en
- ecoinvent-DB. (2020). The ecoinvent Database. Zurich: ecoinvent Association.
- Eurostat. (2017). Energy from renewable sources.
Abgerufen von: <https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained>
- Eurostat. (2020). Renewable energy statistics.
Abgerufen von: <https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained>
- GaBi. (2020). GaBi LCA Software. Leinfelden-Echterdingen: Sphera Solutions GmbH
- Hauschild, M. Z., Wenzel, H. (2001). The European Person Equivalent: Measuring the personal environmental space. (...). Report no. 242. U.S. En. Cincinnati, OH.
- ISO14040. (2006). ISO 14040:2006 - Environmental management - Life cycle assessment - Principles and framework. <https://www.iso.org/standard/37456.html>
- ISO14044. (2006). ISO 14044:2006 - Environmental management - Life cycle assessment - Requirements and guidelines. <https://www.iso.org/standard/38498.html>
- Jablonowski, N. D., Kollmann, T., (...) Zapp, P., Schonhoff, A., Schrey, S. D. (2020). Full assessment of Sida (*Sida hermaphrodita*) biomass as a solid fuel. In Global Change Biology – Bioenergy, GCBB12694.
- Jablonowski, N. D., Kollmann, T., Nabel, M., Damm, T., Klose, H., (...), Schurr, U. (2017). Valorization of Sida (*Sida hermaphrodita*) biomass for multiple energy purposes. In GCB Bioenergy, 9(1), 202-214.
- Nabel, M., Schrey, S. D., Temperton, V. M. ; Harrison, L., Jablonowski, N. D. (2018). Legume Intercropping With the Bioenergy Crop *Sida hermaphrodita* on Marginal Soil. In Frontiers in Plant Science, 9, 905.
- Nabel, M., Schrey, S. D., Poorter, H., (...), Jablonowski, N. D. (2018). Coming Late for Dinner: Localized Digestate Depot Fertilization for Extensive Cultivation of Marginal Soil With *Sida hermaphrodita*. In Frontiers in Plant Science, 9, 1095.

- Nabel, M., Temperton, V. M., Poorter, H., Lücke, A., & Jablonowski, N. D. (2016). Energizing marginal soils – The establishment of the energy crop *Sida hermaphrodita* as dependent on digestate fertilization, NPK, and legume intercropping. In *Biomass and Bioenergy*, 87, 9-16.
- Nahm, M., & Morhart, C. (2018). Virginia mallow (*Sida hermaphrodita* (L.) Rusby) as perennial multipurpose crop: biomass yields, energetic valorization, utilization potentials, and management perspectives. In *GCB Bioenergy*, 10(6), 393-404.
- Pennington, D. W., (...), Hauschild, M. (2010). ILCD Handbook Public Consultation Workshop. In *International Journal of Life Cycle Assessment*, 15(3), 231-237.
- Rankin, J. (2019). Greta Thunberg tells EU: your climate targets need doubling. Abgerufen von: <https://www.theguardian.com/environment>
- Schonhoff, A., Jablonowski, N. D., & Zapp, P. (2020). Environmental competitiveness evaluation by Life Cycle Assessment for solid fuels generated from *Sida hermaphrodita* biomass. Submitted for publication in *Biomass and Bioenergy*.

Kontakt

Andreas Schonhoff, Wissenschaftlicher Mitarbeiter

Forschungszentrum Jülich GmbH | Institut für Energie- und Klimaforschung - Systemforschung und Technologische Entwicklung (IEK-STE)

✉ a.schonhoff@fz-juelich.de | Ⓛ www.fz-juelich.de/iek/iek-ste

*Guy Kabengele, Mirko Barz, Mike Böttcher, Karsten Fankhänel,
Wendelin Wichtmann, Tobias Dahms, Nina Körner,
Claudia Oehmke, Max Wenzel, Ludwig Bork*

Projekt BOOnaMoor – Untersuchungen zur thermischen Nutzung von Niedermoorbiomasse

Zusammenfassung: Im Rahmen des vom Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft geförderten Verbundprojektes BOOnaMoor (Biomasseproduktion-Optimierung auf nassen Moorstandorten und deren thermischen Verwertung) werden Untersuchungen zur energetischen Nutzung von Niedermoorbiomasse in kleintechnischen Feuerungsanlagen und in einem 800 kW Biomasseheizwerk in Malchin (Mecklenburg-Vorpommern) durchgeführt [Wichtmann et al. 2019, Barz et al. 2019]. Als Brennstoffe werden Seggen, Schilf und Rohrglanzgras in pelletierter Form und in Ballenform eingesetzt. Untersucht werden insbesondere die Auswirkungen von kritischen Inhaltsstoffen auf den Verbrennungsprozess (z.B. Auswirkungen auf das Emissionsverhalten und Risiken von Ascheagglomerationen im Kessel, Erosionen und Materialkorrosion von Anlagenteilen und Ablagerungen an Wärmeüberträgern) in Abhängigkeit von der Brennstoffvorbehandlung und dem Erntezeitpunkt der Biomassen. Ziel der Untersuchungen ist die Optimierung der Verbrennung sowie die Verbesserung der Managementempfehlungen für die Rohstoffbereitstellung. In der Heizperiode 2019/2020 wurden im November und Dezember 2019 sowie im Februar 2020 im Heizwerk Malchin Messkampagnen mit losem Halmgut durchgeführt und mit Messkampagnen aus der vorangegangenen Heizperiode (2018/2019) verglichen, bei der pelletierte Biomassen derselben Halmgüter eingesetzt worden sind. Als weiterer Vergleichsbrennstoff wurde eine Messkampagne mit Weizenstroh durchgeführt. Untersucht wurden die Auswirkungen verschiedener Parameter (Kesselleistung, Brennraumtemperaturen, Luftzahlen sowie Primär-/Sekundärluftverhältnisse) auf die Emissionswerte sowie mögliche Auswirkungen auf den Verbrennungsprozess durch Einbauten in der Brennkammer. Es zeigte sich, dass die Emissionswerte bei der Verbrennung pelletierter Brennstoffe deutlich niedriger ausfallen als bei losem Halmgut, pelletierte Biomasse allerdings eine erhöhte Verschlackungsgefahr im Kessel zur Folge hat. Die Emissionswerte beim Einsatz von Niedermoorbiomasse liegen im Vergleich zu holzartigen Brennstoffen (Holzhackschnitzel) wie erwartet höher, im Vergleich zu den Verbrennungsversuchen mit Stroh erwiesen sich die Niedermoorbiomassen als besser geeignet, um die in der TA Luft vorgegebenen Grenzwerte sicher einzuhalten [Barz et al. 2012].

Abstract: As part of the BOOnaMoor project, funded by the Federal Ministry of Food and Agriculture, studies on the energetic use of biomass from rewetted peatlands were carried out in small-scale combustion plants and in an 800 kW biomass heating plant in Malchin (Mecklenburg-Western Pomerania) [Wichtmann et al. 2019, Barz et al. 2019]. The fuels used are sedges, reed, reed canary grass in pellet form and in bale form. In particular, the effects of critical constituents on the combustion process are investigated as a function of fuel pre-treatment and time of harvesting the

biomass (e.g. effects on the emission behavior and risks of ash agglomeration in the boiler, erosion and material corrosion of plant components and deposits on heat exchangers). The aim of the investigations is to optimize combustion and improve management recommendations for the supply of raw materials. During the heating period 2019/2020, measurement campaigns with baled biomass were carried out at the Malchin heating plant in November and December 2019 as well as in February 2020. The results were compared with measurement campaigns from the previous heating period (2018/2019), in which pelletized biomasses were used. A measurement campaign with straw was carried out as a further comparison fuel. The effects of different parameters (boiler output, combustion chamber temperatures, air ratios and primary/secondary air conditions) on the emission values as well as possible effects on the combustion process due to installations in the combustion chamber were investigated. It was shown that the emission values for the combustion of pelletized fuels are significantly lower than for loose straw, but pelletized biomass results in an increased risk of slagging in the boiler. When using biomasses from paludiculture, the emission values are higher in comparison to wood-like fuels (wood chips). Compared to combustion experiments with straw, biomass from paludiculture seems to be better suited to safely comply with the limit values specified in the Technical Instructions on Air Quality Control (TA-Luft) [Barz et al. 2012].

1 Ausgangssituation

1.1 Paludi-Biomasse und dessen Nutzung als Brennstoff

Paludikultur(abgeleitet von den lat. Begriffen „palus“ = „Sumpf“ und „cultura“ = Anbau) umfasst die land- und forstwirtschaftliche Nutzung nasser Hoch- und Niedermoore für die Biomasseproduktion. Die Möglichkeit der Biomasseproduktion ist vielfältig und umfasst die Produktion von holzartigen Biomassen wie z.B. der Schwarzerle (*Alnus glutinosa*) für die stoffliche Verwertung, Torfmoos-Biomasse als alternatives Kultursubstrat im Gartenbau und die Produktion verschiedener halmgutartiger Biomassen wie z.B. Schilf (*Phragmites australis*), Rohrkolben (*Typha spec.*), Rohrglanzgras (*Phalaris arundinacea*) und Seggenarten (*Carex spec.*), für die sowohl stoffliche, als auch energetische Nutzungspfade in Frage kommen [Wichtmann et al. 2009]. Die energetische Nutzung halmgutartiger Biomasse von wiedervernässten Mooren ermöglicht hohe Energieerträge. Je nach Produktivität kann Biomasse mit einem Heizöläquivalent von 850 bis 5.000 l/ha geerntet werden [Barz et al. 2017, Dahms et al. 2017]. Die standortgerechte Biomasseproduktion auf wiedervernässten Mooren bietet somit ein großes Potential zur Substitution von fossilen Energieträgern.

Die Brennstoffqualität von Paludi-Biomasse wird durch chemische, brennstofftechnische und physikalisch-mechanische Eigenschaften bestimmt, welche je nach Pflanzenart, Erntezeitpunkt und Brennstoffaufbereitung variieren. In wiedervernässten Niedermooren werden nutzbare Dominanzbestände vor allem durch Schilf, Seggen und Rohrglanzgras gebildet (Abb 1).



Schilf <i>Phragmites australis</i>	Seggen <i>Carex spec.</i>	Rohrglanzgras <i>Phalaris arundinacea</i>
Wuchshöhe: > 3m	Wuchshöhe: > 40 cm	Wuchshöhe: 0,5-2 m
Ernte: Winter	Ernte: Sommer/Spätherbst	Ernte: Sommer/Herbst
Produktivität Ø 6 tTM/ha*a	Produktivität Ø 4,5 tTM/ha*a	Produktivität Ø 6 tTM/ha*a

Abb. 1: Typische Niedermoor Biomassen, Fotos: [Dahms et al., 2017]

In den Verbrennungsversuchen wurden Biomassen, die im Sommer und Spätsommer des Jahres 2019 im Bereich der Moorwiesen bei Neukahlen nordöstlich von Malchin geerntet worden sind, eingesetzt (Abb. 2).



Abb. 2: Standort der Paludikulturen, Moorwiesen bei Neukahlen mit Schilfröhricht (links) und Rohrglanzgrasbestand (rechts) [Fotos Barz]

1.2. Brennstofftechnischen Eigenschaften der Brennstoffpellets

Anhand der brennstofftechnischen Eigenschaften kann die Eignung eines Brennstoffes für den Einsatz in Feuerungssystemen und Anlagen beurteilt werden. Zu den wichtigsten Kriterien/Eigenschaften zählen die elementare Zusammensetzung des Brennstoffes, der Gehalt an Wasser, flüchtigen Substanzen, fixem Kohlenstoff, Asche sowie der Brenn- und Heizwert und das Ascheschmelzverhalten. Abb. 3 zeigt die für die Bestimmung der Eigenschaften entsprechenden DIN EN ISO Normen.

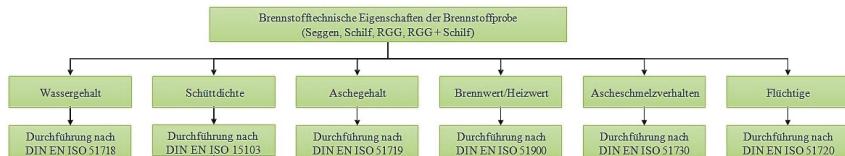


Abb. 3: Aufteilung der Brennstofftechnische Eigenschaften (Quelle: Brandt, 2019)

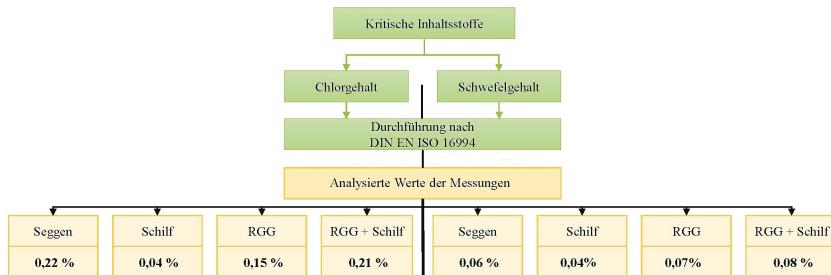
Die Ergebnisse der Brennstoffanalysen sind in Tab. 1 dargestellt.

Tab. 1: Brennstofftechnische Ergebnisse aus den Labormessungen [Quelle:Brandt, 2019]

Wassergehalt	Schüttdichte	Aschegehalt	Brennwert/ Heizwert	Ascheschmelzverhalten	Flüchtige
Seggen: 6,0 %	Seggen: 605 kg/m ³	Seggen: 6,8 %	Seggen: 18,1 MJ/kg	Seggen: 1130 °C	Seggen: 74,0 %
Schilf: 4,8 %	Schilf: 632 kg/m ³	Schilf: 4,5 %	Schilf: 17,4 MJ/kg	Schilf: 1190 °C	Schilf: 76,7 %
RGG: 4,9 %	RGG: 620 kg/m ³	RGG: 5,0 %	RGG: 17,6 MJ/kg	RGG: 1172 °C	RGG: 74,7 %
RGG + Schilf: 4,6 %	RGG + Schilf: 587 kg/m ³	RGG + Schilf: 6,1%	RGG + Schilf: 17,5 MJ/kg	RGG + Schilf: Keine	RGG + Schilf: 74,5 %

Ein weiteres wichtiges Kriterium bezüglich der Auswirkungen von kritischen Inhaltsstoffen auf den Verbrennungsprozess (wie z.B. Materialkorrosion von Anlagenteilen und Ablagerungen an Wärmeüberträgern) ist der Gehalt an kritischen Komponenten wie Schwefel und Chlor im Brennstoff [Oehmke et al. 2016]. Tab. 2 zeigt die im Ergebnis der Analysen festgestellten Werte.

Tab. 2: Chlor- und Schwefelgehalt der untersuchten Biogene Brennstoffen (Quelle: Brandt 2019)



1.3 Gesetzliche Rahmenbedingungen zur Einhaltung der Emissionsgrenzwerte

Das Bundesimmisionsschutzgesetz regelt, welche Anforderungen Feuerungsanlagen in Abhängigkeit von der Brennstoffkategorie und der Feuerungswärmeleistung erfüllen müssen. Die Maßnahmen zur Luftreinhaltung betreffen dabei im Wesentlichen Anforderungen an die einzusetzenden Brennstoffe, die Feuerungstechnik, die Abgasreinigung und an die Emissionsüberwachung. Die einzuhaltenden Emissionsgrenzwerte für Holz und Stroh sowie ähnliche Stoffe sind in Tab. 3 dargestellt.

Tab. 3: Emissionsgrenzwerte BImSchV/ TA-Luft (Quelle: Brandt 2019)

Rahmenbedingung Werte in g/m³	Feuerungswärmeleistung P kW	CO	NO _x	Staub	SO ₂	O ₂
1. BImSchV						
(Geltungsbereich nach §3, Absatz 1 Nummer 5a oder nach §3, Nummer 8 und 13)	$\geq 4 \leq 500$	0,4	0,5	0,02	-	13 %
Anlagen ab 31.12.2014 für Pelletöfen ohne Wassertaschen	$\geq 4 < 100$	0,4	0,5	0,02	-	13 %
		0,25	0,5	0,03	-	13 %
TA Luft	MW					
Nr. 5.4.1.2.1 für naturbelassenen Holz	< 2,5			0,1	-	11 %
	< 5	0,15	0,4	0,05	-	11 %
Nr. 5.4.1.3 für Stroh und ähnliche Stoffe	< 1	0,25	0,5	0,05	0,35	11 %
	< 50	0,25	0,4	0,02	0,35	11 %

2 Messkampagnen im Heizwerk Malchin

2.1. Heizwerk Malchin

Durch die Installation eines Biomasseheizkessels (Abb. 4) der Firma LIN-KA/ Danstoker mit einer Feuerungsleistung von 800 kW im bestehenden Erdgas-Heizwerk im Jahr 2014 wurde die Möglichkeit geschaffen, über das bestehende Nahwärmenetz einen Teil des Heizenergiebedarfes der Stadt (543 Wohneinheiten + 2 Schulen + KITA + Bürogebäude) nachhaltig mit Wärme aus Erneuerbaren Energieträgern zu versorgen [Bork 2019].

Die aus der Verbrennung von Biomasse bereitgestellte Wärme dient zur Abdeckung von Grund- und Mittellast am Standort. Als Brennstoff für den Biomassekessel kann neben der im Bereich des Kummerower Sees erzeugten Niedermoorbiomasse auch Stroh bzw. Holz in Form von Pellets oder Holzhackschnitzeln eingesetzt werden.

In der Heizperiode 2019 sind insgesamt 4.200 Ballen Niedermoorbiomasse verbraucht und 3.370 MWh Wärmeenergie produziert worden.

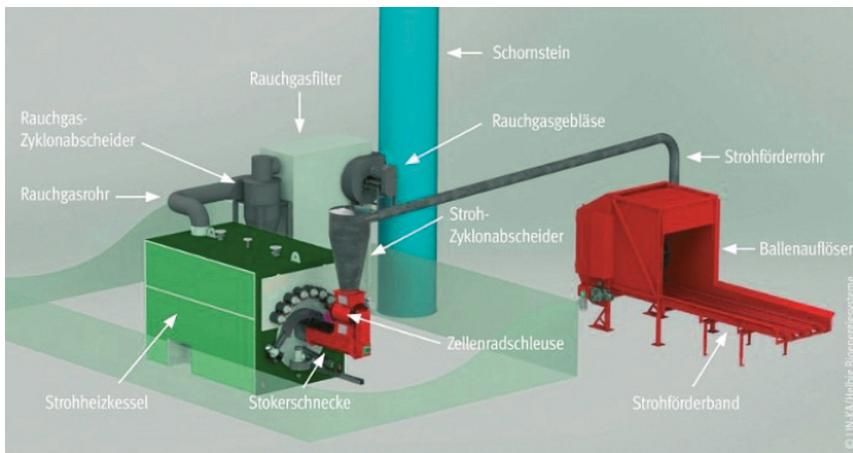


Abb. 4: Prinzip Aufbau der Heizwerk Malchin (Quelle: Agrotherm GmbH, 2019)

2.2. Messkampagnen

Untersuchungen zur Verbrennung von Niedermoorbiomassen wurden im Februar 2019 mit pelletierter Biomasse und im November und Dezember 2019 sowie im Februar 2020 mit losem Halmgut (Ballen mit Seggen, Rohrglanzgras und Stroh) (siehe Abb. 5) durchgeführt.



Abb. 5: Bestückung des Förderbands mit Niedermoorbiomasse-Rundballen (Foto: Kabengele)

Untersucht wurden die Auswirkungen verschiedener Parameter (Kesselleistung, Brennraumtemperaturen, Luftzahlen sowie Primär-/Sekundärluftverhältnisse) auf die Emissionswerte sowie mögliche Auswirkungen auf den Verbrennungsprozess durch Einbauten in der Brennkammer. Abgasproben zur Analyse der Emissionswerte wurden dem Rauchgasstrom unmittelbar nach dem Verlassen der Brennkammer vor dem Rauchgasfilter (Abb. 6a) sowie an einer weiteren Probenahmestelle unmittelbar vor dem Rauchgaskamin (Abb. 6b) entnommen.



Abb. 6a: Probenahmestelle vor Staubfilter



Abb. 6b: Probenahmestelle vor Rauchgaskamin

2.3. Ergebnisse

Die 800 kW Feuerungsanlage in Malchin fällt aufgrund des Einsatzes halbgutartiger Brennstoffe unter den Geltungsbereich der TA Luft, hier Absatz 5.4.1.2.4a (Anlagen zur Erzeugung von Strom, Dampf, Warmwasser, Prozesswärme oder erhitztem Abgas in Feuerungsanlagen durch den Einsatz anderer als in Nummer 1.2.1 oder 1.2.3 genannter fester Brennstoffe). Die gemessenen Emissionswerte sind gemäß der in Tab. 3 dargestellten Regelungen auf einen Bezugssauerstoff von 11 % umzurechnen und mit den vorgegebenen Emissionsgrenzwerten abzugleichen. Bei den im Februar 2019 eingesetzten Biomasspellets handelte es sich um Mischpellets, bestehend aus Schilf, Seggen und Rohrglanzgras. Die Pellets weisen eine weitgehend einheitliche Form ($\varnothing 8\text{ mm}$, L 10-20 mm, siehe Abb. 7) auf und zeichnen sich durch eine hohe Schütt- und Energiedichte (ca. 610 kg/m³, 18,5 MJ/kg) aus. Der Wassergehalt betrug 6,5%, wodurch eine problemlose Lagerung über lange Zeiträume ermöglicht wird.



Abb. 7: Pellets aus Niedermoorbiomasse Foto: [Dahms et al., 2017]

Die Ergebnisse der Verbrennungsversuche mit Halmgutpellets sind in Abb. 8 exemplarisch über einen Messzeitraum von 30 Minuten dargestellt.

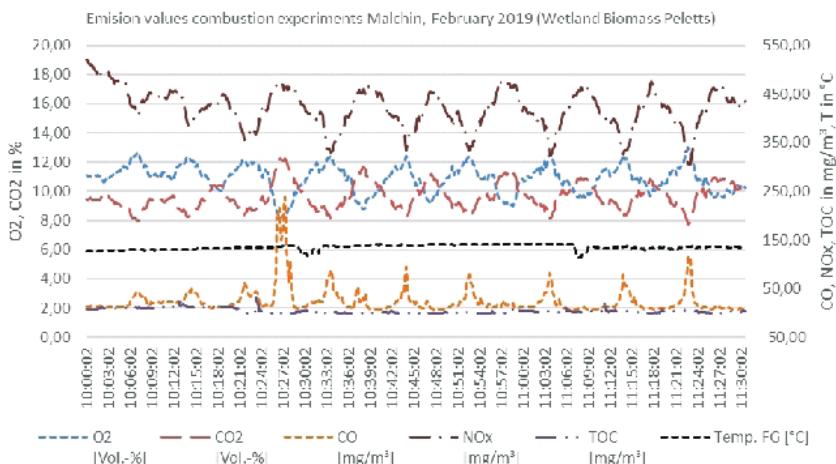


Abb. 8: Emissionswerte bei der Verbrennung von Halmgutpellets im Heizwerk Malchin bei 800 kW Nennleistung (Werte aus der Messkampagne im Februar 2019)

Die zyklischen Schwankungen der Emissionswerte sind auf die diskontinuierliche Beschickung der Anlage mit Brennstoff (der Eintrag erfolgt zyklisch im Takt von etwa 3 Minuten) zurückzuführen. Trotz der dargestellten Schwankungen verläuft die Verbrennung stabil und die in Tab. 3 dargestellten Grenzwerte werden sicher unterschritten. Da aus ökonomischen Gründen (Kosten der Pellets) ein dauerhafter Betrieb der Anlage mit Pellets aus Niedermoorbiomasse nicht tragbar ist wurden die Messungen in der Heizperiode 2019/20 mit in Ballenform bereitgestellter Biomasse durchgeführt. Die verwendeten Rundballen haben die Abmessung von 100 cm x 125 cm und ein Gewicht von durchschnittlich 220 kg/Ballen. Aufgrund widriger Wetterbedingungen zum Erntezeitpunkt beträgt der Wassergehalt der in Ballen gepressten Biomasse ca. 20 %. Der Heizwert reduziert sich dadurch auf ca. 14,3 MJ/kg. In Abbildung 9 sind exemplarisch für die Verbrennung von in Ballen bereitgestellter Niedermoorbiomasse Ergebnisse der Verbrennung von Seggen aus der Messkampagne vom Februar 2020 dargestellt. Aus der Darstellung des zeitlichen Verlaufs der Emissionswerte ist ersichtlich, dass sich stabile Verbrennungsverhältnisse erst ca. 5 Minuten nach Beginn der Messreihe einstellen. Nach Erreichen eines stabilen Betriebes sind auch hier die auf die zyklische diskontinuierliche Beschickung der Feuerungsanlage zurückzuführenden typischen Schwankungen der Emissionswerte erkennbar.

Emission values combustion experiments Malchin, February 2020 (Sedge bales)

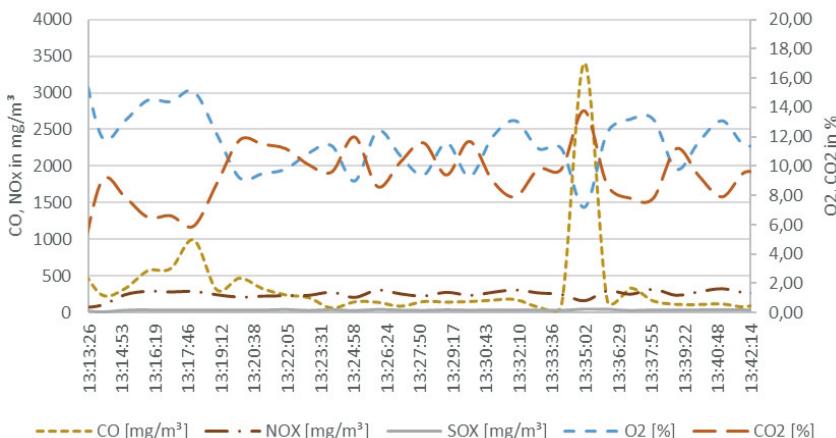


Abb. 9: Emissionswerte bei der Verbrennung von Seggen im Heizwerk Malchin bei 800 kW Nennleistung (Werte aus der Messkampagne im Februar 2020)

Die Werte für NOx liegen auch bei diesem Versuch deutlich unter den in Tabelle 3 angegebenen Grenzwerten. Für Kohlenmonoxid pegeln sich die Werte nach Erreichen eines stabilen Anlagenbetriebes zunächst auf Werte unterhalb des in der TA Luft vorgegebenen Grenzwertes von 0,25 g/m³ ein, allerdings ist nach ca. 20 Minuten Verbrennungsbetrieb ein deutlicher Peak der CO-Werte, verbunden mit einem Einbruch der Luftzahl (Rückgang des O₂-Gehaltes im Abgas auf < 8%) erkennbar. Ursachen hierfür sind Schwankungen der durch die Beschickungseinrichtungen in die Brennkammer eingebrachten Brennstoffmenge sowie mögliche Inhomogenitäten des eingebrachten Brennstoffes (z.B. ein erhöhter Feinpertikelgehalt der aus dem Ballenauflöser resultierenden Halmgutfraktion).

3 Ausblick

Im Ergebnis der bisherigen Messungen wurde gezeigt, dass die Feuerungsanlage in Malchin sehr gut für den Einsatz von Niedermoorbiomasse geeignet ist. Die Verbrennung von pelletierter Niedermoorbiomasse zeichnet sich durch stabile Emissionswerte und (aufgrund der hohen volumenbezogenen Energiedichte der Pellets) eine erhöhte Energiefreisetzung in der Kesselanlage aus. Aus ökonomischen Gründen (hohe Brennstoff- und damit Energiebereitstellungskosten bei Pelleteinsatz) orientieren sich die weiteren Arbeiten auf eine Optimierung des Anlagenbetriebs beim Einsatz von in Ballen gepresster Biomasse. Die exemplarisch für die Verbrennung von Seggen dargestellten Ergebnisse (ähnliche Ergebnisse wurden auch beim Einsatz von Rohrglanzgras und Stroh erzielt) zeigen, dass sowohl anlagentechnische Optimierungen als auch Einflussnahmen auf die Prozessparameter (z.B. Verhältnis von Primär- zu Sekundärluft,

Brennraumtemperatur etc.) zu einer Reduzierung der Emissionswerte beitragen können. Vor der Fortführung der Messkampagnen in der Heizperiode 2020/21 werden daher durch den Betreiber der Anlage Umbauten im Kessel vorgenommen, die vor allem auf die Reduzierung der zeitweise hohen CO-Werte im Abgas ausgerichtet sind. Hierzu zählen unter anderem die Veränderungen der Position der Sekundärluftzuführung im Brennraum und der Einbau von Umlenkvorrichtungen zur Turbulenzerhöhung im Bereich des Übergangs der Rauchgase aus der Brennkammer zu den Wärmeüberträgern. Ergänzend werden in den Laboren der HTW kleintechnische Verbrennungsversuche in einer Laboranlage und einer kleintechnischen Feuerungsanlage mit 15 kW Feuerungsleistung durchgeführt, um reaktionskinetische Daten zu ermitteln. Eine Fortführung der Messkampagnen in der kommerziell betriebenen Anlage der Fa. Agrotherm in Malchin ist ab Oktober 2020 vorgesehen.

Literatur/Quellen

- [Wichtmann et al. 2019] Wichtmann, W., Barz, M., Bork, L., Dahms, T., Kabengele, G., Körner, N., Oehmke, C., Wenzel, M. 2019: BoNaMoor-Biomasseproduktion und Optimierung auf nassen Moorstandorten und deren thermische Verwertung, 13. BioEnergie Forum Rostock, ISBN 978 3 86009 487 7
- [Barz et al. 2007] Barz, M., Ahlhaus, M., Wichtmann, W. & T. Timmermann (2007): Utilisation of common reed as a renewable ressource. 15th European Biomass Conference and Exhibition. International Congress Center Berlin. 7. - 11.5.2007. Proceedings, 5 pages
- [Barz et al. 2019] Barz, M., Kabengele, G., Brandt A., Wichtmann, W., Wenzel M., Wichmann, S., Oehmke C., Dahms, T., Borg, L. (2019): Rewetted Peatlands as Source for Bioenergy Production - 19th International Scientific Conference - "Sakharov Readings: Environmental Problems of the 21st Century" Minsk, May 23rd - 24th 2019
- [Brandt 2019] Brandt, A. (2019): Analyse der verbrennungstechnischen Eigenschaften von Biomasse aus Paludikulturen, Konzeption und Aufbau eines Verbrennungsprüfstandes Masterarbeit, HTW-Berlin
- [Barz et al. 2017] Barz, M.; Wichtmann, W. (2017): Rewetted Peatlands as Source for Bioenergy Production, In: ЭКОЛОГИЧЕСКИЙ ВЕСТНИК, S. 98-104, 2017, ISSN 1994-2087
- [Bork, 2019] Bork, L. (2019): Thermische Moorgrünlandverwertung in Malchin, Konferenzbeitrag „Brandenburgs Moore klimafreundlich bewirtschaften - Chancen für die Landwirtschaft!“; Potsdam, 27. Februar 2019
- [Kaltschmitt et al. 2016] Kaltschmitt, M., Hartmann, H. & Hofbauer, H. (2016): Energie aus Biomasse: Grundlagen, Techniken und Verfahren. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg.
- [Dahms et al. 2017] Dahms, T., Oehmke, C., Kowatsch, A., Abel, S., Wichtmann, S., Wichtmann, W. & Schröder, C. (2017): Halmgutartige Festbrennstoffe aus nasen Mooren. Universität Greifswald, Greifswald Moor Centrum. 73 S. (2. Auflage)

- [Oehmke et al. 2016] Oehmke, C. & Wichtmann, W. (2016): Kritische Inhaltsstoffe von Festbrennstoffen aus Paludikultur. In: Wichtmann, W., Schröder, C & H. Joosten (2016): Paludikultur – Bewirtschaftung Nasser Moore. Klimaschutz, Biodiversität, regionale Wertschöpfung. Verlag Schweizerbart, p. 50 – 51
- [Barz et al. 2012] Barz, M., Tanneberger, F. & W. Wichtmann (2012): Sustainable Production of Common Reed as an Energy Source from Wet Peatlands. Proceedings of the 4th International Conference on Sustainable Energy and Environment, A Paradigm Shift to Low Carbon Society 27-29 February 2012, Bangkok, Thailand, ISBN 978-616-202-573 -4, p. 780 – 787
- [Wichtmann et al. 2009] Wichtmann, W., Wichmann, S. (2009): Endbericht zum Forschungsprojekt, Energiebiomasse aus Niedermooren (ENIM), gefördert mit Mitteln der Deutschen Bundesstiftung Umwelt (DBU), Greifswald, Dezember 2009.
- [Barz et al. 2007] Barz, M.; Ahlhaus M.; Wichtmann W.; Timmermann T. (2007): Production and energetic utilization of biomass from rewetted peatlands. In: Scientific Proceedings of the Riga Technical University, Section Heat, Power and Thermal Physics, 2007, ISSN 1691-5054

Kontakt

Guy Kabengele, Wissenschaftlicher Mitarbeiter

Prof. Dr.-Ing. Mirko Barz, Mike Böttcher, Karsten Fankhänel

Hochschule für Technik und Wirtschaft zu Berlin (HTW-Berlin)
FB 1 – Regenerative Ernegasysteme

⌚ +49 (0)30.5019-3884 | ✉ kabenge@htw-berlin.de

🌐 <https://www.moorwissen.de/de/paludikultur/projekte/bonamoor/index.php>

*Dr. Wendelin Wichtmann, Tobias Dahms, Nina Körner, Claudia Oehmke,
Max Wenzel*

Universität Greifswald, Institut für Botanik und Landschaftsökologie – Partner im
Greifswald Moor Centrum

Ludwig Bork, Geschäftsführer

Agrotherm GmbH, Malchin

*Daniela Pomsel, Kerstin Wurdinger, Laura García, Nora Szarka,
Volker Lenz*

Ölersatz Biomasse Feuerung

Schlagwörter: Heizungsaustausch, Biomassefeuerung, Ölersatz, Hemmnisanalyse und -auflösung

Zusammenfassung: Seit einigen Jahren stagniert die Wärmewende in Deutschland. Im Rahmen des Klimaschutzgesetzes versucht die Bundesregierung neue Impulse zu setzen (Bundestag, 2019). In diesem Zuge wurde auch ein Verbot von neuen Ölheizungen, die keine Kombination mit erneuerbaren Energien aufweisen, beschlossen (Bundesregierung, 2019). Bisher wird jedoch immer noch stark von den Marktakteuren für eine Weiternutzung von Ölheizungen argumentiert (DHZ, 2020 und Vaillant, 2020).

In einem vom BMWi geförderten Projekt untersucht das DBFZ seit Herbst 2019 die für kurzfristig einbaubare biomassebasierte Optionen bestehenden Hemmnisse bei der Umsetzung und Möglichkeiten zu deren Auflösung. Im Folgenden werden die methodische Herangehensweise, sowie die Ergebnisse der Hemmnisanalyse und der derzeitige Stand des Projekts im Hinblick auf Lösungsansätze vorgestellt. Zwei der wesentlichen identifizierten Hemmnisse sind Informationsbedarfe von Heizungsnutzern und -installateuren im Hinblick auf eine zeit- und fristgerechte Erschließung von vorhandenen Kenntnisse (Verteilung, Aufbereitung und Verdichtung strukturierter und unstrukturierter Informationen), sowie die vermeintlich längeren Ersatzzeiten von z.B. Biomassefeuerungen bei einem plötzlichen Ausfall der Ölfeuerung (Havarie).

Erste Vorschläge zur verbesserten Ansprache der beiden Hauptakteursgruppen, erarbeitet mit der Hilfe von Kommunikations-, Medien- und Marketingexperten, werden vorgestellt. Auch werden bereits in der Etablierung befindliche Konzepte der Biomassekesselhersteller zur Lösung der Zeitproblematik erörtert.

Dieser Textbeitrag schließt mit einem Ausblick auf die weiteren Arbeiten, erwartete Ergebnisse und Möglichkeiten zur Mitarbeit.

Abstract: For some years now, heat transition in Germany is stagnating. Within the framework of the Climate Protection Law, the Federal Government is attempting to generate new impulses (Bundestag, 2019). In this context, a ban on new oil-fired heating systems that do not use a combination with renewable energies was also decided (Bundesregierung, 2019). However, it is still argued that no renewable options were available that could be installed in the short term to replace existing oil hearings. This way, it is tried to justify their continued existence ((DHZ, 2020 und Vaillant, 2020)).

In a project funded by the Federal Ministry of Economics and Technology (BMWi), the DBFZ has been investigating the existing obstacles and possibilities for biomass-

based options since autumn 2019. It will be shown the methodological approach, the results of the obstacle analysis and the status of the project with regard to possible solutions. Two of the main obstacles are (a) deficits among users and heating installers to sufficiently index information (i.e. deficits in the distribution, processing and compression of structured and unstructured information) and (b) expected longer replacement times of e.g. biomass furnaces in case of a sudden damage of the oil heating (accident).

First proposals to improve the addressing of the two main groups of actors, elaborated with the help of communication, media and marketing experts, are presented. Moreover, concepts already being established by biomass boiler manufacturers to solve the time problem will also be discussed.

The presentation concludes with an outlook on further work, expected results and possibilities for cooperation.

1 Hintergrund und Stand der Nutzung von Öl- und Biomasseheizungen

Ölheizungen haben nach den kaum noch gebrauchten Kohlefeuerungen und reinen Stromheizungen (Strommix-Deutschland), die höchsten spezifischen THG-Emissionen der heutigen Heizoptionen (Ölheizung ca. 319 g/kWhCO₂-Äquiv, Erdgasheizungen 250 mg/kWhCO₂-Äquiv und Holz-Pellet-Heizung 19 mg/kWhCO₂-Äquiv) (GEMIS, 2017). Dies gilt selbst für Öl-Brennwertgeräte. Daher hat die Politik 2019 mit dem Klimaschutzprogramm 2030 beschlossen, dass ab 2026 keine neuen Ölheizungen mehr eingebaut werden sollen, außer sie werden im Verbund mit anderen erneuerbaren Energien installiert (Bundesregierung, 2019).

In Deutschland waren Ende 2018 rund 5,5 Mio. Ölkesselanlagen zur Wärmebereitstellung installiert – knapp 27 % aller Bestandsheizanlagen (Statista, 2018). Der Einsatz von Heizöl ^{extra leicht} für Heizzwecke betrug 2018 13,26 Mio. t (164 TWh/a) (BAFA, 2020). Die Neuinstallationen von Ölheizungen betrug rund 62.000 Geräte pro Jahr (2018) mit sinkender Tendenz; das entspricht etwa 8,5 % der Neuinstallationen für zentrale Wärmeversorger (Baulinks, 2020).

Im niedrigen Leistungsbereich bis etwa 100 kW gelten Pelletkessel als direkte und sofortige Ersatzoption von Ölheizungen, da ebenfalls ein hausinternes Lager genutzt werden und die Belieferung über Tankwagen erfolgen kann. Ein Gasleitungsanschluss ist nicht erforderlich. Für größere als 100 kW Leistungen kommen auch Holzhackschnitzelfeuerungen oder Kombinationen aus Biomassefeuerung und Spitzenlastölb- oder Gaskessel in Frage. Bisher wurden in Deutschland bis Ende 2018 rund 0,46 Mio. Pelletkessel (inkl. Pelletöfen) installiert bei aktuellen Neuinstallationszahlen von Pelletkesseln für 2018 von 15.200 (2,1 % der neuinstallierten Zentralheizungsanlagen) (DEPI, 2020).

Der Vergleich dieser wenigen Zahlen zeigt bereits, dass es Biomassekessel als erneuerbare Austauschoption bisher nicht im Ansatz geschafft haben den Einsatz von klimaschädlichem Heizöl abzulösen.

In dem vom BMWi geförderten Projekt OBEN (FKZ-Nr. 03KB156, <https://www.dbfz.de/oben>) wird untersucht, welche Hemmnisse diesen Status Quo aufrechterhalten. Es sollen Lösungen auf verschiedenen Ebenen aufgezeigt werden, die es technisch erlauben jede bestehende Ölheizung auch unter den im Havariefall bestehenden zeitlichen Zwängen durch eine erneuerbare Wärmeoption zu ersetzen. Dies erscheint umso wichtiger, als die Politik die Option offen gelassen hat in der Kombination mit minimalem Einsatz erneuerbarer Wärme (wie z.B. Solarthermiekleinanlage) weiterhin neue Ölketten zu installieren, die dann aus technischer Sicht mindestens bis 2040 weiterhin massiv CO₂ emittieren.

2 Hemmnisse beim Austausch von Ölketten

Zu Beginn des Projekts wurde eine internationale Literaturanalyse durchgeführt, um aktuelles Wissen über bestehende Hemmnisse und Barrieren beim Austausch von Ölketten zu sammeln. Die daraus resultierende Liste wurde von Wissenschaftlern des DBFZ im Rahmen eines internen Workshops diskutiert, verifiziert und ergänzt. Sie wurde auch von einigen externen Experten wie Anlagenherstellern, dem Deutschen Bioenergieverband und Schornsteinfegern überprüft und priorisiert. Parallel dazu wurden Endnutzer auf einer Baumesse befragt, um ihre aktuellen Bedürfnisse hinsichtlich eines Heizungsaustauschs und der am häufigsten genutzten Informationskanäle zu ermitteln. Die Ergebnisse wurden ebenfalls in die Liste aufgenommen. Um ein gutes Verständnis der Zielgruppen, ihres Nutzerverhaltens und erfolgversprechender Kommunikationsstrategien zu erhalten, wurden qualitative Telefoninterviews mit Sozialwissenschaftlern (Umweltpsychologie, Verhaltenswissenschaften) durchgeführt und die Ergebnisse hinsichtlich ihrer Relevanz für die erfolgreiche Weiterführung des Projekts ausgewertet.

Die identifizierten Hemmnisse wurden in zunächst in 9 Gruppen geclustert und nach den Nutzerinterviews auf der Baumesse um die Gruppen 10 und 11 ergänzt (s. Abb. 1). Die Hemmnisse wurden in politische (p), menschliche (m), ökologische (ö), kommerzielle (k) und technische (t) Hemmnisse eingeteilt. Die Liste bestätigte die Vermutung, dass es mehrere menschliche Hindernisse seitens der Handwerker und Nutzer gibt, wie beispielsweise Informations-/ Wissensdefizite, Gewohnheiten, Angst vor Komfortverlust, fehlendes Vertrauen (z.B. in Ausfallsicherheit und sichere Brennstoffverfügbarkeit) und Wahrnehmungsdefizite gibt. Dazu zählt auch die Schwierigkeit, aus einer großen Masse an strukturierten und unstrukturierten Daten (verlässlich oder weniger verlässlich und auf verschiedensten sozialen Kommunikationskanälen) diejenigen zu einem konkreten Bedarf bei der eigenen Heizung so aufzubereiten, dass Nutzer oder Handwerker mit ihnen der komplexen Fragestellung nach einer systemischen Betrachtung der Energieversorgung im eigenen Lebensumfeld gerecht werden können.

Um diesen Hemmnisse entgegenzuwirken, ist es wichtig, die spezifischen "windows of opportunity" zu kennen, wenn Endnutzer anfangen, über ihr Heizsystem nachzudenken und einen erhöhten Bedarf an verlässlichen Online- und Offline-Informationen haben, z.B. beim Kauf eines älteren Ein- oder Zweifamilienhauses oder beim plötzlichen Schaden an der vorhandenen Ölheizung. Dieses Zeitfenster (Konzeptphase) sollte genutzt werden, um Endnutzer mit maßgeschneiderten Informationen über Biomasse-Heizsysteme zu versorgen und so ihren individuellen Meinungsbildungsprozess zu unterstützen. Doch welche Informationskanäle wählen die Endnutzer in der Regel? In Bezug auf Heizsysteme werden die Endnutzer mit Personen in Kontakt treten, die sie kennen und denen sie vertrauen, z.B. ihrem Installateur, Schornsteinfeger, Bankberater, Energieberater. Andere Peer-Groups wie Nachbarn, Verwandte und Freunde sind wichtig, um solche Entscheidungen zu inspirieren, aber Schlüsselinformationen für einen Systemaustausch werden bei diesen Gruppen nicht aktiv gesucht. Sie werden vielmehr weitere Informationen aus dem Internet (z.B. www.co2online.de, www.saena.de) und von Verbrauchermessen sammeln, um sich eine eigene Meinung zu bilden. Um den Bedarf der Endbenutzer an Online-Informationen zu decken, könnte es eine Lösung sein, eine Website mit allen relevanten Informationen oder eine App mit einem Entscheidungsbaum zu entwickeln, die dabei hilft, eine erneuerbare Alternative für die (kaputte) Ölheizung zu finden. Die Projektgruppe wird untersuchen, ob dies eine realisierbare Option ist, aber auch andere Hindernisse und den gesamten Umstellungsprozess selbst betrachten. Möglicherweise gilt es auch ein generelles Umdenken zu befördern: Erneuerbare Wärmelösungen sollten nicht mehr als komplizierte und herausfordernde „Sonderlösungen“ verstanden werden, sondern als Standardlösungen, für die der Kunde sich genauso vertrauensvoll entscheidet, wie bisher für einen Öl- oder Gaskessel. Die teilweise komplexeren Fragestellungen zur konkreten Umsetzung sollten dazu ggf. komplett auf die Fachebene verlagert werden, um die Masse der Kunden von der Flut an verfügbaren Informationen zu entlasten.

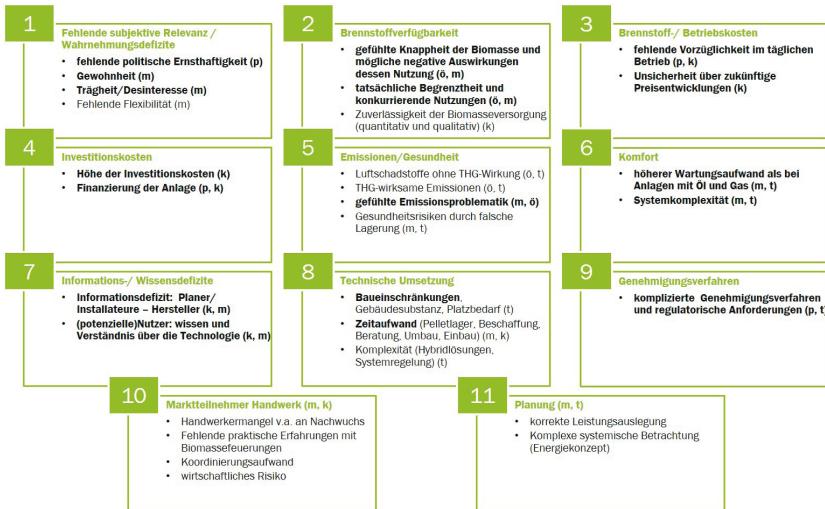


Abb. 1: identifizierte Hemmnisgruppen beim Ersatz von Ölheizungen durch Biomassefeuerungen, höher priorisierte Hemmnisse sind hervorgehoben, politische (p), menschliche (m), ökologische (ö), kommerzielle (k) und technische (t) Hemmnisse

Im Folgenden werden beispielhaft mögliche Lösungsansätze für zwei ausgewählte Hemmnisse weitergehend erläutert: Aktivierung der Heizungsinstallateure und Zeitknappheit im Havariefall. Beide Herausforderungen erscheinen als besonders relevant, da der Heizungsbauer als erster Ansprechpartner grundlegenden Einfluss auf die Auswahlentscheidung des Kunden hat und der Havariefall lange Informations- und Entscheidungsketten verbietet.

3 Lösungsansatz für Heizungsinstallateure

Grundsätzlich ist die Aufstellung und der Anschluss eines Pelletkessels im Ersatz zu einer Ölfeuerung nicht signifikant schwieriger als der Ersatz eines bestehenden Ölbeckens. Für einen später reibungsfreien Betrieb ist jedoch die Auswahl einer geeigneten Leistung von höherer Relevanz, da eine Überdimensionierung zu einem häufigen Takten der Anlage mit erhöhten Emissionen und deutlich sinkender Effizienz und im Nachgang dann auch zu einem erhöhten Verschleiß und höherer Störanfälligkeit führen kann. Zudem werden durch viele Förderprogramme die Einrichtung eines Pufferspeichers gefordert, so dass die Komplexität des Systemaufbaus steigt. Eine besondere Herausforderung besteht in der Errichtung des Pelletlagers, das im Unterschied zu gegebenenfalls notwendigen Austausch eines Öltanks besondere Fähigkeiten (Mauern, Holzbau) erfordert, die nicht jeder Heizungsinstallateur bieten kann. Unabhängig von der Frage nach dem Brennstoff kann ggf. durch die Anpassung der Kesselleistung und/oder bei zusätzlichem Wunsch nach Brennwertnutzung im Zusammenhang mit der neuen Feuerung eine Anpassung des vorhandenen Schornsteins notwendig werden. Mit der Verbindung unterschiedlicher Gewerke steigt somit auch der

Koordinierungsaufwand, das Fehlerrisiko und das Risiko nicht eindeutiger Haf tungssituationen. Eine besondere Herausforderung entsteht, wenn eine solarthermische Anlage vorhanden ist und mit ins System eingebunden werden soll. Untersuchungen am DBFZ haben gezeigt, dass bei üblichen Systemregelalgorithmen 5 bis 10 %-Punkte der Systemeffizienz verloren gehen können (Büchner D., Schraube, C., 2019), so dass hier ein besonderes Augenmerk auf die Systemregelung gelegt werden muss.

Kommt hinzu, dass der Heizungsinstallateur noch wenig oder gar keine Erfahrungen mit Biomassefeuerungen hat und somit davon ausgehen muss, dass es zu mehreren Folgeterminen nach der Inbetriebnahme kommen wird, sinken die Chancen für den Heizungsinstallateur seine Dienstleistung an dem Objekt angemessen vergütet zu bekommen.

Selbst wenn die absolute Marge aufgrund der höheren Gesamtkosten deutlich über denen einer Ölfeuerung inkl. Solarthermieanlage liegt, können schon wenige zusätzliche Nachjustierungstermine im Rahmen der Gewährleistung diese vollständig aufzehren. Daher entscheiden sich viele Heizungsinstallateure für den einfachen und vielfach erprobten und deshalb sicherer Weg, lieber die herkömmlichen Öl- und ggf. Gastechnologie einzubauen und trotz kleinerer absoluten Margen über höhere „sorgenfrei“ installierte Stückzahlen einen sicheren Gewinn einzufahren und – aus ihrer Sicht unnötigen oder unerwünschten – Konflikten vorzubeugen.

Zudem besteht für Heizungsinstallateure bei Pelletkesseln ein weiteres erhöhtes wirtschaftliches Risiko: Die Kosten und der Zeitaufwand je umgesetzter Anlage sind deutlich höher als bei Ölheizanlagen. Dies führt zu einem erhöhten Risiko, dass bei Zahlungsausfall des Kunden, dem Heizungsinstallateur ein existenzbedrohender Verlust entsteht (weniger Kunden mit jeweils höherem Einnahmeausfallpotenzial je Kunde) – fest mit dem Gebäude verbundene Einrichtungen (wie ein Kessel oder ein eingebautes Pelletlager) dürfen auch bei nicht erfolgter Bezahlung nicht wieder vom Lieferanten mitgenommen werden und können auch nicht einzeln gepfändet werden (Sauer, r., Arendt, S., Hampel, H., 1997).

Tab. 1 gibt einen Überblick über die aufgeführten Herausforderungen für Heizungsinstallateuren und zeigt Lösungsoptionen auf, die im Rahmen des Projekts identifiziert wurden und in den kommenden Monaten weiter untersucht und experimentell ausprobiert werden sollen.

Tab. 1: Überblick über Herausforderungen für Heizungsinstallateure und mögliche Lösungsansätze

Herausforderung	Bemerkung	Lösungsoption
korrekte Leistungsauslegung	Fehler haben negativere Folgen als bei Ölkesseln	Online-Experten-Hilfe inkl. Rückgriff auf Kesselhersteller
höhere Systemkomplexität	z.B.: zusätzliche Einbindung Puffer, Optimierung Kesselbetrieb nötig	automatisierte und standardisierte Anschluss- und Regelungsoptionen + Online-Experten-Hilfe
Errichtung Pelletlager	ggf. mauern und Holzbau nötig, zeitlicher Aufwand	Einsatz von vorgefertigten Metalltanks oder Gewebesilos zumindest als Übergangslösung
fehlende Erfahrung	Risiko von Gewährleistungsterminen und Verlust der Gewinnmarge	besondere Betreuung durch Kesselhersteller bei ersten Objekten + ggf. finanzielle Unterstützung durch Kesselhersteller
Ausfallrisiko	bei fehlender Zahlung durch Kunden	Einrichtung von Sonderkreditprogrammen bei der KfW zur Zwischenfinanzierung von Zahlungsausfällen bis zur gerichtlichen Durchsetzung

Für die korrekte Leistungsauslegung, den Umgang mit der erhöhten Systemkomplexität und der fehlenden Erfahrung sind die Möglichkeiten der Digitalisierung auszuschöpfen. So können Schritt-für-Schritt-Onlinehilfen zielgruppenspezifisch eine erste gute Hilfe sein. Werden diese verbunden mit einer Hotline zum Kesselhersteller können auch konkrete Fragen schnell und zielführend beantwortet werden. Zukünftig können hier sogar noch weitergehende Optionen zum Einsatz kommen. Mittels Augmented Reality (AR)¹ könnte dem Heizungsinstallateur vor Ort bei der Aufnahme der Platzverhältnisse, der Auslegung und Aufstellungsplanung der Komponenten, der Projektumsetzung und der Inbetriebnahme und Parametrisierung Online geholfen werden. Virtual Reality (VR)² könnte darüber hinaus dem Experten an seinem Firmenarbeitsplatz helfen die örtlichen Gegebenheiten kennen zu lernen, verschiedene Lösungsansätze auszuprobieren und dann den passendsten Lösungsvorschlag an den Heizungsinstallateur vor Ort zu übersenden. Dies wirkt sich natürlich nur dann positiv aus, wenn der Heizungsinstallateur interessiert an diesem „neuen“ Markt ist und auch eine gewisse Aufgeschlossenheit gegenüber modernen Medien besitzt. Sollte er dagegen gar keine Zeit oder kein Interesse an einem für ihn neu zu erschließenden Themenfeld haben, bleibt ggf. in Zeiten des Fachkräftemangels nur in einem weiteren Schritt beide Ansätze dazu zu nutzen, um technikaffine Gebäudeeigentümer dazu zu befähigen Eigeninstallationen und Eigenoptimierungen vorzunehmen.

¹ Augmented Reality: Hier werden mittels Datenbrille oder Handy Online Informationen zur Umgebung des Betrachters bereitgestellt.

² Virtual Reality: Hier können virtuelle Realitäten über eine Datenbrille oder ein Tablett bereitgestellt werden, um z.B. Prozesse/Installationen zu planen.

Im Hinblick auf die Pelletlager ist festzustellen, dass der Einbau von vorgefertigten Metallsilos und Sachsilos in Verbindung mit einem Saugsystem im Grunde einfacher sind als der Einbau und Anschluss von Öltanks. Lediglich die Errichtung von gebäudeangepassten Lagerräumen für Holzpellets bringen einige spezielle Herausforderungen mit sich: Standsicherheit von Wänden (Überdruck beim Einblasen der Pellets), Staubdichtheit, Vermeidung von Strömungskurzschlüssen beim Befüllen des Raumlagers, korrekte Installation von Prallmatten, ausreichende Neigung der Schrägen, korrekte Installation der Fördersysteme und deren Erreichbarkeit bei Störungen, Sicherung von vorhandenen Leitungen im Bereich des Lagers, Füllstandskontrolloption und Ex- sowie Erstickungsschutz. Auch diese Punkte lassen sich mit den vorhandenen Hinweismaterialien und Empfehlungen z.B. des DEPV³ leicht berücksichtigen, können aber bei dem einen oder anderen Heizungsinstallateur aufgrund der fehlenden Fachkompetenz zu einer Herausforderung führen, so dass bei einem Festhalten an der Raumlagerung ggf. ein anderer Heizungsinstallateur gesucht werden muss. Unabhängig von der Wahl des Pelletlagertyps kann es im Havariefall zu Engpässen kommen. Bevor das eigentliche Pelletlager installiert werden kann, muss in den allermeisten Fällen das vorhandene Öllager leergepumpt, abgebaut und entfernt werden. Dies kann einen zeitlichen Engpass darstellen. Mittels des Einsatzes von geliehenen Metallsilos für Ein- bis Zwei-Wochenvorräte kann hier Abhilfe geschaffen werden, so dass neben dem Räumen des Öllagers auch für eine Drittbeauftragung des Pelletlagers genug Zeit verbleibt.

Die Belastung des Mittelstands durch zahlungsunfähige oder zahlungsunwillige Kunden ist nicht zu vernachlässigen und das damit verbundene Insolvenzrisiko ist durch die im Zuge der Corona-Krise bei vielen Akteuren geschrumpften Reserven noch gestiegen. Bei einzeln nicht-pfändbaren Einbauten sind die Schäden besonders hoch, da neben der Arbeitszeit auch die nicht unerheblichen Materialkosten auf unabsehbare Zeit nicht refinanziert werden. Bei Biomasselösungen sind im Vergleich zu Ölkkesseln sowohl die Materialkosten als auch die Arbeitskosten absolut deutlich höher (Faktor 2 bis 3), so dass bereits ein einziger Zahlungsausfall für ein kleineres Heizungsinstallationsunternehmen eine bedenkliche Liquiditätslücke reißen kann. Abhilfe schaffen können hier nur geänderte rechtliche Regelungen (z.B. Demontageerlaubnis) oder alternative Zwischenfinanzierungsoptionen (z.B. KfW-Programm zur Zwischenfinanzierung bis zum Eintreiben der Schuld). Ggf. könnten sich auch Heizungsinstallateur und Biomassekesselhersteller das Zahlungsausfallrisiko teilen. Vorkassevereinbarungen sind nur bedingt hilfreich, da dann ein erhöhtes Ausfallrisiko dem Privatkunden zugemutet wird, der dann bei einer nicht erfolgreichen Installation der Anlage noch größere Schwierigkeiten bekommen kann: Folgeschäden aufgrund fehlender Heizungsanlage, Wegfall der Förderung, Einbauzwang einer alternativen Heizung mit zusätzlichen Kosten, die kaum erstattet werden. Somit würde eine solche Risikoumkehr die Verbreitung von Biomassefeuerungen erheblich hemmen. Hier ist also auch der Gesetzgeber gefordert die Heizungsinstallateure zu unterstützen.

³ Deutscher Energieholz- und Pellet-Verband e. V.

4 Auflösung zeitlicher Restriktionen im Havariefall

Heizungsanlagen stehen im Privathausbereich meist in einem Heizraum und finden nur dann Beachtung, wenn Brennstoff nachbeschafft werden muss, gesetzliche Änderungen (vermeintlichen) Handlungsbedarf erzeugen oder Störungen auftreten, die dazu führen, dass ein bestehender Heizbedarf nicht bedient werden kann.

Kommt es also zu einer Havarie der vorhandenen Ölheizung, die durch eine Reparatur nicht mehr behebbar ist, drängt die Zeit zur Installation einer neuen Anlage. Gerade im Winter kann ein genutztes Wohngebäude nur wenige Tage kalt bleiben, bevor es zu erheblichen Folgeschäden neben den möglichen Mieterklagen kommen kann. Auch bei Industrieprozessen ist jede Ausfallstunde schnell sehr kostenintensiv. Während die Standardfabrikate und Größen bei Ölkesseln innerhalb von wenigen Stunden vor Ort sein können, besteht bei Pelletkesseln und verstärkt bei Holzhackschnitzelkesseln häufig die Herausforderung mehrere Tage bis Wochen auf die Lieferung eines passenden Gerätes warten zu müssen. Damit ist dann aber das Zeitfenster für den Umstieg nach einer Havarie meist verpasst.

Neben den unter 3. aufgeführten computergestützten Systemen in Interaktion mit Experten, die eine schnelle Entscheidung für ein passendes Produkt ermöglichen (möglichst innerhalb von 12 Stunden), ist die sofortige Verfügbarkeit von Kesseln in den üblichen Leistungsgrößen durch entsprechende Lagerhaltung der Hersteller oder Lieferanten zu gewährleisten. Außerdem sind angepasste Transportkapazitäten vorzuhalten, um eine Anlieferung an jedem Ort in Deutschland innerhalb von 24 Stunden zu ermöglichen.

Ein Vorgehensschema, wie das in Abb. 2 dargestellte Arbeitsmodell, sichert dabei, dass alle notwendigen Prüfungen, Zustimmungen und Absprachen zeitgerecht und zeitnah erfolgen.

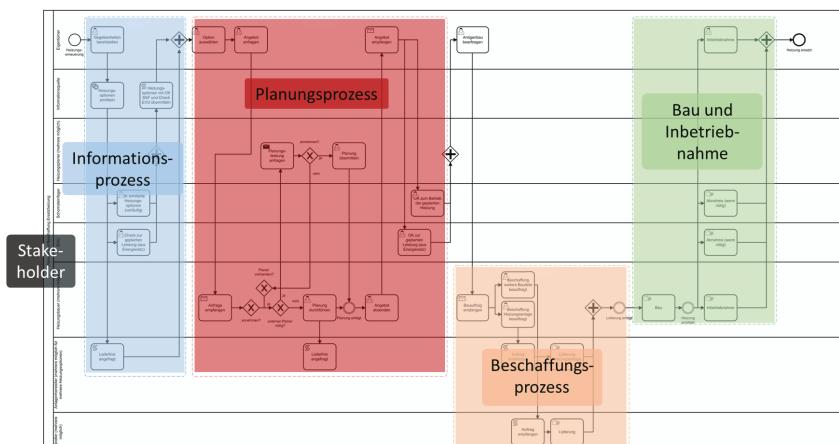


Abb. 2: Verfahrensschema für den Ersatz einer Ölheizung durch eine Heizung auf Biomassebasis

Mittels der unter 3. aufgeführten computergestützten Systemen in Interaktion mit Experten kann sich der Heizungsinstallateur vorab auf die notwendigen Arbeiten und die Bereitstellung der notwendigen Anschlussmaterialien vorbereiten, so dass bis spätestens 48 h nach Havarieerkennung der Biomassekesel einsatzbereit steht. Damit verbleibt dann nur die Herausforderung die Brennstoffbevorratung ebenfalls in diesen ersten 48 Stunden zu realisieren. Diese Zeitspanne erlaubt keine Installation eines Raumlagers. Ist dieses vom Kunden gewünscht, bieten Lehsilos, die ggf. alle 14 Tage aus Sackware nachzubefüllen sind, eine praktikable Zwischenlösung (siehe auch Abschnitt 3). Mit der Beauftragung des Umbaus, sollte -ein Akteur gemäß Abb. 2 auch direkt die Bestellung einer ausreichenden Menge an Pellets initiieren (bestenfalls automatisiert), so dass der Brennstoff auch innerhalb der 48-Stunden geliefert wird. Hier sind im Rahmen des Projekts Gespräche mit dem DEPI⁴ zu führen, so dass Pelletlieferanten Sofort-Befüllungen bzw. Sackwarenbereitstellungen anbieten und erfüllen können.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Der nächste Schritt im vorgestellten Projekt besteht darin, mögliche technische Lösungen für die identifizierten Hindernisse zu operationalisieren und mit Herstellern und Lieferanten abzustimmen. Später erfolgt die Umsetzung der Lösungsansätze mittels digitaler Werkzeuge mit einer anschließenden Testphase (Real-Labor). Neben den anlagen- und informationstechnischen sowie organisatorischen Hindernissen gibt es auch solche, die sich aus den allgemeinen oder spezifischen rechtlichen Rahmenbedingungen ergeben und die von den Projektteilnehmern nicht gelöst werden können. Diese Hindernisse sollen weiter differenziert, bestimmten Akteursgruppen zugeordnet und mögliche Lösungsoptionen diskutiert und beschrieben werden. Die Ergebnisse aus den Workshops und der praktischen Umsetzung sollen aufbereitet und verbreitet werden (Übersichten mit Handlungsoptionen, Stellungnahme-Papier, englischsprachige Open-Access-Publikation, deutschsprachige Fachpublikation). Eine erfolgreiche Umsetzung wird jedoch immer nur dann sicher gelingen, wenn alle möglichen Hemmnisse gleichzeitig ausgeräumt werden.

Danksagung

Die Arbeiten für diesen Tagungsbandbeitrag wurden dankenswerter Weise durch das Bundesministerium für Wirtschaft (BMWi) im Rahmen des Projekts „OBEN“ (FKZ: 03KB156) finanziert.

⁴ Deutsches Pelletinstitut

Literatur/Quellen

- Baulinks 24.2.2020: Heizungsmarkt legte 2019 nur schwach zu, aber neue Förderung hat Potential für 10% Wachstum. <https://www.baulinks.de/webplugin/2020/0269.php4> (Zugriffsdatum: 19.05.2020)
- Büchner, D., Schraube, C. (2019): Entwicklung eines Energiemanagementsystems zur kombinierten Nutzung erneuerbarer Energien (KombiOpt): Schlussbericht, 2019 <https://www.tib.eu/de/suchen/id/TIBKAT%3A1667693417/Entwicklung-eines-Energiemanagementsystems-zur/> (Zugriffsdatum: 19.05.2020)
- Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle (2020): MineralölINFO Dezember 2019 (Mineralölabsatz) 03.03.2020 https://www.bafa.de/SharedDocs/Kurzmeldungen/DE/Energie/Mineraloel/2019_12_mineraloelinfo.html (Zugriffsdatum: 19.05.2020)
- Bundesregierung (2019): Klimaschutzprogramm 2030 der Bundesregierung zur Umsetzung des Klimaschutzplans 2050. BMU 8.10.2019
- Bundestag (2019): Gesetz zur Einführung eines Bundes-Klimaschutzgesetztes und zur Änderung weiterer Vorschriften. Vom 12. Dezember 2019
- DHZ Deutsche Handwerkszeitung (2020): Umwelt + Energie 24.01.2020 Verbot von Ölheizungen: Das soll ab 2026 gelten. <https://www.deutsche-handwerks-zeitung.de/verbot-von-oelheizungen-das-gilt-ab-2026/150/32542/392249> (Zugriffsdatum: 19.05.2020)
- Deutsches Pelletinstitut GmbH (DEPI) (2020). Mediathek – Pelletkessel. <https://depi.de/de/mediathek?endDate=&openSection=Grafiken&selectedTags=Thema%253APelletkessel&startDate> (Zugriffsdatum: 19.05.2020)
- GEMIS 4.95 (2017): Ergebnisauszug April 2017 <http://iinas.org/gemis-download-121.html> (Zugriffsdatum: 19.05.2020)
- Statista (2018): Bestand zentraler Wärmeerzeuger für Heizungen in Deutschland nach Kategorie im Jahr 2018 in Millionen Stück) Stand 2018. <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/165282/umfrage/gesamtbestand-der-zentralen-waermeerzeuger-in-deutschland/> (Zugriffsdatum: 19.05.2020)
- Sauer, r., Arendt, S., Hampel, H. (1997): Vollstreckung im Steuerrecht. 3. Vollständig überarbeitete Auflage, 1997 R. Oldenbourg Verlag München Wien
- Vaillant (2020). Ölheizungsverbot ab 2016 – was ist dran? <https://www.vaillant.de/heizung/klima-foerderung/oelheizung-austauschen/> (Zugriffsdatum: 19.05.2020)

Kontakt

*Daniela Pomsel, Dr.-Ing. Volker LenzKerstin Wurdinger, Laura García,
Dr. Nora Szarka, Dr.-Ing. Volker Lenz*

DBFZ Deutsches Biomasseforschungszentrum gemeinnützige GmbH

Torgauer Straße 116, 04347 Leipzig

✉ daniela.pomsel@dbfz.de

Rechtliche Herausforderungen der dezentralen Einspeisung in Fernwärmennetze

Zusammenfassung: Bei Neubauten ist der Einsatz regenerativer Energien zur Wärmeversorgung bereits obligatorisch, im Hinblick auf die Erreichung der Klimaschutzziele ist es jedoch unabdingbar, auch im Gebäudebestand eine entsprechende Umstellung zu ermöglichen. Dabei spielen unter anderem Nah- und Fernwärmennetze eine Rolle, deren Transformation hin zu einer CO₂-reduzierten Wärmeerzeugung Gegenstand der Untersuchungen im Rahmen des Projekts „SmartBioGrid – Optionen zum Einsatz von fester Biomasse in dekarbonisierten Wärmenetzen“ (FKZ 03KB159) ist.

Für die Dekarbonisierung der Wärmeerzeugung in bestehenden Netzen gibt es eine Vielzahl von technischen Lösungen, die sich auf verschiedene Weise kombinieren lassen. Von großer Bedeutung ist dabei die Einspeisung dezentral erzeugter Wärme, gegebenenfalls aus kundeneigenen Anlagen. Entsprechende Veränderungen in einem Wärmenetz erfordern jedoch in der Regel auch eine Anpassung der bestehenden rechtlichen Strukturen des jeweiligen Versorgungskonzepts. Anders als im Stromsektor ist die Gesetzeslage für derartige Fragestellungen bei Wärme allerdings an vielen Stellen unklar. In dem Projekt werden daher die rechtlichen Rahmenbedingungen der Netztransformationen in einem eigenen Teilvorhaben analysiert und insbesondere im Hinblick auf die dezentrale Einspeisung ausgewertet.

Abstract: The use of renewable energies for heating supply is mandatory for new buildings, but with regard to climate protection, it is necessary to enable a change for existing buildings, too. In this context also district heating grids matter – their transformation from fossil fuels to low-carbon heat production is the purpose of the research project “SmartBioGrid – Options for an efficient usage of solid biofuels in decarbonized heating grids” (FKZ 03KB159).

There is a multitude of technological options to decarbonize heat production, which may be combined in different settings. Decentralized heat production and input – eventually from customer-owned production plants – are of major importance in this context. The corresponding changes in heating grids generally require an adaption of the existing legal structures within the particular supply concept, too. The German legal framework for those changes in heating grids is vague at some points and not as explicit as it is e.g. with regard to electricity. The project therefore aims to analyze and evaluate the legal requirements for different transformation procedures with a special emphasis on the organization of possible decentralized heat production and input within the sub-project “Legal requirements for grid transformation” at the Biomass Institute, located at the University of Applied Sciences Ansbach.

1 Das Projekt „SmartBioGrid“

1.1 Konsortium, Inhalt und Ziele

Das Verbundprojekt „SmartBioGrid – Optionen zum Einsatz fester Biomasse in dekarbonisierten Wärmenetzen“ wird vom BMWi im Rahmen des Programms „Energetische Biomassenutzung“ gefördert (FKZ 03159KB). Beteiligt sind die Deutsche Biomasse Forschungszentrum gGmbH (DBFZ) als Koordinator, die TU Dresden sowie das Biomasse Institut an der Hochschule Ansbach. Das Projekt hat am 01.09.2019 begonnen und ist auf drei Jahre ausgelegt.

Im Rahmen des Projekts soll letztlich ein kostenfreies Optimierungstool entstehen, welches es Wärmenetzbetreibern ermöglicht, verschiedene Szenarien für die Dekarbonisierung ihres Netzes durchzuspielen und so die für ihr Netz passendste Transformationsstrategie zu ermitteln. Die resultierenden Anpassungen werden außerdem für einen möglichst effizienten Betrieb optimiert, auf ihre Eignung für den Einsatz von fester Biomasse als steuerbarer Option in Ergänzung zu den fluktuierenden erneuerbaren Energien untersucht und darüber hinaus rechtlich bewertet.

1.2 Juristische Analyse als Teilvorhaben

Dem Biomasse Institut obliegt die Bearbeitung des Teilvorhabens „Rechtliche Rahmenbedingungen der Netztransformationen“ (FKZ 03KB159C). Schwerpunkte liegen dabei auf der Ausgestaltung einer möglichen dezentralen Wärmeeinspeisung, ggf. mit hochaufgelöster Verbrauchsdatenerfassung, der Einbeziehung von Abwärme sowie der Nutzung angeschlossener Gebäude als Speicher. Anhand einer Analyse der geltenden Rechtslage sollen die rechtlichen Auswirkungen möglicher Veränderungen an bestehenden Fernwärmennetzen ermittelt und gleichzeitig Empfehlungen für rechtliche Anpassungen bei der Umsetzung verschiedener Transformationskonzepte abgeleitet werden.

2 Netztransformation und dezentrale Einspeisung

Bei Transformationskonzepten mit dem Ziel der Dekarbonisierung bestehender Nah- und Fernwärmennetze spielt in der Regel die Integration von Anlagen zur Wärmeerzeugung aus erneuerbaren Quellen eine tragende Rolle, ob im Wege einer schrittweisen Transformation zur Ergänzung und Entlastung einer bestehenden, fossil gespeisten Anlage oder auch langfristig zur alleinigen Wärmeerzeugung. Dabei stellt sich unter anderem die Frage, ob eine Veränderung der bestehenden Einspeisestruktur erforderlich ist bzw. ob neben der bisher zentralen Wärmeeinspeisung weitere, zusätzliche Einspeisepunkte eröffnet werden müssen. Sofern die vollständige Umstellung auf EE-Anlagen mit fluktuierenden Energieträgern, Abwärme und eventuell der Einsatz von Speichern geplant ist, wird die Nutzung mehrerer Einspeisepunkte zum Erhalt von Systemstabilität und Versorgungssicherheit unabdingbar sein [Pehnt u.a. 2017, (1)]. Die dezentrale Gestaltung ist darüber hinaus in städtischen Gebieten besonders relevant, da

es hier aufgrund der dichteren Bebauung erschwert ist, größere Neu-Anlagen zu errichten, gleichzeitig aber unter Umständen viel industrielle Abwärme und ggf. auch Sonnenenergie genutzt werden können, die als fluktuierende Wärmequellen jedoch erhöhten Organisationsaufwand verursachen [Hertle, Pehnt u.a. 2015, (2)]. Der Etablierung von Versorgungskonzepten mit mehreren, dezentral organisierten Energieerzeugungsanlagen kommt damit zunehmend auch im Wärmesektor Bedeutung zu.

Neben den nicht unerheblichen technischen Herausforderungen stellen derartige Versorgungskonzepte die Beteiligten auch vor rechtliche Herausforderungen. Sofern sämtliche Anlagen im Verantwortungsbereich des Versorgungsunternehmens bleiben, wird sich an der grundsätzlichen Aufgabenverteilung zwischen Wärmeversorger und Anschlussnehmer bzw. Kunde nicht viel ändern. Möglicherweise sind Preisanpassungen oder die Regelung von Zutritts- und Ablesemodalitäten mit betroffenen Anschlussnehmern erforderlich. Vor allem bei der Einbeziehung von Kundenanlagen bzw. Anschlussnehmern als sog. „Prosumern“ kann jedoch Rechtsunsicherheit entstehen. Ein klar geregeltes Vergütungsmodell wie beispielsweise im EEG für Strom gibt es für Wärmenetze nicht. Darüber hinaus müssen in diesem Fall unter Umständen auch die Verantwortung für den Erhalt der Anlagen, der Systemstabilität und der Netztemperatur sowie die Rechte und Pflichten gegenüber weiteren Anschlussnehmern neu austariert werden, um eine für alle Beteiligten tragbare Lösung zu finden.

3 Einbeziehung von Kundenanlagen

3.1 Beteiligte und Interessen

Bei bestehenden Wärmenetzen oder auch im Rahmen kommunaler Wärmeprojekte, bei welchen neue Wärmenetze errichtet werden, spielen in der Regel auf Versorgerseite die folgenden Parteien eine Rolle:

- das Energieversorgungsunternehmen
- der Wärmeerzeuger bzw. Anlagenbetreiber
- der Wärmeverteiler bzw. Netzbetreiber

Diese Parteien fallen bei Wärmenetzen nicht selten in einer (juristischen) Person zusammen. Anders als im Stromsektor gibt es hier keine Entflechtung, sodass sich die Wärmeversorgung häufig als lokales Angebot „aus einer Hand“ darstellt [Bundeskartellamt 2012, (3)]. Auf Seiten des Anlagenbetreibers stehen regelmäßig eine hohe Auslastung seiner Anlage sowie ein möglichst hoher Absatz der erzeugten Energie im Vordergrund, während dem Netzbetreiber an einer störungsfreien und mit geringem Aufwand verbundenen Verteilung der Wärme gelegen ist. Für den Energieversorger können neben einer möglichst einfachen Abrechnung auch Aspekte wie Kundenbindung und ein „grünes“ Image eine Rolle spielen [Krist, Reinelt u.a. 2017, (4); Thomsen 2013, (5)]. Auf Abnehmer- bzw. Kundenseite kommen die folgenden Beteiligten in Betracht:

- der Wärmekunde bzw. Anschlussnehmer
- die Kommune

Diesen Parteien ist meist eine kostengünstige und sichere Versorgung mit Wärme wichtig, gerade bei kommunalen Projekten kommt aber häufig auch ein Interesse an Umweltschutz und Nachhaltigkeit hinzu [Krist, Reinelt u.a., (4); Thomsen 2013, (5)]. Bei der Einbindung von Kundenanlagen in bestehende Netze kann die Rollenverteilung jedoch verschwimmen: der Betreiber einer Kundenanlage erhofft sich zwar Vergünstigungen durch eine mögliche Eigenversorgung und eventuellen Absatz an weitere Anschlussnehmer, bleibt aber weiterhin auch Kunde und möchte nicht an Sicherheit einbüßen, während sich Netzbetreiber bzw. Energieversorger plötzlich auch in der Abnehmerrolle wiederfinden, daneben aber infolge der zusätzlichen Wärmeeinspeisung sogar gesteigerte Systemverantwortung tragen.

3.2 Keine Übertragbarkeit der EEG-Gestaltung

Mit dem EEG soll gerade der Anschluss auch kleinerer Kundenanlagen an das allgemeine Stromversorgungsnetz zur Erhöhung des Anteils erneuerbarer Energien bei der Stromerzeugung gefördert werden. Es besteht eine Verpflichtung des Netzbetreibers, die entsprechenden Anlagen anzuschließen, den erzeugten Strom abzunehmen und dem Anlagenbetreiber die gesetzlich vorgesehene Vergütung zu zahlen, die letztlich über die EEG-Umlage wieder ausgeglichen wird.

Im Unterschied zum Stromsektor fehlt es für Wärme jedoch in erster Linie an einem entsprechenden allgemeinen Versorgungsnetz. Wärmenetze sind in der Regel lokal begrenzt und in sich abgeschlossen, sodass z.B. bei einem Zuviel an Einspeisung die Ausgleichsmöglichkeit auf einer vorgelagerten Netzebene fehlt und die Etablierung einer standardmäßigen Durchleitung von „fremderzeugter“ Wärme erheblichen technischen Schwierigkeiten begegnet [Bundeskartellamt 2012, (3); Paar, Herbert u.a. 2013, (6)]. Wärmenetze sind darüber hinaus in der Anschaffung vergleichsweise teuer, sodass eine Erhöhung der Komplexität des Netzes, mit welcher ein erhöhtes Risiko für Störungen einhergeht, häufig auch ein gesteigertes wirtschaftliches Risiko für den Netzbetreiber darstellt [Paar, Herbert u.a. 2013, (6)]. Eine Übertragbarkeit des EEG-Mechanismus auf den Wärmemarkt, ob seitens des Gesetzgebers oder im Rahmen der privatvertraglichen Ausgestaltung entsprechender Wärmekonzepte ist damit nicht ohne weiteres möglich.

3.3 Vertragsrechtliche Konsequenzen und mögliche Alternativen

Bei der Integration kundeneigener Anlagen in ein bestehendes Wärmenetz müssen in jedem Fall die bereits vorhandenen Wärmelieferverträge angepasst werden. Nachdem sich, wie unter 3.1 bereits dargelegt, die Rollen der Vertragsparteien – üblicherweise Energieversorgungsunternehmen als Anbieter einer

All-inclusive-Lösung und Anschlussnehmer – nun teilweise überschneiden können, muss in der Regel eine Anpassung der vertraglichen Leistungsbeschreibung bzw. Verpflichtungen erfolgen. Insbesondere Art und Umfang der Abnahmeverpflichtung auf Seiten des Netzbetreibers und damit korrelierend Zeitraum und Menge der Einspeisung durch den Kunden als gleichzeitigen Anlagenbetreiber sollten hier festgelegt werden, ebenso wie die neue Verteilung der Verantwortlichkeiten bei Störungen und für den Erhalt der Netztemperatur.

Die entsprechenden Änderungen werden sich voraussichtlich auch in der Preisgestaltung niederschlagen, ebenso wie der Anteil einer zu erwartenden Eigenversorgung des Kunden. Eine allgemeingültige Aussage ist hier jedoch angesichts der Vielzahl an technischen Gestaltungsmöglichkeiten nicht möglich.

Tendenziell bewegt sich der Vertrag damit weg vom klassischen Verbrauchervertrag und hin zu einer stärkeren Gegenseitigkeit der Parteien. Dabei stellt sich jedoch die Frage, ob dies vor allem auch seitens des bisherigen Kunden so gewollt ist und er neben der für ihn eventuell attraktiven Eigenversorgung auch weitergehende Verantwortung für das Netz und weitere Anschlussnehmer übernehmen will. Sofern das nicht der Fall ist, könnte eine Alternative im Angebot einer Contracting-Lösung durch den WärmeverSORGER liegen, bei welcher der Kunde lediglich einen Platz für die zusätzliche Anlage bereitstellt, Zutritt gewährt und im Gegenzug ggf. von der Möglichkeit der Eigenversorgung profitiert, die weiteren Verpflichtungen wie Wartung der Anlage, Einspeisemanagement und Netzbetrieb jedoch beim Versorgungsunternehmen bleiben. Die vertragsrechtliche Herausforderung besteht hierbei in der Kombination bzw. Ergänzung des bestehenden Wärmelieferverhältnisses mit einem geeigneten Contracting-Modell, wobei eine angemessene Bestimmung von Leistung und Gegenleistung auch hier nur anhand des jeweiligen Einzelfalles erfolgen kann.

Literatur/Quellen

- (1) Pehnt, Martin u.a. (2017): Wärmenetzsysteme 4.0 – Endbericht – Kurzstudie zur Umsetzung der Maßnahme „Modellvorhaben erneuerbare Energien in hocheffizienten Niedertemperaturwärmennetzen“, BMWi-Projekt-Nr. 102/16-03 (Abschnitt 2.5.2.)
- (2) Hertle, Hans; Pehnt, Martin; Gugel, Benjamin; Dingeldey, Miriam; Müller, Kerstin (2015): Wärmewende in Kommunen – Leitfaden für den klimafreundlichen Umbau der WärmeverSORGUNG, Heinrich-Böll-Stiftung, Schriften zur Ökologie, Band 41 (Abschnitt 2.3)
- (3) Schweikardt, Stephan; Didycz, Michael; Engelsing, Felix; Wacker, Katharina (2012): Bundeskartellamt, Sektoruntersuchung Fernwärme – Abschlussbericht gemäß § 32e GWB – August 2012
- (4) Krist, HansJürgen; Reinelt, Birgit; Frisch, Alexandra; Kreidenweis, Stefan; Dalsass, Annika; Hofmann, Anna (2017): Wärmenetze in Kommunen – Leitfaden, Bayerisches Landesamt für Umwelt (LfU), 3. Ausgabe Februar 2019

- (5) Thomsen, Jochen (2013): Geschäftsmodelle für Bioenergieprojekte – Rechtsformen, Vertrags- und Steuerfragen, Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR)
- (6) Paar, Angelika; Herbert, Florian; Pehnt, Martin; Ochse, Susanne; Richter, Stephan; Maier, Stefanie; Kley, Magalie; Huther, Heiko; Kühne, Jens; Weidlich, Ingo (2013): Transformationsstrategien von fossiler zentraler FernwärmeverSORGung zu Netzen mit höheren Anteilen erneuerbarer Energien – Endbericht, AGFW, Forschung und Entwicklung, Heft 24 (Abschnitt 8.2.2 und 3)

Kontakt

Ass.iur. Anja Bartsch, Wissenschaftliche Mitarbeiterin

Biomasse Institut, Hochschule Ansbach, Residenzstr. 8, 91522 Ansbach

① +49 (0)981.203 633 31 | ✉ anja.bartsch@hs-ansbach.de

🌐 www.biomasseinstitut.de

Mehrkammer-Biomeiler –

Neue Möglichkeiten zur Schließung regionaler Energie- und Stoffkreisläufe durch flammenlose energetische Nutzung von Reststoffen

Zusammenfassung: Biomeiler bieten vornehmlich Betrieben mit hohen Biomasse- reststoffaufkommen, eigenem Wärme- und Kompostbedarf eine Option zur Kosten- senkung. In Rahmen einer umfassenden Feldstudie wurden erstmals fundierte wis- senschaftliche Datenerhebungen bezüglich der Leistungsbereitstellung durchgeführt und systematisch Modifizierungen zur Erhöhung des Wärmertrages und zur Reduzierung der Treibhausgasemissionen sowie zur Steuerbarkeit der Prozesse vorge- nommen. Vorgestellt werden der aktuelle Entwicklungstand, eine daraus abgeleitete erste Einschätzung der Wirtschaftlichkeit sowie die potentiellen Nutzergruppen.

Abstract: Biomeilers primarily offer an option for cost reduction to companies with high biomass residue volumes, and internal heat and compost demands. Within the framework of a comprehensive research study, profound scientific findings regarding the power output were collected for the first time and systematic modifications were made to increase the heat yield, reduce greenhouse gas emissions and control the processes. The current state of development, a first assessment of the economic efficiency derived from it and the potential user groups are presented.

1 Einleitung

Seit gut 2 Jahren sinkt die Nachfrage großer Heiz(kraft)werke nach geschred- dertem Grünschnitt. Im Februar 2020 befand sich der Preis frei Verwertungsan- lage auf einem historisch niedrigen Niveau von 38,4 €/t atro (ohne MWSt.). Vor allem milde Winter und ein Überangebot an Kalamitätenholz trugen zu diesem Abwärtstrend bei (vgl. EUWID 2020).

Erschwerend kommt hinzu, dass auch der Bedarf an dem Endprodukt der stoff- lichen Verwertung, dem Kompost, zurückgegangen ist. Mit einem Mengenanteil von rund 90 % waren bislang landwirtschaftliche Betriebe Hauptabnehmer des Kompostes (Osterburg et. al. 2016). Mit der nationalen Umsetzung der EG-Nit- ratrichtlinie (91/676/EWG) durch das Düngegesetz und die Düngemittelverord- nung wurde die Ausbringungsmasse organischer Dünger auf 170 Kilogramm Stickstoff pro Hektar und Jahr begrenzt, wobei auch der im Kompost enthal- tende Stickstoff angerechnet wird. Dies führt insbesondere in den Veredelungs- regionen mit einem hohen Anfall an Wirtschaftsdünger tierischer Herkunft als auch Gärresten und einem daraus resultierenden Stickstoffüberangebot zu schwindenden Interesse an Kompost.

Die stärkere Begrenzung der Ausbringungsmasse an Stickstoff hat aber auch Auswirkungen auf die Ackerbauregionen, wo die dortigen Kompostpreise durch die verstärkte Verbringung von Wirtschaftsdünger aus den Veredelungsregionen zunehmend unter Druck geraten. Um Ihre Aufbereitungskosten decken zu können, reagieren die Kompostierbetriebe auf diesen Preisverfall mit einer Anhebung der Annahmegebühren für Grünschnitt. Betroffen sind hiervon sowohl Private als auch Gewerbetreibende und kommunale Unternehmen, deren Kosten für Pflegemaßnahmen entsprechend steigen.

Neben den Annahmegebühren bei den Verwertern fallen aber auch die Transportkosten ins Gewicht. Grünschnitt wird überwiegend in kleinen Mengen unter 5 m³ angeliefert (Windisch 2020), wodurch die Stückkosten bei Anrechnung der Transportmittel- und Arbeitszeitkosten recht hoch ausfallen. Um diese zu verringern, sammeln die Flächenpflegebetriebe in einigen Fällen auch kleinere Mengen zunächst in Containern auf ihren Betriebshöfen, um diese dann – mehr oder weniger gefüllt- bei den Kompostierbetrieben zu entleeren.

Durch die ungeregelte „Vorkompostierung“ bei der Zwischenlagerung kommt es im Zuge des Zersetzungsprozesses zur Freisetzung des Klimagases Kohlenstoffdioxid und infolge unzureichender Durchlüftung auch von Methan. Aber auch in Kompostieranlagen kommt es bei einer geringen Umsetzungsrate des geschredderten Materials zu erheblichen THG-Emissionen (Lampert & Neubauer 2015; Cuhls et al 2015). Zugleich bleibt die im Kompostierprozess freiwerdende erneuerbare Wärmeenergie bei der ungeregelten Lagerung und zumeist auch bei der geregelten Verwertung ungenutzt.

Im Rahmen von Forschungsvorhaben, gefördert vom Bundesministerium für Bildung und Forschung, wurden am Deutsche Biomasseforschungszentrum gemeinnützige GmbH (DBFZ) nach neuen technischen Verwertungsansätzen gesucht, die eine höherwertigere dezentrale stofflich-energetische Nutzung der Reststoffe ermöglichen und damit einen Beitrag zur Schließung regionaler Energie- und Stoffkreisläufe sowie zur Senkung der Kosten für Landschafts- und Grünflächenpflege leistet.

2 Entwicklung eines Mehrkammer-Biomeilers

2.1 Biomeiler - Definition und Ausgangssituation

Biomeiler sind Kleinkompostierungsanlagen (ca. 50-120 m³) mit Vorrichtungen zur Entnahme der Prozesswärme. Sie ermöglichen die dezentrale kombinierte stoffliche und energetische Nutzung von heterogenen biogenen Reststoffen, vornehmlich Grünschnitt.

Eine erste Beschreibung zur Nutzung eines Biomeilers für die Energieversorgung eines Haushalts stammt aus den Zeiten der Ölkrise 1972 (Pain 1972). Eine Technisierung und Professionalisierung fand ab den 80er Jahren statt. Untersu-

chungen dazu wurden sowohl in Europa (Schuchard 1983 & 1984, Kranert 1989, Soyez 1996, Thostrup 1982, Viel 1987) als auch den USA (Fulford 1986, Sobel 1983) getätigten. Auf großtechnischer und industrieller Ebene ist die Nutzung der Kompostierung als Niedertemperatur-Wärmequelle erst in den letzten Jahren wieder interessant. Einen geschichtlichen Überblick und eine Einordnung der Verfahren gibt es in (Smith 2016, Brown 2014).

Trotz verschiedener internationaler Forschungsvorhaben war es aufgrund der Unterschiedlichkeit der technischen Ansätze und der genutzten Substrate sowie einer uneinheitlichen Datenerfassung bis dato nicht gelungen, fundierte wissenschaftliche Erkenntnisse bezüglich der Leistungsbereitstellung, einem optimalen Betriebsverhalten und den Kosten für einen professionellen Einsatz der Wärmerückgewinnung aus der Kompostierung biogener Reststoffe zu gewinnen.

2.2 Weiterentwicklung zum professionellen Mehrkammer-Biomeiler

Seit 2016 forscht das Deutsche Biomasseforschungszentrum gemeinnützige GmbH (DBFZ) an der Optimierung und Steuerung der Wärmegegewinnung aus der Kompostierung. In einem ersten Schritt erfolgte die Erfassung des Ist-Standes im Rahmen des Projekts "stadtPARTHEland", in dem neuen Ansätze für ein Kulturlandschaftsmanagement entwickelt wurden. Um zunächst die Einflussfaktoren auf die Wärmerückgewinnung aus der Kompostierung zu identifizieren, wurde in Zusammenarbeit mit Nativ Power e.V. der "Klassische Biomeiler" untersucht. Dies ergab einen großen Forschungsbedarf zur Optimierung des Betriebs und Prozessverhaltens: Erfassung des Wärmeertrags, Steuerbarkeit der Wärmeenergieerzeugung, Vermeidung anaerober Zonen mit Klimagasemissionen, Handling im professionellen Anwendungsbereich und Senkung der Kosten für diese nachhaltige Wärmebereitstellung (Müller 2017).

Gemeinsam mit der Annalinde gGmbH und der LAV Markranstädt entwickelt das DBFZ im Rahmen eines vom BMBF-geförderten Projektes einen Mehrkammer-Biomeiler zur professionellen Wärmeerzeugung und Kompostgewinnung. Neben den o.g. **Optimierungen des Prozessverhaltens** kann durch einen **modularen Aufbau** der Anlage die Biomasse je nach jahreszeitlichem Anfall eingebaut und zur **kontinuierlichen Wärmebereitstellung** genutzt werden. Durch eine **optimierte Steuerung** von Wärmeerzeugung und -abnahme erfolgt eine **bedarfsgerechte Bereitstellung** der Wärmeenergie. Zusätzlich dazu führt ein **höherer Automatisierungsgrad** zu einem arbeitseffizientem Auf- und Abbau. Die damit verbundenen Kosten können reduziert werden, zu einer höheren Auslastung des Systems beitragen und die **ökonomische Anreize** verbessern.

2.3 Anlagenkomponenten des optimierten Biomeilers

Auf dem Gelände der Annalinde gGmbH liegenden Versuchsfeld wurden bis dato 11 Biomeiler und 2 Kammermodule zur Erforschung weiterer Optimierun-

gen getestet. Die Prozessoptimierungen wurden zunächst in den klassischen zylinderförmigen Biomeilern durchgeführt, um die Erkenntnisse im zweiten Schritt auf ein Kammermodul zu übertragen.

Der klassische Biomeiler ist zylinderförmig und verwendet einen internen Rohrschleifen-Wärmeübertrager. Dieser besteht aus 3 Lagen Standard RC-Rohr zu je 100 m und musste bislang händisch eingebracht werden. Der Biomeiler 2.0 erhielt zur Optimierung eine steuerbare Dombelüftung (Paar 2000, Brummack 2008), siehe Abb. 1 und Abb. 2. Diese ermöglicht einen fremdenergiefreien Frischluftteintrag bis zum Kern der Kompostmiete und erhöht den Wärmeertrag, reduziert Klimagasproduktion und verbessert die Steuerbarkeit der Anlage.

Aktuell wird an der Übertragung der im Biomeiler 2.0 optimierten Prozesstechnik und Anlagenführung in ein modulares Kammersystem geforscht: Die Kammer besteht aus einem von dem Institut für Verfahrens- und Umwelttechnik der TU Dresden entwickelten, straßentauglichen 36 m³ Abrollcontainer, ausgestattet mit einer Dombelüftung und Isolierung, welcher um einen Sonden-Wärmeübertrager ergänzt wurde (Abb. 3 und Abb. 4). Das Modul kann so fertig befüllt beim den Verbrauchen an ein Heizungssystem angeschlossen werden (Plug & Play). Der aktuelle Forschungsfokus ist auf dem arbeitseffizienten Auf- und Abbau und dem Prozessverhalten der Biomasse.

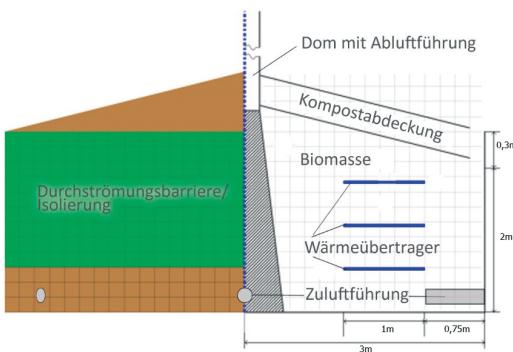


Abb. 1: Schematischer Aufbau der Anlagenkomponenten Biomeiler 2.0



Abb. 2: Biomeiler 2.0 mit Dombelüftung



Abb. 3: Wärmeübertrager im Kammermodul



Abb. 4: Kammermodul Mehrkammer-Biomeiler

2.4 Prozessführung

Der als Batch-Betrieb konzipierte Prozess lässt eine Prozesssteuerung durch die internen Wärmeübertrager, die Dombelüftung und das Substratdesign zu. Die Verweildauer einer Substratcharge beträgt je nach Biomasse und deren spezifischen Energieertrag 2-12 Monate. Im Verlauf der Kompostierung steigt das Temperaturniveau anfänglich auf 70-80 °C (Heißrotte), um dann - je nach Betriebsweise innerhalb von 2 bis 12 Monaten - auf 45 °C abzusinken. Betriebsweisen im thermophilen Bereich ($> 45^{\circ}\text{C}$) werden aufgrund der höheren Vorlauftemperaturen für den Heizkreislauf bevorzugt betrachteten. Es sind auch Betriebsweisen mit geringeren Vorlauftemperaturen von $< 30^{\circ}\text{C}$ z.B. als Vorlauf für eine **Wärmepumpe** denkbar.

Durch Kombinationen mehrerer Kammermodule, welche je nach Heizenergiebedarf versetzt mit der saisonal anfallenden Biomasse gefüllt werden können, wird eine quasi-kontinuierliche Wärmeenergieversorgung gewährleistet. Durch kurze Verweilzeiten kann so auch die maximale Wärmeenergieproduktion in der Heißrottephase gezielt genutzt werden.

2.4.1 Wärmeübertrager

Aus dem exothermen Kompostierungsprozess kann Wärmeenergie entzogen werden, wenn der Prozess nicht maßgeblich gestört wird. Kompostmieten erreichen in der Heißrotte Temperaturen bis zu 80 °C. Bei Wärmeentzug durch den Wärmeübertrager senkt sich die Temperatur ab. Nach Erreichen der Hygienisierungsbedingungen kann so die Temperatur der Anlage auf optimale Betriebstemperatur von ca. 55 °C geregelt werden. Je nach Einbindung ins Heiznetz bietet sich auch ein alternierender Wärmeentzug an. Hierbei sollte die Temperatur der Biomasse stets im unteren thermophilen Bereich ($> 45^{\circ}\text{C}$ und $< 55^{\circ}\text{C}$) gehalten werden.

2.4.2 Belüftung

Die Belüftung hat für die Kompostierung drei Aufgaben:

1. Sauerstoffversorgung des aeroben Prozesses
2. Senkung der Kompostierungstemperatur, um einer thermischen Inaktivierung der Mikroorganismen vorzubeugen
3. Senkung des Wassergehalts

Dabei wird 10 mal mehr Luft zur Prozesskühlung benötigt als zur Sauerstoffversorgung (Themelis 2005). Durch die in die Biomasse integrierten Wärmeübertrager kann die Belüftung von der Prozesskühlung entkoppelt und Wärme zur Nutzung rückgewonnen werden. Die Belüftung kann durch einen Schieber auf die optimale Sauerstoffversorgung reduziert, vorzeitige Austrocknung des Materials verhindert (bspw. bei reinem Grünschnitt und hoher Verweilzeit) und der Kompostierungsprozess über ein Jahr ohne Umsetzen optimal gefahren werden.

2.4.3 Substrat

Prinzipiell sind in den Anlagen alle zur Durchströmung geeignete biogenen Reststoffe umsetzbar. Das im Projekt untersuchte Substrat ist holziger, wassergesättigter Grünschnitt mit optimalen physikalischen Eigenschaften für die passive Belüftung. Eine Beimischung von maximal 30 % Tierdung oder Mahd wäre möglich. Aufgrund der o.g. Prozesssteuerung und Prozessüberwachung ist gewährleistet, dass ein hygienisierter Frisch- oder Fertigkompost das Kammermodul verlässt, welcher den RAL Anforderungen entspricht. Der Wassergehalt des Substrats sollte idealerweise ca. 50 % aufweisen. Eine nachträgliche Bewässerung muss vor der Befüllung auf ausgebreiteter Biomasse durchgeführt werden. Eine gleichmäßige Bewässerung von geschichteter Biomasse ist nicht möglich, da das Wasser bei einer Berieselung der Schwerkraft folgend in Kanälen verläuft und damit ein Großteil des Substrates nicht befeuchtet wird.

3 Ergebnisse

3.1 Anlagenleistung

3.1.1 Emissionsminderung

Durch die optimierte Sauerstoffversorgung mittels Dombelüftung (steuerbare passive Belüftung) konnte im gesamten reaktiven Material die Entstehung von anaeroben Bereichen und damit einhergehenden Emissionen vermieden werden. Abb. 5 zeigt exemplarisch den 11. und 104. Versuchstag einer Miete ohne Belüftung (Abb. 5a) und einer Miete mit Belüftung (Abb. 5b), wobei der **Methangehalt im Mietenkern von 15 % auf 0 % gesenkt** werden konnte. Nachgewiesen wurde dies durch die Messung der Gaskonzentrationen im Mietenkörper (18

Messpunkte), direkt an der Mietenkörperoberfläche und in der Abluftführung im gesamten Versuchszeitraum.

Zusätzlich dazu ist das Material gleichmäßig belüftet, da die durch den Eigenzug getriebene, passive Belüftung die Entwicklung von bevorzugten Strömungswegen und Randgängigkeiten verhindert und so ein gleichmäßigen Rottegrad im gesamten Mietenkörper erzeugt.

3.1.2 Wärmeproduktion

Mit Hilfe eines Wärmemengenzählers wurde die Wärmegewinnung aus den Biomeilern erfasst. Durch die verbesserte Prozessführung konnte die **Wärme- produktionsrate der optimierten Biomeiler 2.0 gegenüber dem klassischen Biomeiler je nach Betriebszeitraum vervierfacht** werden (vgl. Abb. 6). Grünschnitt besitzt ein Potential von ca. 1000 kWh/t (Frischmasse). Konservative Schätzungen gingen davon aus, dass davon nur rund 20 kWh/t (FM) durch Wärmerückgewinnung bei der Kompostierung gewonnen werden können. Die Ergebnisse zeigen nun, dass nach 60 Tagen mit dem klassischen Biomeiler ohne Belüftung 41 kWh/t (FM) und mit der optimierten Variante ca. 190 kWh/t (FM) gewonnen werden konnte. Nach 300 Tagen ist eine Steigerung um Faktor 2,3 mit 190 kWh/t (FM) klassischer Biomeiler und 430 kWh/t (FM) optimierter Biomeiler 2.0 zu verzeichnen. Eine weitere Steigerung ist durch die Applikation einer effizienten Isolierung der Boden-, Dach- und Seitenflächen sowie einer Wärmerückgewinnung aus der Abluft zu erwarten.

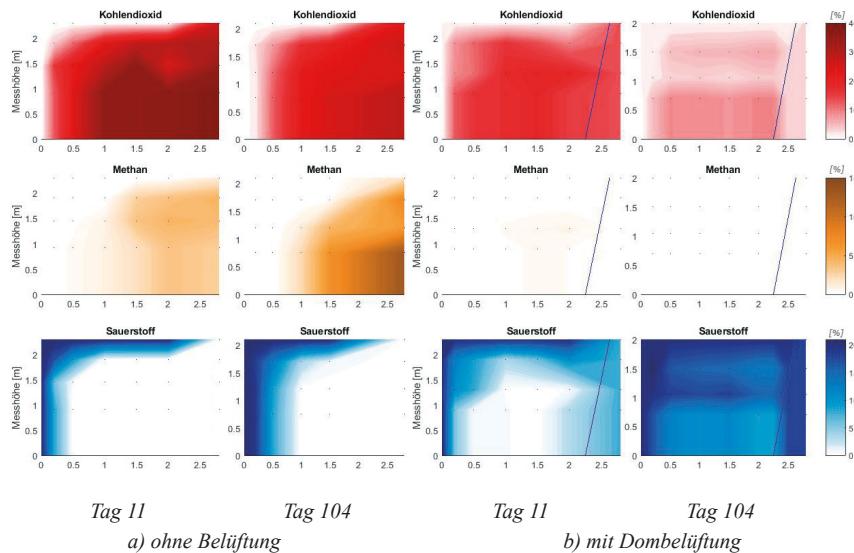


Abb. 5: Halbprofildarstellung der Gaskonzentration und Temperatur in zylinderförmigen Kompostmieten (Rotationsachse jeweils rechts) an Versuchstag 11 und 104

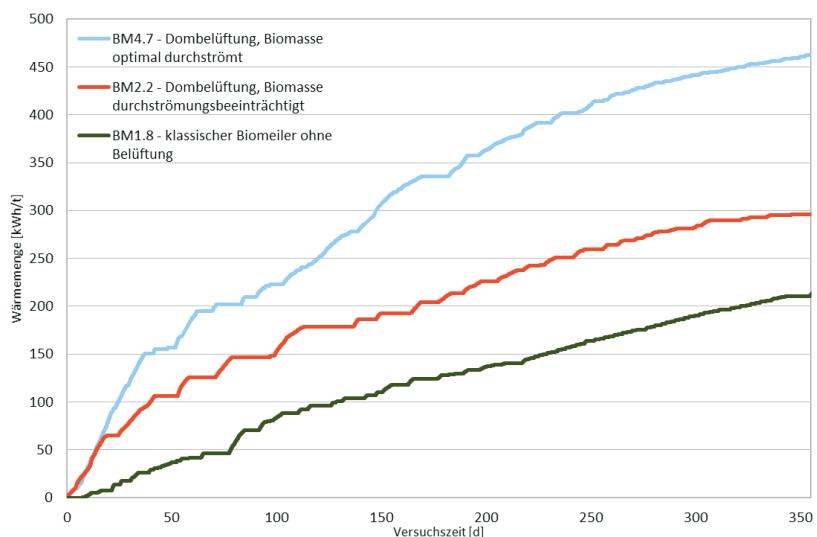


Abb. 6: Wärmemengensteigerung durch optimierte Prozessführung

3.2 Geschäftsmodelle

3.2.1 Wirtschaftlichkeitsberechnung

Der Einsatz eines Biomeilers bietet sich insbesondere für Betriebe an, bei denen sowohl viele organische Reststoffe anfallen und die auch die resultierenden Wärme- und Kompostmengen selber nutzen können. In diesem Fall können die Kosten für alternative Brennstoffe wie Öl eingespart werden. Auch kann der Kompost als Dünger oder Bodenverbesserer verwendet und damit Kosten für Zukauf von Mineraldünger oder Kompost eingespart werden.

Da sich die Wärmeproduktion durch Prozesssteuerung zwar senken, aber nicht stoppen lässt, bieten Wärmesenken mit ganzjährigem Wärmebedarf Vorteile. Um hohe Kosten beim Bau einer Wärmeleitung für den Anschluss des Biomeilers an das bestehende Heizungssystem zu senken, ist ein geeigneter Aufstellungsort nahe der Wärmesenke am Einspeisungsort erforderlich. Der Biomeilerstandort sollte von mehreren Seiten mit Maschinen anfahrbar sein, um einen arbeitseffizienten Auf- und Abbau zu ermöglichen. Hierzu eignen sich insbesondere Bagger, aber auch Radlader, die bestenfalls bereits im Betrieb vorhanden sind. Die extremen Trockenperioden der letzten Jahre haben gezeigt, dass es mitunter auch notwendig ist, den Wassergehalt des Substrats vor dem Einbau in den Biomeiler durch eine Bewässerung anzuheben. Hierfür ist eine Wasserentnahmestelle und eine befestigte Fläche erforderlich.

Auch für Betriebe, die den Kompost nicht oder nur teilweise nutzen können, kann der Biomeiler eine interessante Option sein: Im Verlauf des Kompostierprozesses reduziert sich die Masse des Inputmaterials durch die Abbauprozesse und die Wasserverluste auf rund zwei Drittel. Entsprechend geringer ist damit auch die Masse, die bei einer Abgabe in einem Kompostierbetrieb in die Berechnung der Annahmegebühr einfließt.

Je nach Anwendungsbereich oder betrieblichen Hintergrund können zwei verschiedene Biomeiler-Geschäftsmodelle eingesetzt werden:

1. Biomeiler 2.0 – Rundmeiler mit Dombelüftung: Aufgrund höherem manuellen Arbeitsaufwand bei Auf- und Abbau und den daraus resultierenden hohen Arbeitskosten eignet sich dieses Modell vor allem für Betriebe in denen ein leistungsunabhängiges Arbeitsentgelt gezahlt wird und in denen zeitweise Phasen mit geringem Arbeitsaufkommen auftreten. Diese könnten dann – bei fehlenden gewinnbringenden Alternativen – für den Aufbau der Biomeiler genutzt werden, ohne dass die betrieblichen Lohnkosten steigen.

Auch könnte dieses Modell, wie schon bereits die klassischen Biomeiler, Anwendung bei Vereinen und Verbänden finden, die im Umweltbildungsbereich tätig sind. Hier dient der Biomeiler zum einen als Demonstrationsobjekt und wird zum anderen häufig von ehrenamtlich Tätigen, Mitgliedern oder Seminarteilnehmern errichtet, wobei keine oder nur sehr geringe Arbeitskosten anfallen. In die Wirt-

schaftlichkeitsberechnung (s. Tab. 1) sind allerdings für den objektiven Vergleich mit dem Mehrkammerbiomeilersystem Lohnkosten mit einbezogen worden.

2. Mehrkammer-Biomeiler: Dieser ermöglicht eine weitgehend maschinelle Befüllung und Entleerung und zeichnet sich durch eine hohe Arbeitseffizienz aus. Allerdings sind die Investitionskosten aufgrund der technisch hochwertigen Ausführung größer. Dies macht - auch in Hinblick auf den begrenzten "Reaktoraum" – eine höhere Auslastung des Systems erforderlich, die durch kürzere Verweilzeiten und die stärkere Konzentration auf die Heißrottephase erreicht wird.

Für einen Biomeiler 2.0 und ein Modul des Mehrkammer-Biomeilers wurde mit den u.g. Annahmen die Amortisationszeit der Investitionskosten berechnet (s. Tab. 1). Es werden betrieblich ideale Voraussetzungen zu Grunde gelegt, d.h. die Wärmeenergie und der Kompost kann von dem Betrieb vollständig genutzt werden.

Tab. 1: Kennzahlen der Wirtschaftlichkeitsberechnung und Amortisationszeit

Parameter	Optimierter Biomeiler 2.0 (Betrachtung eines Biomeilers)	Mehrkammer-Biomeiler (Betrachtung einer Modulkammer)
Verweilzeit Biomasse	12 – 6 Monate	6 - 3 Monate
Betriebszyklen	1 - 2 Zyklen/a eines einzelnen Biomeilers	2 - 4 Zyklen/a eines einzelnen Kammermoduls
Materialdurchsatz pro a	24 - 48 t/a	30 - 60 t/a
Wärmeenergie in kWh/a	7.000 – 9.900 kWh/a	8.700 - 10.800 kWh/a
Investitionskosten inkl. Anschlusskosten, Steuereinheit sowie Personen-, Maschinen stunden	2.500 € - 2900 €	10.500 – 11.100 €
Amortisationszeit	7 - 6 Jahre	12 - 9 Jahre

Annahmen:

- Im Falle einer Fremdbelieferung mit Wärmeenergie werden Kosten von 6 ct/kWh geschätzt, was im Bereich des aktuellen Heizölpreises liegt. Eine Vollversorgung wurde hierbei nicht berücksichtigt, sondern nur die Einsparung der Brennstoffkosten für Gas oder Öl.
- Wärme kann vollständig genutzt werden
- Gewichtsverlust des Inputsubstrats bis zum Produkt (Fertigkompost) von 33 %
- Verkaufspreise für Fertigkompost 26 €/m³
- Abgabe Grüngut Gewerbe 31 €/t
- Jährliche Wartungskosten entsprechen 1 % der Investitionskosten
- Anrechenbarkeit möglicher Zuschüsse für erneuerbare Energiequellen nicht betrachtet
- Eigenkapitalzins 5,56 % bei einem Eigenkapitalanteil von 20 %
- Fremdkapitalzinssatz 1,6 % bei einem Fremdkapitalanteil von 80 %

Wie in der Tab. 1 ersichtlich weisen die Investitionen für den Biomeiler 2.0 unter idealen Voraussetzungen einen Kapitalmittelrückfluss innerhalb von 6-7 Jahren und damit in einem überschaubaren Zeitraum auf. Im Fall des Mehrkammer-Biomeilers liegt dieser nur knapp unter der Abschreibungszeit für einen Container (10 Jahre). Allerdings bietet der aktuelle technische Stand des Mehrkammer-Biomeilers nach derzeitigen Erkenntnissen einige weitere Optimierungsoptionen, um die Auf- und Abbaukosten deutlich zu senken, wodurch die Amortisationszeit nochmals sinkt.

Wie Abb. 7 verdeutlicht, ist der Einsatz eines Biomeilers insbesondere in Hinblick auf die **eingesparten Entsorgungskosten für Grünschnitt** (Entsorgungsgebühren sowie Kosten für An- und Abfahrt) wie auch der **eingesparten Einkaufskosten für Kompost** interessant. In einigen Landkreisen in Deutschland liegen die Grünschnitt-Annahmegebühren für Gewerbe zudem deutlich über den hier berechneten 31 € /t, wodurch der Kapitalrückfluss der Investitionen ebenfalls beschleunigt. Die Biomeilermodelle dürfen damit sowohl für Vereine, Verbände und Unternehmen zukünftig einen wirtschaftlich interessanten Ansatz zur höherwertigeren Nutzung der betrieblich anfallenden Biomassereststoffe bieten.

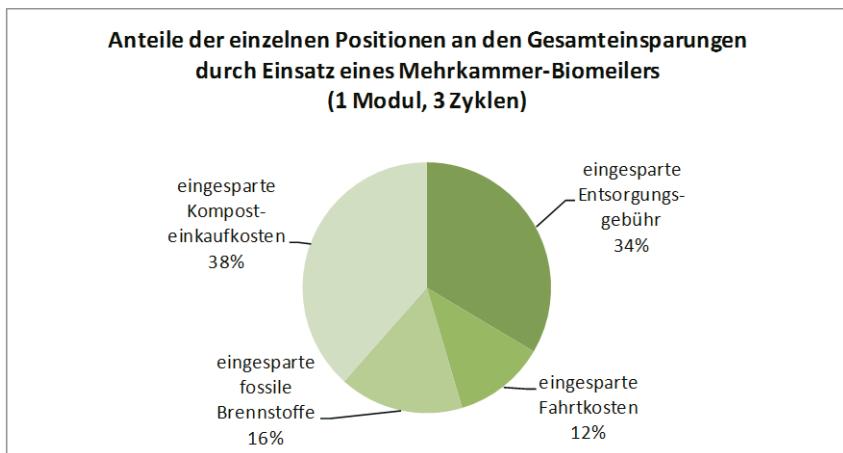


Abb. 7: Erlösstruktur für ein Modul des Mehrkammer-Biomeilers bei einer Substratverweildauer von 6 Monaten (2 Zyklen/a)

3.2.2 Stakeholder

Als potentielle Nutzer von Biomeilern kommen **Landwirte** in Betracht, die ein Reststoffaufkommen von > 25 t/a mit vornehmlich Grünschnitt haben, welches auf den betriebseigenen Flächen anfällt. Zumeist sind auch Betriebsgebäude vorhanden, in deren Heizsystem der Biomeiler eingebunden werden kann. Der Kompost kann – abhängig vom Reifegrad – entweder direkt oder im Anschluss

an die Nachrotte im Betrieb verwendet werden. Auch eine Abgabe des Komposts an lokale Gartenbaubetriebe und die Vermarktung stellt bei größerem Aufkommen einen möglichen Verwertungsweg dar. Hierbei sind aber die Kennzeichnungspflichten von Düngemitteln und die mit der Nachweiserbringung verbundenen Zusatzkosten zu berücksichtigen.

In den kommenden Jahren fallen viele **Biogasanlagen** aus dem Förderung gemäß Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG). Die Aufbereitung des Biogases zu Biomethan und dessen Einspeisung könnte, sofern die strukturellen Voraussetzungen erfüllt sind, für einige dieser Anlagen eine neue Alternative darstellen. Werden die Biomeiler in diesen Fällen zur Wärmeversorgung der Fermenter genutzt, ließen sich ggf. die mit hohen Investitionskosten verbundenen BHKWs einsparen.

Weitere Anwender können **Flächenpflegebetriebe** wie Unternehmen aus dem Garten- und Landschaftsbau sowie Straßenmeisterei sein, die durch die Verwertung des Pflegematerials im Biomeiler Betriebsgebäude (oder auch externe Objekte) mit Wärmeenergie versorgen können und anschließend nur noch eine deutlich reduzierte und vor-kompostierte Restmenge entsorgen müssen.

Nicht zuletzt bietet sich diese Konversionstechnik auch für die **Kompostierbetriebe** an, um ihre eigenen Gebäude oder die in unmittelbarer Umgebung angesiedelter Gewerbebetriebe mit Wärme zu versorgen. Zudem existieren hier schon langwierige Kundenbeziehungen zur Vermarktung des Kompostes. Aufgrund des hohen Massenaufkommens fallen die auf eine Masseneinheit umgerechneten Kosten zur Erfüllung der Kennzeichnungspflicht gering aus. Die Anschaffung für die Gütesicherung notwendigen Technik (Siebung) ist nur bei einer entsprechend hohen Auslastung wirtschaftlich darstellbar.

3.3 Abfallrechtliche Aspekte

Ein vom Projektpartner LAV eingeholtes Gutachten der K. STARKE CONSULT kommt zum Schluss, dass die Mengenschwelle (10 t/d) für immissionsschutzrechtlich genehmigungsbedürftige Anlagen beim Einsatz eines Biomeilers weit unterschritten wird. **Die Anlage fällt somit nicht unter die Genehmigungspflicht nach Bundesimmissionsschutzrecht.** Ggf. sind die umweltrelevanten Anforderungen (vgl. § 22 BImSchG Pflichten der Betreiber nicht genehmigungsbedürftiger Anlagen) somit in einem Baugenehmigungsverfahren zu berücksichtigen. Da Biomeiler für die Genehmigungsbehörden noch Neuland darstellen wird derzeit ein Leitfaden entwickelt, der zukünftige Planer und Betreiber, aber auch die Genehmigungsbehörden bei der Antragstellung unterstützen soll.

Eine **Abgabe und Lagerung von Grünschnitt bei Dritten, ist aufgrund seiner Abfalleigenschaft, rechtlich nicht erlaubt** und nur für Kompostierbetriebe wirtschaftlich darstellbar (Genehmigungsverfahren). Eine „Zwischenlagerung“ in einem geschlossenen System (Container mit Auffangeinrichtung Sickerwas-

ser) und eine Abholung und Weiterverarbeitung des Rohkompostes ist jedoch möglich. Ggf. sind auch hier genehmigungsrechtliche Fragen (Versiegelung des Containerstandortes) vorher mit der unteren Wasserbehörde abzustimmen.

Im Sinne einer Schließung von regionalen Stoff- und Energiekreisläufen wäre die **Bildung von regionalen Konsortien aus Reststofflieferanten und Wärmeabnehmern** wünschenswert. Bei vielen Betrieben fallen zwar große Mengen Reststoffe an, sie können diese aber nicht selbst energetisch verwerten. Wiederum andere Betriebe besitzen einen konstanten Wärmebedarf mit gleichzeitig keinen oder nur geringen Biomasse-Reststoffmengen. Durch die genaue Festlegung der Substratlieferungen (Art, Menge) sowie der Flächen, von denen die Reststoffe stammen bzw. auf denen der Kompost ausgebracht werden darf, könnte - gemeinsam mit dem anlagenseitig zu erbringenden Nachweis der erfolgten Hygienisierung - die notwendige Qualitätssicherung erfolgen.

4 Zusammenfassung

Landschafts- und Grünflächenpflegemaßnahmen sind mit hohen Entsorgungskosten verbunden. Holziger Grünschnitt wird zumeist kostenpflichtig an Kompostierbetriebe abgegeben, da die Nachfrage bei Heiz(kraft)werken gering ist (geringe Transportwürdigkeit, Überangebot Kalamitätenholz). Die Folge: Um Entsorgungskosten zu vermeiden, werden Kleinstmengen des Pflegematerial oftmals ungeregelt gelagert. Daraus resultiert 1. ein Verlust der Biomasse für eine stoffliche und/oder energetische Nutzung und 2. eine fehlende Überprüfung hinsichtlich umweltrelevanter Wirkungen (Emissionen, Sickerwasser). Weiterhin werden Pflegemaßnahmen nicht im notwendigen Umfang durchgeführt, um die aufgrund fehlender Einnahmemöglichkeiten hohen Pflegekosten zu vermeiden.

Mit Hilfe eines vom Deutsche Biomasseforschungszentrum gemeinnützige GmbH in Kooperation mit Praxispartnern entwickelten modular erweiterbaren Mehrkammer-Biomeiler wird eine wettbewerbsfähige und nachhaltige, flammenlose energetische Wärmenutzung dieser und weiterer bislang nicht bzw. rein stofflich genutzter Reststoffe ermöglicht. Neben der professionellen Nutzung der Prozesswärme können im Zuge einer Kaskadennutzung der Reststoffe auch hochwertige Kompostprodukte gewonnen werden.

Innerhalb von zwei Jahren konnte an mehreren Demonstrationsanlagen durch die optimierte Prozessführung die Wärmeproduktionsrate bereits vervierfacht und Methanemissionen gänzlich vermieden. Durch die betriebliche Einbindung eines Biomeilers können nicht nur fossile Brennstoffe zur Wärmeversorgung eingespart und damit weitere Emissionen vermieden werden, sondern idealerweise auch der im Prozess anfallende Kompost in dem Betrieb direkt verwertet werden. Damit leistet das System einen Beitrag zur Mobilisierung noch ungenutzter Reststoffpotenziale und zur Schließung regionaler Stoff- und Energiekreisläufe. Durch die Aufwertung der Reststoffe trägt das Konzept damit letztlich auch zur Senkung der Landschaftspflege-/Grünflächenpflegekosten bei.

Als Zielgruppe wurden insbesondere Landwirtschaftsbetriebe und Flächenpfliegebetriebe mit einem hohen Grünschnittaufkommen und ganzjährigen Wärmebedarfe identifiziert.

FÖRDERHINWEIS

Die Inhalte dieses Artikels wurde im Verlauf des Projektes stadtPARTHland (FKZ 033L119E) im Rahmenprogramm Forschung für nachhaltige Entwicklung (FONA) sowie dem Projekt IBÖM03: Entwicklung eines Mehrkammerbiomeilers zur effizienten Wärme- und Komposterzeugung (FKZ 031B0492A) im Ideenwettbewerb – Neue Produkte für die Bioökonomie erarbeitet. Beide Projekte wurden durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung gefördert.



Literatur/Quellen

- Brown, G.: The Compost-Powered Water Heater - How to heat your greenhouse, pool or buildings with only compost! Vermont, 2014-05.
- Brummack, J.: Fremdenergiefreie Trocknung von Holzhackgut. In: "Lagerung von Holzhackschnitzeln", Experten-Workshop. Potsdam-Bornim: Bornimer Agrartechnische Berichte; 2008.
- Lampert, C.; Christian Neubauer, C.: Praxis großer Kompostieranlagen und Anforderungen an einen emissionsarmen Betrieb. Wien, Umweltbundesamt GmbH; 2015
- Cuhls, C., Mähl, B., Clemens, J.: Ermittlung der Emissionssituation bei der Verwertung von Bioabfällen. UBA; 2015
- EUWID Neue Energie: Exporte von NawaRo-Holz nehmen aufgrund des hohen Angebots weiter zu, Ausgabe 9.2020, S. 11
- Fulford, B.: The Composting Greenhouse at New Alchemy Institute: A Report on Two Years of Operation and Monitoring March 1984-January 1986. Techn. Ber. New Alchemy Institute, 1986.
- Kranert, M.: Freisetzung und Nutzung von thermischer Energie bei der Schlammkompostierung, Stuttgarter Berichte zur Abfallwirtschaft Bd. 33, Bielefeld: Erich Schmidt Verlag, 1989.
- Müller, N.: „Untersuchungen zum Betriebsverhalten von Biomeiler“. Diplomarbeit, TU Dresden, 2017.
- Osterburg, Bernhard; Schüler, Maximilian; Klages, Susanne: Auswirkungen der Novelle der Düngerverordnung auf die Kompostanwendung in der Landwirtschaft, abgerufen am 11.05.2020 unter https://www.kompost.de/fileadmin/user_upload/Dateien/HUK-Dateien/8_9_2016/Kompost_und_DueV-Novelle_Endbericht_8_2016_endg.pdf
- Paar, S.: „Das Dombelüftungsverfahren - Ein Verfahren zur Belüftung offener Rottennieten unter Nutzung des thermischen Auftriebs“. Diss. TU Dresden, 2000.
- Pain, J. & Pain, I.: Another Kind of Garden – The Methods of Jean Pain. Villecroze, 1972.

- Schuchardt, F.: Versuche zum Wärmeentzug aus Festmist. In: Landbauforschung Völkenrode 33.3 (1983), S. 169.
- Schuchardt, F.: Wärmeentzug bei der Kompostierung von Schnittholz. In: Landbauforschung Völkenrode 34.4 (1984), S. 189.
- Smith, M. M., Aber, J. D. & Rynk, R.: Heat Recovery from Composting: A Comprehensive Review of System Design, Recovery Rate, and Utilization. In: Compost Science & Utilization (2016-10).
- Sobel, A. T. & Muck, R. E.: Energy in animal manures. In: Energy in agriculture 2(1983).
- Soyez, K. & Koller, M.: Verfahrensentwicklung zur Kopplung von Kompostierung und Gewächshausproduktion - BMBF-Verbundvorhaben „Neue Techniken zur Kompostierung“ Teilvorhaben TV3/1-3. Techn. Ber. Umweltbundesamt, 1996.
- Themelis, N. J.: Control of heat generation during composting. In: BioCycle 46.1 (2005)
- Thostrup, P.: Preliminary paper on continuous thermophilic composting heat plant for solid manure. In: Seminar on Composting of Organic Wastes. Jutland Technical Institute, Aarhus, Dänemark, 1982, S. 63.
- Viel, M. et al.: Optimization of In-vessel Co-composting through heat recovery. In: Biological Wastes 20.3 (1987-01), S. 167.
- Windisch, F.: Telefonische Auskunft. Position: Produkt- und Qualitätsmanagement, Forschung und Entwicklung, Öffentlichkeitsarbeit; Erdenwerk LAV Markranstädt, 08.05.2020

Kontakt

Dr. Torsten Schmidt-Baum und Nele Jaschke

Deutsches Biomasseforschungszentrum gemeinnützige GmbH
Torgauer Str. 116, 04347 Leipzig

✉ torsten.schmidt-baum@dbfz.de

KomBio-Speicher: Entwicklung eines neuartigen Dampfspeichersystems für ein flexibles Biomasse-Heizkraftwerk zur Erhöhung der Systemstabilität

Zusammenfassung: Im Rahmen des Projekts KomBio-Speicher soll ein neuartiges Speichersystem zu Flexibilisierung eines Biomasse-Heizkraftwerke (HKW) untersucht werden. Ein Speichersystem aus Ruths und Betonspeicher soll die Dampferzeugung von der Dampfnutzung entkoppeln und dadurch eine netz- oder marktdienliche Stromerzeugung ermöglichen, wie sie gegenwärtig durch Biogasanlagen umgesetzt werden. Im vorliegenden Beitrag werden das Konzept des Speichersystems sowie die Zielsetzungen des Forschungsprojekts dargestellt. Auf Grund der Neuartigkeit des untersuchten Speichersystems gilt es vorrangig ein Testspeichersystem im Testmaßstab aufzubauen und dessen Betrieb zu untersuchen.

Abstract: In the research project KomBio, a novel storage system for the flexible power generation via biomass CHP plant is investigated. A combination of a Ruths and concrete storage is utilized to decouple steam generation and steam utilisation to enable a grid- or market-driven power generation, similar. In the present publication, the storage concept and the aim for the project are discussed. A main objective will be the development of a laboratory scaled storage unit to investigate the technical feasibility of the concept.

1 Einleitung

1.1 Motivation

Durch die Anreize im Erneuerbare Energien-Gesetz (EEG) wurden seit Beginn der 2000er Jahre hohe Kapazitäten an Bioenergieanlagen installiert. Aufgrund der zum Betrieb erforderlichen land- bzw. forstwirtschaftlichen Infrastruktur wurden diese Anlagen verstärkt im ländlichen Raum ausgebaut und zur Strom- und Wärmeerzeugung betrieben. Da die gesamte, über das Jahr erzeugte Strommenge vergütet wird, ist das Betriebsregime der meisten Bioenergieanlagen auf eine konstante Stromerzeugung und damit auf möglichst hohe Strommengen ausgelegt. Zudem agieren die Anlagen weitestgehend unabhängig von anderen Stromerzeugern.

Der steigende Anteil wetterabhängiger, volatiler Stromerzeuger führt jedoch zu starken Abweichungen zwischen Erzeugung und Bedarf und daraus resultierend zu immer häufiger auftretenden Über- und Unterkapazitäten (siehe Abb. 1A). Im Sinne der Netzstabilität und der Versorgungssicherheit steigt deshalb der Bedarf an Ausgleichsmechanismen.

In Zukunft soll ein Ausgleich bereits in den unteren Netzebenen, wie der Bilanzkreisebene, stattfinden (BMWI, 2015). Generell besteht jedoch die Unsicherheit, welche Arten von Ausgleichsmechanismen in welcher Situation bzw. zu welchen Zeitpunkten benötigt werden (Prognos 2016). Neben der aktuell bereits etablierten, flexiblen Stromerzeugung anhand der Spotmarktpreise, wie sie bereits von vielen Biogasanalgen durchgeführt wird, sollen weitere netzdienliche Betriebsweisen forciert werden.

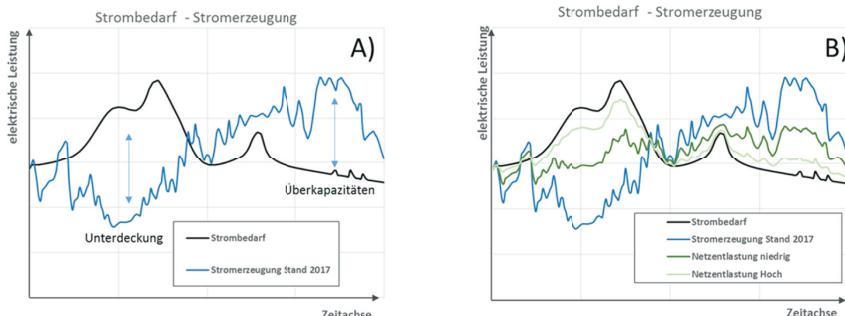


Abb. 1: Strombedarf und Stromerzeugungen ohne (A) und mit (B) Management auf Bilanzkreisebene.

Insbesondere der Ausgleich zwischen volatilen und steuerbaren Erneuerbaren Stromerzeugen stellt in diesem Kontext ein zentrales Element dar, den Ausgleich innerhalb von Bilanzkreisen zu fördern. Eine regionale Netzentlastung ist beispielhaft in Abb. 1B dargestellt.

Während Biogasanlagen bereits vielerorts strom-, markt- oder netzdienlich betrieben werden, ist eine flexible Stromerzeugung aus Biomasse HKW bisher nur in Sonderfällen realisiert worden. Besonders Biomasse HKW stellen jedoch vorwiegend in ländlichen Netzen häufig einen signifikanten Anteil der installierten Leistung.

1.2 Projektziel

Um den netz- bzw. marktdienlichen Betrieb von erneuerbaren Stromerzeugern zu stärken und bessere Zukunftsperspektiven speziell für Biomasse HKW zu schaffen, soll ein neuartiges Speicherkonzept auf der Grundlage ausgewählter Speichertechnologien untersucht werden. Die übergeordnete Fragestellung lautet dabei, ob dieser Ansatz der Kraftwerksflexibilisierung eine technologische und wirtschaftliche Option für zukünftige Netzedarstellen kann.

2 Stand von Wissenschaft und Technik

2.1 Biomasse Heizkraftwerk

Insgesamt wurden in Deutschland mehr als 540 Biomasse HKW mit einer installierten Leistung von über 1.560 MW_{el} installiert. Der Großteil der installierten Leistung wird von Anlagen >5MW_{el} (74 %) und Anlagen zwischen 0,5 und 5 MW_{el} (23 %) bereitgestellt (Hoffstede, et al., 2016). Das Leistungssegment >2MW_{el} (und damit mehr als 80 % der installierten Leistung) wird fast ausschließlich von Biomasse-HKW mit Dampfkreislauf abgedeckt.

Die BMHKW mit Dampfkreislauf bestehen grundsätzlich aus den nachfolgenden Komponenten. In einer Feststofffeuerung wird holzartige Biomasse verbrannt und Hochdruckdampf (50 bis 90 bar) erzeugt. Dieser Dampf wird zur Stromerzeugung direkt in eine Dampfturbine geleitet. Der anfallende Abdampf (0,1 bis 0,05 bar) wird in einem Luftkondensator kondensiert und über den Speisewasserbehälter zurück in den Kreislauf geführt. Oftmals ist die Turbine für den KWK-Betrieb mit Entnahme oder Anzapfung ausgeführt, um Dampf für Wärme- oder Prozessdampfversorgung aus dem System entkoppeln zu können. Biomasse HWK die bereits über einen Dampfspeicher verfügen sind nicht bekannt.

Um den stark schwankenden Heizwert des sehr inhomogenen Brennstoffes (schwankende Feuchte, Fremdstoffgehalt etc.) auszugleichen, ist die Feuerung auf eine konstante und träge Fahrweise ausgelegt. Die besten Betriebsparameter werden auf einem definierten Betriebspunkt und bei konstanter Fahrweise erzielt.

2.2 Flexible Stromerzeugung in BHKW

Aufgrund des steigenden Bedarfs an flexibler Stromerzeugung wurden im Bereich der Bioenergie verschiedene Studien durchgeführt. Im Fokus dieser Studien standen allerdings Biogasanlagen, welche durch die guten Speichereigenschaften des Biogases mit überschaubarem Zusatz-Aufwand flexibel betrieben werden können. Für Biomasse-HKW ist die Flexibilisierung deutlich aufwändiger. Aufgrund des sehr inhomogenen Brennstoffes sind die Anlagen auf einen konstanten Verbrennungsprozess ausgelegt, wodurch eine flexible Steuerung der Verbrennung nur sehr träge möglich ist. Auch der Zwischenergieträger Dampf ist im Gegensatz zum Biogas, nur mit sehr großem Aufwand speicherbar.

In den Studien von Hoffstede (2016) und Thrän (2015) wurden verschiedene Alternativen zur steuerbaren Stromerzeugung aus Biomasse HKW untersucht. Die drei relevanten Konzepte sind in Tab. 1 zusammengefasst.

Tab. 1: Konzepte zur BHKW Flexibilisierung (nach Hofstede (2016) und Thrän (2015))

	Feuerungsregelung	Dampfumfahrung	Wärmepufferung
	Brennstoffregelung im Feuerraum	Dampf wird über Bypass an Turbine vorbeigefahren und direkt kondensiert	Wärmespeicher entkoppelt Wärmeentnahme und Wärmelieferung
Regelbereich ¹	40 % bis ca. 115 %	30 % bis 100 %	60 % bis ca. 110 %
Investition	niedrig	niedrig	mittel (Wärmespeicher)
Vorteile	kein Umbau erforderlich	sehr schnell, Lieferung negativer Regelenergie, kostengünstig	hohe Effizienz, schnelle Regelbarkeit
Nachteile	sehr träge Regelung, hohe Effizienzverluste, Emissionsprobleme, langsame Regelung, nicht bei allen Kesseltypen möglich	nur Reduzierung der Strommenge möglich, „Energievernichtung“	Energiemenge limitiert, nur bei Warmwasserversorgung möglich, stark abhängig von Wärmebedarf und Saison
	keine Kompensation der reduzierten Energie, d. h. keine Rückverstromung keine elektrische Energiespeicherung		

In beiden Studien wurden alle drei Konzepte unter technischen und wirtschaftlichen Gesichtspunkten als tendenziell unrentabel bewertet. Ein wesentlicher Grund dafür, besteht unter anderem in der fehlenden Möglichkeit zur Rückverstromung. Das bedeutet, die elektrische Leistung kann zwar reduziert, jedoch nicht signifikant erhöht werden. Um mit Stromspeichern konkurrieren zu können ist allerdings sowohl eine Reduzierung, als auch Erhöhung der elektrischen Leistung notwendig. Antoni et al. (2015) untersuchten die Feuerungsregelung und die Wärmepufferung und kamen zu ähnlichen Erkenntnissen bezüglich der Wirtschaftlichkeit. Auch technische Aspekte, wie die träge Regelung, die stark limitierte Speichermenge oder erhöhter Verschleiß, stellen zentrale Hürden für die betrachteten Flexibilisierungskonzepte.

Zusammenfassend kann die Aussage getroffen werden, dass aktuell keine wirtschaftlich umsetzbare Lösung für die Flexibilisierung von BMHKW besteht, welche eine den Stromspeichern ähnliche Betriebsweise ermöglicht.

Der Ansatz der Dampfspeicherung wurde in betreffenden Studien jedoch nur am Rande untersucht. Zudem wurden die Betrachtungen einzig auf den Ruths-Dampfspeicher bezogen (Hofstede, 2016, Ortwein, et al., 2015).

2.3 Dampfspeicherung zur Flexibilisierung von Biomasse HKW

Das Grundkonzept der Dampfspeicherung für die Flexibilisierung von Kraftwerken wurde bereits in den 1930er Jahren für die Spitzenlasterzeugung in Kohle und Atomkraftwerken entwickelt (Goldstern, 1970). Für dieses Konzept standen ausschließlich-Ruths-Speicher zur Verfügung. Die Konzeptidee besteht darin, die unflexiblen Komponenten des Kraftwerks (Feuerung und Dampferzeuger) vom hochflexiblen Dampfturbinensystem zu entkoppeln (siehe Abbildung 3). Zur Reduzierung der Strommenge kann ein Teilstrom des Turbinendampfes abgeführt und in den Speicher geladen werden. Zum Erhöhen der Strommenge wird Dampf aus dem Speichersystem in eine niedrigere Druckstufe der bestehenden Turbine oder in eine zusätzliche Turbine integriert. Zwar wurden in den 1930er Jahren einzelne Spitzenlastkraftwerke mit Ruths-Speichern in diesem Betriebsmodus realisiert (Beckmann , et al., 1984), jedoch wurde ein solcher Betrieb weder wissenschaftlich, noch seitens der Industrie dokumentiert. Dieses Speicherkonzept hat sich aufgrund hoher Kosten und Speicherverlusten, aber auch wegen dem damals niedrigen Bedarf an Ausgleichsenergie nicht etabliert (Goldstern, 1970). Der Umstand, dass nur Sattdampf aus dem Ruths-Speicher entladen werden kann, wirkt sich ebenfalls negativ aus, da die Umsetzung von Sattdampf mit niedrigeren Wirkungsgraden und ggf. einen höherem Verschleiß einher.

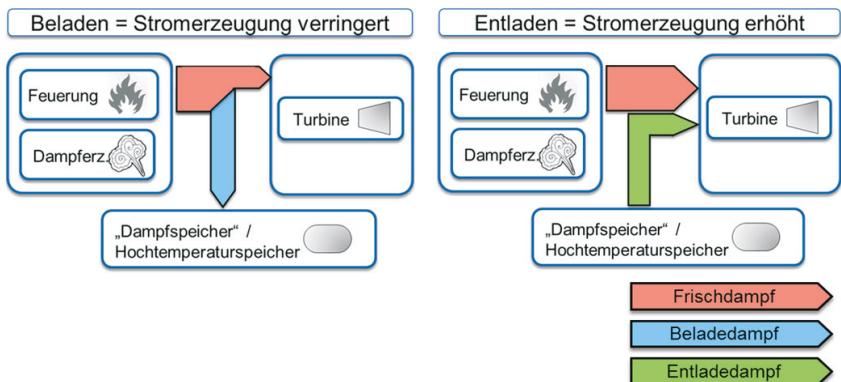


Abb. 2: Konzept der Dampfspeichernutzung im Kraftwerk.

Der Ruths-Speicher als Pufferspeicher für industrielle Prozessdampf (als reiner Wärme-/Dampfspeicher) ist bis heute Stand der Technik. In diesem Anwendungsfall wird der Speicher in eine Dampfversorgungsleitung eingebaut, um Sattdampf (üblicherweise zwischen 10 und 25 bar) zwischen Erzeuger und Verbraucher zu puffern. Die Regelung erfolgt mit einer einfachen Druckregelung (Spirax Sarco, 2016). Aus Gründen der Effizienz in der Dampflieferung wird nur ein sehr geringes Druckband von etwa 1-2 bar zwischen Be- und Entladung gefahren.

Beim geplanten Einsatz am Biomasse HKW ist jedoch ein vollkommen anderer Speicherbetrieb erforderlich. Im Gegensatz zur Regelung auf ein geringes Druckband wird hier der Speicher auf Maximaldruck von über 60 bar beladen und fast vollständig auf unter 2-3 bar entladen. Bei dieser Betriebsweise ist eine um ein Vielfaches höhere Speicherkapazität, jedoch aber auch eine stärker schwankende Dampfqualität zu erwarten.

In den letzten 15 Jahren wurde das Konzept der Dampfspeicherung im Bereich der solar-thermischen Kraftwerke wieder verstärkt aufgegriffen. Um die Kraftwerke auch nachts betreiben zu können, ist hier eine Dampfspeicherung notwendig. Steinmann (2006) stellt fest, dass eine Speicherung von Dampf mit einer Kombination aus verschiedenen Speichersystemen deutlich effizienter gestaltet werden kann. So ist es möglich, den Dampf zu überhitzten und die Speichereffizienz zu verbessern. Für die solarthermischen Großkraftwerke wurden verschiedene, neuartige Speichersysteme entwickelt. Diese wurden in verschiedenen Studien zusammengefasst und untersucht (Medrano, et al., 2010, Gil, et al., 2010, Tamme, et al., 2005). Einige dieser innovativen Speichertechnologien wie der Hochtemperatur-Latentspeicher oder der Feststoffspeicher, aber auch modifizierte oder erweiterte Ruths-Speicher werden mittlerweile bereits für andere Anwendungen, wie die industrielle ProzesswärmeverSORGUNG, betrachtet. Auch erste Ideen für die Nutzung als Stromspeicher werden bereits vorangetrieben (Dittmann, et al., 2015).

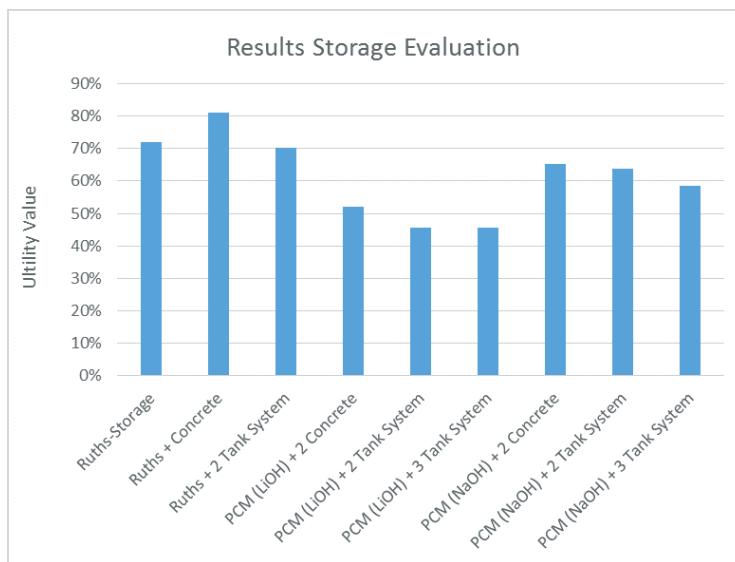


Abb. 3: Ergebnisse der Nutzwertanalyse (Stark, 2017)

Diese Konzepte wurden auf ihre Eignung für den Einsatz im BMHKW bewertet (Stark, et al., 2016). In einer, unter Experten durchgeföhrten Delphi-Studie wur-

den neun, für den Einsatz in Bioenergieanlagen nutzbare Speicherkonzepte verglichen und bewertet. In dieser Untersuchung stellte sich die Kombination von Feststoff-Betonspeicher und Ruths-Speicher als die vielversprechendste Variante heraus (Stark, 2017).

Die Kombination von Feststoff-Beton- und Ruths-Speicher wurde von Steinmann et al. (2006) betrachtet. Bei solar-thermischen Systemen (mit ähnlichen Dampfparametern) kann der Feststoffspeicher 10-15 % der thermischen Energie aufnehmen und den Ruths-Speicher entsprechend entlasten. Bai et al. (2011) entwickelten ein Berechnungsmodell. Dieses Modell wies die Überhitzung des Entladedampfes und den Speicherbetrieb theoretisch nach. In einem Feldversuch von Laing (2006) wurden verschiedene Betonspeicher im Feldversuch genauer untersucht und auf ihre Eignung zur Dampfüberhitzung erzielt.

3 Dampfspeicher für ein Biomasse Heizkraftwerk

Das Speichersystem setzt sich aus den Komponenten Ruths-Speicher (Sattdampfspeicherung), Feststoff-Betonspeicher (Vorkühlung/Überhitzung des Dampfes), Regelung und einer Turbine zur Nachverstromung zusammen (Abb. 4). Die Regelung wird über ein zu entwickelndes Betriebsregime, abhängig von äußeren Signalen (z.B. Netzbelaistung, PV- oder Winderzeugung, Markt-signalen) betrieben.

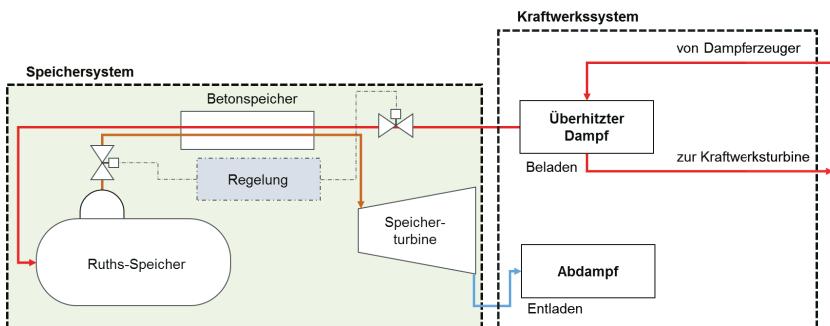


Abb. 4: Verschaltung des Speicherkonzeptes

Die vorgehenden Untersuchungen stellten folgende Vorteile dieser Speicherverschaltung. Ein Teil der Speicherkapazität wird auf den Betonspeicher verlagert.

- Beim Entladen wird die gespeicherte Energie aus dem Betonspeicher verwendet
- Der Sattdampf aus dem Ruths-Speicher wird überhitzt und ist so besser zu verstromen.
- Betonspeicher wie auch der Ruths-Speicher haben eine sehr schnelle Reaktionszeit.

Zum aktuellen Zeitpunkt sind nur theoretische Modellberechnungen möglich, um das Speicherverhalten abzubilden, jedoch bieten diese Ergebnisse keine ausreichende Zuverlässigkeit für den Bau einer industriell nutzbaren Anlage. Gerade die Komponente Ruths-Speicher stellt einen entscheidenden Kostenfaktor dar.

Obwohl einzelne Bestandteile dieses Speichersystems bereits am Markt verfügbar sind, besteht in der Kombination und dem neuartigen Einsatzfall ein nennenswerter Forschungs- und Entwicklungsbedarf. Die interne Verschaltung, die Regelung und die Anbindung des Speichersystems an das Kraftwerk müssen neu konzeptioniert werden.

4 Forschungsziele KomBio

Im Forschungsprojekt KomBio sollen folgende Schwerpunkte bearbeitet werden.

Einbindung und Konzeption des Speichersystems: Die Einbindung des Speichersystems in den Kraftwerksprozess sowie die interne Verschaltung wurden bisher nicht ausgearbeitet. Hier sind die verschiedenen Möglichkeiten zu erfassen sowie Vor- und Nachteile zu bewerten.

Aufbau eines industriellen Testspeichers im Labormaßstab: Die Wechselwirkungen der einzelnen Speicher-Komponenten untereinander sind nicht bekannt oder in der Literatur verfügbar. Das Be- und Entladeverhalten, die Dampfparameter und die Kapazitäten müssen über einen Testspeicher untersucht werden. Gerade die zeitliche Verfügbarkeit und die Dampfqualität sind hier entscheidend.

Entwicklung und Testen der Regelung: Der Aufbau und die Betriebsweise der Regelung ist bisher nicht entwickelt worden. Da die in den Turbinen erzeugte Strommenge direkt vom Massenstrom des Dampfes abhängt, muss der Massenstrom genau eingestellt werden können. Es ist notwendig weitere Kenntnisse über die Genauigkeit, Anfahrgeschwindigkeit und Effizienz dieser Regelung zu erhalten. Diese Regelung muss konzeptioniert und getestet werden.

Entwickeln eines Betriebsregimes: Erst mit den Erkenntnissen am Testspeicher kann ein realitätsnahes Betriebsregime ausgearbeitet werden. Auf Basis äußerer Kennwerte wie Netzelastung, Erzeugung, Bedarf oder Marktsignale, soll der Speicher angesteuert und Be- bzw. Entladeprozesse initiiert werden. Am Testspeicher soll dieses Betriebsregime im entkoppelten Parallelbetrieb auf seine Machbarkeit untersucht werden.

Diese vier beschriebenen Punkte, sind die nächsten notwendigen Schritte zur Entwicklung des geplanten Speichersystems. Auf Basis dieser Erkenntnisse kann eine genaue Aussage zur wirtschaftlichen und technischen Machbarkeit wie auch zu den THG-Einsparungen und zur Energieeffizienz getroffen werden.

Das Gesamtziel des Vorhabens besteht darin, Konzepte für die sinnvolle Inte-

gration von Speichertechnologien zu entwerfen und die Grundlagen für den Bau von Prototypen an Biomasse Heizkraftwerken zu schaffen.

Eine Umrüstung von Biomasse Heizkraftwerken zu flexiblen Kraftwerken kann vor allem den Betreibern von Bestandsanlagen, deren EEG Vergütung in den kommenden Jahren ausläuft, eine neue wirtschaftliche Basis ermöglichen. Auch für die Neuanlagen, die in Zukunft ausgeschrieben werden sollen, kann die Möglichkeit der flexiblen Stromerzeugung ein wirtschaftlicher Vorteil sein. Im Rahmen des Strommarktes 2.0 /Weißbuchs des BMWI sollen weitere Märkte für die flexible Betriebsweisen von Kraftwerken geschaffen und ausgebaut werden.

Auch Stromvermarkter, die aktuell Biogasanlagen zu virtuellen Kraftwerken zusammenschließen, können hiervon profitieren. Im Gegensatz zu Biogasanlagen könnten Biomasse Heizkraftwerke stufenlos geregelt werden und das aktuelle Portfolio der Vermarkter ergänzen.

Unabhängig von marktabhängigen Faktoren ist in Zukunft geplant, die Netze schon auf Bilanzkreisebene auszugleichen. Beispielsweise in Netzabschnitten mit hohen Photovoltaik-Erzeugungskapazitäten, wie sie in Zukunft in ganz Bayern und Deutschland üblich sein werden, können flexible Biomassekraftwerke in Wechselwirkung mit den volatilen Erzeugern betrieben werden um so einen Netzausgleich schon auf den niedrigeren Netzebenen zu gewährleisten.

Insgesamt soll eine Basis geschaffen werden, um die mit fester Biomasse betriebenen Anlagen auch in Zukunft weiter im Netz zu etablieren.

Literatur/Quellen

Antoni Oliver, Stark Matthias und Zörner Wilfried Anreize zur flexibilisierten Fahrweise von Kraftwerken mit fester Biomasse [Artikel] // Energiewirtschaftliche Tagesfragen. - 2015. - 2.

Bai Fengwu und Xu Chao Performance analysis of a two stage thermal energy storage system using concrete and steam accumulator [Artikel] // Applied Thermal Engineering. - 2011. - S. 2764-2771.

Beckmann Georg und Gilli Paul Viktor Thermal Energy Storage [Buch] / Hrsg. Springer-Verlag. - Wien; New York : Springer-Verlag, 1984.

BMWI Ein Strommarkt für die Energiewende - Weißbuch [Bericht]. - Berlin : BMWI, 2015.

Dittmann Achim, Kretschmer Rutger und Liebmann Cornelia Option für eine gelingende Energiewende [Artikel] // Euro heat and Power. - 2015. - Sept .

Gil Antoni [et al.] State of the art on high-temperature thermal energy storage for power generation Part 1- Concepts and modelization [Artikel] // Renewable and Sustainable Energy Reviews. - 2010. - S. 31-55.

Goldstern W. Steam Storage Installation [Buch]. - Oxford : Pergamon Press, 1970.

Hoffstede U. [et al.] FlexHKW Flexibilisierung des Betriebes von Heizkraftwerken [Bericht]. - Kassel : Fraunhofer IWES , 2016.

- Hofstedte FlexHKW Flexibilisierung von Biomasse Heizkraftwerken [Konferenz] // Energetische Biomassenutzung, 6. Statuskonferenz Biomasse. - Leipzig : DBFZ, 2015.
- Laing, D., [et al.], Solid media thermal storage for parabolic trough power plants. [Article] Solar Energy, pp. 1283-1289., 2006
- Medrano Marc [et al.] State of the art on high-temperature thermal energy storage for power generation. Part 2—Case studies [Article] // Renewable and Sustainable Energy Reviews. - 2010. - pp. 56-72.
- Ortwein Andreas und Lenz Volker Flexible Power Generation from Solid Biofuel [Buchabschnitt] // Smart Bioenergy. - Leipzig : Springer, 2015.
- Spirax Sarco Grundlagen Dampfspeicher [Buch]. - Konstanz : SPIRAX SARCP GmbH, 2016. - 1.
- Stark Matthias [et al.] Approaches for Dispatchable Biomass Plants with Particular Focus on Steam Storage Devices [Artikel] // Chemical Engineering & Technology. - 21. Dezember 2016. - S. 227-237.
- Stark Matthias Steam Storage Flexible Biomass Power Generation - Formal Review [Bericht]. - Ingolstadt / Leicester : Technische Hochschule Ingolstadt / De Montfort University Leicester, 2017.
- Steinmann W.-D. und Eck Markus Buffer storage for direct steam generation [Artikel] // Solar Energy 90. - 2006. - S. 1277 - 1282.
- Tamme Rainer, Nunez Thomas und Götsche Joachim Speicherung für Hochtemperaturwärme [Artikel] // FVS. - 2005.
- Thrän D. Smart bioenergy - Technologies and concepts for a more flexible bioenergy provision in future energy systems [Buch]. - Cham : Springer, 2015. - S. Ch. 10.
- Zarza Eduardo [et al.] Direct steam generation in parabolic troughs: Final results and conclusions of the DISS project [Artikel] // Energy 29. - 2004. - S. 635-644.

Kontakt

Matthias Stark, B.Eng, Wissenschaftlicher Mitarbeiter

Institut für Neue Energiesysteme InES der TH Ingolstadt

⌚ (0)841.9348-6405 | ✉ matthias.stark@thi.de | 🌐 www.thi.de/lnes

Biomass Steam Processing – Energieeffiziente Nutzbarmachung von Bioreststoffen in einer 2.000 t/a Demonstrationsanlage

Zusammenfassung: Das Bioabfallaufkommen in Deutschland ist seit Jahren steigend, was vor allem an der vermehrten Getrenntsammlung von häuslichen Bioabfällen nach dem Kreislaufwirtschaftsgesetz liegt. Biotonnenabfälle und Garten- und Parkabfälle werden bevorzugt in Kompostierungsanlagen zu Kompost verwertet, an welchen jedoch immer höhere Anforderungen gestellt werden. Zur Bewältigung dieser Herausforderung werden Verfahren benötigt, welche sowohl unbearbeitete biogene Reststoffe als auch die bei der Kompostierung anfallenden Reststoffströme (z.B. kunststoffhaltige Fraktionen) verwerten können.

Das BSP-Verfahren (Biomass Steam Processing) bietet durch energieeffiziente Karbonisierung eine Lösung für biogene Reststoffe. Es ist für eine große Bandbreite von trockenen und feuchten organischen Stoffen einsetzbar und verwertet Reststoffe, die bisher mit hohem Kostenaufwand entsorgt werden müssen und produziert einen Rohstoff, welcher weiter genutzt werden kann. Das Verfahren zeichnet sich vor allem durch seine einfache Anlagentechnik und moderate Prozessparameter aus. Derzeit wird eine Demonstrationsanlage am Standort einer Kompostierungsanlage errichtet, welche im Frühjahr 2020 in Betrieb geht. Sie hat einen projektierten Durchsatz von mindestens 2.000 t/a und soll durchgehend betrieben werden.

Abstract: The quantity of biowaste collected has been rising in Germany for years, mainly due to the increased separation of household biowaste in accordance with the German Recycling Management Act. Biowaste from household bins and garden and park maintenance are mostly turned into compost in composting facilities, which are, however, facing increasingly stringent requirements. Processes that can recycle both unprocessed biogenic residues and the residue streams resulting from composting (e.g. fractions containing plastic carry bag residues) are therefore needed.

The BSP process (Biomass Steam Processing) has been demonstrated to be an energy-efficient carbonisation method for such biomass residues. It can be used for a wide range of dry and moist organic materials and recycles biogenic residues that previously had to be disposed of at high cost. The biochar produced is a raw material with diverse uses. The BSP process is characterised by its simple plant design and relatively mild process parameters. A demonstration plant is currently being built near a composting plant, which will be commissioned during spring 2020. It has a projected throughput of 2,000 t/a of feedstock and will be operated continuously.

1 Entwicklung neuer Karbonisierungsstrategien

1.1 Limitierte Ressourcen erfordern neue Energieträger

Angesichts der knapper werdenden fossilen Ressourcen und des fortschreitenden Klimawandels steigt das Interesse an Energieträgern aus Biomassen. Der Einsatz von kohlehydratbasierten biogenen Reststoffen, wie Stroh, Holzresten und -abfällen, Grasschnitt, biogenen Siedlungsabfällen, Gärresten als Energieträger anstelle von sogenannten „Energiepflanzen“ vermeidet die Konkurrenz zu Nahrungsmitteln. Biomasse weist einen hohen Anteil an chemisch gebundenem Wasser, sowie häufig einen hohen Feuchtegehalt auf. Daraus resultiert ein niedriger massebezogener Energiegehalt.

Um die Energiedichte von Biomasse zu erhöhen, sind verschiedene Verfahren verfügbar. Abhängig von Temperatur, Druck, Reaktionszeit und Biomasseanteil lassen sich dabei feste, flüssige oder gasförmige kohlenstoffhaltige Stoffe gewinnen. Generell gilt: Mit steigender Schärfe der Reaktionsbedingungen, vor allem Temperatur und Reaktionszeit, nimmt die Tendenz zur Bildung gasförmiger Produkte zu und es entstehen kleinere organische Moleküle.

Kohlenstoff stellt einen vielfältig einsetzbaren effektiven Energiespeicher dar. Verfahren zur Konditionierung von Biomassen, die auf Kohlenstoff als Feststoff abzielen, treffen daher auf ein großes Interesse. Bei der Karbonisierung wird der Kohlenstoffanteil der Einsatzbiomassen durch thermische Behandlung in Inertgasatmosphäre (Pyrolyse) oder mit Hilfsstoffen wie Wasser unter Druck (HTC) als feste Kohle gewonnen. Sowohl Pyrolyse als auch HTC erfordern vergleichsweise lange Reaktionszeiten, um in den Produkten hohe Kohlenstoffanteile zu erzielen. So wird bei der Pyrolyse die Biomasse für mehrere Stunden auf rund 450 °C oder höher gehalten. Bei HTC sind mit etwa acht bis 24 Stunden bei 180 °C bis 240 °C ebenso lange Reaktionszeiten nötig, doch die Reaktionstemperaturen ist niedriger. Der verfahrenstechnische Aufwand bei der HTC ist allerdings durch das flüssige, heterogene Reaktionsmedium und den anzuwendenden Druck erheblich höher. Zudem wirkt das Reaktionsmedium durch die in der Biomasse enthaltenen Salze und organischen Säuren, die im Prozess gebildet werden, unter den Reaktionsbedingungen des Verfahrens korrosiv, was entsprechende Anforderungen an das Material der Reaktoren stellt. Vorteilhaft bei der HTC ist die Möglichkeit, feuchte Biomasse einzusetzen. Dabei lassen sich äußerst variable Strukturen erreichen.

1.2 BSP – einfach und schnell

Um die verfahrenstechnischen Nachteile der HTC und der Pyrolyse zu vermeiden, wurde im Rahmen einer Forschungskooperation zwischen dem Karlsruher Instituts für Technologie (KIT) und dem Energieversorger EnBW Energie Baden-Württemberg AG eine alternative Methode – die atmosphärische Dampfkonditionierung (siehe Abbildung 1) entwickelt und zur technischen Reife gebracht. Beim „Biomass Steam Processing“ (BSP) wird der Einsatzstoff unter Atmosphä-

rendruck mit Wasserdampf bei Temperaturen zwischen 250 °C und 400 °C bei Reaktionszeiten von einigen Minuten bis wenigen Stunden behandelt. Dabei entsteht mit wesentlich geringerem verfahrenstechnischem Aufwand als bei der HTC und bei stark reduzierten Reaktionszeiten als bei der Pyrolyse braunkohleähnliche Biokohle. Die Kohle wird kontinuierlich produziert und fällt im Prozess trocken an, was eine energieintensive Nachbehandlung vermeidet. Die kondensierbaren und Permanentgasbestandteile werden aus dem Prozess abgeführt und können zu wertvollen Chemikalien auskondensiert oder zur Wärmeerzeugung thermisch genutzt werden. Insgesamt sind die BSP-Reaktionsbedingungen einfacher beherrschbar und die Elementarzusammensetzungen der entstehenden Kohlen sind variabler als bei konkurrierenden Verfahren.

	Langsame Pyrolyse (SP)	Biomass Steam Processing (BSP)	Hydrothermale Karbonisierung (HTC)
Medium	Inertgas (N_2)	überhitzter Dampf	heißes Druckwasser
Temperatur	300 – 500°C	250 – 400°C	180 – 250°C
Zeit	lang ($t > 8$ h)	kurz ($t < 2$ h)	lang ($t > 8$ h)
Druck	erhöht ($p > 1$ bar)	atmosphärisch	hoch ($p > 12$ bar)
Verfahren	kontinuierlich	kontinuierlich	semi-kontinuierlich

Abb. 1: Verfahrensvergleich

1.3 BSP – Anlagenentwicklung

Das BSP Verfahren wurde zunächst in einem kleinen Laborreaktor im Batchbetrieb untersucht. Überhitzter Dampf wurde bei Reaktionstemperaturen zwischen 200 °C und 400 °C und Drücken zwischen 0,1 und 0,4 MPa über ca. 1 g Biomasse geleitet. Die Variation des Druckes hatte nur geringen Einfluss auf die Produktzusammensetzung. Die so erhaltenen Biokohlen sind vergleichbar mit Braunkohle und entsprechen den durch die druckgestützte hydrothermale Karbonisierung erhaltenen Produkten. Aufbauend auf diesen Ergebnissen im Laborreaktor wurde ein elektrisch beheizter Schneckenrohrreaktor (Vinnen = 1 L) im Technikumsmaßstab gebaut, mit welchem kontinuierliche Versuche durchgeführt wurden. Dabei wurden Massenströme zwischen 10 g/h und 500 g/h mit 1 kg/h Dampf bei Atmosphärendruck zwischen 250 und 400 °C behandelt, wobei die Verweilzeit zwischen 15 und 120 min über die Schneckenfrequenz eingestellt wurde. Bei Versuchen an diesem Reaktor konnten die Kohlenstoffbilanzen von Holz und Stroh für alle drei Phasen (Biokohle, Kondensat, Permanentgase) geschlossen werden. Durch Variation der Reaktionsbedingungen konnten bis zu 80 % des Kohlenstoffanteils in der Biokohle gefunden werden, die einen Brennwert (trocken, aschefrei) von etwa 25 MJ/kg aufwies. Am

beschriebenen Versuchsstand wurde eine große Bandbreite an Biomassen mit verschiedenen Wassergehalten untersucht, um die Eignung der Technologie als Biomasse-Verwertungsverfahren zu verifizieren. Aufbauend auf diesen Experimenten wurde eine Pilotanlage mit einem Doppelschneckenreaktor (Vinnen = 93 L) mit einem nominellen Durchsatz von 25 kg/h (bei einer Dichte von ca. 300 kg/m³) aufgebaut bei einer maximalen Dauertemperatur von 400 °C. Die Dampfphase wurde kontinuierlich ausgeschleust und in einer zweistufigen Kondensatoreinheit in eine bioölreiche und eine wässrige Phase aufgetrennt.



Abb. 2: BSP-Forschungsanlagen; links: Labor; Mitte: Technikum; recht: Pilotanlage

Nach erfolgreicher Versuchsführung und Dauerbetrieb konnte ein weiterer Scale-Up geplant werden, um dauerhaft reale Abfallstoffströme umzusetzen. Unterstützend wurden zudem Prozessmodelle in der Simulationssoftware AspenPlus entwickelt, um Wärme- und Stoffströme des BSP-Verfahrens für unterschiedliche Reaktorgeometrien zu berechnen. Dafür wurden empirisch die Ausbeuten der jeweiligen Produkte, wie z.B. Kohlenstoff in der Biokohle, Essigsäure, CO_x als Funktion der Reaktionstemperatur im Intervall zwischen 250 °C und 350 °C durch einen Potenzansatz für eine Verweilzeit von einer Stunde beschrieben.

Auf Basis dieser Ergebnisse wurde im Rahmen des Projektes eine Demonstrationsanlage erbaut, welche mit einem Durchsatz von mindestens 2.000 t/a (ca. 250 kg/h) feuchte organische Reststoffe verwerten soll.

2 Demonstrationsanlage

2.1 Vorversuche

Für die Planung der Demonstrationsanlage wurden alle verfügbaren experimentellen Ergebnisse der Forschungen im Karlsruher Institut für Technologie herangezogen und auf deren Basis ein Reaktorkonzept entwickelt, welches den Prozesserfahrungen und den höheren Durchsätzen Rechnung trägt. Aufgrund der Inhomogenität von Biomasse und insbesondere der am Standort der Kompostierungsanlage auftretende Gefahr von Störstoffen, wurde eine möglichst einfache und störstofftolerante Anlagentechnik gesucht. Die Wahl fiel aufgrund der Erfahrung in thermischen Prozessen auf ein indirekt beheiztes Drehrohr. Durch diese Art der Beheizung können die Abgase der Brenner und die entstehenden Prozessgase getrennt voneinander geführt werden, was die Nachbehandlung vereinfacht. Zur Verifizierung des Reaktorkonzepts wurden Vorversuche

an einem 5,8 m langem Drehrohr mit einem Durchmesser von 0,3 m durchgeführt, welches elektrisch geheizt wurde. Dabei wurden die biogenen Reststoffe des Standorts verwendet, welche neben einem hohen Wassergehalt auch einen hohen Aschegehalt aufweisen. Dies führt zwangsläufig zu nur geringen Heizwerten von 3 bis 7 MJ/kg der Einsatzstoffe, die Karbonisierung selbst verläuft aber dennoch nach dem bisherigen Muster (siehe Tab. 1). Die Einsatzstoffe wurden aus verschiedenen Kompostierungsstoffströmen entnommen. Biotonne entspricht dem eingesetzten Material vor der Kompostierung und besteht aus kommunal gesammelten häuslichen biogenen Abfällen. NIR-Eject ist ein Stoffstrom mit einem hohen Anteil an Kunststofffolien, welche durch Fehlwürfe in der Abfallsammlung in die Kompostierung eingetragen werden. Rekultivierungs-material ist der abgetrennte Feinanteil nach der Kompostierung. Die Massendurchsätze der Versuchsreihen lagen zwischen 25 und 40 kg/h, wobei Einsatzstoffe mit höherem Wassergehalt mit niedrigerem Durchsatz prozessiert wurden, um eine vollständige Entfernung des anhaftenden Wassers zu gewährleisten. Die für den Prozess nötige Heizleistung wurde protokolliert, wobei keine Recyclierung der Prozesswärme genutzt und die Verlustwärme des Reaktors nicht separat betrachtet wurde.

Tab. 1: Stoffdaten von Einsatzstoffen und Produkten

	Wassergehalt %	Aschegehalt %	Heizwert MJ/kg	Energiebedarf kWh/kg _{IN}
NIR-Eject	37	22	7,0	-
Biotonne	56	21	3,1	-
Rekultivierung	37	36	4,3	-
Kohle _{NIR}	-	55	12,1	0,44
Kohle _{Bio}	-	68	8,0	0,66
Kohle _{Rekult}	-	71	7,3	0,55

Während der Vorversuche wurden die optimalen Reaktionsparameter für die eingesetzten biogenen Stoffströme bestimmt. Die Reaktionstemperatur konnte auf 350 °C bei einer Verweilzeit von 45 bis 60 min reduziert werden. Die erhaltenen Produktkohlen waren trocken und erreichten Heizwertsteigerungen von knapp 70 bis über 150 % (siehe Abb. 3). Der relative Aschegehalt in den Kohlen stieg aufgrund der Verdampfung des Wassers und der Abspaltung von flüchtigen Reaktionskomponenten stark an.

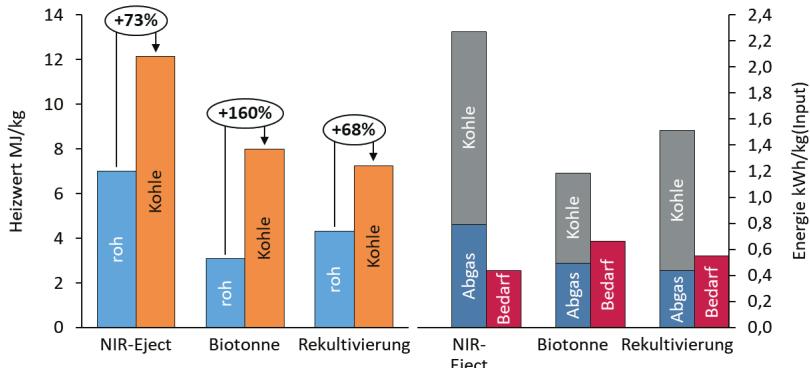


Abb. 3: links: Heizwerte von Einsatzstoffen und Produkten; rechts: Energiegehalte von Produktströmen und Prozessenergiebedarf

Durch die zusätzliche Bestimmung der Zusammensetzung der Prozessgasatmosphäre konnte die Karbonisierung über Massen- und Energieströme bilanziert werden. Dabei wurde gezeigt, dass die energetische Nutzung des Prozessgases den Energiebedarf des Verfahrens größtenteils oder in günstigen Fällen sogar vollständig decken kann (siehe Abb. 3).

Die Vorversuche an der verwendeten Labordrehrohranlage gezeigt, dass das Verfahren in einem solchen Anlagendesign gut durchführbar ist und gegenüber dem ursprünglichen Aufbau mit Förderschnecken weitere, entscheidende Vorteile bietet.

Die experimentellen Ergebnisse zeigen aber auch, dass sich die hier eingesetzten Reststoffströme nur bedingt zur Produktion von energetisch nutzbarer Biokohle eignen. Um alternative Verwertungspfade für aschereiche Biokohlen zu definieren, laufen immer noch weitere Forschungscooperationen zur Nutzung von Biokohle als Nährstoffspeicher („Bodenverbesserer“) und Aktivkohlerohstoff.

2.2 Aufbau

Die BSP-Karbonisierung findet in einem indirekt beheizten Drehrohr mit einer Länge von 12 m und Durchmesser von 1,2 m statt. Das Drehrohr kann sektional mit Erdgas/Flüssiggas geheizt werden und gewährleistet eine konstante Reaktionstemperatur von bis zu 400 °C. Beschickt wird die Anlage von einer Schnecke. Das Zuführsystem besteht aus einem Abrollcontainer mit Schubboden, welcher zur externen Befüllung abgekoppelt werden kann. Eine Förderschnecke und ein Kratzkettenförderer transportieren die Biomasse anschließend zu einer Doppelpendelklappe, welche als Eingangsschleuse dient und einen weitgehend sauerstofffreien Betrieb ermöglicht. Nach Abschluss der Karbonisierung wird die entstandene Biokohle über eine weitere Doppelpendelklappe ausgeschleust und mittels Kühl schnecke abgekühlt. Die kalte Biokohle wird abschließend in einem Container mit Verteilschnecke gelagert.

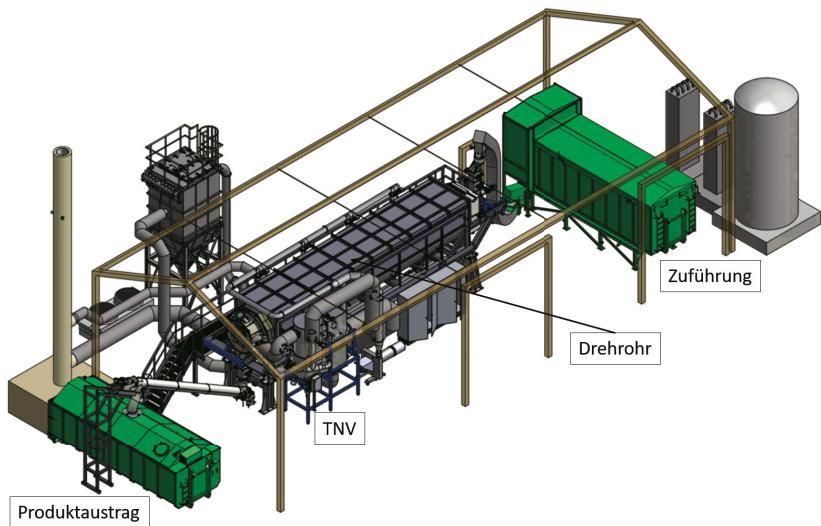


Abb. 4: 3D-Aufstellungsplan der Demonstrationsanlage

Die bei der Karbonisierung entstehende Prozessgasatmosphäre aus Wasserdampf und flüchtigen Abbauprodukten der Biomasse werden aus dem Drehrohr abgesaugt und direkt in eine thermische Nachverbrennung (TNV) geführt ($850\text{ }^{\circ}\text{C}$, 2 s Verweilzeit). In dieser werden die Prozessgase entsprechend der geltenden Vorschriften behandelt. Das resultierende Heißgas wird anschließend zur Beheizung des Drehrohrs verwendet und kann so die Energieeffizienz bedeutend steigern. Abb. 4 zeigt die tatsächliche Aufstellung der Demonstrationsanlage. Sie wird abschließend nach den Bestimmungen der 17. BImSchV zertifiziert sein.

Die BSP-Demonstrationsanlage befindet sich derzeit (Frühjahr 2020) in der Inbetriebnahmephase und soll anschließend in den kontinuierlichen Regelbetrieb überführt werden. Sie wird unterschiedliche Reststoffströme der Kompostierungsanlage mit einem Mindestdurchsatz von 2.000 t/a verwerten. Schon jetzt zeichnet sich ab, dass dieser Wert in gewissen Fällen um ca. 25 % höher liegen kann.

3 Fazit und Ausblick

Im vorgestellten Projekt wurde auf Basis der Erkenntnisse aus den Forschungen zur BSP-Technologie eine Demonstrationsanlage mit einem Durchsatz von 2.000 t/a errichtet. Die BSP-Technologie ist ein patentiertes Karbonisierungsverfahren, welches in Zusammenarbeit von EnBW Energie Baden-Württemberg AG und dem Karlsruher Institut für Technologie (KIT) entwickelt und verbessert wurde. Es kann für eine große Bandbreite an biogenen Reststoffen eingesetzt werden und wurde in verschiedenen Skalierungen getestet. Das BSP-Verfahren

zeichnet sich vor allem durch seine einfache Anlagentechnik und moderate Prozessparameter aus, wobei der eingesetzte biogene Reststoff nicht vorbehandelt werden muss. Das Produkt ist eine trockene, kohlenstoffangereicherte Biokohle, welche je nach Einsatzstoff Anwendung in verschiedenen Branchen finden kann. Sie kann sowohl energetisch zur Wärme- und Stromproduktion als auch stofflich verwendet werden. Stoffliche Nutzungsgebiete sind zum Beispiel die Weiterverarbeitung zu Aktivkohle, welche gegenwärtig am KIT weiter erforscht werden, oder der Einsatz als Bodenverbesserer zum Fixieren von Nährstoffen und zur Optimierung der Wasserspeicherfähigkeit des Bodens. Die Biokohle dient außerdem als CO₂-Speicher, da von Pflanzen aus der Atmosphäre gebundenes CO₂ in ihr fixiert wird.

In Zusammenarbeit mit dem Ingenieurbüro Live Energies GmbH und der Kompostierungsanlage der KDM GmbH am Standort Ratingen wird derzeit die Demonstrationsanlage aufgebaut, die noch Frühjahr 2020 in den kontinuierlichen Betrieb gehen soll.

Literatur/Quellen

Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen (2019): Struktur des Primärenergieverbrauchs in Deutschland 2019; Berlin.

Statistisches Bundesamt (2017): Fachserie 19 Umwelt, Reihe 1 Abfallentsorgung 2017; Wiesbaden.

Steinbrück, J. (2019): Biomass Steam Processing - Konzeption und Entwicklung eines Verfahrens zur Karbonisierung von Biomasse; Dissertation; Karlsruher Institut für Technologie.

Tavakkol, S. (2016): Investigation on Carbonization of Different Biomasses by Biomass Steam Processing (BSP); Masterarbeit; Universität Ulm.

Kontakt

Dr. Johannes Steinbrück, Projektmanager

Live Energies GmbH

① (0)711.9455 8335 | ☎ johannes.steinbrueck@liveenergies.de

⌚ www.liveenergies.de

Falko Niebling, Michael Tietze, Hagen Hilse

Wie aus organischen Reststoffen marktfähige Produkte entstehen –

Innovative Verknüpfung von Verfahren und Technologien zur Nährstoffrückgewinnung im Wachstumskern abonoCARE®

Zusammenfassung: Organische Reststoffe zu am Markt verkäuflichen Produkten aufzubereiten statt sie kostenintensiv, aber minderwertig zu entsorgen - diesem Ziel haben sich 18 Partner, davon elf privatwirtschaftliche Unternehmen und sieben Forschungseinrichtungen, aus den ostdeutschen Bundesländern verschrieben. In dem vom BMBF geförderten regionalen Wachstumskern abonoCARE® bündeln sie Innovationskraft, um geschlossene Technologie- und Wertschöpfungsketten vom Reststoff zum Produkt zu entwickeln und wirtschaftlich zu verwerten.

Dabei besteht die Herausforderung darin, das Prozesswissen sowie die entwickelten Technologien der einzelnen Partner zielgerichtet zu umsetzungsreifen Technologieketten zusammenzuführen. Hierfür hat GICON® die Aufgabe übernommen, eine Struktur zu entwickeln, um die einzelnen technologischen Beiträge der Partner in einem Wissensspeicher firmenübergreifend mit marktrelevanten Informationen zu verbinden.

Hierfür werden definierte Informationsschnittstellen und ein Konfigurator-Software mit geschützten Wissensbereichen genutzt, um die Zusammenarbeit objektiv zu organisieren. Die Software beruht auf einer Kombination fester, modellierter Regeln, spezifischen Verfahrensdaten und Variablen. Dabei werden die Einzeltechnologien bereits frühzeitig innerhalb des Projektes vernetzt und hinsichtlich ihrer Kombinierbarkeit untersucht und gegebenenfalls entwickelt.

How to turn organic residues into marketable products – Innovative combination of processes and technologies for nutrient recovery in the abonoCARE® growth core.

Summary: To process organic residues into products for sale on the market instead of disposing of them in a cost-intensive but inferior way - this is the aim of 18 partners, eleven private companies along with seven research institutions, from the states of the former East Germany. In the BMBF-funded regional growth core abonoCARE®, they are bundling innovative strength in order to develop and economically exploit closed-loop technology and value-added chains from residual material to finished product.

The challenge here is to bring together the process knowledge and the technologies developed by the individual partners in a targeted manner to create technology chains ready for implementation. For this purpose, GICON® has taken on the task of developing a structure to link the individual technological contributions of the partners to a structured, inter-company knowledge repository with market-relevant information.

For this purpose, defined information interfaces and configurator software with proprietary knowledge areas will be used to bundle the cooperation. The software is based on a combination of fixed, modelled rules, specific process data and variables. The individual technologies will be networked at an early stage within the project and will be examined and, if necessary, developed with regard to their combinability.

1 Einleitung

Organische Reststoffe zu am Markt verkauflichen Produkten aufzubereiten statt sie kostenintensiv, aber minderwertig zu entsorgen – diesem Ziel haben sich 18 Partner, davon elf privatwirtschaftliche Unternehmen und sieben Forschungseinrichtungen, aus den ostdeutschen Bundesländern verschrieben. In dem vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) geförderten regionalen Wachstumskern abonoCARE® bündeln sie ihre Innovationskraft, um geschlossene Technologie- und Wertschöpfungsketten vom Reststoff zum Produkt zu entwickeln und wirtschaftlich zu verwerten.

Im Rahmen von abonoCARE® werden organische Reststoffe (u.a. Klärschlamm, Gülle, Gärprodukte, aber auch Bioabfälle und Grünschnitt) als wertvolle Rohstoffressourcen betrachtet, für deren Verwertung es aktuell noch großes Optimierungspotenzial gibt. Die Steigerung der Wertschöpfung aus Stoffströmen heutiger Entsorgungssysteme ist eine drängende Zielstellung des Ressourcen- und Umweltschutzes. Deshalb wollen die abonoCARE®-Partner Technologieketten zur Verarbeitung organischer Reststoffe mit integrierter Nährstoff-Fraktionierung aufbauen und umsetzungsreif entwickeln. Diese Aufgabe bezieht gesellschaftliche Akteure aus mehreren Verwaltungs- und Wirtschaftsbereichen ein.

Jeder Partner bringt sein eigenes Prozesswissen über Stoffströme sowie seine eigene Technologie ein, um das Projekt Baustein für Baustein praxistauglich zu machen. Die Zielsetzung, organische Reststoffe zu wertvollen Produkten umzuwandeln, die natürlichen Ressourcen zu schonen, die Landwirtschaft nachhaltiger zu gestalten und den Einsatz von Kunstdünger verringern zu können, ist im Detail sehr komplex und stark von der regionalen Situation geprägt. Neben der Verfügbarkeit von Stoffströmen sind Rechtsvorschriften, Transportwege, Marktstrukturen usw. zu betrachten.

Deshalb ist es eine für den Gesamterfolg des Wachstumskerns entscheidende Aufgabe, das Know-how und die Entwicklungsergebnisse der einzelnen Partner zielgerichtet zusammenzuführen. Nur so können letztlich umsetzungsfreie Technologieketten geknüpft werden.

GICON® hat dafür die Aufgabe übernommen, eine Struktur zu entwickeln, um die einzelnen technologischen Beiträge der Partner in einem Wissensspeicher firmenübergreifend mit marktrelevanten Informationen zu verbinden.

2 Vorstellung Wachstumskern

abonocare® steht als Synonym für die Nutzbarmachung bisher verlorener Nährstoffe und somit für die Schonung der Umwelt und wertvoller Rohstoffressourcen. Der Name: »abono« steht spanisch für Dünger – der Inbegriff für die notwendige Nährstoffzufuhr in einer modernen Landwirtschaft zur Sicherung unserer Ernährung. Sorgsamer Umgang mit Rohstoffressourcen und nachhaltige Landwirtschaft ohne schädliche Überdüngung von Böden sind eine Generationenverantwortung, »care« steht folglich für den Anspruch der Umweltverträglichkeit und Nachhaltigkeit. Weitere Informationen liefert die Webseite www.abonocare.de.

Den Kern von abonoCARE® bilden Partner mit unterschiedlichen, eigenentwickelten Technologien zur Konditionierung, Konversion, Fraktionierung und Konfektionierung von Stoffströmen. Unterstützt werden diese durch Unternehmen und Institute, die umfangreiche analytische Kapazitäten sowie Labor- und Versuchsanlagen für Produkt- und Verfahrensentwicklung bieten. Der Wachstumskern abonoCARE® konzentriert sich auf die Wertstoffrückgewinnung aus biogenen Reststoffen, wobei biologische, chemisch-physikalische und thermische Verfahren zur Anwendung kommen. Die bisher in der Wirtschaft dominierende energetische Verwertung von biogenen Reststoffen, bestenfalls ergänzt durch die Flächenaufbringung als relativ gering wertgeschätzter Kompost, wird durch die Zielstellung der Wertstoffextraktion erweitert. Phosphor, Stickstoff, Kalium und Humus stellen dabei die Hauptkomponenten dar, aus denen Produkte mit großer Relevanz für die Landwirtschaft geschaffen werden können.

Das technologische Angebot von abonoCARE® beinhaltet die zuverlässige Behandlung von anfallenden organischen Reststoffen und eine Verwertung dieser gemäß den höchsten Standards an Nachhaltigkeit und Umweltschutz, unter anderem in Form von anwendungsspezifischem Hochleistungsdünger und Spezialerde. Der Marktzugang soll künftig neben der unmittelbaren Bereitstellung der Technologie durch die Konsortialpartner mit der Kompetenz im Anlagenbau auch die Lizenzierung und den Technologietransfer für Verwertungsketten einschließlich der technologischen Beratung umfassen.

Die Arbeit des Wachstumskerns kann in **vier übergeordnete Verbundprojekte** gegliedert werden, welche jeweils durch mehrere Teilprojekte unterstellt sind:

Im **Verbundprojekt 1** arbeiten fünf Unternehmen und Forschungsinstitute an multifeedstockfähigen Konditionierungstechnologien zur Vorbereitung organischer Reststoffe für die weiterführende Verarbeitung und Verwertung. Dabei liegen die Schwerpunkte auf einer praktikablen Charakterisierung der Eingangsstoffe und Zwischenprodukte, der effizienten Fest-Flüssig-Trennung, einer innovativen Nährstoffgewinnung mit integrierter Abgasbehandlung und einer zielgerichteten Aufwertung der Feststoffe für die Weiterverarbeitung zu Spezialzuckerloden und Bodenhilfsstoffen.

Die Wirtschaftlichkeit der Nutzung organischer Reststoffe ist geprägt durch die Qualität und Quantität des regionalen Aufkommens, woraus sich unterschiedliche Herausforderungen ergeben. So müssen in Überschussgebieten die Nährstoffe aufkonzentriert werden, um sie zu wirtschaftlich attraktiven Bedingungen überregional vermarkten zu können. Deshalb wird beispielsweise zur Verbesserung der Ausbeute an Feststoff aus Gärprodukten und zur Erzeugung weiterer nährstoffseitig aufkonzentrierter Fraktionen eine innovative zweistufige Separation mit Nutzung von elektromagnetischen Verfahren und neuartigen Flockungshilfsmitteln entwickelt.

Die Entwicklungsarbeit umfasst folgende Leistungen:

- Verfahren und Technologien zur multifeedstockfähigen Konditionierung organischer Reststoffe (Hochleistungsseparation und Feststoffaufwertung), einschließlich analytischem Monitoring
- Verfahren und Technologien zur Herstellung von Düngemitteln wie Ammoniumsulfat oder Ammoniumnitrat in Kombination mit einer Abgasreinigung
- Entsorgungsdienstleistungen mit nachhaltigen Verwertungs- und Produktionskapazitäten

Im **Verbundprojekt 2** konzentrieren sich sieben Unternehmen und Forschungsinstitute auf Verfahren und Technologien zur innovativen thermischen Verwertung von organischen Reststoffen mit Heißgasfiltration und der anschließenden Weiterverarbeitung oder zur Überführung in HTC-Kohle, wobei folgende Projektpfade verfolgt werden:

- Verfahren und Technologien zur Heißgasfiltration zum kombinierten Einsatz in Verbrennungsprozessen
- Verfahren zur Herstellung von standardisierten Düngemitteln und Phosphorsäure sowie Aufbau entsprechender Produktionskapazität
- HTC-Technologie zur Herstellung neuartiger, phosphorab gereicherter HTC-Kohle

Im **Verbundprojekt 3** forschen sechs Unternehmen und Forschungsinstitute an Verfahren und Technologien zur Rückgewinnung von Stickstoff mit Hilfe von unterschiedlichen und flexiblen Abtrennungs- und Aufkonzentrationsverfahren aus flüssigen und gasförmigen Medien der Hochlastvergärung und Trocknung.

Die Kombinierbarkeit betrifft dabei sowohl die Ausgangsstoffe (zum Beispiel Speiseabfälle, Reste aus der Lebensmittelproduktion, HTC-Abwässer, nährstoffreicher Geflügelmist) als auch den Fraktionierungsgrad (Aufbereitungsgrad) und die Fraktionierungsart der daraus gewonnenen (Düng-)Produkte.

Dabei wird der Ansatz verfolgt, eine Stabilität des Biogasprozesses bei hohen Stickstoff-/Nährstofffrachten zu erreichen sowie die Effizienz der nachfolgenden Fraktionierung zu steigern. Basis dafür ist das zweistufige, zweiphasige GICON®-Biogasverfahren für eine effiziente und flexible Biogaserzeugung. In dieses innovative, zur Vergärung sehr unterschiedlicher Inputstoffe geeignete Verfahren werden Stufen zur Nährstoffrückgewinnung integriert.

Daraus resultieren Produkte mit hoher Wertschöpfung wie zum Beispiel Ammoniumsulfat-Dünger (ASL), Spezialdünger, reine Ammonium-Carbonat-Salze (AHC) ohne Zusatzstoffe oder auch Magnesiumammoniumphosphat (MAP) ohne chlorhaltige Magnesiumsalze.

Möglich ist die Herstellung solcher Qualitätsprodukte unter anderem mit speziell konstruierten keramischen Membrankontaktoren und –filtern, die selbst unter sehr harschen Bedingungen Ammoniak bzw. Ammonium direkt aus der Gas-/Dampfphase sowie der Flüssigphase entfernen können. Sie sichern bei der Herstellung dieser Produkte die hohe Qualität und Reinheit.

Konkret umfasst das Teilprojekt folgende Leistungen:

- Verfahren und Anlagen zur Aufbereitung flüssiger organischer Reststoffe mit Erzeugung hochwertiger (Düng-)Produkte
- Hochwertige (Düng-)Produkte: ASL (25-40%), angepasste Spezial-N-Düngerlösungen (N, N+S, NPK, NPK+S), kristallines AHC (Lebensmittelanwendung), kristalline MAP-Dünger

In **Verbundprojekt 4** haben es sich drei Unternehmen und Forschungsinstitute zum Ziel gesetzt, anwenderspezifische Spezialerde und standardisierte Hochleistungsdünger aus phosphathaltigen Reststoffen sowie Verfahren und Technologien zu deren Herstellung zu entwickeln.

So werden neue Möglichkeiten der Spezialerdenkonfektionierung für eine nachhaltige Rohstoffverwertung erschlossen. Auf Basis unterschiedlicher kommunaler und landwirtschaftlicher organischer Reststoffe entstehen anwenderspezifische Spezialerde und Bodenhilfsstoffe mit exakt eingestellten bodenphysikalischen und chemischen Eigenschaften sowie eine an die Anforderungen abgestimmte Nährstoffzusammensetzung. Durch eine bessere Kon-

trolle des Kompostierverlaufes und gezielt abgestimmte Kompostiertechniken sowie Mischungen werden wesentlich verbesserte Produkteigenschaften bei gleichbleibender, hoher Qualität erreicht.

Eine weitere innovative verfahrenstechnische Komponente basiert auf der Wirbelschichttechnologie. Damit werden phosphathaltige Klärschlammmaschen in hochwertige Düngergranulate überführt, wobei die bisher bestehenden technischen Probleme solcher Prozesse überwunden werden. Dazu wird in einem ersten Schritt das weitgehend unlösliche Phosphat aus Verbrennungsaschen durch einen Säureaufschluss in eine hervorragend pflanzenverfügbare Form überführt. Durch die mögliche Zugabe von weiteren Nährstoffkomponenten können die vom Landwirt benötigte Nährstoffzusammensetzung eingestellt und außerdem die typische Schwankungsbreite der Verbrennungsaschen für eine gleichmäßige Produktqualität ausgeglichen werden. Die erzeugten und standardisierten Düngergranulate entsprechen konventionellen Mineraldüngern, die derzeit in der Landwirtschaft eingesetzt werden und können diese zukünftig ersetzen.

3 Wissensbausteine aus der Projektphase

In den Teil- und Verbundprojekten des Wachstumskerns entstehen im Rahmen der praxisorientierten Forschung in der Projektphase Ergebnisse in mehreren methodischen Schritten nach folgendem prinzipiellen Ablauf:

- (1) Entwicklung und Test der Einzelprozesse/-verfahren (Laborphase) durch die jeweiligen Partner inklusive Sammlung von Versuchs- und Recherche-daten,
- (2) Abstimmung der Kombinationsmöglichkeiten der Einzelverfahren zu Technologieketten zwischen den Arbeitsgruppen,
- (3) Schnittstellendefinition und apparatetechnische Auslegung der Einzelver-fahren und
- (4) Reale Kombination von Einzelverfahren und Test ausgewählter Technolo-gieketten in Demonstrationsanlagen

Die dabei erstellte Datenbasis, die angewendeten Auslegungsmethoden und die gesammelten Betriebserfahrungen sind Wissensbausteine. Sie sollen möglichst einheitlich strukturiert werden, um ihre spätere Kombination zu erleichtern. Die verfahrenstechnische Auslegung von Grundoperationen (vgl. Abb. 1) wird also jeweils durch betriebs- und materialspezifische Erfahrungen erweitert.

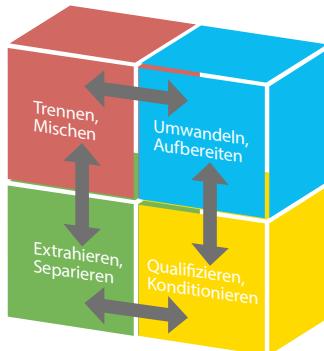


Abb. 1: Verfahrenstechnische Operationen in der Projektphase von abonoCARE®

Für das einzelne Teilverfahren werden Daten in folgende Typen strukturiert:

Leistungsdaten sind Bilanzparameter der variablen Stoff- und Energieströme, die an einem Stoff- und/oder Energiewandlungsprozess beteiligt sind. Zu den verfahrenstechnischen Leistungsdaten zählen die Stoff- und Energiestrommengen, also alle Haupt- und Nebeneinsatzstoffe, inklusive der eingesetzten Energie, aus der Produkte entstehen. Dabei berücksichtigt werden sollen auch die Betriebsmittel oder Hilfsstoffe, also Einsatzstoffe und Energieaufwendungen, die den Wartungs- und Instandhaltungsmaßnahmen von Praxisanlagen zugeordnet werden. Weiterhin gehören zu den Leistungsdaten alle Haupt-, Neben- und Abfallprodukte (Outputströme), die in einem Verfahren generiert werden. Die Leistungsdaten werden häufig als spezifische und skalierbare Verhältnisse von Input- und Outputströmen angegeben, wobei die Gültigkeitsbereiche impliziert und nicht zusätzlich angegeben sind. Abgeleitete Leistungsdaten sind beispielsweise Abbau- und Wirkungsgrade etc.

Technische Kenngrößen fassen alle Parameter zusammen, die zur praxisrelevanten Beschreibung von Verfahren und deren apparatetechnischer Umsetzung notwendig sind. Dazu gehören technische Einsatzbedingungen und -grenzen, Baumaße technischer Haupt- und Nebenanlagen, aber auch aus rechtlichen Anforderungen abgeleitete technische Zusatzmaßnahmen.

Ökonomische Kenngrößen werden einerseits aus den verfahrensabhängigen Investitionen, Aufwendungen im Betrieb und den Produkterlösen gebildet. Die verfahrensbezogenen ökonomischen Daten lassen sich durch kaufmännische Berechnungsmethoden mit Hilfe der Leistungsdaten und technischen Kenngrößen quantifizieren. Andererseits bilden finanzielle, rechtliche, politische und gegebenenfalls moralische Beschränkungen oder Anreize, die sich indirekt auf Investitions- sowie Betriebsaufwendungen und/oder Produkterlöse auswirken, weitere Rahmenbedingungen. Unmittelbar praxisrelevante ökonomische Betrachtungen müssen außerdem standortspezifische Randbedingungen einbeziehen.

Erst durch die umfassende Einbeziehung aller drei Datengruppen wird eine Bewertung der Machbarkeit und Wirtschaftlichkeit von Einzeltechnologien und auch Technologiekombinationen für die spätere Marktphase – nach der Projektphase – möglich. Die Schnittstellen zwischen Einzelverfahren werden in der Laborphase wissenschaftlich bewertet und anschließend praktisch an Demonstratoren erprobt. Die dabei gewonnenen Erfahrungen werden in den einzelnen Verbundprojekten ausgewertet.

Eine Herausforderung liegt in der Beherrschung einer großen Vielfalt bereits heute gegebener und in der anschließenden Marktphase noch hinzukommender Anwendungssituationen. Während der Projektphase können nur ausgewählte und als besonders relevant identifizierte Verfahrensketten näher untersucht und in den Demonstratoren getestet werden. Daher sind in sich geschlossene Beschreibungen der Einzelverfahren und damit verbundene Schnittstellen mit großer Sorgfalt zu erarbeiten, um eine belastbare Datenbasis für spätere neue Kombinationen zu sichern.

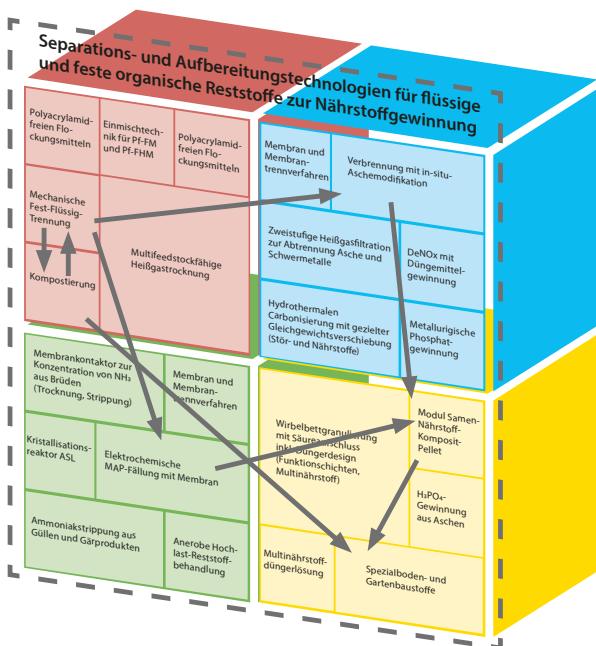


Abb. 2: Überblick der Schnittstellenmatrix und Kombinationsmöglichkeiten (Beispiel) im Wachstumskern abonoCARE®

Diese Beschreibungen verfahrenstechnischer Methoden entstehen auf der Ebene der Teilprojekte des Wachstumskerns und werden dort zur Abbildung von Verfahrensketten verknüpft. Die Modellgenauigkeit ergibt sich dabei aus den Erfahrungen der Technologiegeber und der Schnittstellenbeschreibung zur

Kombination von Technologien mehrerer Projektpartner. Die Modellentwicklung für insgesamt sechs Demonstratoranlagen wird gemeinsam von wissenschaftlichen und wirtschaftlichen Akteuren durchgeführt und dokumentiert. Außerdem wird die Bandbreite verfügbarer Einsatzstoffe und Zwischenprodukte analysiert und hinsichtlich der erforderlichen Leitparameter mit den Produktanforderungen abgestimmt. Zusätzlich wird die Anwendbarkeit der Einsatzstoffe für die Verfahrensketten systematisch bewertet und in Datenbanken erfasst. Dabei können auch die Erfordernisse an die Qualität der Zwischen- und Endprodukte berücksichtigt werden. Die o.g. Modellierungsstrategie ist auf alle vier Verbundprojekte des Wachstumskerns anwendbar.

4 Ein Konfigurator als Planungsinstrument

Die Modellierung von Verfahren und die Quantifizierung von Schnittstellen sind Grundvoraussetzungen für die Implementierung einer softwaregestützten Planung.

Innerhalb der Teilprojekte des Wachstumskerns werden umfassende Daten von einzelnen (Teil-)Verfahren der Behandlung organischer Reststoffe ermittelt und gesammelt. Durch die technischen Kenngrößen können die Teilverfahren modular beschrieben und kombiniert werden. Die praktische Demonstration von Verfahrensketten ermöglicht die Verifizierung von Leistungsdaten. Ergänzt wird die verfahrenstechnische Bewertung durch detaillierte Einschätzungen der anlagentechnischen Machbarkeit und differenzierte Betrachtungen, welche Verfahrenswege nur unter bestimmten Voraussetzungen möglich sind. Diese Erfahrungsbasis bildet gemeinsam mit den zu recherchierenden bzw. zu bestimmenden ökonomischen Kenngrößen innerhalb der Projektphase die Grundlage der ökonomischen Bewertung.

Die Besonderheit der empirischen Bewertungsmethodik und der Nachweis geeigneter bzw. der Ausschluss von ungeeigneten Verfahrenswegen mit Hilfe von Demonstratoren erfordert die Einbeziehung von Erfahrungskomponenten in die Planungssoftware. Der Umgang mit strukturierten Daten muss durch Datenbankfunktionen ermöglicht werden.

Eine große praktische Herausforderung zur Machbarkeitseinschätzung von Technologieketten besteht in der Schnittstellendefinition. Auch ist eine Unterstützung in Form von flexiblen Planungshilfen mit anwendungsorientierter Detailtiefe zweckmäßig beziehungsweise erforderlich. Die Aufgabe für die Software ist also, alle oben genannten Informationen, Projektergebnisse und Schnittstellenbeschreibungen zu bündeln und anwendungsorientiert verfügbar zu machen.

Da mit verfahrensbezogenen Informationen gearbeitet wird, die mit aufwändiger Entwicklungsarbeit durch unabhängige Partner gewonnen wurden, sind Datensicherheit sowie Modellschutz weitere wichtige Anforderungen an die Software. Das heißt, schutzwürdige Wissensbausteine sind trotz Einbettung in die Soft-

ware vor unerwünschtem Zugriff zu schützen. Zusätzlich soll die Software insbesondere für teilnehmende Wirtschaftspartner kompatibel sein mit bereits bestehenden Modellierungs-, Berechnungs- und Verwaltungsanwendungen. Diese vielfältigen Anforderungen kann spezielle Software vom Typus der so genannten Produktkonfiguratoren erfüllen.

Für die Zusammenfassung verschiedener Verfahrensalternativen und die Variation von Einsatzstoffen sowie Produkten in einem Vorplanungsinstrument gibt es verschiedene Beispiele. Im landwirtschaftlichen Sektor ist beispielsweise der Biogasrechner des Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V. (KTBL) sehr bekannt. Allerdings ist die Komplexität der Aufgabenstellungen im Rahmen von abonoCARE® weitaus größer, da mindestens eine zusätzliche Dimension beherrscht werden muss, nämlich grundlegend verschiedene verfahrenstechnische Kombinationen.

5 Umsetzung eines zentralen Konfigurators für mehrere unabhängige Technologiegeber

Bekannt ist die Anwendung von Produktkonfiguratoren zum Beispiel aus dem professionellen Vertrieb von Baumaschinen, Lastkraftwagen oder Produktionsanlagen. Derartige Produkte sind sehr komplex und angebotsseitig durch einen hohen Variantenreichtum gekennzeichnet. Im Wachstumskern abonoCARE® sind, wie im vorherigen Abschnitt erläutert, für die Auslegung von Technologieketten ähnlich komplexe Abhängigkeiten und Variationsmöglichkeiten gegeben. Deshalb soll auch für diesen Kontext ein softwaregestützter Konfigurator entwickelt werden.

Die zusätzliche Herausforderung für den Konfigurator des Wachstumskerns besteht darin, dass die einzelnen technologischen Abschnitte der Technologieketten und die entsprechenden apparatetechnischen Komponenten von vielen voneinander unabhängigen Partnern, Forschungsinstituten ebenso wie kleinen und mittelständischen Unternehmen entwickelt werden. Jeder der Partner hat insofern eigenes, teilweise geschütztes Know-how, technologiespezifische Erfahrungen und dementsprechend individuelle Interessen und Erwartungen bezüglich der späteren Vermarktung. Gerade die kommerzielle Vermarktung kann aber ihr Potenzial nur entfalten, wenn die einzelnen Komponenten aufeinander und auf den jeweiligen individuellen Anwendungsfall abgestimmt als Systemlösung präsentiert und realisiert werden können.

Eine Aufgabenstellung der GICON®-Großmann Ingenieur Consult GmbH ist deshalb die unternehmensübergreifende planerische Vernetzung der im Rahmen des Wachstumskerns abonoCARE® untersuchten Einzelverfahren und Technologieketten. Dies geht über eine bloße Erfassung der Erkenntnisse aus den einzelnen Teilprojekten in Wissensdatenbanken hinaus, da der Fokus auf fallspezifischen Verfahrenskonfigurationen liegt. Der Transfer der Erkenntnisse

aus der Projektphase in die Marktphase erfordert vielmehr ein dialogbasiertes Planungsinstrument.

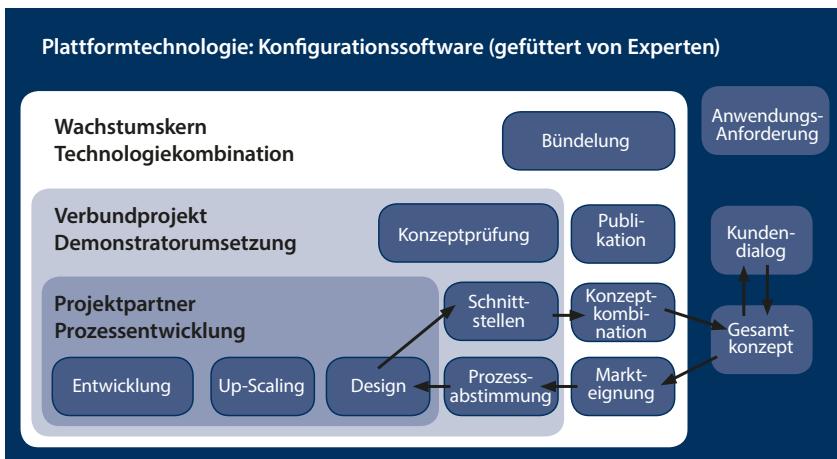


Abb. 3: Transfer und Modellierung von Einzelverfahren und Technologieketten in abonoCARE®

Mit Hilfe von logischen und mathematischen Operationen können die Wissensbausteine aus dem Labor- und Praxismaßstab zusammengeführt und in der Modellebene der Software kombiniert werden. Die in der Projektphase durchgeführte Abstimmungsarbeit wird somit nachvollziehbar systematisiert. Die gewonnenen Daten und definierten Zusammenhänge können in der erforderlichen Detailtiefe verknüpft und als erweiterbare Berechnungsmodule eingebunden werden. Diese Vorgehensweise erfordert Präzision und Sorgfalt bei der Erarbeitung der inhaltlichen Elemente für die Konfigurationssoftware. Hier müssen die Bedingungen und Abhängigkeiten, die sich durch den Technologieeinsatz ergeben, von der verfahrenstechnischen bis zur ökonomischen Ebene konkret modelliert werden. Die Definition der dazu erforderlichen Apparate-technik ist wesentlicher Bestandteil der Entwicklungsarbeit. Hierbei werden Methoden der Grobauslegung angewendet, so dass mit der Software als Vorplanungsinstrument die Teilverfahren und Verfahrensketten basierend auf den in der Projektphase bestimmten Faktoren ausgelegt werden können.

Als nächster Modellierungsschritt können Preise für die technische Ausrüstung, Produktions- und Betriebsmittel sowie Produkterlöse einbezogen werden, um die Wertschöpfung der Verfahrensketten zu beurteilen. Sobald die inhaltlichen Elemente fertiggestellt sind, können diese beliebig häufig neu kombiniert und reproduziert werden.

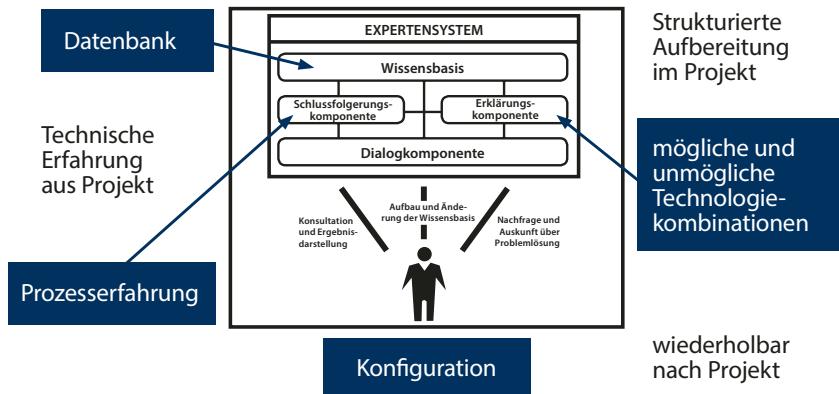


Abb. 4: Komponenten der Konfigurationssoftware und Koordinationsaufgaben von GICON® (blau)

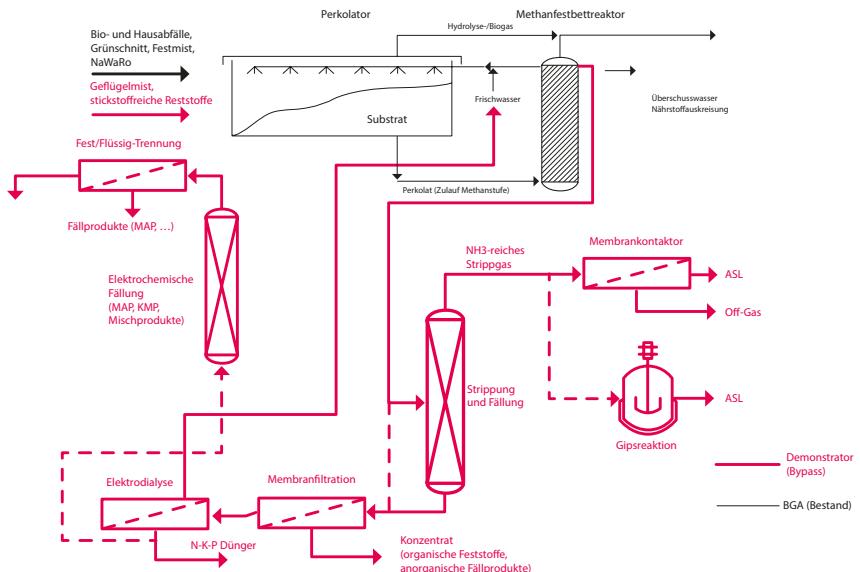
Mit Hilfe von geführten Dialogen kann erreicht werden, dass eine Verfahrens- und Anlagenkonfiguration zu einer kommerziellen Aufgabenstellung von verschiedenen Startinformationen aus erarbeitet wird. Dafür fließen im Softwaresystem gespeicherte umfangreiche Daten und Erfahrungen ein, ohne dass der Anwender diesen Erfahrungsschatz kennen oder eigenständig bewerten muss.

Beispielsweise soll in einem Anwendungsfall die Produktion eines speziellen werthaltigen Düngerproduktes aus Gärresten erfolgen. Eine zielführende Auslegungsstrategie könnte beim gewünschten Endprodukt beginnen. Für dieses Endprodukt wäre zu prüfen, welche unterschiedlichen Vorprodukte kombinierbar sind und wie diese über vorgesetzte Verfahren, zum Beispiel ein spezielles Biogasverfahren, aus bestimmten Reststoffen konditioniert werden können.

Da die Software eine Technologieplattform darstellt, kann die Fragestellung aber auch ausgehend von verfügbaren Reststoffen formuliert werden. Als Anwendungsziel soll ebenso erreicht werden, nach verschiedenen Wertschöpfungen für einen vorgegebenen Einsatzstoff zu suchen und die dafür geeigneten Verfahrensketten unter ökonomischen Gesichtspunkten abzuwägen. Die Konfigurationssoftware kann dabei Lösungsangebote für beide Anwendungsziele erstellen, bis hin zu einer orientierenden Berechnung der Wirtschaftlichkeit.

6 Beispielhafte Entwicklung einer Technologiekette während und nach der Projektphase

Innerhalb des Projektzeitraumes werden unter anderem die Kombinationsmöglichkeiten zur Stickstoff- und Phosphorrückgewinnung für strukturreiche biogene Reststoffe detailliert untersucht. In einem ab Ende 2020 verfügbaren Demonstrator werden die **Leistungsdaten** in einer Technologiekette, bestehend aus dem GICON®-Biogasverfahren, der wks-Elektrodialyse und dem FaserPlus-Verfahren von GNS, verifiziert.



*Abb. 5: Bestandteile des Konfigurationsmodells während der Projektphase des Teilprojekts 3
in abonoCARE® mit fünf Projektpartnern (GICON®-Großmann Ingenieur Consult GmbH,
GNS Gesellschaft für Nachhaltige Stoffnutzung mbH, wks Group, Fraunhofer IKTS, Fraunhofer IGB)*

Die **technischen Kenngrößen** zur planerischen Vernetzung der zu kombinierenden Einzelverfahren werden auf Basis skalierbarer Stoff- und Energieströme ermittelt. Diese und die **Leistungsdaten** der Bestandteile (Stripping, Membranfiltration, Elektrodialyse, usw.) bilden den Kern des Berechnungsmodells. Es können zusätzliche verfahrensbedingte Abhängigkeiten und Besonderheiten berücksichtigt werden. Die **ökonomische Bewertung** ergibt sich dann u.a. aus der Qualitätsbewertung der gefällten N-P-K-Feststoffmischung bzw. Ammonium-Sulfat-Lösung (ASL), den Kosten für den notwendigen apparativen Aufwand sowie dem Verbrauch an Betriebsmitteln.

Die modulare Struktur in Form von Einzel- bzw. Teilverfahren ermöglicht auch die Variation der Verfahrensketten und ggfs. eine Neukombination zum Beispiel mit anderen Verfahren oder den Einsatz bei geänderten Randbedingungen wie zum Beispiel anderen Einsatzstoffen.

7 Das verbundene System ist mehr als die Summe der einzelnen Teile

Die Anzahl der Variationsmöglichkeiten für die Konfiguration von Technologieketten bzw. darauf basierenden Anlagensystemen erhöht sich mit zunehmender Anzahl von Einzelverfahren. Das heißt, je mehr Unternehmen sich mit ihren

Technologiekomponenten integrieren, desto besser werden die Chancen für die Maximierung des Wertschöpfungspotenzials. Die Konfigurationssoftware bietet umfassenden Schutz unternehmensinterner Informationen und erlaubt das jederzeit neue Verfahren integriert werden können. Der Aufwand der Modellierung kann wahlweise von den Technologiegebern selbst übernommen oder zumindest teilweise als zentraler Service organisiert werden, wobei die praktische Umsetzung hard- und softwareseitig durch eine Serverlösung erfolgt.

Die GICON®-Großmann Ingenieur Consult GmbH sieht den Wachstumskern abonoCARE® sehr gut aufgestellt für die Kombination von Wissens- und Geschäftsbereichen sowohl der beteiligten privatwirtschaftlichen Unternehmen als auch der Forschungsinstitutionen. Der unternehmensübergreifende Einsatz von Planungsinstrumenten in einem Netzwerk von Technologiegebern und Plännern ist hierbei von großer Bedeutung für die spätere erfolgreiche Vermarktung von Systemlösungen. Das Gesamtprojekt ist somit auch ein aktuelles Erprobungsfeld, wie die wirtschaftlichen Interessen von verschiedenen Technologiegebern unter Berücksichtigung der rechtlichen Bedingungen anwendungsorientiert und synergistisch kombiniert werden können.

Kontakt

M. Sc. Falko Niebling, Niederlassungsleiter Cottbus

GICON®-Großmann Ingenieur Consult GmbH

⌚ +49 (0)355.494967-20 | ☎ f.niebling@gicon.de | 🌐 www.gicon.de

Dipl.-Ing. Michael Tietze, Fachbereichsleiter Bioenergie/Biogastechnikum

GICON®-Großmann Ingenieur Consult GmbH

⌚ +49 (0)351.47878 7737 | ☎ m.tietze@gicon.de

Dr.-Ing. Hagen Hilse, Geschäftsführer

GICON®-Großmann Ingenieur Consult GmbH

⌚ +49 (0)351.47878 42 | ☎ h.hilse@gicon.de

Biomasseasche – Wertstoff oder Abfall?

Nutzungsoptionen gemäß der Ergebnisse des Biomasse-Asche-Monitorings (BAM)

Zusammenfassung: Bei der Nutzung von naturbelassenen Biomassefeststoffen als Energieträger fallen zwangsläufig Aschen in unterschiedlichen Fraktionen an, die laut Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz (KrWG) zu entsorgende Abfälle darstellen. In dem vom BMEL geförderten Biomasse-Asche-Monitoring (BAM) wurden elf Feuerungsanlagen regelmäßig beprobt, um diese Situation vor Ort erfassen und bewerten zu können. Der Schwerpunkt lag hierbei auf den anfallenden Brennraumaschen. Aschen aus dem Rauchgasweg wurden ebenfalls beprobt. Ergänzend wurden Brennstoffproben gezogen. Die beprobten Biomasseaschen wurden auf Schad-, Nähr- und Spurenstoffe untersucht und hinsichtlich einer gesetzeskonformen Nutzung geprüft. Zwischen den Feuerungsanlagen traten große Unterschiede in Nähr- und Schadstoffgehalten auf, basierend auf dem eingesetztem Brennstoff, der Anlagengröße und Verbrennungsführung. Zwei Drittel der ersten Aschefraktion erfüllte alle Kriterien der Düngemittelverordnung (DüMV) und lässt eine land- bzw. forstwirtschaftliche Verwertung grundsätzlich zu. Verwertbare Aschen ließen sich durch Siebung und Granulierung (Staubbindung) entsprechend geforderter Korngrößen aufbereiten. Die bei Siebung abgetrennte Schlackefraktion wurde separat untersucht. Eine Nutzung als Recyclingbaustoff kommt zumeist aufgrund der eluierbaren Anteile nicht in Frage. Aus dem Rauchgasweg abgeschiedene Aschen sind wegen ihrer mineralischen und organischen Schadstofffracht nicht verwertbar und demzufolge zu deponieren.

Biomass ash – resource or waste? Usages according to the results of the biomass ash monitoring (BAM)

Abstract: The use of natural solid biomass fuels as energy source inevitably generates ashes in different fractions, which represent waste to be disposed of according to the Closed Substance Cycle and Waste Management Act (KrWG). Within the BMEL-funded Biomass Ash Monitoring (BAM), eleven biomass furnaces were sampled regularly in order to record and assess this situation on site. The focus of the project was on bottom ashes. If possible, ashes from the flue gas path were sampled and in addition, fuel samples were taken. Biomass ashes were examined for pollutants, nutrients and trace elements in order to assign them to a type of use in accordance with the existing law. Large differences in nutrient and pollutant levels occurred depending on the type of fuel, size of the system and combustion management. More than two thirds of the first ash fraction met all the criteria of the Fertilizer Ordinance (DüMV) and basically admits an agricultural or forestry use. The usable ashes could be processed according to the required grain sizes by sieving and granulation (dust binding). The slag fraction separated by sieving was examined separately. A use as a construction material is ineligible due to the amount of total dissolved

solids. Fly ashes are not usable due to their mineral and organic pollutant loads and must therefore be disposed of.

1 Einleitung

Im Zuge der Energiewende sind viele kleine und große Biomasseheiz(-kraft)werke installiert worden. Viele Aschen derartiger Anlagen werden gegenwärtig entsorgt. Die Aschen von einigen Anlagen finden bereits heute als Dünger Anwendung. Grundsätzlich entspricht eine Rückführung der Biomasseaschen in landwirtschaftliche Produktionskreisläufe dem „Cradle-to-Cradle“-Prinzip (C2C-Konzept) nach McDonough & Braungart (2002). Die teilweise abnehmende Rückführung von Wirtschaftsdüngern aus der Tierproduktion aufgrund der in manchen Betrieben zunehmenden Entkopplung der Tier- von der Pflanzenproduktion sowie der steigende Nährstoffentzug durch eine Intensivierung von Produktionssystemen (Marktfrucht- und Energiepflanzenanbau) führten dazu, dass sich die P- und K-Versorgung der Ackerböden in den letzten 20 Jahren deutlich verschlechtert hat (Zorn et al., 2008; Zorn & Schröter, 2009). Entstehende Nährstoffdefizite ließen sich durch die Rückführung von Rückständen aus der energetischen Biomassenutzung (Aschen und Gärreste) im Sinne einer gesteigerten Ressourceneffizienz und einer nachhaltigen Bewirtschaftung teilweise schließen. Potentialanalysen weisen für den Sekundärrohstoff „Stroh“ in Deutschland ein unter Berücksichtigung der Humusbilanz nachhaltig nutzbares Potential von 7 bis 13 Mio. Tonnen Frischmasse aus (Weiser et al., 2011; Zeller et al., 2011). Die Ausbringung von Biomasseaschen könnte eine Maßnahme zur Absicherung einer nachhaltigen Pflanzenproduktion darstellen (Zorn et al., 2011). Die Düngewirkung der Asche wurde bereits teilweise in einem FNR-Projekt zur Düngung mit „Rinde-Asche-Presslingen“ anhand von Gefäß- und Freilandversuchen mit Holzaschen nachgewiesen (Ettl et al., 2009). Auch von Strohaschen ist eine positive Düngewirkung bekannt (Eichler-Löbermann & Schiemenz, 2010; Bierbümpfel et al., 2010). Von der Ausbringung von Biomasse-Aschen sind weitere Einflüsse auf die Bodenfruchtbarkeit zu erwarten, die über die reine Nährstoffwirkung hinausgehen. Daher werden im Projekt Biomasse-Asche-Monitoring die Verbrennungsrückstände von elf Biomasseanlagen systematisch beprobt und analysiert. Dabei soll ihre Schadstofffreiheit festgestellt und ihre Düngewirkung in Gefäßversuchen geprüft werden. Für eine anlagenspezifische landwirtschaftliche Ascheverwertung werden daraus anwendungsbezogene Empfehlungen erarbeitet.

2. Material und Methoden

2.1 Bioenergieanlagen und deren Beprobung

Die einzelnen, geprüften Konversionsanlagen unterscheiden sich u.a. in der Art und Leistung des Feuerungssystems, der installierten Abscheidetechnologien (Aschefraktionen) bzw. ihres Entaschungssystems (Nass- oder Trockenentschung). Des Weiteren wird in den Anlagen ein breites Spektrum unterschied-

lichster halbgut- bzw. holzartiger Brennstoffe eingesetzt. (s. Tab. 1). Halbgutkonversionsanlagen sind aufgrund der niedrigen Ascheschmelzpunkte dieser Brennstoffe mit wassergekühlten Feuerräumen ausgestattet.

Tab. 1: Bepropte Anlagen – Feuerungswärmeleistung (FWL), eingesetzte Brennstoffe sowie Art des Feuerungs- bzw. Entaschungssystems. * Ersatz für Nr. 4, ** Ersatz für Nr. 6, *** Ersatz für Nr. 5

Anlage Nr.	FWL [kW]	Brennstoff	Feuerungs-system	Entaschung
1	950	Stroh (Ballen, Häcksel)	Rost	trocken
2	800	Rohrglanzgras, Schilf	Rost	trocken
3	630	Landschaftspflegeheu	Rost	trocken
4	550	Stroh (Ballen, Häcksel)	Drehrohr	trocken
5	500	Miscanthus	Mulde	trocken
6	180	Stroh (Pellets)	Mulde	trocken
7	19.500	Holz (Hackschnitzel)	Rost	nass
8	49.800	Stroh (Ballen, Häcksel)	Rost	nass
9*	550	Landschaftspflegeholz (Hackschnitzel)	Rost	trocken
10**	320 (2x160)	Stroh (Pellets)	Rost	trocken
11***	600	Miscanthus	Mulde	trocken

Beprobt wurden Brennstoffe, anfallende (zugängliche) Aschefraktionen sowie evtl. anfallende Schlacken. Ein besonderer Untersuchungsschwerpunkt lag auf halbgutartigen Biomassekonversionsanlagen. Die Aschen der einzelnen Anlagen gliedern sich in folgende Fraktionen:

- A – Brennraumaschen
- B – Zyklonaschen
- C – Gewebefilteraschen und
- D – Mischaschen (A+B, A+C, A+B+C, B+C)

Dabei können Mischaschen aus verschiedenen Kombinationen der Fraktionen A bis C vorliegen. Die Probenahme erfolgte nach den Vorschriften der Länderarbeitsgemeinschaft Abfall (LAGA PN 98) in Anlehnung an die Vorgehensweise der Bundesgütegemeinschaft Holzasche. Hierbei ist besonders auf die Art und Weise der Entaschung und die Lagerung der Aschen zu achten. Die Brennraumaschen wurden teilweise in losen Haufwerken im Freien bzw. in Containern mit Volumina von 800 l bis 7 m³ gelagert (s. Abb. 1).



Abb. 1: Aschelagerung im losen Haufwerk (links), im Container (rechts)

Diese wurden jeweils repräsentativ beprobt. Je nach Größe des Haufwerks und der vorliegenden Korngröße wurden mindestens acht Einzelproben mittels Edelstahl-Schaufel bzw. einem extra hierfür angefertigten Probenahmespeer (s. Abb. 2) entnommen, homogenisiert und entsprechend der Vorschrift reduziert. Die auf diese Weise gewonnenen Ascheproben wurden hinsichtlich aller düngemittelrechtlich relevanten Schad- und Nährstoffe untersucht.



Abb. 2: Probenahme von Einzelproben (links), Spezialanfertigung Probenahmespeer für Brennstoffe und Aschen (rechts)

2.2 Charakterisierung und Bewertung der Biomasseaschen gemäß Düngemittel-, Bioabfall- und Deponieverordnung

Es sind ausschließlich Brennraumaschen (A) naturbelassener, pflanzlicher Ausgangsstoffe und keine Aschen aus dem Rauchgasweg, ausgenommen der ersten filternden Einheit, wie z.B. Zyklonasche (B) landwirtschaftlich zu verwerten. Dabei sind definierte, maximale Schadstofffrachten entsprechend der Grenzwerte der Düngemittelverordnung (DüMV) einzuhalten. Dies betrifft Konzentrationen der Elemente Arsen, Blei, Cadmium, Chrom, Nickel, Quecksilber und Thallium sowie den Dioxingehalt (PCDD/F & dl-PCB) und perfluorierte Tenside (s. Tab. 2). Befinden sich diese unterhalb der vorgeschriebenen Grenzwerte, ist eine Verwendung der Fraktionen möglich, einzelne Parameter sind ggf. kennzeichnungspflichtig.

Tab. 2: Kennzeichnungs- sowie Grenzwerte für Schadstoffe laut Düngemittelverordnung 2012
(DüMV Anl. 2 Tab. 1.4)

Schadstoff	Einheit	Kennzeichnungswert	Grenzwert
Arsen (As)	mg / kg TM	20	40
Blei (Pb)	mg / kg TM	100	150
Cadmium (Cd)	mg / kg TM	1	1,5
(Cd) für Düngemittel > 5 % P ₂ O ₅ (FM)	mg / kg P ₂ O ₅	20	50
Chrom (ges.)	mg / kg TM	300	-
Chrom (CrVI)	mg / kg TM	1,2	2
Nickel (Ni)	mg / kg TM	40	80
Quecksilber (Hg)	mg / kg TM	0,5	1
Thallium (Tl)	mg / kg TM	0,5	1
Perfluorierte Tenside (PFT)	mg / kg TM	0,05	0,1
Σ PCDD/F & dl-PCB (WHO-TEQ 2005)	ng / kg TM	-	30

Um Biomasseaschen einem definierten Düngemitteltyp (mineralische Ein- oder Mehrnährstoffdünger, organisch-mineralische Düngemittel) zuzuordnen, müssen sie spezielle Mindestnährstoffgehalte aufweisen (s. Tab. 3).

Tab. 3: Zuordnung der Biomasseaschen zu einem Düngemitteltyp nach DüMV anhand enthaltener Mindestnährstoffgehalte

Düngemitteltyp	Typenbezeichnung	Mindestgehalt	Bestimmungen
Mineralische Einnährstoffdünger (DüMV Anl. 1 Abschnitt 1)	Kaliumdünger (1.3.4) aus der Aufbereitung von Aschen	10 % wsl. K ₂ O	Brennraumaschen naturbelassener, pflanzlicher Ausgangsstoffe. Keine Aschen aus Rauchgasweg, ausgenommen 1. filternde Einheit. Keine Kondensatfilterschlämme. Abgabe granuliert oder staubgebunden. Siebdurchgang: 90 % bei 6,3 mm, 70 % bei 3,15 mm. (Anlage 1, Tab. 1.4.6)
	Kalkdünger (1.4.6) aus der Verbrennung pflanzlicher Stoffe	15 % CaO i.d. TM.	
Mineralischer Mehrnährstoffdünger (DüMV Anl. 1 Abschnitt 2)	PK-Dünger	2 % P ₂ O ₅ , 3 % K ₂ O	Herstellung durch Mischen, Lösen oder Suspendieren. Ausschließlich Aschen pflanzlicher Ausgangsstoffe. Granulierung bei trockenem Material, Abgabe granuliert oder staubgebunden. Siebdurchgang: bei 0,1 mm ≤ 0,2 %, bei 0,05 mm ≤ 0,05 %, bei 0,01 mm ≤ 0,005 %.
	NPK-Dünger	Zustand P ₂ O ₅ K ₂ O N Ges.	
	Fest	2 % 3 % 3 % -	
	Träger	1 % 1 % 1 % 4 %	
	Lösung	1 % 1 % 1 % 4 %	
	Suspension	3 % 4 % 4 % -	
Organisch-Mineralische Düngemittel (DüMV Anl. 1 Abschnitt 3)	K-Dünger	3 % K ₂ O	10 % Organische Substanz (TM). Toleranzen: 50 % des Nährstoffgehalts (max. 1%), 50 % der organischen Substanz (max. 5%).
	P-Dünger	2 % P ₂ O ₅	
	PK-Dünger	0,5 % P ₂ O ₅ , 1 % K ₂ O	
	NPK-Dünger	0,5 % P ₂ O ₅ , 1 % K ₂ O, 1,5 % N	

Des Weiteren gibt es unterschiedliche Bestimmungen hinsichtlich einer weiteren Aufbereitung (Korngröße, Staubbinding, etc.). Beispielsweise müssen Kalkdünger aus der Verbrennung naturbelassener, pflanzlicher Stoffe einen Sieb-

durchgang von 90 % bei 6,3 mm sowie 70 % bei 3,15 mm aufweisen und sind in granulierter oder staubgebundener Form abzugeben. Biomasseaschen mit Nährstoffkonzentrationen unterhalb der Anforderungen an mineralische Ein- oder Mehrnährstoffdünger nach DüMV lassen sich als organisch-mineralischer Dünger nach Bioabfallverordnung (BioAbfV) verwerten, wenn sie deren Anforderungen ebenfalls erfüllen (s. Tab. 4).

Tab. 4: Grenzwerte nach Bioabfallverordnung (BioAbfV) in Abhängigkeit der maximalen Aufbringungsmenge

Schadstoff	Einheit	20 t TM/ha*	30 t TM/ha*
Blei (Pb)	mg/kg TM	150	100
Cadmium (Cd)	mg/kg TM	1,5	1
(Cd) für Düngemittel > 5 % P ₂ O ₅ (FM)	mg/kg P ₂ O ₅	50	50
Chrom (ges.)	mg/kg TM	100	70
Nickel (Ni)	mg/kg TM	50	35
Quecksilber (Hg)	mg/kg TM	1	0,7
Kupfer (Cu)	mg/kg TM	100	70
Zink (Zn)	mg/kg TM	400	300

* maximale Aufbringungsmenge innerhalb von 3 Jahren

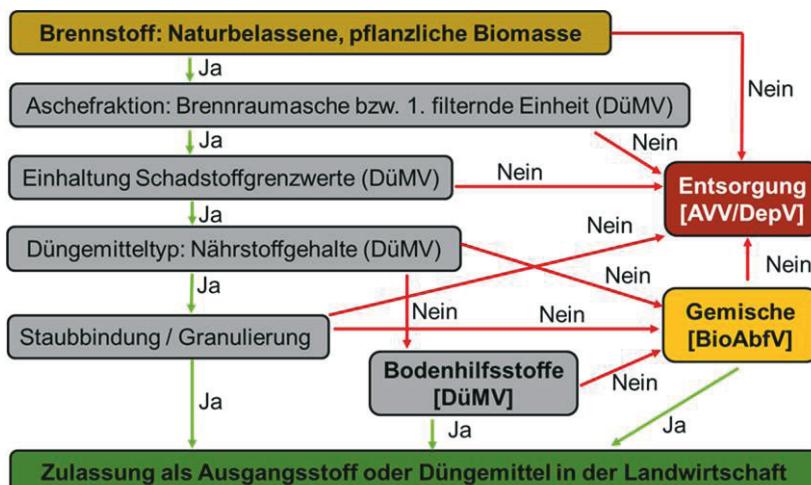


Abb. 3: Schematische Darstellung der Verwertbarkeitsprüfung für Biomasseaschen. Rechtsgrundlagen: Düngemittelverordnung (DüMV), Bioabfallverordnung (BioAbfV), Abfallverzeichnisverordnung (AVV) sowie Deponieverordnung (DepV)

Die Bioabfallverordnung stellt im Vergleich zur Düngemittelverordnung erhöhte Anforderungen bei den Grenzwerten für Nickel und Gesamtchrom und schließt zusätzlich die Elemente Kupfer und Zink ein. Um als organisch-mineralischer Dünger laut BioAbfV ausgebracht zu werden, sind der Asche mindestens 10 % Organische Substanz, beispielsweise in Form von Kompost oder Stroh, beizumengen. Kommt eine Verwertung einzelner Biomasseaschefraktionen nicht in Frage, so sind diese hinsichtlich eines geeigneten Entsorgungsweges zu prüfen (s. Abb. 3).

Nach Deponieverordnung (DepV) sind diese Aschen einer Deponiekasse zuzuordnen und entsprechend dieser zu entsorgen (s. Tab. 5). Grundsätzlich erfolgt dabei die Einordnung nach dem Abfallschlüssel der Abfallverzeichnisverordnung (AVV). Diese weist für „Rost- und Kesselasche, Schlacken und Kesselstaub“ für unbehandeltes, naturbelassenes Material die AVV-Nummer 10 01 01 sowie für „Filterstäube aus Torfffeuerung und Feuerung mit (unbehandeltem) Holz“ die AVV-Nummer 10 01 03 aus.

Tab. 5: Einstufung von Abfällen in die einzelnen Deponieklassen je nach enthaltenem Feststoff- bzw. Eluatgehalt

Parameter	Deponiekasse			
	DK 0	DK 1	DK 2	DK 3
BTEX	6 mg / kg TM	-	-	-
PCB	1 mg / kg TM	-	-	-
Mineralölkohlewasserstoffe	500 mg / kg TM	-	-	-
Σ PAK	30 mg / kg P ₂ O ₅	-	-	-
Glühverlust	3 M.-%	3 M.-%	5 M.-%	10 M.-%
TOC	1 M.-%	1 M.-%	3 M.-%	6 M.-%
Extrahierbare lipophile Stoffe	0,1 M.-%	0,4 M.-%	0,8 M.-%	4 M.-%
pH-Wert	5,5-13	5,5-13	5,5-13	4-13
DOC	50 mg / l	50 mg / l	80 mg / l	100 mg / l
As, Pb, Cd, Cr, Cu, Ni, Hg, Zn,	div. Grenzwerte	div. Grenzwerte	div. Grenzwerte	div. Grenzwerte (mg)
Chlorid	80 mg / l	1.500 mg / l	1.500 mg / l	2.500 mg / l
Sulfat	100 mg / l	2.000 mg / l	2.000 mg / l	5.000 mg / l
Fluorid	1 mg / l	5 mg / l	15 mg / l	50 mg / l
Cyanide, leicht freisetzbar	0,01 mg / l	0,1 mg / l	0,5 mg / l	1 mg / l
Gesamtgehalt gelöster Stoffe	400 mg / l	3.000 mg / l	6.000 mg / l	10.000 mg / l

3 Ergebnisse des Monitorings

In allen elf beprobenen Anlagen werden ausschließlich naturbelassene, pflanzliche Biomassen eingesetzt. In sechs der beprobenen Anlagen fallen dabei reine Brennraumaschen (Fraktion A), in drei Anlagen Mischungen aus Brennraum- und Zyklonaschen (Fraktion A + B) und in zwei Anlagen konstruktionsbedingt Mischaschen inklusive der letzten filternden Einheit an (Fraktion A, B und C). Formell können letztere aufgrund des Verbotes der Verwendung der letzten

filternden Einheit nicht als Düngemittel verwertet werden und wurden deshalb in diese Betrachtung nicht mit einbezogen. Grundsätzlich konnte bestätigt werden, dass Brennraum- bzw. Brennraum- und Zyklonaschen deutlich weniger schadstoffbelastet sind als Aschen aus dem Rauchgasweg (s. Abb. 4).

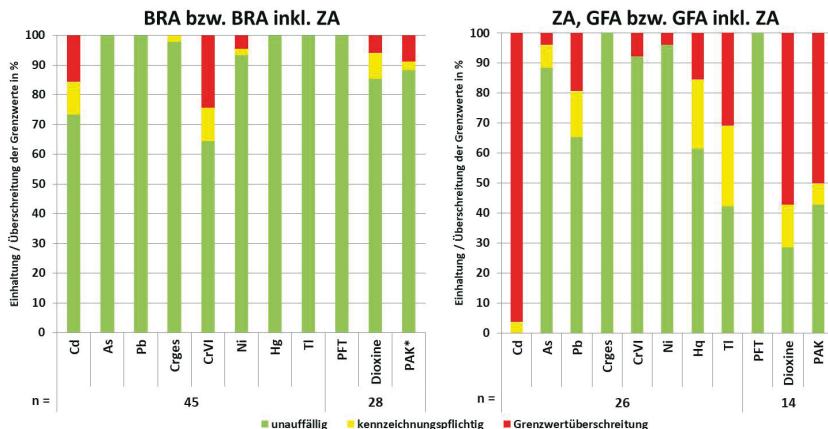


Abb. 4: Einhaltung / Überschreitung von Schadstoffgrenzwerten in Ascheproben (Fraktionen) nach DüMV, Anlage 2, Tab. 1.4

In der ersten Aschefraktion (Brennraum- bzw. Brennraum- und Zyklonasche) gab es bei der überwiegenden Anzahl der Aschen sowie Parametern keine Überschreitungen der nach Düngemittelverordnung geforderten Grenzwerte. Dies trifft auf die Parameter Arsen (As), Blei (Pb), Chromgesamt (Crges), Quecksilber (Hg), Thallium (Tl) und Perfluorierte Tenside (PFT). Bei Cadmium (Cd), ChromVI (CrVI), Nickel (Ni) und Dioxinen (PCDD/F & dIPCB) gab es in einzelnen Anlagen Grenzwertüberschreitungen. Bei fünf von elf Anlagen waren die Cadmiumkonzentrationen in der ersten Aschefraktion unauffällig. In drei weiteren Feuerungsanlagen waren auffällige Einzelwerte festzustellen, der Cadmium-Grenzwert wurde allerdings ausschließlich in Holzfeuerungen deutlicher (um mehr als 10%) überschritten. Hinsichtlich des Parameters ChromVI wies das Holzheizkraftwerk (Anlage 7) systematische Überschreitungen des Grenzwerts auf. Bei der anderen Holzfeuerung (Anlage 9) waren die gemessenen ChromVI-Konzentrationen zumeist kennzeichnungspflichtig. Auffälligkeiten von Einzelwerten hinsichtlich des Parameters ChromVI gab es bei drei weiteren Anlagen. Eine Reduktion des ChromVI-Gehaltes in Holzaschen ist durch Aufbereitung und Alterung der Asche technisch möglich (Schneider, 2017), sodass eine prinzipielle Verwertung nicht generell auszuschließen ist. Eine Misanthusasche wies zu hohe Werte für Nickel bzw. Dioxine und Furane sowie dioxinähnliche Polychlorierte Biphenyle (PCDD/F & dI-PCB) auf.

Um als Düngemittel oder als Ausgangsstoff für Düngemittel deklariert und gemäß DüMV in der Landwirtschaft verwertet werden zu dürfen, müssen Bio-

masseaschen bestimmte Nährstoffkonzentrationen enthalten. Anhand dieser sind sie einem definierten Düngemitteltyp zuzuordnen. Zunächst ist festzustellen, dass alle beprobten Brennraum- bzw. Brennraum- und Zyklonaschen unabhängig vom eingesetzten Brennstofftyp dem Düngemitteltyp organisch-mineralischer Mehrnährstoffdünger (Abb. 5 links) zuzuordnen sind, da sie deutlich mehr als 0,5 % Gesamtphosphat sowie über 1 % Gesamtkali enthielten. Eine Verwertung als organisch-mineralischer Ein- oder Mehrnährstoffdünger nach Bioabfallverordnung (BioAbfV) kommt für 70 % der geprüften Brennraum- bzw. Brennraum- und Zyklonaschen in Frage, die übrigen Aschen (u.a. die beiden Holzaschen) überschritten dort vorgegebene Grenzwerte für Kupfer, Zink und/oder Chromges. Allerdings ist für diesen Düngemitteltyp ein Anteil von 10 % organischer Substanz notwendig. Da bei keiner der geprüften Fraktionen ein derartiger Anteil organischen Materials vorliegt, müsste dieser beispielsweise in Form von Kompost, Stroh oder Holz entsprechend der Vorgaben zugesetzt und anschließend analysiert und bewertet werden. Da alle Holzaschen sowie die meisten LaPf-Heuaschen und ein Teil der Strohaschen mindestens 15 % basisch wirksame Bestandteile (BWB: Σ CaO & MgO) enthielten, ließen sie (59 % der beprobten Brennraum- bzw. Brennraum- und Zyklonaschen) sich dem Kalkdünger (Abb. 5 rechts) zuordnen.

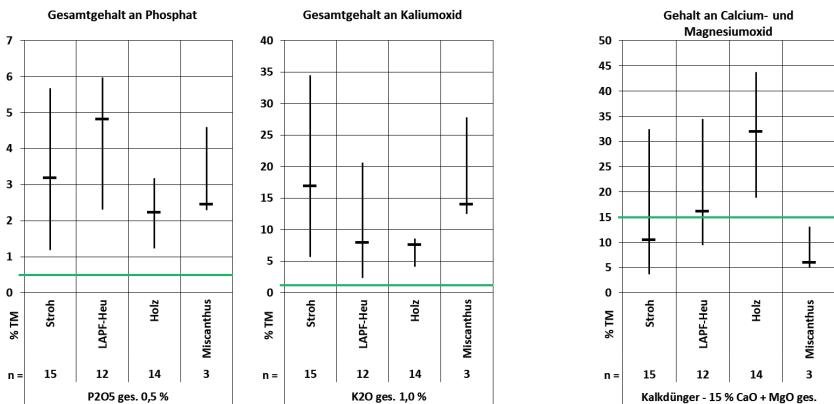


Abb. 5: Zuordnung von Biomasseaschen zum Düngemitteltyp organisch-mineralischer Mehrnährstoffdünger (links) sowie zum mineralischen Einnährstoffdünger: Kalkdünger (rechts)

Knapp die Hälfte (43 %) der getesteten Brennraum- bzw. Brennraum- und Zyklonaschen lassen sich dem höherwertigen Düngemitteltyp mineralischer Phosphor-Kalium-Dünger zuordnen, da sie mindestens 2 % mineralsäurelösliches Phosphat sowie mindestens 3 % wasserlösliches Kaliumoxid enthalten (Abb. 6 rechts). Dies betrifft den überwiegenden Teil der LaPf-Heuaschen sowie einen Teil der Stroh-, Miscanthus- und Holzaschen. Ein Fünftel (20 %) der geprüften Brennraum- bzw. Brennraum- und Zyklonaschen enthielt mindestens 10 % wasserlösliches Kaliumoxid und lässt sich demzufolge dem mineralischen Einnährstoffdünger Kaliumdünger zuordnen (Abb. 6 links).

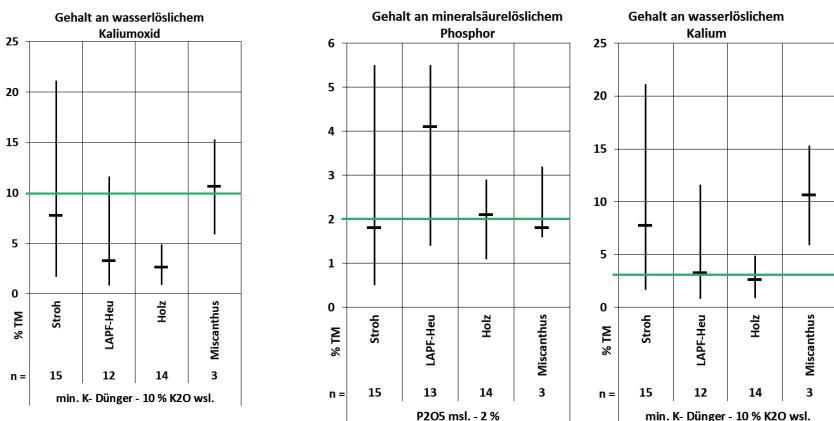


Abb. 6: Zuordnung von Biomasseaschen zum Düngemitteltyp mineralischen Einnährstoffdünger Kaliumdünger (links) sowie zum mineralischen Mehrnährstoffdünger: Phosphor-Kalium-Dünger (rechts)

Dies betrifft zwei von drei Miscanthusaschen sowie einen Teil der Strohaschen und einzelne LaPf-Heugaschen.

Fazit

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass 63 % der ersten Aschefraktion (Brennraum- bzw. Brennraum- und Zyklonasche) laut DüMV alle Anforderungen an maximale Schadstoffgehalte einhalten. Einzelne Auffälligkeiten betrafen die Parameter Cadmium und ChromVI sowie vereinzelt den Dioxin- oder Nickelgehalt. Bei Prüfung der Aschen nach Bioabfallverordnung (für organisch-minerale Dünger) waren besonders die Kupfer-, Cadmium-, Chrom- und Nickelkonzentrationen in den Aschen zu beachten. In diesem Fall ist den Biomasseaschen organisches Material beispielsweise in Form von Kompost, Stroh oder Holz zuzufügen um den geforderten Mindestanteil von 10 % organischen Materials zu erfüllen. Alle Aschen ließen sich aufgrund ihrer Nährstoffe einen Düngemitteltyp zuordnen und entsprechend durch Siebung, evtl. Trocknung, Aufmahlung, Kompaktierung bzw. Staubbbindung aufbereiten. Die verwendeten Brennstoffe beeinflussten die Aschezusammensetzung stark. Holzaschen sorgten beispielsweise für hohe Kalziumkonzentrationen, während sich in Halmgutaschen ins Besondere Kalium anreicherte. Untersuchungen zu Dioxingehalten und Polyaromatischen Kohlenwasserstoffen ergaben in Einzelfällen Auffälligkeiten. In Bezug auf die Aschequalität besteht in einzelnen Anlagen Optimierungspotenzial hinsichtlich der Brennstoffqualität, der Betriebsführung, der Anlagenkonfiguration sowie der Ascheaufbereitung.

Literatur/Quellen

- AVV (Verordnung über das Europäische Abfallverzeichnis - Abfallverzeichnisverordnung) i. d. F. vom 10. Dezember 2001, BGBl. I S. 3379.
- Biertümpel, A.; Heidrich, R.; Graf, T.; Vetter, A. (2010) Düngung mit Presskuchen und Strohhasche - Auswertung 14jähriger Versuchsergebnisse. Eigenverlag der TLL, 10 S.
- BioAbfV (Verordnung über die Verwertung von Bioabfällen auf landwirtschaftlich, forstwirtschaftlich und gärtnerisch genutzten Böden - Bioabfallverordnung) i. d. F. vom 4. April 2013, BGBl. I S. 658.
- DepV (Verordnung über Deponien und Langzeitlager – Deponieverordnung) i. d. F. vom 27. April 2009, BGBl. I S. 900.
- DüMV (Verordnung über das Inverkehrbringen von Düngemitteln, Bodenhilfsstoffen, Kultursubstraten und Pflanzenhilfsmitteln - Düngemittelverordnung) i. d. F. vom 5. Dezember 2012, BGBl. I S. 2482.
- Eichler-Löbermann, B.; Schiemenz, K. (2010). Nutzung von Biomasseaschen für die Phosphor-Versorgung im Pflanzenbau. FNR (FKZ: 22016206).
- Ettl, R.; Weis, W.; A. Göttlein (2009): Rinden-Asche-Presslinge - ein Lösungsansatz für ein ökologisch verträgliches Ascherecycling. Forst u. Holz 64, 24-30.
- McDonough, W.; Braungart, M. (2002): Cradle to Cradle. Remaking the way we make things. North Point Press. 193 S.
- Schneider, A. C. (2017): Reduktion von Chrom(VI) in Holzasche durch Eisensulfat. Vortrag anlässlich des 17. Fachkongresses Holzenergie. September 2017, Würzburg.
- Weiser, Ch.; Reinicke, F.; Zeller, V.; Vetter, A.; Thrän, D.; Wagner, B. (2011): Bestimmung des deutschlandweiten Getreidestrohpotenzials auf Landkreisebene unter Anwendung verschiedener Humusbilanzmethoden. Eigenverlag der TLL, 8 S.
- Zeller, V.; Weiser, Ch.; Hennenberg, K.; Reinicke, F.; Schaubach, K.; Thrän, D.; Vetter, A.; Wagner, B. (2011): Basisinformationen für eine nachhaltige Nutzung landwirtschaftlicher Reststoffe zur Bioenergiebereitstellung. Schriftenreihe des BMU-Förderprogramms „Energetische Biomassenutzung“, Band 2, S. 18.
- Zorn, W.; Schröter, H., Heß, H. (2008): Auswirkungen langjährig suboptimaler P- und K-Düngung im Ackerbau - Schlussfolgerungen für einen erweiterten Anbau von Energiepflanzen. Kongressband 2008 Jena. VDLUFA-Schriftenreihe 64/2008 S. 454-461.
- Zorn, W., Schröter, H. (2009): Auswirkungen suboptimaler P- und K-Düngung im Ackerbau. Tagungsbericht ALVA-Jahrestagung 2009 Salzburg St. Virgil, S. 125-127.
- Zorn, W.; Schröter, H., Heß, H. (2011): P- und K-Düngung bei Energiepflanzenanbau. Neue Landwirtschaft 9/2011, S. 50-52.

Kontakt

Roland Bischof, Projektkoordination

Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft
Naumburger Straße 98, 07743 Jena

① +49 (0)361.574041-459 | ☎ roland.bischof@tll.thueringen.de
✉ <http://www.thueringen.de/th9/tll/>

POSTERBEITRÄGE

Verfügbarkeit und Erlösmöglichkeiten unterschiedlicher Biogasanlagenkonzepte im Smart-Market-Ansatz

Zusammenfassung: Aktuell entwickelt sich der Netzausbau nicht synchron zur EE-Zubaurate, was zu Ausfallarbeit (ungenutzte EE-Strommengen) im Rahmen des Engpassmanagements führt. Ein Ansatz um Kosten für das Engpassmanagement zu senken besteht darin einen lokal und temporär beschränkten Markt aufzuspannen um Akteure kurzfristig zu einem netzdienlichen Verhalten zu aktivieren (Smart Market). Die durchgeführte ex-post Analyse zur Verfügbarkeit von verschiedenen Biogasanlagenkonzepten belegt, dass vor allem Anlagen im Grundlastbetrieb zu potentiellen Smart Market Zeiten zur Verfügung stehen. Die Teilnahme im Smart Market ist jedoch für Grundlastanlagen eingeschränkt, da diese – im Gegensatz zu flexiblen Anlagen – nur kurze Zeit die Stromproduktion einstellen und diese zu einem späteren Zeitpunkt nicht oder nur stark eingeschränkt nachholen können. Am Strommarkt ausgerichtete und entsprechend flexibel betriebene Biogasanlagen stehen zu Netengpasszeiten tendenziell weniger häufig zur Verfügung, da der Strompreis zu Zeiten mit lokalen Engpässen oft niedrig ist und die Stromproduktion dieser Anlagen entsprechend in diesen Phasen eingestellt wird. Auf Basis der erarbeiteten Gebotsystematik des Smart Market wird gezeigt, dass die Erlösmöglichkeiten je Biogasanlagenkonzept stark von den Mehrkosten der Fahrplananpassung sowie den Strommarktpreisen abhängen. Auf Basis dieser Einflussgrößen können entsprechend künftige Erlösmöglichkeiten am Smart Market für Biogasanlagen abgeleitet werden.

Abstract: Currently, network expansion and increase of renewable energy do not evolve synchronously which leads to loss of electricity production as part of the German congestion management (e.g. feed-in management). One approach to reduce costs for congestion management is to create a temporally and spatially limited market in order to activate players to act in a network-enhancing manner (Smart Market). The ex-post analysis of the availability of different biogas plant concepts shows that especially base load operating plants are available during potential Smart Market times. However, participation within the Smart Market is limited for base load plants as – in contrast to more flexible plants - switch off is only possible briefly and the production cannot or only limitedly be shifted to a later stage. Biogas plants that operate electricity market oriented and therefore operate flexible are less available during congestion times as the electricity price is often low at times of local bottlenecks. Based on the proposed bidding process it is shown that additional revenues for different biogas plant concepts depend mainly on the additional costs due to the shift of production and the electricity market prices. These additional costs are determined and serve as a basis to derive future revenue opportunities within the Smart Market.

1 Motivation und Smart Market Ansatz als markt-basiertes Engpassinstrumenten zur Ergänzung des regulären Strommarkts

Die Ausfallarbeit aufgrund der Abregelung von EE-Anlagen belief sich im Jahr 2018 auf 5.403 GWh und verursachte Gesamtkosten von 635 Mio. € (Bundesnetzagentur 2020). Neben dem Netzausbau und der Neuregelung des Redispatch in Deutschland werden häufig neue Ansätze diskutiert, um die Kosten für das Engpassmanagement zu senken. Der Smart Market, als einer dieser Ansätze, soll dem Stromnetzbetreiber als zusätzliches, marktbezogenes Engpassinstrument zur Verfügung gestellt werden. In den Smart Markets soll Flexibilität kurzfristig gehandelt werden, um mögliche physikalische lokale Einschränkungen des realen Stromnetzes zu berücksichtigen (Ecofys und Fraunhofer IWES 2017). Zudem wären die Märkte temporär und regional begrenzt, da sie nur bei Eintreten von vordefinierten physikalischen Bedingungen (prognostizierte Engpässe) im vorgelagerten Netz aktiviert würden (BDEW 2017). Der Smart Market Ansatz stellt somit eine Ergänzung zum aktuellen Strom- und Regelleistungsmarkt dar. Der markträumende Preis in den Smart Markets wird auf die Höhe der aktuellen Kosten fürs Einspeisemanagement nach oben hin begrenzt (finanzielle Obergrenze) (Mast et al. 2018). Dabei stehen im Smart Market verschiedene Flexibilitätsoptionen (beispielsweise Erdgas-BHKW, Batteriespeicher, Power-to-Heat) in einem Wettbewerb. Biogasanlagen (BGA) kommt hierbei als Flexibilitätsoption eine Sonderrolle zu, da sie einerseits eine erneuerbare Erzeugungskapazität darstellen, andererseits ihre Erzeugung verlustarm reduzieren und zeitlich verschieben können. Die Forschungsthese lautet dabei, dass BGA durch die Teilnahme an einem Smart Market – neben den Erlösmöglichkeiten am etablierten Strommarkt und Regelleistungsmarkt – zusätzliche Erlöse generieren können.

2 Verfügbarkeit unterschiedlicher Biogasanlagenkonzepte in Smart Markets

2.1 Ableitung von Einschaltsignalen für Smart-Market-Situationen

Zur Vereinfachung des physikalischen Netzzustandes wurde das Einschaltsignal von Smart Markets durch die Analyse von realen Netzengpasssituationen ex-post ermittelt. Hierfür wurde das Netzgebiet der Bayernwerk Netz GmbH als überregionaler Verteilnetzbetreiber im süddeutschen Raum für den Zeitraum 2015-2019 analysiert (Bayernwerk Netz GmbH). Die veröffentlichten Einspeisemanagement (EinsMan) Maßnahmen werden als Einschaltsignal für Smart Market Situationen herangezogen: Es wird unterstellt, dass anstelle der EinsMan Maßnahmen zu den Zeiten ein Smart Market aufgespannt und Flexibilität gehandelt wird.

2.2 Untersuchte Biogasanlagenkonzepte und deren Fahrplanerstellung

Um die theoretische Verfügbarkeit von Biogasanlagen zu möglichen Smart Markets zu beurteilen, wurden drei verschiedene Anlagenkonzepte herangezogen (siehe Tab. 1). Es wird hierbei zwischen Grundlastanlage und zwei flexiblen Anlagen unterschieden, wobei für BGA Flex 2 ein Start pro Tag und für BGA Flex 3 zwei Starts pro Tag angenommen werden.

Tab. 1: Ausgewählte Biogasanlagenkonzepte

Modell-BGA	Grundlast BGA	BGA Flex 2	BGA Flex 3
Betriebsweise	Grundlast	Einspeisung im Block 12 h	Einspeisung in zwei Zeitblöcken
Nennleistung [kW]	500	1.000	1.000
Bemessungsleistung [kW]	460	460	460
Vollaststunden [h/a]	8.000	4.000	4.000
Typ. Biogasspeicheranlegung	1-2 h	12 h	8 h

Für die in Tab. 1 vorgestellten Beispianlagen wurden jeweils für eine strompreis- sowie eine strompreis- und wärmegeführte Betriebsweise synthetisch Fahrpläne generiert. Zur Fahrplanerstellung wurden jeweils die Restriktion des Gasspeichers berücksichtigt und die historischen Daten des Zeitraums 2015-2019 als Einschaltsignale verwendet. Die Fahrpläne der strompreisgeführte Betriebsweise orientieren sich am Day-Ahead-Börsenpreis. Für die strompreis- und wärmegeführte Betriebsweise liegt die Annahme zu Grunde, dass zwei identische BHKWs betrieben werden. Davon dient eines primär zur Erfüllung der Wärmelieferverpflichtungen und das zweite wird strompreisgeführt betrieben. Für das wärmegeführte BHKW wurde die durchschnittliche Außen-temperatur dreier repräsentativer Standorte in Bayern als Indikator herangezogen.

2.3 Theoretische Verfügbarkeit der Beispianlagen in Smart Markets

Durch den Vergleich der Einschaltsignale der Smart Markets und den synthetischen Fahrplänen wird ersichtlich, welche Anlagenkonzepte in Smart Market Situationen unter den beschriebenen Annahmen zur Verfügung stehen könnten. Dabei wird unterstellt, dass die Biogasanlage durch das Abschalten des BHKW am Smart Market teilnehmen kann, um so sonst abgeregelten fluktuierenden Strommengen im Stromnetz Platz zu machen.

Tab. 2: Theoretische Verfügbarkeit der Anlagenkonzepte während Smart Market Situationen

Modell-BGA	Grundlast BGA	BGA Flex 2	BGA Flex 3
Betriebsweise	Grundlast	Einspeisung im Block 12 h	Einspeisung in zwei Zeitblöcken
Nennleistung [kW]	500	1.000	1.000
Bemessungsleistung [kW]	460	460	460
Vollaststunden [h/a]	8.000	4.000	4.000
Typ. Biogasspeicheranlegung	1-2 h	12 h	8 h

Die Tab. 2 zeigt, dass flexiblere Anlagen (BGA Flex 3) zu Netzengpasszeiten tendenziell weniger zur Verfügung stehen als Anlagen mit geringerer (BGA Flex 2) oder keiner Flexibilität (Grundlast BGA). Dennoch kann sich zu 35 % der Zeit der ausgewerteten Netzengpässe eine Teilnahme am Smart Market ergeben. Sind die Anlagen gleichzeitig auch vom Wärmebedarf in der Fahrplanerstellung beeinflusst, dann sinkt die Verfügbarkeit beider BHKWs auf bis zu 16 %. Für die strompreis- und wärmegeführte Betriebsweise ergibt sich, dass teilweise zu Netzengpasszeiten nur ein BHKW betrieben wird (z.B. wärmegeführter Betrieb eines BHKWs im Winter) aber zu anderen Zeiten beide BHKWs im Smart Market zur Verfügung stehen würden (z.B. rein strompreisgeführter Betrieb beider BHKWs im Sommer). Dementsprechend unterscheidet sich auch die angebotene flexible Leistung je nachdem ob ein BHKW oder beide BHKWs zum jeweiligen Netzengpasszeitpunkt für die Abschaltung zur Verfügung stehen. Grundlastanlagen dagegen weisen zwar eine sehr hohe Verfügbarkeit auf, können aber auf Grund der geringen Gasspeicherdauer nur wenige Stunden am Smart Market teilnehmen.

3 Prinzip der Erlösmöglichkeiten für Biogasanlagen in Smart Markets

3.1 Systematik der Gebotsermittlung und Erlösmöglichkeit in Smart Markets

Neben der theoretischen Verfügbarkeit ist das Erlöspotential für die Bereitstellung der Flexibilität von BGA in Smart Markets entscheidend, um die Flexibilität in den Markt zu bekommen. Nur wenn das Abweichen vom ursprünglich vorgesehenen Fahrplan einen finanziellen Mehrwert für den Betreiber bringt, wird die BGA als Akteur im Smart Market aktiv werden. Am Beispiel des Konzeptes BGA Flex 3 werden die Aspekte, welche bei der Gebotsabgabe berücksichtigt werden, in Abb. 1 aufgezeigt. Ab dem Zeitpunkt des Beginns eines Engpasses wird die Stromproduktion der BGA entsprechend eingestellt. Gleichzeitig wird der am Day-Ahead-Markt erlöste Börsenpreis (BP_1) für den Ausgleich der Kosten für die Bilanzkreisabweichung aufgewendet (so die vereinfachte Annahme). Die Einnahmen am Spotmarkt sind somit auf der Erlösseite entgangen (vgl. Abb. 1). Die Marktpremie (MP), sowie der bei späterer Produktion (t_2) erzielte Day-Ahead (BP_2) – welcher geringer ausfällt als BP_1 – stellen entsprechende Einnahmen für die BGA dar, sobald die Stromproduktion nachgeholt wird. Die Anlage erhält außerdem den Day-Ahead-Preis zu diesem Zeitpunkt (BP_2), welcher geringer ausfällt als BP_1 . Damit im Rahmen der Smart Market Aktivität kein finanzieller Nachteil entsteht, wird die BGA ein Gebot abgeben, welches sowohl den ursprünglich erwarteten Spotmarktpreis (BP_1) erreicht (unter Berücksichtigung von BP_2), als auch die Zusatzaufwendungen (ZA) durch die Fahrplananpassungen. Die Summe aus Delta BP ($BP_1 - BP_2$) und ZA stellt somit das Gebot der BGA im Smart Market zu Grenzkosten dar und kann je nach Situation sehr unterschiedlich ausfallen.

Die Einnahmen durch das Nachholen der Stromproduktion (BP_2 und MP) und die erlösten Grenzkosten (ZA + Delta BP) im Smart Market stellen noch keinen finanziellen Anreiz für die Teilnahme am Smart Market dar. Das Prinzip des markträumenden Preises – d.h. alle bezuschlagten Flexibilitätsoptionen erlösen den gleichen Preis am Smart Market – ermöglicht es der BGA jedoch im Smart Market Zusatzerlöse zu erzielen, welche über ihrer minimalen Einnahmewertung (Grenzkosten=Gebot im Smart Market) liegen. Die maximal möglichen Erlöse – von den operativen Zusatzkosten des Smart Market Betriebs abgesehen – und somit die Kosten für den Smart Market sind durch die finanzielle Obergrenze des Marktes begrenzt (vgl. Kapitel 1).

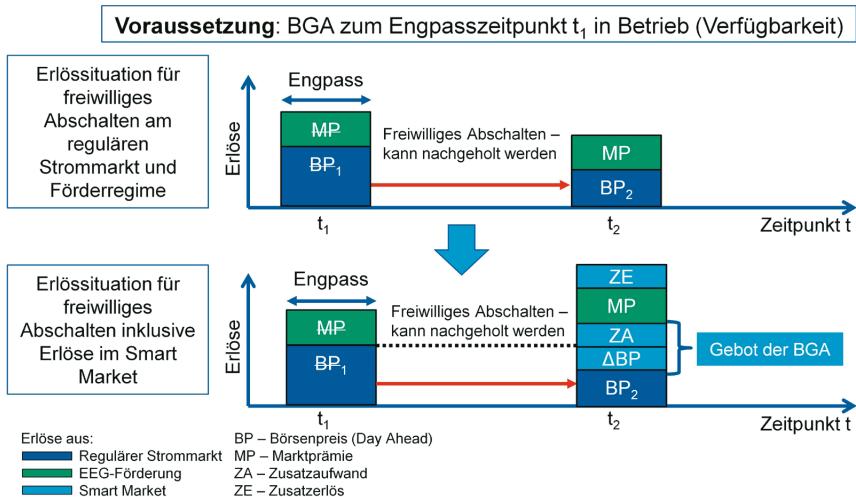


Abb. 1: Erlössituation durch eine netzdienliche Fahrplananpassung im Smart Market am Beispiel des Konzeptes BGA Flex 3

3.2 Delta Börsenpreis als Bestandteil des Gebots in Smart Markets

Da die Differenz aus BP_1 und BP_2 (Delta Börsenpreis) in die Gebotsermittlung mit einfließt, kann der erwartete Day-Ahead-Börsenpreis zum Zeitpunkt des Nachholens die Grenzkosten für das Flexibilitätsangebot und somit die Gebotshöhe reduzieren und die Chance auf eine Teilnahme im Smart Market erhöhen. Der Zeitpunkt des Nachholens ist daher betriebswirtschaftlich günstig zu wählen um die Chance des Gebotszuschlags und damit auch der Zusatzerlöse möglichst hoch zu halten. Dabei ist das Nachholen der Stromproduktion vom jeweiligen BGA Konzept abhängig, da Wärmeverpflichtungen und Speicherrestriktionen die Möglichkeiten bei der Wahl des Zeitpunktes beeinflussen. Für BGA im Grundlastbetrieb entspricht Delta Börsenpreis dem BP₁, da die Stromeinspeisung nicht nachgeholt werden kann.

3.3 Mögliche Zusatzaufwendungen als Bestandteil des Gebots in Smart Markets

Die Berücksichtigung des Zusatzaufwandes durch die netzdienliche Fahrplananpassung sollte anhand der folgenden Kostenpunkte erfolgen, damit sich ein Mehrerlös durch die Smart Market Aktivität einstellt. Falls durch den angepassten Fahrplan ein zusätzlicher Start notwendig wird, steigt der Biogasverbrauch durch den ungünstigeren Wirkungsgrad während des Startvorgangs. Zudem reduziert ein zusätzlicher Start, welcher nicht im Wartungsvertrag abgedeckt ist, die Dauer bis zur geplanten Generalüberholung, sodass dann Zusatzkosten für Wartung und Instandhaltung berücksichtigt werden müssen. Durch das Abschalten während des Smart Market wird zudem ggf. ein Warmhalten des Motors notwendig, um einen motorschonenden Warmstart zu ermöglichen. Es wird unterstellt, dass dies mittels elektrischem Heizstab und Öl-Pumpe erfolgt. Die Kosten ergeben sich aus der zusätzlichen Strombezugsleistung und der Abschaltzeit im Smart Market. Falls aufgrund der Fahrplananpassung einer bestehenden Wärmeverpflichtung nicht nachgekommen werden kann, wird eine Ersatzwärmerversorgung mittels Erdgas-Heizkessel unterstellt. Alternativ fließen entgangene Wärmeerlöse mit in die Grenzkosten- bzw. Gebotsermittlung ein.

Beteiligt sich eine Grundlastanlage am Smart Market, so sei zudem darauf hingewiesen, dass die Marktprämie (MP) zum Zeitpunkt des Abschaltens entgeht und nicht zu einem späteren Zeitpunkt nachgeholt wird (entgehende Förderung). Das dadurch eingesparte Substrat kann hingegen als ersparte Aufwendung bei der Gebotsabgabe berücksichtigt werden. Zudem könnte ein angepasster Fahrplan zu einer geänderten Belastung durch Steuern/Umlagen führen. Die geänderte Bezugsstrommenge im Vergleich zur ursprünglichen Betriebsweise könnte zu steuerlichen Mehrbelastungen führen. Auch falls Begünstigungen oder Steuerbefreiungen in Anspruch genommen und durch die Fahrplananpassung tangiert werden, ist dies ggf. für die Gebotsabgabe und -höhe zu berücksichtigen.

4 Schlussfolgerung und Ausblick

Vor allem Biogasanlagen im Grundlastbetrieb stehen zu möglichen Smart Market Situationen zur Verfügung, während flexible Anlagen tendenziell eine geringere Verfügbarkeit zu diesen Zeitpunkten aufweisen. In Ergänzung zur Verfügbarkeit zeichnet sich jedoch ab, dass die Zusatzaufwendungen für Grundlastanlagen unter anderem durch das Entgehen der Marktprämie und des Börsenpreises tendenziell höher ausfallen und somit das Gebot am Smart Market (als geforderter finanzieller Mindestanreiz) über dem von flexibleren Anlagen liegt, welche wie schematisch dargestellt die Stromproduktion nachholen können. Die Erlös-situation von BGA in Smart Markets ist daher gleichermaßen unter den Aspekten Verfügbarkeit und geforderter finanzieller Anreiz zu beurteilen. Wie dargestellt, sind die Erlösmöglichkeiten dabei von den technischen, ökonomischen und regulatorischen Restriktionen der individuellen Biogasanlage abhängig und werden darüber hinaus durch die Konkurrenz zu weiteren Flexibilitätsoptionen

sowie der finanziellen Obergrenze des Marktes geprägt. Sie können anlagenspezifisch und situationsabhängig sehr unterschiedlich ausfallen. Im Laufe des Projekts SmartBio (FKZ 22405116) werden die genannten Kostenpunkte je Biogasanlagenkonzept anhand der ex-post Einschaltsignale für alle Zeitpunkte analysiert um die zusätzlichen Erlöspotenziale zu quantifizieren. Daraus soll abgeleitet werden für welche Anlagenkonzepte der Smart Market Ansatz einen Beitrag zum wirtschaftlichen Weiterbetrieb von BGA ermöglicht.

Literatur/Quellen

- Bayernwerk Netz GmbH (Hg.): Abgeschlossene Maßnahmen. Online verfügbar unter <https://www.bayernwerk-netz.de/de/energie-einspeisen/einspeisemanagement/veroeffentlichungen/abgeschlossene-massnahmen.html>, zuletzt geprüft am 20.02.2020.
- BDEW (2017): Konkretisierung des Ampelkonzepts im Verteilungsnetz. Hg. v. Bundesverband der Energie-und Wasserwirtschaft e.V. Berlin. Online verfügbar unter https://www.bdew.de/media/documents/Stn_20170210_Konkretisierung-Ampelkonzept-Verteilungsnetz.pdf, zuletzt geprüft am 28.05.2018.
- Bundesnetzagentur (Hg.) (2020): Monitoringbericht 2019, zuletzt geprüft am 14.04.2020.
- Ecofys und Fraunhofer IWES (2017): Smart-Market-Design in deutschen Verteilnetzen. Studie im Auftrag von Agora Energiewende. Entwicklung und Bewertung von Smart Markets und Ableitung einer Regulatory Roadmap, zuletzt geprüft am 08.01.2018.
- Mast, Tanja; Holzhammer, Uwe; Matthias, Philipp (2018): SmartBio – Biogasanlagen als Akteur in neuen intelligenten, regionalen Märkten. In: Michael Nelles (Hg.): Tagungsband 12. Rostocker Bioenergieforum, Bd. 78. Rostock, S. 143–150, zuletzt geprüft am 09.07.2018.

Kontakt

M.Sc. Tanja Mast, Wissenschaftliche Mitarbeiterin im Bereich Energiesystemtechnik

M.Eng. Maria Koller, Wissenschaftliche Mitarbeiterin im Bereich Energiesystemtechnik

Prof. Dr.-Ing. Uwe Holzhammer, Bereich Energiesystemtechnik

Institut für neue Energiesysteme (InES), Technische Hochschule Ingolstadt (THI)

① +49(0)841.9348-6498 | ☎ tanja.mast@thi.de | 🌐 www.thi.de/go/energie
② +49(0)841.9348-5014 | ☎ maria.koller@thi.de

Agroforstwirtschaft – ein multifunktionales Anbau-system in Zeiten des Klimawandels

Zusammenfassung: Unsere moderne Landwirtschaft verzeichnet kaum noch Ertragszuwächse, schädigt Umwelt und Klima, produziert eine monotone und ausgeräumte Agrarlandschaft, während sie selbst unter Klimawandel, Umweltschäden (Dürresommer, Verlust an Bodenfruchtbarkeit etc.) und einem Mangel an gesellschaftlicher Anerkennung leidet. Vor diesem Hintergrund sind – wie im Energiebereich – Alternativen dringend erforderlich. Agroforstwirtschaft kann viele dieser Probleme verringern: Die bewusste Integration von Gehölzen, meist Bäumen, in Acker- und Weideflächen verbindet zahlreiche ökologische und ökonomische Vorteile, die in vielen Studien national wie international nachgewiesen sind. Aus diesem Grund versucht die VRD Stiftung zusammen mit Partnern auf den Rückstand in Deutschland hinsichtlich Agroforstwirtschaft aufmerksam zu machen und für Abhilfe zu sorgen: Auf Projektebene werden Landwirte bundesweit kostenlos bei der Einrichtung von Agroforstflächen beraten und begleitet, politische Stellen für Mängel im deutschen Agrarförderrecht sensibilisiert und Öffentlichkeitsarbeit betrieben.

Abstract: Modern farming hardly records any increases in yield, pollutes environment, damages climate, produces a monotonous landscape, while it suffers itself from climate change, environmental damage (drought summers, loss of soil fertility etc.) and a lack of social recognition. Similar to the energy sector, alternatives are urgently needed. Agroforestry can alleviate many of these problems: The targeted integration of large variety of tree species in arable and pasture land combines ecological and economic advantages proven by many national and international studies. Therefore, the VRD Foundation, together with partners, tries to draw attention to the agroforestry-backlog in Germany and to provide remedies: At project level and nationwide, farmers are advised and supported free of charge by establishing agroforestry systems; agrarian politics are sensitized of deficiencies in German agricultural funding law and public relations are done.

Agroforstsysteme

Im Industrieland Deutschland prägt die Landwirtschaft mehr als 50 % der Landesfläche – zusammen mit der Forstwirtschaft sind es etwa 82 %. Damit hat die Landwirtschaft massiven Einfluss auf den Ausstoß klimawirksamer Gase und umgekehrt auf deren Bindung in Biomasse und Boden, auf Landschaftsgestaltung (Tourismus), Wasserhaushalt, Grundwasserqualität, Biodiversität, Lebensmittelqualität, Ertragshöhe und -stabilität, Bodenqualität und -fruchtbarkeit etc.

Aufgrund dieser vielfältigen Funktionen und ihrer massiven Einflussnahme auf unsere Umwelt – aber auch der Abhängigkeit davon – sollte sich das Design landwirtschaftlicher Anbausysteme so weit wie möglich an den jeweils vorlie-

genden ökosystemaren Gegebenheiten orientieren (autochthone Systeme), um Ökosystemähnlichkeit zu simulieren. Nur so werden Agrarökosysteme so weit wie möglich in sich selbst stabilisiert. Andernfalls sind sie extrem instabil, zum Beispiel unsere in der Natur kaum vorkommenden Monokulturen, und müssen mit viel externem Energieaufwand stabilisiert und reguliert werden. Je naturnäher also das Agrarökosystem gestaltet wird, desto (ertrags-)stabilier und umweltfreundlicher ist es.

In Mitteleuropa war die Landwirtschaft die längste Zeit geprägt durch Mischkulturen, die Gehölze – häufig Bäume – einschlossen. Ausgehend von der aktuellen Landwirtschaft einjähriger Monokulturen geht es also um eine Steigerung der biologischen Komplexität, und mehrjährige Gehölze werden dabei zu einem wichtigen Baustein, um Agrarökosysteme autochthon zu stabilisieren. Die Stagnation der Erträge und massive ökologische Probleme (nicht zuletzt der Klimawandel und die Anpassung an Wetterextreme wie zum Beispiel Dürresommer) machen es nötig, den Landwirten solche grundlegend anderen Alternativen anzubieten.

Dabei haben Agroforstsysteme in unseren Breiten eine lange Tradition (Streuobst, bewirtschaftete Hecken). Die VRD Stiftung für Erneuerbare Energien arbeitet zusammen mit anderen daran, den vielfältigen positiven Wirkungen moderner Agroforstsysteme endlich auch in Deutschland zum Durchbruch zu verhelfen:

Klimaschutz und Anpassung an den Klimawandel: Während die Energiewende vor allem darauf abzielt, den Ausstoß klimaschädlicher Gase in die Atmosphäre zu reduzieren, entziehen moderne Agroforstsysteme der Atmosphäre vorhandenes Kohlendioxid und binden es im Holzkörper und als Humus. Durch die Vielfalt der Kombinationsmöglichkeiten moderner Agroforstsysteme – von Kurzumtriebsstreifen zur Erzeugung von Energieholz mit bis zu 250 schnell wachsenden Gehölzen pro Hektar und geringen Umtriebszeiten zwischen 3 und 20 Jahren bis hin zu Wert- und Fruchtholzsystemen mit 30-60 Bäumen pro Hektar und langen Umtriebszeiten von 50-60 Jahren – schwanken die Berechnungen zur CO₂-Bindung entsprechend stark. Aktuell kombinieren Landwirte auch Energie- mit Wert-/Fruchtholz auf der gleichen Fläche. Im günstigsten Falle könnten nach Schätzungen der BTU Cottbus und der VRD Stiftung pro Jahr und unter Einbezug der unterirdischen Biomasse bis zu fast der Hälfte der Emissionen der landwirtschaftlichen Erzeugung gebunden werden, wenn Agroforstsysteme auf knapp 10 % der landwirtschaftlichen Nutzfläche in Deutschland etabliert würden. Diese Prognose deckt sich in etwa mit einer europäischen Metastudie unter Federführung einer Schweizer Einrichtung. „Alternative Methoden“ zur CO₂-Bindung, wie die risiko- und energieintensive CO₂-Verpressung in Cavernen, werden in Agroforstsystemen durch risikofreie und ökologisch wertvolle Photosynthese ersetzt.

Da ein beträchtlicher Teil der CO₂-Emissionen in der Landwirtschaft durch die Produktion industriell erzeugter Düngemittel und Pestizide entsteht, reduzie-

ren ökosystemähnlichere Verfahrensweisen wie Agroforstanbau, die weniger energieintensiven Regulationsaufwand von außen benötigen, die Emissionen zusätzlich. Unabhängig davon, ob Energie- oder Wert-/Fruchtholz angebaut und wann die Gehölze geerntet werden, schafft man bei entsprechender Nachpflanzung dauerhaft mit Gehölzen aufgewertete Flächen, die bisher gehölzfrei und strukturlos sind.

Biomasse und erneuerbare Energie: Durch die Erzeugung von hölzerner Biomasse in modernen Agroforstsystmen wird nicht nur Kohlendioxid aus der Atmosphäre gebunden, sondern auch wertvoller Rohstoff in Form von Industrie- oder Möbelholz sowie Energieholz erzeugt. Schnell wachsende Pappeln zum Beispiel werden nach einigen Jahren energetisch verwertet und geben damit den zuvor gebundenen Kohlenstoff schon wieder in die Atmosphäre frei. Sie substituieren dabei jedoch fossile Brennstoffe (Substitutionspotenzial). Bei Gehölzen mit langen Umtriebszeiten (s.o.) spricht man dagegen vom Bindungspotenzial, weil der Kohlenstoff der Atmosphäre umso länger entzogen bleibt, je länger das Holz genutzt wird.

Grundwasserschutz: Da die tiefer wurzelnden Gehölze nach unten sickernde Nährstoffe (Stickstoff, Phosphor) aufnehmen können, erreichen sie das Grundwasser nicht oder in reduzierter Menge. Teure und energieintensive Wasserreinigung, die Überdüngung fließender Gewässer und teure Strafzahlungen an die Europäische Union wegen der Überschreitung von Grenzwerten werden verringert. Daher verwundert es nicht, dass Agrar- und Umweltausschuss am 27. März 2020 erstmals im Bundesrat der Bundesregierung empfahlen, die Vorteile von Agroforstsystmen zu prüfen.

Bodenfruchtbarkeit: Absterbende Wurzelteile der Gehölze, Pilzsymbiosen und Laubfall erhöhen die organische Biomasse im Boden (Humus) und damit die Bodenfruchtbarkeit sowie die Kohlenstoffspeicherung. Je höher die Bodenfruchtbarkeit, desto niedriger der Bedarf an industriell erzeugten Düngemitteln und desto höher die Energieeinsparung und der Umweltschutz. Kohlenstoffzertifikate werden voraussichtlich eine neue Einnahmequelle für die Landwirtschaft werden. Hiermit beschäftigt sich unter anderem die Stiftung Lebensraum.

Windschutz: Gehölze als Strukturen in der Agrarlandschaft zwischen, aber auch auf den Flächen verringern das Fliegen des Bodens und damit den Verlust fruchbarer, oberer Bodenschichten.

Verdunstungsschutz: Damit einher geht – verstärkt durch Schattenbildung und gebremste Luftzirkulation – die Reduzierung der Verdunstung auf der landwirtschaftlichen Fläche. Das kann bei steigenden Temperaturen und vermehrter Dürresommer durch den Klimawandel helfen Ernten zu schützen.

Landschaftsbild: Moderne Agroforstsysteme unterscheiden sich durch ihre Vielgestaltigkeit in ihrem äußeren Erscheinungsbild. Während Kurzumtriebsstreifen als Sonderform von Agroforstsystemen zu betrachten sind und eher wie höhere Heckenstreifen wirken, lassen Wertholzsysteme die Agrarflächen durch solitär stehende Bäume, oft in Reihen, wie eine offene Parklandschaft erscheinen (vgl. Abb. 1). Im Gegensatz zu ausgeräumten Agrarlandschaften steigert dies die Attraktivität einer Landschaft und kommt auch dem lokalen Tourismus zugute.



Abb. 1: Quelle: Neue Optionen für eine nachhaltige Landnutzung,
Schlussbericht des Projektes agroforst vom November 2009, S. 186

Biodiversität: Agroforstsysteme schaffen linienförmige Strukturen bis hin zu offenen Parklandschaften, welche die Artenvielfalt unterstützen und erhöhen: Simuliert wird bestenfalls ein Ökosystemübergang zwischen Wald und Offenlandschaft, indem sich Arten beider Systeme aufhalten können. In Anbetracht des Artenrückgangs, in den Medien war zuletzt viel von Insekten- und Bienensterben zu lesen, ein wichtiger Effekt. Als Baumarten wiederum können zahlreiche einheimische Arten verwendet werden.

Traditionelles Wissen: Das traditionelle Wissen über Agroforstsysteme ist in unseren Breiten leider weitgehend verschüttet. Dennoch kommen zahlreiche Landwirte mit dem Wunsch nach Beratung auf uns zu. Dabei wird versucht, an altes Wissen anzuknüpfen und dieses mit modernen Elementen anzureichern.

Synergien: Bei geschickter Sortenkombination und geeignetem Systemdesign kommt es zu Synergieeffekten zwischen Ackerkulturen und Gehölzen. Dies äußert sich in gesteigerter Photosynthese-Aktivität, erhöhtem Biomasseaufbau und damit Ertragssteigerung. Untersuchungen gehen davon aus, dass diese Steigerung verglichen mit Monokulturanbau in unseren Breiten bis zu 20 % betragen kann. Darüber hinaus wird ein Agrarökosystem mit gesteigerter Biodiversität und komplexer Vernetzung innerhalb der Arten (Räuber-Beute-Systeme, Symbiosen etc.) über die Jahre stabiler. Der externe, energieintensive Regulierungsaufwand wird reduziert (Umweltschutz biotisch und abiotisch).

Ökonomische Diversifizierung und Wertanlage: Mischkulturen wie Agroforstsysteme erhöhen die Vielfalt zu vermarktender Produkte. Dies macht sich umso positiver im Betriebsergebnis bemerkbar, je stärker der Betrieb in der Lage ist, seine Produkte direktvermarktet abzusetzen. Darüber hinaus sind die Bäume selbst eine Wertanlage und Investition in die Zukunft (Rente, nächste Generationen).

Die Situation in Deutschland

Weil zahlreiche Forschungsprojekte auf deutscher, europäischer und außereuropäischer Ebene die oben dargestellten Vorteile von Agroforstsystemen belegen (EU-Projekt „SAFE“ 2000-2005, Deutsche Bundesstiftung Umwelt 2010 und aktuell, BMBF, BTU Cottbus, Uni Freiburg, HNE etc.), empfiehlt die Europäische Union ihren Mitgliedstaaten seit 2006 die Einrichtung und Förderung von Agroforstsystemen. Dadurch werden den Landwirten in den Mitgliedsstaaten, welche diese EU-Kofinanzierung aktiviert haben, in den ersten fünf Jahren bis zu 80 % der Erstinvestitionen erstattet.

Doch in Deutschland hat bisher kein einziges Bundesland die Kofinanzierung aktiviert. Von Ausnahmen regional innovativer Agrarverwaltungen abgesehen wird Landwirten nach aktueller Gesetzeslage die mit Gehölzen bepflanzte Fläche von ihrer förderfähigen Landwirtschaftsfläche abgezogen. Dies hat in Deutschland eine lange Tradition: Bereits 1953 führten die Emser Beschlüsse dazu, das Baumfällprämien das Ende von Millionen von Bäumen in der Kulturlandschaft einläuteten. Verschiedene Phasen der Flurbereinigung taten dann ihr übriges. Die Ausräumung der Landschaft galt damals, kurz nach dem Krieg, als modern und war politisch gewollt. Heute wissen wir es besser und können es politisch wieder ändern. Diese unzeitgemäße Fördersituation ist neben mangelndem Wissen und Beratung der Landwirte einer der Hauptgründe, warum bisher in Deutschland kaum Agroforstflächen eingerichtet wurden.

Wie eine Umfrage des Agroforstprojektes „Aufwerten“ bei den Landwirtschaftsministerien der Bundesländer zeigte, sehen diese wegen des Mangels der Nachfrage seitens der Landwirte keinen Grund, die Kofinanzierung der EU für Agroforstsysteme zu aktivieren. So wartet die deutsche Agrarpolitik auf die Initiative der Landwirte, während diese wiederum, durch Unkenntnis und in Sorge um Subventionsverluste, untätig bleiben. In Analogie zur Energiewende befinden wir uns in Deutschland daher noch weit vor dem damaligen „100.000-Dächer-Pro gramm“ für Photovoltaik, und alles muss wie damals gleichzeitig gemacht werden. Daraus leiten sich die Ziele der VRD Stiftung und ihrer Partner, der Veolia Stiftung, der Deutschen Postcode-Lotterie und des 2019 gegründeten Deutschen Fachverbands für Agroforstwirtschaft (DeFAF) e.V. ab:

Flächen anlegen/Bäume pflanzen: Projektbezogen legen interessierte, progressive Landwirte mit Hilfe fundierter Beratung Agroforstsysteme an (Energieholz, Wertholz). Die Anfragen von Landwirten steigen seit Projektbeginn im Jahr 2019 stark an.

Agrarförderpolitik: Erste Bundesländer (Agrarsprecher der Fraktionen, Agrarministerien) werden für das Thema und die Anpassung ihrer Fördergesetze sensibilisiert. So soll im Bund-/Länderrat eine Sogwirkung auf die übrigen Bundesländer ausgehen.

Öffentlichkeitsarbeit macht das Thema in wichtigen Zielgruppen bekannter, z.B. bei Landwirten, Agrarverwaltung/-politik, landwirtschaftlichen Initiativen. Und mittel- bis langfristig soll das Thema in die vorhandenen Strukturen der staatlichen Agrarberatung und -verwaltung einfließen, so dass gemeinnützige Initiativen wie Stiftungen sich wieder anderen Themen zuwenden können.

Literatur und weiterführende Links

Kostenfreie Beratung zu Agroforst: www.vrd-stiftung.org/Projekte/Agroforst
Maik Veste, Christian Böhm (Hrsg.) 2018: Agrarholz - schnell wachsende Bäume in der Agrarlandschaft. Springer Spektrum.
Deutscher Fachverband für Agroforstwirtschaft (DeFAF) e. V.: www.agroforst-info.de
Stiftung Lebensraum - Mensch. Boden. Wasser. Luft: <https://stiftunglebensraum.org/>
Sonja Kay et al. 2019: Agroforestry creates carbon sinks whilst enhancing the environment in agricultural landscapes in Europe. In: Land Use Policy 83: 581-593.

Kontakt

Dr. Georg Eysel-Zahl, Geschäftsführer

VRD Stiftung für Erneuerbare Energien

⌚ +49(0)6221.39539-07 | 📩 gez@vrd-stiftung.org | 🌐 www.vrd-stiftung.org

NETFLEX-Entwicklung einer Steuerung zur Integration von Biogasanlagen in Netze mit hohem Anteil fluktuierender Stromerzeuger

Zusammenfassung: Das Forschungsvorhaben „NETFLEX“, gefördert durch das Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft im Rahmen des „Förderprogramms Nachwachsende Rohstoffe“ (Förderkennzeichen: 22405217), beschäftigt sich mit der Integration von Biogasanlagen als Systembaustein in intelligenten Energiennetzen. So sollen im Sinne der Klimaschutzziele bereits auf der Nieder- und Mittelspannungsebene des deutschen Verteilnetzes dezentrale Ausgleichsmechanismen ermöglicht werden. Da die Wechselwirkung zwischen Anlagenkomponenten im sekundenaufgelösten Zusammenspiel mit Photovoltaikanlagen (PV-Anlagen) bisher nicht hinreichend untersucht ist, bietet die Entwicklung eines Energiemanagementsystems (EMS) für sogenannte Hybridsysteme unter Verteilnetzgesichtspunkten großes Potenzial für Biogasanlagen. Das Forschungsziel ist die Entwicklung eines vorausschauenden EMS für Biogasanlagen, das auf kurzfristige Schwankungen der photovoltaischen Stromerzeugung aus PV-Anlagen innerhalb von Sekunden reagieren soll.

Abstract: The "NETFLEX" research project, funded by the German Federal Ministry of Food and Agriculture within the framework of the "Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V." (funding code: 22405217), is dealing with the integration of biogas plants as system components in intelligent electricity grids. In the sense of climate protection goals, balancing mechanisms with a regional and decentralized focus at the low and medium voltage level of the German distribution grid can be realised. The interaction between biogas plants and photovoltaic (PV) power plants within seconds has not been sufficiently investigated. Therefore, the development of an energy management system (EMS) for so-called hybrid systems, from a distribution network point of view, offers great potential for biogas systems. The research objective is to develop a forward-looking EMS for biogas plants, which is able to react to short-term fluctuations of PV-based electricity generation within seconds.

1 Motivation

Aufgrund des Ausbaus der variablen Stromerzeugung aus Wind- und Sonnenenergie steigt die Nachfrage nach einem ganzheitlichen Ansatz zu deren Ausgleich auf Verteilnetzebene stetig an. Biogas ist eine Energiequelle, die unter den erneuerbaren Energien hohe Speicherkapazitäten aufweist. Das technische und wirtschaftliche Potenzial einer flexiblen Verstromung von Biogas kann daher zur Netzstabilität beitragen. Um den daraus resultierenden Herausforderungen gerecht zu werden und die zukünftige Stabilität des Stromnetzes zu gewährleisten, sind regelbare Biogasanlagen einschließlich der Anpassung deren EMS auf Verteilnetzebene erforderlich.

2 Forschungsziel

Durch die Schaffung eines EMS für ein System bestehend aus Photovoltaik- und Biogasanlage, ein Photovoltaik-Biogasanlagen-Hybridsystem (PV-BP-Hybridsystem), kann die bedarfsgerechte Stromerzeugung und Einspeisung in das deutsche Verteilnetz mittels Biogasanlagen verstärkt in zur Systemstabilität beitragen (Abb. 1).

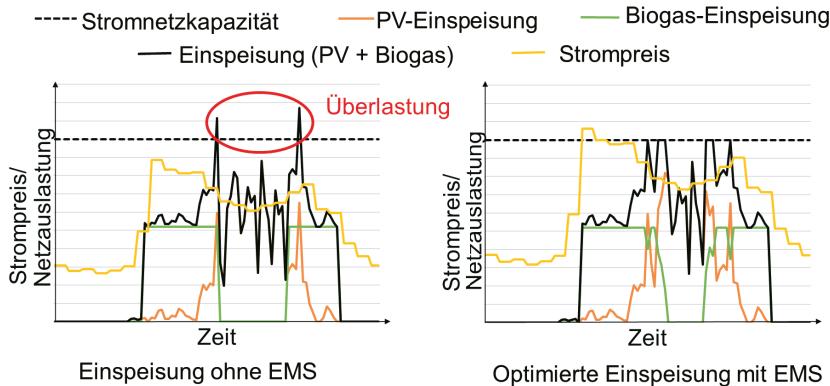


Abb. 1: Einspeisung eines PV-BP-Hybridsystem.

Das übergeordnete Ziel besteht in der modellbasierten Analyse und Simulation innovativer Steuerungsstrategien sowie der Entwicklung eines EMS für Biogasanlagen zur Vermeidung kurzfristiger, tageszeitlich auftretender Netzüberlastung in ländlichen Verteilnetzen.

3 Energiemanagementsystem

Für eine verbesserte Steuerung sind die Gesamtreaktionszeit des EMS und die Bereitstellung von Leistung entsprechend der Stromnetzanforderungen entscheidend. Zur Steigerung der Effizienz des Gesamtsystems und der Gewährleistung eines optimalen Echtzeit-Anlagenbetriebs, muss das EMS eine vorausschauende Steuerung ergänzend ermöglichen. Hierzu werden unter anderem laufend Wetterprognosen aus Modellen, modernen Nowcasting-Verfahren und PV-Stromeinspeiseprofilen realer am Stromnetz angeschlossener PV-Anlagen in den Steuerungsablauf integriert. So kann auch unter Unsicherheiten die beste Betriebsstrategie für ein PV-BP-Hybridsystem definiert und die Leistungsflüsse an die Anforderungen des lokalen Stromnetzes zu einem erwarteten Zeitpunkt (t) angepasst werden (Abb. 2). Unter Berücksichtigung aller Komponenten werden so valide Konzepte für eine bedarfsgerechte Stromproduktion von Biogasanlagen entwickelt, wobei eine mathematische Optimierung den Kern des EMS bildet.

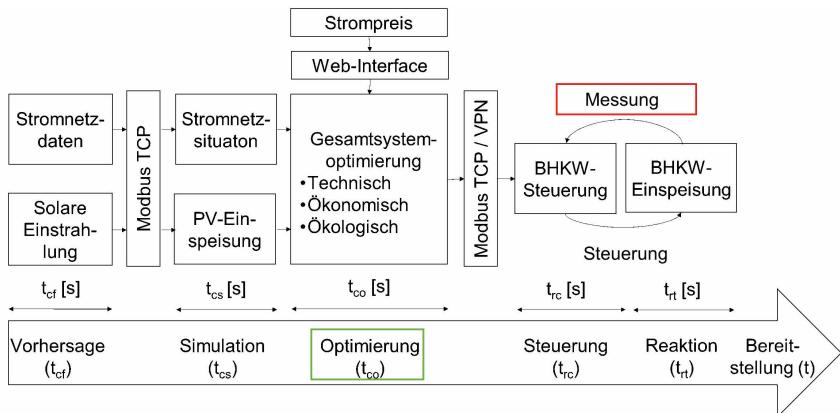


Abb. 2: Zeitlicher Ablauf EMS.

Das Hauptziel der mathematischen Optimierung besteht in der Maximierung des Umsatzes für den Anlagenbetreiber. Darüber hinaus können Emissions- und Kostenreduktionen als untergeordnete Optimierungsziele definiert werden. Innerhalb verschiedener Optimierungsmodi können so die Betriebskonzepte der Blockheizkraftwerke (BHKW) der Biogasanlage an die Bedürfnisse der Energiemarkte sowie an die Anforderungen der Stromnetze und den Wärmebedarf angepasst werden.

4 Konzeptvalidierung und Key Performance Indicators

Die Validierung der optimierten Betriebskonzepte wird anhand von Key Performance Indicators (KPI) an einer realen und kommerziell betriebenen Biogasanlage realisiert (Abb. 3). Hierzu werden sowohl die Eigenschaften des produzierten Biogases als auch sämtliche Energieflüsse bis hin zur Einspeisung des erzeugten Stroms des PV-BP-Hybridsystem mittels einer messtechnischen Überwachung des Anlagenbetriebs im Sinne eines Monitoringsystems ermittelt.

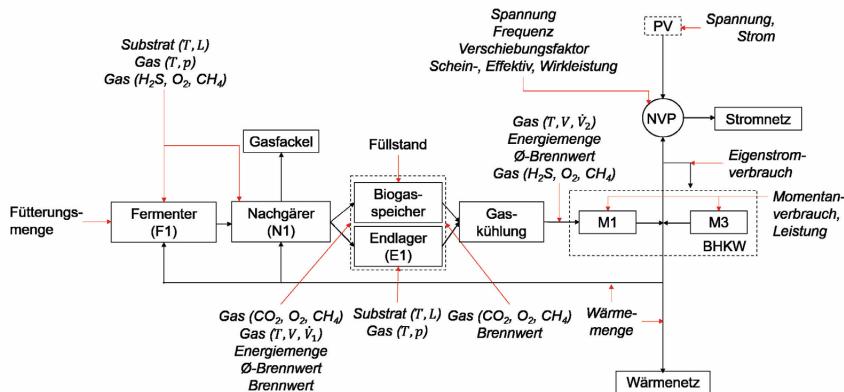


Abb. 3: Beispielhaftes Mess- und Monitoringsystem zur Konzeptvalidierung.

Mit der Definition von KPI können dann die relevanten Anlagenkomponenten analysiert werden. KPIs werden für die Kategorien PV-Anlage, Biogasanlage, elektrische und thermische Last, thermischer Speicher und elektrisches und thermisches Netz sowie unterschiedliche Kosten und Emissionen analysiert. Unter zur Hilfenahme der KPI ist so eine adäquate Approximation und Validierung der berechneten Steuersignale an den realen Anlagenbetrieb möglich und der Praxiseinsatz des EMS gewährleistet.

Kontakt

*M.Sc. Katharina Bär, Wissenschaftliche Mitarbeiterin
M.Sc. Abdessamad Saidi, Leiter Bereich Industrielle Energiesysteme
PhD Wilfried Zörner, Institutsleitung*

Institute of new Energy Systems, Technische Hochschule Ingolstadt
Esplanade 10, D-85049 Ingolstadt,

⌚ +49 (0)841.9348-6453 | ✉ Katharina.Baer@thi.de
🌐 www.thi.de/go/energy

*PhD Christoph Hackl, Stellvertretender wissenschaftlicher Leiter
Forschungsinstituts für Nachhaltige Energiesysteme*

University of Applied Sciences Munich
Lothstraße 64, D-80335 Munich

✉ Christoph.Hackl@hm.edu . | 🔗 <https://sites.hm.edu/ises/>

*Stefanie Wageneder, N. Grösch, A. Saidi, R. Wagner, M. Glötzl,
J. Gleich, C. Hermann, S. Mielke, C. Freydank, W. Zörner*

Lösungsansätze zur technischen Anpassung bestehender Biogasanlagen für die Nutzung faseriger Reststoffe – Auswahl der zu untersuchenden Anlagen im Rahmen des Projekts „LaRA“

Zusammenfassung: Um den Einsatz und die Effizienz der anaeroben Vergärung von ligninreichen landwirtschaftlichen Reststoffen zu steigern, werden im Rahmen des Projekts „Landwirtschaftliche Rest- und Abfallstoffverwertung“ (LaRA) Lösungsansätze für die prozess- und anlagentechnischen Rahmenbedingungen erarbeitet und bewertet. Ergänzend zu den technischen Fragestellungen werden (sozio-)ökonomische Faktoren untersucht um darzustellen, welche betreiberspezifischen und gesellschaftlichen Auswirkungen aus einer Substratumsstellung auf eine vermehrte Reststoffnutzung resultieren. Die geplanten Praxisuntersuchungen werden an ausgewählten Bestandsbiogasanlagen durchgeführt, die den Fokus bereits auf den Einsatz von Festmist, Stroh und Landschaftspflegegras gelegt haben. Um einen repräsentativen Querschnitt der landwirtschaftlichen Biogasanlagen abzubilden werden für die Anlagenauswahl Kriterien formuliert und in einer Matrix zusammengefasst. Die potenziellen Bestandsbiogasanlagen werden nach den grundlegenden Anlagenspezifikationen, den eingesetzten Reststoffanteilen, den integrierten Vorbehandlungstechniken sowie den messtechnischen Voraussetzungen und Nachrüstungsmöglichkeiten für die Datenaufnahme der notwendigen Anlagen- und Prozessparameter kategorisiert und beurteilt.

Abstract: In order to increase the use and efficiency of anaerobic digestion of lignin-rich agricultural residues, solutions for the process and plant engineering framework will be developed and evaluated within the scope of the project "Agricultural Residual and Waste Material Utilisation" (LaRA). In addition to the technical perspective, (socio-)economic aspects are investigated to evaluate the comprehensive effects resulting from the substrate change to an expanded use of agricultural residues. The planned practical investigations will be carried out on selected operating biogas plants, which have already focused on the use of solid manure, straw and landscape conservation grass. To get a representative profile of the biogas plants concepts, criteria for the plant selection will be defined and summarized in a matrix. Potential biogas plants will be categorised according to the basic plant specifications, the used residual material proportions, the integrated pre-treatment techniques as well as the measuring technology requirements and possible retrofitting. The aim is to select suitable plants for further investigations and data acquisition of the necessary plant and process parameters to achieve expedient results.

1 Vorstellung des Projekts „LaRA“

1.1 Motivation

Im Zuge der politischen und gesellschaftlichen Bestrebungen, die gegenwärtig dominierende Substratnutzung auf der Basis nachwachsender Rohstoffe durch ökologischere Einsatzstoffe zu substituieren, wird die energetische Nutzung biogener Rest- und Abfallstoffe durch anaerobe Vergärung in Biogasanlagen vermehrt als Zukunftsmodell angesehen.

Die Gründe für eine Umstellung der bestehenden Biogasanlagen auf biogene Rest- und Abfallstoffe sind vielseitig und umfassen beispielsweise Reglementierungen für die Teilnahme an den Ausschreibungen nach dem Ende des bisherigen EEG-Anspruchs hinsichtlich der Deckelung des Einsatzes von Mais und Getreidekorn für die Biogaserzeugung. Eine weitere Motivation bieten steigende Anbau-, Lagerungs- und Ausbringungskosten sowie sinkende Vergütungen, welche einen Umstieg auf ein langfristig gesehen kostengünstigeres Substrat erfordern. Zudem können klimabilanzielle Fragestellungen und die gesellschaftliche Akzeptanz positiv durch einen vermehrten Rest- und Abfallstoffeinsatz beeinflusst werden und zur Zukunftsfähigkeit der Biogastechnologie beitragen.

Eine Transformation des überwiegend mit nachwachsenden Rohstoffen betriebenen Anlagenbestands geht allerdings mit unterschiedlichen Herausforderungen einher. Hervorzuheben sind dabei neue Anforderungen an die Anlagentechnik und Prozessführung, welche sich durch die abweichenden Substrateigenschaften ergeben. Weiterhin ist zu berücksichtigen, dass geringere Biogaserträge und die daraus resultierende nachteilige Wirtschaftlichkeit einen limitierenden Faktor für die Adaption bestehender Anlagenkonzepte auf die biogene Reststoffnutzung darstellen können.

1.2 Projektziel und Methodik

Die übergeordnete Zielsetzung des geplanten Vorhabens besteht in der Entwicklung von Lösungsansätzen zur Schaffung optimaler prozess- und anlagentechnischer Rahmenbedingungen für die Verwertung faserhaltiger Rest- und Abfallstoffe in landwirtschaftlichen Biogasanlagen. Die Untersuchungen und anschließende Konzeptionierung berücksichtigen neben den prozesstechnischen Untersuchungen durch das Leibniz Institut für Agrartechnik und Bioökonomie (ATB) und den anlagentechnischen Fragestellungen des Instituts für neue Energie-Systeme der Technischen Hochschule Ingolstadt (InES), ebenfalls ökonomische und soziale Aspekte, welche schwerpunktmäßig von der Beratungsinstitution des C.A.R.M.E.N. e.V. betrachtet werden.

Als Grundlage für die Konzeptentwicklung soll der Stand der Wissenschaft und Technik im Umfeld der Reststoffnutzung in Biogasanlagen definiert werden. Im Fokus stehen dabei die Verwertung der faserhaltigen Reststoffe Festmist, Stroh und Landschaftspflegegras. Im Rahmen der Recherche werden die

bestehenden Aufbereitungs- und Vorbehandlungsverfahren für die Nutzung der drei Reststoffkategorien ermittelt. Zudem werden aus den Rechercheergebnissen Kriterien abgeleitet, anhand derer die zu untersuchenden Anlagen ausgewählt werden. Es sollen zu jeder der drei Reststoffkategorien 5 Biogasanlagen analysiert werden. Dabei wird angestrebt, pro Reststoffkategorie eine Anlage während der Umstellung begleitend betreuen zu können. Um belastbare Ergebnisse für die vorgesehene Handlungsempfehlung zu generieren soll im Hinblick auf die Anlagencharakteristik ein möglichst breites Spektrum des gegenwärtigen Anlagenbestands abgedeckt werden.

Im Anschluss an die Auswahl der Praxisanlagen werden Substrat- und Gärrestproben entnommen und im Hinblick auf Zusammensetzung, Gäreigenschaften und Störstoffeintrag untersucht. Anhand der Probenuntersuchungen und Daten zur Gasbildung in den Praxisanlagen ist es möglich, eine Aussage über die Effizienz der Umsetzung des Substrates in den Anlagen und den Einfluss auf die Prozessstabilität zu treffen. Zusätzlich werden diskontinuierliche und kontinuierliche Gärversuche im Labormaßstab mit den entnommenen Substratproben durchgeführt, um die verschiedenen Gasbildungspotenziale festzustellen und geeignete Optimierungsmaßnahmen abzuleiten.

Zur Untersuchung anlagentechnischer Fragestellungen im Kontext der Substratumstellung werden Messeinrichtungen an den Praxisanlagen angebracht. Durch die Installation von Strom- und Wärmemengenzählern soll der Einfluss der vermehrten Reststoffnutzung auf den Eigenenergiebedarf der Anlage ermittelt werden. Um die rheologischen Eigenschaften der Substrate im Fermenter und die resultierenden Auswirkungen auf die Einbringung und Durchmischung zu erfassen, werden Schub- und Drehmomentmessungen an den Rührwerken durchgeführt.

Neben der adaptiven Dimensionierung der Anlagenkomponenten werden alternative Ansätze, wie beispielsweise der Einsatz innovativer Vorbehandlungstechniken für den effizienten Aufschluss zur Steigerung der Abbaufähigkeit schwer vergärbarer Substrate untersucht.

Auf der Grundlage der umfassenden Untersuchungen an den gewählten Beispianlagen werden eine Schwachstellenanalyse durchgeführt und anlagen-spezifische Optimierungspotentiale aufgedeckt. Darauf aufbauend werden Maßnahmen abgeleitet und Konzepte entwickelt, um den Substratmix in landwirtschaftlichen Biogasanlagen auf einen vermehrten Reststoffeinsatz anzupassen. Anschließend werden die entwickelten Anlagenkonzepte nach der Wirtschaftlichkeit, dem anlagentechnischen Aufwand, dem Wartungsaufwand, der Anlagensicherheit, den rechtlichen Fragestellungen und der gesellschaftlichen Akzeptanz bewertet.

Aus der Bewertung der verschiedenen Konzepte wird eine Handlungsempfehlung für Anlagenbetreiber abgeleitet, die einen validen Maßnahmenkatalog zur

erfolgreichen Anpassung der Anlagentechnik beinhaltet und eine umfassende Betrachtung entlang der Prozesskette der Biogaserzeugung darstellt.

2 Bisheriger Stand: Definition der Kriterien zur Anlagenauswahl

Im Rahmen des Verbundvorhabens ist eine umfassende Dokumentation von 15 Praxisbeispielen vorgesehen. Diese ermöglicht eine belastbare Datengrundlage für die nachfolgende Schwachstellenanalyse, woraus Anlagenkonzepte erarbeitet und Handlungsempfehlungen formuliert werden. Von der Bewertung der technischen und logistischen Umstellung über die neuen Arbeitsfelder und den veränderten Arbeitsalltag des Betreibers bis hin zu wirtschaftlichen und konzeptionellen Fragestellungen werden zentrale Aspekte der faktischen Substrat-substitution in realen Anlagen durchleuchtet. Um einen repräsentativen Bestand an landwirtschaftlichen Biogasanlagen zu untersuchen, verschiedene Anlagenvarianten abzubilden und vergleichbare Ergebnisse zu erzielen werden Kriterien festgelegt und in einer Matrix zusammengefasst. Dies ermöglicht die Einordnung und spätere Fixierung der für die Untersuchungen geeigneten Praxisanlagen.

Zunächst werden die allgemeinen Charakteristika der zu untersuchenden Praxisanlagen definiert, um eine möglichst große Anzahl an Bestandsbiogasanlagen zu repräsentieren und somit zahlreichen Biogasanlagenbetreibern einen Mehrwert durch die zu formulierende Handlungsempfehlung zu bieten. In diesem Zusammenhang werden die potenziellen Anlagen im Hinblick auf die Anlagengröße, die Leistungsklasse sowie das Inbetriebnahmejahr kategorisiert.

Des Weiteren werden Praxisanlagen vorzugsweise mit volldurchmischten Rührkesselfermentern gewählt, da diese Konzeptvariante die häufigste Ausführung der landwirtschaftlichen Biogasanlagen darstellt (Daniel-Gromke et al. 2017, S. 24). Zudem stellt diese Fermenterbauweise besondere Herausforderungen an den Anlagenbetrieb mit einem vermehrten Reststoffeinsatz, da die betrachteten landwirtschaftlichen Reststoffe zur Bildung von Schwimm- und Sinkschichten neigen und somit die Durchmischung erschweren können (Koch et al. 2017, S. 7, 8), (Leible et al. 2015, S. 13). Diese volldurchmischten Rührkesselfermenter werden im Rahmen der Anlagenauswahl durch eine Berücksichtigung geeigneter alternativer Fermenterbauweisen, beispielsweise eines Ppropfenströmers, komplementiert.

Nach der Festlegung erster Anlagenspezifikationen werden weitere Kriterien, die auf der vorangehenden Recherche zu verschiedenen bestehenden technischen Ansätzen zur Adaption von Biogasanlagen an die vermehrte Reststoffnutzung aufbauen, festgelegt. Als wesentliche Kriterien sind hierbei der Reststoffanteil im Substratmix und die Implementierung einer zweckmäßigen Vorbehandlungs-technik zu nennen.

Der Inputanteil des jeweiligen Reststoffs ist ein weiterer signifikanter Faktor für die Identifikation der anlagen- und prozesstechnischen Einflussfaktoren. Dabei wurden Anteile am Substratmix von mindestens 20 % für die Anlagen der Reststoffkategorien Festmist und Stroh festgelegt. Für die Praxisanlagen mit dem Einsatz von Landschaftspflegegras wurden keine Mindestanteile definiert. Da der Anteil des bisher in Deutschland eingesetzten Landschaftspflegematerials im Jahr 2017 bei nur einem Prozent aller in Biogasanlagen eingesetzten nachwachsenden Rohstoffe lag (Daniel-Gromke et al. 2017, S. 21), stellt die Suche nach passenden Praxisanlagen für diese Reststoffkategorie ohnehin eine Herausforderung dar.

Die Adaption bestehender Anlagenkonzepte an den Einsatz lignozellulosehaltiger Reststoffe kann mit Hilfe einer Vorbehandlung erfolgen. Diese passt die Eigenschaften der Einsatzstoffe bereits vor der Einbringung in den Fermenter an. Dadurch können unterschiedliche Desintegrationsmaßnahmen unter anderem Auswirkungen auf die Methanausbeute, die rheologischen Eigenschaften und die Vermeidung von Schwimmschichten haben (Kissel et al. 2019). Somit stellt der Einsatz einer Vorbehandlungstechnik ein weiteres Auswahlkriterium dar. Es wird zwischen physikalischen und biologischen Vorbehandlungen unterschieden. In der Betrachtung werden sowohl Anlagen berücksichtigt, die sich eine oder mehrere dieser Technologien zu Nutze machen, als auch Betriebe, die ohne jegliche Aufbereitung auskommen, um die Vor- und Nachteile in der Praxis gegenüberstellend zu bewerten.

Die letzte in der Matrix definierte Kriterienkategorie umfasst die an den Praxisanlagen vorhandene messtechnische Ausrüstung und bestehende Möglichkeiten zur Nachrüstung für die im Zuge des Vorhabens geplante Datenaufnahme.

Ausgehend von der Annahme, dass die meisten betrachteten Anlagen bereits die Substratumstellung durchgeführt haben, ist es essenziell, auf eine vollständige Dokumentation zurückgreifen zu können. Wichtige Aspekte sind dabei beispielsweise die Erfassung der zugeführten Substratmengen sowie regelmäßig gemessene Volumenströme und Methangehalte des Rohbiogases. Zusätzlich besteht die Möglichkeit, die Eigenstrom- und Wärmebedarfe messtechnisch zu erfassen und Schub- und Drehmomentmessungen an der Rührtechnik anzubringen. Die Auswahl der Praxisanlagen ist diesbezüglich auf ihre Eignung zu prüfen.

3 Ausblick

Die vorgestellte Kriterienauswahl und der methodische Ansatz, diese in einer Matrix zusammenzufassen stellen die Entscheidungsgrundlage für eine repräsentative und objektive Anlagenauswahl dar.

Die Kriterien wurden dahingehend definiert, mit einer vertretbaren Anzahl an potentiellen Praxisanlagen wesentliche für die Projektumsetzung relevante Fragestellungen abgedeckt zu haben.

Im Anschluss an den Auswahlprozess werden im Zuge des Projekts die anlagen-, prozesstechnischen und (sozio-)ökonomischen Untersuchungen durchgeführt.

Literatur/Quellen

- Daniel-Gromke, J, Rensberg, N, Denysenko, V, Trommler, M, Reinholz, T, Völler, K, Beil, M & Beyrich, W (2017): DBFZ Report Nr. 30: Anlagenbestand Biogas und Biomethan – Biogaserzeugung und -nutzung in Deutschland.
- Döhler, H (2020): 'Ökonomische Bewertung bei der Biogasgewinnung aus Stroh und Gülle'. Stroh, Gras -> Biogas. Innovative Verfahren zur Nutzung von Ernteresten in Biogasanlagen, ed ProFair Consult+Project GmbH, pp. 51–53.
- Kissel, R, Henkelmann, G, Dollhofer, V, Lebuhn, M, Seidel, J & Koch, K (2019): Substrataufbereitung. Zur Verbesserung des Abbaus faserreicher Biomasse. Fachinformation.
- Koch, K, Post, M, Auer, M & Lebuhn, M (2017): Einsatzstoffspezifische Besonderheiten in der Prozessführung.
- Leible, L, Kälber, S, Kappler, GO, Oechsner, H & Mönch-Tegeder, M (2015): Biogas aus Landschaftspflegegras. Möglichkeiten und Grenzen.

Kontakt

Stefanie Wageneder, Wissenschaftliche Mitarbeiterin

Institut für neue Energie-Systeme – Technische Hochschule Ingolstadt

① (0)841.9348-6514 | ☐ Stefanie.Wageneder@thi.de
↗ www.thi.de/go/energie

Norbert Grösch, Abdessamad Saidi, Wilfried Zörner
Institut für neue Energie-Systeme – Technische Hochschule Ingolstadt

Robert Wagner, Melanie Glötzl, Jasmin Gleich
Centrales Agrar-Rohstoff Marketing- und Energie-Netzwerk e.V. (C.A.R.M.E.N.)

Christiane Hermann, Sophie Mielke, Christian Freydank
Leibniz-Institut für Agrartechnik und Bioökonomie e.V. (ATB)

Sebastian Foth, Andrea Schüch, Michael Nelles

COASTAL Biogas – Energetische Verwertung von Seegras als Co-Substrat in der Vergärung

Zusammenfassung: Jedes Jahr landen tausende Tonnen Strandanwurf an unserer heimischen Küste. Die Reinigung der Ostseestrände von „Trebsel“ ist vor allem aus ästhetischen Gründen wichtig für einen florierenden Badetourismus. Betroffene Kommunen wenden dafür jede Saison erhebliche Kosten auf. Im Rahmen des Projektes „COASTAL Biogas“ untersucht die Professur für Abfall- und Stoffstrommanagement die Möglichkeiten zur kommerziellen Verwertung von angespültem Seegras an der Ostseeküste.

Im Fokus dieser Überlegung steht die energetische Verwertung als Co-Substrat in Biogasanlagen. Die dabei anfallenden Gärreste kommen als Dünger auf landwirtschaftlichen Flächen zum Einsatz. Durch die Etablierung dieser Wertschöpfungskette aus angespültem Seegras sollen die Eutrophierung in der Ostsee bekämpft und die Strandreinigung finanziell entlastet werden.

Die vorliegende Studie betrachtet daher das theoretische und technische Potenzial von Seegras aus der Strandreinigung anhand bisheriger Erkenntnisse zu Substrateigenschaften und Vergärbarkeit von Seegras als Co-Substrat in Biogasanlagen. Zudem werden Aussagen zur Eignung der anfallenden Gärreste als organischer Dünger getroffen.

Abstract: Every year thousands of tons of beach wrack flushed to the German Baltic Sea Coast. The cleaning of the beaches from "Trebsel" is important for a flourishing bathing tourism, especially for aesthetic reasons. Affected municipalities spend considerable costs on this every season. As part of the "COASTAL Biogas" project, the Department of Waste and Resource Management of the University of Rostock is investigating the possibilities for commercial utilization of washed up seaweed on the German Baltic Sea Coast.

The focus of this consideration is the energetic utilization as co-substrate in the anaerobic fermentation. The resulting digestate is used as fertilizer in agriculture. By establishing this value chain from washed up seaweed, eutrophication in the Baltic Sea is to be combated and beach cleaning is to be financially relieved.

The present study therefore investigates the theoretical and technical potential of seaweed from beach cleaning based on previous knowledge of substrate properties and fermentability of seaweed as a co-substrate in biogas plants. In addition, statements are made as to the suitability of the digestate as organic fertilizer.

1 Die Ostseeküste

Der deutsche Teil der Ostsee grenzt an die Bundesländer Mecklenburg-Vorpommern und Schleswig-Holstein. Es ist eine bedeutende Region für den baltischen Wirtschaftsraum. Die Morphologie der deutschen Ostseeküste ist maßgeblich von den Prozessen der letzten Eiszeit beeinflusst. Es entstand ein halb umschlossenes Meer mit einer stark strukturierten Küste, die aus Buchten, Inseln und Halbinseln besteht. Dieses relativ geschlossene System ist nur über die Straße von Skagerrak/Kattegat mit der Nordsee und dem Atlantik verbunden. Der Boden des Küstengebiets ist größtenteils von feinem Sand bedeckt, wobei harte Substrate nur sehr begrenzt vorkommen. Die Außenküste ist zusätzlich durch Strukturen zum Schutz von fruchtbarem Land und menschlichen Siedlungen geprägt (BLANO 2014). Die Länge der deutschen Ostseeküste beträgt insgesamt 2,582 km (Ministerium für Landwirtschaft, Umwelt und Verbraucherschutz Mecklenburg-Vorpommern 2 – 1/2010). Politisch teilt sich die deutsche Ostseeküste in Mecklenburg-Vorpommern und Schleswig-Holstein.

1.1 Ökologie

Die deutsche Ostseeküste ist ein einzigartiges und wertvolles Ökosystem, das durch die Mündungen verschiedener Flüsse gekennzeichnet ist. Von deren Ursprung aus wird die Ostsee stark von landwirtschaftlichen Einträgen beeinflusst. Darüber hinaus folgt die Flora und Fauna einem starken Salzgehaltsgradienten von West nach Ost sowie von Nord nach Süd (BLANO 2014). Die dort lebenden Organismen sind permanent von Wind und Strömungen betroffen. Die deutsche Ostseeküste ist als wichtiger Lebensraum und Brutgebiet mit Fütterungs- und Ruhemöglichkeiten für viele Arten weitgehend erhalten. Nach der Flora-Fauna-Habitat-Richtlinie gibt es eine Reihe von geschützten Biotopen (Richtlinie 92/43/EWG). Die Bedürfnisse von Wohnraum, Wirtschaft und Tourismus mit dem Schutz dieser Lebensräume in Einklang zu bringen, ist eine große Herausforderung für die lokalen Behörden.

1.2 Gefährdung der Ostsee

Flora und Fauna der verschiedenen Biotope entlang der Ostseeküste sind durch Sturmfluten, Erosion, Umweltverschmutzung, Überfischung und Eutrophierung bedroht. Zur Erhaltung dieser einzigartigen Naturräume werden strenge Küstenschutzmaßnahmen umgesetzt (Ministerium für Landwirtschaft, Umwelt und Verbraucherschutz Mecklenburg-Vorpommern 2 – 1/2010). Der anthropologische Einfluss spiegelte sich stark im Überschuss an diffusen Nährstoffen wider, die aus überwiegend landwirtschaftlichen Einträgen resultieren. Die Folgen einer zunehmenden Eutrophierung sind eine erhöhte marine Biomasse, Sauerstoffmangel und eine Einschränkung des Transparenzgrades (Ministerium für Landwirtschaft, Umwelt und Verbraucherschutz Mecklenburg-Vorpommern 2016). Darüber hinaus belasten Wirtschaft und Tourismus die natürliche Umwelt sehr. Um die Anforderungen der EU-Wasserrahmenrichtlinie (Richtlinie 2000/60/EG) auf Bundes- und Länderebene umzusetzen, wurden eine Reihe von Maßnahmen-

und Reduktionszielen für die Ostsee entwickelt (Ministerium für Landwirtschaft, Umwelt und Verbraucherschutz Mecklenburg-Vorpommern 2016). Darüber hinaus sind innovative nachhaltige Ansätze zur Bekämpfung der Eutrophierung unerlässlich.

2 COASTAL Biogas

COASTAL Biogas ist ein durch das Förderprogramm Interreg South Baltic sowie durch den Europäischen Fonds für regionale Entwicklung (ERDF) gefördertes Projekt (STHB.02.02.00-DE-0129/17) zur Bekämpfung der Eutrophierung der Ostsee durch die Rückführung der überschüssigen Nährstoffe aus der Landwirtschaft in einen geschlossenen Stoffkreislauf. Ziel des Projektes ist die Entwicklung eines wirtschaftlichen Konzeptes zum Management von anfallendem Strandanwurf, welches sowohl die Art und Weise der „Ernte“, als auch die Anforderungen an Logistik und Infrastruktur berücksichtigt. Durch die Etablierung einer Wertschöpfungskette aus dem frei verfügbareren Rohstoff Seegras sollen betroffene Kommunen bei der Strandreinigung finanziell entlastet werden. Das von der Fachagentur nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR) koordinierte Projekt entwickelt hierzu gemeinsam mit 6 Partnern aus 5 Ländern Werkzeuge für Kommunen, Reinigungsunternehmen, Betreibern von Biogasanlagen, Entsorgungsunternehmen und Landwirten zur Verwertung von angespültem Seegras aus der Ostsee. Dabei werden jahrelange positive Erfahrungen und Ergebnisse aus Dänemark zur Vergärung von Seegras in industriellem Maßstab genutzt.



Abb. 1 Schema zur Rückführung überschüssiger Nährstoffe aus der Landwirtschaft durch die energetische Verwertung von Seegras als Co-Substrat in der anaeroben Vergärung

Durch den Einsatz von Biogasanlagen können minderwertige Ressourcen/Abfälle in einen erneuerbaren hochwertigen Brennstoff umgewandelt werden. Die Nutzung von Seegras als alternative Strom-, Wärme- und Nährstoffquelle bietet dem südlichen Ostseeraum eine große Chance für die zirkulare Bioökono-

mie. Die Bundesländer Schleswig-Holstein sowie Mecklenburg-Vorpommern verfügen zwar über eine große Anzahl von Biogasanlagen, jedoch sind die landwirtschaftlichen Anlagen gesetzlich nicht zur Verarbeitung von angeschwemmtem Seegras zugelassen (siehe Kapitel 2.2). Somit kommen für die energetische Verwertung von Seegras als Co-Substrat in der anaeroben Vergärung lediglich Abfallvergärungsanlagen in Frage (siehe Kapitel 1.4.6). Doch im Umgang mit angespültem Strandanwurf kommen auch andere Verwertungspfade, wie die thermische Verwertung oder die Kompostierung in Betracht. Die Art und Weise der Verwertung hängt dabei stark von den Eigenschaften des jeweiligen Substrates ab.

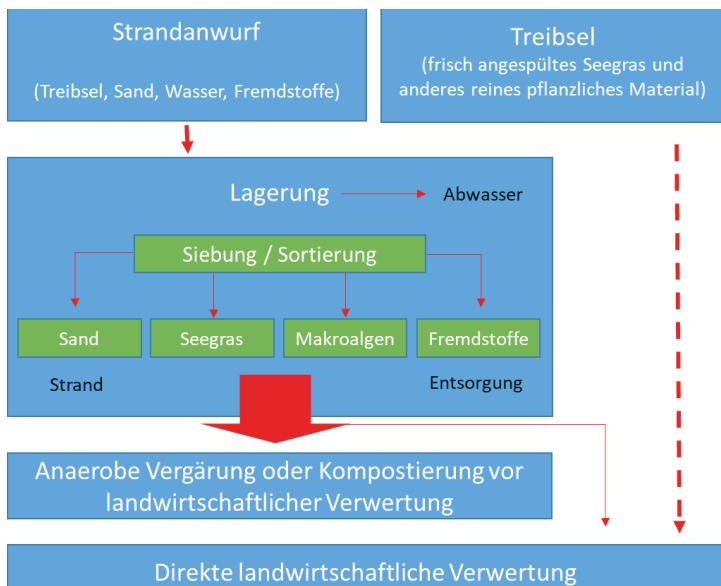


Abb. 2: Schema zum Umgang mit angespültem Strandanwurf
(verändert nach Ministerium für Wirtschaft, Arbeit und Gesundheit M-V 2018)

Das folgende Kapitel stellt die wirtschaftlichen, sozioökonomischen und rechtlichen Herausforderungen dieser Thematik auf den Prüfstand.

3 Herausforderungen bei der Verwertung von Seegras

Die Erschließung sowie die Verwertung von angeschwemmtem Seegras hängen sowohl von den Mengen und Eigenschaften des Substrates als auch von den infrastrukturellen, logistischen und rechtlichen Rahmenbedingungen ab. Bezugnehmend auf Fallstudien und Literatur werden in dieser Studie die verschiedenen Aspekte der energetischen Verwertung von Seegras als Co-Substrat in der anaeroben Vergärung beleuchtet.



Abb. 3: Aspekte der Seegrasverwertung im Rahmen des Projektes COASTAL Biogas

3.1 Substratverfügbarkeit

Unter Berücksichtigung der EU-WRRL und ihrer Umsetzung auf Bundes- und Länderebene ist aufgrund des Naturschutzes ein direkter Zugang zur Küste und damit auch deren Reinigung im deutschen Ostseeraum nur an bestimmten Stränden oder Häfen möglich. Nur 309 km der Außenküste sind als Tourismusstrand ausgewiesen (Aldag 2018). Diese Strände verfügen über eine gute infrastrukturelle Anbindung und sind daher geeignete Gebiete zur Entfernung von Seegras.

Darüber hinaus ist die Verfügbarkeit des Substrates auch zeitlich determiniert. Im Verlaufe der Vegetationsperiode werden tote und abgerissene Pflanzenteile durch wind- und strömungsbedingte hydrodynamische Prozesse an die Küste gespült (GRAVE, MÖLLER 1982). Die Menge an Seegras, die an der Küste angeschwemmt wird, hängt stark von Lage und Exposition der Strände sowie von akuten Wetterereignissen ab (Radka Ptacnikova 2013).

3.2 Ernte/Strandreinigung

Die Beräumung der Strände hat laut den gesetzlichen Bestimmungen ausschließlich landseits zu erfolgen. Die Entnahme der Biomasse innerhalb von, gemäß der Flora-Fauna-Habitat-Richtlinie, geschützten Biotopen ist ausdrücklich untersagt. In der Regel verteilt sich der Strandanwurf, in Folge akuter Wetterlagen, wie Sturm oder Niedrigwasser, großflächig oberhalb der Wasserlinie. In Abhängigkeit von Menge und Zustand des Substrates ist eine händische Reinigung bedingt möglich. In den meisten Fällen empfiehlt sich jedoch die Aufnahme der verwertbaren Biomasse mit Hilfe von Radladern oder entsprechend ausgestatteten Traktoren. Um den Anteil von Sand und Wasser zu reduzieren, empfiehlt sich der Einsatz von sogenannten Siebschaufeln. Beide hier genannten Varianten machen den Einsatz eines Begleitfahrzeuges zur Aufnahme und zum Transport des Strandanwurfs erforderlich. Modernere Konzepte, die beide Arbeitsschritte, also die Räumung und die Aufnahme, vereinen sind von den

Anschaffungskosten häufig nicht wirtschaftlich für den Strandreinigungsbetrieb oder den anfallenden Mengen des Strandanwurfs nicht gewachsen.

3.3 Vorbehandlung

Produkt der Strandreinigung ist Treibsel. Es besteht hauptsächlich aus Seegras und Makroalgen. Je nach Erntetechnik enthält die Biomasse neben weiteren pflanzlichen Bestandteilen und anderen Verunreinigungen wie Kunststoff eine erhebliche Menge Sand und Wasser (Ministerium für Wirtschaft, Arbeit und Gesundheit 2018). Aus diesem Grund ist eine Vorbehandlung des Substrates vor der Verwertung zu empfehlen, um Verunreinigungen zu entfernen und den Sandanteil zu reduzieren.

3.4 Lagerung

Aufgrund des diskontinuierlichen Aufkommens des zu räumenden Strandanwurfs ist eine Lagerung bis zur endgültigen Verwertung häufig unausweichlich. Zudem ist das vorrübergehende Lagern des Abfallgutes am Strand ausdrücklich erlaubnispflichtig, da nachteilige Auswirkungen auf Schutzgüter (z.B. durch biologische Prozesse) zu erwarten sind. Die kurzzeitige Bereitstellung zum Abtransport direkt vom Strand ist dadurch nicht betroffen. Der Verbleib in einem Zwischenlager ist jedoch an verschiedene Auflagen gebunden. Die Genehmigung und Errichtung solcher Lagerstätten ist für betroffene Kommunen laut einer Erklärung der Landesregierung ausdrücklich förderfähig.

3.5 Verwertung

Nach entsprechender Vorbehandlung ist anfallendes Seegras aus der Strandreinigung für verschiedene stoffliche und energetische Nutzungspfade verfügbar. In Deutschland ist die bislang bevorzugte Variante dabei die Kompostierung. Darüber hinaus besteht z.B. die Möglichkeit der energetischen Verwertung, gemäß den Vorgaben des EEG, als Co-Substrat in dafür zugelassenen Abfallvergärungsanlagen. Entsprechend den Grundsätzen des Kreislaufwirtschaftsgesetzes können Gärreste sowie die pflanzlichen Bestandteile des Treibsels nach der Kompostierung oder anaerober Vergärung beispielsweise als Dünger auf landwirtschaftlichen Flächen unter Berücksichtigung der Anforderungen der Düngemittelverordnung (Ministerium für Wirtschaft, Arbeit und Gesundheit 2018) verwendet werden.

3.6 Rechtliche Rahmenbedingungen

Die pflanzlichen Bestandteile des Strandanwurfs, wie Seegras und Algen, sind aufgrund fehlender gesonderter Abfallbezeichnung im europäischen Abfallverzeichnis unter der Abfallschlüsselnummer 20 02 01 (biologisch abbaubare Abfälle) deklariert und gelten als pflanzlicher Abfall aus einem anderen Herkunftsgebiet als aus Haushaltungen. Sie zählen damit zu den Siedlungsab-

fällen und sind unter Beachtung abfallrechtlicher Aspekte zu entsorgen. Der Anwendungsbereich des Abfallrechts wird in dem Moment eröffnet, in dem die angespülte Biomasse zur weiteren Entsorgung zusammengetragen wird, um den Strand und den Ufersaum davon zu beräumen.

Bei den pflanzlichen Bestandteilen des Strandanwurfs handelt es sich im Allgemeinen um keinen gefährlichen Abfall. Jedoch besteht bei der Verwertung auf zum Beispiel landwirtschaftlichen Flächen grundsätzlich eine Behandlungs- und Untersuchungspflicht. Zudem kann nur auf Antrag des Abfallbesitzers (Seebad/Kommune) von der zuständigen Behörde (Staatliche Ämter für Landwirtschaft und Umwelt Mecklenburg-Vorpommern - StALU) im Einvernehmen mit der landwirtschaftlichen Fachbehörde (LMS) eine entsprechende Freistellung erfolgen. Frisch angespültes reines pflanzliches Material kann mit einer solchen Freistellung von den Behandlungspflichten gemäß § 10 Abs. 2 Bioabfallverordnung (BioAbfV) direkt auf landwirtschaftliche Flächen verwertet werden. Es ist hierbei aber stets die Bioabfallverordnung (BioAbfV) als Spezialregelung aus dem Abfallrecht anzuwenden. Die Entsorgung von 'nicht aufbereitetem Strandanwurf ist in Abfallbehandlungsanlagen gemäß den entsprechenden Annahmebedingungen dieser Anlagen möglich. Aus der Bioabfallverordnung (BioAbfV) ergibt sich gemäß § 11 zusätzlich ein Nachweisverfahren (Lieferschein) für die Verwertung und den Verbleib aller Bioabfälle und damit auch für die pflanzlichen Bestandteile des Strandanwurfs, dass durch den Abfallbesitzer (Seebad/Kommune) sowie auch den Verwerter/Entsorger einzuhalten ist (Ministerium für Wirtschaft, Arbeit und Gesundheit 2018).

4 Theoretisches und technisches Potenzial von Seegras aus der Strandreinigung

Diese Studie identifiziert das theoretische und technische Biomassepotential für Seegras aus der Strandreinigung. Anlagenkapazitäten werden dabei nicht berücksichtigt, da in dieser Darstellung die Notwendigkeit der Nutzung dieser Ressource im Vordergrund steht.

4.1 Theoretisches Potential von Treibsel und Seegras

Die resultierenden Entsorgungsmengen von angeschwemmtem Seegras variieren zeitlich und räumlich stark aufgrund der unterschiedlichen Zusammensetzung des Treibses und der Art der Bewirtschaftung der Strände sowie der vorherrschenden Strömungsverhältnisse und Küstenmorphologie. Zahlenangaben hierüber gehen aus verschiedenen Quellen hervor und sind nicht einheitlich. Für die Berechnung des möglichen Substratinputs wurden für diese Studie die Informationen über Treibsemlmengen des Ministeriums für Wirtschaft, Arbeit und Tourismus für die deutsche Ostseeküste sowie Seegrasmengen nach Wilken et al. 2006 berücksichtigt. Die Daten sind in der folgenden Tabelle zusammengefasst.

Tab. 1: Treibsel- und Seegrasmengen entlang der deutschen Ostseeküste

Bundesland	Außenküste	TM Treibsel in t/a	TM Seegras in t/a
Mecklenburg-Vorpommern	380	19.000	5.000
Schleswig-Holstein	350	17.500	6.500
gesamt	730	36.500	11.500

4.2 Technisches Potential von Treibsel und Seegras

Das technische Potenzial umfasst den Teil des theoretischen Potenzials, der unter Berücksichtigung der aktuellen technischen Bedingungen genutzt werden kann. Die Anzahl der dafür bereitstehenden Betriebsanlagen für das Jahr 2017 wurden vom Landesamt für Umwelt, Naturschutz und Geologie Mecklenburg-Vorpommern sowie vom Ministerium für Energiewende, Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume Schleswig-Holstein im Jahr 2018 veröffentlicht und in Tab. 2 zusammengefasst. Die Menge des resultierenden Gärrests wird aufgrund inkonsistenter praxisbezogener Daten nicht angegeben. Der geschätzte Biogasertrag für Treibsel basiert auf den Daten von Alldag 2018.

Tab. 2: Anlagen zur potentiellen energetischen Verwertung von Treibsel/Seegras 2017

Bundesland	n thermische Verwertungsanlagen	n Biogasanlagen	n Abfallvergärungsanlagen	n MBA	Output Biogas
Mecklenburg-Vorpommern	11	510	8	4	k.A.
Schleswig-Holstein	6	909	k.A.	2	k.A.
gesamt	17	1419	k.A.	6	900.000-2.000.000 m³

(n=Anzahl; MBA=Mechanisch-biologische Abfallbehandlungsanlage)

5 Ausblick

Die Verwendung von Seegras als Co-Substrat in der anaeroben Vergärung und die Nutzung des Gärückstands als Dünger in der Landwirtschaft stellt eine wertvolle Ergänzung zu den Bemühungen zur Minderung der Eutrophierung in der Ostsee dar. Von dem Aufbau einer Wertschöpfungskette aus dem frei verfügbaren Rohstoff Seegras profitieren letztlich alle Akteure. Organisatorische sowie rechtliche Herausforderungen stehen einer flächendeckenden Praxis der energetischen Verwertung von Seegras als Co-Substrat in der anaeroben Vergärung jedoch bisher im Wege. Die Entwicklung eines konsistenten Managementkonzeptes für anfallenden Strandanwurf erfordert demnach eine Anpassung der gelgenden Rahmenbedingungen. Dabei ist eine enge Zusammenarbeit aller Beteiligten

gefragt. Im Rahmen des Projektes COASTAL Biogas sollen positive Erfahrungen aus Nachbarländern des südbaltischen Raumes durch gezielten Technologie-transfer und eine grenzübergreifende Zusammenarbeit vorangetrieben werden.

Literatur/Quellen

- Aldag, S. 2018: Ökologische Aspekte der stofflichen Verwertung von Seegras, Rostock
- BioAbfV 2017: Verordnung über die Verwertung von Bioabfällen auf landwirtschaftlich, forstwirtschaftlich und gärtnerisch genutzten Böden
- BLANO 2014: Konzept zur Ableitung von Nährstoffreduktionszielen nach den Vorgaben der Wasserrahmenrichtlinie
- GRAVE, H., MÖLLER, H. 1982: Quantifizierung des pflanzlichen Strandanwurfs an der westdeutschen Ostseeküste
- KrWG 2012: Gesetz zur Förderung der Kreislaufwirtschaft und Sicherung der umweltverträglichen Bewirtschaftung von Abfällen
- LUNG M-V (2018): Daten zur Abfallwirtschaft 2017, Güstrow
- Ministerium für Landwirtschaft, Umwelt und Verbraucherschutz Mecklenburg-Vorpommern 2010: Regelwerk Küstenschutz M-V, 2 - 1 / 2010
- Ministerium für Landwirtschaft, Umwelt und Verbraucherschutz Mecklenburg-Vorpommern 2016: Konzept zur Minderung diffuser Nährstofteinträge aus der Landwirtschaft
- Ministerium für Wirtschaft, Arbeit und Gesundheit (2018): Vollzugshinweise zur „Direkten Verwertung“ von Treibsel als Abfall auf landwirtschaftlichen Flächen in Mecklenburg-Vorpommern, Schwerin
- Ministerium für Wirtschaft, Arbeit und Tourismus (2009): Energie aus Abfall in Mecklenburg-Vorpommern, Schwerin
- Ptacnikova, R. 2013: Coastal marine biomass-to-energy potential in Lower Saxony
- Richtlinie 2008/98/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 19. November 2008 über Abfälle und zur Aufhebung bestimmter Richtlinien
- Richtlinie 92/43/EWG des Europäischen Parlaments zur Erhaltung der natürlichen Lebensräume sowie der wildlebenden Tiere und Pflanzen
- WILKEN, H.; FÜRHAUPTER, K.; MEYER, T. (2006a): Die Seegrasverbreitung entlang der Ostseeküste Mecklenburg-Vorpommerns - Dichte- und Biomasseabschätzung mittels Luftbildauswertung. Auftraggeber: Amt Klützer Winkel

Kontakt

Sebastian Foth, Wissenschaftlicher Mitarbeiter

Professur für Abfall- und Stoffstromwirtschaft der Universität Rostock

① +49(0)381.498-3405 | ✉ sebastian.foth2@uni-rostock.de

*Markus Daldrup, Marc Kurzbuch, Dietmar Ramhold,
Harald Lindorfer*

Monovergärung von Weizenpülpe

Zusammenfassung: Die Nutzung von Abfällen und Reststoffen zur Erzeugung von Biogas wird zunehmend interessanter, denn es reduziert anfallende Kosten für die Entsorgung dieser Stoffe. Eine Anlage zur Vergärung dieser Abfall- und Reststoffe kann noch vorhandenes Potential unter Erzeugung von Biogas ausnutzen. Mithilfe von Laborversuchen lässt sich abschätzen inwieweit sich mögliche Einsatzstoffe für die Biogasproduktion eignen. Der untersuchte Reststoff ist eine Weizenpülpe aus der Stärkeindustrie. Sie bleibt am Ende von vielen Prozessen übrig, bei denen aus Weizenkörnern Stärke und Gluten für unterschiedliche Einsatzgebiete extrahiert wurden. In Laborversuchen mit 4 baugleichen Biogas-Kleinstanlagen, mit einem aktiven Fermentervolumen von jeweils 18 Liter, wurde diese Weizenpülpe näher untersucht. Die Versuchsdauer betrug 130 Tage. Dabei war es erforderlich eine Reihe an Prozesshilfsstoffen einzusetzen um die Fermenterbiologie zu unterstützen. Damit konnten die Fermenter über den gesamten Versuchszeitraum stabil betrieben werden. Im Anschluss wurden auf Basis der gesammelten Ergebnisse und untersuchten Raumbelastungen erste Berechnungen über eine mögliche zukünftige Anlage unternommen. Für eine tatsächliche Auslegung einer Anlage im großtechnischen Maßstab sind allerdings noch weitere Praxiserfahrungen nötig.

Abstract: The usability of waste and other waste materials in biogas production is of an increasing interest, because it can reduce the costs of waste disposal. A facility for anaerobic digestion of these remnants can utilize further potential with the production of biogas. With the help of experiments on a laboratory scale it can be estimated how well a substrate is suited for the anaerobic digestion process. The examined substrate is a waste material from the starch industry. At the end of several processes, where starch and gluten for many different purposes are extracted from wheat, a wheat pulp remains. This wheat pulp was examined in four identical micro biogas plants. The plants are continuously operating and have an active digester volume of 18 litres. The test duration was 130 days. During the experiment, it was necessary to use additives to support the digester biology. The digestion process remained stable during the test. Afterwards, the collected data was used to estimate the size of a digester for a plant on an industrial scale. For an actual construction, it is necessary to gather more practical experience.

1 Einleitung und Zielsetzung

Steigende Preise für Energie in den letzten Jahren machen die stofflich-energetische Nutzung von organischen Abfällen und Reststoffen zunehmend interessanter. Nicht zuletzt, da ihre Entsorgung mit entsprechenden Kosten verbunden ist. Hier kann eine Anlage zur Vergärung dieser Stoffe das noch vorhandene Potenzial, unter Erzeugung von Biogas, ausnutzen. Biogas hat dabei vielfältige Einsatzmöglichkeiten. Es lässt sich zur Strom- und Wärmeerzeugung nutzen

und kann, wenn veredelt, sogar in das öffentliche Gasnetz eingespeist werden. Der am Ende des Biogasprozesses entstehende Gärrest kann als Düngemittel eingesetzt werden [1].

Inwieweit sich verschiedene Einsatzstoffe für den Biogasprozess eignen kann im Vorfeld mithilfe von Laborversuchen abgeschätzt werden. Der Biogasertrag eines Einsatzstoffes kann mithilfe von Gärversuchen ermittelt werden. Ebenso ist oft unklar, ob der kontinuierliche Betrieb einer Anlage zur Vergärung möglich ist und ob der dort stattfindende Prozess stabil läuft. Hier können Laborversuche erste Fragestellungen beantworten.

1.1 Die Stärkefabrik

Die Stärkefabrik verarbeitet zum Zeitpunkt des Versuchs durchschnittlich 14 t Weizenmehl pro Stunde zu Stärke- und Glutenprodukten für verschiedene Anwendungsbereiche. Dabei fallen am Ende der stattfindenden Prozesse 300-330 m³/d Weizenpülpe als Reststoff an. Aufgrund von Umbaumaßnahmen ist die Anlage fähig 16 t/h zu verarbeiten. Bei einer Anlagenleistung von 15 t/h werden 350 m³ Weizenpülpe produziert. Bei geringster Anlagenleistung beträgt die minimale Menge an Reststoff 250 m³. Die Temperatur der frischen Weizenpülpe liegt bei 37 °C [2]. Dieser Reststoff soll am Standort vor Ort anaerob vergoren werden. Das dabei entstehende Biogas kann in den energieintensiven Prozessen im örtlichen Industriepark genutzt werden.

1.2 Zielsetzung

Damit genaue Aussagen über die Vergärbarkeit und den Prozess gemacht werden können, sind Laborversuche notwendig. Im Rahmen der kontinuierlichen Vergärungsversuche im Labormaßstab werden folgende Fragestellungen untersucht:

- Wie hoch ist der Gasertrag der Weizenpülpe?
- Welche Zusammensetzung hat das entstandene Biogas?
- Ist der Prozess stabil?
- Welche Zusatzstoffe sind notwendig?
- Lassen sich die Versuchsergebnisse in vollem Umfang auf die Praxis übertragen?

2 Material und Methoden

Die Versuche werden in vier baugleichen Biogas-Kleinstanlagen mit einem aktiven Fermentervolumen von 18 l durchgeführt. Diese sind im Nachfolgenden als Fermenter 5 bis Fermenter 8 bezeichnet. Als Impfschlamm wird Fermenterschlamm aus der NawaRo-Biogasanlage auf Gut Hülsenberg verwendet. Diese Anlage wird im Folgenden als Referenzanlage zur Einordnung der Ergebnisse herangezogen. Das Substrat für diese Anlage besteht aus Mais und Gülle

im Verhältnis 2:1. Der Schlamm, der aus Hauptfermenter 2 entnommen wurde, wurde vor Versuchsstart gesiebt und 7 Tage lang ausgezehrt. Abb. 1 und Abb. 2 zeigen den Versuchsaufbau der kontinuierlichen Laborfermenter.



Abb. 1: Laborfermenter 5-8 (von rechts)

Im unteren Teil der Abb. 1 befinden sich die Fermenter 5-8, die für die Versuche verwendet wurden. Zwischen den Fermentern (-1-) befindet sich je ein Vorlagebehälter (-2-) für die automatisierte Fütterung, die ab Versuchstag 78 in Betrieb genommen wurde. Hinter den Fermentern befinden sich kleine 5 l Gas-speicherbeutel (-3-), die dazu dienen einen Druckausgleich zwischen dem Fermenter und der Umgebung herzustellen. Dies verhindert bei Gärrestentnahme einen Unterdruck im Fermenter. Im oberen Bereich der Abbildung 1 befinden sich die Motoren mit Steuerungseinheit (-4-) für die Rührwerke und dazwischen die Schlauchpumpen (-5-) für die Dosierung der Weizenpülpe in den Fermenter. Die Fermenter werden 6 Mal pro Stunde für jeweils 3 Minuten gerührt. Dabei erreichen die Rührwerke eine Umdrehungsgeschwindigkeit von knapp 80 U/min. Die Fermenter befinden sich in einer Wärmekammer in der konstant eine Temperatur von 40 °C eingestellt ist.

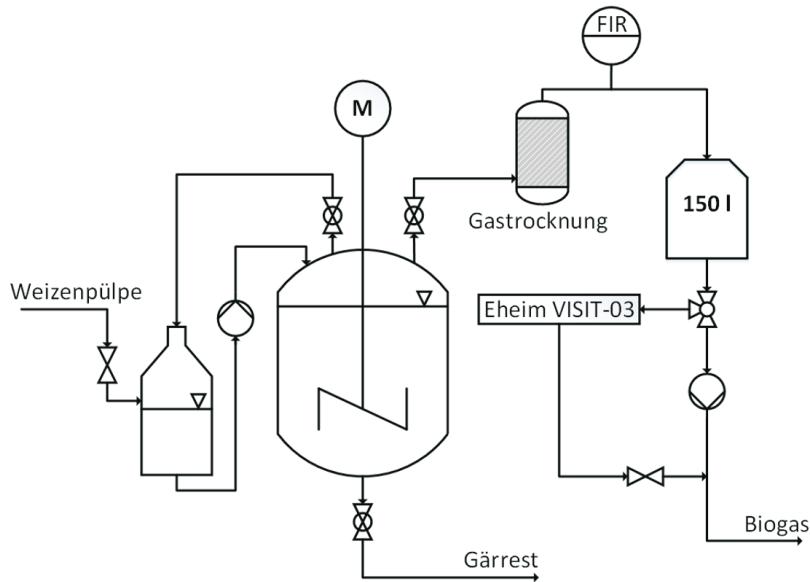


Abb. 2: Schematische Darstellung des Versuchsaufbaus eines Fermenters

Der gesamte Versuchszeitraum von 130 Tagen lässt sich in vier Abschnitte unterteilen:

- Startphase: 35 Tage, $RB < 5,5 \text{ kg}_{\text{oTS}} / (\text{m}^3 \text{ d})$
- $RB = 5,5 \text{ kg}_{\text{oTS}} / (\text{m}^3 \text{ d})$
- Erhöhung der Raumbelastung, $5,5 < RB < 7,0 \text{ kg}_{\text{oTS}} / (\text{m}^3 \text{ d})$
- $RB = 7,0 \text{ kg}_{\text{oTS}} / (\text{m}^3 \text{ d})$

Aufgrund schwankender Trockensubstanzgehalte in der Weizenpülpe wurden die Tagesmengen je nach Trockensubstanz (TS) und organischer Trockensubstanz (oTS) angepasst. Tab. 1 zeigt die wichtigen Parameter der Weizenpülpe, die für die Fütterung der Fermenter maßgebend sind. Für eine Raumbelastung (RB) von $5,5 \text{ kg}_{\text{oTS}} / \text{m}^3 \text{ d}$ bekommt der Fermenter täglich 99 g organische Trockensubstanz. Durch den Trockensubstanzgehalt in Charge 1 der Weizenpülpe von durchschnittlich 9,5 % und Ascheanteil von durchschnittlich 3,02 % muss eine Frischmasse von 1075 g zugeführt werden. Dadurch kommt es im Verlauf des Versuchs zu Verdünnungseffekten im Fermenter, wodurch die Konzentrationen an Nährstoffen und Puffersubstanzen sinken. Die Verweilzeit beträgt dabei ≈18 Tage. Bei Einsatz der zweiten Charge Weizenpülpe betrug die Verweilzeit ≈25 Tage. Zusatzstoffe werden ab Tag 60 des Versuchszeitraums regelmäßig und nach Bedarf eingesetzt. Dabei kamen folgende Zusatzstoffe zum Einsatz:

- Natriumbikarbonat zur Erhaltung der Pufferkapazität
- Harnstoff für die Stickstoffversorgung des Fermenters
- BC.ATOX flüssig, ein Spezialprodukt zur Entschwefelung des Biogases
- Spurenelemente, ebenfalls ein Spezialprodukt (BC.TEplex akut)

Tab. 1: Weizenpülpe TS/oTS

	pH	Ø TS [%-FM]	Ø Mineralische Substanz [%-TM]	Ø oTS [%-FM]
Weizenpülpe Charge 1 Tag 1-74	3,41	9,5	3,0	9,2
Weizenpülpe Charge 2 Tag 75-130	3,35	18,7	1,5	18,4

Analyserahmen

Zur Überwachung des Prozesses wurden eine Reihe von Parametern in verschiedenen Intervallen überwacht. Tab. 2 zeigt die Parameter und den dazugehörigen Rhythmus. Die Analysen wurden nach den hauseigenen Methoden zur Analyse von Fermenterschlammten der ISF GmbH durchgeführt. Diese Methoden entsprechen den Standardmethoden nach VDLUFA und DIN.

Tab. 2: Analysen während des Versuchs für Gärrest und Biogas

	Rhythmus	Parameter	
Kleine Probennahme	14-täglich	pH, FOS/TAC, Säuren, NH4	Labor
Große Probennahme	14-täglich	pH, FOS/TAC, Säuren, NH4, TS/oTS, gesamt N, Spuren, Viskosität	
Gasanalyse	täglich	Gasmenge	Technikum
	täglich	Gaszusammensetzung	

Ergebnisse

Während des Versuchs wurden tägliche Messungen der Gasqualität und der Gasmengen durchgeführt. Da alle Fermenter gleichbehandelt wurden und die

erfassten Messwerte dadurch insgesamt sehr ähnlich sind, sind nachfolgende Ergebnisse anhand eines Fermenters dargestellt. Abb. 3 zeigt die aus den täglichen Gasmengenmessungen kumulierte Gasmenge über den gesamten Versuchszeitraum. Ebenfalls dargestellt ist die Raumbelastung (rote Linie). Im ersten Versuchsabschnitt stellt die rote Linie die Steigerung der Raumbelastung und damit eine Erhöhung der Fütterungsmengen dar. Mit der Erhöhung der Fütterungsmengen steigt, wie an der blauen Linie zu erkennen, das täglich gebildete Gasvolumen. Dies ist an der größer werdenden Steigung der blauen Kurve zu erkennen. Durch den stetigen Anstieg der kumulierten Gasmenge lässt sich eine kontinuierliche Gasbildung erkennen. Bei der Steigerung der Raumbelastung auf $7,0 \text{ kg}_{\text{ots}}/\text{m}^3 \text{ d}$ ab Versuchstag 82 steigt auch die gebildete Gasmenge pro Tag an. Ein Abflachen bedeutet eine geringere Gasbildung und kann damit auf Prozessstörungen hinweisen. Wie in der Abb. 3 erkennbar, kam es zu keinem Zeitpunkt während des Versuchs zu gravierenden Einbrüchen in der Gasbildung. Mithilfe von Batchversuchen nach VDI 4630 wurde vor dem Versuch der Gasertrag der Weizenpülpe bestimmt. Dieser lag bei $650 \text{ IN}/\text{kg}_{\text{ots}}$.

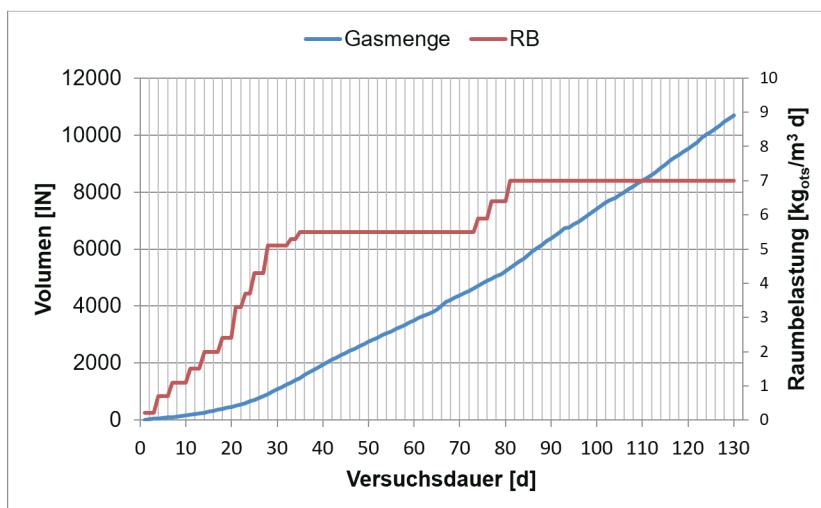


Abb. 3: Kumulierte Gasmenge und Raumbelastung über den gesamten Versuchszeitraum

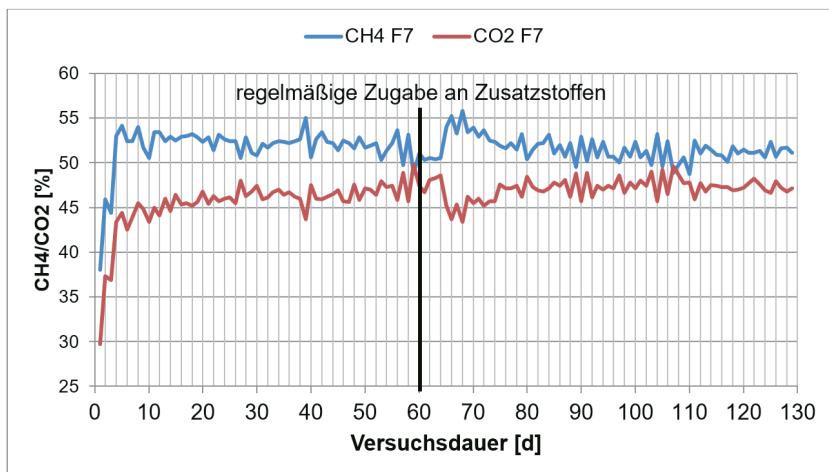


Abb. 4: Gaszusammensetzung

Ein wesentlicher Faktor bei der Bewertung von Biogasprozessen ist die Gaszusammensetzung. Das wesentliche Ziel im Biogasbereich ist eine möglichst hohe Konzentration an Methan und möglichst wenig Kohlenstoffdioxid. Abb. 4 zeigt die tägliche Gaszusammensetzung bei der Vergärung von Weizenpülpe. Vier Tage nach Versuchsstart konnte dauerhaft eine durchschnittliche Methankonzentration von mehr als 50 % im Biogas erreicht werden. Der CO₂-Wert liegt dabei im Durchschnitt bei über 45 %.

Regelmäßige Analysen des Gärrests (Tab. 2) dienten zur Überwachung des Prozesses. Anhand dieser Parameter konnten Prozessstörungen frühzeitig erkannt werden. Vor allem hinsichtlich der Versorgung der Fermenterbiologie mit Nährstoffen und Spurenelementen waren regelmäßige Analysen erforderlich. Abbildung 5 zeigt die Entwicklung der Konzentration an Ammonium- und Gesamtstickstoff. Stickstoff gilt als essentieller Nährstoff für Mikroorganismen und wird während der Abbauprozesse im Fermenter von proteinhaltigen Substraten in Form von Ammonium und Ammoniak freigesetzt. Das Ammoniumion NH₄⁺ wird dabei von Mikroorganismen zur Stickstoffversorgung synthetisiert [3]. Abb. 5 zeigt den Verlauf der Konzentration an Ammoniumstickstoff und an Gesamtstickstoff. In den ersten Versuchstagen nehmen die Konzentrationen für Gesamtstickstoff und Ammoniumstickstoff ab. Der Grenzwert für die Ammoniumversorgung im Fermenter liegt bei 0,1 %-FM. Wenn die Konzentration zu niedrig ist, steht den Mikroorganismen zu wenig Stickstoff für die Bildung wichtiger Enzyme zur Verfügung und es entsteht ein Mangel. Dieser Mangel führt dann dazu, dass die maximal mögliche Methanausbeute nicht erreicht wird, da durch unzureichenden Stoffwechsel der vorhandene Kohlenstoff nicht vollständig umgesetzt werden kann [1]. Ab Tag 48 erfolgt die Dosierung von 1 g/d Harnstoff als Quelle für Ammoniumionen. Da diese Menge nicht ausreichend ist, sinkt die Konzentration an NH₄⁺ weiter auf 0,06 %. Dieser Wert liegt unterhalb des

Richtwerts von 0,1 %. Eine höhere Dosierung von Harnstoff mit 1,5 g/d ab Tag 53 sorgt für eine bessere Versorgung der Mikroorganismen. Ab Versuchstag 67 ist der Richtwert von 0,1 %-FM erreicht, da ab Tag 61 die Dosierung auf 2,5 g/d erhöht ist. Nachfolgend gibt es im Zeitraum von Tag 74-78 bei der Gaszusammensetzung (Abbildung 4) einen Sprung der Methankonzentration auf 55 %. Dieser flacht ein paar Tage später wieder ab und lässt darauf schließen, dass sich in der Zeit der Unterversorgung bestimmte Stoffe akkumuliert haben, die dann, aufgrund der besseren Versorgung der Mikroorganismen, abgebaut werden konnten.

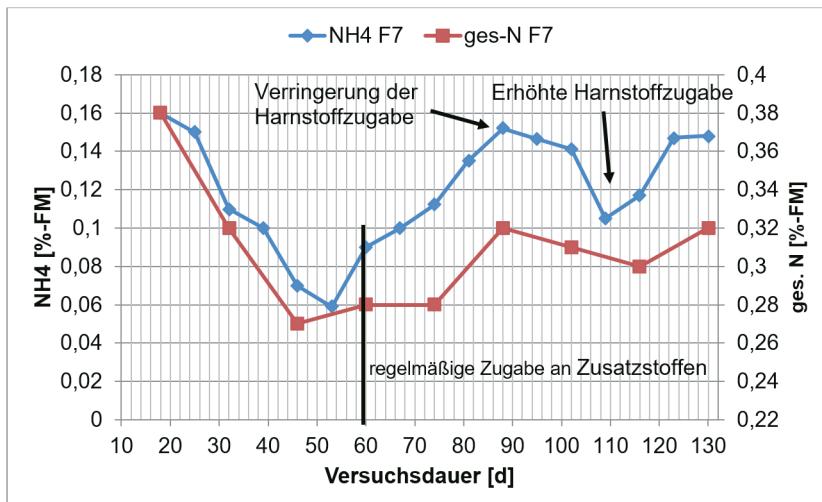


Abb. 5: Ammonium- und Gesamtstickstoff

3.1 Entwicklung der Spuren- und Mengenelementgehalte in den Versuchsfermentern

Wie in allen biologischen Prozessen gilt auch in Biogasanlagen das Liebigsche Gesetz vom Minimum, welches besagt, dass bei Mangel nur eines Nährstoffs keine vollen Erträge erreicht werden können. Eine optimal angepasste Spurenelementdosierung dient somit der Stabilisierung und Optimierung des Methanbildungsprozesses, indem sie sowohl das Wachstum der am Abbauprozess beteiligten Mikroorganismen fördert als auch die Bildung der notwendigen Enzyme und Co-Enzyme ermöglicht. Durch die Zugabe von Spurenelementen wird eine Synchronisierung der einzelnen Stufen in der Biogasproduktion und eine langfristige Steigerung der Fermenterleistung erreicht. Um den Gehalt an Spuren- und Mengenelementen im Gärsubstrat zu überwachen, wurden in regelmäßigen Abständen von zwei Wochen, Proben aus den Versuchsfermentern mittels ICP-OES analysiert. Bei der Monovergärung von Weizenpülpel erhält der Fermenter praktisch keine Nährstoffe aus dem Input Substrat. Spuren- und Mengenelemente, die sonst in landwirtschaftlichen Anlagen in spezifischer Menge über die

Fütterung mit Maissilage, Grassilage oder Rindergülle eingetragen werden, fehlen im vorliegenden Versuch fast vollständig.

An Versuchstag 18 (Abb. 6) war der Fermenterschlamm noch deutlich durch den verwendeten Impfschlamm aus der hauseigenen Biogasanlage auf Gut Hülsenberg beeinflusst. Der Gehalt an Spurennährstoffen war hier optimal bis überdurchschnittlich gut eingestellt worden, um eine solide Startgrundlage für die Versuche zu gewährleisten. Der TS-Wert lag zu diesem Zeitpunkt bei über 5 %. Durch die anhaltende Fütterung mit Weizenpülpe und dem damit verbundenen Frischmasseeintrag (ca. 1 kg pro Tag) bzw. Wassereintrag kam es zu einer schnellen Verdünnung des Fermenterinhals und einem Abfall der Spurenelementkonzentration an Versuchstag 60 (Abbildung 6). Die Versorgung mit Nährstoffen an Tag 60 lässt sich als unzureichend einstufen. Besonders NH₄-N, B, Co, Ni und Mo weisen einen deutlichen Mangel auf. Na und Fe befinden sich nur im Überschuss, weil bereits frühzeitig über Fe(III)Cl₂ und Natriumhydrogenkarbonat entschwefelt bzw. chemisch gepuffert wurde. Der starke Anstieg des Elements Wolfram (W) lässt sich auf den Einsatz des Fe(III)Cl₂ bzw. dessen Reinheit zurückführen. Unter Berücksichtigung des TS-Wert von 2,6 % an Tag 60 muss die Versorgung mit Spuren- und Mengenelementen als kritisch interpretiert werden. Um in den Normbereich zurück zu gelangen, erfordert es eine höhere Menge an Spurenelementen, da sich der Flüssiganteil im Fermenter etwa verdoppelt hat. Die Abbildung zu Versuchstag 130 (Abbildung 6) zeigt das Analyseergebnis für Fermenter 7 nach mehrmaliger Zugabe einer standardisierten, flüssigen Spurenelementmischung auf EDTA-Basis (0,5 g alle zwei Wochen auf 18 kg aktives Fermentervolumen). Die für die Mikrobiologie essentiellen Elemente Ni, Co, Mo, B und Se konnten durch die Zugabe der standardisierten Spurenelementmischung für Laborversuche schnell wieder in den Normbereich gebracht werden. Der Bedarf an Mg, Ca, K und Mn ließ sich durch die flüssige Mischung nicht decken.

3.2 Fazit und Empfehlung zum Einsatz von Spuren- und Mengenelementprodukten

Neben Eisenchloriden, Harnstoff und Natriumbikarbonat bzw. Natronlauge sollte eine anlagenindividuelle Spurenelementmischung eingesetzt werden (Einsatzmenge mindestens 0,4 kg/100 kW Anlagenleistung). Die Mischung lässt sich zusätzlich mit Eisen und Mangan ausstatten. Der Mangel an Mg, Ca, K und Mn lässt sich nur über die separate Zugabe eines speziellen Präparates zur Versorgung von Mengenelementdefiziten ausgleichen.

Nährstoffversorgung Fermenter 7
Versuchstag 18

	Defizit	Normbereich	Überschuss
NH4	*		
P	*		
K	*		
Mg	*		
Na		*	
Ca	*		
S	*		
Cu	*		
Ni	*		
Zn	*		
Fe	*		
B	*		
Co	*		
Mn	*		
Mo	*		
Se	*		
W	*		

Nährstoffversorgung Fermenter 7
Versuchstag 60

	Defizit	Normbereich	Überschuss
NH4	*		
P		*	
K	*		
Mg	*		
Na		*	
Ca		*	
S		*	
Cu		*	
Ni	*		
Zn	*		
Fe		*	
B	*		
Co	*		
Mn	*		
Mo	*		
Se	*		
W	*		

Nährstoffversorgung Fermenter 7
Versuchstag 130

	Defizit	Normbereich	Überschuss
NH4	*		
P		*	
K	*		
Mg	*		
Na		*	
Ca	*		
S		*	
Cu		*	
Ni		*	
Zn	*		
Fe		*	
B	*		
Co		*	
Mn	*		
Mo	*		
Se	*		
W	*		

	Analyse Nr.: 7_18	
	% der FM	% der TM
NH4	0,16	
P	0,05	1,08
K	0,29	5,79
Mg	0,04	0,87
Na	0,03	0,69
Ca	0,10	1,95
S	0,03	0,65
mg/kg in FM mg/kg in TM		
Cu	2,46	49
Ni	0,42	8,4
Zn	17,23	344
Fe	138,57	2768
B	1,34	27
Co	0,17	3,3
Mn	21,08	421
Mo	0,26	5,3
Se	0,07	1,43
W	0,07	1,47

	Analyse Nr.: 7_60	
	% der FM	% der TM
NH4	0,09	
P	0,04	1,32
K	0,09	3,44
Mg	0,02	0,58
Na	0,04	1,39
Ca	0,09	3,18
S	0,02	0,72
mg/kg in FM mg/kg in TM		
Cu	0,91	34
Ni	0,11	4,2
Zn	4,97	185
Fe	142,10	5302
B	0,40	15
Co	0,04	1,3
Mn	7,64	285
Mo	0,09	3,3
Se	0,02	0,71
W	0,10	3,58

	Analyse Nr.: 7_130	
	% der FM	% der TM
NH4	0,15	
P	0,03	1,14
K	0,05	1,60
Mg	0,01	0,32
Na	0,23	8,23
Ca	0,02	0,72
S	0,02	0,56
mg/kg in FM mg/kg in TM		
Cu	0,82	29
Ni	0,26	9,1
Zn	3,68	130
Fe	165,41	5859
B	0,57	20
Co	0,12	4,1
Mn	4,14	147
Mo	0,17	6,1
Se	0,05	1,79
W	0,09	3,13

Abb. 6: Darstellung der Nährstoffversorgung des Versuchsfermenters Nr. 7 an unterschiedlichen Zeitpunkten. Versuchstag 18 stellt die Bedingungen zu Beginn der Testreihe dar (TS-Wert: 5,31). Versuchstag 60 verdeutlicht den sich andeutenden Mangel an Spuren- und Mengenelementen ohne externe Dosierung der fehlenden Komponenten (TS-Wert: 2,68). An Versuchstag 130 wurde bereits mehrmals ein Spurenelementpräparat dosiert und die Gehalte an Ni, Co, Mo, B und Se merklich aufgefüllt. Der Mangel im Mengenelementbereich ist zu diesem Zeitpunkt weiter vorhanden.

3.3 Mögliches Design einer späteren Anlage

Basierend auf den hier gezeigten Laborversuchen lassen sich erste Schlüsse auf die Auslegung einer Anlage im großtechnischen Maßstab ziehen. Für die tatsächliche Auslegung der geplanten Anlage zur Vergärung der Weizenpülpe sind Praxiserfahrungen notwendig. Jedoch können mit den in Tab. 3 zusammengefassten Annahmen erste Berechnungen im Hinblick auf die spätere Größe eines Fermenters gemacht werden. Dabei können aufgrund der unterschiedlichen Trockensubstanzgehalte und Raumbelastungen im durchgeföhrten Laborversuch 4 Fälle unterschieden werden. Nachfolgend wird beispielhaft der erste von den 4 Fällen berechnet.

Über die Raumbelastung kann das aktive Fermentervolumen berechnet werden:

$$R_B = \frac{m_{ots}}{V_{aktiv} d}$$

Die organische Trockenmasse, die täglich in den Fermenter eingebracht wird, ist mit einem Anteil an der Frischmasse von 10 % angenommen. Der Volumenstrom der organischen Trockenmasse von $40 \text{ m}^3/\text{d}$ wird zu 40.000 kg/d vereinfacht. Mit einer Raumbelastung von $5,5 \text{ kg}_{ots}/\text{m}^3 \text{ d}$ ergibt sich ein aktives Fermentervolumen von $\approx 7200 \text{ m}^3$ bei einer Verweilzeit von ≈ 18 Tagen. Um etwaige Schwankungen im Substratstrom auszugleichen, empfiehlt sich hier ein aktives Volumen von 8000 m^3 . Für eine flexible Fahrweise der Anlage sollte der Substratstrom mindestens auf zwei Hauptfermenter mit jeweils 4000 m^3 aufgeteilt werden. Diese beiden Hauptfermenter würden beide in ein gemeinsamen Nachgärrer bzw. abgedecktes Endlager überleiten. Die Verweilzeit im Endlager beträgt ca. 7 Tage. Daraus folgt eine Größe für das Endlager von $3000-4000 \text{ m}^3$ aktivem Fermenterinhalt. Tab. 3 gibt einen Überblick über noch weitere Fermentergrößen für die entsprechenden Fälle.

Substratstrom [m^3/d]	Organische Trockensubstanz [%-FM]	Raumbelastung [$\text{kg}_{ots}/\text{m}^3 \text{ d}$]	Aktives Fermentervolumen [m^3]	Verweilzeit [d]
400	10	5,5	7200	18
400	10	7,0	5700	14
400	20	5,5	14500	36
400	20	7,0	11400	29

Tab. 3: Annahmen zur Auslegung und daraus resultierende Fermentervolumen

Eine Raumbelastung von $7,0 \text{ kg}_{ots}/\text{m}^3 \text{ d}$ wurde mit der ersten Charge Pülpe mit einem oTS-Gehalt von durchschnittlich 9,5 %-FM im Labor nicht getestet, da für diesen Versuchsabschnitt die zweite Charge Weizenpülpe mit höherem oTS-Gehalt verwendet wurde. Daher können hier keine Aussagen über den Ausgärgrad und die Stabilität des Prozesses bei dieser Raumbelastung, vor allem hinsichtlich der verkürzten hydraulischen Verweilzeit von 14 Tagen, mit dieser Pülpe gemacht werden. Eine Raumbelastung von $7,0 \text{ kg}_{ots}/\text{m}^3 \text{ d}$ ist zwar im Laborbetrieb bei höherem oTS-Gehalt in der Weizenpülpe möglich, aber in der Praxis als zu hoch anzusehen. Bei größeren Anlagen sollte die Raumbelastung deshalb bei $5,5-6,0 \text{ kg}_{ots}/\text{m}^3 \text{ d}$ liegen.

4 Fazit

Die Untersuchungen zur Monovergärung von Weizenpülpe ergeben, dass der Prozess unter Einhaltung der verschiedenen Randbedingungen im Betrieb von Biogasanlagen möglich ist. Während der Untersuchungen wurden die Fermenter über einen Zeitraum von 130 Tagen stabil betrieben. Der Gasertrag der Weizenpülpe wurde im Batchversuch mit $650 \text{ IN/kg}_{\text{OTS}}$ ermittelt. Aufgrund der unterschiedlichen Qualitäten der Weizenpülpfen ist es für den Betrieb einer Anlage zur Vergärung der Weizenpülpe empfehlenswert die Pülpe im Hinblick auf verschiedene Parameter, wie zum Beispiel TS_{OTS} , Zucker- und Stärkegehalte, regelmäßig zu kontrollieren, um Auswirkungen auf den Prozess und die Gaserträge abschätzen zu können.

Für Raumbelastungen von $5,5 \text{ kg}_{\text{OTS}}/\text{m}^3 \text{ d}$ lief der Prozess im Labor stabil. Auch höhere Raumbelastungen von $7,0 \text{ kg}_{\text{OTS}}/\text{m}^3 \text{ d}$ konnten anschließend über einen Zeitraum von 49 Tagen realisiert und stabil gehalten werden. Dabei muss allerdings beachtet werden, dass das Versuchssubstrat im Zeitraum der höheren Raumbelastung eine deutliche höhere Trockensubstanz von 18,7 % hatte. Zu keinem Zeitpunkt im Versuch kam es zu nennenswerten Einbrüchen in der Gasproduktion. Durch einen Mangel an Ammoniumstickstoff war der Methanertrag über wenige Tage verringert. Dies wurde aber nach entsprechender Dosierung von Harnstoff und Spurenelementen ausgeglichen. Das zeigt, dass auf die speziellen Anforderungen Rücksicht genommen werden muss und die Mileubedingungen für die Mikroorganismen eingehalten werden müssen, um einen stabilen und effizienten Prozess zu gewährleisten. Die Versorgung der Fermenter mit Zusatzstoffen wie Harnstoff, Puffersubstanzen und Spurenelementen ist für optimale Prozessbedingungen erforderlich. Damit einhergeht eine regelmäßige Überwachung der einzelnen Prozessparameter, um Störungen frühzeitig erkennen zu können. Das entstandene Biogas hat über den Versuchszeitraum eine Zusammensetzung von mindestens 50 % Methan und einen Anteil von CO_2 von mindestens 45 %. Mithilfe von Nachgärem lässt sich der Biogasgewinn erhöhen und diese stellen damit eine bessere Ausnutzung des Substrats und des Gärrests dar.

Die in dieser Arbeit gewonnenen Erkenntnisse lassen sich im Wesentlichen in die Praxis übertragen. So wurden bereits erste Berechnungen zu einer späteren Anlage durchgeführt. Diese sollen mithilfe der aus diesem Versuch gewonnenen Daten lediglich einen ersten Überblick über eine mögliche Anlage im großtechnischen Maßstab geben. Eine Reproduzierbarkeit ist nur dann gegeben, sofern alle Prozessbedingungen denen im Labor entsprechen.

Literatur/Quellen

- [1] T. Nevzorova und V. Kucherov, „Barriers to the wider implementation of biogas as a source of energy: A state-of-the-art review,“ Energy Strategy Reviews, Bd. 26, p. 100-414, 2019.
- [2] E. Schopp, Monovergärung Weizenpülpel.
- [3] M. Gerber, „Ganzheitliche stoffliche und energetische Modellierung des Biogasbildungsprozesses,“ Ruhr-Universität Bochum, 2009.

Kontakt

Dr. Harald Lindorfer, Produktmanagement

Schaumann BioEnergy GmbH

⌚ +49 (0)4101.218-5412 | ✉ Harald.Lindorfer@schaumann-bioenergy.eu
🌐 www.schaumann-bioenergy.eu

Markus Daldrup, Wissenschaftlicher Mitarbeiter

Universität Rostock, Professur Abfall- und Stoffstromwirtschaft

✉ markus.daldrup@uni-rostock.de

14. ROSTOCKER BIOENERGIEFORUM

UNSERE FÖRDERER

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Ernährung
und Landwirtschaft



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages



VRD STIFTUNG
FÜR ERNEUERBARE
ENERGIEN



SCHAUMANN
BioENERGY



VRD STIFTUNG
FÜR ERNEUERBARE
ENERGIEN

Abenteuer Energie



Kinderbuch
„Die kleine Rennmaus und ihr Zauberhaus“

- mit Hörbuch- und Lieder-CD
- 2014 ausgezeichnet mit dem Kinder-Medienpreis „Der weiße Elefant“
- über den Buchhandel beziehbar
- ermöglicht ca. drei- bis achtjährigen Kindern einen emotionalen Zugang zum Thema „erneuerbare Energie“



36 Seiten, DIN A4,
Hörbuch-CD 28 Minuten Spieldauer
ISBN-Nummer: 978-3-9816231-0-9
Preis: 12,99 €

*Komplette Überarbeitung 2017 (3. Auflage):
Gabriele Hoffmann, Diplom-Pädagogin
Sprecherin auf der CD: Viktoria Brams
Lieder und CD-Produktion: Karen Kassulat*



Interaktive Lesung

Buchen Sie eine interaktive Lesung mit Buch, Gesang, Handpuppe und kleinen Experimenten. Die Kinder überlegen gemeinsam, was „Energie“ eigentlich ist. Sie erleben den vielfältigen Einfluss, den Energie auf uns hat und was man mit erneuerbarem Strom machen kann. Auch Lieder und Bastelaktionen werden in die Veranstaltung integriert.



Kontakt:
[www.
leseratten
service.de](http://www.leseratten-service.de)

Maria Breuer hat Theaterwissenschaften studiert, ist Autorin und Regisseurin. Sie entwickelt naturwissenschaftliche Theaterstücke für Kinder u.a. für staatliche Stellen und die Forscherstation, Klaus-Tschira-Kompetenzzentrum für naturwissenschaftliche Bildung.





VRD STIFTUNG
FÜR ERNEUERBARE
ENERGIEN

Klimaschutz und Biomasse durch Agroforst- wirtschaft



Vorteile

- Klimaschutz: CO₂-Bindung durch Gehölze und Humusaufbau
- Klimawandel-Anpassung durch Wind-, Verdunstungs- und Erosionsschutz
- Hoher Biomassezuwachs
- Ertragszuwachs durch Mischkultursystem
- Grundwasserschutz durch Nährstoffbindung tiefer Baumwurzeln
- Förderung der Biodiversität
- Aufbau der Bodenfruchtbarkeit (Humus)
- Ästhetische Aufwertung der Landschaft (Erholung und Tourismus)



In Kooperation mit der

Stiftung
VEOLIA

www.vrd-stiftung.org

14. ROSTOCKER BIOENERGIEFORUM

UNSERE KOOPERATIONSPARTNER



Industrie- und Handelskammer
zu Rostock



Der Bundesverband Bioenergie e.V. (BBE) ist der Dachverband der Bioenergie.

Er wurde in 1998 gegründet, um der Vielfalt der Bioenergie mit all ihren Erscheinungsformen und Technologiepfaden im Strom-, Wärme- und Verkehrssektor eine wirksame Vertretung in Politik und Gesellschaft zu verleihen. Zu den Stärken des BBE zählen die Einbindung spezialisierter Branchenverbände und Unternehmen zu einem starken Netzwerk. Im BBE treffen sich die Experten und Entscheidungsträger, um politische und ökonomische Rahmenbedingungen zu analysieren und eine starke Position für die Branche zu vertreten. Der BBE gestaltet so einen ganzheitlichen Auftritt der Bioenergie und fördert den Austausch zwischen Bioenergie, Politik und Gesellschaft. Gestalten Sie daher im BBE die Zukunft des Bioenergiemarktes auf nationaler und europäischer Ebene mit und profitieren Sie von dem BBE-Experten-Netzwerk sowie den BBE-Verbandsdienstleistungen! Pragmatische Lösungen und nachhaltige Antworten erarbeiten und vermitteln die für Mitglieder offenstehenden Arbeitsgruppen und Ausschüsse des BBE, um der Politik, Wirtschaft und Wissenschaft verlässliche Handlungsempfehlungen für ein erneuerbares klimafreundliches und sicheres Energiesystem der Zukunft präsentieren zu können.

Durch seine etablierten Kongress- und Veranstaltungsformate bietet der BBE seinen Mitgliedern ein Forum, sich Kunden und Entscheidungsträgern zu präsentieren sowie attraktive Geschäftsmodelle und Innovationen näher zu bringen. Die Einbindung von Branchenverbänden und Markakteuren in die Programmgestaltung gewährleistet dabei Praxisnähe sowie eine hohe fachliche Relevanz. Dadurch wird es den Teilnehmern ermöglicht, sich sicher im rechtlichen und wirtschaftlichen Umfeld der Bioenergie bewegen zu können.

Die Projekte des BBE ermöglichen eine direkte Beteiligung von Mitgliedern an konkreten Vorhaben auf deutscher und europäischer Ebene, um Geschäftsmodelle weiterzuentwickeln und das eigene Netzwerk kontinuierlich auszubauen. Regelmäßige Mitglieder-Newsletter garantieren aktuelle Informationen zur Bioenergie aus den Bereichen Wirtschaft, Politik und Wissenschaft.

Werden Sie Mitglied im BBE!

Tragen daher auch Sie zu einer kontinuierlichen Weiterentwicklung des Bioenergiemarktes in Deutschland bei und unterstützen Sie mit Ihrer Mitgliedschaft und Mitarbeit den BBE. Denn nur zusammen erreichen wir unser gemeinsames Ziel: Mehr Marktanteile für die Bioenergie und den Auf- und Ausbau einer nachhaltigen Energiewirtschaft. Werden Sie Mitglied im BBE. Wir bieten unseren Mitgliedern folgende Vorteile:

- Politische Interessensvertretung und offensive Gestaltung der politischen und wirtschaftlichen Rahmenbedingungen auf nationaler und europäischer Ebene (der BBE ist deutsches Mitglied im Europäischen Biomasseverband (AEBIOM)),
- aktive Mitgestaltungsmöglichkeit unserer Verbandsarbeit in unseren Fachausschüssen zur festen, flüssigen und gasförmigen Bioenergie,
- regelmäßige topaktuelle Marktnews per BBE-Mitglieder-E-Mail,
- Öffentlichkeitsarbeit und Vertretung unserer Mitgliederinteressen auf Messen, Kongressen sowie Fachtagungen, mit Vorträgen und Publikationen,
- vergünstigte Teilnahmebedingungen zu den BBE-Veranstaltungen (z.B. Parlamentarische Abende und Parlamentarische Frühstücke, Kongresse, Fachtagungen etc.),
- Präsentationsmöglichkeiten über Vorträge und Infostände auf den BBE-Veranstaltungen.

Weitere Informationen, die Vereinssatzung und Beitragsunterlagen erhalten Sie unter www.bioenergie.de

**DG
AW**

**RESSOURCEN
NEU
DENKEN.**

**Deutsche Gesellschaft für
Abfallwirtschaft e.V.**



Plattform für Produktverantwortung und Ressourcenschonung

DGAW – Ihr Kompetenz-Netzwerk

- Experten der Kreislauf- und Ressourcenwirtschaft
- Arbeitskreise zu aktuellen Schwerpunktthemen
- Austausch zwischen den Akteuren
- Positionspapiere, Stellungnahmen, Pressemitteilungen
- Partner der Weltleitmesse IFAT
- Fachveranstaltungen und Expertengespräche
- Wissenschaftskongress „Abfall- und Ressourcenwirtschaft“
- Kooperation mit allen wichtigen Verbänden und Initiativen

www.dgaw.de

Über uns

In der Branche gilt die **DGAW** seit langem als unabhängiger Ansprechpartner für Industrie und Politik. Unsere Stärke liegt in der sachlichen konsensualen Meinungsbildung. Wir streiten nicht für Einzelinteressen, sondern wirken verantwortungsbewusst für die Zukunft unserer Branche.

Die **DGAW** bietet Ihnen eine Plattform für eine interdisziplinäre Zusammenarbeit mit offenem Erfahrungsaustausch an.

Unsere über 450 Mitglieder sind Entscheidungsträger aus allen Bereichen der Abfall- und Ressourcenwirtschaft, aus Industrie und Gewerbe, Anlagen- und Maschinenbau, Ingenieurwesen, Wissenschaft, öffentlicher Verwaltung, Politik und Anwaltschaft.

Wir bieten branchenverbandsunabhängige, sachorientierte Informationen, Diskussionen und Stellungnahmen, die oft weit über die Beschäftigung mit reinen Abfall- und Recyclingfragen hinausgehen.

Unsere Mission ...

Wir verstehen uns als größte Experten-NGO der Kreislaufwirtschaft.

Wir schaffen Verbindungen und sind unabhängiger und kompetenter Partner für Produzenten, Entsorger, Politik, Wissenschaft und Gesellschaft.

Wir sind Vordenker und Impulsgeber für die zukünftige Circular Economy.

Wir werden als „Stimme der Vernunft“ wahrgenommen.

Markt, Produktverantwortung, aktuelle Gesetzgebung und Recycling sind unsere zentralen Themen.

Wir sehen die Produkte von heute als Ressourcen für morgen.

Wir regen zum Meinungsaustausch unterschiedlicher Sachthemen an, um eigene Positionen zu reflektieren.

Wir unterstützen den nationalen und internationalen Wissenstransfer.

**T 030.84 59 14 77
info@dgaw.de**

**Nieritzweg 23
14165 Berlin**

ENVERO GmbH

Das Unternehmen ist eine Ausgründung der Universität Rostock und hat im Sommer 2008 die Arbeit aufgenommen. Die ENVERO GmbH, mit Sitz in Rostock, agiert als unabhängiges und international tätiges Ingenieurbüro an der Schnittstelle zwischen Wissenschaft und Wirtschaft. Das Beraterteam der ENVERO GmbH weist langjährige Erfahrungen im internationalen Wissens- und Technologietransfer aus. Hauptakteure und Gesellschafter der ENVERO GmbH sind Prof. Dr. Michael Nelles, Dr. Gert Morscheck und PD Dr. Abdallah Nassour vom Lehrstuhl für Abfall- und Stoffstromwirtschaft (ASW) der Universität Rostock.

Den Schwerpunkt der ENVERO GmbH im internationalen Wissens- und Technologietransfer bilden die zahlreichen umwelt- und energietechnische Projekte mit deutschen und internationalen Partnern, bei denen das Ziel verfolgt wird, funktionierende Strukturen in den jeweiligen Ländern (z.B. Arabischer Raum und China) zu etablieren und in enger Kooperation mit dem Lehrstuhl ASW der Universität Rostock wissenschaftlich zu begleiten.

Das Leistungsspektrum der ENVERO GmbH umfasst:

- Beratung für Unternehmen bei der Markterschließung und -einführung
- Unterstützung bei Projektanbahnung und -implementierung
- Planung und Optimierung von abfall-, abwasser- und energietechnischen Anlagen
- Wissenschaftliche Begleitung von Projekten (Forschung, Entwicklung und Gutachtentätigkeit)
- Entwicklung angepasster Lösungen (Produkte und Verfahren) an die lokalen Gegebenheiten
- Aufbau und Pflege von internationalen Netzwerken
- Unterstützung bei der Konzeption und Einführung von Gesetzen und Verordnungen
- Beratung bei der Finanzierung von Umweltvorhaben
- Organisation und Durchführung von Aus- und Weiterbildungsprogrammen

PD Dr.-Ing. habil. Abdallah Nassour
Geschäftsführer
Envero GmbH
Zur Mooskuhle 3
18059 Rostock

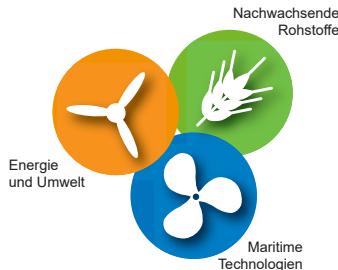
Fon +49 381 403 38 95
Fax +49 381 403 37 97
www.envero.eu
info@envero.eu

Deutsche Bank Rostock
BLZ 130 700 24
KTO 114 243 900
StNr. 079 108 060 097
Amtsgericht Rostock
HRB 10913

BIC (SWIFT)
DEUT DE DBROS
IBAN DE93
1307 0024 0114 243900

INNOVATIONS- UND BILDUNGSZENTRUM Hohen Luckow e.V.

Kompetenzzentrum Energie - Umwelt - Wirtschaft



Unsere Leistungen

- Forschung, Beratung und Dienstleistungen auf den Gebieten Energie, Umwelt und Wirtschaft
- Versuchslabore: Nachwachsende Rohstoffe und Energie
- Informations- und Weiterbildungsangebote
- Partnerschaft mit IBZ-Mitgliedsfirmen auf den genannten Kompetenzfeldern



Innovations- und Bildungszentrum
Hohen Luckow e.V.



www.ibz-hl.de

Kurzvorstellung IBZ Hohen Luckow e.V.

Das Innovations- und Bildungszentrum Hohen Luckow e.V. wurde 1992 gegründet. Das Ziel ist die Förderung von Wissenschaft, Innovation und Information auf dem **Gebiet Energie – Umwelt**. Die Arbeit konzentriert sich auf die Hauptgeschäftsfelder: Maritime Technologien, Nachwachsende Rohstoffe/ regenerative Energien und Nachhaltige Entwicklung. Das IBZ Hohen Luckow e.V. bündelt die Kompetenzen und Erfahrungen seiner Mitgliedsfirmen auf diesem Gebiet. Diese werden durch die Partner oder das IBZ Hohen Luckow e.V. in Forschungs- und Dienstleistungen, Produkten und Weiterbildungen angeboten. Folgende fachlichen Schwerpunkte des IBZ Hohen Luckow in Kooperation mit seinen Mitgliedsfirmen und Kooperationspartnern sind beispielhaft zu nennen:

- Technische Diagnostik und effektiver Betrieb von Energieanlagen (z.B. für Schiffsantriebe, Windenergie- und Biogasanlagenanlagen)
- Optimale Prozessführung und umweltgerechter Betrieb von technischen Anlagen
- Nutzung erneuerbarer Energien für regionale Inseln
- Energetische und stoffliche Nutzung nachwachsender Rohstoffe
- Weiterbildung auf dem Gebiet Energie und Umwelt

Kontakt:

Innovations- und Bildungszentrum Hohen Luckow e.V.
Bützower Str. 1a
18239 Hohen Luckow

Tel.: +(49) 38295 74 101
Fax: +(49) 38295 74 143

www.ibz-hl.de
ibz@ibz-hl.de

Das **Niedersachsen Netzwerk Nachwachsende Rohstoffe und Bioökonomie e. V.** unterstützt die Umsetzung biobasierter Produkte und innovativer Prozessketten im Sinne der Ressourceneffizienz, des Umwelt- und Klimaschutzes und einer nachhaltigen Landwirtschaft.

Wir setzen und ein für

Nachhaltigkeit

- Wertschöpfungskette vom Rohstoff zum Produkt
- neue Rohstoffpflanzen / Palludikulturen
- Ressourceneffizienz

Klimaschutz

- Bau- und Dämmstoffe aus nachwachsenden Rohstoffen / stoffliche Holznutzung
- dezentrale Energieversorgung / effiziente Wärme- und Stromnutzung
- Bioenergiesysteme

Innovation

- neue Materialien / Verbundwerkstoffe / Bionik
- Innovative Verfahren / Bioraffination / Kaskadennutzung
- Biopolymere / 3D Druck

Kommunikation

- Information / Beratung / Wissenstransfer
- Messen, Veranstaltungen, Aktionen/Exkursionen
- Landesmarketingfonds Holz

Weiter Informationen, Projekte und Referenzen finden Sie unter www.3-n.info.

Gründer des 3N e. V. sind das Land Niedersachsen, die Landwirtschaftskammer Niedersachsen, die HAWK Hochschule Hildesheim/Holzminden/Göttingen, die Niedersächsischen Landesforsten, der Landkreis Emsland sowie die Stadt und Samtgemeinde Werlte. Darüber hinaus gehören dem 3N e. V. aktuell 33 niedersächsische Unternehmen, Kommunen und Initiativen an.

**3N-Kompetenzzentrum
Niedersachsen Netzwerk Nachwachsende Rohstoffe und Bioökonomie e.V.**

Geschäftsstelle, Kompaniestr. 1, 49757 Werlte

① +49 (0)5951.9893-0 | ☎ +49 (0)5951.9893-11
✉ info@3-n.info | ⚡ www.3-n.info

Büro Göttingen, Rudolf-Diesel-Str. 12, 37075 Göttingen

① +49 (0)551.30738-17 | ☎ +49 (0)551.3 0738-21
✉ goettingen@3-n.info | ⚡ www.3-n.info

Büro im Landkreis Heidekreis

Walsroder Straße 9
29683 Bad Fallingbostel
① +49 (0)5162.8850-474 | ☎ +49 (0)5162.9856 297
✉ heidekreis@3-n.info | ⚡ www.3-n.info



DIE DIENSTLEISTER FÜR HÖCHSTLEISTER

BERATUNG UND ANALYTIK RUND UMS BIOGAS



WER WEITER DENKT,
WIRD WEITER KOMMEN.



WIR SAGEN WAS DRIN
IST, DAMIT SIE WISSEN,
WO SIE DRAN SIND.

UNTERNEHMENSBERATUNG

Die LMS Agrarberatung begleitet Sie von der Analyse über die Planung und Durchführung bis zur Kontrolle Ihrer Biogasproduktion.

Die Betriebszweigauswertung (BZA) Biogas informiert über den Einzelbetrieb und bietet diverse Vergleiche zwischen den Unternehmen – damit Sie wissen, wo Sie stehen und wo Sie hin müssen. Neben Kostenoptimierung und Potenzialausnutzung können so auch Aussagen zu Rentabilität und Risikoeinschätzung getroffen werden.

ANALYTIK

Die LUFA Rostock unterstützt Sie, damit Sie eine effiziente, stabile Biogasproduktion erreichen. Die Untersuchungen reichen von der Ernte und Silierung über Input und Fermenter bis hin zu Gärrest und Boden. Bestellen Sie Ihr maßgeschneidertes Analysepaket, beispielsweise für die Prozesskontrolle, bei der LUFA.

LMS Agrarberatung GmbH/LUFA Rostock · Graf-Lippe-Str. 1 · 18059 Rostock

Telefon: +49 381 877133-0 · Fax: +49 381 877133-70 · E-Mail: gf@lms-beratung.de

LUFA - Telefon: +49 381 20307-0 · Fax: +49 381 20307-90 · E-Mail: lufa@lms-beratung.de



ENTWICKLUNG DES ENERGIEVERBUNDES

Der Energieverbund Landwirtschaft MV wurde am 06.12.2012, mit 11 Gründungsmitgliedsbetrieben und einer Leistungsgröße von 5,3 MW, als Erzeugergemeinschaft von Biogasanlagenbetreibern und Landwirten in Rostock gegründet. In der Zeit von 2012 - 2019 ist die Zahl auf nunmehr 50 Mitgliedsbetrieben mit 26,38 MW im Verbund angewachsen, eine stattliche Leistung an Biogasanlagen aus MV!



ZIELE DES ENERGIEVERBUNDES

- gewonnene Energie gemeinsam vermarkten
- Einkauf/ Bündelung von elektrischer/ thermischer Energie
- Verbesserung der Energieerzeugung (Wirkungsgrad)
- Erschließung weiterer Energiemärkte
- Vermittlung Bezug Betriebsmittel und Technik
- Beratung in allen Erzeugungs- und Vermarktungsfragen
- Netzwerkbildung (persönlicher Austausch, „gemeinsam sind wir stark“)
- Förderung des Erfahrungsaustausches
(z. B. Durchführung Energiestammtische)

Kontakt:

Antje Zibell, Mobil: 0162 1388015 · E-Mail: azibell@lms-beratung.de
LMS Agrarberatung GmbH · Graf-Lippe-Str. 1 · 18059 Rostock
Telefon: +49 381 877133-0 · Fax: +49 381 877133-70 · E-Mail: gf@lms-beratung.de

Ideen säen, Erfolg ernten!

Ideen säen ...

Der Deutsche Bauernverband e.V. (DBV) und der Bundesverband Deutscher Pflanzenzüchter e.V. (BDP) haben im Jahr 1990 die Union zur Förderung von Oel- und Proteinpflanzen e.V., kurz UFOP, gegründet. In einer bis heute einmaligen Verbandsstruktur vertritt die UFOP die politischen Interessen der an der Produktion, Verarbeitung und Vermarktung heimischer Öl- und Proteinpflanzen beteiligten Unternehmen, Verbände und Institutionen in nationalen und internationalen Gremien. Alle Beteiligten haben die Chance dieser neuen Form der vertrauensvollen Zusammenarbeit in einer interprofessionellen Organisation erkannt. Seit ihrer Gründung hat die UFOP zahlreiche Ideen zur Optimierung der landwirtschaftlichen Produktion sowie zur Entwicklung neuer Verwertungsmöglichkeiten in den Bereichen Nahrungsmittel, Energie/Industrie sowie Futtermittel entwickelt und überaus erfolgreich realisiert.

Erfolg ernten!

Wie kaum eine andere landwirtschaftliche Organisation hat es die UFOP geschafft, Züchtung, Anbau, Markt und auch Agrarpolitik zu einem gemeinsamen von der gesamten Agrarwirtschaft getragenen Konzept zusammenzuführen.

Die Ergebnisse der UFOP-Aktivitäten sind beachtlich. So ist es gelungen, Biodiesel zum Vorzeigeprodukt unter den nachwachsenden Rohstoffen zu entwickeln. Das Wissen um die hohe ernährungsphysiologische Qualität von Rapsspeiseöl konnte umfassend etabliert werden. Futtermittel auf Basis heimischer Öl- und Proteinpflanzen haben in der UFOP einen anerkannten Protagonisten gefunden und leisten einen wichtigen Beitrag zur Versorgung mit heimischem Eiweiß. Die landwirtschaftliche Praxis profitiert von zahlreichen praxisrelevanten Informationen und Sortenprüfungsergebnissen.

Aufgaben ...

Die Arbeit der UFOP gliedert sich in vier wesentliche Aufgabenfelder:

- ✓ Politische Interessenvertretung in nationalen und internationalen Gremien
- ✓ Optimierung der landwirtschaftlichen Produktion durch Forschungsförderung und Unterstützung des Sortenprüfweises
- ✓ Förderung von Projekten zur Entwicklung von Verwertungsmöglichkeiten in den Bereichen Tierernährung, Humanernährung sowie zur stofflichen und energetischen Nutzung
- ✓ Öffentlichkeitsarbeit zur Förderung des Absatzes sämtlicher Endprodukte heimischer Öl- und Proteinpflanzen

Strukturen ...



Finanzierung ...

Die Aktivitäten der UFOP werden überwiegend durch Leistungen der Erzeuger und Züchter von Raps, Sonnenblumen und Proteinpflanzen sowie durch Mitgliedsbeiträge finanziert. Dieses Finanzierungskonzept sichert der UFOP Selbstständigkeit und Unabhängigkeit. Durch die solidarisch getragene Finanzierung wird es der UFOP auch in Zukunft möglich sein, Ideen zu säen, um weitere Erfolge zu ernten.



UFOP Union zur Förderung von Öl- und Proteinpflanzen e.V.

Claire-Waldhoff-Straße 7, 10117 Berlin

Tel. (030) 31 90 4 -202 Fax. (030) 31 90 4 - 485 E-Mail: info@ufop.de

www.ufop.de

14. ROSTOCKER BIOENERGIEFORUM

DIE VERANSTALTER

Wer sind wir

Kurzbeschreibung

Der sorgfältige Umgang mit unseren natürlichen Ressourcen und deren Schonung gewinnt immer stärker an Bedeutung. Vor dem Hintergrund steigender Energiekosten und hoher Abfallmengen beschäftigt sich die Forschergruppe des Lehrstuhls für Abfall- und Stoffstromwirtschaft (ASW) vorrangig mit Fragen zur Optimierung der stofflichen und energetischen Verwertung von Bio- und Sekundärrohstoffen. Mit der Realisierung von energieeffizienten Stoffkreisläufen über die gesamte Wertschöpfungskette wird ein wesentlicher Beitrag zur Ressourcenschonung – und somit zum Umweltschutz – geleistet.

Team

Für die laufenden Arbeiten steht ein interdisziplinäres Team, bestehend aus Ingenieuren, Agrar- und Wirtschaftswissenschaftlern, Technikern, Doktoranden sowie studentischen MitarbeiterInnen, mit durchschnittlich 40 Personen zur Verfügung.



Wie arbeiten wir

Veranstaltungen

Der Wissenstransfer und die effiziente Übertragung von Forschungsergebnissen in die Praxis durch regelmäßige regionale und internationale Fachveranstaltungen sowie Weiterbildungsangebote zählen zu den Eckpfeilern unserer Arbeit. Zu den eigenen nationalen und internationalen Veranstaltungen gehören u.a.:

- Dialog Abfallwirtschaft M-V
- Rostocker Bioenergieforum
- Internationale Umweltkonferenz in Hefei (China)
- Aus- und Weiterbildungsmöglichkeiten für Fach- und Führungskräfte auf internationaler Ebene, z.B. arabischer und asiatischer Raum und Südamerika

Ausstattung

Mit dem Technikum für Abfallwirtschaft und Bioenergie in Rostock stehen dem Lehrstuhl 600 m² Hallen- und Laborflächen sowie eine umfangreiche geräte- und labortechnische Ausstattung zur Verfügung.

Das Hauptarbeitsfeld im Bereich Forschung und Entwicklung bilden derzeit über 150 diskontinuierliche und kontinuierliche Biogasreaktoren. Darüber hinaus werden weitere Pilot- und Praxianlagen für Projektpartner an den jeweiligen Standorten im In- und Ausland betrieben und wissenschaftlich begleitet.

Professur für Abfall- und Stoffstromwirtschaft

Was machen wir

Forschung

Die Schwerpunkte in der angewandten Forschung & Entwicklung bilden praxisorientierte Projekte in den Bereichen:

- Abfallwirtschaft/Abfalltechnik
- Stoffliche und energetische Verwertung von Biomasse
- Internationaler Wissens- und Technologietransfer

Forschungsschwerpunkte

- Erzeugung und Verwertung von Biogas
- Aufbereitung und energetische Verwertung von Sekundärbrennstoffen
- Mechanisch-biologische Abfallbehandlung (MBA)
- Deponietechnik und -betrieb
- Aufbereitung und Verwertung fester Bioenergieräger
- Einsatz, Verwertung und Entsorgung von Biopolymeren
- Umwelttechnologietransfer, Schwerpunkt Schwellen- und Entwicklungsländer

Unser Angebot

Leistungen

- Lehrveranstaltungen in den Bereichen Abfallwirtschaft/Abfalltechnik und Bioenergie
- Konzeption, Durchführung und wissenschaftliche Begleitung praxisorientierter Pilotprojekte
- Erstellung von Studien und Gutachten zu technischen, wirtschaftlichen und juristischen Fragen der abfallwirtschaftlichen Praxis
- Organisation und Durchführung von Workshops, Seminaren und Tagungen zu aktuellen Themen in den Bereichen Abfallwirtschaft und Bioenergie
- Umweltschutzprojekte und -aktivitäten auf internationaler Ebene

Universität Rostock

Agrar- und Umweltwissenschaftliche Fakultät

Professur für Abfall- und Stoffstromwirtschaft

Prof. Dr. mont. Michael Nelles

Justus-von-Liebig-Weg 6

D 18059 Rostock

Fon + 49 (0)381 498-3401 Fax + 49 (0)381 498-3402

www.auf-aw.uni-rostock.de

Smart Bioenergy – Innovationen für eine nachhaltige Zukunft

Das Deutsche Biomasseforschungszentrum (DBFZ) wurde 2008 durch das ehemalige Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz (BMELV) mit dem Ziel gegründet, eine zentrale Forschungseinrichtung für alle relevanten Forschungsfelder der Bioenergie einzurichten und die Ergebnisse der sehr vielschichtigen deutschen Forschungslandschaft in diesem Sektor zu vernetzen.

Die Mission des DBFZ ist es, im Rahmen angewandter Spitzenforschung sowohl technische Lösungen wie vielfältige Konzepte zur wirtschaftlich tragfähigen, ökologisch unbedenklichen und sozial verträglichen energetischen Nutzung von Biomasse zu entwickeln. Darüber hinaus werden die potenziellen Konfliktfelder zwischen den verschiedenen Zielen, die mit dem Ausbau der Bioenergie verfolgt werden, von den wissenschaftlichen Mitarbeitern des DBFZ umfassend analysiert und Gestaltungsansätze vorausschauend entwickelt. Mit der Arbeit des Deutschen Biomasseforschungszentrums soll das Wissen über die Möglichkeiten und Grenzen einer energetischen und integrierten stofflichen Nutzung nachwachsender Rohstoffe in einer biobasierten Wirtschaft insgesamt erweitert und die herausragende Stellung des Industriestandortes Deutschland in diesem Sektor dauerhaft abgesichert werden.

Wichtige Forschungsthemen der energetischen Biomassenutzung sowie der integrierten stofflichen Nutzung werden am DBFZ in fünf Forschungsschwerpunkten bearbeitet. Sie sorgen dafür, dass wesentliche Fragen und Aspekte der Bioenergie in der für die exzellente Forschung notwendigen Tiefe abgebildet werden können. Die Schwerpunkte orientieren sich an den zukünftigen Entwicklungen sowie den forschungspolitischen Herausforderungen und Rahmenbedingungen der Bundesregierung wie der nationalen Forschungsstrategie Bioökonomie 2030, der nationalen Politikstrategie Bioökonomie, der Mobilitäts- und Kraftstoffstrategie der Bundesregierung oder der Roadmap Bioraffinerien. Wichtige Eckpunkte für die wissenschaftliche Ausrichtung der Forschungsschwerpunkte sind außerdem die förderpolitischen Rahmenbedingungen, die Alleinstellungsmerkmale in der Forschungslandschaft sowie die gute infrastrukturelle Ausstattung des DBFZ.

Die Forschungsschwerpunkte des DBFZ

- Systembeitrag von Biomasse
Ansprechpartnerin: Prof. Dr.-Ing. Daniela Thrän
- Anaerobe Verfahren
Ansprechpartner: Dr. agr. Peter Kornatz
- Biobasierte Produkte und Kraftstoffe
Ansprechpartnerin: Dr.-Ing. Franziska Müller-Langer
- Intelligente Biomasseheiztechnologien (SmartBiomassHeat)
Ansprechpartner: Dr.-Ing. Volker Lenz
- Katalytische Emissionsminderung
Ansprechpartner: Dr. rer.nat. Ingo Hartmann



Kontakt

DBFZ Deutsches Biomasseforschungszentrum gemeinnützige GmbH

Torgauer Str. 116 | 04347 Leipzig

① +49 (0)341 2434-112 | ☎ +49 (0)341 2434-133

✉ info@dbfz.de | ⌂ www.dbfz.de



Landesforschungsanstalt für Landwirtschaft und Fischerei Mecklenburg-Vorpommern

Die Landesforschungsanstalt für Landwirtschaft und Fischerei Mecklenburg-Vorpommern (LFA) ist eine Einrichtung der anwendungsorientierten Agrarforschung. Als kompetenter Dialog- und Ansprechpartner für Fragen aus Landwirtschaft, Gartenbau und Fischerei leisten wir unseren Beitrag zur wirtschaftlichen, wettbewerbsfähigen und umweltverträglichen Gestaltung des Agrarstandortes Mecklenburg-Vorpommern.

Zur Lösung der Aufgaben sind wir eng vernetzt mit Politik, Praxis und Beratung. Wir arbeiten an traditionsreichen Forschungsstandorten in vier Instituten:

- Institut für Pflanzenproduktion und Betriebswirtschaft (Gültzow)
- Institut für Tierproduktion (Dummerstorf)
- Institut für Fischerei (Rostock, Born, Hohen Wangelin)
- Gartenbaukompetenzzentrum (Gültzow)

Die LFA ist eine nachgeordnete Einrichtung des Ministeriums für Landwirtschaft und Umwelt MV. Wir forschen praxisnah. Das bedeutet vor allem, herkömmliche und neue innovative Produktionsverfahren hinsichtlich ihrer Nachhaltigkeit zu bewerten, kostengünstige und umweltschonende Bewirtschaftungssysteme zu erarbeiten, unterschiedliche Bewirtschaftungsformen zu demonstrieren und gegebenenfalls den jeweiligen landesspezifischen Bedingungen anzupassen. Die Stärkung des ländlichen Raumes durch eine standort- und umweltgerechte Produktion ist dabei Hauptkriterium.

Die Herausforderungen und Rahmenbedingungen der Landwirtschaft und Fischerei unterliegen einem ständigen Wandel. Sowohl die landwirtschaftliche Praxis als auch die Gesellschaft erwarten Antworten auf die entsprechenden Zukunftsfragen. Der praxisorientierten Forschung kommt hierbei eine Schlüsselrolle zu. Aktuell relevante Themen werden an der LFA gemeinsam mit nationalen und internationalen Partnern und Betrieben des Landes im Rahmen von haushalts- und drittmittelfinanzierten Projekten bearbeitet. Zur Effizienzsteigerung erfolgt zwischen den Bundesländern eine länderübergreifende Zusammenarbeit in Form von Mehrländerprojekten sowie arbeitsteiliger Kooperationen.

Folgende Schwerpunkte werden an der LFA bearbeitet:

- Acker- und Pflanzenbau
- Nachwachsende Rohstoffe
- Ökologischer Landbau
- Sortenwesen
- Grünlandbewirtschaftung
- Milch- und Fleischproduktion
- Aquakultur
- Fischereimanagement der Binnen- und Küstengewässer
- Freilandgemüsebau
- Obst- und Sonderkulturen
- Agrarökonomie

Kontakt

Landesforschungsanstalt für Landwirtschaft und Fischerei
Mecklenburg-Vorpommern (LFA)
Dorfplatz 1/OT Gültzow – 18276 Gültzow-Prüzen
① +49 (0)3843.789-0 | ☎ poststelle@lfa.mvnet.de

19. DIALOG

Abfallwirtschaft MV

19. DIALOG ABFALLWIRTSCHAFT MV

Aktuelle Entwicklungen in der Abfall- und Ressourcenwirtschaft

Schirmherr: Dr. Till Backhaus

Minister für Landwirtschaft und Umwelt Mecklenburg-Vorpommern

Veranstalter



Traditio et Innovatio



Ministerium für
Landwirtschaft und Umwelt



Mikroplastik in aquatischen Systemen: gegenwärtige und (potentielle) zukünftige Belastungen

Zusammenfassung: Mikroplastik (MP) wurde in den letzten sieben Jahren intensiv am IOW erforscht. Dabei steht die Ostsee und, exemplarisch für alle Zuflüsse, die Warnow bei Rostock im Fokus der Untersuchungen. Mikroplastik ist ubiquitär, es wurde in allen untersuchten Habitaten und Matrices in unterschiedlicher Anzahl gefunden. Die Untersuchung der mikrobielle Zusammensetzung auf MP und das mikrobielle Abbaupotential ergaben, dass die Wechselwirkungen zwischen MP und Mikroorganismen sehr gering anzusehen sind und ein mikrobieller Abbau im marinen Milieu nicht stattfindet. Auch zukünftig sind keine evolutionären Entwicklungen hin zu MP Abbau zu erwarten. Daher kann das Problem des MP in der marinen Umwelt langfristig nur über die Kontrolle des Eintrags von Makroplastik angegangen werden.

Einleitung

MP (Plastik Partikel < 5mm) und seine Auswirkungen auf die Umwelt bewegt die breite Öffentlichkeit wie kaum ein anderes Thema – vor dem Corona Virus Covid-19. Der Umgang mit Plastik im Alltag wird insgesamt auch verstärkt hinterfragt, Plastik selbst z.T. in Frage gestellt. Gleichzeitig ist die wissenschaftliche Datenlage zu MP in der Umwelt gering, und die eindeutige Identifikation von Quellen und Eintragspfaden schwierig. Obwohl es inzwischen viele Studien mit Ergebnissen zu einzelnen Probennahmen gibt, fehlt ein allumfassender Ansatz. Bisherige Methoden sind (zeit-)aufwändig, sodass nur eine begrenzte Anzahl Proben in einem annehmbaren Zeitrahmen analysierbar ist.

Unser Ziel ist es, die MP Belastung und Verbreitung für die gesamte Ostsee einschätzen zu können. Erste wertvolle Erfahrungen im Umgang mit MP wurden in der Arbeitsgruppe ‚Umweltmikrobiologie‘ über das von der Leibniz-Gemeinschaft geförderte, und bereits abgeschlossene, Projekt MikrOMIK gewonnen. Der Schwerpunkt lag auf der Untersuchung von MP als Vektor für mikrobielle Populationen im Ökosystem der Ostsee. In dem derzeit laufenden Folgeprojekt MicroCatch_Balt werden exemplarisch für die deutschen Ostseezuflüsse im Einzugsgebiet der Warnow Quellen und Senken von MP, sowie relevante Verbreitungsprozesse auf dessen Weg zur offenen Ostsee ermittelt. In einem weiteren Projekt, PLASTRAT, steht der MP Austrag aus Kläranlagen im Fokus. Beide Projekte werden durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) gefördert und sind mit 19 weiteren Projekten Teil des FONA Forschungsschwerpunkts ‚Plastik in der Umwelt‘. Im Mittelpunkt des derzeit laufenden EU-Projekts BONUS MICROPOLL stehen die Auswirkungen welches MP für die gesamte Ostsee haben kann, z. B. die Anlagerung oder das Austreten von Schadstoffen an/aus MP und das Gefährdungspotential von potentiell pathogenen Vibrionen auf MP. Im Weiteren wird die Abbaubarkeit von MP untersucht.

Ergebnisse

MP in der Unterwarnow

Die Ergebnisse einer Probennahmen Kampagne in der Unterwarnow zeigten, dass die am häufigsten vorkommenden Polymere Polyolefine (u.a. Polyethylen, Polypropylen) und Polyester sind. Diese werden EU-weit auch mit am häufigsten produziert (PlasticsEurope, The Facts 2019). Innerhalb der Proben, die in der Warnow und nicht in Nebenflüssen genommen wurden, nahm die Anzahl an MP Partikeln mit zunehmender Nähe zum Ästuar, und damit zum urbanen Zentrum Rostock, zu. Die Ergebnisse zeigen zudem, dass sich bei Mehrfachmessungen an einem Standort große Schwankungen ergeben können.

MP in der Oberwarnow

Im Warnow Ästuar wurden im Sediment an mehreren Standpunkten MP ($> 500\mu\text{m}$) quantifiziert (Enders et al. 2019). Hierbei wurden Korrelationen zwischen MP Größenfraktionen und der Sedimentkorngröße entdeckt, was eine zukünftige Identifizierung von MP-Senken im aquatischen Bereich erleichtern kann. Es konnten zudem potentielle Punktquellen identifiziert werden. So nahm die Anzahl an Farbpartikel mit zunehmender Nähe zu Häfen und Anlegestellen signifikant zu, genauso wie das gewöhnliche MP in der Nähe der Kläranlage des Ästuars signifikant zunahm.

MP in Ackerböden

Diffuser Eintrag aus landwirtschaftlichen Gebieten wurde als relevante Quelle für MP im Fluss diskutiert. In Zusammenarbeit mit der Landwirtschaftlichen Untersuchungs- und Forschungsanstalt (LUFA) in Speyer und dem Fraunhofer Institut für ländliche Räume in Braunschweig wurden Untersuchungen der MP Anzahl in Böden mit definiertem Klärschlammauftrag durchgeführt. Die Ergebnisse der ersten Messpunkte zeigen im Vergleich mit den Feldern mit Klärschlammdüngung eine relativ hohe Belastung der Kontrollfelder ohne Klärschlammaustrag.

Großes MP und Mesoplastik an Stränden der Oberwarnow

Verschiedene Methoden für ein Monitoring von größeren Plastikpartikeln (2-25 mm) wurden an Stränden des Warnow Ästuars durchgeführt. Je nach Methode wurden im Schnitt 5 und 31 Plastikpartikel pro m^2 Strand gefunden. Die Methoden zur Analyse von größerem Plastik sind im Vergleich zur Analyse von MP deutlich weniger (zeit-)aufwändig, weniger kostspielig und können teilweise durch den Einsatz von Freiwilligen durchgeführt werden. Sie haben das Potential Tendenzen hinsichtlich der Zu- oder Abnahme der Abfallverschmutzung an Stränden anzuzeigen. (Haseler et al. 2019).

Mikrobielle Wechselwirkungen mit MP

Der Abbau von Polyamid durch Mikroorganismen der Ostsee wurde genauer untersucht. Die Untersuchung erfolgte anhand der Messung des gelösten anorganischen Kohlenstoffs in einem geschlossenen System nach einer gewissen Inkubationszeit. Zwar wurde ein Anstieg des Kohlenstoffs gemessen, dieser war aber nicht auf den Abbau der eigentlichen Polymerstruktur zurückzuführen, son-

dern auf die monomeren und oligomeren Bestandteile, die meist noch zu einem gewissen Anteil im Plastik verbleiben. Für das Polymer konnte demnach kein mikrobieller Abbau nachgewiesen werden (Klaeger et al. 2019). In einer weiteren Überblicksstudie wurde die mikrobielle Wechselwirkung mit MP in marinen Ökosystemen anhand aktueller Literatur, neuen vergleichenden Analysen und Überlegungen zur mikrobiellen Anpassung analysiert. Es wurde geschlussfolgert, dass die Wechselwirkungen zwischen Mikroorganismen und MP Partikeln eher begrenzte Auswirkungen auf die Meeresökosysteme haben. Nach einer Analyse der Literatur zu mikrobiellen Abbauraten von Polymeren wird der mikrobielle Abbau für Zeitskalen, die wesentlich für die menschliche Gesellschaft sind, als nicht relevant eingeschätzt (Oberbeckmann und Labrenz 2020).

Schlussfolgerung

Unsere Ergebnisse zeigen, dass MP ubiquitär ist. Es ist in sämtlichen unserer untersuchten Matrices gefunden worden; auch Kontrollproben wie Ackerböden ohne Klärschlamm Exposition. Um dem eingetragenen MP Quellen zuweisen zu können und dann Maßnahmen zur Reduktion ergreifen zu können, müssten viel häufiger und engmaschiger Proben genommen und analysiert werden. Dies ist mit derzeitigen Methoden nicht möglich.

Das meiste von uns gefundene MP ist sekundäres MP. Makroplastik (>5mm) ist der Ursprung dieses sekundären MPs, da es im Laufe der Zeit und unter abiotischen Einflüssen wie UV, Wind und Wellen in eine schier unendliche Anzahl an MP fragmentiert (Barnes et al. 2009). Über Flüsse und die Atmosphäre wird es in die Meere und Ozeane eingetragen. Es muss von einer Anreicherung in der marinen Umwelt ausgegangen werden, da ein mikrobieller Abbau für menschlich relevante Zeiträume nicht zu erwarten ist. In der marinen Umwelt existiert eine Vielfalt deutlich leichter zu erschließender Kohlenstoffquellen, als die des Plastiks, sodass auch eine evolutionäre Entwicklung von Mikroorganismen mit MP abbauenden Eigenschaften nicht zu erwarten ist (Oberbeckmann und Labrenz 2020). Mikroorganismen werden also voraussichtlich das Problem des MP in der marinen Umwelt auch in der Zukunft nicht lösen. Da auch das Herausholen bereits eingetragenen MPs in die marine Umwelt technisch nicht möglich ist, ohne dem Ökosystem nachhaltig zu schaden, gilt es Maßnahmen zu ergreifen die schon bei Makroplastik ansetzen. Nur durch die Verminderung oder, wo möglich, Vermeidung des Eintrags weiteren Makroplastiks kann die Anreicherung von MP reduziert werden. Maßnahmen zur Reduktion der Nutzung von Plastikartikeln (besonders Einwegartikel im öffentlichen Raum) können beispielsweise dazu beitragen. Primäres Mikroplastik, welches bereits beim Eintrag in die Umwelt kleiner als 5 mm ist, lässt sich schwieriger vermindern, da es oft durch Abnutzung entsteht (z.B. Abriss) und zudem auf Grund seiner Größe schlechter zurückgehalten werden kann, wie beispielsweise in Filtern einer Kläranlagen. Hierbei sollte eine vierte Reinigungsstufe in Kläranlagen verpflichtend werden, welche einen weiteren Eintrag in Gewässer nahezu verhindert.

Literatur/Quellen

- Barnes, D. K., F. Galgani, R. C. Thompson and M. Barlaz (2009). "Accumulation and fragmentation of plastic debris in global environments." *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences* 364(1526): 1985-1998
- Enders, K., Käppler, A., Biniasch, O., Feldens, P., Stollberg, N., Lange, X., Fischer, D., Eichhorn, K.-J., Pollehne, F., Oberbeckmann, S., and Matthias Labrenz (2019). Tracing microplastics in aquatic environments based on sediment analogies. *Scientific Reports - Nature* 9: 15207
- Haseler, M., Weder, C., Buschbeck, L., Wesnigk, S., Schernewski, G. (2019). Cost-effective monitoring of large micro- and meso-litter in tidal and flood accumulation zones at south-western Baltic Sea beaches. *Marine Pollution Bulletin* 149: 110544
- Klaeger, F., Tagg, A.S., Otto, S., Bienmüller, M., Sartorius, I., Labrenz, M. (2019). Residual monomer content affects the interpretation of plastic degradation. *Scientific Reports - Nature* 9: 2120
- Oberbeckmann, S., Labrenz, M. (2020). Marine microbial assemblages on microplastics: diversity, adaptation, and role in degradation. *Annu Rev Mar Sci*, 12:209-232
- PlasticsEurope - The Facts 2019 An analysis of European plastics production, demand and waste data (2019). Market Research Group (PEMRG) and Conversio Market & Strategy GmbH

Danksagung

Dank an Franziska Klaeger für die, wie stets exzellente, Unterstützung in der Erstellung dieses Textes. Diese Arbeit resultierte aus dem von der Leibniz-Gemeinschaft finanzierten Projekt MikrOMIK (SAW-2014-IOW-2), dem BMBF Projekt MicroCatch_Balt (03F0788A), und dem von BONUS geförderten Projekt BONUS MICROPOLL (Art 185), das gemeinsam von der EU und dem BMBF finanziert wird (03F0775A).

Kontakt

Prof. Dr. Matthias Labrenz

Leibniz-Institut für Ostseeforschung Warnemünde (IOW)

Seestraße 15, 18119 Rostock-Warnemünde

✉ matthias.labrenz@io-warnemuende.de

Konzept zur Klärschlammverwertung einschließlich Phosphor-Recycling in MV

Das hier vorgestellte Konzept wurde im Rahmen des BMBF-Projektes RePhor-MV (FKZ 02WPR1501) erarbeitet. Es ist damit Ergebnis des ganzen Projektteams und vieler externer Partner, die uns bei der Ausarbeitung mit Daten, Beratung und Abstimmungen sowie Zuarbeiten unterstützt haben. Die Autorenliste müsste deshalb recht lang sein. Stellvertretend möchte ich mich insbesondere bei den beteiligten Mitarbeitern der Professuren Wasserwirtschaft, Abfall-/Kreislaufwirtschaft und Pflanzenbau sowie des Ministeriums für Landwirtschaft und Umwelt, der KKMV GmbH, des ZWAR, der HTCycle GmbH und der Pontes Pabuli GmbH bedanken.

1 Ausgangslage

Mecklenburg-Vorpommern hat als dünn besiedeltes Flächenland eine relativ kleinteilige Form der Abwasserbehandlung. Insgesamt werden ca. 90 Mio. m³ Abwasser in ca. 600 Kläranlagen behandelt (Abb. 1). Davon sind mehr als 90% kleiner 10.000 Einwohnerwerte. Dabei fallen 30.000...32.000 t TS Klärschlamm pro Jahr an. Diese wurden im Jahr 2017 zu 63 % direkt landwirtschaftlich verwertet; zusammen mit weiteren Verwertungswegen wurden insgesamt über 70 % des Klärschlammstoffs stofflich verwertet (Abb. 2). Dies steht im deutlichen Gegensatz zur bundesweit dominierenden thermischen Klärschlammverwertung (ca. zwei Drittel der anfallenden Klärschlammmenge; Destatis).

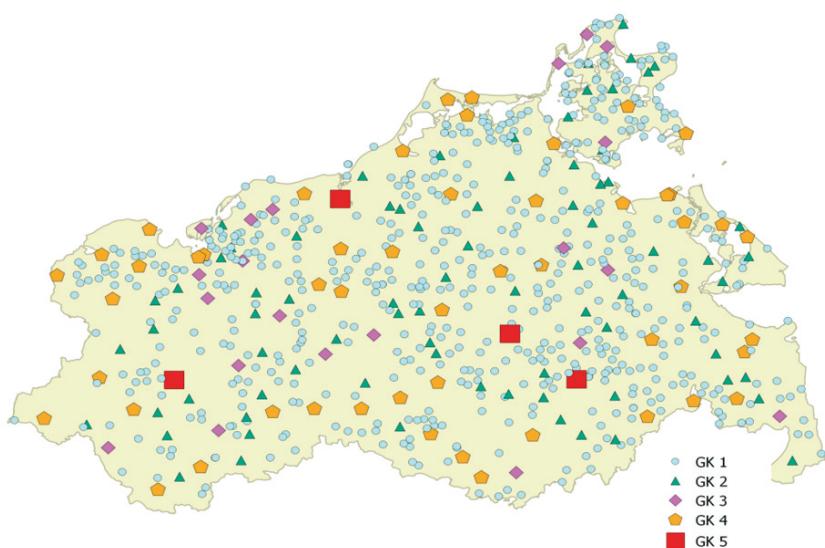


Abb. 1: Kläranlagen in Mecklenburg-Vorpommern (Datenquelle: StatA MV und LUNG)

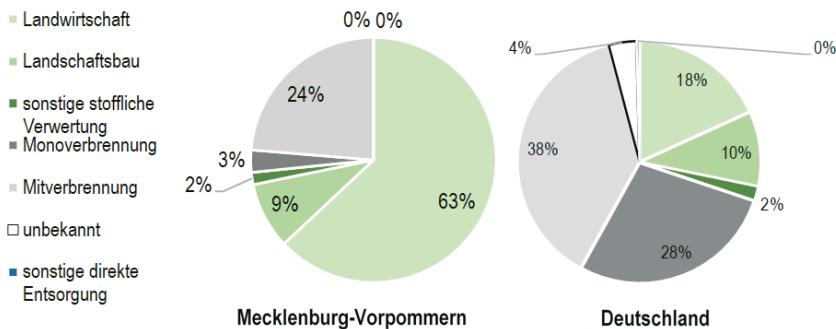


Abb. 2: Klärschlammverwertung im Jahr 2017 in MV (links) im Vergleich zum bundesdeutschen Durchschnitt (rechts), Datenquelle: www.destatis.de

Für die bisher dominierende landwirtschaftliche Verwertung des Klärschlammes sprechen zwei wesentliche Gründe:

- eine spezifisch überdurchschnittlich große landwirtschaftliche Nutzfläche
- Anfall regionaler Klärschlämme
- gute bis sehr gute Klärschlammqualität

Mit einer bis heute großstrukturierten Landwirtschaft bietet MV sehr gute Randbedingungen für ein regionales Phosphorrecycling. Die landwirtschaftlich genutzte Fläche beträgt rund 1,34 Mio. ha. Schwerpunkte liegen deutlich im Pflanzenbau und der Produktion von Getreide und Ölfrüchten, die über 75 % der Anbaufläche (MLUV, 2018) einnehmen. Darüber hinaus werden Mais, Kartoffeln, Zuckerrüben und Futterpflanzen angebaut. Die Tierproduktion mit nur 0,4 Großviecheinheiten je Hektar spielt eine untergeordnete Rolle. Entsprechend gering ist die P-Versorgung über regional verfügbare Wertstoffdünger. Das Bundesland MV verfügt über relativ leichte Böden, besitzt aber u.a. wegen des maritimen Klimas ein gutes Ertragsniveau (Nationalatlas, 2002),(UBA, 2018). Ca. 40 % der Böden in MV haben einen niedrigen bis sehr niedrigen P-Gehalt (Gehaltsklasse A und B) (LUNG, 2016). Trotz eines jährlichen Mineraldüngereinsatzes von 9.500-11.500 t/a (destatis, 2018) beträgt das mittlere jährliche Bilanzdefizit für Phosphor ca. 1,5 kg/(ha·a) (biota, 2013), bezogen auf die landwirtschaftliche Nutzfläche also ca. 2.000 t/a. Eine verstärkte Nutzung von Klarschlamm und Klärschlammprodukten (auch aus anderen Bundesländern) ist damit eine Möglichkeit, um die Differenz zwischen P-Entzug und P-Zufuhr zu verringern.

Basierend auf den behördlichen Überwachungsdaten (Datenquelle: LUNG) werden ca. 94 % des Phosphors in den kommunalen Kläranlagen eliminiert und damit in den Klärschlamm eingebunden. Insgesamt beträgt die damit verfügbare P-Fracht ca. 1.400 t/a. Aufgrund des geringen Industriewasseranteils und der dominierenden Trennkanalisation sind die Klärschlämme in MV im deutschlandweiten Vergleich (destatisDWA, 2015) relativ unbelastet und halten zumeist

die Qualitätsanforderungen der Düngemittel-Verordnung (DüMV, 2012) ein (Abb. 3). Erhöhte Werte treten z.T. bei den Parametern Zink, Kupfer und in Einzelfällen bei Quecksilber auf, die jedoch bis auf Kupfer unter dem für Deutschland typischen Mittelwert liegen.

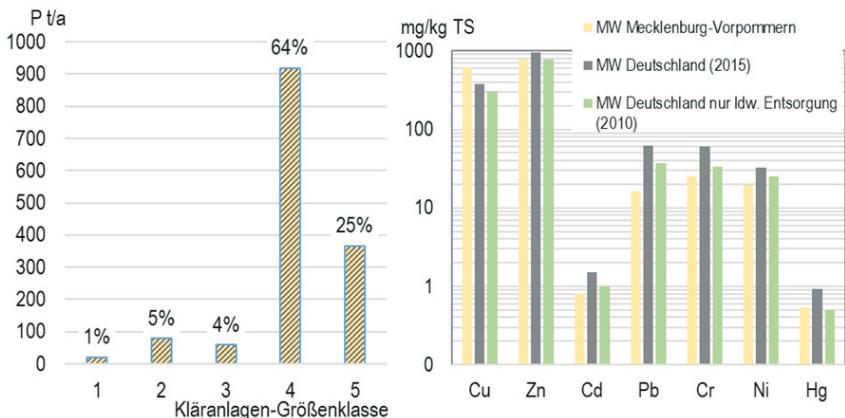


Abb. 3: links: Gebundene P-Frachten in Klärschlämmen nach Kläranlagengrößenklassen
rechts: Mittelwert der Schwermetallgehalte im Klärschlamm in MV und in Deutschland

Aufgrund der geänderten rechtlichen Rahmenbedingungen steht jedoch auch die Klärschlammensorgung in MV vor einem tiefgreifenden Umbruch.

Aktuell hat sich der bodenbezogene Verwertungsweg durch die Einführung einer konsequenten Stickstoffbilanzierung in der Düngeverordnung (DÜV, 2017) bereits deutlich eingeengt. Die Regelungen in der neuen Düngeverordnung, welche 2020 in Kraft treten, führen zu einer weiteren Beschränkung des Stickstoffeinsatzes in der Landwirtschaft. Diese für den Grundwasserschutz unstrittig notwendigen Beschränkungen führen jedoch zu einer verstärkten Konkurrenz um die Ausbringungsflächen. Damit verbunden sind erhebliche Preissteigerungen für die landwirtschaftliche Verwertung und z.T. das Wegbrechen von Abnahmeverträgen. Dies zeigt sich bereits beim Vergleich der Daten von 2017 und 2018. Im Jahr 2018 stieg die in MV verwertete Klärschlammmenge um ca. 50 % auf ca. 45.000 t TS an, vermutlich durch verstärkten Import aus anderen Bundesländern. Dieser Anstieg verteilt sich zu gleichen Teilen von je ca. 8.000 t TS auf die bodenbezogene und die thermische Verwertung. Insgesamt verschiebt sich damit aber die Verwertung bereits eindeutig in Richtung thermische Entsorgung, vorerst dominiert durch die Mitverbrennung in Kohlekraftwerken und der Zementindustrie. Mit dem vereinbarten Kohleausstieg schließt sich jedoch auch dieser Verwertungsweg.

Die zweite wesentliche rechtliche Rahmenbedingung ist die novellierte Klärschlammverordnung (AbklärV, 2017), welche die mittelfristig bodenbezogene

Verwertung von Klärschlämmen aus Kläranlagen größer 50.000 Einwohnerwerte unterbindet und gleichzeitig das Gebot zur Phosphor-Rückgewinnung aus nicht stofflich verwerteten Klärschlämmen enthält. Mittelfristig ist durch die Umsetzung der Klärschlammverordnung [3] für Kläranlagen > 50.000 EW der Aufbau neuer Entsorgungswege erforderlich. Dies betrifft formal ca. 18 Kläranlagen in MV, mit ca. 50 % der jährlichen P-Fracht im Klärschlamm. Aufgrund regional organisierter Abwasserentsorger mit verbandsübergreifenden Klärschlammensorgungskonzepten sind aber faktisch auch kleinere Anlagengrößen vom Verbot der landwirtschaftlichen Klärschlammverwertung betroffen.

2 Geplante künftige Klärschlammensorgung in MV

Die vorgenannten Entwicklungen waren zum Teil lange vor ihrer rechtlichen Umsetzung absehbar. Dementsprechend wurden bereits sowohl kommunale als auch privatwirtschaftliche Konzepte für eine thermische bzw. thermisch-stoffliche Klärschlammverwertung entwickelt und durch vertragliche Verpflichtungen, Investitionsentscheidungen sowie abgeschlossene und laufende Planungs- und Genehmigungsverfahren weitgehend fixiert. Daraus lässt sich die künftige Klärschlammensorgung in MV für alle Betreiber relativ belastbar angeben (Abb. 4).

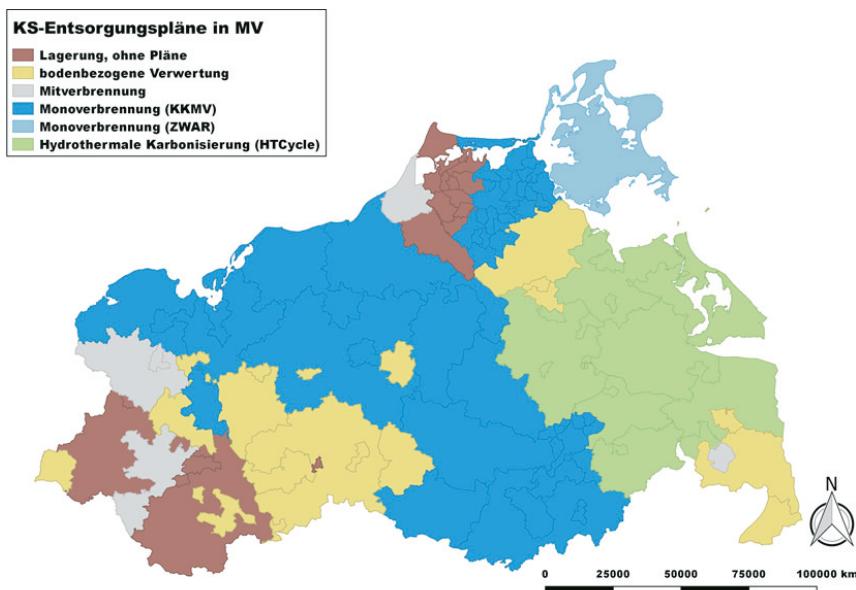


Abb. 4: Aktueller Planungsstand zur Klärschlammensorgung Mecklenburg-Vorpommern

Tab. 1: Klärschlamm- und Phosphormengen nach geplantem Verwertungsweg

Verwertungsweg	Akteure	Schlamm-menge (t TS/a)	Asche-menge (t TS/a)	P-Rückgewinnungspotential bei 3,5 % P im KS (t P/a)
Monoverbrennung	KKMV ZWAR EEW	20.500 2.300 25.000	17.000	1.670
Hydrothermale Karbo-nisierung	HTCycle	4.000		140
bodenbezogene Verw. Sonstige	Diverse	3.700		130
Summe (mit EEW*)		55.500		1.940

* Diese Klärschlammmenge stammt nicht (nur) aus MV, sondern soll auch aus anderen Bundesländern akquiriert werden.

Thermische Verwertung: Der größte Teil des Klärschlammes aus MV wird künftig thermisch verwertet werden. Dafür werden in MV neben der bestehenden Monoverbrennungsanlage in Bergen zwei weitere Anlagen entstehen. Größter Akteur ist hierbei die Klärschlamm-Kooperation Mecklenburg-Vorpommern GmbH (KKMV.), die mit 17 kommunalen abwasserbeseitigungspflichtigen Körperschaften eine der größten Solidargemeinschaften für die Behandlung der im Verbund anfallenden Klärschlämme in Deutschland ist. Ihre Mitglieder verfügen über eine Klärschlammme von rund 25.000 Tonnen (TS). Diese sollen künftig in einer gemeinsamen Monoverbrennungsanlage am Standort der Kläranlage Rostock thermisch verwertet werden. Das Anlagenkonzept kombiniert eine konventionelle Wirbelschichtverbrennung mit Rauchgasreinigung und Einspeisung von Wärme in ein Fernwärmennetz. Zur Reduzierung der Transportaufwendungen bei Klärschlamm lieferung sind an verschiedenen Standorten dezentrale Trocknungsanlagen vorgesehen.

Eine kleinere Wirbelschichtverbrennung für Klärschlamm arbeitet bereits in Bergen auf Rügen. Hier werden aus ca. 2.300 t TS Klärschlamm 800 t/a Klärschlammmasche produziert, die gegenwärtig deponiert werden. Zusätzlich erweitert die Firma EEW am Standort Stavenhagen eine bestehende Abfallverbrennungsanlage um eine Monoverbrennungsanlage für Klärschlamm mit einer Verbrennungskapazität von 32.000 t TS/a. EEW zielt vor allem auf die Akquise von Klärschlämmen aus dem Norden Brandenburgs ab, in Summe ebenfalls 25.000 t TS/a. Weitere Planungen von Verbrennungsanlagen, sind noch unsicher und vorerst nicht berücksichtigt.

Hydrothermale Karbonisierung: Parallel bemüht sich die Firma HTCycle im Bereich Vorpommern um die Entsorgung von ca. 4.000 t TS Klärschlamm pro Jahr. Der Klärschlamm wird hier bei bis zu 220 °C und 24 bar erhitzt, Die dabei entstehende HTC-Kohle soll (ggf. nach einer Zwischennutzung als Aktivkohle)

in der Zementindustrie mitverbrannt werden. Als Standort für die HTC-Anlage ist die Kläranlage Wolgast vorgesehen.

Landwirtschaftliche/bodenbezogene Verwertung: Um wirtschaftliche Lösungen für das gesamte Bundesland zu erzielen, sind aber auch die Entsorgungswege für die über 500 Kläranlagen mit Einwohnerwerten <50.000 zu berücksichtigen. Die Klärschlammqualität von Kläranlagen der GKL 1-3 im ländlichen Bereich ist meist sehr gut. Kombiniert mit spezifisch hohen betrieblichen Aufwendungen kleiner Anlagen kann die dezentrale stoffliche Verwertung in der Landwirtschaft weiterhin eine wirtschaftlich und ökologisch sinnvollste Lösung sein. Entsprechend setzen mehrere Betreiber weiterhin auf diesen Entsorgungsweg, z.T. nach Kompostierung.

Sonstige: Mit Umsetzung der neuen Verwertungsstrukturen verbleiben noch 10-15 % der Klärschlämme für eine direkte bodenbezogene oder sonstige Verwertung. Betroffene Betreiber, welche aufgrund der Anlagengröße weiterhin bodenbezogen verwerten dürfen, versuchen mehrheitlich diesen Verwertungsweg weiter zu nutzen. Aufgrund der unsicheren künftigen Entwicklung sind Vertragsverlängerungen mit Entsorgungsdienstleistern im Moment schwierig (lange Vertragsbindung, Kosten). Deshalb gibt es wieder verstärkte Bestrebungen zu direkten Verträgen mit einzelnen Landwirten, mit Vorteilen, aber auch Verlagerungen von Überwachungs- und Dokumentationspflichten für beide Seiten. Weitere Betreiber warten im Moment noch ab und errichten große Lagerkapazitäten. In wenigen Fällen wird auch der Weg der Mitverbrennung erwogen, kombiniert mit einem P-Recycling aus dem Nassschlamm.

3 P-Rückgewinnung

3.1 Allgemeine Kriterien

Mit dem Umstieg auf eine thermische Verwertung stellt sich die Frage nach der gebotenen P-Rückgewinnung. Grundsätzlich bestehen dabei zwei Rückgewinnungsoptionen:

- Rückgewinnung aus Nassschlamm auf der Kläranlage
- Rückgewinnung aus der Klärschlammäsche

Dies hat auch rechtliche Implikationen: während die Rückgewinnung aus Nassschlamm auf der Kläranlage noch dem Wasserrecht unterliegt, greift für die Rückgewinnung aus der Asche das Abfallrecht. Bei HTCycle definiert sich die rechtliche Zuständigkeit nach dem Standort der P-Rückgewinnung. Die Anforderungen an den Wirkungsgrad der Rückgewinnung sind ebenfalls verschieden. Bei Nassschlamm wird ein Wirkungsgrad von mindestens 50 % oder eine Abreicherung des Schlamms unter 20 gP/kg TS gefordert. Aus der Asche müssen mindestens 80 % des Phosphors zurückgewonnen werden.

Die bisherigen Untersuchungen mit Rückgewinnungsverfahren im Nassschlamm zeigen, dass ein Wirkungsgrad von 50 % nur schwer zu erreichen ist. Für Anlagen mit hohem Anteil an P-armem Industriewasser kann es ggf. möglich sein, mit vertretbarem Aufwand einen P-Gehalt unter 20 g/kg TS zu erzielen. Die P-Rückgewinnung aus Nassschlamm wird deshalb auf wenige Sonderlösungen beschränkt bleiben.

Aufgrund der zentralisierten Verbrennung und des deutlich besseren Wirkungsgrades der P-Rückgewinnung aus der Asche sollten Rückgewinnungsverfahren hier ansetzen. Bei der Wahl des passenden Rückgewinnungsverfahrens sind viele Kriterien zu berücksichtigen. Diese lassen sich im Wesentlichen gruppieren in:

- Verwertungsmöglichkeit des gewonnenen P-Rezyklates
- Transportwege, Anfall und Entsorgung von Reststoffen
- Investiver und betrieblicher Aufwand für Rückgewinnungsverfahren
- Synergien zu bestehenden Strukturen (z.B. Industrie-/Gewerbe parks mit günstigem Anfall von Energie, Hilfsstoffen oder Bedarf an den Rezyklaten)

Verwertungsmöglichkeit der P-Rezyklate: Wie eingangs bereits erläutert bietet MV sehr gute Randbedingungen für ein regionales P-Recycling. Das P-Rückgewinnungspotential von knapp 2.000 t (siehe Tabelle 1) könnte vollständig von der regionalen Landwirtschaft genutzt werden. Demgegenüber besteht aufgrund der wirtschaftlichen Struktur kaum Bedarf an hochwertiger Phosphorsäure oder anderen P-Produkten für den industriellen Bedarf. Ziel sollte also die Erzeugung eines landwirtschaftlich verwertbaren P-Produkts sein. Parallel sind allerdings auch Verwertungsketten für dieses Produkt aufzubauen.

Transportwege, Anfall/Entsorgung von Reststoffen: Grundsätzlich ist bei allen Rückgewinnungsverfahren der Skaleneffekt zu beachten. Danach sinken i.d.R. die spezifischen Kosten signifikant mit der Anlagengröße. Gerade technologisch aufwändigeren Verfahren werden erst bei hohen Aufbereitungsmengen (>> 10.000 t TS/a) wirtschaftlich zu betreiben sein. Die erforderlichen Mindestmengen fallen in MV ggf. nicht an, so dass in diesem Fall nur der Transport der gesamten Asche an eine zentrale Aufbereitung außerhalb des Landes verbleibt. Weiterhin ist zu prüfen, welche Reststoffe (ausgelaugte Asche, schwermetallhaltige Reste aus Ionenaustauschern oder Fällungsanlagen) anfallen und welche Entsorgungsaufwendungen damit verbunden sind.

Investiver und betrieblicher Aufwand für Rückgewinnungsverfahren: Angestrebgt wird ein möglichst geringer Aufwand für die P-Rückgewinnung. Gegenwärtig ist kaum ein Verfahren im Vergleich zur Produktion von Primärphosphaten ökonomisch konkurrenzfähig. In der aktuellen rechtlichen Situation wäre der Differenzbetrag zwischen Aufwand und Erlös dann über die Schmutzwassergebühr zu finanzieren. Der Aufwand des Verfahrens ist dabei immer mit dem erzielbaren Erlös und der Verwertungssicherheit des Produkts abzuwagen.

Synergien zu bestehenden Strukturen: Bestimmte Rahmenbedingungen können die Wirtschaftlichkeit eines Verfahrens deutlich verbessern. So fallen in bestimmten Industriebereichen Säuren als Reststoffe an, welche für P-Mobilisierung genutzt werden können, oder eine ggf. gewonnene Phosphorsäure kann im Bereich der Metallverarbeitung eingesetzt werden. Nach gegenwärtigem Kenntnisstand, sind diese Synergien nicht in unmittelbarer Nähe der geplanten Standorte für die Ascheerzeugung vorhanden, so dass bei der Verfahrensauswahl auf einen möglichst geringen Hilfsstoff- und Energiebedarf gesetzt werden sollte.

3.2 Grundsätze für die P-Rückgewinnung in MV

Zusammenfassend bestehen für MV folgende Ausgangs- und Rahmenbedingungen:

- Hoher P-Bedarf in der regionalen Landwirtschaft
- Vergleichsweise geringe Belastung der Klärschlämme
- P-Recyclingpotential nach eingeschlagenen Verwertungswegen:

Monoverbrennung: 80 %; hydrothermale Karbonisierung: ca. 10 %; bodenbezogen: ca. 10 %

Diese gilt es durch Zusammenarbeit aller maßgeblichen Akteure in ein Konzept zu überführen, welches die Klärschlammensorgung und das regionale P-Recycling in MV nachhaltig sichert. Dafür wurden in der Konzeptphase folgende übergeordnete Grundsätze für RePhOR-MV formuliert:

1. Der verfügbare Phosphor der heimischen Klärschlämme soll im Sinne geschlossener Nährstoffketten als Düngemittel in die regionale Landwirtschaft zurückgeführt werden. Idealerweise sollte die gesamte Verwertungskette in der Region und für die Region gestaltet werden.
2. P-Rückgewinnung und Recycling müssen ökologisch und wirtschaftlich nachhaltig sein. Dies betrifft sowohl den Energie- und Stoffeinsatz der Rückgewinnungsverfahren als auch die Transportaufwendungen für Klärschlamm, Klärschlammmasche und P-Rezyklate.
3. Um hochwertigen P-Dünger zur Verfügung zu stellen, ist eine konsequente Qualitätssicherung des Klärschlams ökologisch sinnvoller als aufwendige End-of-pipe-Lösungen; und unter den Bedingungen in MV auch umsetzbar.
4. Die regionale Verwertung von P-Rezyklaten aus Klärschlamm kann nur erfolgreich sein, wenn
 - i. Düngewirksamkeit und Schadstoffarmut nachgewiesen sind,
 - ii. durch Zusammenarbeit mit Landwirten die Umsetzung demonstriert werden kann,
 - iii. ein klarer düngerechtlicher Anwendungsrahmen existiert,
 - iv. ein nachhaltiges Vertriebskonzept aufgebaut werden kann.

3.3 P-Rückgewinnung aus Klärschlammmasche

Zur P-Rückgewinnung aus Klärschlammmasche wurden in den letzten Jahren zahlreiche Verfahren entwickelt, welche sich grundsätzlich in drei Konzepte unterscheiden lassen:

- Thermische Abtrennung und weitere Aufbereitung
- Saure Extraktion des Phosphors in die flüssige Phase und Aufbereitung als hochwertiger Dünger bzw. als relativ reine Phosphorsäure
- Löslichkeitserhöhung des Phosphors in der Asche und Granulierung als streufähiger Dünger mit weiteren düngewirksamen Zuschlagstoffen

Keiner der vorgenannten drei Betreiber von Verbrennungsanlagen in MV (KKMV, ZWAR, EEW) setzt auf ein thermisches Verfahren (z.B. Ashdec, Kubota, Mephrec). Gründe sind die relativ hohen investiven und energetischen Aufwendungen, keine Erfahrung mit derartiger Anlagentechnik, die erforderliche Nachaufbereitung des Phosphors und der Anfall eines Reststoffs zu dessen Entsorgung wenig Erfahrung vorliegt.

Die nasschemischen Verfahren (wie BioCon-, SEPHOS-, SESALPhos-, Tetraphos, Parforce, ASH2PHOS, PASCH- oder Leachphos-Verfahren) basieren auf aufwendigen und komplexen Fällungs- bzw. Extraktionsprozessen und ermöglichen je nach Verfahren auch bei höher belasteten Klärschlämmen die Herstellung relativ reiner P-Rezyklate. Die Wirtschaftlichkeit ist aufgrund des hohen Chemikalieneinsatzes, der verbleibenden Abfallstoffe und der komplexen Prozessführung aus unserer Sicht nur bei größeren Anlagen gegeben. Verfahren, die Phosphorsäure generieren, sind aufgrund der notwendigen anschließenden Verarbeitung für ein regionales Recycling in der Landwirtschaft eher ungeeignet.

Der P-Aufschluss in der Asche mit anschließender Granulierung der gesamten Asche ist demgegenüber verfahrenstechnisch und kostenseitig relativ unaufwendig und es fallen (bis auf die Schadstoffabtrennung) keine entsorgungsbedürftigen Reststoffe an. Da die gesamte Asche landwirtschaftlich verwertet wird, setzt dies relativ unbelastete Klärschlämme voraus und/oder erfordert eine Metallabreicherung im Prozess. Gelingt es, boden- und pflanzenspezifische Standarddünger mit reproduzierbarer Qualität zu produzieren, kann die Wirtschaftlichkeit als gut bewertet werden. Gerade für Regionen mit Trennsystem und geringem Industriewasseranfall ist ein P-Aufschluss mit anschließender Granulierung der gesamten Asche interessant, wenn sie durch qualitätssichernde Maßnahmen im Klärschlamm flankiert werden. Aufgrund der vergleichsweise wenig aufwendigen Verfahrensführung, können derartige P-Rückgewinnungsverfahren auch in kleineren Skalen regional betrieben werden. Die anfallenden Rezyclate stehen damit direkt für eine Rückführung in die regionale Landwirtschaft zur Verfügung.

Zu den Aufschluss- und Granulierungsverfahren gehören u.a. RECOPHOS, Seraplant/Glatt, pontes pabuli. Grundsätzlich zielen alle Verfahren auf die Herstellung eines standardisierten Düngemittels. Das RECOPHOS-Verfahren wurde aufgrund ungelöster verfahrenstechnischer Probleme nicht weiter verfolgt.

Das SERAPLANT/Glatt-Verfahren löst diese technischen Probleme durch die Trennung der Reaktion zwischen Asche und Säure von der Granulation (Kirchhof, 2018). Im ersten Prozessschritt wird dabei eine Suspension aus Asche, Wasser, Säure und allen Nährstoffkomponenten hergestellt. Im zweiten Prozessschritt wird die so erzeugte Suspension einer Sprühgranulation im Wirbelschichtverfahren zugeführt. Dieses verbindet die konvektive Trocknung und Granulatbildung. Je nach Wasseranteil ist dies mit einem hohen elektrischen und thermischen Energiebedarf verbunden. Durch die Zugabe von Nährstoffkomponenten lassen sich kontrolliert verschiedene Mehrnährstoffdünger (z.B. NP-, PK-, NPK-Dünger) herstellen. Eine Schwermetallabtrennung ist nicht möglich.

Beim Pontes pabuli-Verfahren wird wie bei den zuvor genannten Verfahren das weitgehend unlösliche Phosphat in der Klärschlammmasche mit Mineralsäure aufgeschlossen (s. Abb. 5). Das so erzeugte Gemisch aus Wasser, Asche und Mineralsäure (Suspension) wird konditioniert und über eine mechanische Entwässerung der Wassergehalt eingestellt. Anschließend werden über Standardmischgeräte weitere Nährstoffkomponenten (wie K_2SO_4 , Harnstoff, Ammoniumsulfat etc.) dem erfeuchten Gemisch zudosiert. Abschließend wird Gemisch granuliert, typischerweise auf Granuliertellern wie in der Düngemittelindustrie. Durch die mechanische Vorentwässerung liegt der Wassergehalt vor der Granulierung nur noch bei 10-20 %. Gleichzeitig bietet die Entwässerung die Möglichkeit der Schwermetallabreicherung. Die durch den Säureaufschluss ggf. mobilisierten Schwermetalle können dabei über eine Kreislaufführung Mineralsäure-Wasser-Gemisches abgeschieden werden, z.B. über sulfidische Fällung. Die Intensität der Schwermetallabreicherung wird durch die Kombination von Säureaufschluss und anschließender Abscheidung im Säure-Wasser-Kreislauf entsprechend Abb. 5 gesteuert.

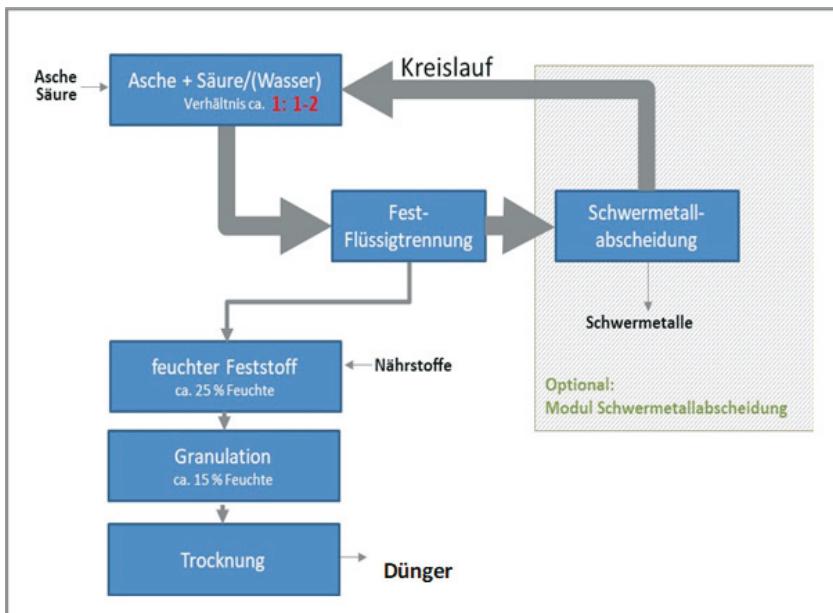


Abb. 5: Schematische Darstellung des Pontes pabuli-Verfahrens (Quelle: pontes pabuli GmbH)

Damit erscheint das pontes pabuli-Verfahren zum gegenwärtigen Stand des Wissens als besonders gut geeignet, die P-Rückgewinnung nach den oben formulierten Grundsätzen zu ermöglichen.

3.4 P-Rückgewinnung im HTCycle-Prozess

Die hydrothermale Karbonisierung ist ein thermochemisches Verfahren zur Konversion wässriger Biomassen, wie z.B. mechanisch entwässerten Klärschlamm, in ein kohleähnliches Material, der sogenannten HTC-Kohle (auch „Biokohle“ genannt). Nach der eigentlichen HTC-Reaktion findet eine Vorentwässerung des Kohleschlammes und eine Trennung der Prozessströme statt.

Für die P-Rückgewinnung wird das vorwiegend an der eingedickten Kohle gebundene Phosphat durch pH-Wert-Absenkung mit Mineralsäure als ortho-Phosphat in die flüssige Phase überführt („Cleanphos-Verfahren“). Das daraus resultierende Leachwasser wird anschließend im basischen Milieu als Magnesiumammoniumphosphat (Struvit) auskristallisiert („Hohenheimer Verfahren“).

Derzeit wird das HTC-Verfahren in größer skaligen Versuchen am Standort Murchin getestet.

3.5 Qualitätssicherung der Klärschlämme

Bei P-Rückgewinnung über eine Mobilisierung/Granulierung der Asche müssen flankierende Maßnahmen zur Qualitätssicherung der Klärschlämme etabliert werden. Da bei der Verbrennung (und eingeschränkt auch im HTC-Prozess) organische Spurenstoffe vollständig entfernt werden, liegt der Fokus auf möglichst niedrigen Metallgehalten. Teilweise treten jedoch erhöhte Werte insbesondere bei den Parametern Kupfer und Aluminium auf, welche aber im Bereich der DÜMV liegen. Vermutete wesentliche Eintragspfade sind die Hausinstallation (Cu, Zn), angeschlossenes Niederschlagswasser und ggf. Indirekteinleiter. Daraus leiten sich grundsätzlich folgende Ansatzpunkte ab:

- schrittweise Reduzierung von nicht DIN-konformen Materialien der Hausinstallationen:
- konsequente Indirekteinleiterkontrolle und ggf. Forderung von Vorbehandlungsmaßnahmen: Weitere Entflechtung des Mischsystems und Ausbindung von Niederschlagswasser:
- Reduzierung des Fällmitteleneinsatzes, Verbesserung der Fällmittelqualität

4 Ausblick

Die beiden Verbrennungsanlagen in Rostock und Stavenhagen werden perspektivisch in fünf Jahren betriebsbereit sein. Dann werden mehr als 2/3 der in MV anfallenden Klärschlämme thermisch verwertet. Spätestens dann sollte nicht nur die P-Rückgewinnung aus der Asche sondern auch die Verwertung der P-Rezyklate gelöst sein. HTCycle engagiert sich gegenwärtig beim Ausbau einer großtechnischen Versuchsanlage in betriebsbereiten Prototypen. Die weitere Umsetzung des Konzepts bedarf aber weiterer Abstimmungen mit Verbänden und Behörden sowie ergänzender Untersuchungen, u.a. zur Prozesswasserbehandlung. Es bleibt zu wünschen, dass die noch verbleibenden Klärschlammengen in der stofflichen Verwertung sich auch langfristig realisieren lassen. Für diese können angesichts der aktuell errichteten Verbrennungskapazitäten auch außerhalb von MV notfalls alternative Entsorgungswege möglich werden.

Das in RePhoR-MV entworfene Konzept zum P-Recycling erscheint allen Beteiligten als zielführend. Für eine Umsetzung bedarf es aber vorhergehender i) skalirerbarer Pilotversuche, ii) pflanzenbaulicher Untersuchungen mit den gewöhnlichen P-Rezyklaten und iii) der Entwicklung von Vermarktungsstrukturen. Die Universität Rostock bemüht sich deshalb in Kooperation mit den Betreibern der Verbrennungsanlagen um entsprechende Förderung.

Zusammenfassend bestehen in MV bereits jetzt transparente und belastbare Konzepte, die für den Großteil der Klärschlämme eine Verwertungssicherheit in den nächsten Jahrzehnten gewährleisten.

Literatur/Quellen

- AbfKlärV 2015. Verordnung über die Verwertung von Klärschlamm, Klärschlammge- misch und Klärschlammkompost. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit
- Adám, Kinga; Kristine Søvik, Anne; Krogstad, Tore (2006): Sorption of phosphorous to Filtralite-P--the effect of different scales. In: Water Research 40 (6), S. 1143–1154. DOI: 10.1016/j.watres.2006.01.009.
- DWA (2009): DWA-A 226, Grundsätze für die Abwasserbehandlung in Belebungsanlagen mit gemeinsamer aerober Schlammstabilisierung ab 1.000 Einwohnerwerte. Hennef. DWA Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V.
- DWA (2006): DWA-A 262, Grundsätze für Bemessung, Bau und Betrieb von Pflanzenkläranlagen mit bepflanzten Bodenfiltern zur biologischen Reinigung kommunalen Abwassers. Hennef. DWA Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V.
- AbKlärV (2017) Verordnung über die Verwertung von Klärschlamm, Klärschlammge- misch und Klärschlammkompost, Bundesministerium der Justiz und Verbraucher- schutz
- biota (2013) Regionalisierte Flächenbilanzen für Stickstoff und Phosphor auf landwirtschaftlichen Nutzflächen in Mecklenburg-Vorpommern, eds. MV biota – Institut für ökologische Forschung und Planung GmbH im Auftrag des LUNG
- destatis (2018) Düngemittelversorgung, Inlandsabsatz nach Ländern und Sorten, Phosphathaltige Düngemittel, Statistisches Bundesamt
- destatis, DWA (2015) Abwasser und Klärschlamm in Deutschland – statistische BetrachtungenTeil 2: Klärschlamm, Klärgas, Rechen und Sandfanggut, Korre- pondenz Abwasser, Abfall, 62 (1), 46-53
- DüMV(2012)VerordnungüberdasInverkehrbringenvonDüngemitteln,Bodenhilfsstoffen, Kultursubstraten und Pflanzenhilfsmitteln (Düngemittelverordnung - DüMV), Bundesministerium für Ernährung Landwirtschaft und Verbraucherschutz,
- DÜV (2017) Verordnung über die Anwendung von Düngemitteln, Bodenhilfsstoffen, Kultursubstraten und Pflanzenhilfsmitteln nach den Grundsätzen der guten fach- lichen Praxis beim Düngen, Bundesministerium für Landwirtschaft und Umwelt / Bundesministerium für Justiz und Verbraucherschutz
- Kirchhof J. (2018) Das GLATT/ Seraplant Verfahren zur Herstellung von Dünger aus Klärschlammassen, Phosphordialog MV, 21. August 2018, Rostock
- LUNG (2016) Bodenschutzprogramm Mecklenburg-Vorpommern, interner Bericht
- MLUV (2018) Landwirtschaft in MV, <https://www.regierung-mv.de/Landesregierung/Im/Landwirtschaft/Landwirtschaft/>
- Nationalatlas (2002) Nationalatlas Bundesrepublik Deutschland – Relief, Boden und Wasser, Bodengüte der Landwirtschaftlichen Nutzflächen, (PDF-Titel: Band2_104-105_archiv.pdf), eds. Liedtke H. and Marschner B.
- UBA (2018) Daten zur Umwelt, Ausgabe 2018

Kontakt

Prof. Dr.-Ing. Jens Tränckner

Universität Rostock, Agrar- und Umweltwissenschaftliche Fakultät
Professur für Wasserwirtschaft

✉ jens.traenckner@uni-rostock.de

Die Novelle des Kreislaufwirtschaftsgesetzes Eine Einschätzung der Anpassungsvorschläge durch den VKU

Die Abfallrahmenrichtlinie der Europäischen Union. Eine Umsetzungsfrist, die im Juli 2020 endet. Deutschland unter dem Einfluss des Corona-lockdowns. Das Kabinett beschäftigt sich größtenteils mit Maßnahmen zur Bekämpfung der Auswirkungen der Corona-Pandemie, Bundesrat und Bundestag tagen unter erschwerten Bedingungen, das ganze Land debattiert über Klimaschutzziele und deren Vereinbarkeit mit der aktuellen Situation.

Die derzeitige Lage ist neu in Deutschland, sie steht den meisten politischen Entscheidungen im Weg. Dennoch versucht Deutschland auf das Gas zu treten und die europäische Abfallrahmenrichtlinie nunmehr fristgerecht im deutschen Recht zu verankern. Nach dem Referentenentwurf des BMU kam im Februar 2020 der Kabinettsentwurf, mit welchem sich der Bundesrat am 15. Mai 2020 beschäftigen soll. Das weitere Verfahren steht unter dem Druck, die Abfallentsorgung in Deutschland an die europäischen Vorgaben anzupassen, selbst wenn der derzeitige Aufmerksamkeitsschwerpunkt auf ganz anderen Aspekten liegt. Bleibt da noch Zeit und Muße für eine sinnvolle und passgenaue Umsetzung der Abfallrahmenrichtlinie in deutsches Recht? Nach Einschätzung des VKU ist dies an einigen Punkten der Novelle durchaus fraglich.

Grundsätzlich begrüßen wir die geplanten Änderungen des Kreislaufwirtschaftsgesetzes, wobei es insbesondere erfreulich ist, dass nunmehr wesentliche Begriffe der Abfallwirtschaft, wie z.B. der Siedlungsabfall und die Verfüllung, erstmalig definiert werden. Für den Umgang u.a. der Rechtsprechung mit Fragen der Abfallwirtschaft ist dies ein erheblicher Vorteil.

Stärkung des Recyclings

Keine Verbrennung von Abfällen, die für die Vorbereitung zur Wiederverwendung oder zum Recycling getrennt gesammelt wurden- auch das ist eine Klarstellung innerhalb der Novelle, die in dieser Ausgestaltung durchaus wünschenswert ist. Dennoch: in der Praxis besteht häufig die Schwierigkeit, dass Sammelfraktionen durch Fehlwürfe verunreinigt werden und hierdurch in einigen Fällen eine derart schlechte Qualität aufweisen, dass ein Recycling mit einem noch vertretbaren Aufwand überhaupt nicht mehr erreicht werden kann. In Auslegung der deutschen Abfallhierarchie müssen diese Abfälle sodann als Restmüll qualifiziert werden und eine entsprechende Behandlung durch den öRE erfahren. In diesem Zusammenhang muss auch von einer Überlassungspflicht nach Maßgabe des § 17 Abs. 1 Satz 2 KrWG gesprochen werden und eine energetische Verwertung der Abfälle sodann möglich sein. Der Gesetzgeber sollte es an dieser Stelle

auch nicht verpassen, zwar diese Möglichkeit zu eröffnen, hier jedoch auch nicht Tür und Tor aufzustoßen und eine solche Verwertung bereits dann als legitim einzustufen, wenn schwierige Marktverhältnisse vorherrschen, die eine entsprechende Behandlung rechtfertigen. Technische Unmöglichkeit oder wirtschaftliche Unzumutbarkeit sind Begriffe, mit denen wir bereits seit vielen Jahren arbeiten und die wir in keinem Fall außer Acht lassen sollten. Hier muss dahingehend vorgesorgt werden, dass alle möglichen Maßnahmen ergriffen werden, um ein möglichst weitgehendes Recycling zu gewährleisten. Gerade vor dem Hintergrund, dass viele mineralische Stoffe in der Umwelt nur in begrenztem Maße zur Verfügung stehen, müssen wir deren Rückgewinnung aus dem Abfällen sichern und einen Kreislauf schaffen, in dem recycelte Materialien neue Verwendungsmöglichkeiten erhalten. Die kommunale Abfallwirtschaft hat sich dies- neben Aspekten der allgemeinen Abfallvermeidung- auf die Fahnen geschrieben und begrüßt Vorstöße, die in diese Richtung gehen.

Keine Ausweitung der freiwilligen Produktverantwortung

Nach § 26 KrWG-E wird die freiwillige Rücknahme von Produktabfällen durch Hersteller oder Vertreiber – auch von fremden Produkten – bereits dann zugelassen, wenn die geplante Rücknahme und Verwertung der Abfälle mindestens gleichwertig im Vergleich zu einer Erfassung und Verwertung durch den öRE erfolgt. Diese Regelung wurde erst im Rahmen des Kabinettsentwurfs aufgenommen. Im Referentenentwurf des BMU wurde dagegen noch gefordert, dass die Erfassung und Verwertung höherwertiger sein müsse. Diese –aus unserer Sicht negative- Veränderung kann zu einer Aushöhlung der kommunalen Entsorgungsverantwortung führen. Hersteller können im Sinne dieser Vorschrift auch Fremdprodukte zurücknehmen und werden sich naturgemäß auf derartige Produktabfälle stürzen, die gute Markterlöse zu erzielen geeignet sind. Im schlimmsten Szenario verblieben dann für die Kommunen nur noch Rest- und Sonderabfälle, was, abgesehen vom quasi nicht vorhandenen Marktwert, wegen der verminderten Sammelmengen auch erhebliche Auswirkungen auf die vorhandene Sammelinfrastruktur haben wird. Es dürfte sich bestenfalls als schwierig erweisen, das in Deutschland sehr gut ausgebaute Netz an Wertstoffhöfen zu erhalten, wenn sich jede Supermarktfiliale zum Wertstoffentsorger erklären kann.

Allein schon dies muss die Überlegung nahelegen, herstellerfremde Produkte nur dann einer freiwilligen Rücknahme zu öffnen, wenn hiermit ein nachweisbarer Vorteil für die Kreislaufwirtschaft verbunden ist. Natürlich ist dies unabhängig von der Frage einer freiwilligen Rücknahme von Altprodukten des Herstellers/ Vertreibers. Dass die Novelle die für diese Rücknahme notwendigen Kriterien konkretisiert, ist in vollem Umfang zu unterstützen. Auch hier sollte jedoch gesichert werden, dass die Überlassungspflichten an die öffentlich-rechtlichen Entsorgungsträger gewahrt bleiben. Dafür müsste darauf hingewirkt werden, dass die Produktrücknahmen nur über die eigenen Verkaufsstellen und nicht z.B. über drittbeauftragte Entsorger erfolgen dürfen.

Beteiligung der Hersteller an den Reinigungskosten der Umwelt

Allein 320.000 Coffee-to-go-Becher landen pro Stunde auf deutschen Straßen. Die Anzahl an Zigarettenfiltern auf den Gehwegen ist kaum quantifizierbar und für alle anderen Plastikgegenstände, die ihr Ende in der deutschen Umwelt finden, kann kaum eine vollständige Liste erstellt werden. Die Entsorgung dieser Abfälle zahlen die Bürger- über die Abfallgebühren oder die Straßenreinigungsgebühren, während die Hersteller dieser Artikel vom Verkauf umfassend profitieren. Es ist daher ein richtiger und wichtiger Schritt, dass die Novelle nunmehr eine Grundlage dafür schafft, dass sich die Hersteller im Rahmen der Produktverantwortung an den Kosten, die für die Reinigung der Umwelt und die anschließende Verwertung und Beseitigung der Produkte, die sie in den Verkehr gebracht haben, beteiligen müssen. Dies kann nach § 25 Abs. 1 Nr. 4 KrWG-E durch Rechtsverordnung geregelt werden.

Wo somit eine Beteiligung der Hersteller an den kommunalen Reinigungsleistungen für „litteringträchtige“ Produkte deutlich zu begrüßen ist, ist doch eine Beschränkung dieser Finanzierungsverantwortung auf einzelne Einwegkunststoffprodukte nach der Kunststoffrichtlinie der EU, wie sie derzeit im Entwurf verankert ist, entschieden abzulehnen. Die derzeit vorliegende starre Verweisung auf Teil E der EU-Kunststoffrichtlinie bringt mit sich, dass eine zeitnahe erneute Novellierung des KrWG erforderlich wird, da auch diese Richtlinie im Zusammenhang mit dem europäischen „Green Deal“ überarbeitet werden wird. Eine starre Verweisung nimmt dem Verordnungsgeber somit jegliche Flexibilität, auf die sich stetig wandelnden Zustände einzugehen. Diesen Punkt haben übrigens auch die Ausschüsse des Deutschen Bundesrats erkannt und in ihren Empfehlungen vom 23.03.2020 aufgegriffen.

Eine Beschränkung auf Erzeugnisse der EU-Kunststoffrichtlinie ist zudem im Hinblick auf die Durchsetzung der Produkt- und Herstellerverantwortung nicht sachgerecht. Aus § 23 Abs. 2 Nr. 10 KrWG-E ergibt sich die Grundpflicht der Hersteller zur Beteiligung an den Kosten für die Reinigung der Umwelt von seinen zu Abfall gewordenen Produkten, wobei hier keine Einschränkung auf bestimmte Materialien oder Produkte vorgenommen wurde. Vielmehr sollen alle Produkte umfasst sein, die häufig gelitten werden. Durchsetzbare materielle Pflichten ergeben sich hieraus indes nicht, es bedarf spezifischer Rechtsverordnungen oder Gesetze. Einen Grund für das Zurückfallen dieser Ermächtigung in § 25 Abs. 1 Nr. 4 KrWG-E hinter die entsprechende Grundpflicht in § 23 KrWG-E ist indes nicht ersichtlich und stünde dem Sinn und Zweck stattdessen kontraproduktiv gegenüber.

Es muss vielmehr so sein, dass ein Anreiz geschaffen wird, auf wiederverwendbare Stoffe umzusteigen. Das ist unter anderem dann zu schaffen, wenn die Verordnungsermächtigung auch Produkte umfasst, die nur für den einmaligen Gebrauch bestimmt sind, egal, ob es sich um Einwegkunststoffe handelt oder andere Materialien. Dies würde sodann auch dem Ziel der Einweg-Kunststoff-

richtlinie entgegenkommen, mit welcher u.a. verfolgt wird, den Übergang zu einer Kreislaufwirtschaft mit innovativen und nachhaltigen Geschäftsmodellen, Artikeln und Werkstoffen zu fördern.

Folgt man indes dem Vorschlag des Kabinetts, so wird es wohl zu Verlagerungseffekten auf andere Produkte oder Materialien kommen, deren ökologische Wirkung nicht erheblich besser sein muss und die zumindest den gleichen kommunalen Reinigungsaufwand auslösen, wie Produkte aus Einwegkunststoffen. Eine Änderung der Materialzusammensetzung der Produkte wird nicht zugleich zu einem veränderten Konsum- und Wegwerfverhalten der Bevölkerung führen. Stattdessen kann es durchaus sein, dass andere Materialien einen veränderten, intensiveren Reinigungsaufwand nach sich ziehen, ohne einen finanziellen Ausgleich durch eine Verordnung zu ermöglichen.

Die Klagebefugnis des öffentlich-rechtlichen Entsorgungsträgers

Im Referentenentwurf des BMU fand sich in § 18 Abs. 8 KrWG-E der Anspruch eines von einer gewerblichen Sammlung betroffenen öffentlich-rechtlichen Entsorgungsträgers (örE), dass der gewerbliche Sammler die für ihn geltenden Bestimmungen des Anzeigeverfahrens einhält. Damit konnte sich z.B. ein örE gegen solche gewerblichen Sammlungen gerichtlich zur Wehr setzen, die ihm erhebliche Mengen an Wertstoffen entziehen und dadurch Gebührensteigerungen verursachen. Die Klagebefugnis ist leider in der Kabinettssfassung entfallen.

Diese Waffengleichheit mit gewerblichen Sammlern ist indes dringend erforderlich, da nur dann für die örE nachteilige Behördenentscheidungen gerichtlich überprüft werden können. Den gewerblichen Sammlern steht der Weg vor die Gerichte bereits jetzt offen, sie machen hiervon auch umfassend Gebrauch. Für den örE ist die Stellungnahme im Anzeigeverfahren die einzige Möglichkeit, seine Interessen im Verfahren einzubringen. Sobald die Behörde diesen Vortrag nicht beachtet und die Anzeige des gewerblichen Sammlers akzeptiert, hat der örE keine Möglichkeiten mehr, diese Entscheidung überprüfen zu lassen.

Gerade auch Entscheidungen im Zusammenhang mit der Unzuverlässigkeit von gewerblichen Sammlern könnten von dieser Klagebefugnis profitieren. Feststellungen zur Unzuverlässigkeit ergeben sich ausschließlich aus der Gesamtschau aller Umstände, die Folgen einer solchen Sammlung bekommt jedoch grundsätzlich der örE zu spüren. Da der örE vor Ort tätig ist, hat er einen deutlich besseren Blickwinkel auf die Lage und kann diese vor Gericht auch besser darstellen als die Behörde. Warum der örE diesen Schutzmechanismus nicht nutzen können darf, erschließt sich nicht.

Auch die Qualität der behördlichen Entscheidungen dürfte hierdurch beeinflusst werden, da die zuständige Behörde mit Klagen immer dann zu rechnen hätte,

wenn der Sachverhalt nicht ausreichend ermittelt oder die Rechtsvorschriften fehlerhaft angewandt worden sind.

Es lässt sich somit wie folgt zusammenfassen: die Novelle des KrWG hat an vielen Stellen gute Ansätze, einzelne Punkte sind aus Sicht des VKU natürlich noch zu überarbeiten. Die Fragen zur Klagebefugnis, der starren Verweisung auf die Kunststoffrichtlinie oder auch die Ausweitung der freiwilligen Produktverantwortung sind hingegen von grundsätzlicher Natur und sollten unbedingt im weiteren Verfahren berücksichtigt werden.

Ina Abraham, Fachgebietsleiterin öffentliches Recht beim Verband kommunaler Unternehmen, Berlin

Kontakt

Ina Abraham, Fachgebietsleiterin Öffentliches Recht, Bereich Recht

Verband kommunaler Unternehmen e.V.

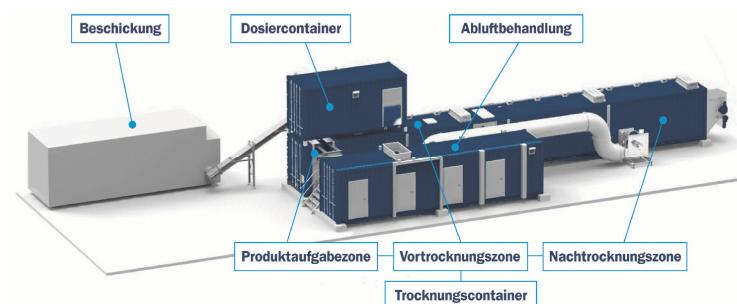
Invalidenstraße 91, 10115 Berlin

① +49 (0)30.58580-137 | ☎ abraham@vku.de | ⌂ www.vku.de

Steigerung der Energieeffizienz durch Wärmenutzung zur Klärschlamm-trocknung am Standort der ALBA TAV Betriebs GmbH in Ludwigslust

In den letzten Jahren hat ein gesellschaftliches Umdenken über die richtige Verwertung von kommunalen Klärschlämmen stattgefunden. In der Vergangenheit wurde Klärschlamm entweder landwirtschaftlich verwertet oder in Kohlekraftwerken- und Müllverbrennungsanlagen mitverbrannt. Wir wissen heute, dass das Austragen von Klärschlämmen auf Äckern zu Schadstoffbelastungen im Boden, Gewässern und Nahrungsmitteln geführt hat. Und wir wissen, dass bei der Mitverbrennung Ressourcen an Phosphor verloren gehen. Die Politik hat diese Erkenntnisse aufgenommen und 2017 mit der novellierten Klärschlamm- und Düngemittelverordnung die Weichen für eine umweltbewusstere Klärschlammverwertung gestellt, was die regionalen Abwasserzweckverbände seit dem 1. Januar 2019 vor neue Herausforderungen bei der Verwertung von Klärschlämmen aus der Abwasseraufbereitung stellt. In der geplanten Klärschlamm-Trocknungsanlage der ALBA TAV Betriebs GmbH (TAV) in Ludwigslust werden wir kommunale Klärschlämme klimaneutral durch den Einsatz der Wärme, die in unserer thermischen Abfallwertungsanlage bei der thermischen Verwertung von Abfällen entsteht, trocknen. Mit der Errichtung und dem Betrieb der geplanten Klärschlamm-trocknungsanlage wird bisher ungenutzte Abwärme für dringend benötigte Kapazitäten zur Trocknung von Klärschlamm genutzt und damit die Energieeffizienz der TAV wesentlich erhöht. Bis-her wurde der erzeugte Dampf ausschließlich zur Verstromung genutzt, da eine Wärmenutzung am Standort der TAV Ludwigslust nicht möglich war. Durch die Trocknung regionaler Klärschlämme am Standort der TAV Ludwigslust werden CO₂-Einsparungen aufgrund der Reduzierung von Transportaufwand und durch die Nutzung des Trockensubstrates zur Erzeugung von thermischer Energie in Klärschlammmonoverbrennungsanlagen erzielt. Durch das Recycling von Klärschlämmen werden fossile Ressourcen eingespart, wobei das energetische Potenzial von Abfall mit hohem Wirkungsgrad genutzt und eine echte Kreislaufwirtschaft umgesetzt wird. Unsere geplante Klärschlamm-Trocknungsanlage ist speziell auf die Trocknung von kommunalen Klärschlämmen ausgelegt, und wird aus einem 2-Bandtrockner und einer nachgelagerten Abluftaufbereitungsanlage zur Einhaltung der gesetzlich vorgeschriebenen Emissionswerte bestehen. Der vorentwässerte Klärschlamm wird bei Anlieferung mittels LKW direkt in einen im Boden eingelassene Beschicker (Walking Floor-Bunker) verkippt. Mittels des im Beschicker integriertem hydraulischen Schubbodens wird der Klärschlamm über nachgelagerte Fördersysteme den Dosiercontainern der beiden Bandtrockner zugeführt. Die Dosierung des Klärschlamm aus dem Dosiercontainer zum Walzenextruder erfolgt vollautomatisch mittels Voll- und Leermeldesignal. Unter dem Walzenextruder befindet sich das Trocknungsband, welches

mit Klärschlamm in der gewünschten Schüttdicke gleichmäßig über die gesamte Breite des Trocknerbandes vollautomatisch gefüllt wird. Die Klärschlamm-trocknung selbst, erfolgt über ein Bandtrocknungssystem mit einem oberen und einem unteren Band durch den Kontakt mit Warmluft. Frischluft wird über einen Wärmetauscher auf ca. 100 °C erwärmt. Die auf ca. 100 °C erwärmte Trocknungsluft durchströmt die Klärschlamm-schicht, wobei die Trocknungsluft Feuchtigkeit aufnimmt und über ein Abluftsystem abtransportiert wird. Die Verweilzeit des Klärschlams in der aktiven Trocknungszone beträgt 1,5 bis 3 Stunden. Der getrocknete Klärschlamm wird als Granulat mit einer Restfeuchte von ca. 10 % in zwei Hochsiloanlagen staubdicht zwischengelagert. Der Transport des Trockensubstrates zur thermischen Verwertung in Klärschlammmonoverbrennungsanlagen erfolgt mit Silofahrzeugen zu unseren Kooperationspartnern. Die Monoverbrennung des heizwertreichen Trockensubstrates dient zur Erzeugung von Strom und Fernwärme, ersetzt fossile Brennstoffe und bildet die Grundlage zur Rückgewinnung von Phosphor aus der Asche des Verbrennungsprozesses. Die Trocknung von Klärschlämmen reduziert Transportvolumen um rund 30 Prozent, wodurch deutlich weniger LKW Anlieferungen an den Verwertungsanlagen anfallen.



Bandtrocknerlinie



Containerlösung Klärschlamm-trocknung

Kontakt

Rainer Wiedenbröker, Geschäftsführer

ALBA TAV Betriebs GmbH

Am Alten Flugplatz 1, 19288 Ludwigslust

✉ rainer.wiedenbroeker@alba.info | ✉ www.alba.info

Zukunft der Kreislaufwirtschaft – Aktuelle Beispiele

Wasserstoff als Energieträger für die Abfallwirtschaft – Neue Synergien

Wasserstoff ist das häufigste natürlich vorkommende Element, welches in reiner oder gebundener Form überall zu finden ist. Grüner Wasserstoff als Energieträger für das Erreichen der Klimaziele ist zur Zeit in aller Munde und bietet vielseitige Nutzungsmöglichkeiten. Unter dem Stichwort „Sektorenkopplung“ werden sowohl strombasierte Anwendungen, als auch Mobilität und Wärmenutzung diskutiert und umgesetzt.

Für die Abfallwirtschaft gibt es aufgrund der vorhandenen Infrastruktur und Kompetenzen eine Vielzahl interessanter Themen mit hohem Synergiepotential:

- Einsatz von Sauerstoff der Elektrolyse in Kläranlagen zur Erhöhung der Klärleistung,
- Nutzung von befähigten BHKW zur Verknüpfung von Deponiegas und Wasserstoff,
- Weiternutzung von stillgelegten Deponieflächen (PV auf der Halde) zur Transformation zu Wasserstoffstandorten,
- Nutzung der Abwärme zur Nutzung in Klärstufen, um ebenfalls Kapazitäten zu erhöhen (Mikroorganismen im Winter auf Arbeitstemperatur halten),
- Aufbau als Wasserstofflieferant in der Region (Tankstellen, Fernwärmе).

Die Technik hierfür ist ausgereift und APEX Energy kann als Experte regionale Nutzungskonzepte basierend auf individuellen Verbrauchsprofilen vorschlagen und implementieren.

Kontakt

Dr. Mischa Paterna

APEX ENERGY TETEROW GMBH

Am Kellerholz 4, 17166 Teterow (Germany)

① +49(0)381.7999020 | ✉ mischa.paterna@apex-energy.de

**AKTUELLE THEMEN
UNSERER DOKTORANDEN
IM BEREICH ABFALLWIRT-
SCHAFT IN DER MENA-
REGION UND IN CHINA**

Co-processing of RDF in cement industry: A case of study Algeria

Abstract: Municipal solid waste management and disposal becomes a serious issue in Algeria with the continuous population growth and industrial development. Today, Algeria generates 13 million tons/y with around 0.9kg/capita per day. More than 90% of waste goes to Landfills without any pre-treatment which imposes many environmental problems in terms of Greenhouse Gases (GHG) emissions, leachate, and groundwater contamination. Among numerous mixed waste treatment methods around the world, co-processing of Refused Derived Fuel (RDF) in cement kilns has high credits in recent years. This study aims to examine the potential of RDF utilization in cement industry. An overview on the actual status of waste management system in Algeria is addressed. Globally, the development of RDF co-processing is highlighted. The literature review showed that using alternative fuels in cement industry can significantly reduce the quantities of waste to be landfilled, GHGs emissions, energy consumption as well as raw materials consumption. Co-processing of waste in cement industry is a good alternative for Algeria since it has 17 cement plant which can co-incinerate RDF in their kilns. Overall, prior the adoption of RDF co-processing technique, the required modifications and proper implementation considering the legal, institutional, financial and technical aspects must be taken into account.

Keywords: Municipal solid waste (MSW), Refused Derived Fuel (RDF), Co-processing, Cement industry, Algeria.

1 Introduction

Municipal solid waste (MSW) management is one of the most significant challenges facing urban communities around the world. The effective management of solid waste involves the adoption of numerous treatment methods, technologies and practices to ensure the protection of public health and the environment. Solid waste management (SWM) over the years has utilized many advanced technologies and strategies [1]. There are several alternative waste treatment options and strategies available for handling with mixed MSW to limit the residual amount ends up in the landfilling [2].

Usually, landfilling, composting, recycling and incinerating are used as solid waste treatment and disposal methods. Globally, landfilling is the most commonly used waste disposal method, despite all the significant environmental, health and economic impacts of this practice. However, landfilling of municipal solid waste is challenging mainly because landfill space is becoming scarce as well as the growing of public environmental awareness. Therefore, recent MSW management strategies encourage material and energy recovery as well as the stabilization of solid waste prior to landfill. Thus, Thermal treatment(incineration), Mechanical Biological Treatment (MBT), Refuse-Derived Fuel (RDF), compost

and stabilized products have attracted increasing attention [3].

A good alternative for the region is the waste-to-energy (WtE) concept by which mixed municipal solid waste is converted to RDF [4]. This concept contributes the reduction of the moisture content, which increases the heating value of the final products and decreases the production of leachate in the case of landfilled material if no further stabilization of organic material is applied [5].

The potential for RDF production and utilization as an alternative fuel in cement industry has not yet been launched in Algeria. Therefore, the aim of the present study is to investigate the potential for RDF production and utilization as an alternative fuel for the Algerian cement industry. The current status of solid waste management system in Algeria as well as the trend of RDF co-processing in cement industry locally worldwide are reviewed and evaluated.

2 Municipal Solid Waste Management status in Algeria

Algeria is a large country located in the north of Africa; it is known by its natural resources especially natural gas. The population is estimated of about 43 million inhabitants with population growth rate around 1.5 % and surface area of 2,381,000 km². Administratively, the country is divided into 48 Wilaya; 65 % of the Algerian people live in the north (4 % of the total area) which generates an intensive urbanization in this region and an occupation density of 270 inhabit/km² [6].

The country's MSW production is 13 million tons with an average per capita of 0.9 kg/day; 0.95 and 0.85 kg per capita day⁻¹ in urban and rural area respectively [7].

Law No.01-19 December of 2001 is the primary environmental legislation in Algeria. The latter is address the waste management, treatment, monitoring and disposal.

The Ministry of Environment and Renewable Energies (MEER) in cooperation with other concerned institutions such as National Agency for Waste (AND), Municipalities and Wilaya's environmental departments (DEW) is responsible for developing environmental policies, programs and environmental pollutants measures. From the financial point of view, the Ministry of Finance (MoF) is responsible for the financing of the local municipalities to guarantee the availability of the budget needed for performing all of the waste management activities starting from collection followed by treatment and finally landfilling.

Nowadays, Algeria generates 13 million tons of MSW with an annual growth of 3 %. Up to 90 % of the amount of waste generated is disposed in different landfills and dumping sites without any pre-treatment. Municipalities are responsible on a day-to-day for Municipal Solid Waste collection and disposal. Separation at

source still is not practiced in Algeria; all the kind of waste is collected as mixed waste even the hazardous one, which generate high level of GHG emissions (GHG) and leachate due to the large amount of organic fraction and water content. The rate of the recyclables recover from waste stream is ranged between 5 to 10 % only.

The composition of MSW in Algeria is significantly influenced by the development of the food and packaging industry as well as consumption habits. However, the waste composition is dominated by organic fractions (50-55 %) with 10 % recyclable materials particularly plastic and paper, and 20 to 30 % combustibles [8]. Fig. 1 shows the average composition of the municipal solid waste in Algeria.

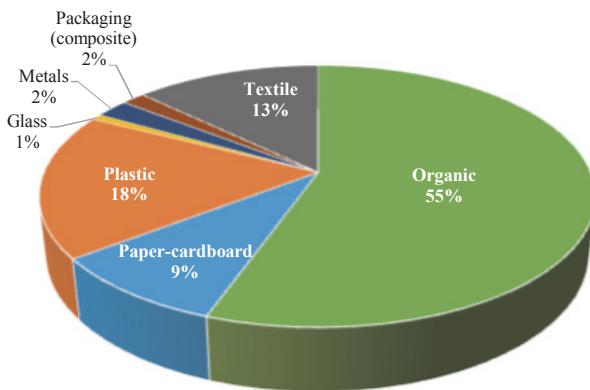


Fig.1: The Composition of municipal solid waste in Algeria [8].

The waste composition demonstrates the typical characteristic of the developing countries waste in terms of high amount of organics and moisture content (55-60%). The combustible fractions (paper, plastic and textile) count of about 30-40 % of the total waste generated, which in turn create high potential to be utilized as RDF for co-processing applications.

3 RDF as an alternative treatment option for mixed waste stream

RDF is an alternative solid fuel which represents the high to middle calorific fractions recovered from municipal or/and industrial solid waste. RDF typically consists of the MSW fraction that remains after the removal of noncombustible materials such as metals, glass, inert. It is a recovered fuel that can be utilized as a substitute fuel for the fossil fuel currently used in cement industry for the purpose of energy recovery [1].

Cement industry is intensive energy-consuming sector. The energy generally counts of about 30 to 40 % of the total production costs. Different sources of fuels are used in traditional cement kilns, such as natural gas, coal, and petroleum oil which are not renewable and being consumed rapidly [9]. In order to produce 1 tone of clinker, 3.2-6.3 Gj of energy and 1.7 ton of raw materials are required [10].

Many environmental issues are associated with cement production like air pollution and the efficient use of energy. Cement industry is responsible for about 5 % of global Carbon dioxide (CO_2) emissions; 30 % of the CO_2 comes from the fuel combustion in the kiln, 10 % of other downstream plant operations and 60 % from the limestone calcination [9].

Many studies demonstrated that the co-processing of RDF from MSW in cement kilns is a feasible alternative waste treatment option that can address the need for decrease the environmental impacts of solid waste, safely disposes hazardous wastes, decrease GHG emissions, decrease waste handling costs, reduces waste amount ends up in landfilling as well as enhance saving natural (non-renewable) energy and raw materials [11].

RDF is produced from the non-recyclable materials of municipal solid waste. The latter must be sorted to remove the recyclable and inert, and sometimes wet fractions before using it in cement kilns. The remaining material accounts for about 25-35 % of the original MSW depending on the applied pre-treatment technology. The main attractive purpose for pre-treatment facilities is to produce RDF as their main output, because removing the excessive moisture of the input waste facilitates mechanical processing and improves its potential for thermal recovery.

RDF is derived from MSW through three technologies, which can be classified into three main groups; Mechanical biological Treatment (MBT), Mechanical-Biological Stabilization (MBS) and Mechanical-Physical Stabilization (MPS). MPS is also denominated as mechanical treatment technology, as there is no biological step involved (Fig. 2).

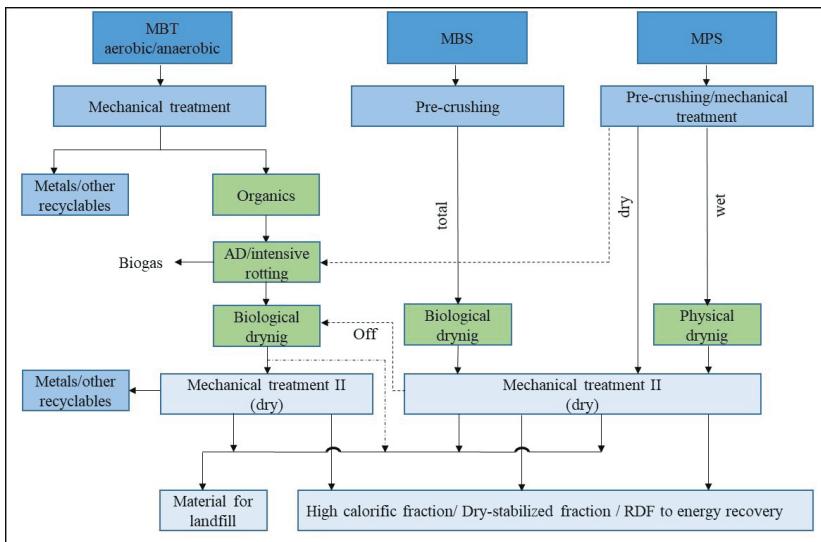


Fig. 2: Types of MBT technologies for mixed municipal solid waste pre-treatment [12].

Mechanical Biological Treatment (MBT): It aims to produce a stabilized fraction for landfilling, in these MBT plants, the input waste is separated into different material fractions: materials for energy recovery (RDF), recycling materials, materials for biological treatment (organics) and inert materials. In addition to RDF production, MBT concept including producing organic fertilizer or/and Compost-like Output (CLO). The fresh raw organic materials are subjected to windrow pile composting technology in an open site area for a period ranged between 8-12 weeks. Adapting MBT pre-treatment concept prior to landfilling reduces the potential of GHG emission by around 95% [13].

Mechanical-Biological Stabilization (MBS): The main purpose of MBS is to produce RDF by stabilizing the carbon as the main source of energy contained in the MSW by biological drying (generation of heat by microorganisms) and converts it in multiple-stage treatment into the high calorific fraction for use as RDF fuels. Bio-drying is a form of composting where the heat produced during the aerobic biological activity is used to dry the waste, where it will primarily lose moisture and achieve a low degradation of the organic matter. In this way, most of the biomass content from the waste can be included into the RDF, which will reduce the biodegradable material to be landfilled [13,14].

Mechanical-Physical Stabilization (MPS): In MPS the waste is dried with the supply of external thermal energy (fossil fuels) instead of self-heating (bio-drying). The pre-treatment comprises the segregation of the low calorific fraction and metals together with a multistage crushing. If necessary, hazardous fractions are separated and the high calorific fraction dried using thermal energy

(heat). Then the fine processing comes (sorting, classification) for the separation of fractions for RDF production and mineral fractions suitable for land-filling.

Before using RDF in co-incineration systems, it must meet the general quality standards to be safely and efficiently utilized (Table 1). The RDF from MSW has different chemical and physical properties depending on its nature; calorific value, ash, water content and chlorine are the main properties that categorize the final RDF produced. Heterogeneity of RDF's particle size, quality as well as chemical and physical properties are the main obstacles facing using it in cement kilns.

Table 1: Quality standards for RDF in some European Countries [15].

Parameter	Switzerland	Italy	Eurits
Calorific value (MJ/Kg)	25.1-31.4	15	15
Moisture content (%)	<10	<25	NA
Ash content (%)	0.6-0.8	20	5
Chlorine (%)	<1	0.9	0.5
Pb	<100	200	<2500
As	NA	9	NA
Cd	<5	NA	NA
Ni	<10	40	NA
Zn	NA	NA	500
Cr	NA	NA	<1500
Hg	<5	NA	NA

RDF should have well defined calorific value in order to satisfy the energy demand of the co-processing plant. Low concentrations in toxic compounds like heavy metals and chlorine are also limiting factors. A high quality of RDF would possess a higher value for the heating value, and lower values for moisture and ash content.

From heavy metal content point of view, such as cadmium, chromium and mercury due to the heterogeneity of wastes and waste fuels - are quite large and can be used as guide parameters of pollutant in household waste. Regarding chlorine, it's also a limiting parameter for RDF quality, not only for ecological reason but also technical reason; because it strongly influences the corrosion behavior during combustion of waste fuel. The type of waste input into the RDF co-processing plant is more important than the fuel recovery process itself since the final quality of waste fuels like RDF depend on the origin of the input materials [16].

4 International practices of Co-processing of RDF in cement industry

Different sources of energy are used in the cement manufacturing plants. The most common sources of fuels are; coal, oil, and natural gas [17]. Alternative fuels derived from municipal, industrial and hazardous waste are another source of energy used in cement industry worldwide. Many advantages are offered by the co-processing of waste in cement kilns for the authorities responsible for waste management as well as for the cement industry. Saving fossil energy and raw materials consumption are the main interests for cement producers to contribute to an eco-efficient production.

The high temperatures of the cement kilns make them suitable for waste co-processing because, it favors the degradation of toxic compounds formed upon burning of certain wastes. The high energy consumption by cement industries has been a crucial issue with respect to environmental questions as fossil fuel consumption and climate change. Due to this, co-processing is a win-win alternative, avoiding fossil fuel consumption and at the same time providing an adequate destiny to many kinds of wastes. It is well documented that co-processing of RDF in cement industry has high credits and applied in large scale in European countries. The successful of the implementation of this approach are the well-defined regulations, proper waste management system, involvement of the stakeholder concerned in the field such as public bodies, local private companies and social communities [18].

RDF utilization in EU, Austria, Japan and USA is a common practice since the beginning of the 1970s, and has increased in recent years. The thermal energy share covered by alternative fuels in cement industry differs from region to region [19]. In 2016, 11.3 Million tons of RDF were used in the EU with an average of about 44 %. At the worldwide level, average RDF utilization is about 17 %. In particular, RDF substitution rate in USA, Canada, Germany and Austria have reached a substitution rate of 16 %, 13 %, 66 % and 76 % respectively. In Austria, the thermal substitution rate reached 81 % counting 510,000 tons/year, which was the highest one worldwide [20].

Using RDF as a supplemental fuel in cement production is an economically viable option to minimize fuel costs and landfill disposals. The effect of using RDF on plants' economics is changing with the investment cost, fossil energy and landfill disposal prices. It is known by several studies that co-processing of waste reduces the fossil energy and raw materials consumption which are usually have high cost and represent 30 % to 40 % from the total production cost [20].

5 Potential of co-processing of RDF in cement industry in Algeria

Co-processing of RDF in cement industry is utilized in many developed countries, while in the developing countries like India, China and some of the Mena region countries still in initial phases. Algeria, as one of such country, RDF utilization is not lunched yet and doesn't receive enough attention. This is due to the lack of regulations framework, the lack of know-how, the insufficient financing, the lack of the end users (cement industry) infrastructure and the absence of cooperation between the cement industry and urban local authorities (municipalities).

RDF specifications from the end users (cement plants) point of view, should be investigated in order to produce RDF that conforms to users' requirement. Waste separation and RDF production technologies have to be selected and the cost associated has to be considered. Therefore, for further study, a survey on potential RDF users, their requirement together with their demand on RDF should be investigated. Finally, the legal framework has an important role for introducing the co-processing of RDF in the Algerian waste management plan, therefore, enforcement of the related laws and regulations should be considered.

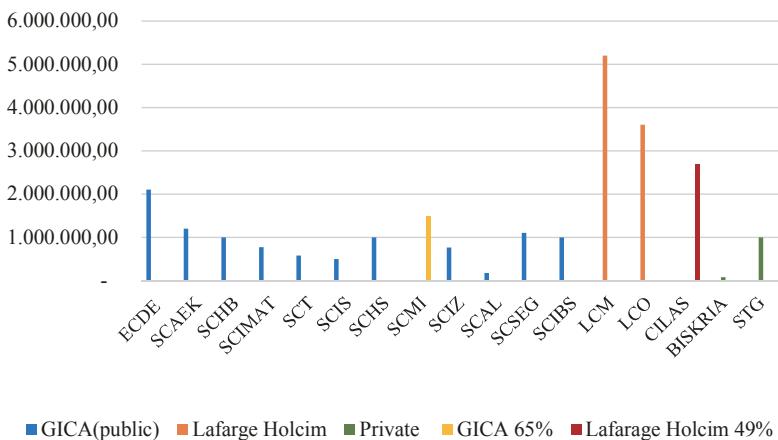


Fig. 3: Cement production capacity of the different compagnies in Algeria

Currently in Algeria, there are 17 cement industries owned by three sectors; 11 plants wholly owned by public sector (GICA), 1 plant (SCMI) majority owned by public sector (65 % GICA-35 %Lafarge), 2 plants wholly owned by Lafarge Holcim and 1 plant in partnership with local private sector (CILAS; 49 % Lafarge), and 2 plants owned by private sector. The country's total production capacity was about 25 million tons, the main type of fuel used in cement production in cement plants in Algeria is natural gas; 97 Nm³ of natural gas and 1.6 ton of raw materials are required to produce one ton of clinker (SCMI). Figure (3) shows the capacity production of each cement plant.

Algerian political agenda currently focus on increasing the rate of investment in the country and simultaneously the demand on cement products will increase. The latter will lead to increase the energy and raw materials consumption and therefore RDF as substitute fuel could be a viable option.

The 17 plants are located in 17 different Wilayas, and in different part of the country. Most of the plants are located in the north of the country where 65 % of the population live (Fig. 4). Therefore, as for the 17 Wilayas, the availability of raw fresh waste of about 4.6 Million tons of waste per year (counts 35 % of the total national waste production) as well as the availability of the end users (17 cement plants) make the concept of RDF co-processing is viable treatment option for Algeria.



Fig. 4: Locations of Cement plants in Algeria (Google Satellite)

The legal framework, financial framework, inter-link between institutional bodies, technical aspects, capacity building, stakeholder involvement are the main functional elements for adopting any waste management concept or strategy.

6 Summary

Solid waste management has become one of the major environmental problems facing Algerian municipal authorities. It has been aggravated over the past few years by the significant increase in the volume of waste generated as well as qualitative changes in its composition. The provision of adequate waste management services is critical because of the potential impact on public health and on the environment. Lack of planning, lack of proper disposal, limited collection services, use of unsuitable technology, insufficient financing, limited availability of trained and skilled manpower together with massive and sudden population

increases are considered to be the main problems facing solid waste management system in Algeria.

Being faced by these challenges related to municipal solid waste management, and with expectations of increasing urbanization and subsequent increase in quantum of generated waste, Algeria is seeking for sustainable solutions to improve its waste management system by utilizing the untapped resources in the waste streams.

Specifically, it has approved that RDF co-processing in cement kiln has several advantages that could be achieved, which can be summarized as reduces the use of non-renewable fossil fuels such as natural gas, financial savings, maximizes energy recovery from waste, contributes towards minimizing emissions, and reduction of the waste amount for landfilling.

Cement manufacturing requires extremely high temperatures, it consumes more energy than other industrial processes, and it is also responsible for a large part of Greenhouse Gas (GHG) emissions. Experiences from different developed countries have shown that the use of waste as alternative fuels by cement plants is both ecologically and economically beneficial. RDF utilization contributes the reduction of the energy costs as well as cement production. Moreover, using RDF as substitute fuel, the quantities of waste destined for dumping or burning will be reduced which means less dumping and landfill sites required.

Considering the experiences of the developed countries, the availability of the fresh raw materials and end users. Co-processing of RDF is one of the most suitable and viable treatment solutions for the Algerian waste management system.

References

- [1] Reza, B.; Soltani, A.; Ruparathna, R.; Sadiq, R.; Hewage, K. (2013). Environmental and economic aspects of production and utilization of RDF as alternative fuel in cement plants: A case study of Metro Vancouver Waste Management. *Resour. Conserv. Recycl.* 2013, 81, 105–114.
- [2] Hemidat, S.; Saidan, M.; Al-Zu'bi, S.; Irshidat, M.; Nassour, A. and Nelles, M. (2019). Potential Utilization of RDF as an Alternative Fuel for the Cement Industry in Jordan. *Sustainability*. 11 (20), Pp: 1–23.
- [3] Usó'n, A.A.; Lo'pez-Sabiro'n, A.M.; Ferreira, G. and Sastresa, E.L. (2013). Uses of Alternative Fuels and Raw Materials in the Cement Industry as Sustainable Waste Management Options. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 23: 242–260.
- [4] Madlool, N.A.; Saidur, R.; Hossain, M.S. and Rahim, N.A. (2011). A Critical Review on Energy Use and Savings in the Cement Industries. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 15: 2042–2060.

- [5] Velis, C.A.; Longhurst, P.J.; Drew, G.H.; Smith, R. and Pollard, S.J.T. (2010). Production and Quality Assurance of Solid Recovered Fuels Using Mechanical-Biological Treatment (MBT) of Waste - A Comprehensive Assessment. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, vol.40: 979-1105.
- [6] National Office for Statistics (ONS 2019).
- [7] National Agency of waste (AND 2018).
- [8] Report AND: Municipal solid waste characterization in the northern, semi-arid and arid zones in Algeria 2014.
- [9] Fayza S. Hashem.; Taha A. Razek.; Hani A. Mashout.; (2019), Rubber and plastic wastes as alternative refused fuel in cement industry *Construction and Building Materials* 212 (2019) 275–282.
- [10] Md. Uzzal Hossain.; Chi Sun Poon.; Michael Yue Kwong Wong.; Aung Khine.; (2019), Techno-environmental feasibility of wood waste derived fuel for cement production *Journal of Cleaner Production* 230 (2019) 663e671.
- [11] Nassour. A.; (2013); Energy to Waste – Co-incineration a Feasible Strategy for MENA Region. The Regional Solid Waste Exchange of Information and Expertise Network in Mashreq and Maghreb countries (SWEEP-Net), Oct. 2013.
- [12] Ketelsen. K.; and Nelles. M., (2015). Status and new trends / perspectives of MBT in Germany. In proceeding of Waste-to-Resources 2015. 6th International Symposium MBT, MRF & Recycling.
- [13] Nelles. M.; Morscheck. G.; Lemke. A.; and El Naas. A.; (2017), Chapter 18: Treatment of the municipal and industrial waste water. In: *Applied Bioengineering: Innovations and Future Directions*. First Edition. Edited by Toshiomi Yoshida. Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA.
- [14] Nelles. M., (2013). Mechanisch-biologische Abfallbehandlung in Deutschland – Entwicklung, Status und Ausblick, Beitrag in: Thomé-Kozmiensky, K.; Pomberger, R. (Hrsg.): O. Universitätsprofessor Dr. Karl E. Lorber – Festschrift zur Emeritierung, S. 191-199, ISBN 978-3-944310-03-9 (10/2013).
- [15] Antonio. Gallardo.; MarCarlos.; M.D. Bovea.; Francisco J. Colomer.; Fernando. Albarraan.; (2014), Analysis of refuse-derived fuel from the municipal solid waste reject fraction and its compliance with quality standards- *Journal of Cleaner Production* 83 (2014) 118-125.
- [16] Sarc. R.; and Lorber. K.E.; (2013). Production, Quality and Quality Assurance of Refuse Derived Fuels (RDFs). *Waste Management* (2013), Vol. 33: 1825–1834.
- [17] Nickolaos Chatziaras Constantinos.; S. Psomopoulos Nickolas.; J. Themelis; (2016), Use of waste derived fuels in cement industry: a review, *Management of Environmental Quality: An International Journal*(2016), Vol. 27 Iss 2 pp. 178 – 193.
- [18] F. N. Stafford a.; M. D. Viquezb.; J. Labrinchac.; D. Hotzaa.; (2015), Advances and challenges for the co-processing in Latin American cement industry *Procedia Materials Science* 9 (2015) 571 – 577.
- [19] Azad Rahman.; M.G. Rasul.; M.M.K. Khan.; S. Sharma.;(2013), Impact of alternative fuels on the cement manufacturing plant performance: an overview *Procedia Engineering* 56 (2013) 393 – 400.

- [20] Renato Sarc.; IM. Seidler.; L. Kandlbauer.; KE. Lorber.; and R.Pomberger;(2019), Design, quality and quality assurance of solid recovered fuels for the substitution of fossil feedstock in the cement industry – Update (2019) Waste Management & Research 1–13.

Contact

Asma Sakri, Ali Aouabed

Functional analysis laboratory and treatment methods, University of SAAD DAHLAB BLIDA1, 09000 Blida, Algeria

Correspondence

✉ asmaa.sakri09@gmail.com

PD Dr.-Ing. habil. Abdallah Nassour

Department of Waste and Resource Management, Rostock University,
18059 Rostock

Odor Control in Composting Facilities

Abstract: Treatment of municipal organic waste with composting method results in prevention of leachate generation and greenhouse emission in landfills which has pivotal role in environmental conservation. Therefore, composting is currently one of the most popular methods for bio-waste treatment around the world. However, many challenges have faced development of recycling organic wastes, particularly in case of food and kitchen wastes such as odor emission. Most feedstock materials naturally contain odorous and due to the time lag between residential disposal, collection and transportation to composting facility, they often begin rotting and odor emission prior to process. In addition, intermediate breakdown products of larger molecules, such as fats, carbohydrates and proteins are intrinsically odorous. Moreover, short supply of oxygen or high percent of moisture during process creates bad smell by formation of anaerobic condition. Odor emission generally counts as a disadvantage of composting facilities. Hence, it can be controlled through better facility design and operations management. This paper focuses on emission controls in municipal composting facilities. Odor management strategies in composting facilities include design criteria (negative-air tipping buildings, covered structures, covered piles), applied technologies (exhaust air treatment systems, flaring) and process control (C/N ratio, bulk density, pile size, aeration, oxygen, moisture content, temperature). Other methods to address malodors are use of Effective Microorganism (EM) and high carbon content additives.

Key words: organic waste, composting, odor, emission control

Introduction

Organic waste disposal and treatment has been always a significant sustainability challenge in urban areas (Das et al., 2019). Mismanagement of organic waste poses a major risk to environment and human health as well as the loss of valuable nutrient resources (Parvaze and Kumar, 2019). Introduction of sustainable integrated solid waste management concept in recent decays aims to recycle the bio-waste and convert it into a value-added product. Composting is a management strategy for treatment of organic materials in the municipal solid waste (MSW) stream. Socio-economic and environmental issues associated with implementation of waste-to-energy and landfilling contribute to more attractiveness of composting comparing to other organic waste treatment methods.

Off-site emission is a major concern in bio-waste treatment facilities; the nuisance to the surrounding area contributes to inhabitant's complaints and non-acceptance of the facility. Depending on weather and topographical conditions, odors may be carried away several kilometers; usually the significant effect is occurred within 500 m off site (He'roux et al., 2004). Legislations in several countries consequently set standard distances from the facility to the nearest accommodations (e.g., Germany: 300 m; BimSchV, 2001).

The malodor problem of composting facilities is not considered to cause health problems directly (Cheng et al., 2019). Malodors have impact on environmental health and result in defensive reactions of people due to psychological effects (Lu, 2020). These gaseous emission problems in urban areas with high population density can considerably reduce quality of life, limit performance in some professions (such as food preparation), lead to nutritional difficulties and render individuals more vulnerable to hazards such as fire, chemical toxins in the environment and spoiled food (Miwa et al., 2001). For these reasons, an adequate waste gas management strategy has to be implemented.

Coposting Process and Odor Formation

Composting is the most globally practiced method for recycling the organic wastes. It is defined as aerobic putrefaction and stabilization of organic materials. The biological process gives rise to temperatures through microbial activity. Thermophilic condition secures the final product from pathogens and weeds (Oazana et al., 2017). Composting can be implemented by using close or open systems. In close method, the process is carried on in reactors or boxes by automatic control of temperature and moisture. Open air systems are classified based on aeration methods into; windrow piles using machinery turning and static piles with forced aeration system (Aspray et al., 2015).

Large municipal compost facilities use numerous processing steps, buildings, and complex machinery to produce finished compost for market. While facilities may vary slightly in their setup, key steps or features that are common to all facilities include ensuring the raw materials to be well-blended to obtain optimal initial conditions (pile dimensions, porosity, moisture, C/N ratio, etc.) for rapid decomposition. Providing all the equipment and tools required for efficient composting process; in-situ measurements tools (temperature, O₂, CO₂, pH, etc.), turning machine, watering system, laboratories for the purpose of samples analysis.

The odorous compounds in composting process are mainly consisted of organic sulfides, mercaptans, amines, and volatile fatty acids (VFA) (Zhang, 2008). Terpenes, ammonia, alcohols, and hydrogen sulfide can also contribute to malodor problems (Smet et al., 1999). Most of these compounds are intermediates and/or reduced in chemical process. The generation, accumulation and discharge of these gaseous emissions to the surrounding area can be an indicator to inadequate process controls; mixing feedstock with bulking agent, pre-processing, aeration rates (oxygen and moisture content) and etc. This results in immature and low quality final product as well as wide release of odorous compounds.

Odor Management

A large portion of odorous emissions can be avoided by optimal organic waste management system; starting from type of feedstock, collection method and treatment method in composting facilities. Raw input materials with high protein

content are above all susceptible to production of odorous compounds. Proteins are made up of amines, which contain and may release volatile nitrogen (amines and ammonia) and volatile sulfur (organic sulfides, mercaptans, and hydrogen sulfide). Feedstock with high amine and protein content include poultry manure, bio-solids, food waste, and green waste (Miller, 1993). Moreover, raw organic materials containing high proportions of carbohydrates, fats and oils decompose quickly, often producing VFA. This mostly occurs due to low oxygen content; therefore storage of the biodegradable waste and in particular food waste from residential and commercial areas in collection bins as well as composting facility should be minimized.

The management strategy for avoiding odorous emissions in composting facility is taken into consideration based on the nature of feedstock, composting method and applied technology (figure 1). Controlling emission is more problematic at open air composting facilities. In-vessel systems, semi-permeable cover, enclosed implementation of high emission potential part of process like mixing and grinding and utilization of gaseous emission in an incineration facility nearby are effective method to minimize fugitive emissions. Routine cleaning of the processing plant by high pressure water washers may help to minimize potential sources of fugitive emissions (Boisch, 2001).

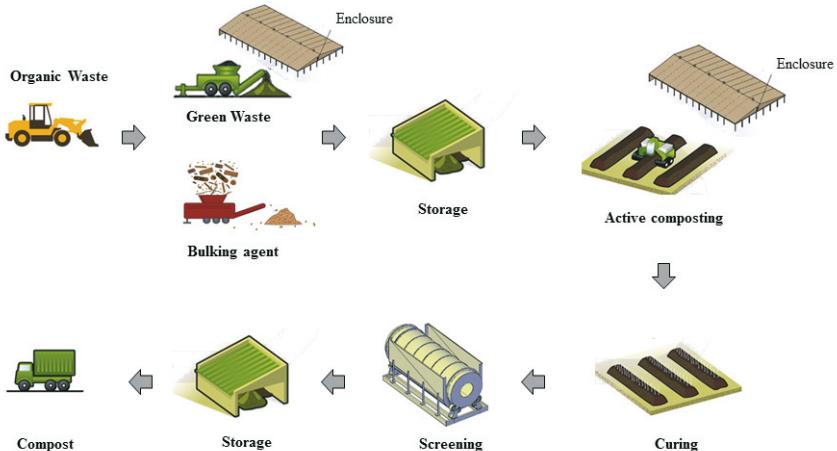


Fig. 1: Layout of a large scale compost facility considering odor management

Best management practices preventing the emission of odor during composting process in large facilities can be addressed as followed:

Aeration: during the first phase of composting with high microbial activity, optimal aeration rate is 57 cubic meter per hour per dry ton (Ma et al., 2013). Food waste and grass clippings need even greater oxygen ratios (Coker and Gibson, 2013). Aeration provides the biological process with desirable range of oxygen and

adjusts moisture and temperature inside the pile. Food waste compost requires 4.3 %, 18.2 %, and 77.5 % of aeration inputs to biological degradation, moisture control, and temperature control, respectively (Coker and Gibson, 2013). During late phase of composting, when highly biodegradable material has been decomposed and microbial activity is significantly reduced; typical target aeration rates are usually 6-14 ($m^3.h/dt$).

Oxygen Content: The minimum suggested oxygen concentration inside a pile is 8-10 %; whereas the ideal oxygen content is 10-18 % during the initial composting stages (Coker and Gibson, 2013). The presence of required oxygen proportion in the pile increases the activity of aerobic microorganism which reduces the anaerobic condition, the tendency towards low pH negative feedback cycles as well as fugitive odor emission.

Moisture: the ideal moisture range required within a pile for optimal composting process remain 50-55 %, while more than 60 % moisture content creates the potential of anaerobic condition zone (Norbu et al., 2005; Bernal et al., 2009). The feedstocks with high moisture content nature like food waste should paid more attention in this regard. Furthermore, climate condition is significantly affected maintaining the moisture content within desired level; suggested practices include covered structures and/or pile covers. Reducing the water content of food waste prior to pile construction in negative air buildings and high aeration rates during process is other options to control moisture (Coker and Gibson, 2013).

Temperature: Pile temperatures during thermophilic phase of composting process increases rapidly. Optimal decomposition process occurred at the more moderate 55 °C level (Eklind et al., 2007). The temperature > 67 °C result in more than double the ammonia emissions as compared to temperatures of 40 °C and 55 °C (Eklind et al., 2007). Feedstocks with high moisture content nature (food waste and/or green grass clippings) release considerable heat during degradation process which necessitates higher aeration rate to keep the temperature <65 °C. Temperatures higher than 70 °C have been observed to significantly prevent desirable composting. Lower temperature ranges during the first stage of composting controls acid production which reduces the production of odorous compounds; acids and ammonia (Sundberg et al., 2012).

Process Controls: Modern, real-time process controls count as major tools to maintain optimal compost biology. On-line monitoring for pH, acids, oxygen levels, and temperature may be necessary, with automatic adjustments in aeration or other management strategies. It is well-known that aerated static pile composting is more prone to emit odor than windrow composting (Coker and Gibson, 2013).

Pile size: Piles should not exceed 3 m in height with an estimated width of 8 m (Winges, 2011). Larger piles significantly increase the risk of producing anaerobic environments as well as higher thermophilic operating temperature (Richart and Walker, 2006). In large modern facilities active temperature control is practiced via aeration.

Nutrients and C/N ratio: The appropriate mixing of carbon and nitrogen benefit the procedure by providing microbial community with adequate source of food and energy (high level of carbon). The C/N ratio of 25-30 and carbon to sulfur (C:S) ratios of 100:1 are needed for beginning of the process (Miller, 1993). Significant deviations from these ratios negatively impact the compost operation and increase the likelihood of producing odors. Providing desired ratios is mainly achieved by feedstock choices and mixing with various additives.

Bulk Density/Porosity: Air circulation is decreased in the composting pile as bulk density increases. Bulk density is related to moisture content as moist particles are denser. Bulk densities of 600 kilogram per cubic meter or less (Oshins, 2006) are desired which depends upon the nature of feedstock. Grass clippings and food waste are distinguished for having small particle size, high density, and high moisture content with rapid release of internal water to the bulk pile; which demanding close monitoring and control of bulk density through the compost process (Buckner, 2002).

Gaseous Treatment Technology

Biological exhaust air treatment systems are state-of-the-art technologies for emissions of composting processes. The enclosed parts in modern compost facility are usually equipped with these systems; the most relevant systems are bio scrubbers and bio-filters and/or combination of both methods.

Bio scrubbers: Bio scrubbing is a process of biological waste gas treatment in which exhaust air is “washed” in an absorber with a scrubbing liquid. The scrubbing liquid is subsequently drawn off and transferred to an activation tank in which the constituents absorbed to the liquid are degraded by microorganisms. The liquid is continuously cycled through the process (VDI 3478, 1996). Bio scrubbers can be supplied with carrier materials to provide additional surface for microorganisms. The rapidly formed biofilm has a large effect on the degradation efficiency of the scrubber. It even exceeds the impact of the volume of the activation tank. To avoid clogging, the carrier material should have large pores and should be cleaned frequently. Nutrients may be added to the scrubbing liquid if necessary to allow optimal conditions for the microorganisms.

Bio filters: bio-filter is a fixed-bed reactor filled with biologically active packing material. Microorganisms settled on the media feed on the organic compounds that are contained in the waste gas. Bio-filters usually are combined with moist scrubbers. The scrubbers are used to humidify the air passing to the filter in order

to avoid drying of the filter material. Frequently used bio-filter media are: compost, peat, root wood, bark, wood chips (normally used as bulking agent) and various combinations. One important property of the media is the ability to store water. Bio-filters may be open to the atmosphere or enclosed (VDI 3477, 2004).

In open bio-filters the exhaust air flows through its bed in an up-flow direction. The bio-filter bed is up to 2 m deep. A problem with open bio-filters is that its media are directly exposed to climatic conditions, which may influence the filters performance. A hot and dry climate may result in drying the filter media. In these cases a sprinkler system on top of the bio-filter material may be installed. The opposite problem has been reported from places with very humid climates. Enclosed bio-filters are less affected by weather conditions and have higher efficiencies than open filters (Heining, 1998).

Other Odor Treatment Approaches

Effective microorganism

Another biological approach to odor management and high quality compost production is use of effective microorganisms (EMs). Effective Microorganism (EM) is a microbial product that is used in fermentation of organic materials. It contains helpful microorganisms existing in nature; lactic acid bacteria, yeast and phototrophic bacteria (Das, 2000). Many of these species are tolerant of both aerobic and anaerobic conditions as well as tolerant to low pH environments. They are also capable of metabolizing energy-rich substrates such as carbohydrates (Daly and Stewart, 1999). Addition of EM in composting process can inhibit the activity of putrefying bacteria and consequently fewer odors are emitted.

Use of Amendment

The other odor-control method includes addition of carbon-based materials to piles, including activated carbon, high carbon wood ash, and biochar. Utilization of activated carbon is an effective method to control odor, however it is not usually on the table for widespread use due to its high cost. The ash residual from biomass energy combustion is another high carbon content additive to control odor while it is obtainable at relatively low cost. The results from few available scientific literatures indicate non to positive effect of ash application to control odor and efficient composting process. However, at higher quantities, the ash may compromise the quality of the compost as a plant growth medium.

The other high carbon content product in controlling odor and producing high quality soil amendment is biochar, produced through pyrolysis processes. Numerous studies report the significant impact of biochar on composting process and reducing methane emission via carbon sequestration. Increasing the air and water holding capacity, biochar enhance the activity of aerobic bacteria, decreasing the anaerobic condition and therefore reducing odor emission.

Conclusion

Emissions control infrastructure should be carefully considered in design of a composting facility according to the capacity, nature of the feedstock and distance to the neighborhood. Malodor management strategies include design criteria (negative-air tipping buildings, covered structures, covered piles), applied technologies (exhaust air treatment systems, flaring) and process control (C/N ratio, bulk density, pile size, aeration, oxygen, moisture content, temperature). Other methods to address fugitive emissions are use of Effective Microorganism (EM) and high carbon content additives.

References

1. Das, S., Lee, S. H., Kumar, P., Kim, K. H., Lee, S. S. and Bhattacharya, S. S. (2019). Solid waste management: Scope and the challenge of sustainability. *Journal of Cleaner Production*, 228, 658-678.
2. Parvaze, S., & Kumar, R. (2019). Organic wastes in agriculture: Risks and remedies for sustainable agriculture production. *Contaminants in Agriculture and Environment: Health Risks and Remediation*, 1, 21.
3. Cheng, Z., Sun, Z., Zhu, S., Lou, Z., Zhu, N., & Feng, L. (2019). The identification and health risk assessment of odor emissions from waste landfilling and composting. *Science of the total environment*, 649, 1038-1044.
4. Lu, J. G. (2020). Air pollution: A systematic review of its psychological, economic, and social effects. *Current opinion in psychology*, 32, 52-65.
5. Oazana, S.H., Naor, M., Grinshpun, J., Halachmi, I., Raviv, M., Saadi, I., Avidov, R.; Sudharsan, V., Rosenfeld, L., Gross, A. and Laor, Y., 2017. A flexible control system designed for lab-scale simulations and optimization of composting processes. *Waste Management*, Vol. 72, pp. 150-160.
6. Aspray, T.J., Dimambro, M.E., Wallace, P., Howell, G. and Frederickson, J., 2015. Static, dynamic and inoculum augmented respiration based test assessment for determining in-vessel compost stability. *Waste Management*, Vol. 42, pp. 3-9.
7. Zhang, W. (2008). Preventive control of ammonia and odor emissions during the active phase of poultry manure composting (Doctoral dissertation, University of British Columbia).
8. Smet, E., Van Langenhove, H., & De Bo, I. (1999). The emission of volatile compounds during the aerobic and the combined anaerobic/aerobic composting of biowaste. *Atmospheric Environment*, 33(8), 1295-1303.
9. Miller, F. C. 1993. Minimizing Odor Generation. *Science and Engineering of Composting*. H. A. J. Hoitink and H. M. Keener. OH, Ohio State University.
10. Boisch, A., 2001. Geruchsmanagement am Beispiel des Kompostwerkes Butzberg (Odour management practices at the composting plant Bu"tzberg). In: *Abluft 2001, Biologische Abfallbehandlung –Emissionen und deren Behandlung*, Dokumentation der Fachtagung vom 05.-06.11.2001 in Hamburg. In: Stegmann, Doedens, Hensel (Eds.), *Hamburger Berichte*, vol. 17. Verlag Abfall aktuell, Stuttgart, ISBN 3-9806505-9-6, pp. 183-191.

11. Ma, J., Wilson, K., Zhao, Q., Yorkey, G. and Frear, C. (2013). Odor in Commercial Scale Compost: Literature Review and Critical Analysis. Washington State Department of Ecology, 17.
12. Coker, C. and Gibson, T. 2013. Design Considerations in Aerated Static Pile Composting. *BioCycle*, 54(1), 30.
13. Norbu, T., Visvanathan, C., and Basnayake, B., 2005. Pretreatment of municipal solid waste prior to landfilling. *Waste management*, Vol. 25, No. (10), pp. 997-1003.
14. Bernal, M.P., Alburquerque, J.A. and Moral, R., 2009. Composting of animal manures and chemical criteria for compost maturity assessment: a review. *Biore-source Technology*, Vol. 100, pp. 5444-5453.
15. Eklind Y., Sundberg, C., Smars, S., Steger, K., Sundh, I., Kirchmann, H., and Jons-son, H., 2007. Carbon Turnover and ammonia emissions during composting of biowaste at different temperatures, *Journal of Environmental Quality*. 36, 1512-1520.
16. Sundberg, C., Yu, D., Franke-Whittle, I., Kauppi, S., Smårs, S., Insam, H., Romant-schuk, M., and Jönsson, H. 2012. Effects of pH and microbial composition on odour in food waste composting. *Waste Management*, 33(1), 204-211.
17. Winges, K. 2011. An Air Quality Modeling Investigation of Potential Odors from a Composting Facility. Everett, Washington Cedar Grove Composting Facility.
18. Richart, T.L., and Walker, L.P. 2006. Modeling the temperature kinetics of aerobic solid-state biodegradation, *Biotechnology Progress*. 22, 70-77.
19. Oshins, C. 2006. Composting Process. On Farm Composting Handbook. Ithica, NY, NRAES.
20. Buckner, S. C. 2002. Controlling Odors during grass composting. *BioCycle*, 43(9), 42-47.
21. VDI 3477, 2004. Biological Waste Air Purification – Biofilter. VDI/DIN-Handbuch Reinhaltung der Luft, vol. 6. Beuth Verlag, Berlin (DE).
22. VDI 3478, 1996. Biological Waste Air Purification – Bioscrubbers. VDI Guideline 3478. VDI-Handbuch, Reinhaltung der Luft, vol. 6. Beuth Verlag, Berlin (DE).
23. Heining, K., 1998. Biofilter und Biowa“scher – Die Geruchseliminierung bei Kompostwerken (Biofilters and bioscrubbers – odour elimination at composting plants). In: Hamburger Berichte. In: Stegmann (Ed.), Abfallwirtschaft, Technische Universita“t Hamburg- Harburg, vol. 14. Economica Verlag GmbH, Bonn, ISBN 3-87081-158-7.
24. Das, K. C. 2000. Odor Related Issues in Commercial Composting. Y2K Composting in the Southeast Conference and Expo, Charlottesville, VA.
25. Daly, M. and Stewart, D. 1999. Influence of “effective microorganisms” (EM) on vegetable production and carbon mineralization—a preliminary investigation. *Journal of Sustainable Agriculture*, 14(2-3), 15-25.
26. He’roux, M., Page’, T., Ge’linas, C., Guy, C., 2004. Evaluating odor impacts from a landfilling and composting site: involving citizens in the monitoring. *Water Science and Technology* 50 (4), 131–137.

27. BImSchV, 2001. Verordnung über Anlagen zur biologischen Behandlung von Abfallen (30th Federal Ordinance on Ambient Air Protection: Ordinance on plants for biological treatment of wastes). – 30. BImSchV – Artikel 2 der Verordnung vom 20. February 2001, BGBl. IS. 305.
28. Miwa T, Furukawa M, Tsukatani T, Costanzo RM, DiNardo LJ, Reiter ER. Impact of olfactory impairment on quality of life and disability. Arch Otolaryngol Head Neck Surg 2001;127(5): 497–503.

Contact

Haniyeh Jalalipour PhD student

Rostock University, Department of Waste and Resource Management

✉ haniyeh.jalalipou@uni-rostock.de

*Mona-Maria Narra, Vicky Shettigondahalli Ekanthalu,
Susanne Hartard, Gert Morscheck, Satyanarayana Narra,
Michael Nelles*

Municipal solid waste behaviour in the Chinese peri-urban area – Zhaoquanying

Abstract: *With the initiative of promoting sustainable waste management, the government of China has launched new municipal waste management (MSW) classification strategy. In the year 2015 China selected 26 pilot cities for MSW classification with the intention to implement a mandatory waste classification strategy throughout the country. The waste sorting analysis is a vital part of determining the total waste value potential. Sustainable waste management and efficient resource recovery require reliable data on the composition and the source of the generated waste. In this concern, within the consortium of the PERIVAL- waste to value chains in peri-urban environment project, this research provides the detailed results from the sorting analysis of MSW produced in Zhaoquanying town (ZQY), a pilot town in the periphery of Beijing. The waste sorting analysis was carried out in two different seasons to clearly understand the seasonal behavior of the generated waste. The detailed information on the composition, chemical, and physical properties of MSW has been summarised with the aid of sorting, proximate, ultimate, and heavy metal analysis. The outcome of the current investigation can be vital in determining the total waste value potential and to encourage further research on waste specific valorization possibilities. Nevertheless, the provided results are also intended to foster the early intentions of the Chinese government to implement a countrywide mandatory waste classification system.*

Keywords: *Waste management, Municipal waste management in china, Waste sorting analysis, Waste classification*

1 Introduction

The improvement in waste management and efficient resource recovery requires accurate and reliable data on the material composition, characteristics, and the source of the generated waste. The waste analysis can be typically characterized into three phases: (i) sampling of the waste, (ii) sorting the waste into the various category of material fractions (e.g. recyclable and non-recyclable), and (iii) handling, interpretation and valorization possibility of the acquired data. The need for international standards in waste sorting is very crucial in effective waste sampling and sorting activities, and the absence of international standards will make the comparison and analysis of the results challenging [1]. One of the most obvious characteristics of the solid waste is heterogeneity. This behaviour of the waste is directly influenced by local conditions (e.g. collection system and equipment, local sorting guideline, segregation systems, and various other parameters) and the variability in the sampling methodology can influence the applica-

tion of the data outside the local context.

ZQY town is the part of Shunyi district's administrative division located at 30km away from the northeast of Beijing's urban core. ZQY town has a seasonal temperate climate with an annual mean temperature of 11.5°C and semi-humid monsoon [2]. According to the 2010 census conducted by the National Bureau of statistics of the people's republic of china, ZQY town consists of 10804 households and has a population of 30182. The organizing and planning of waste management in small towns like ZQY is very rudimentary. The rudimentary planning and organizing reflect directly on the deficiency of data and information that local officials and decision-makers can rely upon address the issue. Local officials require accurate and reliable data on the material composition, characteristics, and the source of the generated waste for planning effective waste management [3]. Knowledge of waste generation and material composition is very important for the preparation of long-term waste management solutions. Such information also aids in determining the feasibility of waste-energy recovery [4].

The current waste management in ZQY consists of waste drying, incineration in a central incineration plant, and final disposal in the landfill. ZQY is the peri-urban city where most of the produced recyclable wastes are retained by households for further sale or collected by the informal sectors. Unfortunately, there is no effective recovery or reuse of the organic waste produced ZQY. ZQY and several other middle-income countries mostly depend on landfilling and incineration to manage their waste. This research focuses to depict the benefits that proper MSW could potentially offer. The experience of several countries manifests the successful use of kitchen and organic waste in the production of biogas and compost. Similarly, waste such as paper, plastic, glass, and metal holds higher monitorial value to make additional profit. Nevertheless, recovery and recycling of waste have a higher potential in encouraging sustainable waste management practice. Within the consortium of the PERIVAL- waste to value chains in peri-urban environment project the present study provides the results of sorting analysis, chemical analysis and describes the possible plans on valorizing organic waste fractions produced in ZQY. The appropriate technologies are defined based on the outcomes of the waste sorting analysis and their chemical characteristic.

The holistic aim of this study is to deliver a consistent framework for MSW characterization in ZQY and thus support the creation of transparent waste composition datasets. The specific objectives were; (i) waste sorting analysis as per the created waste nomenclature, (ii) chemical characteristic of the produced waste (ultimate analysis, heating value, heavy metal analysis) and (iii) analyzing the obtained data to understand ZQY's waste value potential.

2 Material and methods

2.1 Study area

As part of the PERIVAL – Waste to value chains in peri-urban environments projects, ZQY was selected as a pilot town in the periphery of Beijing. ZQY was selected because it has the optimal prerequisite to link the produced organic waste to the gardening and agricultural sector. The primary and practical research aim of the PERIVAL project is to explore the existing and suitable adapted organization structure for separate collection of waste values (dry/wet, home/road, organic/inorganic) in typical Chinese peri-urban settlement areas. A waste sorting analysis is part of the early definition phase for the implementation of the mandatorily waste classification which is anticipated to be introduced mandatorily into Chinese waste management in the near future (countrywide). The waste sorting analysis is also an important part of determining a total waste value potential analysis (WPA) for the pilot region ZQY. The primary aim of this research is to provide comprehensive details on the waste sorting analysis of ZQY. Besides providing the detailed sorting analysis results, this research also provides the experimental results on the physical and chemical properties of the qualified sample.

2.2 Waste sampling procedure

ZQY town is a part of the Shunyi district's administrative divisions. ZQY town consists of 24 villages with 30182 inhabitants and produces approximately 38 tons of municipal waste/day. The waste generated in these 24 villages is collected and transported to a central waste transfer station in ZQY and treated together. Delivered waste is treated together by compacting to remove leachate and transported further to a centralized waste incineration plant in Shunyi for incinerated. The current sorting analysis was carried out from the freshly delivered mixed waste obtained from the central waste transfer station of ZQY before compaction.

2.3 Sorting analysis

This analysis rather focusing on the source-segregated waste (bulky waste, garden waste, and other segregated waste) it focuses on the classification of the range of mixed residual waste consisting of waste materials with high heterogeneity. The scheme for waste sorting is as depicted in Figure 1. The waste sorting analysis was carried out in the municipal yard of ZQY. The sorting area was open-air sheltered by a roof to restrain any addition of rainwater or other liquids that can alter the character of the waste. Within the consortium of the PERIVAL project two separate waste sorting analysis was carried out in spring 2019 (27 March - 1 April) and in summer 2019 (05 – 11 July 2019). In spring the typical weather was around 15°C and dry and in summer the temperature was usually more than 30°C and rainy. The analysis was made in two different seasons to understand seasonal waste composition changes. The waste composition of potentially recyclable waste of different sources was analyzed as a

part of waste sorting analysis. During these sorting analyzes, qualified samples were taken to determine the waste's physical and chemical properties.

The individual waste types were largely separated during sorting. Even though one plastic bag itself does not represent a large mass fraction, it still can alter e.g. the calorific value of a sample. Hence, plastic bags were emptied to attain their contents. Materials of individual waste pieces were not separated. For instance, lids remained on glass containers. However, plastic bottles that visibly contained remaining beverages were emptied and all forms of adhesion (moisture, dirt) remained on the individual waste pieces. The sorting was to imitate the possible mechanical separation methods of sorting and classification, as they could possibly be used in the actual waste treatment process.

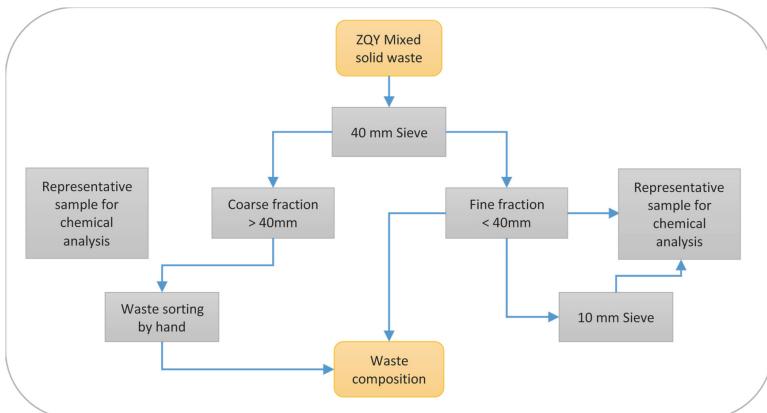


Fig. 1: Scheme for the waste sorting procedure

To determine further chemical and physical waste parameters, samples from all waste fractions except glass, metals, and other mineral wastes are considered. Glass, metals, and mineral wastes have no heating value and relatively inert, thus these waste streams were excluded from further chemical analysis.

The further chemical analysis was planned in Germany. The samples of the individual waste fractions were filled into paper bags and pre-dried using a makeshift ventilator system. The main intention of pre-drying was to reduce the mass and odor of the sample while transporting. The collected samples were dried in a drying cabinet at 105 °C for 24 hours. The water content of the waste samples was calculated considering the fresh weight of samples to the weight of the oven-dried sample. Further, the kitchen and organic waste streams were finely grounded to a grain size of 3mm to get the homogeneous sample for further chemical analysis. The representative samples were chemically analyzed in a certified laboratory. Additionally, the samples with the waste nomenclature 10-40 mm and 0-10 mm (see Table 1) were also chemically analyzed in a certified laboratory without any further physical changes.

2.4 Waste fraction nomenclature

The waste nomenclatures were inspired and adapted from a report from umweltbundesamt [5] and Riber et al., 2009 [6] to fit the local waste fraction behaviour. Special care was taken to ensure the consistent naming of the waste fraction and to avoid the possible misleading of the sorting fractions. Table 1 describes the list of selected fractions that are further categorized into 13 different fractions. The selected nomenclature allows transparent classification by ensuring proper grouping of the waste fraction to produce highly reliable data. For instance, organic wastes are differentiated as kitchen waste and other organic waste. Kitchen waste particularly comprises of the food and beverage products which were intended for human consumption (Edible waste material e.g. fruits, vegetable, meat, etc., and inedible waste material e.g. bones, eggshells, peels, etc.). Recyclable nature of paper and cardboard made these materials to be retained by the households and making there proportion very little in the total waste composition. In this concern, paper and cardboard together classified into one classification category. The fine fraction (< 40 mm) was again screened to give information on the chemical properties of the very fine fraction (0-10 mm). However, the sorting analysis results are depicted as in fine fractions (< 40mm).

Table 1: Waste fraction nomenclature

Material fraction	Description
Kitchen waste	This fraction contains the leftover after human consumption and wooden/bamboo chopsticks (readily biodegradable organic substances that would be suitable for fermentation)
Other organic waste	Garden waste, a mixture of grass clippings, possibly with roots, clippings of bushes and trees, branches, Leaves and directly compostable
paper, paperboard and cardboard (PPC)	Paper and board; magazines, newspapers, packaging materials, books, notebooks
Glass	Packaging glass and usually glass bottles (no color separation)
Plastic packaging	No separation of plastic polymers, plastic films (packaging or non-packaging), plastic containers (usually plastic bottles), Styrofoam
Textile	Clothing and non-apparel, e.g. towels, rags
Metal	Ferrous and non-ferrous, including packaging (cans)
Hazardous material, E-waste	Light bulbs, chemicals, batteries, medical products
Undefined waste, shoes	Shoes and composite materials that not be assigned to any other group
Hygienic materials	Toilet papers and napkins, sanitary products, diapers, condoms
Other mineral waste	Stones, clay pots, ceramics, porcelain, structural ceramics, construction and demolition waste
10-40 mm fraction	Fine section screened from the complete waste amounts
0-10 mm fraction	Very fine section screened from the 0-40 mm fraction

3 Results and discussion

3.1 Sorting analysis results of MSW from ZQY town

Figure 2 depicts the waste composition in ZQY. The waste composition dominated with fraction < 40 mm size with a close following of the kitchen and food waste. The fine fraction (0-10 mm fraction) includes all kinds of materials present in the waste but represents mainly a mixture of mineral and organic particles. Food waste composition consisting of vegetable and animal-derived food waste constituted for 28.69 % in spring and 18.45 % in summer. Followed by food waste, plastic packaging waste constituted 10.69 % and 15.39 % of total waste generated in spring and summer respectively. PPC had a composition of 2.65 and 2.62 %, glass constitutes 2.28 and 3.74 %, metal with 1.85 and 1.01 % respectively in spring and summer 2019. A relatively higher fraction of undefined waste was found in spring season 4.39 % compared to summer 1.70 %. The composition of textile waste was 3.06 and 4.49 % and Hazardous waste/e-waste were 0.55 and 0.27 % in spring and summer season respectively. The percentage of total recyclable waste generated from PPC, glass, and metal constituted 6.78 and 7.37 % in spring and summer respectively. Expect PPC, the analysis results of recyclables were similar to the results obtained from most of the middle-income countries [7], [8] and [9].

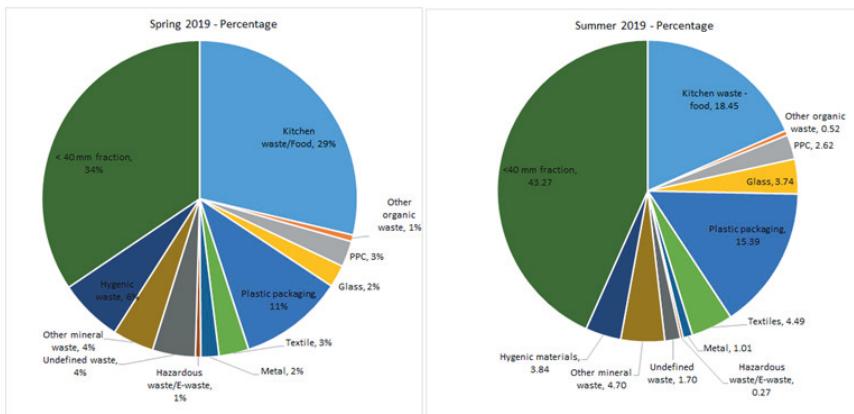


Fig. 2 Composition of mixed solid waste in ZQY town in spring and summer 2019

The composition of recyclable wastes is lower compared to the average MSW composition in the EU and reason seems to be the source-segregation of recyclables and informal waste collections in ZQY [10]. As explained earlier ZQY is the peri-urban city where most of the produced recyclable wastes are retained by households for further sale or collected by the informal sectors. As the characteristic of the organic waste does not provide the direct recycling/monitory benefit this category of waste ends up in the incineration plant without resource recovery. Variations in the source-segregation pattern in ZQY town may potenti-

ally explain differences in the composition of recyclables. Nevertheless, additional factors such as income levels, local sorting guidelines, consumption patterns, demographics, and development in general may influence the composition.

3.2 Economic characteristics of the sorted waste in a different season

Table 2 shows the composition of solid waste generated in ZQY concerning the waste value characteristic analyzed in spring and summer. The seasonal variation increases the composition pertaining to energy recoverable waste from spring to summer at 32.42 and 23.46 % respectively. Another predominant category is a recyclable waste. The recyclable waste composition is relatively lower in spring with 17.49 % in comparison with summer at 22.76 %. The trend with the non-recyclables was found to be higher in the spring season 15.68 % compared to that of summer season 10.51 %.

In the category of energy recoverable waste, the most representative samples comprise of food scrap and textile. Kitchen waste accounts for the significantly higher percentage in the three statuses (< 40 mm fractions are not considered here) having a higher percentage composition in spring. Textile waste shows contradictory behaviour with a higher percentage composition in summer than spring. This behaviour can be due to the start of the academic year leading to households getting rid of old textiles.

Table 2: Waste value characteristic of solid waste generated in ZQY in spring and summer 2019 in percent of the mass

Type of waste	Spring 2019	Summer 2019
Energy recoverable waste in percentage		
Kitchen waste	28.69	18.45
Other organic waste	0.67	0.52
Textile	3.06	4.49
Total	32.42	23.46
Recyclable waste in percentage		
PPC	2.67	2.62
Glass	2.28	3.74
Metal	1.85	1.01
Plastic packaging	10.69	15.39
Total	17.49	22.76
Non-recyclable waste in percentage		
Hazardous waste/E-waste	0.55	0.27
Undefined waste	4.39	1.7
Other mineral waste	4.24	4.7
Hygienic waste	6.5	3.84
Total	15.68	10.51
Finer fractions		
< 40 mm fraction	34.43	43.27

3.4 Chemical characteristic of waste in ZQY in spring 2019

Table 4 represents the chemical characteristic of MSW produced in ZQY in spring 2019. Diversity in organic waste in ZQY (kitchen waste, garden waste, fines < 40mm) creates promising opportunities for optimal utilization of the waste specifically concerning the production of high quality of finished compost and biogas production (kitchen waste). Organic waste contains kitchen waste (nitrogen source) and garden waste (carbon source) guarantees the suitable C/N ratio needed for efficient decomposition. This is due to the fact that the quality of the compost produced depends largely on the level of the C/N start-up ratio and the quality of constituents within the mixture.

High levels of heavy metals represent an obvious concern when the compost is destined to be applied to food crops [22], [23]. Heavy metals do not degrade during the composting process and always become more concentrated due to microbial degradation. Heavy metals in compost products are sourced from the raw materials that have been subjected to composting. Thus, the method of waste collection (i.e. source-separated or mixed collection) and composition characteristics of the raw materials significantly affect the quality of the compost product [24]. In this context, all the samples analyzed showed that the resulting content in ZQY raw organic materials was below the respective upper limits given by German bio-waste ordinance - BioAbfV [25].

From the environmental benefits point of view, the composting and biogas production can be beneficial in treating the organic fractions of solid waste by reducing it up to 30 % of the volume and decreasing the burden of waste entering the already overcrowded landfill sites or expensive treatment by incineration. Converting organic materials from municipal solid waste to fertilizer has many environmental benefits such as reducing greenhouse gas emissions and reducing leachate quantities once disposed of in landfills. The overall waste composition of ZQY and its chemical properties (heavy metals content) indicate that the composting/biogas production is a good alternative for ZQY for the effective management of waste.

Table 4: Chemical characteristic of waste produced in spring 2019

Countries	Composition [in %]							Source	
	Recoverable waste		Recyclable waste			Non-recyclable + other miscellaneous waste			
	kitchen + organic	Textile	PPC	Plastic	Glass	Metal			
Current Study	ZQY (Spring)	29.36	3.06	2.7	11	2.3	1.9	50.11 (includes < 40mm)	
	ZQY (Summer)	18.97	4.49	2.6	16	3.7	1	53.78 (includes < 40mm)	
	Average	24.165	3.78	2.6	14	3	1.4	51.945	
Middle-income countries	Bangladesh	54.9	4.7	13	15	1.1	1.6	-	
	Malaysia	44.8	1.9	16	15	3	3.3	-	
	India	42	-	6	4	2	2	44 (includes Textile)	
	Philippines	49	9	19	17	2.5	6	-	
	Poland	23.7	-	14	11	9.2	2.1	-	
	Average	35.862	4.49	9.5	13	3.4	2.4	-	
High-income countries	Denmark	45.7	1	16	13	2.1	2.3	-	
	France	32.3	10.6	22	11	13	3	8.8	
	Germany	24.1	-	8.2	6.2	2.5	-	-	
	Japan	26	-	46	9	7	8	12	
	UK	20	-	21	9	7	4	-	
	USA	28.4	-	26	13	4.4	9.1	12.9 (includes Textile)	
	Average	29.417	5.8	23	10	6	5.3	-	
low income countries	Algeria	62	-	9	12	1	2	14	
	Ghana	61	1	5	14	3	3	5	
	Kenya	65.6	2.5	17	13	2.1	1.1	-	
	Nigeria	63.6	1.6	9.7	8.7	2.6	3.2	10.6	
	Average	63.05	1.7	10	12	2.2	2.3	-	

4 Conclusion

The study introduced to the detailed waste sorting analysis and chemical characterization of MSW from ZQY town. Even though ZQY falls under middle-income countries, PPC averages about 2.6 % in ZQY town in comparison with an average of 9.5 % in several other middle-income countries. However, the composition of plastic, glass and metal almost similar in ZQY town in comparison with Middle and low-income countries. The overall recyclable waste composition is lower compared to the average recyclable produced in EU and higher-income countries and this can be due to the segregation of valuables at household and geographical factors (as the waste analysis was carried out in village). The chemical characteristic analysis of the waste in ZQY showed that the resulting content in ZQY raw organic materials was below the respective upper limits with the standards given by German bio-waste ordinance for its utilization in preparation of compost. The overall waste composition of ZQY and its chemical properties (heavy metals content) indicate that the composting/biogas production is a good alternative for ZQY for the effective management of waste. However, further experimental research is required to prove and understand the value potential of waste from ZQY town.

Bibliography

- [1] M. E. Edjabou, M. B. Jensen, R. Götze, K. Pivnenko, C. Petersen, C. Scheutz und T. F. Astrup, „Municipal solid waste composition: Sampling methodology, statistical analyses, and case study evaluation,“ *Waste Management*, 2014.
- [2] N. Duana, C. Lin, X. Liu, Y. Wang, X. Zhang und Y. Hou, „Study on the effect of biogas project on the development of low-carbon circular economy —A case study of Beilangzhong eco-village,“ *Procedia Environmental Sciences*, Bd. 5, pp. 160-166, 2011.
- [3] Q. Aguilar-Virgen, P. Taboada-González und S. Ojeda-Benitez, „Seasonal analysis of the generation and composition of solid waste: Potential use - A case study,“ *Environmental Monitoring and Assessment*, Bd. 185, Nr. 6, pp. 4633-4645, 2012.
- [4] N.-B. Chang und E. Davila, „Municipal solid waste characterizations and management strategies for the Lower Rio Grande Valley, Texas,“ *Waste Management*, Bd. 28, Nr. 5, pp. 776-794, 2008.
- [5] B. Bilitewski, J. Wagner und J. Reichenbach, „Best Practice Municipal Waste Management,“ Umweltbundesamt , Wörlitzer Platz 1, 06844 Dessau-Roßlau, 2018.
- [6] C. Riber, C. Petersen und T. H. Christensen, „Chemical composition of the material fraction in Danish household waste,“ *Waste Management*, pp. 1251-1257, 2009.
- [7] S. Towprayoon, S. Shmarin, Q. Gao, A. O. AbdelAziz, J. Farkaš, N. M. Zanzottera, M. Ijaz und C. Sharma, „WASTE GENERATION, COMPOSITION AND MANAGEMENT DATA,“ in Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, 2019.
- [8] M. N. H. a. M. A. M. O. Saeed, „Assessment of municipal solid waste generation and recyclable materials potential in Kuala Lumpur, Malaysia.,“ Bd. 29, 2009.
- [9] V. Srivastava, S. A. Ismail, P. Singh und R. P. Singh, „Urban solid waste management in the developing world with emphasis on India: challenges and opportunities,“ *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology* , pp. 317-337, 2015.
- [10] W. Bidlingmaier, J.-M. Sidaine und E. Papadimitriou, „Separate collection and biological waste treatment in the European Community,“ *Reviews in Environmental Science & Bio/Technology*, pp. 307-320, 2004.
- [11] M. Niyati, „A Comparative Study of Municipal Solid Waste Management in India and Japan,“ 1018. [Online]. Available: <https://core.ac.uk/download/pdf/144446327.pdf>. [Zugriff am 24 March 2020].
- [12] University of Michigan, „<http://css.umich.edu/>,“ August 2019. [Online]. Available: css.umich.edu/factsheets/municipal-solid-waste-factsheet. [Zugriff am 24 March 2020].
- [13] B. T. Eddine und M. M. Salah, „Solid waste as renewable source of energy: current and future possibility in Algeria,“ *International Journal of Energy and Environmental Engineering*, 2012.
- [14] K. Miezah, K. Obiri-Danso, Z. Kádár, B. Fei-Baffoe und M. Y.Mensah, „Municipal solid waste characterization and quantification as a measure towards effective waste management in Ghana,“ *Waste Management*, Bd. 46, pp. 15-27, 2015.

- [15] A. K. Henry, Z. Yongsheng und D. Jun, „Municipal solid waste management challenges in developing countries – Kenyan case study,“ *Waste Management*, pp. 92-100, 2006.
- [16] T. C. Ogwueleka, „Survey of household waste composition and quantities in Abuja, Nigeria,“ *Resources, Conservation and Recycling*, Bd. 77, pp. 52-60, 2013.
- [17] A. M. Omari, B. N. Kichonge, G. R. John und K. N. Njau, „POTENTIAL OF MUNICIPAL SOLID WASTE, AS RENEWABLE ENERGY SOURCE - A CASE STUDY OF ARUSHA, TANZANIA.,“ *International Journal of Renewable Energy Technology Research*, Bd. 3, Nr. 6, pp. 1-9, 2014.
- [18] E. J. A. K. Z. K. J. S. R. Boer, „A review of municipal solid waste composition and quantities in Poland. *Waste Manage*,“ Bd. 30, p. 369–377, 2010.
- [19] L. JOANNIC, „Critical review of waste management in France,“ New York, 2013.
- [20] BMU, Division WR II 1, Dr Andreas Jaron, Christina Kossmann, „Waste Management in Germany 2018,“ Federal Ministry for the Environment, Nature Conservation and Nuclear Safety (BMU), Berlin, 2018.
- [21] WastesWork and AEA, „The composition of municipal solid waste in Wales,“ WRAP and WastesWork, 2010.
- [22] B. P. Chakrabarti, Chakraborty und B. B., „Characterization of municipal solid waste compost in relation to maturity, stability and heavy metals content and pathogens.,“ *Indian Journal of Agricultural Science*, Bd. 71, pp. 791-793, 2001.
- [23] E. Papadimitriou, J. Barton und S. E.I., „Sources and levels of potentially toxic elements in the biodegradable fraction of autoclaved non-segregated household waste and its compost/digestate.,“ *Waste Management & Research*, Bd. 26, pp. 419-430, 2008.
- [24] W. Y. J. Li, D. Shi, G. Liu, Y. Zhao und S. T, „Environmental challenges impeding the composting of biodegradable municipal solid waste: A critical review. Resources,“ *Conservation and Recycling*, Bd. 122, pp. 51-65, 2017.
- [25] BioAbfV, 2013. [Online]. Available: <https://www.gesetze-im-internet.de/bioabfv/BioAbfV.pdf>. [Zugriff am March 2020].
- [26] M. E. Edjabou, M. B. Jensen, R. Götze, K. Pivnenko, C. Petersen, C. Scheutz und T. F. Astrup, „Municipal solid waste composition: Sampling methodology, statistical analyses, and case study evaluation,“ *Waste Management*, 2014.

Contact

Mona-Maria Narra, Scientific staff

Vicky Shettigondahalli Ekanthalu, Scientific staff and PhD student

Prof. Dr. Gert Morscheck, Professor

PD Dr. Saryanarayana Narra, Scientific staff

University of Rostock, Department of Waste and Resource Management

✉ vicky.ekanthalu@uni-rostock.de

Prof. Dr. Michael Nelles, Professor

University of Rostock, Department of Waste and Resource Management

and

Deutsches Biomasseforschungszentrum (DBFZ) Leipzig

Prof. Dr.-Ing. Susanne Hartard, Professor

University of Applied Sciences Trier, Environmental Campus Birkenfeld

*Nour El Houda Chaher, Abdallah Nassour, Michael Nelles,
Moktar Hamdi*

Optimization of food and green wastes mixture ratios during open windrow co-composting process

Abstract: The organic fraction of municipal solid waste (OFMSW) reached currently 68 % of the total waste generated in Tunisia. Thus, a biological treatment is needed. Composting is considered as an effective and sustainable technology from the perspectives of volume reduction, stabilization and releasing the pressure on landfills as well as making a valuable end-product. The aim of this work is to optimize the co-composting substrate ratios of the most dominating kind of organic wastes in Tunisia, which are food and green wastes. To this goal, four experimental windrow piles were monitored. The first containing 100 % of green waste (GW) was taken as a blank test (P_0) and then food waste (FW) was added at different ratios 25, 50 and 75 % of the total fresh mass, noted P_1 , P_2 and P_3 , respectively. The performed experimental trials lasted around 15 weeks with a daily control of the temperature. Indeed, the profile of temperature ascertained the sanitization of the composts gathered from all the trials. Additionally, to assess the process evolution, some parameters were measured at regular intervals to determine the moisture content (MC) (%), total carbon (TC), total nitrogen (TN), C:N ratio and pH. When it came to an assessment of the maturity, stability, and the quality of the generated biofertilizers, further parameters such as respiration activity (AT4) and heavy metal content (HM), were determined at the end of the composting. Variables were compared with the compost quality standards of Tunisia and Germany. Therefore, P_2 illustrated a high quality of the biofertilizer gathered from P_2 in terms of heavy metal concentration, C:N ratio which reached 11.47 and AT4 (lower than 4.89 mgO₂/g TS). Consequently, FW: GW = 50:50 showed the most appropriate ratio for an efficient co-composting operation.

Keywords: Food waste; green waste; co-composting; windrow; biofertilizer; standards composting limitation.

1 Introduction

During the last two decades, waste management is a worldwide challenge because of the increasing amounts of the waste quantities. As the waste management strategy in almost all countries of the Middle East and North of Africa (MENA) region is limited to collection and transport, the implementation of an efficient waste management strategy becomes an alarming concern to compensate the lack of control, and enhance the technical and financial resources [1].

A special attention has to be paid to Tunisia, where the amount of solid wastes is more and more notable, on one hand, and the high rate of organic contents (around 68 %) is sounding the alarm to find out a suitable way reducing waste streams and environmental issues, simultaneously [2;3]. Since January 2011 and following the transformation that occurred at the political level of the

country, Tunisia witnessed a substantial degradation of the environment caused by the mismanagement of solid wastes which wreaked havoc on the urban and rural environments resulting in hot spots of garbage and uncontrolled dumpsites [4]. To reduce the volume of organic solid wastes including domestic waste as well as green waste produced from green areas which are generally sent to landfills, biological treatment seems to be an appropriate technic [5]. This leads to think about recovering the biodegradable streams by managing the disposal of the organic waste and producing a valuable compost, simultaneously [6].

Composting is an ecofriendly biological treatment and a feasible option to ensure a feasible organic waste management technic. It transforms organic residue, such as food waste (FW) into a valuable end-product used in agricultural field as a biofertilizer [7]. Nevertheless, the disproportional nutrients, such as carbon and nitrogen, high moisture content, and compact structure of food waste restrains its utilization as a mono-substrate during the composting process [8]. Then, the addition of a bulking agent (BA) may adjust structural properties, chemical characteristics, composting duration, and leachate formation [9]. Given the attention to the previous studies on the convenience of different kinds of agricultural and green wastes as a bulking agent for FW composting, green waste (GW) was selected to be used during this work [10;11].

To help the decision-makers and stakeholders overcome the environmental impact and reduce the quantities of several forms of organic waste that are habitually mixed and sent to landfills, the test of FW and GW co-composting was fulfilled. Therefore, this research presented the findings of source-separated bio-wastes composting in Tunisia. The purpose of this work was to supervise and optimize the operating parameters as well as to select later the optimal FW: GW mixing ratio. To boot, the end-products were analyzed to determine the rate of heavy metal contents in comparison with German compost quality standards.

2 Methods and materials

2.1 Feedstocks and experimental set-up

FW was considered as the main substrate for different aerobic process trials except the blank test. FW was collected from the canteen of Charguia 2-Tunisia. Later on, a manual removing of non-biodegradable items, FW sample consisted of rice, beans and a modest quantity of substance. Once sorted, it was stocked in small vessels at -20 °C to block any biological reaction. Nevertheless, regarding the BA which provides the composts matrix with the appropriate porosity and sustains the aerospace needed for oxygen transfer, GW was obtained from the National Center for Environmental Technologies of Tunis (CITET).

Four windrows were carried out during 15 weeks at the CITET. To sustain a desirable range for microbial activities, the sustenance of the needed aeration and the requested moisture content were ensured by regularly manual turning as

well as a scheduled moistening during the composting procedure. The volume of each windrow was around 3 m³ and the proportions of the initial materials mixed, on a fresh mass basis were as follows:

- P0 (Blank test): 100 % GW;
- P1: 25 % FW + 75 % GW;
- P2: 50 % FW + 50 % GW;
- P3: 75 % FW + 25 % GW;

2.2 Analytical methods

During the composting period, a daily monitoring of both of ambient and pile temperatures was achieved. Using a sensor (TESTO 175.T2 Logger), pile temperature was recorded in different depths of the windrow, and the average of six measurements was estimated. To ensure a performed degradation of the organic matter, the required aeration was ensured by a planned turning frequency referring to the temperature profile. Additionally, the sampling was collected at regular intervals - each two weeks - to evaluate the progress of the aerobic process. So, three representative samples were collected to determine physical-chemical features such as moisture content (MC) (%), total carbon (TC), total Kjeldahl nitrogen (TKN), and pH. Hence, for MC and TC determination was reached according to NF ISO 11464. Yet, for TKN and pH measurement were realized in reference to the Tunisian Standards NF ISO 11885 and NF ISO10390 (1994), respectively. Still, to estimate the stability and the maturity of the compost, additive parameters including respiration activity (AT4) and heavy metal content (HM) were fulfilled as described in previous work [12]. The measurement of seven heavy metals (HM) elements (Pb, Ni, Cu, Zn, Hg, Cr and Cd) was performed using ICP-OES, following Standard ISO 11885 (2007) to evaluate the quality of the end product and then compared it to Tunisian and German quality requirements for compost. Table 1 summarizes the initial characteristics of the feedstocks used during the composting process.

Table 1: Characterization of raw materials and initial blends

Parameters	Units	GW	FW	P0	P1	P2	P3
pH	-	6.51	4.22	7.21	6.91	5.65	4.91
Moisture Content (MC)	(%)	41.12	54.23	64.90	60.95	63.40	65.30
Total Solids TS	(%)	58.88	45.77	35.10	39.05	36.60	34.70
Total Organic Carbon TOC	(% TS)	48.81	34.82	-	-	-	-
Total Kjeldhal Nitrogen NTK	(% TS)	1.12	2.02	-	-	-	-
C:N ratio	-	43.58	17.24	43.58	36.99	30.41	23.82
Potassium K	(g/kg TS)	9.07	10.94	9.18	8.45	2.50	3.18
Phosphorus P	(g/kg TS)	2.01	3.17	3.54	4.48	0.39	0.35
Nickel (Ni)	(mg/kg TS)	9.63	12.14	-	-	-	-
Cadmium (Cd)	(mg/kg TS)	0.07	0.16	-	-	-	-
Zinc (Zn)	(mg/kg TS)	25.81	53.70	-	-	-	-
Copper (Cu)	(mg/kg TS)	17.83	15.36	-	-	-	-
Lead (Pb)	(mg/kg TS)	2.12	4.46	-	-	-	-
Mercury (Hg)	(mg/kg TS)	-	0.02	-	-	-	-

3 Results

3.1. Temperature profiles during the composting process

Temperature is a critical factor that has to be controlled during the whole composting process to monitor the biodegradability of the organic materials [13]. Figure 1 illustrates that the four typical composting stages were achieved for the different trials which confirmed the good progress of the aerobic digestion. However, each assay presented a specific temperature profile depending deeply on the input composition. Indeed, thermophilic stage was fulfilled in different periods for each pile and lasted 16, 17, 23 and 11 days for P0, P1, P2 and P3, respectively. However, the achievement of the thermophilic temperature was pretty much variable to be launched. Therefore, it took 8, 5, 2 and 4 days after the experimental set-up to attain the desired range characterizing the thermophilic phase [45 °C-65 °C] and reached maximum temperatures of 60 °C, 63 °C, 66 °C and 61 °C, for P0, P1, P2 and P3, respectively [14]. Then, the mesophilic and the maturation stages were triggered and the temperature of each trial has been stabilized to ambient temperature. Thus, the feedstock composition played a vital role on the development of the microorganisms that proliferated in the composting matrix which ascertained the temperature tendencies of P0 and P1. In fact, GW is characterized by a low decomposition rate which is due to its lignocellulosic structure and then more time is required to decompose efficiently that kind of residues [15]. Considering the relatively high proportion of FW on the composting assays P2 and P3, it was notable that the thermophilic stage and the attained temperatures were higher than P1 and P2 which might be due to the presence of easily degradable organic matter providing by FW. Results are in compliance with Oviedo-Ocaña et al., (2017) who tested the co-compos-

ting effects of FW and GW and proved that the addition of FW enhanced the processing times and the end-product quality [10]. However, it should be highlighted that with reference to the hygiene standards of Germany of the compost, the thermophilic temperature fulfilled in the current compost experiments was satisfactory to remove the threat arising by pathogens as the temperature was maintained higher than 55 °C during two weeks [12], except for P3 which kept the temperature higher than 55 °C during uniquely 11 days.

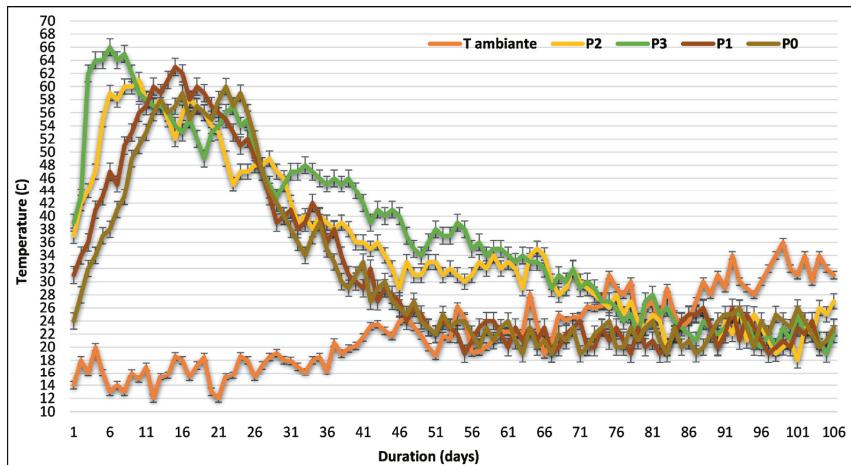


Fig. 1: Temperature evolution during the composting process.

3.2. pH and moisture content evolution

The initial pH values for all trials ranged between 4.91 and 7.21 (Fig. 2). Indeed, pH was affected by the feedstock composition of each pile, particularly, because of the acidic aspect of FW used which influenced the pH of the mixture. Although it is known that an acidic pH is not an impediment to the process, Sundberg and Jönsson indicated that pH had only an impact on the kinetics, and then on the type and rate of reactions [16]. Then, during the thermophilic phase, pH values were always in an acidic range to reach 6.22, 6.17, 6.81 and 6.97 at the end of the 5th week, for P0, P1, P2 and P3, respectively. The acidic pH tendencies were a result of the consumption of the carbonaceous elements and then the dissolution of large amounts of CO₂ into the compost as well as the release of small amounts of acid substances [12]. Once the temperature decreased, pH fluctuations had tended to neutral range. However, the matrix pH of the trials including high rates of FW was characterized by an increased pH to arrive to 8.12 and 8.97 for P2 and P3, respectively. This aspect might be a result of the consumption of the nitrogen compounds of FW and its conversion to aqueous nitrogen forms [17]. At the end of the process, similar pH values were observed for all the trials to be in acceptable range and near of the neutrality indicating the quality of the biofertilizer produced [18].

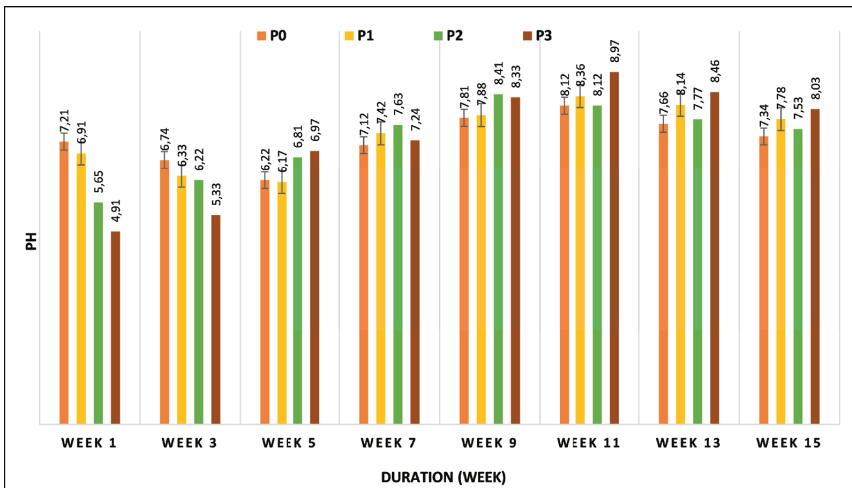


Fig. 2: pH evolution during the composting process.

3.3. End-products characteristics

3.3.1. Compost stability and maturity: C:N ratio and AT4 monitoring

When it comes to the control of the microbiological activity and the progress of the biodegradability, a check of the C:N ratio is needed. Several works have investigated the influence of the initial C:N ratio on composting process to enhance the biodegradation of the organic matter [15;19;20]. Based on this recommendation, the selection of the initial raw material was carefully studied by varying the feedstock mixture in order to find out the optimal mixing ratio. As the blank test (P0) was basically constituted of GW, it was expected that its C:N ratio was a little bit higher than 40 achieving a value of 43.58. However, regarding the trials including FW, P1, P2 and P3 started with C:N ratios of 36.99, 30.41, 23.82, respectively which was relatively low comparing to P0 due to the contribution of FW in terms of nitrogen intake. Then, the blending of organic materials such as FW and GW intended to balance the initial C:N ratio in the required range of [20-40] [9;21]. Following the evolution of C:N ratio during the process, Figure 3 shows a sharp drop particularly by the end of the thermophilic phase which might be entailed by the intensive consumption of the organic residues by the microbial communities. Specifically, a notable decrease of C:N ratio was revealed for P3 to reach 16.77 at the beginning of the cooling stage, when P0, P1 and P2 were characterized by C:N ratios of 29.67, 27.46 and 23.41, respectively. The variable tendencies of C:N ratio might be due the high biodegradability of FW which is a carbon and nitrogen rich material and then the production of CO₂ and NH₃ at high temperatures. The end of the composting process was marked by relatively low values arriving to 17.55, 15.23, 11.47 and 9.23, respectively. So, considering C:N ratio as an index of maturity, 15 weeks were not sufficient for P0 to

attain the maturity needed, at the same time, P3 which presented a relatively low C:N ratio comparing to the desired value revealed the mismatch of GW co-composting with a high rate of FW. Therefore, balancing the feedstock mixture seemed to be a crucial factor to fulfill process maturity within the desired range [21]. Similar results have been observed by several researchers who have managed GW as a co-substrate for FW composting and proved the improvement of the organic residues degradability once an equilibrated C:N ratio was adjusted [8;10].

According to the German categorization of composts, the limits for stabilization is a respiration activity (AT4) below 16 mg O₂/g TS. Table 2 summarizes the AT4 analysis for the tested samples and illustrated that all the tested compost samples were identified as finished composts. Moreover, basing on German Standards, P0, P1 and P2 were ranked as finished composts in the V class, P0, P1 and P2 with AT4 values of 4.21, 4.89, 5.32 mg O₂/g TS, respectively. However, P3 was classified as a finished compost of IV class with a higher AT4 of 9.21 O₂/g TS. Consequently, the compost produced from different assays was evaluated as finished which ascertain the achievement of the aerobic decomposition of the organic residues.

Table 2: Classification of the compost samples according to German standards based on AT4 analysis.

The class of compost	AT4 (mg O ₂ /g TS)	Product description
I	> 40	Compost raw materials
II	28–40	Fresh compost
III	16–28	Fresh compost
IV	6–16	Finished compost
V	< 6	Finished compost

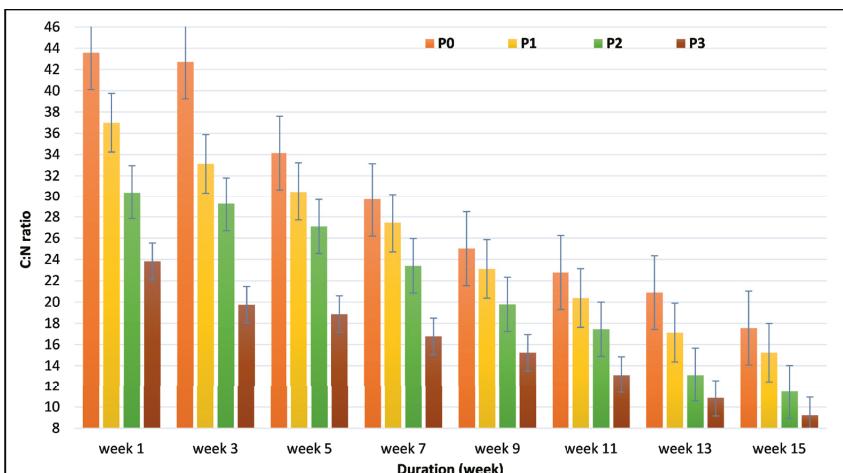


Figure 3: C:N ratio evolution during the composting process.

3.3.2. Compost quality: Heavy metals contents

At the end of the composting process, the speciation of seven heavy metal (HM) elements, Pb, Ni, Cu, Zn, Hg, Cr and Cd, was assessed to be exploited as a quality reference indicator of the biofertilizer generated. Table 3 summarizes the analysis of HM contents and presents the limits on each concentration in line with the applicable law in Tunisia and Germany. According to the maximum amount of heavy metals, two classes – A and B – have been established as German standards. The average values for all samples, were lower than the estimated limits with regard to Class B. Meeting the requirements of the German Standards, composts complied additionally with the Tunisian Standards which ascertained additionally the high quality of the end-products of P0, P1, P2 and P3.

Table 3: The limits of total metal content (mg/kg TS) regarding the standards of certain countries.

Metal	Actual experiments				Compost Quality	
	P0	P1	P2	P3	Tunisia	Germany
					Class A	Class B
Lead (Pb)	2.63	3.47	9.03	9.87	180	150
Copper (Cu)	13.54	23.61	37.12	42.31	300	100
Zinc (Zn)	37.89	50.19	61.04	61.25	600	400
Nickel (Ni)	12.31	15.47	11.12	13.44	60	50
Cadmium (Cd)	0.09	0.23	0.60	0.84	3	1.5
Chrome (Cr)	8.12	10.94	33.90	37.17	120	100
Mercury (Hg)	0.01	<0.04	<0.04	0.05	2	1.0
						0.7

4. Conclusion

Green and food waste co-composting revealed that the feedstock mixture ratios influenced the whole progress of the organic material decomposition. Indeed, the adjustment of the initial C:N ratio had a crucial impact on the development of the aerobic digestion as well as on the end-product maturity and stability. However, FW:GW = 50:50 seemed to be the most appropriate ratio in terms of process performance and end-product quality. Indeed, this is an aspect ought to be given greater consideration in industrial composting studies. Particularly, as it aims to help decision makers to ensure good practices in terms of biological treatments of organic streams. However, as Tunisia is a semi-arid country which is known by a relatively hot climate throughout the year, further works will be devoted to test the composting of FW and GW at different seasons to evaluate firstly the availability of the organic substrates and later the progress of the process under different climatic conditions.

Acknowledgements

Authors express their sincere appreciation to the National Center for Environmental Technologies of Tunis (CITET) and the canteen of Charguia 2 to provide us with the organic residues used. Authors are also grateful to the Technical Lab for Waste Management and Bioenergy, University of Rostock, Germany, for co-funding this study.

Funding

This research received no external funding.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Authors affiliation

- N.E.H.C: Department of Chemical and Process Engineering, National Engineering School of Gabes, University of Gabes, Tunisia;
- A.N, M.N: Department of Waste and Resource Management, Faculty of Agricultural and Environmental Sciences, University of Rostock, Germany;
- M.H: Department of Biological and Chemical Engineering, National Institute of Applied Sciences and Technology, University of Carthage, Tunisia;

References

- [1] A. M. Negm and N. Shareef, Eds., *Waste Management in MENA Regions*. Cham: Springer International Publishing, 2020.
- [2] O. Mahjoub, A. Jemai, and I. Haddaoui, "Waste Management in Tunisia – What Could the Past Bring to the Future?," in *Waste Management in MENA Regions*, A. M. Negm and N. Shareef, Eds. Cham: Springer International Publishing, 2020, pp. 35–69.
- [3] "ANGED : Agence Nationale de Gestion des Déchets." <http://www.anged.nat.tn/cadre-reglementaire-et-institutionnel.html> (accessed May 05, 2020).
- [4] A. Abdulrahman |, "Solid Waste Management in Tunisia | EcoMENA," Jun. 02, 2018. <https://www.ecomena.org/solid-waste-management-tunisia/> (accessed Jan. 13, 2020).
- [5] F. Di Maria, A. Sordi, and C. Micale, "Energy production from mechanical biological treatment and Composting plants exploiting solid anaerobic digestion batch: An Italian case study," *Energy Conversion and Management*, vol. 56, pp. 112–120, Apr. 2012, doi: 10.1016/j.enconman.2011.11.023.
- [6] N. E. H. Chaher, M. Chakchouk, A. Nassour, and M. Hamdi, "Effects of human activities on solid waste composition in Tunisia," vol. 7, no. 4, p. 8, 2020.

- [7] S. K. Awasthi et al., "Changes in global trends in food waste composting: Research challenges and opportunities," *Bioresource Technology*, vol. 299, p. 122555, Mar. 2020, doi: 10.1016/j.biortech.2019.122555.
- [8] A. Hernández-Gómez, A. Calderón, C. Medina, V. Sanchez-Torres, and E. R. Oviedo-Ocaña, "Implementation of strategies to optimize the co-composting of green waste and food waste in developing countries. A case study: Colombia," *Environ Sci Pollut Res*, Feb. 2020, doi: 10.1007/s11356-020-08103-w.
- [9] B. Jolanun and S. Towprayoon, "Novel bulking agent from clay residue for food waste composting," *Bioresource Technology*, vol. 101, no. 12, pp. 4484-4490, Jun. 2010, doi: 10.1016/j.biortech.2010.01.116.
- [10] E. R. Oviedo-Ocaña, I. Dominguez, D. Komilis, and A. Sánchez, "Co-composting of Green Waste Mixed with Unprocessed and Processed Food Waste: Influence on the Composting Process and Product Quality," *Waste Biomass Valor*, vol. 10, no. 1, pp. 63-74, Jan. 2019, doi: 10.1007/s12649-017-0047-2.
- [11] P. K. Pandey, V. Vaddella, W. Cao, S. Biswas, C. Chiu, and S. Hunter, "In-vessel composting system for converting food and green wastes into pathogen free soil amendment for sustainable agriculture," *Journal of Cleaner Production*, vol. 139, pp. 407-415, Dec. 2016, doi: 10.1016/j.jclepro.2016.08.034.
- [12] N. E. H. Chaher, M. Chakchouk, N. Engler, A. Nassour, M. Nelles, and M. Hamdi, "Optimization of Food Waste and Biochar In-Vessel Co-Composting," *Sustainability*, vol. 12, no. 4, p. 1356, Jan. 2020, doi: 10.3390/su12041356.
- [13] E. Ermolaev, Å. Jarvis, C. Sundberg, S. Smårs, M. Pell, and H. Jönsson, "Nitrous oxide and methane emissions from food waste composting at different temperatures," *Waste Management*, vol. 46, pp. 113-119, Dec. 2015, doi: 10.1016/j.wasman.2015.08.021.
- [14] K. Nakasaki, H. Hirai, H. Mimoto, T. N. M. Quyen, M. Koyama, and K. Takeda, "Succession of microbial community during vigorous organic matter degradation in the primary fermentation stage of food waste composting," *Science of The Total Environment*, vol. 671, pp. 1237-1244, Jun. 2019, doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.03.341.
- [15] P. K. Pandey, W. Cao, S. Biswas, and V. Vaddella, "A new closed loop heating system for composting of green and food wastes," *Journal of Cleaner Production*, vol. 133, pp. 1252-1259, Oct. 2016, doi: 10.1016/j.jclepro.2016.05.114.
- [16] C. Sundberg and H. Jönsson, "Higher pH and faster decomposition in biowaste composting by increased aeration," *Waste Management*, vol. 28, no. 3, pp. 518-526, Jan. 2008, doi: 10.1016/j.wasman.2007.01.011.
- [17] J. Bohacz, "Changes in mineral forms of nitrogen and sulfur and enzymatic activities during composting of lignocellulosic waste and chicken feathers," *Environ Sci Pollut Res*, vol. 26, no. 10, pp. 10333-10342, Apr. 2019, doi: 10.1007/s11356-019-04453-2.
- [18] C. Sundberg et al., "Effects of pH and microbial composition on odour in food waste composting," *Waste Management*, vol. 33, no. 1, pp. 204-211, Jan. 2013, doi: 10.1016/j.wasman.2012.09.017.
- [19] L. L. C. Guidoni et al., "Home composting using different ratios of bulking agent to food waste," *Journal of Environmental Management*, vol. 207, pp. 141-150, Feb. 2018, doi: 10.1016/j.jenvman.2017.11.031.

- [20] X. Wang, W. Zhang, J. Gu, H. Gao, and Q. Qin, "Effects of different bulking agents on the maturity, enzymatic activity, and microbial community functional diversity of kitchen waste compost," *Environmental Technology*, vol. 37, no. 20, pp. 2555–2563, Oct. 2016, doi: 10.1080/09593330.2016.1155650.
- [21] B. K. Adhikari, S. Barrington, J. Martinez, and S. King, "Effectiveness of three bulking agents for food waste composting," *Waste Management*, vol. 29, no. 1, pp. 197–203, Jan. 2009, doi: 10.1016/j.wasman.2008.04.001.

Contact

Nour El Houda Chaher, Scientific staff and PhD student

Rostock University, Department of Waste and Resource Management

Department of Chemical and Process Engineering, National Engineering School of Gabes, University of Gabes/Tunisia

✉ nour.chaher@uni-rostock.de

Energy Efficiency increment of Waste incineration plant in combination with CSP technology in MENA region

Abstract: *Waste incineration is still one of the most widespread and safe technologies for the disposal of mixed waste and especially for cities with dense population of more than one million. Numerous countries in the MENA (Middle East North Africa) region have started projects for constructing and operating of waste incineration plants, but unfortunately, they did not implement them. Therefore, there is a great opportunity for waste incineration, especially in Mega cities (millions of citizenships), if the costs are adjusted to the financial framework of the municipalities. This research illustrates the idea of increasing the efficiency of waste incineration plant by utilizing solar parabolic trough (CSP) as a hybrid system to produce power (30 MWe) and desalinated water around (8,500 m³/day) through utilizing the waste heat.*

1 Introduction:

In spite of the development and progressing in waste management system like in Germany and Europe but still there are many difficulties to transfer and implement this knowledge in developing countries. The main reasons standing behind that there are no secured financial support (economic problems), formulated laws, instructions, and professional organized circumstances [1]. The vast majority of developing countries couldn't solve the problems exist in their waste management sector especially when the transferred technology or concept is not matching with local regulations and conditions. Separation at source concept is a very important technique and it must implemented in the waste management for developing countries, and here some barriers appear, where infrastructure for the cities and municipalities are not prepared to embed such concept [2]. However, this concept will take long time to be implemented, also It should be stated here that all countries who they have robust and integrated waste management system like Germany they include waste incineration plant in their solutions to deal with the rest waste which is still generated after passing through all treatment cycle (hierarchy). Where in Germany there are 68 waste incineration plants in operation with a capacity of around 20 million tons of municipal waste [3]. For large cities in MENA region, the only optimum solution to deal with the mixed waste and the huge amount daily generated waste is the thermal treatment (waste incineration), therefore it can be suggested an incineration plant that can receive 50 % from waste and the rest 50 % can be treated through the other processes like prevention, recycling, composting ... etc. This research introducing a hybrid system consisting of waste incineration – solar thermal power plant to produce power and desalinated water. This system represents an incentive factor for the local governments and decision makers in the region to build up a such power system, where it's verifying different targets at the same time,

treating a huge amount of waste by incineration, harvesting the huge amount of solar energy sticking the MENA region through solar field [4], producing power and desalinated water by MSF (Multi Stage Flash) technology by utilizing the waste heat. On the other hand, this system verifies also an income for municipalities through selling power and potable water, which is a very important point in terms of economic perspectives. This work is totally simulation process to simulate the hybrid system and to expect its performance. Simulated hybrid power plant was achieved by using Epsilon 13.02 software package which was developed by Steag company in Germany.

2 Hybrid System Waste incineration plant in combination with CSP technology and using of heat for water destination:

This system consist of two facilities (power plants), waste incineration and parabolic trough solar field, to produce electric power and potable water. As usual, the main concept of any power plant in the world is to produce electricity but still there is a free source of thermal energy (saturated steam with certain values of pressure and temperature) extracted from the steam turbine after power production phase which can be used in different applications [5]. Unfortunate, in MENA region there is no an integrated infrastructure to use this waste heat for buildings' heating and cooling systems or in industrial symbiosis concept, therefore the optimum utilization is through water desalination facility like Multi Stage Flash (MSF) as shown in fig. 1, to produce drinkable water and solving the problem of water scarcity in the region. Taking into consideration the core of this system is the waste incineration facility, where around 70 % of the energy utilized for superheated steam production in the boiler is coming from the furnace of the waste incineration block.

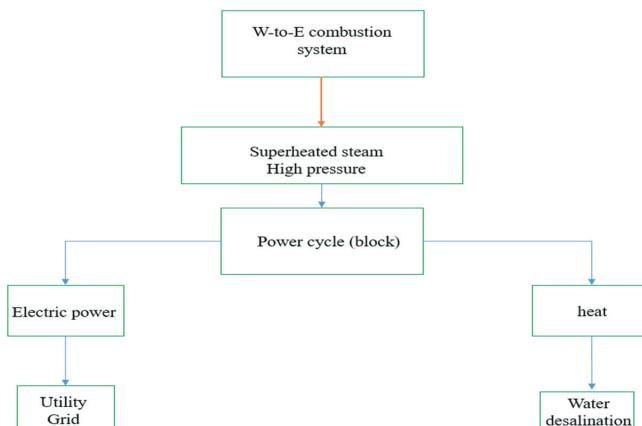


Fig. 1: Hybrid system concept to produce power and potable water.

Two different scenarios were studied and simulated, the first one is standalone waste incineration plant consisting of the combustion system, boiler, steam turbines, Deaerator and condenser. For the second scenario is the hybrid system consisting of waste incineration components and solar parabolic field with $20 * 10^3 \text{ m}^2$ as aperture filed area as shown in fig. 3. As can be seen both facilities are sharing the same power block, the core of connection is the heat exchanger which was erected in the steam cycle to increase the energy content of steam by dragging the extra amount of energy from solar heat transfer fluid. Superheated steam 500 °C was reached through the hybrid scenario. Influent parameters of MSW (municipal solid waste) were considered , the same in both scenarios (1 bar, 40 °C, $8.5 \pm 10\% \text{ kg/s}$) pressure, temperature and mass flowrate respectively. The minimum solar radiation was taken 26 W/m² (for Jordan as a case study) energy was delivered by the heat transfer fluid to the steam cycle, the total power production was 30 MWe, and 8,500 m³/day desalinated water. The parameters and production of this system are summarized in table 1.

Table 1: shows the potential characteristic and abilities of the simulated system.

Parameter	Value	unit
Plant capacity (treated waste)	$200 * 10^3$	Ton/year
Power production	30	MWe
Water desalination	8,500	m ³ /day
Aperture area of solar field	$20 * 10^3$	m ²
Mass flowrate of MSW into the plant	$8.5 \pm 10\% \text{ kg/s}$	Kg/s
Lower calorific Value	10-11	MJ/kg

Table 2: Technical parameters for the main components in a power block.

Component	Parameter	Value
Steam turbine	Isentropic efficiency	85%
Generator	Generator efficiency	85%
Condenser	Steam pressure	0.1 bar
Pump	Isentropic efficiency	80%
Pre-heater	Effectiveness	70%

3 Water scarcity in the MENA region:

There are many reasons for the phenomenon of water scarcity in MENA countries, including population growth, developing economies, changing lifestyles, and climate change. This region has one of the greatest water scarcity situations in the world; it is accommodating almost 6 % of the world's population, while getting only 2 % of the planet's renewable freshwater supply [6] [7]. The average water accessibility per capita in the MENA region is 1100 m³/year, which drops below the water security threshold of 1700 m³/year [6]. Therefore, for the

purpose of this research, it is very important to illustrate the water situation for the vast majority of the countries in the region in terms of water consumption and water availability, as shown in fig. 2, which highlights the water scarcity in 19 countries. As can be seen in fig. 2, the countries are divided into 11 countries with great scarcity, like Bahrain and Kuwait where they do not have any water resources to compensate, and 8 countries with moderate scarcity, like KSA (Saudi Arabia) where they have around 5 billion m³ as surface and ground water while the consumption is around 23.5 billion m³. Note the differences in the scale of the figure (y-axis) due to the huge difference in the available amounts of water in the great scarcity region and the moderate scarcity region.

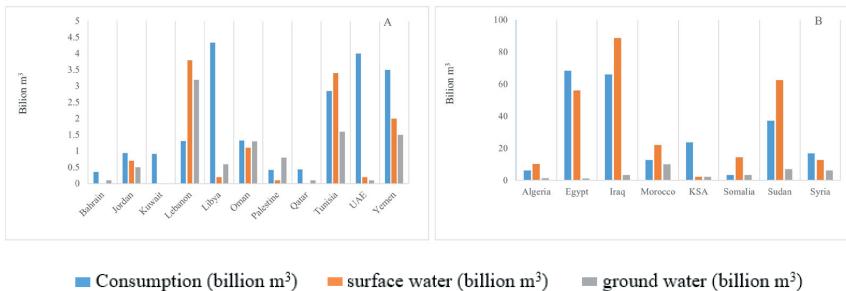


Fig 2: Water scarcity in MENA countries; A: 11 countries with great scarcity,
B: 8 countries with moderate scarcity (data adapted from [8] [9] [10]).

4 Results and Discussion:

Raw waste materials with around 60 % water content and 7 MJ/kg as an average lower calorific value, were used in this research to study the energy recovery of waste by incineration plant. Epsilon Professional was used to carry out this work. The mass flowrate of MSW as mentioned before was $8.5 \pm 10\%$, so in terms of energy there will be around 70 MW entered in both systems (both scenarios). The first point that it should be noted here is the (power +heat)-to-fuel ratio was increased from 30 % for standalone to 43 % with hybrid concept. Power production with hybrid scenario also increased from 15 MWe to 30 MWe, also exhausted flue gas temperature increased to 220 °C which is also can be used to increase the temperature of stoichiometric air used in the furnace or to dry the waste in the bunker before loading into combustion chamber, superheated steam temperature was also increased from 314 to 500 °C, detailed comparison parameters are shown in table 3. Furthermore, the most important point is the potentiality to recover the energy content of MSW (municipal solid waste) in MENA region as it is without any pretreatment process. It should be noted here that the Levelized cost of Electricity has been analysed and evaluated, it was found equal to 0.1 \$/kwh, also cost of each cubic meter of water produced 0.43-1.15 \$/m³.

Table 3 comparison of operational parameters for the power plants.

15 MW standalone			30 MW Hybrid system		
Parameter	Value	Unit	Parameter	Value	Unit
Live flue gas	780	°C	Live flue gas	835	°C
Exhausted flue gas	138	°C	Exhausted flue gas	220	°C
Live steam	314	°C	Live steam	500	°C
Live steam	40	bar	Live steam	40	bar
Waste heat (steam)	46	°C	Waste heat (steam)	46	°C
Waste heat (steam)	0.1	bar	Waste heat (steam)	0.1	bar

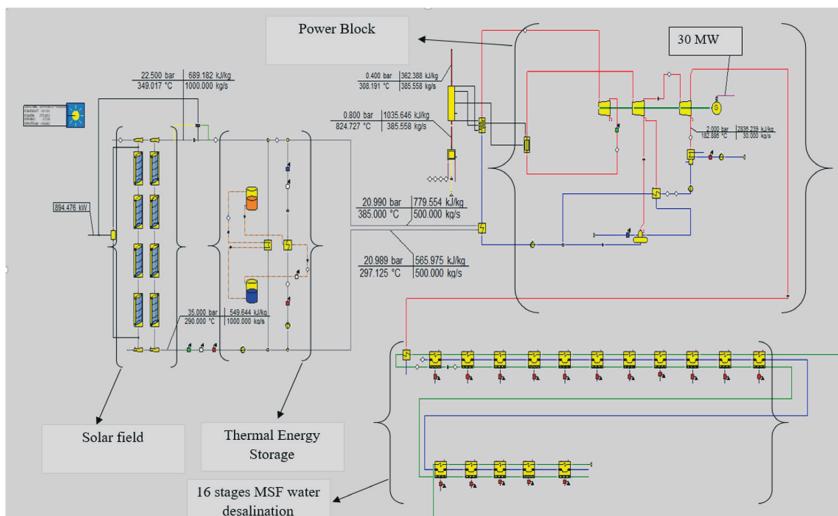


Fig. 3: hybrid power plant (waste incineration and CSP system) for power and water productions.

- Water
- Steam
- Heat transfer fluid
- Water desalinated

References

- [1] Nassour A., Elnass A., Hemidat S., and Nelles M., "Approaches to improve waste management in the Arab Region," Muell und Abfall , Fachzeitschrift fuer Abfall und Resourcewirtschaft, vol. 4, pp. 177-184, 2016.
- [2] Nassour A., Hemidat S., Lemke A., Elnass A., and Nelles M., "Separation by manual sorting at Home: state of the Art in Germany," separation and recycling. The Handbook of Environmental and chemistry, vol. 63, pp. 67-87, 2017.
- [3] Federal Ministry for the Environment, Nature Conservation and Nuclear Safety (BMU),, "Waste Management in Germany 2018 | Facts, data, diagrams," Federal Ministry for the Environment, Nature Conservation and Nuclear Safety (BMU),, Berlin, 2018.
- [4] D. Schüler, S. Wilbert, N. Geuder, R. Affolter, F. Wolfertstetter, C. Prahl, M. Röger, M. Schroedter-Homscheidt, G. Abdellatif, A. Allah Guizani, M. Balghouthi, A. Khalil, A. Mezrab, A. Al-Salaymeh, N. Yassaa, F. Chellali, D. Draou, P. Blanc J. Dubra, Sabry, "The enerMENA Meteorological Network – Solar Radiation Measurements in the MENA Region," solar paces, pp. 1-9, 2015.
- [5] Tchobanoglous G., Kreith F., , ""Handbook of Solid Waste Management",," 2002.
- [6] Mazzoni A., Zaccagni S.,, "Status of Water Resources and Human Health in the Middle East and North Africa Region: An Integrated Perspective," Elsevier, pp. 805-815, 2019.
- [7] Mohammad A. , Birnbaum D., Buritia R., Dieka E., Hasselbringa C., Jimeneza A., Woinowska D., "Water Resources Vulnerability Assessment of MENA Countries Considering Energy and Virtual Water Interactions," Procedia Engineering , vol. 145, p. 900 – 907, 2016 .
- [8] W. Bank, "Beyond Scarcity , water security in the Middle East and North Africa," World Bank Publications, 2017.
- [9] Keulertz, Martin, "WATER AND FOOD SECURITY STRATEGIES IN THE MENA REGION," 2019.
- [10] Programme, United Nations Development, "Water Governance in the Arab Region," United Nations Publications, 2013.

Contact:

M. Sc. Qahtan Thabit PhD student

PD. Dr. Ing. Abdallah Nassour

Prof. Dr. Michael Nelles

Universität Rostock / University Rostock

Professor Abfall- und Stoffstromwirtschaft / Professorship Waste and Resources Management

✉ qahtan.thabit@uni-rostock.de

In dieser Reihe bisher erschienen

Band I

10. DIALOG Abfallwirtschaft MV

– Von der Abfallwirtschaft zur Energiewirtschaft.

Tagungsband, erschienen im Juni 2007, ISBN 987-3-86009-004-6

Band II

Ellen-Rose Trübger

Entwicklung eines Ansatzes zur Berücksichtigung der ungesättigten Zone bei der Grundwassersimulation von Feuchtgebieten.

Dissertation, erschienen im August 2007, ISBN 978-3-86009-006-0

Band III

René Dechow

Untersuchungen verschiedener Ansätze der Wasserhaushalts- und Stofftransportmodellierung hinsichtlich ihrer Anwendbarkeit in Stickstoffhaushaltsmodellen.

Dissertation, erschienen im September 2007, ISBN 978-3-86009-016-9

Band IV

Carolin Włoczyk

Entwicklung und Validierung einer Methodik zur Ermittlung der realen Evapotranspiration anhand von Fernerkundungsdaten in Mecklenburg-Vorpommern.

Dissertation, erschienen im September 2007, ISBN 978-3-86009-009-1

Band 5

1. Rostocker Bioenergieforum.

Bioenergieland Mecklenburg-Vorpommern.

Tagungsband, erschienen im Oktober 2007, ISBN 978-3-86009-013-8

Band 6

Kulturtechniktagung 2007.

Ostseeverschmutzung und Flächenentwässerung.

Tagungsband, erschienen im Januar 2008, ISBN 978-3-86009-018-3

Band 7

Enrico Frahm

Bestimmung der realen Evapotranspiration für Weide (*Salix spp.*) und Schilf (*Phragmites australis*) in einem nordostdeutschen Flusstalmoor.

Dissertation, erschienen im Mai 2008, ISBN 978-3-86009-023-7

Band 8

Jenny Haide

Methode zur Quantifizierung der Einflüsse auf Vorgangsdauern lohnintensiver Arbeiten am Beispiel von Pflasterarbeiten.

Dissertation, erschienen im Juni 2008, ISBN 978-3-86009-024-4

Band 9

11. DIALOG Abfallwirtschaft MV

Chancen und Risiken für die deutsche Abfallwirtschaft im Ausland.

Tagungsband, erschienen im Juni 2008, ISBN 978-3-86009-029-9

Band 10

Stefan Cantré

Ein Beitrag zur Bemessung geotextiler Schläuche für die Entwässerung von Baggergut.

Dissertation, erschienen im Juni 2008, ISBN 978-3-86009-032-9

Band 11

Birgit Wüstenberg

Praxis der Standortwahl von Sportboothäfen im Küstenbereich Mecklenburg-Vorpommerns und Entwicklung einer Bewertungsmethode als Planungshilfe.

Dissertation, erschienen im Juli 2008, ISBN 978-3-86009-033-6

Band 12

André Clauß

Erhöhung der Trinkwasserversorgungssicherheit in Havarie- und Krisensituationen durch neue Handlungsalgorithmen sowie Einbeziehung bisher ungenutzter Ressourcen am Beispiel von Bergbaugrubenwasser.

Dissertation, erschienen im September 2008, ISBN 978-3-86009-037-4

Band 13

Peter Degener

Sickerwasserkreislauf zur Behandlung von Sickerwässern der aerob-biologischen Restabfallbehandlung (Restabfallrotte).

Dissertation, erschienen im Oktober 2008, ISBN 978-3-86009-043-5

Band 14

2. Rostocker Bioenergieforum

Innovationen für Klimaschutz und wirtschaftliche Entwicklung.

Tagungsband, erschienen im Oktober 2008, ISBN 978-3-86009-044-2

Band 15

7. Rostocker Abwassertagung

Fortschritte auf dem Gebiet der Abwasserentsorgung.

Tagungsband, erschienen im November 2008, ISBN 978-3-86009-045-9

Band 16

Christian Noß

Strömungsstrukturen kleiner naturnaher Fließgewässer unter Berücksichtigung von Turbulenztheorie und Dispersionsmodellen.

Dissertation, erschienen im Januar 2009, ISBN 978-3-86009-054-1

Band 17

Ralf Schröder

Entwicklung von Möglichkeiten zur Messung der N₂-Übersättigung sowie Methoden zur Reduzierung der Schwimmschlammbildung.

Dissertation, erschienen im Februar 2009, ISBN 978-3-86009-055-8

Band 18

Elmar Wisotzki

Bodenverfestigungen mit Kalk-Hüttensand-Gemischen.

Dissertation, erschienen im April 2009, ISBN 978-3-86009-059-6

Band 19

Ramez Mashkouk

Untersuchungen zur Adsorption und biologischen Aktivität an Aktivkohlefiltern unter den Bedingungen der Wasseraufbereitung im Wasserwerk Rostock.

Dissertation, erschienen im April 2009, ISBN 978-3-86009-060-2

Band 20

Torsten Birkholz

Handlungserfordernisse und Optimierungsansätze für kommunale Ver- und Entsorgungsunternehmen im Zusammenhang mit demografischen Veränderungen im ländlichen Raum aufgezeigt an einem Beispiel in Mecklenburg-Vorpommern.

Dissertation, erschienen im Mai 2009, ISBN 978-3-86009-061-9

Band 21

12. DIALOG Abfallwirtschaft MV

Aktuelle Entwicklungen in der Abfallwirtschaft.

Tagungsband, erschienen im Juni 2009, ISBN 978-3-86009-062-6

Band 22

Thomas Fritz

Entwicklung, Implementierung und Validierung eines praxisnahen Verfahrens zur Bestimmung von Biogas- bzw. Methanerträgen.

Dissertation, erschienen im Oktober 2009, ISBN 978-3-86009-065-7

Band 23

3. Rostocker Bioenergieforum

Bioenergie – Chance und Herausforderung für die regionale und globale Wirtschaft.

Tagungsband, erschienen im Oktober 2009, ISBN 978-3-86009-065-8

Band 24

Muhammad Mariam

Analyse von Gefahrenpotenzialen für die Trinkwasserversorgung der Stadt Rostock unter besonderer Berücksichtigung von Schadstoffausbreitungsvorgängen in der Warnow.

Dissertation, erschienen im Februar 2010, ISBN 978-3-86009-078-7

Band 25

Manja Steinke

Untersuchungen zur Behandlung von Abwässern der Fischverarbeitungsindustrie.

Dissertation, erschienen im Juni 2010, ISBN 978-3-86009-085-5

Band 26

13. DIALOG Abfallwirtschaft MV

Die Kreislauf- und Abfallwirtschaft im Wandel. Wohin gehen die rechtlichen und technischen Entwicklungen?

Tagungsband, erschienen im Juni 2010, ISBN 978-3-86009-087-9

Band 27

4. Rostocker Bioenergieforum

Zukunftstechnologien für Bioenergie

Tagungsband, erschienen im Oktober 2010, ISBN 978-3-940364-12-8

Band 28

Dirk Banemann

Einfluss der Silierung und des Verfahrensablaufs der Biomassebereitstellung auf den Methanertrag unter Berücksichtigung eines Milchsäurebakteriensiliermittel

Dissertation, erschienen im Januar 2011, ISBN 978-3-86009-087-9

Band 29

14. DIALOG Abfallwirtschaft MV

Abfall als Wertstoff- und Energiereserve

Tagungsband, erschienen im Juni 2011, ISBN 978-3-940364-18-0

Band 30

5. Rostocker Bioenergieforum

Tagungsband, erschienen im November 2011, ISBN 978-3-940364-20-3

Band 31

15. DIALOG Abfallwirtschaft MV

Aktuelle Entwicklungen in der Abfall- und Ressourcenwirtschaft

Tagungsband, erschienen im Juni 2012, ISBN 978-3-940364-26-5

Band 32

6. Rostocker Bioenergieforum

Tagungsband, erschienen im Juni 2012, ISBN 978-3-940364-27-2

Band 33

Ishan Machlouf

Untersuchungen zur Nitratelimination bei der Trinkwasseraufbereitung unter Berücksichtigung syrischer Verhältnisse

Dissertation, erschienen im März 2013, ISBN 978-3-86009-204-0

Band 34

Ralph Sutter

Analyse und Bewertung der Einflussgrößen auf die Optimierung der

Rohbiogasproduktion hinsichtlich der Konstanz von Biogasqualität und -menge

Dissertation, erschienen im März 2013, ISBN 978-3-86009-202-6

Band 35

Wolfgang Pfaff-Simoneit

Entwicklung eines sektoralen Ansatzes zum Aufbau von nachhaltigen Abfallwirtschaftssystemen in Entwicklungsländern vor dem Hintergrund von Klimawandel und Ressourcenverknappung

Dissertation, erschienen im Mai 2013, ISBN 978-3-86009-203-3

Band 36

7. Rostocker Bioenergieforum

Tagungsband, erschienen im Juni 2013, ISBN 978-3-86009-207-1

Band 37

Markus Helftewes

Modellierung und Simulation der Gewerbeabfallaufbereitung vor dem Hintergrund der Outputqualität, der Kosteneffizienz und der Klimabilanz

Dissertation, erschienen im Oktober 2013, ISBN 978-3-86009-402-0

Band 38

Jan Stefan Riha

Detektion und Quantifizierung von Cyanobakterien in der Ostsee mittels Satellitenfernerkundung

Dissertation, erschienen im Oktober 2013, ISBN 978-3-86009-403-7

Band 39

Peter Helmke

Optimierung der Verarbeitungs-, Gebrauchs- und Entsorgungseigenschaften eines naturfaserverstärkten Kunststoffes unter Berücksichtigung automobiler Anforderungen

Dissertation, erschienen im Dezember 2013, ISBN 978-3-86009-404-4

Band 40

Andrea Siebert-Raths

Modifizierung von Polylactid (PLA) für technische Anwendungen

Verfahrenstechnische Optimierung der Verarbeitungs- und Gebrauchseigenschaften

Dissertation, erschienen im Januar 2014 ISBN 978-3-86009-405-1

Band 41

Fisiha Getachew Argaw

Agricultural Machinery Traffic Influence on Clay Soil Compaction as Measured by the Dry Bulk Density

Dissertation, erschienen im Januar 2014 ISBN 978-3-86009-406-8

Band 42

Tamene Adugna Demissie

Climate change impact on stream flow and simulated sediment yield to

Gilgel Gibe 1 hydropower reservoir and the effectiveness of Best Management Practices

Dissertation, erschienen im Februar 2014 ISBN 978-3-86009-407-5

Band 43

Paul Engelke

Untersuchungen zur Modellierung des Feststofftransports in Abwasserkanälen:
Validierung in SIMBA®

Dissertation, erschienen im Februar 2014 ISBN 978-3-86009-408-2

Band 44

16. DIALOG Abfallwirtschaft MV

Aktuelle Entwicklungen in der Abfall- und Ressourcenwirtschaft

Tagungsband, erschienen im April 2014, ISBN 978-3-86009-410-5

Band 45

8. Rostocker Bioenergieforum, 19.-20. Juni 2014 an der Universität Rostock

Tagungsband, erschienen im Juni 2014, ISBN 978-3-86009-412-9

Band 46

Abschlussbericht Projekt CEMUWA - Climate protection, natural resources management and soil improvement by combined Energetic and Material Utilization of lignocellulosic agricultural Wastes and residues

Projektbericht, erschienen im September 2014, ISBN 978-3-86009-413-6

Band 47

8. Rostocker Baggergutseminar, 24.-25. September 2014 in Rostock
Tagungsband, erschienen im September 2014, ISBN 978-3-86009-414-3

Band 48

Michael Kuhn

Mengen und Trockenrückstand von Rechengut kommunaler Kläranlagen
Dissertation, erschienen im Oktober 2014 ISBN 978-3-86009-415-0

Band 49

8. Rostocker Abwassertagung, 10.-11. November 2014 in Rostock
Tagungsband, erschienen im November 2014, ISBN 978-3-86009-416-7

Band 50

Mulugeta Azeze Belete

Modeling and Analysis of Lake Tana Sub Basin Water Resources Systems,
Ethiopia

Dissertation, erschienen im Dezember 2014 ISBN 978-3-86009-422-8

Band 51

Daniela Dressler

Einfluss regionaler und standortspezifischer Faktoren auf die Allgemeingültigkeit
ökologischer und primärenergetischer Bewertungen von Biogas

Dissertation, erschienen im Mai 2015 ISBN 978-3-86009-424-2

Band 52

9. Rostocker Bioenergieforum, 18.-19. Juni 2015 in Rostock

Tagungsband, erschienen im November 2014, ISBN 978-3-86009-425-9

Band 53

Nils Engler

Spuren elementkonzentrationen und biologische Aktivität in NaWaRo-Biogas-
fermentern

Dissertation, erschienen im September 2015 ISBN 978-3-86009-427-3

Band 54

Thomas Schmidt

Möglichkeiten der Effizienzsteigerung bei der anaeroben Vergärung
von Weizenschlempe

Dissertation, erschienen im Oktober 2015 ISBN 978-3-86009-428-0

Band 55

Thomas Dorn

Principles, Opportunities and Risks associated with the transfer of environmental technology between Germany and China using the example of thermal waste disposal

Dissertation, erschienen im Dezember 2015 ISBN 978-3-86009-429-7

Band 56

Uwe Holzhammer

Biogas in einer zukünftigen Energieversorgungsstruktur mit hohen Anteilen fluktuierender Erneuerbarer Energien

Dissertation, erschienen im Dezember 2015 ISBN 978-3-86009-430-3

Band 57

17. DIALOG Abfallwirtschaft MV

Aktuelle Entwicklungen in der Abfall- und Ressourcenwirtschaft

Tagungsband, erschienen im Juni 2016, ISBN 978-3-86009-432-7

Band 58

10. Rostocker Bioenergieforum, 16.-17. Juni 2016 in Rostock

Tagungsband, erschienen im Juni 2016, ISBN 978-3-86009-433-4

Band 59

Michael Friedrich

Adaptation of growth kinetics and degradation potential of organic material in activated sludge

Dissertation, erschienen im Juli 2016 ISBN 978-3-86009-434-1

Band 60

Nico Schulte

Entwicklung von Qualitätsprüfungen für die haushaltsnahe Abfallsammlung im Holsystem

Dissertation, erschienen im Juli 2016 ISBN 978-3-86009-435-8

Band 61

Ullrich Dettmann

Improving the determination of soil hydraulic properties of peat soils at different scales

Dissertation, erschienen im September 2016 ISBN 978-3-86009-436-5

Band 62

Anja Schreiber

Membranbasiertes Verfahren zur weitergehenden Vergärung

von feststoffreichen Substraten in landwirtschaftlichen Biogasanlagen

Dissertation, erschienen im Oktober 2016 ISBN 978-3-86009-446-4

Band 63

André Körtel

Entwicklung eines selbstgängigen statischen Verfahrens zur biologischen Stabilisierung und Verwertung organikreicher Abfälle unter extrem ariden Bedingungen für Entwicklungs- und Schwellenländer, am Beispiel der Stadt Teheran

Dissertation, erschienen im Oktober 2016 ISBN 978-3-86009-447-1

Band 64

Ayman Elnaas

Actual situation and approach for municipal solid waste treatment in the Arab region

Dissertation, erschienen im Oktober 2016 ISBN 978-3-86009-448-8

Band 65

10. Rostocker Abwassertagung, Wege und Werkzeuge für eine zukunftsfähige Wasserwirtschaft im norddeutschen Tiefland, 8. November 2016 in Rostock

Tagungsband, erschienen im November 2016, ISBN 978-3-86009-449-5

Band 66

Gunter Weißbach

Mikrowellen-assistierte Vorbehandlung lignocellulosehaltiger Reststoffe

Dissertation, erschienen im November 2016 ISBN 978-3-86009-450-1

Band 67

Leandro Janke

Optimization of anaerobic digestion of sugarcane waste for biogas production in Brazil

Dissertation, erschienen im Mai 2017 ISBN 978-3-86009-454-9

Band 68

11. Rostocker Bioenergieforum, 22.-23. Juni 2017 in Rostock

Tagungsband, erschienen im Juni 2017, ISBN 978-3-86009-455-6

Band 69

Claudia Demmig

Einfluss des Erntezeitpunktes auf die anaerobe Abbaukinetik der Gerüstsubstanzen im Biogasprozess

Dissertation, erschienen im Juli 2017, ISBN 9978-3-86009-456-3

Band 70

Christian Koepke

Die Ermittlung charakteristischer Bodenkennwerte der Torfe und Mudden Mecklenburg-Vorpommerns als Eingangsparameter für erdstatische Berechnungen nach Eurocode 7 / DIN 1054

Dissertation, erschienen im Juni 2017, ISBN 978-3-86009-457-0

Band 71

Sven-Henning Schlömp

Geotechnische Untersuchung und Bewertung bautechnischer Eignung von Müllverbrennungsschlacken und deren Gemischen mit Böden

Dissertation, erschienen im Juni 2017, ISBN 978-3-86009-458-7

Band 72

Anne-Katrin Große

Baggergut im Deichbau – Ein Beitrag zur geotechnischen Charakterisierung und Erosionsbeschreibung feinkörniger, organischer Sedimente aus dem Ostseeraum zur Einschätzung der Anwendbarkeit

Dissertation, erschienen im Juni 2017, ISBN 978-3-86009-459-4

Band 73

Thomas Knauer

Steigerung der Gesamteffizienz von Biogasanlagen durch thermische Optimierung

Dissertation, erschienen im Juli 2017, ISBN 978-3-86009-460-0

Band 74

Mathhar Bdour

Electrical power generation from residual biomass by combustion in externally fired gas turbines (EFGT)

Dissertation, erschienen im August 2017, ISBN 978-3-86009-468-6

Band 75

Johannes Dahlin

Vermarktungsstrategien und Konsumentenpräferenzen für Dünger und Erden aus organischen Reststoffen der Biogasproduktion

Dissertation, erschienen im September 2017, ISBN 978-3-86009-469-3

Band 76

Sören Weinrich

Praxisnahe Modellierung von Biogasanlagen

Systematische Vereinfachung des Anaerobic Digestion Model No. 1 (ADM1)

Dissertation, erschienen im März 2018, ISBN 978-3-86009-471-6

Band 77

18. DIALOG Abfallwirtschaft MV

Aktuelle Entwicklungen in der Abfall- und Ressourcenwirtschaft

Tagungsband, erschienen im Juni 2018, ISBN 978-3-86009-472-3

Band 78

12. Rostocker Bioenergieforum

Tagungsband, erschienen im Juni 2018, ISBN 978-3-86009-473-0

Band 79

Tatyana Koegst

Screening approaches for decision support in drinking water supply

Dissertation, erschienen im Juni 2018, ISBN 978-3-86009-474-7

Band 80

Liane Müller

Optimierung des anaeroben Abbaus stickstoffhaltiger Verbindungen durch den Einsatz von Proteasen

Dissertation, erschienen im September 2018, ISBN 978-3-86009-475-4

Band 81

Projektbericht Wasserwirtschaft

KOGGE – Kommunale Gewässer Gemeinschaftlich Entwickeln

Ein Handlungskonzept für kleine urbane Gewässer am Beispiel der Hanse- und Universitätsstadt Rostock

Projektbericht, erschienen im September 2018, ISBN 978-3-86009-476-1

Band 82

Adam Feher

Untersuchungen zur Bioverfügbarkeit von Mikronährstoffen für den Biogasprozess

Dissertation, erschienen im Oktober 2018, ISBN 978-3-86009-477-8

Band 83

Constanze Uthoff

Pyrolyse von naturfaserverstärkten Kunststoffen zur Herstellung eines kohlenstoffhaltigen Füllstoffs für Thermoplasten

Dissertation, erschienen im November 2018, ISBN 978-3-86009-478-5

Band 84

Ingo Kaundinya

Prüfverfahren zur Abschätzung der Langzeitbeständigkeit von Kunststoffdichtungsbahnen aus PVC-P für den Einsatz in Dichtungssystemen von Straßentunneln

Dissertation, erschienen im Dezember 2018, ISBN 978-3-86009-484-6

Band 85

Eric Mauky

A model-based control concept for a demand-driven biogas production

Dissertation, erschienen im Januar 2019, ISBN 978-3-86009-485-3

Band 86

Michael Kröger

Thermochemical Utilization of Algae with Focus on hydrothermal Processes

Dissertation, erschienen im Februar 2019, ISBN 978-3-86009-486-0

Band 87

13. Rostocker Bioenergieforum

Tagungsband, erschienen im Juni 2019, ISBN 978-3-86009-487-7

Band 88

12. Rostocker Abwassertagung

Tagungsband, erschienen im September 2019, ISBN 978-3-86009-488-4

Band 89

Philipp Stahn

Wasser- und Nährstoffhaushalt von Böden unter Mischkulturen und Trockenstress

Dissertation, erschienen im Juli 2019, ISBN 978-3-86009-489-1

Band 90

BioBind: Luftgestützte Beseitigung von Verunreinigungen durch Öl mit biogenen Bindern

Projektbericht, erschienen im September 2019, ISBN 978-3-86009-490-7

Band 91

Jürgen Müller

Die forsthydrologische Forschung im Nordostdeutschen Tiefland:

Veranlassung, Methoden, Ergebnisse und Perspektiven

Habilitation, erschienen im Oktober 2019, ISBN 978-3-86009-491-4

Band 92

Marcus Siewert

Bewertung der Ölhabavieorschöpfung im deutschen Seegebiet auf Grundlage limitierender Randbedingungen – Ein Beitrag zur Verbesserung des Vorsorgestatus

Dissertation, erschienen im November 2019, ISBN 978-3-86009-492-1

Band 93

Camilo Andrés Wilches Tamayo

Technical optimization of biogas plants to deliver demand oriented power

Dissertation, erschienen im Februar 2020, ISBN 978-3-86009-493-8

Band 94

Robert Kopf

Technisches Benchmarking mit Standortqualifikationsstudie biochemischer Energieanlagenprojekte (Beispiel Biogas)

Dissertation, erschienen im Februar 2020, ISBN 978-3-86009-494-5