

Schriftenreihe Umweltingenieurwesen

Agrar- und Umweltwissenschaftliche Fakultät

Band 124

Tagungsband

18. Rostocker Biomasseforum

20. und 21. Juni 2024

Veranstalter

Universität Rostock

Landesforschungsanstalt für Landwirtschaft und Fischerei MV

Deutsches Biomasseforschungszentrum gemeinnützige GmbH



18 . ROSTOCKER BIOMASSEFORUM

PROFESSUR

Abfall- und
Stoffstromwirtschaft

Universität
Rostock



Traditio et Innovatio

Schriftenreihe Umweltingenieurwesen

Band 124

Tagungsband

18. ROSTOCKER BIOMASSEFORUM

Veranstalter

Universität Rostock

Landesforschungsanstalt für Landwirtschaft und Fischerei MV

Deutsches Biomasseforschungszentrum gemeinnützige GmbH

am 20. und 21. Juni 2024

Professur

Abfall- und Stoffstromwirtschaft

Agrar- und Umweltwissenschaftliche Fakultät

Universität
Rostock



Traditio et Innovatio

Tagungsband zum 18. Rostocker Biomasseforum

HERAUSGEBER

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

CIP-KURZTITELAUFNahme

18. Rostocker Biomasseforum
Universität Rostock
Agrar- und Umweltwissenschaftliche Fakultät
Rostock, 2024

© 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 978-3-86009-559-1
DOI https://doi.org/10.18453/rosdok_id00004587

Gedruckt in Deutschland auf Recyclingpapier.

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

Inhalt	
Vorwort.....	9
Plenarvorträge	
<i>M. Nelles, E. Angelova, K. Deprie, K.-F. Cyffka, M. Selig; N. Rensberg, P. Kornatz, S. Schaller, T. Thalheim,</i> Stand und Perspektiven der energetischen Verwertung von Biomasse in Deutschland	13
<i>R. Backes, N. Szarka, F. Naegeli de Torres, F. Riedel, L. Blümel, K.-F. Cyffka, S. Richter, J. Kalcher</i> Stand und Perspektiven der stofflichen Biomassenutzung in Deutschland	39
<i>Simon Zielonka, Petra Schüsseler</i> Bioenergieforschung im Rahmen des Förderprogramms Nachhaltige Erneuerbare Ressourcen	63
<i>Martin Maslaton</i> Rechtliche Rahmenbedingungen der Vergütung von Biomasseerzeugnissen ..	71
<i>Claudia Kirsten, Jenny Stukenbrock, Markus Piechotka</i> Aufbereitung von überschüssigen biogenen Reststoffen in der Anklamer Energie Region	81
<i>Natascha Eggers, Fabian Giebner, Torsten Birth-Reichert</i> Orange is the New Green	89
<i>Eric Franke, Sergei Shalnev, Ronny Schimpke, Steffen Krzack, Martin Gräbner</i> Thermochemische Phosphorrückgewinnung aus Klärschlämmen	97
<i>Karin Naumann, Philipp Knötig</i> Erneuerbares Methan aus Biomasse und Wasserstoff	107
<i>Thomas Kreuter, Peter Kornatz, Karsten Wagner, Carola Schuster</i> Harnstoff 3.0 – Vision einer kreislaufbasierten und klimaneutralen Wertschöpfung in Mitteldeutschland.....	111
<i>Elmar Zozmann, Hannes Bluhm, Clara Lenk, Johannes Rupp</i> Ökonomische und sozio-technische Evaluation der Herstellung und Anwendung von Pflanzenkohle.....	121

<i>Sebastian Foth, Erik Fischer, Marina-Adelina Stuparu, Michael Nelles</i> BREC – Bridging the gap between Research and Education for the Circular Bioeconomy	133
----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	-----

Fachforum Biogas

<i>H. Richter, A. Simon, M. Weyd, U. Lubenau, J. Zill, H. Testrich, A. Naumann, L. Dörtelmann, S. Laumann</i> Aufbereitung von Biogas mit keramischen Membranen	151
<i>Jan Sprafke, Elisa Uta Deiß, Tommy Ender, Hans Korte, Michael Nelles</i> Viskositätsmessung in Biogasanlagen – Erkenntnisse aus dem Projekt Biogas-Kohle	159
<i>Jianing Song, Marc Oliver Schmid</i> Experimentelle Untersuchung von den Eluaten aus Rest- und Abfallstoffen	173
<i>Christin Meyer, Sven Korte, Daniel Werner, Harm Drücker</i> MuD SlurryUpgrade	183
<i>Michael Dau, Andreas Gurgel</i> Emissionsminderung bei der Ausbringung von Gärresten durch Ansäuerung (AcidDigSoil).....	193
<i>Rainer Casaretto, Hans Korte, Jan Sprafke</i> Ökonomische Effekte der Pflanzenkohle im Fermentationsprozess	201
<i>Franziska Schäfer, Reinhard Pätz, Alfons Himmelstoss, Reik Ellmann, Jürgen Pröter</i> Kombination anaerober und aerober Verfahren zur Güllebehandlung – GülleKOM.....	209

Kurzbeiträge

<i>Lynn Vincent, Viktor Wesselak, Michael Nelles</i> Bioenergie in Thüringen – aktueller Stand und Rolle auf dem Weg zur Klimaneutralität	223
<i>Cintha Lara, Abdullah Al Saadi, Michael Nelles, Jan Sprafke</i> Kompostierung von biogenen Reststoffen im kleinskaligen Labormaßstab..	229
<i>Suleiman Usman Yunusa, Satyanarayana Narra, Ebenezer Mensah, Kwasi Preko, Aminu Saleh</i> Biomass briquette production using a novel binder:.....	237
<i>Thomas Schliermann, René Bindig, Bettina Stolze, Lukas Lange, Felix Öffner, Giuliano Ercolano</i> Entwicklung eines preisgünstigen und ressourceneffizienten Systems zur Abgasnachbehandlung für Holzgas-BHKW	253
<i>Katrin Oldenburg, Florian Wald, Sven Grochowsky, Leif-Alexander Garbe</i> Physics for Food: Physikalische Hochtechnologien für die Land- und Ernährungswirtschaft	259
<i>Julian Matlach, Lukas Knoll und Jaqueline Daniel-Gromke</i> Klimaschutzorientierte und ressourcenschonende Prozessgestaltung der Kompostierung	267
<i>Mina Abaskharon, Volker Wichmann</i> Einsatzmöglichkeiten von Bioethanol als Kraftstoff für handgehaltene Arbeitsgeräte, eine Übersicht	275
KOOPERATIONSPARTNER	291
DIE VERANSTALTER	307
In dieser Reihe bisher erschienen	315

Das 18. Rostocker Biomasseforum wird mit Mitteln des Bundesministeriums für Ernährung und Landwirtschaft gefördert.

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Diese Veranstaltung wird weiterhin gefördert durch:



Vorwort

Der fortschreitende Klimawandel, starke Biodiversitätsverluste und die aktuellen geopolitischen Krisen machen deutlich, wie wichtig eine sichere und nachhaltige Energie- und Rohstoffversorgung ist. Das gesetzlich festgeschriebene Ziel der Klimaneutralität lässt sich in Deutschland bis 2045 nur erreichen, wenn der Ressourcen- und Energieverbrauch massiv verringert, ein hundertprozentiges Erneuerbares Energiesystem aufgebaut und eine wirkliche Kreislaufwirtschaft implementiert werden. Die nachhaltige, d.h. in der Regel kombinierte stoffliche und energetische Nutzung von Biomasse kann und muss hier einen wesentlichen Beitrag leisten.

Das ambitionierte Ziel der langfristigen Integration von Biomasse und hier insbesondere der biogenen Abfälle und Reststoffe in ein nachhaltiges Energie- und Bioökonomiesystem ist nur erreichbar, wenn die Biomasse effizient, umweltverträglich und mit höchstmöglichem volkswirtschaftlichem Nutzen eingesetzt wird. Es sind zudem konsequente Maßnahmen zur Energieeinsparung und Effizienzsteigerung erforderlich. Neue Technologiekonzepte und Formen der Kaskadennutzung werden ebenso benötigt wie „negative“ Emissionen. Die stoffliche und energetische Kopplung und Kaskadennutzung biogener Ressourcen ist zentrales Element einer klimaneutralen Bioökonomie.

Die aus Biomasse bereitgestellte Endenergie hat mit einem Anteil von > 50 % der Erneuerbaren Energien derzeit eine besondere Bedeutung, die oftmals im öffentlichen Diskurs unerwähnt bleibt. Bezogen auf die Einsatzgebiete waren dies 2022 rund 20 % an der Bruttostromerzeugung, rund 85 % der erneuerbaren Wärme und Kälte im Endenergieverbrauch sowie rund 85 % im Verkehrssektor. Bei der Umstellung z.B. der chemischen Industrie auf Nachwachsende Rohstoffe sind wir mit einem Anteil von < 15 % ebenfalls noch am Anfang, d.h. > 85 % der Rohstoffbasis sind fossiler Natur (alleine 75 % Erdöl). Hier sind künftig auch PtX-Konzepte gefragt, die z.B. die CO₂-Emissionen, vorzugsweise aus der energetischen Nutzung von Biomasse, als Basis für neue Produkte nutzen. Für fast alle relevanten Biomasseströme gilt hier: die optimierte nachhaltige Verwertungsoption ist eine Kombination aus stofflicher und energetischer Nutzung!

Vor diesem Hintergrund haben wir uns auch für eine Anpassung des Tagungsnamens entschieden. Das „18. Rostocker Biomasseforum – Bioenergie und biobasierte Materialien für eine klimaneutrale Zukunft“ wird weiterhin primär die energetische Verwertung der Biomasse in den Fokus nehmen.

Wie schon in den letzten Jahren wollen wir auch zunehmend stoffliche Nutzungsoptionen betrachten, um einen möglichst ganzheitlichen Beitrag zur Weiterentwicklung des Energiesystems und einer biobasierten zirkulären Wirtschaft auf dem Weg in die Klimaneutralität zu leisten.

Insbesondere das direkte Gespräch zwischen Forschern, Praktikern und Politikern soll zu einem Erkenntnisgewinn für alle und zu neuen Lösungsansätzen führen. Das etablierte Rostocker Biomasseforum bietet dafür eine ideale Plattform.



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

Wissenschaftlicher Geschäftsführer
DBFZ Deutsches Biomasseforschungszentrum gemeinnützige GmbH

PLENARVORTRÄGE

Michael Nelles, Elena Angelova, Karen Deprie,
Karl-Friedrich Cyffka, Marco Selig, Nadja Rensberg,
Peter Kornatz, Sven Schaller, Torsten Thalheim

Stand und Perspektiven der energetischen Verwertung von Biomasse in Deutschland

Zusammenfassung: Was hat sich in den letzten Monaten bezüglich der energetischen Verwertung von Biomasse in Deutschland mit Blick auf die nationalen Ziele für Klimaschutz und Energiewende getan? Der vorliegende Beitrag widmet sich dieser Frage auf Basis öffentlich verfügbarer sowie auf Arbeiten des DBFZ Deutsches Biomasseforschungszentrum gGmbH basierender Daten. Der Anteil Erneuerbarer am Primärenergieverbrauch betrug in Deutschland im Jahr 2023 19,6 % – eine leichte Steigerung im Vergleich zu 2022 (ca. 17 %) – und der Beitrag der Biomasse daran war größer als derjenige aller anderen erneuerbaren Energieträger zusammen. Zwar ist der wissenschaftliche Konsens, dass die begrenzten und daher wertvollen Biomassepotentiale bevorzugt in Nutzungskaskaden einzusetzen sind und dass eine energetische Verwertung zielgerichtet erfolgen muss – zum einen in Bereichen, in denen andere Erneuerbare noch oder dauerhaft nicht einsetzbar sind, zum anderen als speicher- und transportfähiger Energieträger, der Versorgungslücken im Gesamtsystem schließt – mittlerweile auch auf politischer Ebene angekommen. Bezüglich der Umsetzung ist das Bild allerdings gemischt. Im Sektor Wärme/Kälte sind Fortschritte zu erkennen: Die Nutzung von Geothermie und Umweltwärme steigt signifikant an. Da allerdings Biomasse weiterhin über 60 % der erneuerbaren Wärme ausmacht und zudem der erneuerbare Anteil am gesamten Energieverbrauch des Sektors deutlich gesteigert werden muss, sind vor allem innovative Hybridlösungen, Ansätze zur Sektorkopplung und vermehrte Einbindung von Biogasanlagen in Wärmenetze dringend erforderlich. In Bezug auf die Stromproduktion stieg in 2023 die installierte Leistung an Biogasanlagen nochmals leicht an. Die geänderten politischen Rahmenbedingungen könnten aber in den kommenden Jahren zu niedrigeren Zahlen führen, falls die Betreiber keine Planungssicherheit erhalten. Im Sektor Verkehr sind die durchaus vorhandenen Innovationspotentiale noch nicht in der Praxis angekommen. Die THG-Emissionen sind auch 2023 kaum gesunken. Da die durchaus deutlichen Steigerungen in Bezug auf Elektrifizierung von einem sehr niedrigen Niveau ausgehen, stehen biogene Energieträger weiterhin für über 80 % der erneuerbaren Energie im Verkehr. Daraus wird deutlich, dass kurzfristige positive Entwicklungen nur unter Einbeziehung fortschrittlicher Biokraftstoffe zu erreichen sind.

Abstract: What has changed over the past months with regards to energetic biomass usage in Germany, with a view to national climate and Energiewende goals? This article looks to answer this question based on data which is either publicly available or stems from the DBFZ's (Deutsches Biomasseforschungszentrum, German Biomass Research Centre) own research work. The share of renewables in primary energy consumption in Germany was 19.6 % in 2023 – slightly up from about 17 % in 2022 – and biomass contributed more to this than all other renewable energy carriers

put together. Scientific consensus is that, since biomass potentials are limited and thus valuable, they must preferably be used in cascades, and any energetic usage must focus either on areas which other renewables cannot serve, or on closing gaps in the energy system as a whole, especially regarding storage and transport capabilities. This consensus has by now reached political discussions as well. However, there are mixed results regarding actual implementation. Progress has been made in the heating/cooling sector: geothermal and ground-source heat has seen significant rises in 2023. However, biomass still makes up over 60 % of renewable heat, and the total share of renewables in the sector needs to increase considerably over the next years. Therefore, innovative hybrid solutions, sector coupling and increased connection of biogas plants to heating networks are urgently required. With a view to electricity production, the installed capacity at biogas plants rose again slightly in 2023. However, changed political frameworks might lead to reduced figures over the coming years, if plant owners see no planning reliability. In the transport sector, the innovation potential (which definitely exists) has not been transferred into practice. GHG emissions have once again failed to decrease significantly in 2023. Increases in electrification, which were considerable all right, started from a very low level. Therefore, biogenic energy carriers still make up over 80% of all renewables in transport. It is thus evident that any positive short-term developments will also involve advanced biofuels.

1 Einleitung

Eine der zentralen globalen Zukunftsaufgaben ist die Sicherstellung einer nachhaltigen Versorgung der Volkswirtschaften mit Rohstoffen und Energie und dafür ist die Transformation in eine klimaneutrale Gesellschaft eine Grundvoraussetzung. Grob vereinfacht kann das nur gemäß folgender Formel funktionieren:

Klimaneutralität (KN) = Erneuerbare Energien (EE) + Kreislaufwirtschaft (KW)

Das ist nun wirklich keine neue Erkenntnis und hier sieht das aktuelle Zwischenfazit weder international noch auf nationaler Ebene gut aus. Seit den 1970er Jahren ist der weltweite Ressourcen- und Energieverbrauch höher als die ökologische Regenerationsfähigkeit des Globus. Weltweit war der ökologische Fußabdruck auch im Jahr 2023 um rund 75 % zu hoch, d.h. wir bräuchten 1,75 Erden für ein ausgeglichenes Verhältnis. In Deutschland ist der ökologische Fußabdruck aktuell doppelt so hoch, d.h. wenn alle Menschen so leben würden, bräuchten wir 3 Erden! Ganz hinten liegen die USA mit etwa 5 Erden! Die beiden bevölkerungsreichsten Länder mit insgesamt je rund 1,4 Mrd. Einwohnern sind Indien (ca. 0,8 Erden) und China (ca. 2,4 Erden), die (wesentlich) besser dastehen als Deutschland.

Aktuell liegt der EE-Anteil im Energiesystem Deutschlands bei knapp 20 % und die Zirkularitätsrate (CMU), d.h. der Anteil der anfallenden Abfälle und Reststoffe, die Verwertungsprozessen zugeführt werden, bei lediglich rund 12 %. In Umfragen sind wir ja gerne Weltmeister in Sachen Klima- und Ressourcenschutz, aber

in der Praxis klemmt es dann doch gewaltig. Das heißt sowohl bei der „Energiewende“ als auch bei der „Rohstoffwende“ stehen wir erst am Anfang eines langen Weges, während die Ziellinie „klimaneutrales Deutschland bis 2045“ im Klimaschutzgesetz klar festgelegt ist!

Die Bundesregierung hat in den letzten Jahren mit mehreren Novellierungen des Klimaschutzgesetzes einen sog. „Generationenvertrag für das Klima“ geschaffen und ihre Klimaschutzziele weiter verschärft. Diese sehen vor, dass zunächst die deutschen Treibhausgasemissionen bis 2030 um mindestens 65 % und bis 2040 um 88 % gegenüber 1990 gesenkt werden sollen. Ab 2045 soll die Bundesrepublik Deutschland klimaneutral werden, d.h. es soll ein Gleichgewicht zwischen Ausstoß und Bindung von Treibhausgasemissionen bestehen. Nach 2050 strebt die Bundesregierung negative Emissionen an, indem mehr Treibhausgase natürlich gebunden als emittiert werden (Bundesregierung 2023).

Grundvoraussetzung für das angestrebte klimaneutrale Deutschland im Jahr 2045 ist vor diesem Hintergrund, dass wir unseren Material- und Energieverbrauch erheblich verringern. Dies ist nur mit signifikanten Effizienzsteigerungen und Konsumverzicht zu erreichen. Zentrale weitere Handlungsfelder sind zum einen die Umstellung der Energieversorgung in den nächsten Jahrzehnten, vollständig und in allen Sektoren, auf erneuerbare Energien (EE) und zusätzlich müssen negative Emissionen generiert werden. Hier sind ein massiver Ausbau und ein optimiertes Zusammenspiel von Wind- und Solarenergie, Bioenergie, Geothermie und Wasserkraft für Strom, Wärme/Kälte und Mobilität erforderlich.

Zum anderen müssen wir unser „lineares“ Wirtschaftssystem zu einer wirklichen Kreislaufwirtschaft weiterentwickeln. Unter anderem muss die Versorgung der Industrie mit organischen Grundstoffen möglichst weitgehend von petro- auf bio-basierte Stoffe umgestellt werden.

Biomasse wird also die Basis der Bioökonomie sowie integraler Bestandteil eines zukunftsfähigen Energiesystems sein. Dies ist nur erreichbar, wenn die Biomasse nachhaltig produziert sowie effizient, umweltverträglich und mit höchstmöglichem volkswirtschaftlichem Nutzen eingesetzt wird. Eine nachhaltige Bioökonomie optimiert deshalb die stofflich-energetische Verwertung biogener Abfälle und Reststoffe. Hierfür sind neue Technologiekonzepte sowie Koppel- und Kaskadennutzung unabdingbar, aber auch „negative“ Emissionen, die über die Speicherung von „grünem“ Kohlenstoff generiert werden können.

Vor diesem Hintergrund werden in Kapitel 2 die bisherige Entwicklung und der aktuelle Stand der energetischen Verwertung von Biomasse in Deutschland erläutert und die vom DBFZ erwarteten weiteren Entwicklungen angesprochen. In Kapitel 3 werden die wesentlichen Punkte kurz zusammengefasst und ein Ausblick skizziert.

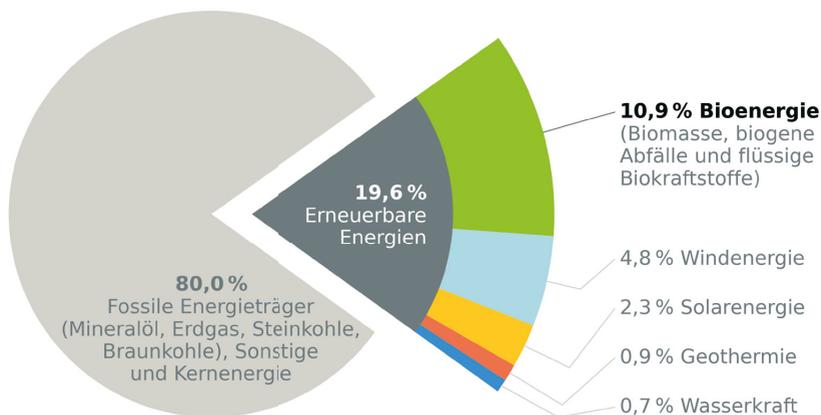
2 Aktuelle energetische Nutzung von Biomasse in Deutschland

Im vergangenen Jahr, 2023, wurde rund die Hälfte der aus erneuerbaren Energien gewonnenen Energie durch Biomasse, biogene Abfälle und flüssige Biokraftstoffe bereitgestellt (UBA 2024a). Der Fokus der Nutzung erneuerbarer Energien liegt dabei weiterhin bei der Strom- (53 %) und Wärmeversorgung (40 %) (UBA 2024c). Der enorme Vorteil von Biomasse als wetterunabhängiger, planbarer Energielieferant kommt dabei insbesondere bei der Wärmeversorgung zu Geltung, der Anteil der Biomasse an der Wärmeerzeugung durch erneuerbare Energien liegt bei über 80 % (Abb. 2) (UBA 2024c). Eine eher untergeordnete Rolle spielt die energetische Nutzung von Biomasse im Verkehrssektor, womit auch durch diesen Umstand zum wiederholten Male die Ziele des Klimaschutzgesetzes verfehlt wurden. Eine stärkere Einbindung von erneuerbaren Energien in diesem Sektor birgt ein enormes, kurzfristiges Potential zur Senkung von THG-Emissionen. Insgesamt leistet die Energieversorgung mittels Biomasse einen konstanten Beitrag zur Sicherstellung der energetischen Versorgung Deutschlands (Nelles et al. 2023). Der Schwerpunkt der Biomassenutzung liegt dabei auch in der Etablierung einer Kreislaufwirtschaft, in welcher Biomasseströme gezielt gelenkt werden, um diese Ressource optimal zu nutzen.

2.1 Primärenergie- und Bruttoendenergieverbrauch

Der Verbrauch an Primärenergien in Deutschland hat historisch betrachtet seinen tiefsten Stand in 2023 erreicht und liegt mit mehr als ein Viertel unter dem bisherigen Höchststand von 1990. Die Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen (AG Energiebilanzen) schätzt diese auf einen Rückgang um 7,9 % auf 10.791 Petajoule (PJ) (AGEB 2023). Grund dafür sind zum einen die immer noch hohen Energiepreise (im Vergleich zu 2021) und zum anderen die schwache wirtschaftliche Entwicklung. Die Investitionen in Energieeffizienz, die Umstellung auf erneuerbaren Energiequellen sowie die Produktionsrückgänge in den energieintensiven Industriezweigen trugen weiterhin zum Rückgang des Energieverbrauchs bei.

Ein Zuwachs ist nur bei den erneuerbaren Energien zu verzeichnen. Ihr Beitrag stieg im Jahr 2023 insgesamt um 2,3 % auf 2.118 Petajoule (19,6 %). Die Bioenergie leistet weiterhin einen bedeutenden Beitrag zum deutschen Energiemix. Im Jahr 2023 lag ihr Anteil bei 10,9 % des gesamten Primärenergieverbrauchs (Abb. 1). Der Anteil der restlichen erneuerbaren Quellen kam zusammen auf nur 8,7 % (AGEB 2024).



0,4 % Stromaustauschsaldo nicht dargestellt
 Quelle: Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen e.V. "Energieverbrauch in Deutschland im Jahr 2023"
 Stand 2024-04-12 CC BY-NC-ND 4.0 DBFZ 2024

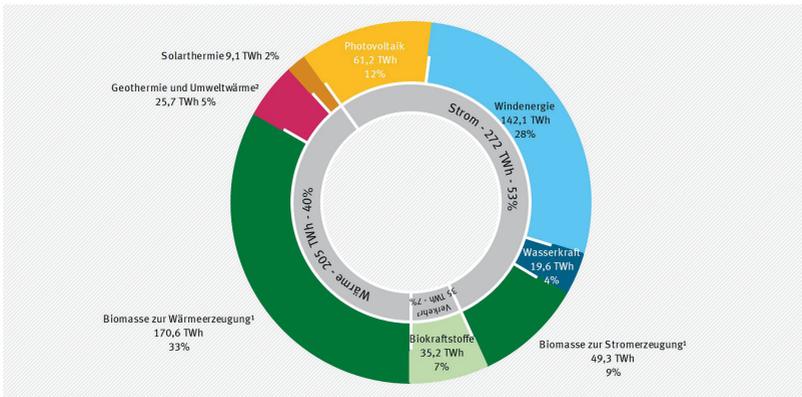
*Abb. 1: Darstellung DBFZ. Datenquelle: Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen e.V.:
 Energieverbrauch in Deutschland im Jahr 2023, Stand 12. April 2024, ©DBFZ 2024.*

Der Anteil der erneuerbaren Energien am Bruttoendenergieverbrauch stieg in 2023 gegenüber dem Vorjahr mit 1,2 Prozentpunkten auf 22,0 % (UBA 2024a). Dazu haben insbesondere die Sektoren Strom und Wärme beigetragen. In diesen Sektoren wurde nicht nur mehr erneuerbare Energien eingesetzt, sondern es kam auch zu einem Rückgang der Gesamtnachfrage nach Strom, Wärme und Kraftstoffe im Verkehrssektor.

Biomasse bleibt weiterhin mit einem Anteil von 49 % an der Gesamtmenge aller erneuerbaren Energien die bedeutendste Energiequelle in Deutschland (Abb. 2). Sie findet in allen Sektoren Anwendung: als Brennstoff zum Heizen, als Biokraftstoff im Verkehr und als Biogas/Biomethan für die Erzeugung von Strom und Wärme (UBA 2023).

Energiebereitstellung aus erneuerbaren Energieträgern (2023)

Gesamtenergiebereitstellung: 513 Terawattstunden [TWh]



¹ mit biogenem Anteil des Abfalls

² Stromerzeugung aus Geothermie etwa 0,2 TWh (nicht separat dargestellt)

³ Verbrauch von EE-Strom im Verkehr etwa 4,9 TWh

Abweichungen bedingt durch Rundungen

Quelle: Umweltbundesamt (UBA) auf Basis AGEE-Stat
Stand 02/2024

Abb. 2: Energiebereitstellung aus erneuerbaren Energien (2023),
Quelle: UBA auf Basis AGEE-Stat, Stand 02/2024.

Der erneuerbare Strom-Anteil am Endenergieverbrauch steigt kontinuierlich seit 2015 (Abb. 3) an und konnte erstmalig im Jahr 2023 mehr als die Hälfte des gesamten Bruttostromverbrauchs (51,8 %) decken (UBA 2024a). Dazu hat nicht nur die Zunahme der erneuerbaren Stromerzeugung beigetragen, sondern auch der konjunkturell bedingte Rückgang des Strombedarfs (um 5 %). Etwa Dreiviertel des erneuerbaren Stroms kamen aus Wind- und Solarenergie, während etwa ein Viertel durch Wasserkraft und Biomasse erzeugt wurde. Die Tiefengeothermie leistete einen sehr kleinen Beitrag zur Gesamtmenge.

Obwohl die letzten zwei Jahre ähnlich warm waren und der Heizwärmebedarf zwischen 2022 und 2023 sich nicht stark unterschied, ist der Anteil Erneuerbarer am Endenergieverbrauch im Wärme- und Kältesektor weiterhin von 17,5 % in 2022 auf 18,8 % in 2023 gestiegen. Insbesondere hat dazu die Energiebereitstellung aus Geothermie und Umweltwärme sehr deutlich beigetragen (plus 18 %). Bei der Biomasse und biogenem Abfall ist einen leichter (minus 1 %) und bei der Wärmenutzung aus Solarthermieanlagen ein stärkerer Rückgang (minus 6 %) wegen der sonnenärmeren Witterung zu verzeichnen (UBA 2024a).

Die Nutzung von Wärme und Kälte aus erneuerbaren Quellen ist besonders in Haushalten angestiegen. Bei der Industrie wurde ein konjunkturbedingter Rückgang des Prozesswärmebedarfs beobachtet, der noch überwiegend durch fossile Energieträger gedeckt wird (UBA 2024a).

Auch der Anteil erneuerbarer Energien am Endenergieverbrauch im Verkehr ist weiter von 6,9 % im Vorjahr auf 7,3 % in 2023 gestiegen. Zurückzuführen ist diese Entwicklung auf den stark wachsenden Einsatz erneuerbaren Stroms sowie den leicht steigenden Einsatz von Biokraftstoffen im Jahr 2023 (UBA 2024a).

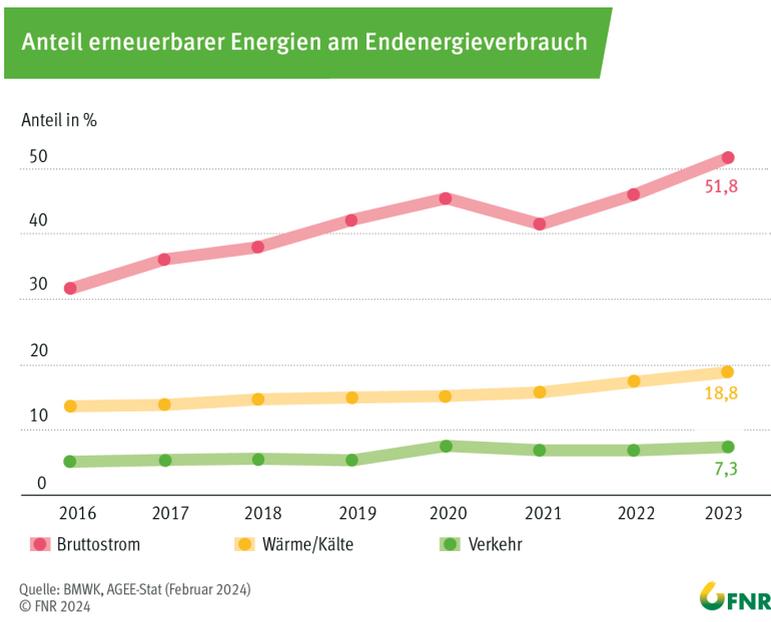


Abb. 3: Anteil erneuerbarer Energien am Endenergieverbrauch, Quelle: BMWK¹, AGEE-Stat (Februar 2024), @ Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. (FNR 2024).

2.2 Bioenergie im Wärme- und Kältesektor

Die Debatten in Politik, Wirtschaft, Wissenschaft und Medien zur zukünftigen Wärmeversorgung zeigen zunehmend nun auch reale Ergebnisse in der praktischen Umgestaltung des Wärmesystems. Stellte Geothermie und Umweltwärme 2021 erst 18,9 Milliarden Kilowattstunden bereit, konnten zwei Jahre später bereits 25,9 Milliarden Kilowattstunden produziert werden. Leicht rückläufig ist hingegen die erneuerbare Wärmebereitstellung aus biogenem Abfall und bei Holz (Abb. 4).

¹ Bundesministerium für Energie und Klimaschutz (BMWK)

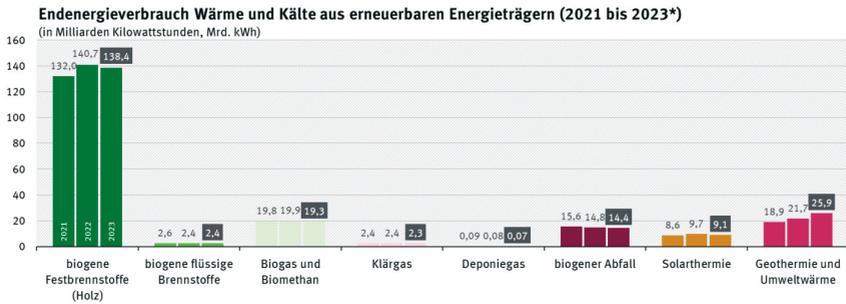


Abb. 4: Endenergieverbrauch für Wärme aus erneuerbaren Energien im Jahr 2023, (AGEE-Stat, 2023).

Trotz dieser leicht rückläufigen Zahlen bei den biogenen Festbrennstoffen stammt die Wärmeversorgung aus erneuerbaren Energien in Deutschland nach wie vor zu knapp vier Fünfteln aus Biomasse. Biomasse machte inklusive des biogenen Anteils am Abfall 83,1 % der erneuerbaren Energien aus (AGEE-Stat 2024). Im Vergleich zum Vorjahr sank der Anteil um 1,1 %, während der Abwärtstrend seit 2021 (minus 2,7 Prozentpunkte) bestehen bleibt. Weiteren Zuwachs haben oberflächennahe Geothermie und Umweltwärme (sektorspezifisch plus 19 %), die sich meist auf den Einsatz von Wärmepumpen bezieht. Im Ausblick ist davon auszugehen, dass die geänderte Gesetzeslage zu einem weiteren Wachstum des Anteils der Wärmepumpen führen wird, während sich gleichzeitig der Anteil der Bioenergie im Wärme- und Kältesektor kontinuierlich reduziert.

Bioenergie im Wärmesektor wird vielseitig eingesetzt. Den Großteil machen nach wie vor die 11,5 Millionen Einzelraumfeuerungsanlagen aus (Abb. 5). Auch in der Industrie werden feste biogene Brennstoffe weiterhin für die Bereitstellung von Prozesswärme eingesetzt. Doch das Marktwachstum der Wärmepumpen ist rasant. Laut Bundesverband Wärmepumpe e.V. wurden im letzten Jahr 356.000 Heizungswärmepumpen verkauft, ein Wachstum von 50 % gegenüber dem Vorjahr. Und mit 82.500 verkauften Einheiten liegt der Zuwachs gegenüber 2022 bei den Warmwasserwärmepumpen sogar bei 80 %. Trotz der Fortschritte bei der technischen Entwicklung von Großwärmepumpen und bei der Umstellung von Energiesystemen auf die Wasserstoffverwendung wird Biomasse bei Hochtemperaturprozessen (über 500 Grad) voraussichtlich weiterhin eine Rolle spielen, z.B. in Hybrid-Systemen.

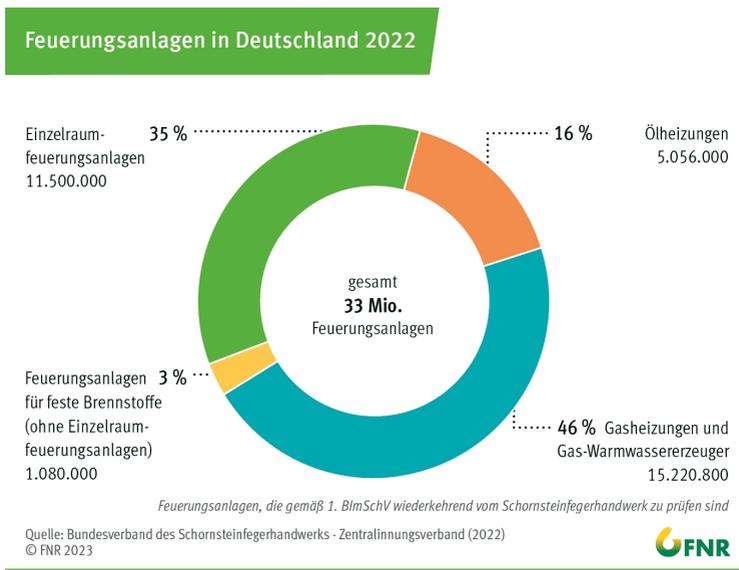


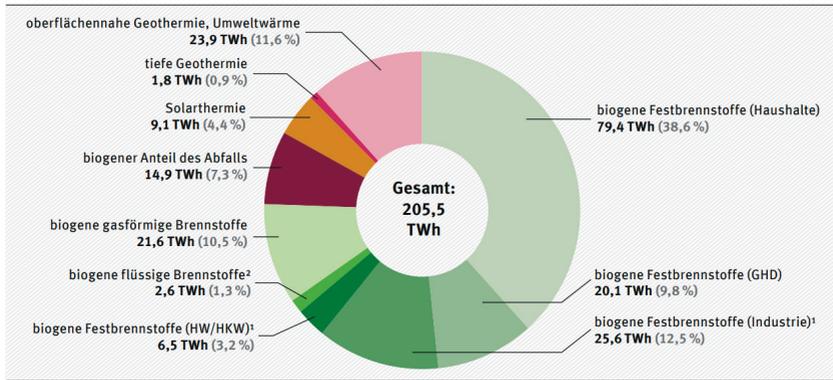
Abb. 5: Feuerungsanlagen in Deutschland 2022, Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR 2024b).

Biogene Festbrennstoffe

Biogene Festbrennstoffe steuern mit Abstand weiterhin den größten Anteil zur Endenergiebereitstellung für Wärme aus erneuerbaren Energien bei. Zusammen machen die verschiedenen Fraktionen der biogenen Festbrennstoffe 64,1 % an der gesamten erneuerbaren Wärmebereitstellung aus. Davon entfallen 38,6 % auf die privaten Haushalte für die Bereitstellung von Raumwärme und Warmwasser, 9,8 % auf Gewerbe, Handel und Dienstleistungen (GHD) sowie 12,5 % auf die Industrie (Abb. 6). Innerhalb des Sektors sind leichte Verschiebungen zu beobachten. Während der Wert bei den privaten Haushalten um 1,3 % niedriger lag als im Vorjahr, erhöhte sich der Anteil bei der Industrie um 0,9 %.

Heizwerke/Heizkraftwerke steuerten 3,2 % zur erneuerbaren Wärmeerzeugung bei. In der Zukunft wird sich speziell der Trend zu schwierigeren Brennmaterialien (z.B. Altholz) verfestigen.

Endenergieverbrauch für Wärme aus erneuerbaren Energien im Jahr 2023
 Werte in Terawattstunden (TWh), Anteile in Prozent in Klammern



¹ inkl. Klärschlamm
² inkl. Biokraftstoffverbrauch in der Land- und Forstwirtschaft, im Baugewerbe und beim Militär
 (HW/HKW = Heizwerke/Heizkraftwerke, GHD = Gewerbe, Handel, Dienstleistungen)
 Quelle: Arbeitsgruppe Erneuerbare Energien-Statistik (AGEE-Stat)

Abb. 6: Endenergieverbrauch für Wärme aus erneuerbaren Energien im Jahr 2023, (AGEE-Stat, 2024).

Beim Blick auf Kleinfeuerungsanlagen zeigt sich erneut ein Anstieg bei Holzpelletfeuerungen. Dieser Trend der letzten Jahre setzt sich somit fort. Waren Ende 2022 etwa 690.000 größere (> 50 kW) und kleinere (< 50 kW) Pelletkessel und Pelletkaminöfen in Nutzung, belief sich die Zahl der Holzpelletfeuerungen Ende 2023 auf knapp 710.000. Für 2024 wird ein Anstieg auf 763.000 Anlagen prognostiziert (Abb. 7). Nach dem steilen Anstieg in den Jahren 2018 bis 2022 zeigt sich aber mittlerweile eine abflachende Wachstumskurve. Die technische Alternative der Wärmepumpe bringt Privatnutzer häufiger dazu, sich für diese Wärmetechnologie zu entscheiden.

Holzpelletfeuerungen in Deutschland

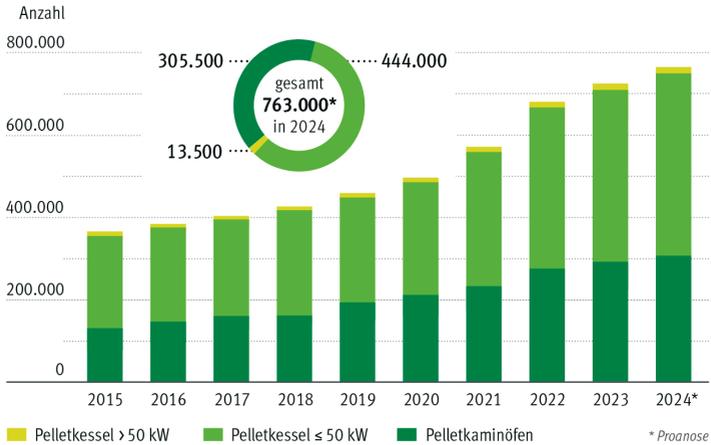


Abb. 7: Holzpelletfeuerungen in Deutschland, Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. auf Basis von Daten des Deutschen Pelletinstituts, (FNR 2024a).

Bei den verkauften Pellets lässt sich dieser Trend noch nicht ablesen. Die Produktionskapazitäten lagen 2023 bei etwa 4,0 Millionen Tonnen und sollen 2024 weiter auf 4,3 Millionen Tonnen erhöht werden. Die Produktion von Pellets (3,7 Millionen Tonnen) überstieg hingegen leicht die Nachfrage (3,3 Millionen Tonnen). Für 2024 gehen die Marktprognosen von einer Annäherung zwischen Angebot und Nachfrage aus. Bei erwarteten Produktionszahlen von etwa 3,8 Millionen Tonnen soll der Verbrauch dann bei etwa 3,6 Millionen Tonnen liegen (Abb. 8).

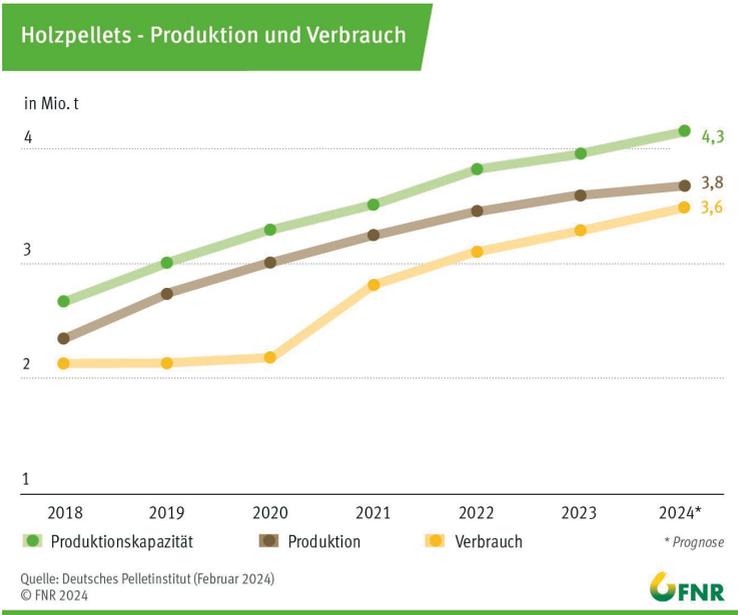


Abb. 8: Holzpellets – Produktion und Verbrauch, Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. auf Basis von Daten des Deutschen Pelletinstituts, (FNR 2024c).

Biogas

Biogas und Biomethan sind ein wichtiger Bestandteil des Versorgungssystems in Deutschland. Insbesondere seit der Invasion Russlands in der Ukraine erlangten sie als mögliche Alternativen zu Erdgasimporten aus Russland eine hohe politische Aufmerksamkeit. Der Gasverbrauch in Deutschland ist durch zahlreiche Gaseinsparungen seit 2021 deutlich gesunken. Daneben wirkten zudem die überdurchschnittlich milden Temperaturen verbrauchsmindernd. Gegenüber dem Durchschnittsverbrauch der Jahre 2018-2021 wurden in 2023 insgesamt rund 17,5 % weniger Gas verbraucht. 2023 wurden insgesamt 968 TWh Erdgas nach Deutschland importiert, 2022 waren es 1.437 TWh. Dabei kamen die größten Mengen aus Norwegen (43 %), den Niederlanden (26 %) und Belgien (22 %). Über die drei deutschen Flüssiggasterminals wurden dabei 2023 rund 69,7 TWh Erdgas nach Deutschland importiert. Das vierte LNG-Terminal in Stade ist im Dezember 2023 in Betrieb gegangen. Erste Gasflüsse werden hier im Jahr 2024 erwartet (BNetzA 2024).

Der Endenergieverbrauch erneuerbarer Energien für Wärme lag 2023 bei 205 TWh (2022: 203 TWh). Die mittels Biomasse bereitgestellte Wärmemenge sank leicht gegenüber dem Vorjahr temperaturbedingt auf 170,6 TWh (83 % der erneuerbaren Wärme). Biogas und Biomethan machen rund 9 % der erneuerbaren Wärme aus. Das entspricht etwa 1,7 % des Endenergieverbrauchs Wärme in Deutschland (2022: 1,6 %) (AGEE-Stat 2024a).

Derzeit werden in Deutschland mehr als 100 TWh Biogas erzeugt. Ein direkter Ersatz von Erdgas durch Biogas in allen Anwendungen ist jedoch erst nach Aufbereitung zu Biomethan möglich. Derzeit werden etwa 11 TWh des produzierten Biogases in Deutschland zu Biomethan aufbereitet, was etwa einem Anteil von 1,4 % am Gasmarkt entspricht. Darüber hinaus kann Biogas Erdgas ohne vorherige Aufbereitung in einzelnen Anwendungen ersetzen. Hierzu zählen flexibel erzeugter Strom (etwa 15 TWh bzw. 19 % der Strombereitstellung aus Erdgas) und (KWK-)Wärme (14 TWh bzw. 3 % der Wärmebereitstellung aus Erdgas) (Rensberg et al. 2023, Destatis 2024). Diese Beiträge zur Energieversorgungssicherheit lassen sich mittelfristig nur begrenzt erhöhen. So könnte etwa der Anteil von Biomethan am Gasmarkt bis 2030 auf ca. 3 % ausgeweitet werden. Zunehmend erfolgt eine Verwertung von biogenem CO₂ aus Biogas- und Biomethananlagen – sowohl in Deutschland als auch in Europa. Der Großteil der derzeit in Betrieb befindlichen CO₂-Abscheidungsanlagen liefert CO₂ aus Biogas und Biomethan in Lebensmittelqualität. Informationen zu geplanten Anlagen zeigen, dass die zukünftige CO₂-Nutzung vorwiegend im Lebensmittel- und Getränkesektor sowie bei Power-to-X-Technologien liegt, während die bisherige Nutzung von CO₂ in Gewächshäusern in den Hintergrund rückt (Denysenko et al. 2023).

Die an Biogasanlagen erzeugte Wärme wird derzeit unterschiedlichen Nutzungen zugeführt. Ein Teil der Wärmemenge wird dabei in der Regel für den Eigenbedarf (Betrieb der Biogasanlage) genutzt. Die resultierende extern verfügbare Wärme wird an rund 97 % der Biogasanlagen einer oder mehrerer weiterer Nutzungen zugeführt. Ergebnisse der DBFZ-Betreiberbefragung zeigen, dass der Wärmenutzungsgrad je nach Anlagenkonzept, Leistungsgröße und Substratinput sehr unterschiedlich ist (Rensberg et al. 2023). An einer Vielzahl von Biogasanlagen wird die erzeugte Wärme für die Beheizung von Wohnräumen, Warmwasserbereitung, Trocknungsprozesse und die Bereitstellung in Wärmenetzen eingesetzt. Nach vorliegenden Angaben wird an rund 58 % der Biogasanlagen die extern verfügbare Wärme der Biogasanlagen allein oder anteilig für die Beheizung von Wohnräumen und Gebäuden inkl. Warmwasserbereitung eingesetzt (Abb. 9) (Rensberg 2024).

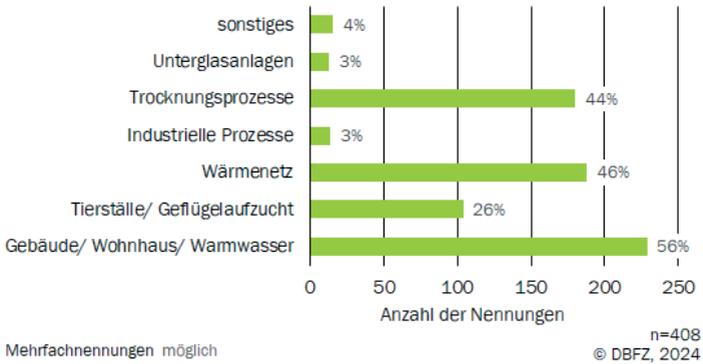


Abb. 9: Art der externen Wärmenutzung, absolute Anzahl der Nennungen und relative Häufigkeit bezogen auf die Stichprobe (n = 408) (Bezugsjahr 2022), Mehrfachnennungen möglich; (Rensberg 2024).

In den vergangenen Jahren ist vor allem die Bedeutung der Wärmebereitstellung über Wärmenetze deutlich gestiegen. Während nach Auswertungen der DBFZ-Befragung 2010 etwas über 10 % der Anlagenbetreibenden angaben, die extern verfügbare Wärme in Wärmenetzen bereitzustellen, sind es 2022 rund 46 % der Anlagenbetreibenden. Ebenso hat die Wärmenutzung aus Biogas in Trocknungsprozessen kontinuierlich zugenommen (Abb. 10). Rund 78 % der aus Biogas extern bereitgestellten Wärmemengen (ohne Berücksichtigung des Eigenwärmebedarfs für den Anlagenbetrieb) wird dabei für Wärmenetze und für Trocknungsprozesse bereitgestellt (Rensberg 2024). Diese Entwicklung unterstreicht, dass die Wärmenutzung aus Biogas an ökonomischer Relevanz gewonnen hat und wahrscheinlich in den nächsten Jahren weiter gewinnen wird.

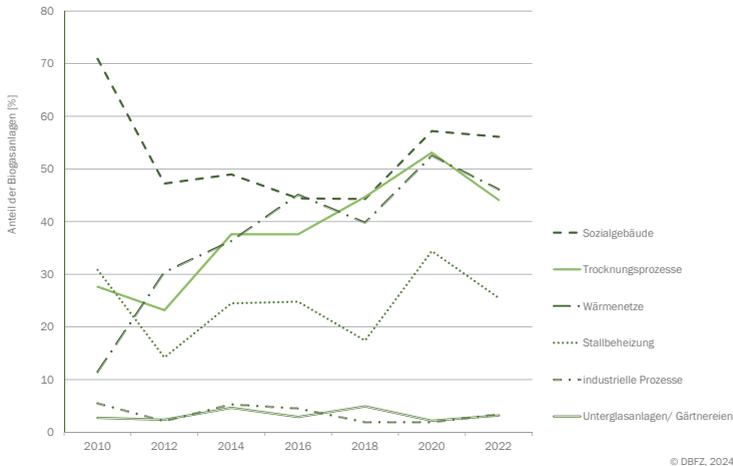
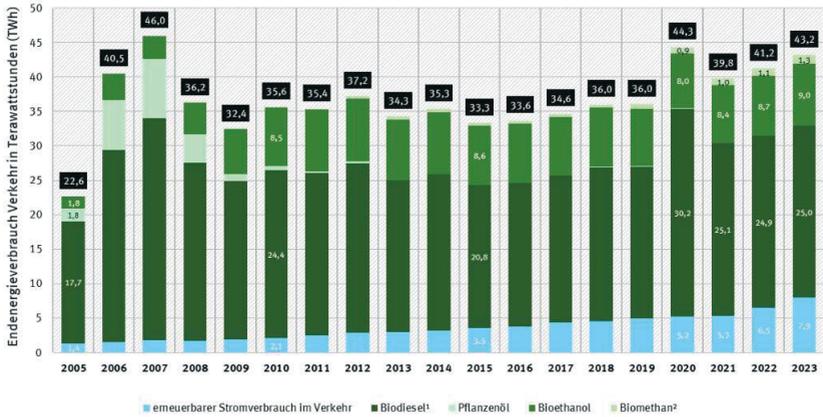


Abb. 10: Entwicklung der externen Wärmenutzung nach Art der Nutzung (Anteil der Biogasanlagen mit jeweiliger Wärmenutzung, Mehrfachnennungen möglich), (DBFZ 2024).

2.3 Bioenergie im Verkehrssektor

Im Hinblick auf die Klimaschutzziele der Bundesregierung ist der Verkehrssektor weiterhin derjenige, der (gemeinsam mit dem Bereich Gebäude) die gravierendsten Umsetzungsschwächen zeigt: Die THG-Emissionen aus dem Verkehr in Deutschland konnten auch 2023 kaum gesenkt werden – lediglich um 2 % im Vergleich zu 2022 auf 145 Millionen Tonnen CO_{2eq} (Agora Energiewende 2024). Damit verfehlte der Sektor bereits zum dritten Male hintereinander die Ziele des Klimaschutzgesetzes (KSG).

Die vermiedenen THG-Emissionen gehen zum größten Teil auf den Einsatz von Biokraftstoffen zurück, die für 81,6 % des gesamten Endenergieverbrauchs aus erneuerbaren Energien im Verkehr stehen (35,3 von insgesamt 43,2 TWh, Abb. 11). Der Absatz von Biokraftstoffen stieg 2023 um 2 % im Vorjahresvergleich, was vor allem auf den erhöhten Biomethan-Anteil des LNG (plus 19 % auf 1,3 TWh) und Steigerungen beim Bioethanol-Absatz (ca. 3 % auf 9 TWh) zurückzuführen ist. Biodiesel incl. hydrierter Pflanzenöle ist zwar weiterhin der mengenmäßig wichtigste Biokraftstoff (25 TWh), die Absatzmenge stieg aber 2023 nur unwesentlich, so dass der prozentuale Anteil an der erneuerbaren Energiemenge im Verkehr mittlerweile unter 60 % liegt (AGEE-Stat 2024). Perspektivisch lassen sich zudem folgende Trends in Bezug auf Biokraftstoffe erkennen. Während die Nutzung von konventionellen Biokraftstoffen (aus Nahrungs- und Futtermitteln) in Zukunft aufgrund der Deckelung im Rahmen der Treibhausgas-minderungsquote (THG-Quote) nicht mehr anwachsen wird, wird die Verwendung von fortschrittlichen Biokraftstoffen aus Abfall- und Reststoffen bis 2030 stark steigen (BMUV 2023, Schröder et al 2023). Derzeit liegt der Importanteil abfallbasierter Biokraftstoffe bei ca. 75 %. Über 90 % der für fortschrittliche Biokraftstoffe genutzten Rest- und Abfallstoffe setzen sich aus den folgenden drei Ressourcen zusammen: POME-Öl (Palmölabwässer-Öl), Reststoffe aus der Forstwirtschaft (dabei handelt es sich um Tallöl) sowie Reststoffe aus Industrieabfällen (Biomethan, BLE 2024). Bislang reizt die THG-Quote daher nicht wie eigentlich gewünscht den Hochlauf der Produktionsinfrastruktur fortschrittlicher Biokraftstoffe in Deutschland bei Nutzung von in Deutschland ungenutzten Rest- und Abfallstoffen an. Stattdessen werden primär Rest- und Abfallstoffe importiert bzw. solche Rohstoffe genutzt, welche vorher bereits energetisch oder sogar stofflich verwendet wurden. Der auf Basis des Strommixes in Deutschland berechnete Anteil erneuerbaren Stroms im Verkehr stieg zudem von 2022 bis 2023 stark an, um 22 % auf 7,9 TWh.



¹ Verbrauch von Biodiesel (inklusive HVO) im Verkehrssektor (ohne Land- und Forstwirtschaft, Baugewerbe und Militär)
² auf Heizwertbasis, ab 2023 inkl. Bio-LNG

Abb. 11: Entwicklung des Endenergieverbrauchs erneuerbarer Energien im Verkehrssektor 2005 – 2023 (AGEE-Stat, 2024b).

Dies liegt am weiter steigenden Anteil von Fahrzeugen mit rein elektrischem Antrieb, der bei Neuzulassungen 18,4 % betrug. Im Bestand allerdings bedeutet dies lediglich einen Anteil von 2,9 % (KBA 2024).

Daraus bzw. aus dem immer noch geringen Anteil von 18,4 % des EE-Stroms am Endenergieverbrauch aus erneuerbaren Energien im Verkehr wird ersichtlich, dass kurzfristig der Einsatz fortschrittlicher Biokraftstoffe essentiell ist, um die Emissionen substantiell zu senken, ebenso wie wirksame Maßnahmen, um den sich seit Jahren abzeichnenden Trend zu schwereren – d.h. mehr Energie verbrauchenden – PKW umzukehren. Laut Kraftfahrt-Bundesamt wächst vor allem das Fahrzeugsegment der SUVs seit Jahren sehr stark, zuletzt in den zwölf Monaten bis Jahresbeginn 2024 um weitere 11,2 % (KBA 2024). Auch Geländewagen, Utility- und Oberklasse-Fahrzeuge verzeichnen ein Plus, während der Bestand an Klein- und Mittelklassewagen zurückgeht. Der Anteil von SUVs, Vans und Utilities am Gesamtfahrzeugbestand stieg dadurch von 18,8 % im Jahr 2014 auf 30,2 % in 2024 (UBA 2024b, Abb. 12).

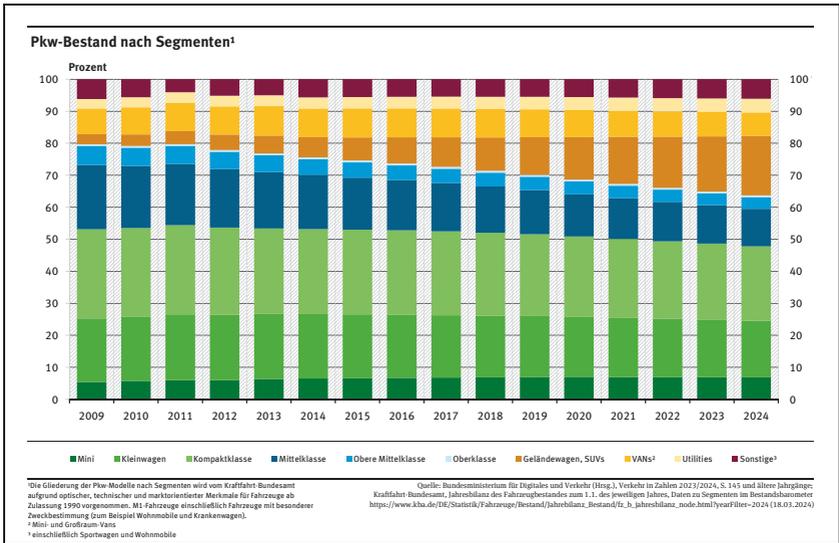


Abb. 12: Entwicklung des KFZ-Bestands in Deutschland. Umweltbundesamt mit Daten des BMDV und des Kraftfahrtbundesamtes (UBA 2024b).

Der gesamte Anteil erneuerbarer Energien am Endenergieverbrauch im Verkehr änderte sich daher trotz der absoluten Steigerungen kaum. Mit 7,3 % liegt er leicht über dem Vorjahreswert (6,9 %), aber noch unter den bisherigen Höchstwerten von 2020 (7,5 %) und 2007 (7,4 %), Abb. 13.

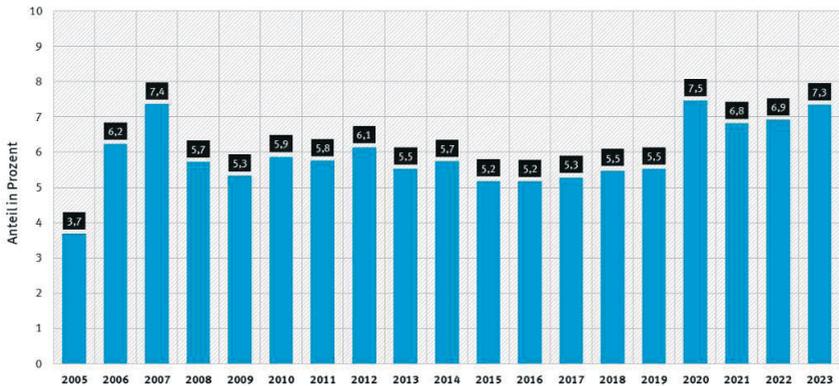


Abb. 13: Entwicklung des Anteils erneuerbarer Energien am Endenergieverbrauch Verkehr in Deutschland (AGEE-Stat 2024b).

Auch die aktuellen politischen Signale geben wenig Anlass zum Optimismus in Bezug auf eine Verkehrswende: In der am 26.04.2024 vom Bundestag beschlossenen zweiten Novelle des KSG sind keine Einzelziele pro Sektor sowie Pflicht-

ten zu Sofortmaßnahmen bei Nichterreichung mehr vorgesehen (Brost 2024). Somit können Misserfolge im Verkehrsbereich durch Übererfüllung in anderen Sektoren bilanziell ausgeglichen werden.

2.4 Bioenergie im Stromsektor

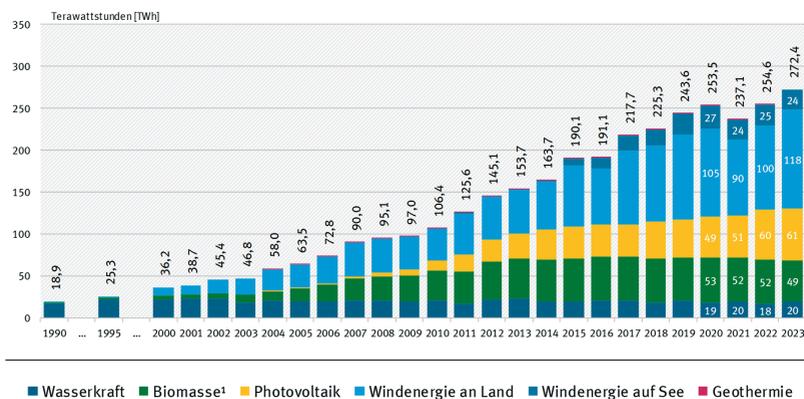
Der ermittelte Primärenergieverbrauch in Deutschland ist seit der Wiedervereinigung weiterhin rückläufig. Demgegenüber ist die Stromerzeugung aus Biomasse seit nunmehr über 10 Jahren nahezu konstant (Abb. 14) und liefert damit einen verlässlichen Beitrag zur Bewältigung der Energiewende.

Dennoch sank im Vergleich zu 2022 die bereitgestellte Energie aus Biomasse um etwa 5 % und lag erstmals seit mehreren Jahren wieder unter 50 TWh (UBA 2024c). Laut AGEE-Stat (Abb. 14) (UBA 2024c) wurde aus Biomasse inklusive der biogenen Anteile des Abfalls in 2023 49,3 TWh (2022: 51,3 TWh) Strom erzeugt. Zu diesem Trend trägt der immer geringere Leistungszubau bei: In 2023 wuchs die installierte Leistung im Bereich Biomasse nur marginal (UBA 2024d). Der Stromertrag blieb auch bei den weiteren Arten von erneuerbaren Energien zum Vorjahr vergleichbar. Einzig bei der Stromerzeugung durch Windenergie an Land wird eine deutliche Steigerung verzeichnet. Nach zwei windarmen Jahren 2021 und 2022 trug vor allem die Erweiterung der installierten Leistung zu einer Steigerung des Ertrages um über 18 % gegenüber dem Vorjahr bei.

Insgesamt konnte die Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien in 2023 erneut gesteigert werden, sodass der in 2021 beobachtete Rückgang bei der bereitgestellten Energie vorerst ein Ausreißer bleibt. Dieser Trend führt in Kombination mit dem insgesamt sinkenden Primärenergieverbrauch in Deutschland dazu, dass erneuerbare Energien gegenüber den Vorjahren einen höheren Beitrag zu einer verlässlichen Stromversorgung in Deutschland leisten konnten.

Bruttostromerzeugung aus erneuerbaren Energien in Deutschland

Entwicklung von 1990 bis 2023



¹ inkl. feste und flüssige Biomasse, Biogas, Biomethan, Deponie- und Klärgas, Klärschlamm und dem biogenen Anteil des Abfalls

Quelle: Umweltbundesamt (UBA) auf Basis AGEE-Stat
Stand 02/2024

Abb. 14: Entwicklung der Bruttostromerzeugung aus erneuerbaren Energien in Deutschland [UBA 2024c]. Quelle: Arbeitsgruppe Erneuerbare Energien-Statistik / Umweltbundesamt (AGEE-Stat 02/2024).

Biogas

Ende 2023 waren in Deutschland rund 8.650 Biogasproduktionsanlagen in Betrieb, an denen Biogas für den Einsatz in Blockheizkraftwerken (BHKW) oder für die Aufbereitung zu Biomethan erzeugt wird. An rund 250 Standorten wird dabei das erzeugte Biogas zu Biomethan aufbereitet (DBFZ 2024). Die Bundesländer Niedersachsen, Bayern und Baden-Württemberg umfassen mehr als die Hälfte des deutschen Biogasanlagenbestandes.

Die Anzahl der betriebenen Biogasanlagen in Deutschland ist seit dem Jahr 1992 kontinuierlich gestiegen und erreichte ein Hoch an Zubau in den Jahren 2009 bis 2011. Mit der Novellierung des EEG 2012 und den nachfolgenden Neufassungen des EEG ist der Anlagenzubau deutlich zurückgegangen. Der Zubau erfolgt seitdem vorrangig im Bereich der Güllekleinanlagen, basierend auf der im EEG 2012 eingeführten gesonderten Vergütungskategorie für güllebasierte Kleinanlagen, und wenigen Anlagen zur Abfallvergärung (Abb. 15). Daneben erfolgte in den vergangenen Jahren ein Zubau vorrangig im Bereich der Leistungserweiterung zur Flexibilisierung des Anlagenbetriebs, motiviert durch Flexibilitätszuschlag bzw. -prämie. Diese Instrumente konnten Anreize schaffen, zusätzliche elektrische Leistung für eine bedarfsorientierte Stromerzeugung bereitzuhalten und den erzeugten Strom direkt zu vermarkten. Bedingt durch zunehmende Außerbetriebnahmen nach Ablauf der 20-jährigen EEG-Vergütung ist seit 2020 ein Rückgang der Anlagenzahlen zu verzeichnen. Gegenwärtig übersteigt dabei die Leistungserweiterung für die Flexibilisierung der Anlagen

noch die außer Betrieb genommenen Anlagenleistungen, so dass hinsichtlich der installierten Leistung weiterhin ein leichter Netto-Zubau zu verzeichnen ist, wenngleich die arbeitsrelevante elektrische Leistung stagniert.

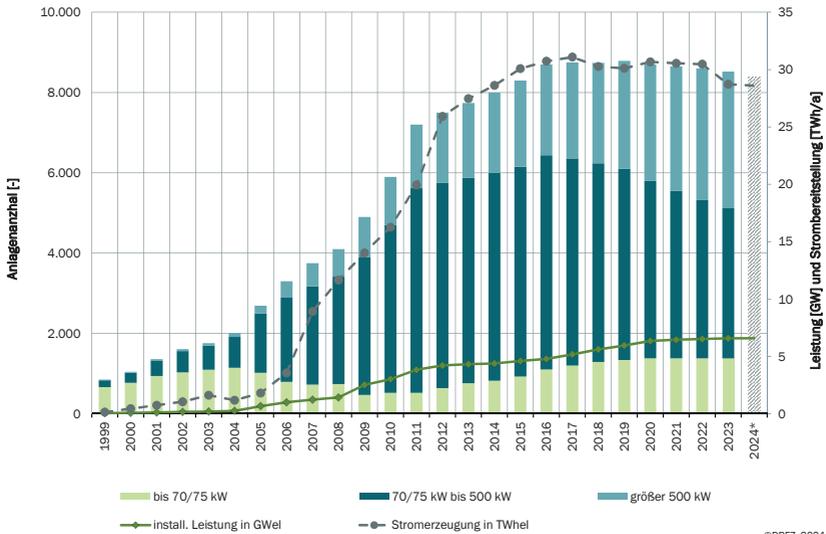


Abb. 15: Entwicklung Biogasproduktionsstandorte (Vor-Ort-Verstromung) differenziert nach Größenklassen, Bruttostromerzeugung und gesamt installierte Anlagenleistung Biogas, Leistungsklasse 70/75 kW bis 2012 Anlagen ≤ 70 kW, ab 2012 Zubau Güllekleinanlagen in Kategorie ≤ 75 kW enthalten. Datengrundlage: Datenbank DBFZ, AGEE-Stat 2024c
*Prognose DBFZ 2024, ©DBFZ 2024.

Biogas leistet einen klaren Beitrag zum Emissions-, Natur- und Umweltschutz. Als ein wesentlicher Bestandteil der deutschen Landwirtschaft kann der Bereich zukünftig eine Vielzahl von ökologischen Systemdienstleistungen in der Landwirtschaft übernehmen. Entscheidend dafür und für die zukünftige Entwicklung des Biogassektors wird jedoch sein, welche Rolle dem Biogas in der endgültigen Fassung der Nationalen Biomassestrategie (NABIS) beigemessen wird (Kornatz et al. 2023). Die NABIS setzt für Biogasanlagen einen klaren Fokus auf Abfälle und Reststoffe. Dementsprechend müssen viele Bestandsbiogasanlagen, die nach NABIS zukunftsfähig sein wollen, Änderungen in ihrer Substratzusammensetzung vornehmen. Alternative Substrate bieten dabei vielfältige Möglichkeiten, Nahrungsmittelsicherheit, Klimaschutz, nachhaltige Wirtschaftssysteme und multifunktionale Agrarlandschaften zu verbinden. Langfristige Perspektiven für die Planungssicherheit für die Marktakteure sind dabei notwendig (Rensberg et al. 2023).

Es wird erwartet, dass Biomethan im künftigen Energiesystem weiterhin eine wichtige Rolle spielen bzw. eher an Bedeutung gewinnen wird. Voraussichtlich werden Biogasanlagen vermehrt für die Biomethanaufbereitung umgerüstet, wobei der Zugang zum Gasnetz hier der limitierende Faktor ist (Kornatz et al. 2023).

Anlagen zur Vergärung von Bioabfällen

Ende 2023 sind in Deutschland ca. 165 Abfallvergärungsanlagen in Betrieb. In diesen werden organische Abfälle (mit einem organischen Anteil ≥ 90 Prozent, massebezogen) wie getrennt erfasste Bioabfälle, Garten- und Parkabfälle, Speisereste, Abfälle aus der Lebensmittelindustrie oder sonstige organische Abfälle zur Biogasproduktion eingesetzt. 126 dieser Abfallvergärungsanlagen werden dabei als Vor-Ort-Verstromungsanlagen betrieben, an den übrigen Anlagenstandorten wird das produzierte Biogas zu Biomethan aufbereitet.

In rund 105 Abfallvergärungsanlagen werden Bio- und Grünabfälle aus getrennter Sammlung eingesetzt – mit sehr unterschiedlichen Anteilen am Gesamtinput. Im Bereich der Vor-Ort-Verstromung sind dies etwa 90 Anlagen. In den Jahren 2022 bis 2023 gingen drei neue Vergärungsanlagen (Vor-Ort-Verstromung) in Betrieb. Alle Anlagen werden dabei auf Basis getrennt gesammelter Bioabfälle (Biotonne und Grünabfälle) betrieben. Zum Stand Ende 2023 sind seit Inkrafttreten des EEG 2012 insgesamt 34 Abfallvergärungsanlagen mit Vor-Ort-Verstromung in Betrieb gegangen. In 31 dieser Anlagen wird ausschließlich oder überwiegend getrennt erfasster Bioabfall gemäß §27a EEG 2012/ §45 EEG 2014/ §43 EEG 2017/2021/2023 zur Vergärung eingesetzt. Eine Verteilung der (Bio)-Abfallvergärungsanlagen mit Vor-Ort-Verstromung in Deutschland differenziert nach Substratinput (Stand Ende 2021) ist in Abb. 16 dargestellt.

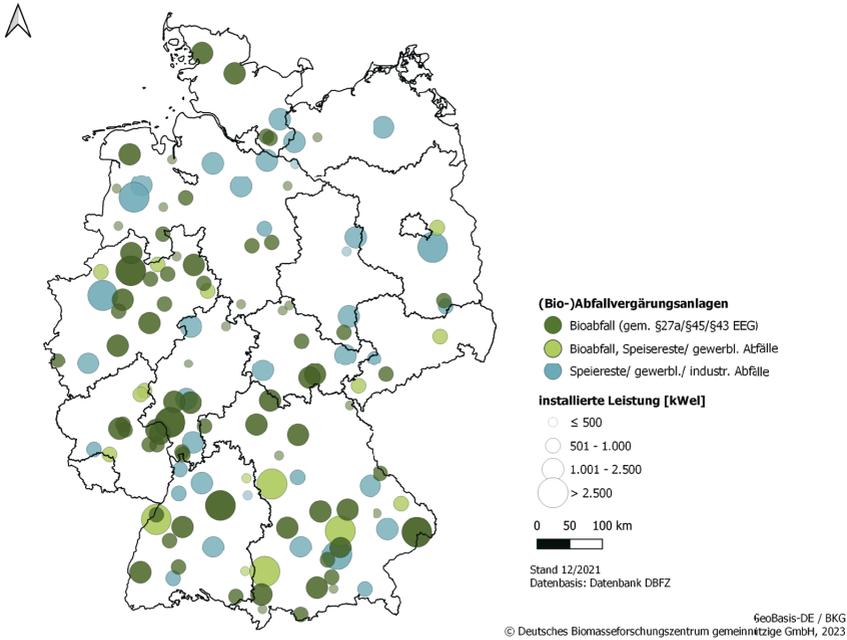


Abb. 16: (Bio-)Abfallvergärungsanlagen mit Vor-Ort-Verstromung in Deutschland differenziert nach Betriebsstatus und Substratinput, ©DBFZ.

3 Ausblick

Wie schon in der Einleitung dargestellt, kann und muss die nachhaltige stoffliche und energetische Nutzung von Biomasse einen wesentlichen Beitrag auf dem Weg zu einem klimaneutralen Deutschland im Jahr 2024 leisten. Grundvoraussetzung hierfür ist, dass wir unseren Material- und Energieverbrauch erheblich verringern. Dies ist nur mit signifikanten Effizienzsteigerungen und Konsumverzicht zu erreichen. Zentrale weitere Handlungsfelder sind zum einen die Umstellung der Energieversorgung in den nächsten Jahrzehnten, vollständig und in allen Sektoren, auf erneuerbare Energien (EE). Hier sind ein massiver Ausbau und ein optimiertes Zusammenspiel von Wind- und Solarenergie, Bioenergie, Geothermie und Wasserkraft für Strom, Wärme/Kälte und Mobilität erforderlich.

Bioenergie leistet aktuell einen bedeutenden Beitrag zum deutschen Energiemix und der Anteil am gesamten Primärenergieverbrauch lag 2023 bei 10,9 %, während die restlichen erneuerbaren Quellen zusammen nur auf nur 8,7 % kamen. Das heißt der Anteil der Bioenergie bezogen auf die Bereitstellung von Primärenergie durch die EE lag bei knapp 56 %. Der Anteil der erneuerbaren Energien am Bruttoendenergieverbrauch stieg in 2023 gegenüber dem Vorjahr mit 1,2 Prozentpunkten auf 22,0 % (UBA 2024a). Biomasse ist mit 49 % aller erneuerbaren Energien auch bezogen auf den Endenergieverbrauch immer noch der

wichtigste erneuerbare Energieträger in Deutschland und in allen Sektoren als Brennstoff zum Heizen, als Biokraftstoff im Verkehr und als Biogas/Biomethan zur Strom- und Wärmeerzeugung gefragt.

Die besondere Stärke der Biomasse als Energieträger liegt in ihrer Fähigkeit, wetterunabhängig, zuverlässig und planbar Energie zu liefern, um stabilere Netze, eine sichere Strom- und Wärmeversorgung und planbare Produktionsprozesse zu ermöglichen. Diese Eigenschaften werden für das künftige Energiesystem auch langfristig benötigt und spielen eine unterstützende Rolle, insbesondere bei der Sicherung der Energieversorgung zum Ausgleich volatiler Energiequellen. Künftig wird die Bioenergie primär zum Schließen von „Lücken“ gebraucht, wenn die anderen EE die Versorgungssicherheit alleine nicht gewährleisten können und die energetische Verwertung biogener Abfälle und Reststoffe wird einen höheren Stellenwert erlangen.

Bei der Transformation unseres „linearen“ Wirtschaftssystems zu einer wirklichen Kreislaufwirtschaft ist die Umstellung der Versorgung der Industrie mit organischen Grundstoffen möglichst weitgehend auf biobasierte Stoffe ein zentraler Baustein. Auch hier gilt es, die Umstellungsprozesse so zu gestalten, dass u.a. die Aspekte Klimaschutz und volkswirtschaftlicher Nutzen optimiert werden. Hierfür sind neue Technologiekonzepte sowie Koppel- und Kaskadennutzung erforderlich, aber auch „negative“ Emissionen, die über die Speicherung von „grünem“ Kohlenstoff generiert werden. Biomasse ist dabei aus nachhaltigem Anbau und in Form biogener Abfälle und Reststoffe bereitzustellen.

Somit rückt Biomasse verstärkt in den Fokus als wichtiger „grüner“ Kohlenstoffträger, einerseits zur Senkung und Bindung von CO₂-Emissionen, andererseits als der Kohlenstoffträger für die zukünftige Bioökonomie. Dies wird die Nachfrage nach Biomasse und bzw. Bedarf nach einer nachhaltigen Kaskaden- und Koppelnutzung in Zukunft deutlich verstärken.

In Deutschland wird der Transformationsprozess zu einer nachhaltigen, zirkulären biobasierten Wirtschaft bzw. Gesellschaft u.a. durch den Bioökonomierat der Bundesregierung begleitet. Auch im Koalitionsvertrag der aktuellen Bundesregierung ist der Auftrag zur Erstellung einer Nationalen Biomassestrategie (NABIS) verankert. Die Entwicklung der NABIS wurde federführend vom BMWK, BMEL und BMUV übernommen, mit dem ursprünglichen Ziel einer Verabschiedung im Bundeskabinett bis Ende 2023. Vor dem Hintergrund des Klima- und Biodiversitätsschutzes und der Ernährungssicherung zielt die NABIS darauf ab, Biomasseströme gezielt zu lenken, damit diese wertvolle Ressource bestmöglich genutzt wird. Eine solche langfristig angelegte Strategie ist sicher erforderlich und hilfreich, um die in Deutschland nur begrenzt vorhandene Biomasse künftig möglichst optimal stofflich und energetisch zu verwerten. Hierzu sollten die wesentlichen Eckpunkte in der NABIS festgeschrieben werden. Allerdings sollten bei der Umsetzung der NABIS kleinteilige Regelungen vermieden werden, da diese typisch deutsche Herangehensweise zu sehr hohen volkswirtschaft-

lichen Kosten und Fehlentwicklungen führen kann, die uns im Klima- und Ressourcenschutz nicht weiterbringen. Derzeit ist leider weder seriös abschätzbar, ob die NABIS die gesteckten Ziele erreichen kann und wann diese beschlossen wird. Es existiert noch kein fachlich/politisch abgestimmter Entwurf von BMWK, BMEL & BMUV und die ursprünglich angekündigte und derzeit gestoppte Stakeholder-Beteiligung steht ebenfalls noch aus, so dass die Verabschiedung der NABIS im Bundeskabinett vor der Sommerpause 2024 sehr unwahrscheinlich ist.

Der Einstieg in die angestrebte zirkuläre Bioökonomie kann aber nur gelingen, wenn auch die Verwertung von biogenen Abfällen und Reststoffen den notwendigen Stellenwert in der NABIS erhält. Dies betrifft sowohl die stoffliche als auch energetische Nutzung und dies sind auch die zentralen Arbeitsschwerpunkte im Rahmen der Kooperation des DBFZ mit dem Lehrstuhl für Abfall- und Stoffstromwirtschaft an der Universität Rostock, die auch in den nächsten Jahren weiter intensiviert werden soll.

Literatur/Quellen

- AGEB 2023: Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen e.V.: Energieverbrauch fällt kräftig / Weiterer Ausbau der Erneuerbaren, URL: <https://ag-energiebilanzen.de/energieverbrauch-ist-2023-kraeftig-gesunken/>, abgerufen am 06.05.2024
- AGEB 2024: Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen e.V.: Energieverbrauch in Deutschland im Jahr 2023, URL: https://ag-energiebilanzen.de/wp-content/uploads/2024/04/AGEB_Jahresbericht2023_20240403_dt.pdf, abgerufen am 06.05.2024
- AGEE-Stat, (2023): Aktuelle Schätzung zur Entwicklung der erneuerbaren Energien im Jahr 2023, AGEB-Wintertagung, 14.12.2023, URL: <https://ag-energiebilanzen.de/wp-content/uploads/2023/11/Erneuerbare.pdf>, abgerufen am 25.04.2024.
- AGEE-Stat (2024a): Erneuerbare Energien in Deutschland. Daten zur Entwicklung im Jahr 2023. Hintergrund // März 2024. Geschäftsstelle der Arbeitsgruppe Erneuerbare Energien-Statistik (AGEE-Stat) am Umweltbundesamt, Umweltbundesamt (Hrsg.), https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/479/publikationen/2024_uba_hg_erneuerbareenergien_dt.pdf, abgerufen am 22.04.2024.
- AGEE-Stat (2024b): Entwicklung der erneuerbaren Energien in Deutschland im Jahr 2023 – Grafiken und Diagramme unter Verwendung aktueller Daten der Arbeitsgruppe Erneuerbare Energien-Statistik (AGEE-Stat). https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/372/dokumente/erneuerbare-energien-in-deutschland-uba-2023_02-2024.pdf, abgerufen am 26.04.2024.
- AGEE-Stat (2024c): Zeitreihen zur Entwicklung der erneuerbaren Energien in Deutschland. Geschäftsstelle der Arbeitsgruppe Erneuerbare Energien-Statistik (AGEE-Stat) am Umweltbundesamt, Umweltbundesamt (Hrsg.), https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/372/dokumente/agee_stat-zeitreihen_zur_entwicklung_der_erneuerbaren_energien_in_deutschland_deu_uba.pdf, abgerufen am 06.05.2024

- Agora Energiewende (2024): Die Energiewende in Deutschland: Stand der Dinge 2023. Rückblick auf die wesentlichen Entwicklungen sowie Ausblick auf 2024. https://www.agora-energiewende.de/fileadmin/Projekte/2023/2023-35_DE_JAW23/A-EW_317_JAW23_WEB.pdf, abgerufen am 22.04.2024.
- BLE (2024): Evaluations- und Erfahrungsbericht für das Jahr 2022 Biomassestrom-Nachhaltigkeitsverordnung Biokraftstoff-Nachhaltigkeitsverordnung, URL: https://www.ble.de/SharedDocs/Downloads/DE/Klima-Energie/Nachhaltige-Biomasseherstellung/Evaluationsbericht_2022.pdf;jsessionid=5054FC8278B4CF00E5E24D39D46D662D.internet972?__blob=publicationFile&v=4, abgerufen am 17.05.2024
- Brost, P. (2024): Ampel-Fractionen einigen sich auf Klimaschutzgesetz und Solarpaket. URL: <https://www.tagesschau.de/inland/klimaschutzgesetz-ampel-solarpaket-100.html>, abgerufen am 22.04.2024.
- Bundesnetzagentur (BNetzA) (2024): Rückblick: Gasversorgung im Jahr 2023. Berlin. Online: https://www.bundesnetzagentur.de/DE/Gasversorgung/a_Gasversorgung_2023/start.html abgerufen am 03.05.2024
- DBFZ (2024): Datenbank Biogas DBFZ, Auswertungen Stand 04/2024
- Denysenko, V.; Daniel-Gromke, J.; Binder, P. M.; Foix, L. (2023): Opportunities for the valorisation of CO₂ extracted from biogas. Deliverable 4.1 Report with the current state, progress made up to date and future challenges of advanced technologies for efficient CO₂ valorisation at multiple scales, from pilot to market scale, in the European Union. EU-Projekt SEcuring doMestic PReduction of cost-Effective BIOMethane (SEMPRE-BIO), GA 101084297, 30.11.2023.
- Destatis, Statistisches Bundesamt (2024): Bruttostromerzeugung in Deutschland für 2019 bis 2023. Stand 7.03.2024. URL: <https://www.destatis.de/DE/Themen/Branchen-Unternehmen/Energie/Erzeugung/Tabellen/bruttostromerzeugung.html>, abgerufen am 07.05.2024
- BMUV (2023): Kurzpapier: Maßnahme zur Verringerung des Anteils von Biokraftstoffen aus Nahrungs- und Futtermittelpflanzen in Folge des Ukraine-Krieges, URL: <https://www.klimareporter.de/images/dokumente/2023/01/230118-arbeitspapier-eckpunkte-agrokraftstoffe.pdf>, abgerufen am 17.05.2024.
- FNR (2024a): „Holzpelletfeuerungen in Deutschland“, FNR auf Basis von Daten des Deutschen Pelletinstituts, URL: <https://mediathek.fnr.de/grafiken/bioenergie/feste-biobrennstoffe/holzpelletfeuerungen-in-deutschland.html>, abgerufen 25.04.2024.
- FNR (2024b): Feuerungsanlagen in Deutschland 2022, Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V., URL: <https://mediathek.fnr.de/grafiken/bioenergie/feste-biobrennstoffe/feuerungsanlagen-in-deutschland.html>, abgerufen: 25.04.2024.
- FNR (2024c): Holzpellets – Produktion und Verbrauch, FNR auf Basis von Daten des Deutschen Pelletinstituts, URL: <https://mediathek.fnr.de/grafiken/bioenergie/feste-biobrennstoffe/holzpellets-produktion-und-verbrauch-in-deutschland.html>, abgerufen 25.04.2024.
- KBA (2024): Jahresbilanz 2024. Bestandsbarometer. Zahlen, Daten, Fakten. URL: https://www.kba.de/DE/Statistik/Fahrzeuge/Bestand/Jahresbilanz_Bestand/fz_b_jahresbilanz_node.html, abgerufen am 22.04.2024.

- Nelles M., Angelova E., Deprie K., Kornatz P., Rensberg N., Schaller S., Selig, M. (2023): Stand und Perspektiven der energetischen Verwertung von Biomasse in Deutschland. Im Tagungsband 17. Rostocker Bioenergieforum/ 17. Rostocker Bioenergieforum am 15. und 16. Juni 2023. Schriftenreihe Umweltingenieurwesen, Band 114. DOI: https://doi.org/10.18453/rosdok_id00004269.
- Rensberg, N.; Denysenko, V.; Daniel-Gromke, J. (2023): Biogaserzeugung und -nutzung in Deutschland. Report zum Anlagenbestand Biogas und Biomethan. (DBFZ-Report, 50). Leipzig: DBFZ. VII, 9-122 S. ISBN: 978-3-949807-02-2. DOI: 10.48480/zptb-yy32
- Rensberg, N. (2024): Betreiberbefragung DBFZ 2023, Bezugsjahr 2022.
- Schröder, J.; Naumann, K. (Hrsg.) (2023): Monitoring erneuerbarer Energien im Verkehr. 1. korrigierte Aufl. (DBFZ-Report 44). Leipzig: DBFZ. 338 S. ISBN: 978-3-946629-82-5. DOI: 10.48480/19nz-0322.
- UBA (2024a): Erneuerbare Energien in Deutschland Daten zur Entwicklung im Jahr 2023, Hintergrund// März 2024, Herausgeber: Umweltbundesamt. ISSN 2363-829X.
- UBA (2024b): Verkehrsinfrastruktur und Fahrzeugbestand, URL: <https://www.umweltbundesamt.de/daten/verkehr/verkehrsinfrastruktur-fahrzeugbestand#lange-der-verkehrswege>, abgerufen am 22.04.2024.
- UBA (2024c): Erneuerbare Energien in Zahlen. URL: <https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/erneuerbare-energien/erneuerbare-energien-in-zahlen>, Stand: 08.03.2024
- UBA (2024d): Zeitreihen zur Entwicklung der erneuerbaren Energien in Deutschland https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/372/dokumente/agee_stat-zeitreihen_zur_entwicklung_der_erneuerbaren_energien_in_deutschland_deu_uba.pdf

Kontakt

Prof. Dr. mont. Michael Nelles, Wiss. Geschäftsführer

DBFZ - Deutsches Biomasseforschungszentrum gGmbH

☎ +49 (0)341.2434-112 | ✉ michael.nelles@dbfz.de | 🌐 www.dbfz.de

und

Universität Rostock, Agrar- und Umweltwissenschaftliche Fakultät
Professur Abfall- und Stoffstromwirtschaft

☎ +49 (0)381.498-3400 | ✉ michael.nelles@uni-rostock.de

🌐 <https://www.auf.uni-rostock.de/professuren/bau-und-umweltbereich/abfall-und-stoffstromwirtschaft/>

*René Backes, Nora Szarka, Friederike Naegeli de Torres,
Fabian Riedel, Linda Blümel, Karl-Friedrich Cyffka, Sören Richter,
Jasmin Kalcher*

Stand und Perspektiven der stofflichen Biomasse- nutzung in Deutschland

1 Einleitung

Im Zuge der Bemühungen zur Reduktion fossiler Rohstoffe wird eine nachhaltige Nutzung von biogenen Rohstoffen immer bedeutender. Ein Blick auf die in Deutschland aktuell und zukünftig erwarteten umgesetzten stofflichen Mengen verdeutlicht, dass wir in absehbarer Zeit mit dem bisherigen Vorgehen bei einer steigenden Nachfrage so nicht weiterkommen können.

Im Laufe der letzten Jahre begann sich Biomasse als Energielieferant in den Endnutzungssektoren Strom, Wärme und Verkehr in Deutschland zu etablieren. Mit Einzug in die Energieversorgung über Verfahren wie der fermentativen Biomethanproduktion oder der Ethanolproduktion gelingt es zunehmend, chemische Grundbausteine in relevanten Mengen zur Verfügung zu stellen. Von diesem Moment an beginnt ein differenzierter Blick auf die stoffliche Nutzung von Biomasse. Längst haben wir uns an ihre selbstverständliche Verwendung in vielen Bereichen gewöhnt, mit Textil- und Bauindustrie seien nur zwei genannt. Aber ab dem Zeitpunkt in dem ganze fossile Wertschöpfungsketten durch nachwachsende Rohstoffe zugänglich werden, wie mit der Synthese von Methan, eröffnen sich neue Szenarien, die auch differenziert betrachtet werden müssen.

Zu dem bereits bestehenden hohen Nutzungsgrad der Ressourcen wird sich in Zukunft zusätzlich ein zunehmender Bedarf für energetische (z.B. Verkehrssektor) und vor allem stoffliche Anwendungen (z.B. Chemie- und Bausektor) ergeben (dena 2021; Geres et al. 2019).

Welche Rolle Biomasse bei der stofflichen Nutzung einnehmen kann, hängt in Zukunft maßgeblich von der Verfügbarkeit ab und welche Spielregeln, Treiber und Hemmnisse gelten werden. Trotz einer sich rasch entwickelten Bioökonomie mit neuen Ansätzen und Erfolgen, stehen auch Herausforderungen im Vordergrund. Diese sind neben der begrenzten Verfügbarkeit und nachhaltigen Produktion, die Konkurrenz um Landnutzung zwischen Nahrungsmittel- und Rohstoffproduktion sowie technische und ökonomische Hürden.

Der folgende Beitrag soll einen Einblick über die aktuellen Verfügbarkeiten von NawaRo, Holz, sowie Rest- und Abfallstoffen in Deutschland geben. Anhand der Szenarien für die Bau-, Papier- und Chemieindustrie soll auch die Perspektive einer zukünftigen nachhaltigen Biomassenutzung beleuchtet werden.

2 Verfügbare Rohstoffe

Bei der Betrachtung der sich bereits in stofflicher Verwendung befindlichen biogenen Rohstoffe ist eine Unterteilung in Nachwachsende Rohstoffe (NawaRo), Holz sowie nicht forstwirtschaftliche Rest- und Abfallstoffe sinnvoll. Rest- und Abfallstoffe unterliegen eigenen, lange etablierten Regularien. Bei zunehmender Bedeutung von biogenen Rest- und Abfallstoffen werden also auch hier Veränderungen notwendig werden. Dennoch bieten Rest- und Abfallstoffe ein bis dato noch nicht ausgeschöpftes Potenzial.

2.1 Nachwachsende Rohstoffe

„Nachwachsende Rohstoffe (NawaRo), [...] sind land- und forstwirtschaftlich erzeugte organische Rohstoffe pflanzlichen, tierischen oder mikrobiellen Ursprungs, die nicht als Nahrungs- oder Futtermittel Verwendung finden, sondern stofflich zur Herstellung von Chemikalien, Werkstoffen und anderen biobasierten Produkten oder energetisch zur Erzeugung von Wärme, Strom oder Kraftstoffen genutzt werden.“ (Vgl. Becker et al. 2024, S.1)

2.1.1 Anbaufläche von NawaRo in Deutschland

Gemäß den Erhebungen der Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. (FNR) wurden im Jahr 2022 ca. 46 % (16,6 Mio. ha) der Gesamtfläche in Deutschland für landwirtschaftliche Zwecke genutzt. Der Großteil dieser Fläche (82 % bzw. ca. 13,6 Mio. ha) ist für die Produktion von Futter- und Nahrungsmitteln bewirtschaftet worden. Auf den übrigen 18 % der landwirtschaftlichen Nutzfläche (ca. 3 Mio. ha) wurden NawaRo angebaut, wobei es sich hierbei zu großen Teilen um Energiepflanzen handelte (13-15 % in anderer Nutzung). Etwa 2 % entfielen auf den Anbau von Industriepflanzen (0,3 Mio. ha). Bezogen auf die beanspruchte Anbaufläche war die Herstellung von Industriestärke aus Getreide, Kartoffeln und Körnermais von größter Relevanz, gefolgt von der Produktion technischen Öls aus Raps (vgl. Tab. 1) (Becker et al. 2024).

Während in dem Zeitraum von 2004-2007 ein erheblicher Anstieg der Anbaufläche von NawaRo zu verzeichnen war (von 1 Mio. ha auf 2 Mio. ha), kann festgehalten werden, dass sich dessen Wachstum seither verringert hat (Becker et al. 2024).

Tab. 1: Anbaufläche nach Verwendung von NawaRo (ausschließlich Industriepflanzen) in Deutschland im Jahr 2022 (Quelle: Becker et al. 2024, S. 5, 9; Statistisches Bundesamt 2024a, 2024b)

NawaRo	Nutzung		Anbaufläche (in Tsd. ha)	Anteil an Gesamtanbau-fläche Deutschlands
Raps	energetisch	Biodiesel, PÖ	541	50 %
	stofflich	Technisches Rapsöl	74	7 %
	gesamt		1.088,20	100 %
Sonnenblume	stofflich	Technisches Sonnenblumenöl	20,8	24 %
	gesamt		85,6	100 %
Lein	stofflich	Technisches Leinöl	5,1	100 %
	gesamt		5,1	100 %
Getreide	energetisch	Bioethanol	190	3 %
		Biogas	160	3 %
	Stofflich	Industriestärke	78,8	1 %
	Gesamt		5655,8	100 %
Körnermais	energetisch	Bioethanol	29,8	7 %
	stofflich	Industriestärke	29	6 %
	Gesamt		456,7	100 %
Kartoffel	stofflich	Industriestärke	37,1	14 %
	gesamt		266,4	100 %
Zuckerrüben	energetisch	Bioethanol	10,7	3 %
		Biogas	30,8	8 %
	stofflich	Industriezucker	10,5	3 %
gesamt		396,3	100 %	
Arznei- und Färbepflanzen	stofflich	Arznei- und Färberstoffe	12	k.A.
	gesamt		k.A.	100 %
Pflanzenfasern	stofflich	Pflanzenfasern	7	k.A.
	gesamt		k.A.	100 %

2.1.2 Einsatzmengen von NawaRo für stoffliche Verwertung in Deutschland

Insgesamt wurden im Jahr 2022 ca. 3,3 Mio. t NawaRo für stoffliche Verwertungspfade eingesetzt. Wie der Tabelle 2 zu entnehmen ist, sind insbesondere biomassebasierte Stärke, Fette und Öle von hoher Relevanz im Sinne einer stofflichen Nutzung. Letztere machten knapp 30 % der stofflichen Gesamteinsatzmenge aus und umfassten neben pflanzlichen Ölen (ca. 800.000 t) auch Fette tierischen Ursprungs (ca. 150.000 t). Diese könnten zwar den biogenen Rest- und Abfallstoffen zugerechnet werden, hier gehören sie allerdings in den aufbereiteten FNR-Daten zum Bereich NawaRo. Zusammen mit Zucker und Chemiezellstoff macht Stärke in etwa die Hälfte der Gesamteinsatzmenge von NawaRo in Deutschland aus (Becker et al. 2024).

Bei alledem ist jedoch zu berücksichtigen, die hier aufgeführten Daten weisen ausschließlich die industriell stoffliche Nutzung aus. Sie bilden die biogenen Rohstoffe aus NawaRo ab, die ihre industrielle Verwendung in der Chemikalien- und Werkstoffproduktion finden oder zur Herstellung anderer biobasierter Pro-

dukte genutzt werden. Des Weiteren sind in den angegebenen Einsatzmengen die aus dem Ausland importierten Mengen enthalten. Man erwartet, dass die aus weltweiten Ländern importierten NawaRo in etwa 50-60 % der in Deutschland verarbeiteten Mengen ausmachen. Die hergestellten Produkte werden dann sowohl inländisch verbraucht als auch ins Ausland exportiert (Becker et al. 2024). Beachtliche Mengen der NawaRo fließen in die deutsche Chemieindustrie und werden zu biobasierten Produkten verarbeitet (Vgl. Tab. 2).

Tab. 2: Einsatzmenge von NawaRo in Deutschland im Jahr 2022
(Quelle: Becker et al. 2024, S. 11, 15)

Rohstoff	Gesamteinsatzmenge für stoffliche Nutzung (in t)	Einsatzmenge in Chemieindustrie (in t)
Fette und Öle	950.000	950.000
Stärke	1.132.000	484.000
Zucker	115.000	115.000
Chemiezellstoff	384.000	384.000
Naturfasern	116.000	k.A.
Proteine	91.000	91.000
Sonstige*	551.000	414.000
Summe Rohstoffe	3.340.000	2.440.000

* Glycerin, Kork, Naturkautschuk, Wachse/Harze/Gerbstoffe und Andere
(Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. 2024)

2.1.3 Import und Export von NawaRo

Die Differenzierung nach Ort des Biomasseanbaus, Ort der Biomasseverarbeitung und Ort der Nutzung hergestellter Produkte ist entscheidend bei der Einschätzung der Relevanz, die Biomasse für stoffliche Nutzungszwecke hat. Aus diesem Grund soll ebenfalls beleuchtet werden, welchen Stellenwert Biomasse- und Flächenimporte (im Ausland belegte Anbauflächen für Import von NawaRo) für die stoffliche Biomasseverwertung in Deutschland haben. Laut statistischem Bundesamt wurden im Jahr 2017 innerhalb Deutschlands Ernährungsgüter verbraucht, die einer Flächenbelegung von 19,1 Mio. ha entsprachen. Davon waren 7,4 Mio. ha pflanzlichen und 11,6 Mio. ha tierischen Ursprungs (Statistisches Bundesamt 2020). Die Anteile verteilten sich dabei zu etwa 7,2 Mio. ha auf nationale Anbaufläche und ca. 11,9 Mio. ha ausländische Flächen für Importe. Bei der importbezogenen Flächenbelegung sind die ausländischen Anbauflächen für Industrie- und Energiepflanzen nicht berücksichtigt (Statistisches Bundesamt 2020). Gemäß den vorhergehenden Angaben zur Flächenbelegung übersteigt der ernährungsbedingte Flächenkonsum (19,1 Mio. ha) die deutsche landwirtschaftliche Fläche (Statistisches Bundesamt 2020) bzw. entspricht nach Dräger de Teran und Suckow (2021) ungefähr genau der landwirtschaftlichen Anbaufläche.

Außenhandelsbilanzen wurden auch im Rahmen des SYMOBIO-Projektes am DBFZ betrachtet, indem Stoffströme für den Agrarbereich in Deutschland für das Jahr 2015 skizziert worden sind. Hierbei wurde eine Importmenge von knapp 39 Mio. t an Rohwaren und verarbeiteten Waren des Agrarbereichs ausgewiesen, während sich die Exporte ebendieser Waren auf ca. 37,5 Mio. t beliefen (Importüberschuss). In diesen Betrachtungen ist u.a. Getreide enthalten, welches auf Grund der Höhe der genutzten Anbaufläche in Deutschland als eines der mengenmäßig wichtigsten NawaRo gilt. Als Agrarrohstoff wies Getreide einen Exportüberschuss auf (knapp 10 Mio. t Importe und 15,2 Mio. t Exporte), ebenso als Zwischenprodukt (ca. 3,5 Mio. t Importe und 5,2 Mio. t Exporte). Wird ein Blick auf die Außenhandelsbilanz von Getreide als Endprodukt geworfen, zeigte sich hingegen ein Importüberschuss – bei einer Importmenge von ca. 3,9 Mio. t und dem gegenüber einer Exportmenge von ca. 2,9 Mio. t. Für stoffliche Zwecke wurden 10 % des Getreides (Endprodukt) genutzt, 8 % fanden in der energetischen Erzeugung und 2 % als Saatgut Verwendung. Als Hauptnutzungspfad von Getreide als Endprodukt wurde bei der Stoffstromanalyse die Verwendung als Tierfuttermittel identifiziert (60 %), während weitere 17 % des Getreides für die Nahrungsmittelproduktion eingesetzt wurden (Bringezu et al. 2020).

Durch die Nutzung von Biokraftstoffen aus Nahrungs- und Futtermitteln (energetischer Anteil von 4,4 % als Obergrenze bezüglich Endenergieverbrauch im Straßen- und Schienenverkehr) wird im In- und Ausland eine Anbaufläche von rund 2,5 Mio. ha belegt (BMUV 2023).

Gerade diese Biokraftstoffe aus Nahrungs- und Futtermitteln werden langfristig eine Rolle spielen, die jedoch heute noch nicht leicht abzusehen sind, insbesondere in bestimmten Bereichen wie dem Betrieb von land- und forstwirtschaftlichen Maschinen (KTBL 2023).

2.2 Holz

Das Rohholzaufkommen (in Mio. m³) ist in Deutschland im Zeitraum von 1995 bis 2022 angewachsen (siehe Abbildung 1). Dieses beinhaltet als größten Anteil die Entnahme von Derbholz (> 7 cm Durchmesser) und Nicht-Derbholz (< 7 cm Durchmesser) ohne Rinde. Diese Rohholzentnahme ist im Zeitraum von 2010 bis 2022 um 34 % gestiegen. Der hohe Wert der Entnahme in 2007 wurde durch das Sturmtief Kyrill bedingt, das entsprechende Schadholzmengen verursacht hatte. In den Folgejahren ging die Entnahme wieder zurück und es wurden stattdessen Lagerbestände genutzt. Es ist zudem zu erkennen, dass von 1995 bis 2008 Rohholz netto exportiert wurde und von 2009 bis 2018 Rohholz netto importiert wurde. Seit 2019 wird Rohholz wieder zunehmend exportiert, große Mengen fließen dabei vor allem nach Asien bzw. China. Weitere Daten zu Import-Export-Bilanzen werden von Thünen veröffentlicht (Thünen-Institut 2024) bzw. sind im Bioökonomiemonitoring-Bericht zu finden (Bringezu et al. 2020).

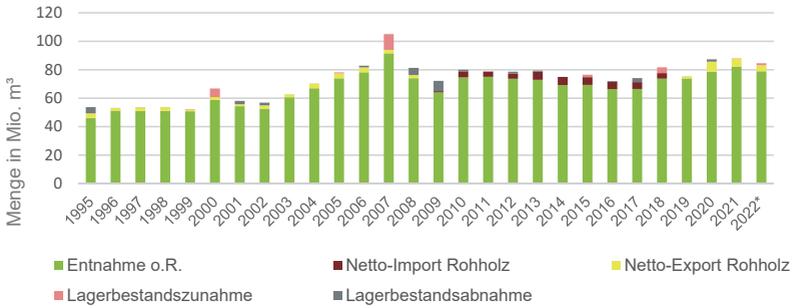


Abb. 1: Rohholzaufkommen (in Mio. m³) in Deutschland 1995-2022 (*vorläufig);
Quelle: Thünen-Institut 2023

Die Rohholzverwendung ist analog zum Aufkommen entsprechend seit 1995 angestiegen und bewegte sich seit 2006 bis 2013 (mit Ausnahme 2009) auf einem konstanten Niveau bei rund 76 bis 80 Mio. m³ (siehe Abb. 2). Seit 2014 bis 2022 liegt das Niveau dagegen etwas niedriger im Bereich 72 bis 76 Mio m³. Während die stoffliche Verwendung in Summe in 2007 mit 57 Mio m³ einen Höhepunkt erreicht hat und bis 2022 auf 51 Mio. m³ abgesunken ist, ist die energetische Nutzung der energetischen Verwender von maximal 28 Mio. m³ in 2013 auf 22 Mio. m³ in 2022 gesunken. Der stoffliche Nutzungsanteil ist bis auf rund 65 % (35 % energetisch) in 2013 gefallen und bis 2022 auf 70 % (30 % energetisch) gewachsen. Während im stofflichen Bereich die größten Rohholzmengen in der Sägeindustrie verwendet werden, wird die energetische Nutzung vor allem durch die Privathaushalte dominiert. Möchte man gewisse Mengen perspektivisch umlenken, muss man also entweder technologische Alternativen zum Heizen mit Holz fördern bzw. Preisanreize setzen, die eine Umlenkung von Primärholz in den Bau- oder in den Chemiesektor beeinflussen (Schindler et al. 2023). Perspektivisch wird zudem der Verbrauch der Bioraffinerie in Leuna von rund 450.000 Tonnen Buchenhackschnitzel in die Statistik einfließen (Mantau 2023).

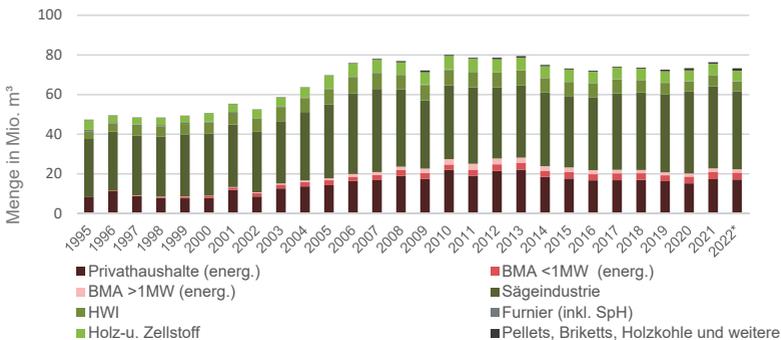


Abb. 2: Rohholzverwendung (in Mio. m³) in Deutschland 1995-2022 (*vorläufig);
Quelle: Thünen-Institut 2023

Das Aufkommen sowie die Verwendung von Rinde und weiteren sekundären Holzrohstoffen, also Sägenebenprodukten (SNP), sonstigem Industrie-Restholz, Schwarzlaube und Altholz, wird durch das Rohstoffmonitoring Holz beschrieben (FNR 2023). Die Abb. 3 zeigt dabei anwachsende Aufkommensmengen bei Sägenebenprodukte, Schwarzlaube und Altholz von 1990 bis 2020. Das Aufkommen von Rinde und sonstigem Industrierestholz ist dagegen bis 2010 angewachsen und bis 2020 wieder gefallen.

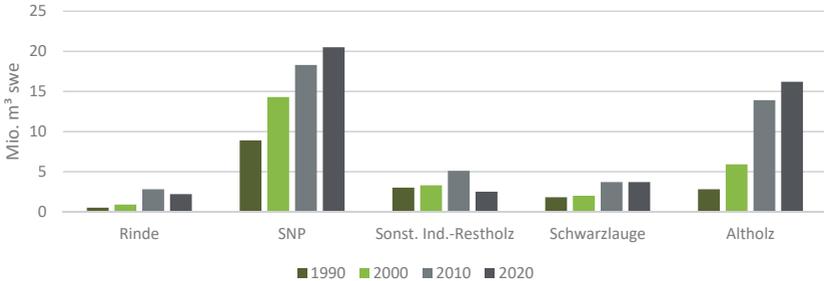


Abb. 3: Aufkommen (in Mio. m³ swe) von Rinde und sekundären Holzrohstoffe (Reststoffe und Nebenprodukte) im zeitlichen Verlauf;

Quelle: FNR 2023: (swe: sawn wood equivalent. Festmeteräquivalent)

In Abb. 4 werden für die benannten Biomassen zudem die Verteilung von stofflicher und energetischer Nutzung für die Jahre 1990, 2000, 2010 und 2020 gegenübergestellt. Rinde und die weiteren sekundären Holzrohstoffe wurden in Summe in 1990 zu 46 % stofflich genutzt, in 2000 zu 43 %, in 2010 zu 33 % und in 2020 wieder zu 37 % stofflich genutzt. Insgesamt überwiegt also eine energetische Nutzung, wobei diese seit 2010 leicht rückläufig ist. Sägenebenprodukte wurden in 2020 zu 55 % stofflich verwendet. Sonstiges Industrierestholz wurden in 2020 zu 16 % und Altholz zu 15 % stofflich verwendet. Nach Auslaufen der EEG-Förderung für die energetische Altholznutzung bieten diese Mengen perspektivisch eine mengenmäßig relevante Option für eine Umlenkung in beispielsweise den Chemiesektor. Dies wird beispielsweise durch das Vorhaben HyAlt4Chem¹ auf technische Machbarkeit geprüft (EU-Recycling 2017). Schwarzlaube wird dagegen vollständig energetisch genutzt. Rinde wird fast ausschließlich energetisch und zu sehr geringen Anteilen im Pflanzenbau als Torfersatzstoff stofflich verwendet, wobei hier der Bedarf steigt (Hirschler et al. 2022). Während Primärhölzer überwiegend von Privathaushalten energetisch genutzt werden, werden die genannten Sekundärrohstoffe überwiegend von Biomasseanlagen verwendet.

¹ <https://eu-recycling.com/Archive/17404>

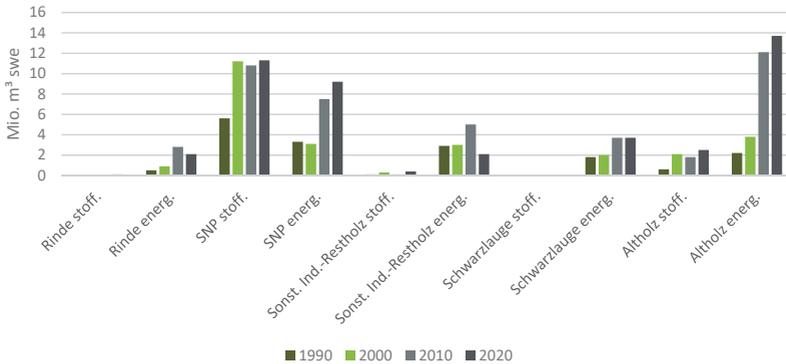


Abb. 4: Stoffliche und Energetische Verwendung (in Mio. m³ swe) von Rinde und sekundären Holzrohstoffen (Reststoffe und Nebenprodukte) im zeitlichen Verlauf; Quelle: FNR 2023

2.3 Biogene Abfälle und Reststoffe (ohne Holz- und Forstwirtschaft)

Weitere Potenziale für eine stoffliche Nutzung ergeben sich aus den biogenen Abfällen und Reststoffen aus Landwirtschaft und Industrie, sowie den Siedlungsabfällen und Reststoffen von sonstigen Flächen (Brödner et al. 2024). In Tab. 3 findet sich eine Übersicht über die technischen Biomassepotenziale² der genannten Gruppen für die Jahre 2015 und 2020 (Naegeli de Torres et al. 2023), wobei für landwirtschaftliche Nebenprodukte auf Grund laufender Datenaktualisierungen (Stand 05/2024) nur für Getreidestroh und Tierische Exkremete Zahlen ausgegeben werden.

Tab. 3: Technische Biomassepotenziale 2015 & 2020 in Mio. t TM

Technisches Biomassepotenzial 2015 & 2020						
	Technisches Biomassepotenzial 2015 [Mio. t TM]			Technisches Biomassepotenzial 2020 [Mio. t TM]		
	Min	Max	Mittel	Min	Max	Mittel
Industrielle Reststoffe	15,2	16,1	15,7	14,3	15,3	14,8
Reststoffe von sonstigen Flächen	3,1	4,4	3,8	no data	no data	no data
Siedlungsabfälle und Klärschlamm	28,5	39,8	34,1	28,4	39,6	34,0
Tierische Exkremete	16,8	22,1	19,5	15,2	20,0	17,6
Getreidestroh	7,9	14,2	11,0	6,9	12,4	9,7

Außer für Siedlungsabfälle und Klärschlamm, liegen derzeit (Stand Mai 2025) für das Jahr 2020 noch keine vollumfänglichen Daten zur Nutzung der hiergenannten Biomassegruppen vor. Aus diesem Grund werden nachfolgend die Nutzungsanteile für verschiedene Biomassegruppen nur für das Jahr 2015 darge-

² Das technische Potenzial beschreibt die zeit- und ortsabhängige, primär aus technischer Sicht (z. B. Bergungsraten, aber auch gesetzlicher Beschränkungen) stofflich oder energetisch nutzbare Menge einer Biomasse (Vgl. Brödner et al. 2024)

stellt (Tab. 4). Insbesondere Industrielle Abfälle und Reststoffe werden bereits zu Großteilen (ca. 85 %) stofflich genutzt. Siedlungsabfällen inkl. Klärschlamm werden etwa zur Hälfte (48-59 %) und Getreidestroh bereits zu mehr als einem Drittel (37-46 %) stofflich genutzt, wobei hier die Nutzung zur Humusreproduktion nicht als stoffliche Nutzung dargestellt wird, sondern bereits in die Berechnung des technischen Potenzials einfließt. Noch nicht berücksichtigt ist jedoch beispielsweise die Nutzung von Stroh zur Herstellung von Papier (Essity 2024). Eine stoffliche Nutzung (ohne Düngung) für die tierischen Exkremate war 2015 nicht etabliert, weshalb diese bis dato ausschließlich energetisch genutzt wurden. Einen Sonderfall stellen die Reststoffe von sonstigen Flächen dar. Bei dieser Kategorie kann davon ausgegangen werden, dass der Großteil genutzt wird. Auf Grund fehlender Daten lässt sich die Art der Nutzung (stofflich oder energetisch) für ca. 40 % des technischen Biomassepotenzials jedoch nicht festlegen.

Tab. 4: Nutzungsanteile nach Biomassegruppen 2015 (*2020)

Nutzungen 2015 (2020*): Anteil des jeweiligen Nutzungspfades am technischen Biomassepotenzial															
	Stofflich			Energetisch			Stofflich oder energetisch			Nicht differenzierbar			Mobilisierbar (=ungenutzt)		
	Min	Max	Mittel	Min	Max	Mittel	Min	Max	Mittel	Min	Max	Mittel	Min	Max	Mittel
Industrielle Reststoffe	85%	84%	84%	7%	7%	7%	2%	2%	2%	7%	7%	7%	0%	0%	0%
Reststoffe von sonstigen Flächen	0%	0%	0%	59%	42%	50%	0%	0%	0%	39%	41%	40%	2%	18%	10%
Siedlungsabfälle und Klärschlamm*	59%	48%	54%	18%	22%	20%	4%	6%	5%	1%	1%	1%	18%	24%	21%
Tierische Exkremate	0%	0%	0%	30%	27%	28%	0%	0%	0%	2%	2%	2%	67%	71%	69%
Getreidestroh	46%	37%	40%	1%	1%	1%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	53%	63%	59%

*Für Siedlungsabfälle und Klärschlamm liegt die Nutzung für 2020 für den Großteil des technischen Biomassepotenzials vor

Biogene Abfälle und Reststoffe werden sowohl inländisch genutzt als auch international gehandelt und nach Deutschland importiert. Gut geeignet für Importe sind Abfälle mit hoher Energiedichte, geringer Reaktivität und definierter Qualität, wie Altspesiefette oder Holzpellets. Generell ist es jedoch schwierig, konkrete Aussagen zu den Mengen, sowie den Verwertungswegen der importierten biogenen Abfälle und Reststoffe zu treffen, da viele biogene Abfälle statistisch nicht erfasst werden und sowohl Abfälle als auch Zwischen- und Endprodukte berücksichtigt werden müssen (Brödner et al. 2024). Insbesondere bei fortschrittlichen Biokraftstoffen aus Rest- und Abfallstoffen sind aufgrund der Vorgaben der Treibhausgasreduzierungsquoten-Regulatorik (THG-Quote) hohe Bedarfsaufwüchse bis 2030 zu erwarten (BMUV 2023). Derzeit werden diese zu rund 75 % aus dem Ausland (v.a. aus Asien) importiert (BLE 2024).

Hinsichtlich der stofflichen Verwertung von importierten biogenen Abfällen und Reststoffen wird beispielsweise davon ausgegangen, dass in Deutschland verwendete Torfersatzstoffe (u.a. aus Kokosfaser, Piniennrinde) zu mindestens 7 % importiert werden (BMEL 2022). Aber auch Importe von Altpapier verzeichnen einen Netto-Importüberschuss von 2,4 Mio. t (Rohholzäquivalent) (Verband Deutscher Papierfabriken e.V. 2021), wobei Altpapier überwiegend stofflich genutzt wird. In Deutschland liegt die Recyclingquote bei 79 % und es werden

knapp 17 Mio. Tonnen in 2020 zur Papierherstellung eingesetzt (Verband Deutscher Papierfabriken e. V. 2021).

3 Perspektiven der stofflichen Nutzung von Biomasse in Deutschland

Im Bereich der stofflichen Biomassenutzung in Deutschlands werden aktuell steigende Nachfragen in verschiedensten Sektoren registriert. In dieser Studie werden drei zentrale Sektoren, die Bau-, Papier- und Chemieindustrie betrachtet. Diese weisen aktuell einen hohen Biomasseanteil auf, sowie zukünftig anzunehmende wachsende Ansprüche, um sektorale aber auch nationalen Ziele der Treibhausgasneutralität bis 2045 zu unterstützen. Für die Erarbeitung von Perspektiven werden vor allem Szenarien der letzten Jahre, aber auch offen zugängliche weitere Literatur, z.B. Verbandspapiere, Strategiepapiere und regulatorische Vorgaben analysiert, um relevante Trends und zukünftige mögliche Entwicklungen der Biomassenutzung innerhalb der betrachteten Sektoren aufzunehmen.

3.1 Holz- und Biorohstoffe in der Bauindustrie

Der Bausektor ist sehr ressourcenintensiv, was sich in 90 % der verwendeten mineralischen Rohstoffe Deutschlands pro Jahr für die Verwendung als Baustoffe oder Bauprodukte ausdrückt (Thünen-Institut Stand 2020). Die Holzbaquote in 2022 (Holzbau Deutschland – Bund Deutscher Zimmermeister im Zentralverband des Deutschen Baugewerbes e. V. 2022) beträgt für Wohngebäude in Holzbauweise 21,3 % und Nichtwohngebäude in Holzbauweise 21,7 %. Somit ermöglicht die Bauindustrie zum Erreichen der Klimaziele 2045 einen wichtigen Beitrag, indem sie Baustoffe als langfristige Kohlenstoffspeicher nutzt und obendrein eine Kaskadennutzung und Substitution von energieintensiven Baustoffen ermöglicht (Wissenschaftlicher Beirat für Waldpolitik WBW 2021; Öko-Institut e.V. 2021). Für die Analyse der künftigen Entwicklung werden insgesamt 19 Datenquellen aus Szenarien, Studien, Vorträgen und Verbandspapiere verwendet. Im Bausektor lassen sich demzufolge einige zentrale Treiber der erhöhten Holznutzung identifizieren. Beispielsweise zwingt eine veränderte Baulandverfügbarkeit zu innovativen Ideen, und damit zu einem stärkeren Fokus auf den Einsatz von Holz als Baumaterial. Das geringere Gewicht sowie kürzere Bauzeiten sind hier wichtige ausschlaggebende Punkte (Mantau et al. 2013; Deutscher Holzwirtschaftsrat e. V. 2020; Filippi 2013; Linner 2021).

Neben Treibern, lassen sich verschiedene Herausforderungen oder Hemmnisse erkennen. Vor allem langwierige Genehmigungsverfahren und fehlende Fachkräfte innerhalb der Branche geben Barrieren für eine Erweiterung der Bautätigkeiten mit Holz vor. Eine erhöhte Unsicherheit besteht derzeit durch die Ungewissheit über die veränderte Gesundheit des Waldes oder einem nicht abschätzbaren höheren Laubholzanteil in Zukunft (Waldumbau, Schadereignisse) (Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen – DGNB e. V. 2021).

Der ganze Sektor, der traditionell über 80 % Nadelholz verwendet, steht hier vor einer großen Herausforderung (Mantau et al. 2013; Böttcher et al. 2018; Wolf et al. 2020). Zudem steht er in Rohstoff-Konkurrenz mit anderen Anwendungen, die Biomasse zur Produktion von Materialien oder Chemikalien benötigen (Bio-refinery Leuna | UPM Biochemicals 2023; Böttcher et al. 2018; Wolf et al. 2020).

Entsprechend der analysierten Studien und über die verschiedenen Perspektiven seitens der Betrachtung von Holzeinsatz im gesamten Baugewerbe (Glasenapp et al. 2017), Holzeinsatz nur für Ein-, Zwei-, und Mehrfamilienhäuser (Hafner et al. 2018), Holzeinsatz für genehmigte Wohnungsgebäude und Nichtwohnungsgebäude (Holzbau Deutschland – Bund Deutscher Zimmermeister im Zentralverband des Deutschen Baugewerbes e. V. 2021), können die Bandbreiten des Biomasseeinsatzes nur für einzelne Studien dargestellt werden (Abb. 5). Weiterhin ist zu beachten das in einem überwiegenden Teil der Studien der Fokus allein auf dem Neubau von Gebäude liegt, während Modernisierung und Sanierung nicht oder kaum betrachtet werden. Hier liegt eine hohe Datenunsicherheit vor, da z.B. laut Mantau et al. (2013) im Neubau 36 % und bei Modernisierung 64 % sowie nach (Hafner et al. 2018) im Neubau 31 % und bei der Modernisierung 69 % der genutzten Holzmenge im Bausektor verwendet werden.

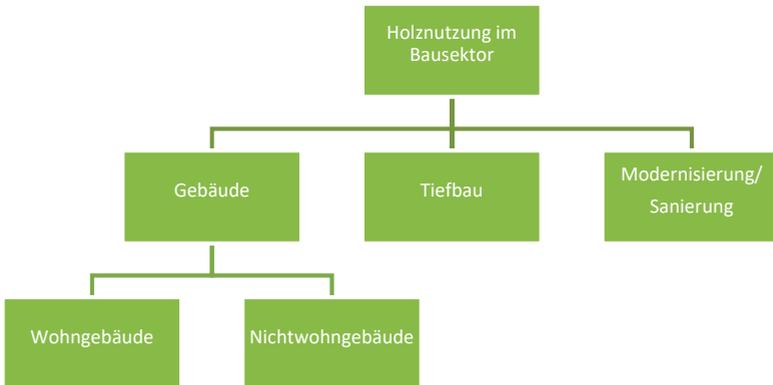


Abb. 5: Eigene Darstellung. Übersicht der Betrachtungsebenen innerhalb der analysierten Datenquellen

Zusammenfassend zeigen die analysierten Studien, dass die vorhandenen quantitativen Aussagen zur zukünftigen Holznutzung vor allem auf wenigen oder wenig aktuellen Datenbasen basieren. Folgt man diesen Annahmen, lässt sich anscheinend eine erhöhte Holzbauquote durch nationale Ressourcen erschließen (Abb. 6). Diese Betrachtung schließt aber nicht alle Felder einer möglichen Biomassenutzung mit ein wie z.B. Sanierungs- und Modernisierungsarbeiten, welche ebenfalls einen hohen Rohstoffverbrauch aufweisen. Im Allgemeinen lassen die Annahmen und getroffenen Aussagen in den Datenquellen auf eine stark steigende Nutzung vor allem von Primärbiomasse von bis zu 30-50 % zum

heutigen Status quo schließen. Um genauere Entwicklung abzubilden benötigt es eine tiefere Status-quo-Analyse mit Beteiligung von relevanten Stakeholdern.

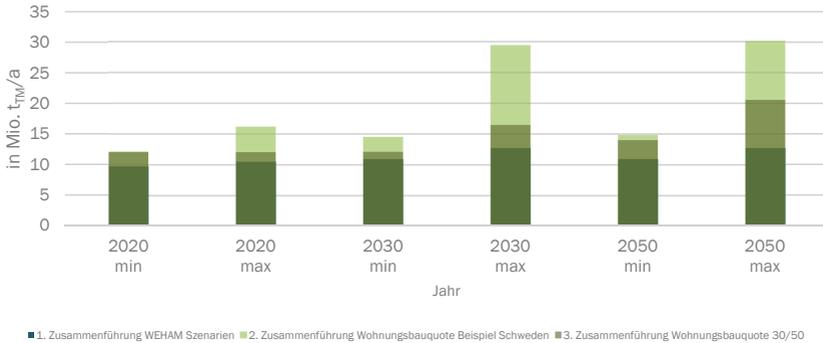


Abb. 6: Eigene Darstellung. Bandbreiten der Szenarienannahmen einer Holzverwendung im Bausektor. Annahmen zur Zusammenführung: Anteil Sanierungsrate von Wohngebäuden auf gesamten Bausektor entsprechend (Mantau et al. 2013); Basierend auf Umrechnungsfaktoren von m³ auf t_{MW} (FNR); Annahme Sanierungsrate (dena 2021)

3.2 Bedarfsentwicklung Papier

Mit ca. 25 % ist Deutschland der größte Papierproduzent innerhalb der EU und der viertgrößte nach China, USA und Japan. Die 156 Betriebe der Papier- und Zellstoffindustrie sind größtenteils mittelständisch strukturiert und haben eine durchschnittliche Betriebsgröße von 216 Beschäftigte und beschäftigten 2019 insgesamt 39.850 Menschen. Im Allgemeinen gehört die Papierindustrie zu den rohstoff-, energie- und kapitalintensiven Industrien. Sie ist mit 9 % des Energieverbrauchs des verarbeitenden Gewerbes die 3. energieintensivste Branche nach Metallerzeugung und Chemieindustrie mit einem Energieeinsatz von 58,37 TWh (Stromeinsatz 16,22 TWh) (Borgnäs et al. 2021).

Für die Analyse der künftigen Entwicklung der Biomassenutzung im Bausektor werden insgesamt 13 Datenquellen aus (Szenarien) Studien, Vorträge und Verbandspapiere verwendet.

Innerhalb des Papiersektors gibt es sowohl Treiber für einen gleichbleibende als auch einen erhöhten Holzmengebedarf, aber gleichzeitig auch Indikatoren für einen Rückgang der Holzmenge. Als Faktoren, welche eine gleichbleibende oder erhöhte Holzmenge beeinflussen, sind neue Verwertungswege zu nennen, z.B. Rest- und Nebenprodukte für die Erzeugung von Plattformchemikalien, welche den Druck einer Preiserhöhung der Rohstoffe reduzieren können (Dornack und Dietz 2016). Durch diese Ansätze können auch Kaskadeneffekte verstärkt werden (Godin 2020; Bundesverband der Deutschen Industrie e.V.

2022; UBA 2014; Fehrenbach et al. 2017). Für eine Steigerung sprechen die Wachstumsfelder der Verpackungs- und Hygieneartikel als Substitution zu Plastik und Papierverpackungen. (Borgnäs et al. 2021; Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena 2021).

Neben den Treibern für eine erhöhte Holzmenge im Papiersektor, sind weitreichendere Treiber bei der Reduktion des Biomasseeinsatzes zu erkennen. Vor allem erhöhte Digitalisierung und der damit einhergehende Rückgang im Bereich des grafischen Papiers ist hier zu nennen (Banse et al. 2020; Glasenapp et al. 2017; Godin 2020). Neben noch weiter steigender Effizienz sowie der Erhöhung der Kreislauf geführten Materialströme kann, wenn auch nur zu einem geringen Anteil, die Altpapier Nutzung erhöht werden (UBA 2014).

Neben den Treibern stehen dem Sektor größere Herausforderungen bevor die durch weitere Faktoren verstärkt und beeinflusst werden. Da der Sektor im Allgemeinen schon einen sehr hohen Altpapier Anteil hat, ist das Recyclingpotenzial von weiteren Stoffströmen begrenzt. Hier stößt die Kreislaufwirtschaft bereits jetzt an ihre Grenzen. Grund ist die schwindende Faserqualität mit jedem Recycling, sie erlaubt nur noch eine begrenzte Zykluszahl und es müssen frische Primärfasern (lang) regelmäßig neu zugegeben werden (Borgnäs et al. 2021; Schönheit und Trauth 2013; Payer und Sterner 2013). Der internationale Wettbewerb, sowie steigende Umweltschutzaufgaben fordern die bestehenden Produktionskapazitäten darüber weiter heraus (Godin 2020; Borgnäs et al. 2021). Auch die hohen Importquoten (ca. 80 %) der eingesetzten Holzmengen stellt in den Zeiten von gefährdeten Lieferketten und steigenden Holzpreisen eine Herausforderung für den Sektor dar (Statistisches Bundesamt 2024c; Godin 2020). Der verbleibende Bedarf an Primärzellstoff wird zu rund 80 % aus importiertem und zu 20 % aus heimisch produziertem Zellstoff gedeckt. Europa bleibt kurz- bis mittelfristig der primäre Markt. Die deutschen Exporte und Importe sind stark europäisch geprägt und die Importanteile aus Asien sehr gering (Godin 2020). Abb. 7 zeigt die Bandbreite für erwartete Holzverwendung im Papiersektor auf Basis von ausgewählten Studien.

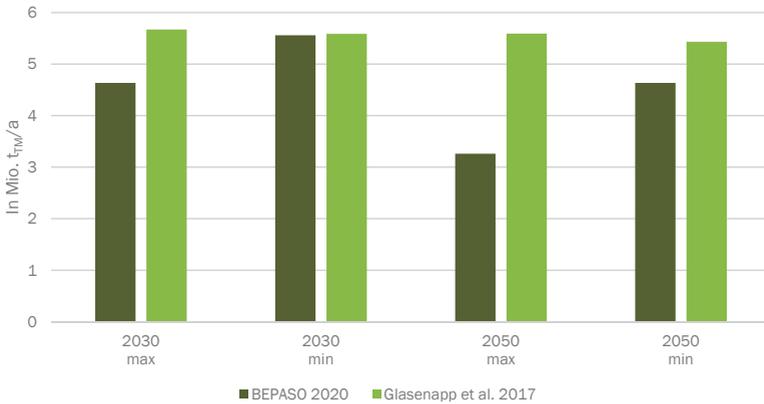


Abb. 7: Eigene Darstellung, Holzverwendung im Papiersktor, basierend auf Banse et al. 2020; Glasenapp et al. 2017 (mit 2020 leicht unterschiedlicher Annahme). Minimumwerte (Glasenapp et al. 2017), Maximumwerte: Szenarioannahmen; Minimumwerte (Banse et al. 2020): BÖ-am Tropf, Maximumwerte: BÖ-Wende; Weniger starke Reduktion Holzverwendung (Minimum Szenario); Stärkere Reduktion Holzverwendung (Maximum Szenario)

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die Branche von hohen Unsicherheiten geprägt ist, besonders auf Grund von Energiepreisen, Rohstoffpreisen- u. Verfügbarkeiten. Hohe Konsolidierung und Effizienzsteigerung sind vor allem im Energiebereich vorhanden und weniger in der stofflichen Nutzung. Der Druck des internationalen Wettbewerbs steigt auf Grund von Importabhängigkeiten sowie Verfügbarkeit von Altpapier. Im Allgemeinen kann auf kein stärkeres Wachstum des Sektors, im Vergleich zu anderen Sektoren, auf Basis der analysierten Studien geschlossen werden.

3.3 Entwicklungen in der chemischen Industrie

Der Sektor Chemie ist die drittgrößte Industriebranche in Deutschland und erwirtschaftet in der chemisch-pharmazeutischen Industrie ca. 10 % des deutschen Industriesatzes, und ca. 1,7 % der gesamten deutschen Wertschöpfung (Geres et al. 2019; Stiftung Arbeit und Umwelt der IG BCE 2021). In Europa befindet sich der Chemiesektor in der globalen Wertschöpfungsstatistik auf Platz 1. Er ist gleichzeitig eine sehr energieintensive Branche, deren Transformation für das Erreichen der nationalen Klimaziele entscheidend ist (Stiftung Arbeit und Umwelt der IG BCE 2021). Die chemisch-pharmazeutische Industrie zeichnet sich durch eine hohe Wertschöpfungstiefe aus, wobei aus Rohölderivaten verschiedenste Produkte und eine sehr breite Produktpalette erzeugt wird. Sie setzt sich von Petrochemikalien, Grundchemikalien, Polymeren über Fein- und Spezialchemikalien, Wasch- und Körperpflegemitteln bis hin zu Pharmazeutika zusammen (Geres et al. 2019). 2018 wurden der Chemieindustrie 36,8 Mio. t CO₂ Äquivalente zugeordnet, was ca. 24 % der Gesamtemission im Industriesektor entspricht. Im Allgemeine benötigt der Sektor 151,6 TWh Endenergie, was ca. 21 % der Gesamtindustrie ausmacht (dena 2021).

Für die Analyse der künftigen Entwicklung der Biomassenutzung im Chemie-sektor wurden insgesamt 21 Datenquellen aus (Szenarien) Studien, Vorträge und Verbandspapiere verwendet. Innerhalb der betrachteten Studien konnte verschiedene Treiber identifiziert werden. Auf Grund der hohen Anteile an fossilen Rohstoffen innerhalb des Sektors, ist dieser eine Schlüsselindustrie, für die nachhaltige Produktionsprozesse und Rohstoffe entscheidend sind. Wichtig ist die große Rolle als Vorleistungsproduzent, der in starker Verbindung zu nachgelagerten Industrien steht (Stiftung Arbeit und Umwelt der IG BCE 2021). Für die Bioökonomie ist dieser Bereich ebenfalls entscheidend, da sich hier verschiedenen Schlüsseltechnologien wie z. B. Wasserstoffnutzung, und Konzepte für Kreislaufwirtschaft und Biotechnologie verbinden (Unkelbach 2014; Stiftung Arbeit und Umwelt der IG BCE 2021). Für die erhöhte Biomassenutzung in den Wertschöpfungsketten spricht, dass in diesen Bereichen eine Technologieführerschaft noch angestrebt werden kann. Neben den nationalen Voraussetzungen, führen auch internationale Lieferketten und deren Schwierigkeiten (Unterbrechung durch Konflikte, Kontrolle der nachhaltigen Bereitstellung, etc.) zu Initiativen, welche einen ressourcenschonenden Ausbau lokaler Lieferketten als wichtigen Baustein einer Transformation beinhaltet (Stiftung Arbeit und Umwelt der IG BCE 2021). Die angestrebte Verteuerung der fossilen Rohstoffpreise sowie das alternative Biomassenutzungswege wettbewerbsfähig werden, führt zu einer Verbreiterung der Rohstoffbasis auf verschiedene Kohlenstoffquellen (Geres et al. 2019; dena 2021). Neben der Biomasse sind Wasserstoff, CO₂ Nutzungskonzepte (CCU, CCS) sowie chemisches Recycling im Fokus (Agora Energiewende und Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie gGmbH, Wuppertal 2019; Material Economics 2019) sowie ein verstärkter Einsatz von Methanol (dena 2021). Neben der Änderung des Rohstoffbasis, fokussieren sich Annahmen auch auf die Möglichkeit einer erhöhten Produktion von Spezialchemikalien (Behrendt 2018; Verband der chemischen Industrie e. V. 2017), welche durch angepasste Produktionsverfahren für die Erhöhung einer Kreislaufwirtschaft sorgen können (Stiftung Arbeit und Umwelt der IG BCE; Unkelbach 2014). Politische Regularien, wie z. B. das Sustainable Carbon Cycles Communiqué der Europäischen Union, welchen einen Anteil von wenigstens 20 % CO₂ aus nicht fossilen Rohstoffquellen anstrebt, unterstützen diese Perspektive (European Commission 2021).

Neben den Treibern die für einen erhöhten Biomasseeinsatz in dem chemischen Sektor sprechen, werden ebenfalls Herausforderungen für die Umstellung auf Biomassenutzung im Sektor angeführt. Politischen aber auch Markt Faktoren spielen eine entscheidende Rolle. Aufgrund der starken Einbindung in den Weltmarkt, wird die wirtschaftliche Konkurrenz aus China und den USA stärker, welche sich z.B. für Erzeugnisse innerhalb der Spezialchemie vom Netto-Importeur zum Netto-Exporteur wandeln (Stiftung Arbeit und Umwelt der IG BCE 2021). Die hohen Abhängigkeiten von Rohstoffimporten (Fleiter et al. 2019) und Entwicklungen des Stromsystems (Geres et al. 2019) sind weitere Treiber für eine Reduktion der Gesamtproduktion. Auch werde die Förderkulissen, welche eine energetische Biomassenutzung fördern, als eine Herausforderung für die

Erschließung neuer Rohstoffquellen dargestellt (Material Economics 2021; Behrendt 2018; Verband der chemischen Industrie e.V. 2017). Aber auch die strukturellen Gegebenheiten stellen Hindernisse für eine schnellere Transformation im Sektor dar. Hier werden die sehr kapitalintensiven Produktionsanlagen mit einer hohen Lebensdauer genannt (Stiftung Arbeit und Umwelt der IG BCE 2021), sowie die vielstufigen und verzweigten Wertschöpfungsketten (Behrendt 2018). Wie auch der Bausektor, steht auch der chemische Sektor vor der Herausforderung des zunehmenden Fachkräftemangels (Stiftung Arbeit und Umwelt der IG BCE 2021).

Im Allgemein lässt sich sagen, dass biobasierte Ansätze bisher eine untergeordnete Rolle im Marktanteil darstellen (Stiftung Arbeit und Umwelt der IG BCE 2021), und sich noch einige Unsicherheiten ergeben. Fragen, wie sich eine erhöhte Biomassenutzung innerhalb der aktuellen Flächenkulisse mit den nachgefragten Mengenströmen aus der Industrie verhält sind hierbei im Zentrum (Behrendt 2018; BDI 2018). Zu Bedenken gilt hier auch, dass wenn die Trends einer erhöhten Biomassenutzung in diesem Sektor eintreten, diese starken Einfluss auf andere Branchen haben könnte, auf Grund von möglichen steigenden Preise für ihre Rohstoffe (Agora Energiewende und Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie gGmbH, Wuppertal 2019; BDI 2018).

Im Chemiesektor hat der Import einen großen Stellenwert und nimmt 40 % des Fertigproduktwertes ein. Somit ist der Chemiesektor stärker in internationale Wertschöpfungsketten eingebunden, wie andere Bereiche (z. B. Automobilindustrie, Maschinenbau) (Stiftung Arbeit und Umwelt der IG BCE 2021). Importiertes Erdöl kommt zu 60 % aus der Russischen Föderation, Großbritannien und Norwegen. Erdgas macht 8 % der Rohstoffversorgung der Chemie in Deutschland aus und 13 % aus nachwachsenden Rohstoffen, wobei hier der Importanteil ebenfalls bei ca. 55-60 % liegt (Becker et al. 2023).

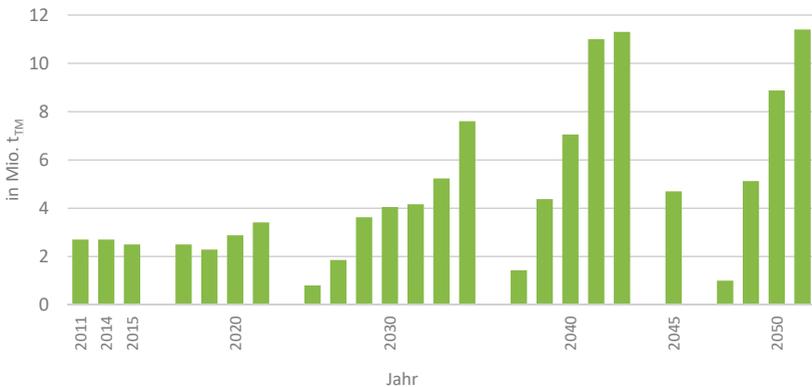


Abb. 8: Eigene Darstellung. Szenarienannahmen in den analysierten Studien für eine zukünftige Biomassenutzung innerhalb des chemischen Sektors basierend auf unterschiedlichen Ausgangswerten in den Jahren 2011, 2014, 2015

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass die chemische Branche unter großem Zugzwang ist, zur Unterstützung der Klimaziele beizutragen. Die Biomassenutzung ist in allen betrachteten Studien ein Faktor um diese Ziele zu erreichen. Hauptrohstoffquelle für stoffliche Nutzung sind in den betrachteten Studien Rohstoffe aus dem chemischen Recycling, CO₂ Abtrennung und Nutzung von strombasierten Anwendungen. Die steigenden Kosten für fossile Rohstoffe sind sowohl Herausforderung für aktuelle Geschäftsmodelle, aber auch Treiber für eine erhöhte Biomassenutzung. Durch die Begrenzung der Rohstoffseite bei einem erhöhten Biomasseneinsatz werden Produkte mit hoher Wertschöpfung als am zielführendsten bewertet. Dabei wird die Fokussierung der Biomassenutzung (Rest- und Nebenproduktströme) auf Grund von Massenströmen und Ressourcenbegrenzungen stärker in der Spezialchemie als in der Basischemie gesehen. Im Allgemeinen stellen die Szenarien eine große Bandbreite von möglichen Entwicklungen einer Biomassenutzungsarten dar. Wenn auch die Biomassenutzung nicht die Hauptrohstoffquelle sein wird, entstehen Ansprüche die eine steigende Biomassenutzung vermuten lassen. Auf Grundlage der ausgewerteten Datenquellen (Abb. 8) wurden Annahmen bis zu einer Steigerung um das 3- bis 4-fache des heutigen Status bis 2050 angenommen, was zu dem Trend einer steigenden Biomassenutzung im Sektor folgt.

4 Ausblick

Insgesamt kann eine steigende Nachfrage nach biogenen Ressourcen verzeichnet werden, sowohl für die energetische als auch die stoffliche Nutzung. Dabei steigen die Anforderungen an Unternehmen, klima- und ressourcenschonend zu wirtschaften.

Wie die vorangegangene Aufstellung verdeutlicht werden die momentan verfügbaren fossilen und biogenen Rohstoffe bereits in dem Maße ausgenutzt, wie es sich ökonomisch etabliert und stabilisiert hat. Eine steigende Nachfrage nach Rohstoffen biogenen Ursprungs wird nicht dazu führen können, dass sich in dem Maße erneuerbare Rohstoffquellen bilden.

Das bedeutet in der Folge kommen neue Nutzungshierarchien auf. Es werden sich zudem Kaskaden mit absteigendem Wert der einzelnen Zwischenstufen ausbilden, bei der sich nach Gebrauch der Materialien auch ein Abfallrecycling anschließen wird.

Die Aufgabe wird nun darin bestehen, diese Ausbildung neuer Wertschöpfungsketten und Nutzungskaskaden nicht durch die bestehenden Regeln und Verordnungen zu behindern. Diese Regeln basierten auf einer Basis einer stark wachsenden fossil basierten Ökonomie.

Um zu beobachten, wie sich eine solche Bioökonomie ausbildet und auch um ungewollte Entwicklungen zu erkennen, ist es erforderlich, nicht nur die Verfügbarkeiten von Biomasse zu erfassen, sondern auch ihre erwartet stark steigende Nutzung.

Dazu ist es wichtig, die Nutzungssysteme der Biomasse systemisch zu erfassen, Zusammenhänge zu verstehen und abzubilden, die relevante Treiber und Hemmnisse zu identifizieren und diese Einflüsse abzubilden und zu quantifizieren.

Die Etablierung eines Reportingsystems würde dabei unterstützen, das Monitoring deutlich zu verbessern und frühzeitig Engpässe für spezifische Biomassen zu erkennen.

Literatur/Quellen

- Agora Energiewende; Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie gGmbH, Wuppertal (Hg.) (2019): Klimaneutrale Industrie. Schlüsseltechnologien und Politikooptionen für Stahl, Chemie und Zement. Online verfügbar unter: https://www.agora-industrie.de/fileadmin/Projekte/2018/Dekarbonisierung_Industrie/164_A-EW_Klimaneutrale-Industrie_Studie_WEB.pdf, zuletzt geprüft am 17.05.2024.
- Banse, M.; Zander, K.; Babayan, T.; Bringezu, S.; Dammer, L.; Egenolf, V. et al. (2020): Eine biobasierte Zukunft in Deutschland – Szenarien und gesellschaftliche. Thünen-Institut. Braunschweig.
- Becker, A.; Peters, D.; Kemnitz, D. (2023): Anbau und Verwendung Nachwachsender Rohstoffe in Deutschland. Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. (FNR). Gülzow-Prüzen. Online verfügbar unter: https://neuweg.de/app/uploads/2023/08/230726_FNR_Statistikbericht_2023_NaWaRo.pdf, zuletzt geprüft am 17.05.2024.
- Becker, Arno; Peters, Dietmar; Wagner, Stefanie; Kemnitz, Dietmar (2024): Anbau und Verwendung nachwachsender Rohstoffe in Deutschland. Hg. v. Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR) Gülzow-Prüzen. Online verfügbar unter: https://www.fnr.de/fileadmin/Statistik/Statistikbericht_der_FNR_2024_web.pdf, zuletzt geprüft am 15.05.2024.
- Behrendt, Siegfried (2018): Feedstock Change in der Chemieindustrie. IZT - Institut für Zukunftsstudien und Technologiebewertung gemeinnützige GmbH. Berlin. Online verfügbar unter: https://www.izt.de/fileadmin/publikationen/IZT_Text_3-2018_Feedstock.pdf, zuletzt geprüft am 17.05.2024..
- Biorefinery Leuna | UPM Biochemicals (2023): Biorefinery Leuna. Online verfügbar unter: <https://www.upmbiochemicals.com/about-upm-biochemicals/biorefinery-leuna/>, aktualisiert am 22.09.2023, zuletzt geprüft am 17.05.2024.
- Borgnäs, Kajsa; Dupuis, Indira; Harrendorf, Malte; Hoare, Stephan; West, Klaus-W. (2021): Branchenausblick 2030+. Die Papier- und Zellstoffindustrie. Stiftung Arbeit und Umwelt der IG BCE, Berlin. Online verfügbar unter: https://www.arbeit-umwelt.de/wp-content/uploads/Branchenausblick-Papierindustrie_StiftungIGBCE.pdf, zuletzt geprüft am 17.05.2024.
- Böttcher, Hannes; Hennenberg, Klaus; Winger, Christian (2018): Waldvision Deutschland. Beschreibung von Methoden, Annahmen und Ergebnissen. Öko-Institut e.V. Online verfügbar unter: <https://www.oeko.de/fileadmin/oekodoc/Waldvision-Methoden-und-Ergebnisse.pdf>, zuletzt geprüft am 17.05.2024.

- Bringezu, Stefan; Banse, Martin; Ahmann, Lara; Bezama, Alberto; Billig, Eric; Bischof, R. et al. (2020): Pilotbericht zum Monitoring der deutschen Bioökonomie. Unter Mitarbeit von Universität Kassel und Center for Environmental Systems Research (CESR).
- Brödner, Romy; Cyffka, Karl-Friedrich; Fais, Andrea; Günther, Susann; Kalcher, Jasmin; Kazmin, Stanislav; Naegeli de Torres, Friederike; Radtke, Kai-Sven; Selig, Marco; Sittaro, Fabian; Thrän, Daniela; Wilske, Burkhard (2024): Biomassepotenziale aus Abfällen und Reststoffen (Version v1). Zenodo. DOI: 10.5281/zenodo.10404436 .
- Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung (BLE) (Hg.) (2024): Evaluations- und Erfahrungsbericht für das Jahr 2022. Online verfügbar unter: https://www.ble.de/SharedDocs/Downloads/DE/Klima-Energie/Nachhaltige-Biomasseherstellung/Evaluationsbericht_2022.pdf;jsessionid=2EBC8CEFC3838FAF92E4183F35312F02.internet992?__blob=publicationFile&v=4, zuletzt geprüft am 17.05.2024.
- Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL) (Hg.) (2022): Torffreigärtnern, Klima schützen. Die Torfminderungsstrategie des BMEL. Online verfügbar unter: https://www.bmel.de/SharedDocs/Downloads/DE/Broschueren/torfminderungsstrategie.pdf?__blob=publicationFile&v=6, zuletzt geprüft am 17.05.2024.
- Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz (BMUV) (2023): Kurzpapier: Maßnahme zur Verringerung des Anteils von Biokraftstoffen aus Nahrungs- und Futtermittelpflanzen in Folge des Ukraine-Krieges. Online verfügbar unter: <https://www.klimareporter.de/images/dokumente/2023/01/230118-arbeitspapier-eckpunkte-agrokraftstoffe.pdf>, zuletzt geprüft am 16.05.2024.
- Bundesverband der Deutschen Industrie e. V. (2022): Rohstoffe. Online verfügbar unter: <https://bdi.eu/themenfelder/rohstoffe/>, zuletzt geprüft am 17.05.2024
- Bundesverbandes der Deutschen Industrie (BDI) (Hg.) (2018): Klimapfade für Deutschland. Online verfügbar unter https://www.zvei.org/fileadmin/user_upload/Presse_und_Medien/Publikationen/2018/Januar/Klimapfade_fuer_Deutschland_BDI-Studie_/Klimapfade-fuer-Deutschland-BDI-Studie-12-01-2018.pdf, zuletzt geprüft am 17.05.2024.
- Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena) (Hg.) (2021): dena-Leitstudie. Aufbruch Klimaneutralität. Eine gesamtgesellschaftliche Aufgabe Berlin. Online verfügbar unter: https://www.dena.de/fileadmin/dena/Publikationen/PDFs/2021/Abschlussbericht_dena-Leitstudie_Aufbruch_Klimaneutralitaet.pdf, zuletzt geprüft am 17.05.2024.
- Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen – DGNB e.V. (Hg.) (2021): Positionspapier Holzbau/Position paper on timber construction. Online verfügbar unter: https://static.dgnb.de/fileadmin/dgnb-ev/de/aktuell/positionspapiere-stellungnahmen/DGNB-Positionspapier-Holzbau.pdf?m=1628695027&&utm_source=baulinks&utm_campaign=baulinks, zuletzt geprüft am 17.05.2024.
- Deutscher Holzwirtschaftsrat e.V. (Hg.) (2020): Positionspapier Für Konjunktur und Klimaschutz. 50 % Holzbau bis 2050. Online verfügbar unter: https://v2.verband-crm.de/docs/1677-ca/dhwr_positionspapier_zum_konjunkturprogramm.pdf, zuletzt geprüft am 17.05.2024.

- Dornack, Christina; Dietz, Wolfram (2016): Alternative Nutzung von Reststoffen aus der Papiererzeugung vor dem Hintergrund steigender Preise in der energetischen Verwertung. In Karl J. Thomé-Kozmiensky, Daniel Goldmann (Hg.): Recycling und Rohstoffe. Neuruppin: TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, S. 573–584. Online verfügbar unter: https://books.vivis.de/wp-content/uploads/2023/03/2016_RuR_573-586_Dornack-Dietz.pdf, zuletzt geprüft am 17.05.2024.
- Dräger de Teran, Tanja; Suckow, Tilo (2021): Klimaschutz, landwirtschaftliche Fläche und natürliche Lebensräume. So schmeckt Zukunft: Der kulinarische Kompass für eine gesunde Erde. Hg. v. WWF Deutschland. Berlin. Online verfügbar unter: <https://www.wwf.de/fileadmin/fm-wwf/Publikationen-PDF/Landwirtschaft/kulinarische-kompass-klima.pdf>, zuletzt geprüft am 15.05.2024.
- Essity (2024). Strohzellstoff aus Mannheim - Factsheet. Online verfügbar unter: https://www.essity.de/Images/Essity_Factsheet_Strohzellstoff_tcm345-122629.pdf, zuletzt geprüft am 16.05.2024.
- European Commission (2021): COMMUNICATION FROM THE COMMISSION TO THE EUROPEAN PARLIAMENT AND THE COUNCIL. Sustainable Carbon Cycles. Online verfügbar unter: https://climate.ec.europa.eu/system/files/2021-12/com_2021_800_en_0.pdf, zuletzt geprüft am 17.04.2024.
- EU-Recycling (2017): Biobasierte Chemieprodukte aus Altholz: Verbundprojekt HyAlt-4Chem in Braunschweig gestartet. Online verfügbar unter: <https://eu-recycling.com/Archive/17404>, zuletzt geprüft am 17.05.2024.
- Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR) (2023): Schlussbericht: Verbundvorhaben: Systemisches Rohstoffmonitoring Holz (RMHsys); Teilvorhaben 1: Aufkommen und Verwendung von Holzrohstoffen in der gesamten Wertschöpfungskette. Online verfügbar unter: <https://www.fnr.de/ftp/pdf/berichte/22005918.pdf>, zuletzt geprüft am 17.05.2024.
- Fehrenbach, Horst; Köppen, Susanne; Breitmayer, Elke; Essel, Roland; Baur, Frank; Kay, Sonja et al. (2017): Biomassekaskaden - Mehr Ressourceneffizienz durch stoffliche Kaskadennutzung von Biomasse – von der Theorie zur Praxis.
- Filippi, Manfred (Hg.) (2013): Welche Trends und Treiber bewegen den Holzbau? 19. Internationales Holzbau-Forum 2013. Online verfügbar unter: https://www.forum-holzbau.com/pdf/IHF_13_Filippi.pdf, zuletzt geprüft am 17.05.2024.
- Fleiter, Tobias; Herbst, Andrea; Rehfeldt, Matthias; Arens, Marlene (2019): Industrial Innovation. Pathways to deep decarbonisation of Industry. Part 2: Scenario analysis and pathways to deep decarbonisation. ICF Consulting Services Limited und Fraunhofer Institut für System- und Innovationsforschung ISI.
- Geres, Roland; Kohn, Andreas; Lenz, Sebastian Cornelius; Ausfelder, Florian; Bazzanella, Alexis; Möller, Alexander (Hg.) (2019): Roadmap Chemie 2050. Auf dem Weg zu einer treibhausgasneutralen chemischen Industrie in Deutschland: eine Studie von DECHEMA und FutureCamp für den VCI. DE-CHEMA Gesellschaft für Chemische Technik und Biotechnologie e. V. Frankfurt am Main.

- Glaserapp, Sebastian; Döring, Przemko; Blanke, Christian; Mantau, Udo (2017): Entwicklung von Holzverwendungsszenarien. Abschlussbericht WEHAM – AP 3.2. Online verfügbar unter: https://www.weham-szenari-en.de/fileadmin/weham/Ergebnisse/Glaserapp__Doering__Blanke__Mantau__2017__Entwicklung_von_Holzverwendungsszenarien__WEHAM_Projekt_.pdf, zuletzt geprüft am 17.05.2024.
- Godin, Hélène (2020): Energiewende in der Industrie Potenziale und Wechselwirkungen mit dem Energiesektor. Branchensteckbrief der Papierindustrie. Bericht an: Bundesministerium für Wirtschaft und Energie. Online verfügbar unter Energiewende in der Industrie Potenziale und Wechselwirkungen mit dem Energiesektor. Branchensteckbrief der Papierindustrie, zuletzt geprüft am 17.05.2024.
- Hafner, Annette; Schäfer, Sabrina; Rüter, Sebastian; Diederichs, Stefan; Ebert, Samuel; Kleinhenz, Heinze GmbH (Hg.) (2018): Überwachung und Verwendung von Holzprodukten im Bausektor und Ermittlung des Potenzials für die CO₂-Bindung. Online verfügbar unter: https://www.tib.eu/de/suchen?tx_tibsearch_search_h%5Baction%5D=getDocument&tx_tibsearch_search%5Bcontroller%5D=Download&tx_tibsearch_search%5Bd%5D=46241550fe142d33015db938374291cc&tx_tibsearch_search%5Bdocid%5D=TIBKAT%3A1045729531&cHash=df93ad4f7d18c05f3fb27a9aad73ef4e, zuletzt geprüft am 17.05.2024.
- Hirschler, Oliver; Osterburg, Bernhard; Weimar Holger; Glaserapp, Sebastian; Ohmes, Marie-Friederike (2022): Peat replacement in horticultural growing media: Availability of bio-based alternative materials, Thünen Working Paper 190. Online verfügbar unter: https://literatur.thuenen.de/digbib_extern/dn064753.pdf, zuletzt geprüft am 17.05.2024.
- Holzbau Deutschland – Bund Deutscher Zimmermeister im Zentralverband des Deutschen Baugewerbes e.V. (Hg.) (2021): Lagebericht 2021. Zimmerer und Holzbau. Berlin. Online verfügbar unter: https://www.holzbau-deutschland.de/fileadmin/user_upload/eingebundene_Downloads/Lagebericht_2021_mit_Statistiken.pdf?utm_source=baulinks&utm_campaign=baulinks, zuletzt geprüft am 18.10.2022.
- Holzbau Deutschland – Bund Deutscher Zimmermeister im Zentralverband des Deutschen Baugewerbes e.V. (Hg.) (2022): Lagebericht 2022. Online Verfügbar unter: https://www.holzbau-deutschland.de/fileadmin/user_upload/eingebundene_Downloads/Lagebericht_2022.pdf, zuletzt geprüft am 18.10.2022
- KTBL (2023): Verwendung erneuerbarer Antriebsenergien in landwirtschaftlichen Maschinen.
- Darmstadt, Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e. V. (KTBL). Online verfügbar unter: https://www.ktbl.de/fileadmin/user_upload/Artikel/Energie/Antriebsenergien/12643_Antriebssysteme.pdf, zuletzt geprüft am 17.05.2024.
- Linner, Albert (2021): 7 Gründe, warum Holz der Baustoff der Zukunft ist. Impleco GmbH. Berlin. Online verfügbar unter: <https://wohnglueck.de/artikel/7-gruende-holz-als-baustoff-17864>, zuletzt geprüft am 17.05.2024.
- Mantau, Udo; Doring, Przemko; Hiller, Dirk (2013): Holzeinsatz im Bauwesen - Verwendungsstrukturen nach Gebäuden und Gewerken. Thünen-Institut. Braunschweig (Thünen Report, 9).

- Mantau, Udo (2023): Holzrohstoffbilanzierung, Kreislaufwirtschaft und Kaskadennutzung – 20 Jahre Rohstoffmonitoring Holz, Gülzow, FNR. Online verfügbar unter: https://www.fnr.de/fileadmin/Projekte/2024/Mediathek/FNR_Brosch_Rohstoffmonitoring_Holz_2024.pdf, zuletzt geprüft am 17.05.2024.
- Material Economics (2019): Industrial Transformation 2050. Pathways to Net-Zero Emissions from EU Heavy Industry. Online verfügbar unter: https://materialeconomics.com/material-economics-industrial-transformation-2050.pdf?cms_fileid=303ee49891120acc9ea3d13bbd498d13, zuletzt geprüft am 17.05.2024.
- Material Economics (Hg.) (2021): EU Biomass Use in a Net-Zero Economy. A course correction for EU biomass. Online verfügbar unter: <https://www.climate-kic.org/wp-content/uploads/2021/06/MATERIAL-ECONOMICS-EU-BIOMASS-USE-IN-A-NET-ZERO-ECONOMY-ONLINE-VERSION.pdf>, zuletzt geprüft am 17.05.2024.
- Naegeli de Torres, Friederike; Brödner, Romy; Cyffka, Karl-Friedrich; Fais, Andrea; Kalcher, Jasmin; Kazmin, Stanislav; Meyer, Richard; Radke, Kai-Sven; Richter, Felix; Selig, M.; Wilske, B.; Thrän, D. (2023). DBFZ Resource Database: DE-Biomass Monitor. Biomass Potentials and Utilization of Biogenic Wastes and Residues in Germany 2010-2020 [Data set]. Zenodo. DOI: 10.5281/zenodo.10370137 .
- Öko-Institut e.V. (2021): Natürliche Senken – Die Potenziale natürlicher Ökosysteme zur Vermeidung von THG-Emissionen und Speicherung von Kohlenstoff. Modellierung des LULUCF-Sektors sowie Analyse natürlicher Senken. Kurzugutachten zur dena-Leitstudie Aufbruch Klimaneutralität. Online verfügbar unter: www.dena.de/fileadmin/dena/Publikationen/PDFs/2021/211005_DLS_gutachten_OekoInstitut_final.pdf, zuletzt geprüft am 17.05.2024.
- Payer, Helmut; Sterner, Vanessa (2013): Der Wald kann vielen nützen. Dr.Curt Haefner-Verlag GmbH. Online verfügbar unter: <https://www.papierundtechnik.de/im-blickpunkt/der-wald-kann-vielen-nuetzen/>, zuletzt geprüft am 17.05.2024.
- Schindler, H.; Majer, S.; Thrän, D.; Lenz, V. (2023). Nachhaltigkeit von Holzenergie: Diskussionspapier. Leipzig: DBFZ. III, 4-35 S. Online Verfügbar unter: <https://www.dbfz.de/pressemediathek/weitere-publikationen/stellungnahmen-studien>, zuletzt geprüft am 17.05.2024.
- Schönheit, Evelyn; Trauth, Jupp (2013): Kritischer Papierbericht 2013. Teilleistung 17 im Rahmen des Gesamtvorhabens: Expertisen zur Entwicklung Neuer und Weiterentwicklung bestehender Umweltzeichen in Innovationsorientierten Produktgruppen. Forum Ökologie & Papier (FÖP). Online verfügbar unter: https://www.foep.info/dokumente/upload/6c397_kritischer_papierbericht_2013_neu.pdf, zuletzt geprüft am 17.04.2024.
- Statistisches Bundesamt (Destatis) (2020): Umweltökonomische Gesamtrechnungen. Flächenbelegung. Flächenbelegung von Ernährungsgütern. Online verfügbar unter: <https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Umwelt/UGR/landwirtschaft-wald/Tabellen/flaechenbelegung.html>, zuletzt aktualisiert am 17.04.2020, zuletzt geprüft am 15.05.2024.

- Statistisches Bundesamt (Destatis) (2024a): Feldfrüchte und Grünland. Ackerland nach Hauptfruchtgruppen und Fruchtarten. Ackerland nach Hauptfruchtgruppen und Fruchtarten. Online verfügbar unter: <https://www.destatis.de/DE/Themen/Branchen-Unternehmen/Landwirtschaft-Forstwirtschaft-Fischerei/Feldfruechte-Gruenland/Tabellen/ackerland-hauptnutzungsarten-kulturarten.html>, zuletzt aktualisiert am 13.03.2024, zuletzt geprüft am 16.05.2024.
- Statistisches Bundesamt (Destatis) (2024b): Feldfrüchte und Grünland. Anbauflächen, Hektarerträge und Erntemengen ausgewählter Anbaukulturen im Zeitvergleich. Anbaufläche ausgewählter Anbaukulturen im Zeitvergleich. Online verfügbar unter: https://www.destatis.de/DE/Themen/Branchen-Unternehmen/Landwirtschaft-Forstwirtschaft-Fischerei/Feldfruechte-Gruenland/_inhalt.html, zuletzt geprüft am 16.05.2024.
- Statistisches Bundesamt (Destatis) (2024c): Pressemitteilung Nr. N 031 vom 10. Mai 2021. Online verfügbar unter: https://www.destatis.de/DE/Presse/Pressemitteilungen/2021/05/PD21_N031_51.html, zuletzt geprüft am 17.05.2024.
- Stade, Jörg (2024): Ministerien entschärfen Biomasse-Strategie. Hg. v. [www.klimarepo](http://www.klimarepo.de). Online verfügbar unter: <https://www.klimareporter.de/deutschland/ministerien-entschaerfen-biomasse-strategie>, zuletzt aktualisiert am 20.02.2024, zuletzt geprüft am 17.05.2024.
- Stiftung Arbeit und Umwelt der IG BCE (Hg.) (2021): Branchenausblick 2030+. Die Chemieindustrie. Online verfügbar unter: https://www.arbeit-umwelt.de/wp-content/uploads/211025_ig_publicationen_Studie_Chemieindustrie_web.pdf, zuletzt geprüft am 17.05.2024.
- Sutton, William R.; Lotsch, Alexander; Prasann, Ashesh (2024): Recipe for a livable planet. Achieving Net Zero Emissions in the Agrifood System. Hg. v. International Bank for Reconstruction and Development / The World Bank. Washington, DC. Online verfügbar unter: <https://openknowledge.worldbank.org/entities/publication/406c71a3-c13f-49cd-8f3f-a071715858fb>, zuletzt geprüft am 16.05.2024.
- Thünen-Institut (2020): Cluster Forst und Holz. Online verfügbar unter: <https://www.thuenen.de/de/fachinstitute/waldwirtschaft/zahlen-fakten/clusterstatistik-forst-holz>, zuletzt geprüft am 17.05.2024.
- Thünen-Institut (2023): Holzeinschlag und Rohholzverwendung. Online verfügbar unter: <https://www.thuenen.de/de/fachinstitute/waldwirtschaft/zahlen-fakten/holzeinschlag-und-rohholzverwendung>, zuletzt geprüft am 17.05.2024
- Thünen-Institut (2024): Außenhandelsbilanz. Online verfügbar unter: <https://www.thuenen.de/de/fachinstitute/waldwirtschaft/zahlen-fakten/holzbilanzen/aussenhandelsbilanz>, zuletzt geprüft am 17.05.2024.
- Umweltbundesamt (UBA) (Hg.) (2014): Treibhausgasneutrales Deutschland im Jahr 2050. Dessau-Roßlau. Online verfügbar unter: https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/378/publikationen/07_2014_climate_change_dt.pdf, zuletzt geprüft am 17.05.2024.
- Unkelbach, Gerd (2014): Nachwachsende Rohstoffe in der Chemie der Zukunft. Online verfügbar unter: https://dechema.de/events_media/Downloads_Bearbeiter/Kolloquien/Unkelbach_Merseburg_24_11_14-p-7240.pdf, zuletzt geprüft am 17.05.2024.

Verband der chemischen Industrie e.V. (Hg.) (2017): The German Chemical Industry 2030. VCI-Prognos Study – Update 2015/2016 – Alternative scenarios. Frankfurt am Main. Online verfügbar unter: <https://www.vci.de/vci/downloads-vci/publikation/vci-prognos-study-the-german-chemical-industry-2030-update-2015-2016-alternative-scenarios.pdf>, zuletzt geprüft am 17.05.2024.

Verband Deutscher Papierfabriken e.V. (Hg.) (2021): Papier 2021. Statistiken zum Leistungsbericht. Online verfügbar unter: https://www.papierindustrie.de/fileadmin/0002-PAPIERINDUSTRIE/07_Dateien/XX-LB/PAPIER2021-digital.pdf, zuletzt geprüft am 16.05.2023

Wissenschaftlicher Beirat für Waldpolitik WBW (2021): Die Anpassung von Wäldern und Waldwirtschaft an den Klimawandel . Online verfügbar unter: https://www.bmel.de/SharedDocs/Downloads/DE/_Ministerium/Beiraete/waldpolitik/gutachten-wbw-anpassung-klimawandel.pdf?__blob=publicationFile&v=2, zuletzt geprüft am 17.05.2024.

Wolf, Tobias; Kubowitz, Petra; Untergutsch, Andrea; Wensing, Christoph; Mittelbach, Heidi; Pagen-kopf, Feng-Lu (2020): Potenziale von Bauen mit Holz. Erweiterung der Datengrundlage zur Verfügbarkeit von Holz als Baustoff zum Einsatz im Holzbau sowie vergleichende Ökobilanzierung von Häusern in Massiv- und Holzbauweise Umweltbundesamt (UBA) Dessau-Roßlau. Online verfügbar unter: <http://www.umweltbundesamt.de/publikationen>, zuletzt geprüft am 17.05.2024.

Kontakt

Dr. René Backes, Head of Bioenergie systems

DBFZ Deutsches Biomasseforschungszentrum gemeinnützige GmbH

✉ rene.backes@dbfz.de | 🌐 www.dbfz.de

Bioenergieforschung im Rahmen des Förderprogramms Nachhaltige Erneuerbare Ressourcen

Zusammenfassung: Die Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR) ist Projektträger des Bundesministeriums für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL). Ihre Aufgabe ist es, Forschungs-, Entwicklungs- und Demonstrationsprojekte im Bereich nachhaltiger erneuerbarer Ressourcen zu koordinieren.

Die Bioenergieforschung des BMEL wird über das Programm Nachhaltige Erneuerbare Ressourcen gefördert, das dem Förderprogramm Nachwachsende Rohstoffe seit dem 01. Januar 2024 nachfolgt. Dies zielt auf die bessere Integration von Klimaschutz, Kreislaufwirtschaft, Nachhaltigkeit, Umwelt- und Ressourcenschutz sowie von Herausforderungen des Wandels zur Bioökonomie. Forschungsförderung zu Bioenergie und Bioenergieträgern ist dem Themenbereich Produkte aus nachhaltigen erneuerbaren Ressourcen zugeordnet. Der Forschungsbedarf wird nun verstärkt über Förderaufrufe adressiert, wobei Initiativskizzen weiterhin möglich sind. Die Ergebnisverwertung hat einen höheren Stellenwert. Aktuell aktive Förderaufrufe zur Bioenergie sind „Künstliche Intelligenz zur Automatisierung der Biogaserzeugung“ bis 30.09.2024 und „Zukunft.Forschung.Biogas“ bis 15.07.2024.

Informationen zum Förderprogramm werden auf der Themen-Webseite <https://foerderung.fnr.de/> bereitgestellt.

Abstract: The Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR) is a funding agency of the Federal Ministry of Food and Agriculture (BMEL). Its task is to coordinate research, development and demonstration projects in the field of sustainable renewable resources.

BMEL's bioenergy research is funded via the Sustainable Renewable Resources programme, which has replaced the Renewable Resources funding programme since 1 January 2024. It aims to better integrate climate protection, circular economy, sustainability, environmental protection and resource conservation as well as the challenges of the transition to a bioeconomy. Research funding for bioenergy and bioenergy sources is assigned to the area of products from sustainable renewable resources. The need for research is now increasingly being addressed via calls for proposals, although initiative outlines are still welcome. The utilisation of results has a higher priority.

Currently open calls for proposals in the area of bioenergy are "Artificial intelligence for the automation of biogas production" until 30 September 2024 and "Future. research.biogas" until 15 July 2024.

Information on the funding programme is available on the topic website <https://foerderung.fnr.de/>.

Die Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V.

Die Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR) ist Projektträger des Bundesministeriums für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL). Sie wurde 1993 auf Initiative der Bundesregierung mit der Maßgabe ins Leben gerufen, Forschungs-, Entwicklungs- und Demonstrationsprojekte im Bereich nachwachsender Rohstoffe zu koordinieren. Die Aufgaben der FNR umfassen die Mitwirkung bei der Planung und die treuhänderische Durchführung von Förderprogrammen des Bundes im Bereich nachwachsender Rohstoffe unter der Rechts- und Fachaufsicht des BMEL (Projektträgerschaft), die Sammlung und Aufbereitung entsprechender Fachinformationen und die Information, insbesondere des Bundes und der Länder sowie der Industrie, der Land- und Forstwirtschaft und der Verbraucher, auf dem Gebiet der nachwachsenden Rohstoffe sowie die dazu notwendige Öffentlichkeitsarbeit.

Projektförderung

Die Projektträgerschaft ist die vorrangige Aufgabe der FNR. Im Auftrag des BMEL unterstützt sie die angewandte Forschung und Entwicklung im Bereich der nachhaltigen Erzeugung und der Nutzung nachwachsender Ressourcen. Das Förderprogramm Nachhaltige Erneuerbare Ressourcen ist mit 822 Vorhaben und 237,5 Mio. Euro das umfangreichste. Darüber hinaus betreut die FNR weitere Förderprogramme wie Torfminderung und Moorbodenschutz mit 94 Vorhaben und einem Fördervolumen von 94,4 Mio. €, Waldklimafonds (177 Vorhaben, 82,9 Mio. €) und das Förderprogramm Energetische Nutzung von Wirtschaftsdüngern im Bereich F&E (48 Vorhaben mit 14,4 Mio. €) sowie auch das Investitionsprogramm (36 Vorhaben mit 3,9 Mio. €) (Abb. 1).

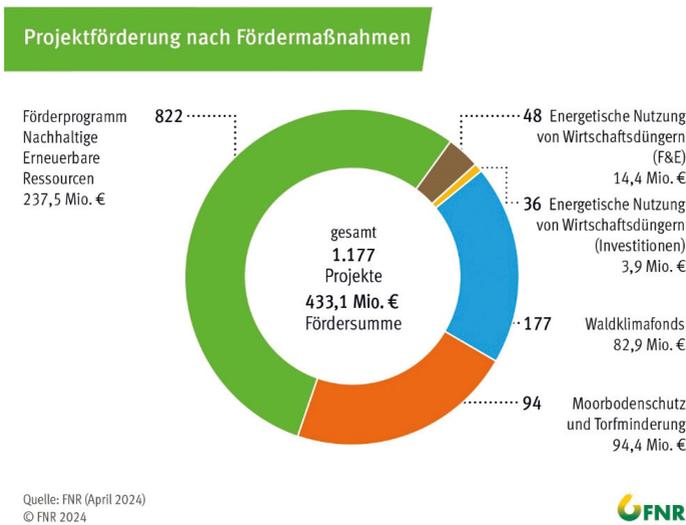


Abb. 1: Anzahl der Vorhaben und Fördervolumen der von der FNR betreuten Förderprogramme des BMEL

Forschungsförderung zur Thematik Bioenergie wurde in den letzten Jahren über die BMEL-Förderprogramme Nachwachsende Rohstoffe und Emissionsminderung bei der Vergärung von Wirtschaftsdüngern durchgeführt. Gemeinsam mit dem Projektträger VDI/VDE Innovation + Technik GmbH war die FNR außerdem für die Förderrichtlinie zur Entwicklung regenerativer Kraftstoffe des Bundesministeriums für Digitales und Verkehr (BMDV) zuständig. Im Bundeshaushalt 2024 stehen für die Förderrichtlinien „Investitionen in emissionsmindernde Maßnahmen bei der Vergärung von Wirtschaftsdüngern“ und „Entwicklung regenerativer Kraftstoffe“ keine zusätzlichen Mittel aus dem Klima- und Transformationsfonds bereit. Daher können hier keine neuen Förderanträge gestellt werden.

Förderprogramm „Nachhaltige Erneuerbare Ressourcen“

Aktuell wird die Bioenergieforschung durch das BMEL über das Programm Nachhaltige Erneuerbare Ressourcen gefördert, das dem Förderprogramm Nachwachsende Rohstoffe seit dem 1. Januar 2024 nachfolgt. Das Förderprogramm „Nachhaltige Erneuerbare Ressourcen“ des BMEL zielt auf die Weiterentwicklung einer nachhaltigen, zirkulären Bioökonomie, des Industriestandortes Deutschland und des ländlichen Raums. Dabei spielt die nachhaltige Gewinnung und Nutzung von Biomasse aus der Land-, Forst- und Abfallwirtschaft die entscheidende Rolle. Mit dem Programm sollen zum einen die Entwicklung innovativer, international wettbewerbsfähiger biobasierter Produkte aus erneuerbaren Ressourcen sowie Verfahren und Technologien zu deren Herstellung, Recycling, Mehrfach- und Kaskadennutzung gefördert und zum anderen die Entwicklung von Konzepten, die auf die Verbesserung der Nachhaltigkeit der biobasierten Wirtschaft ausgerichtet sind, unterstützt werden. Der Bewahrung der natürlichen Lebensgrundlagen, insbesondere dem Klima-, Umwelt- und Biodiversitätsschutz, der Klimaanpassung und der Sicherung des Wohlstands kommt hierbei eine besondere Bedeutung zu.

Wie auch schon beim vorhergehenden Förderprogramm Nachwachsende Rohstoffe erfolgt die Förderung ressourcenbasiert. Vor dem Hintergrund des landwirtschaftlichen Bezuges des BMEL-Förderprogramms werden nun folgende erneuerbare Ressourcen gefördert:

- biogene Ressourcen einschließlich Nebenprodukte, Rest- und Abfallstoffe (Abfälle mit Verwertungspotenzial) aus Land- und Forstwirtschaft, aus Aquakultur, Paludikultur, aus der verarbeitenden Industrie, dem Gewerbe und den Haushalten sowie erneuerbare, biogene Ressourcen aus der Kreislaufwirtschaft,
- die nachhaltige Erzeugung, Bereitstellung, Verarbeitung und Nutzung erneuerbarer Ressourcen,
- die ressourcenschonende/-effiziente und umweltschonende Herstellung von Produkten aus nachhaltigen erneuerbaren Ressourcen sowie
- übergreifende Themen, wie Bewertungen zur Erzeugung und Nutzung nachhaltiger erneuerbarer Ressourcen einschließlich Dialoge mit der Gesellschaft.

Das Programm zielt insbesondere auf die bessere Integration von Klimaschutzorientierung, Kreislaufwirtschaft, Nachhaltigkeit, Umwelt- und Ressourcenschutz sowie von Herausforderungen des Wandels zur Bioökonomie. Forschungs-, Entwicklungs- und Demonstrationsvorhaben werden in den folgenden Bereichen gefördert:

- Nachhaltige erneuerbare Ressourcen – Gewinnung, Erzeugung und Bereitstellung,
- Ressourcenaufbereitung und -verarbeitung,
- Produkte aus nachhaltigen erneuerbaren Ressourcen,
- Herausforderungen des Wandels und
- Gesellschaftlicher Dialog.

Die Verteilung der aktuell geförderten 822 Projekte mit einem Fördervolumen von 237,5 Mio. Euro auf die Förderbereiche ist in Abb. 2 dargestellt. Zu dem mit 538 Projekten und 150,7 Mio. Euro umfangreichsten Förderbereich 3 „Produkte aus nachhaltigen erneuerbaren Ressourcen“ zählen die nachhaltige Produktion von Industrie- und Konsumgütern sowie auch von Energie und Energieträgern.

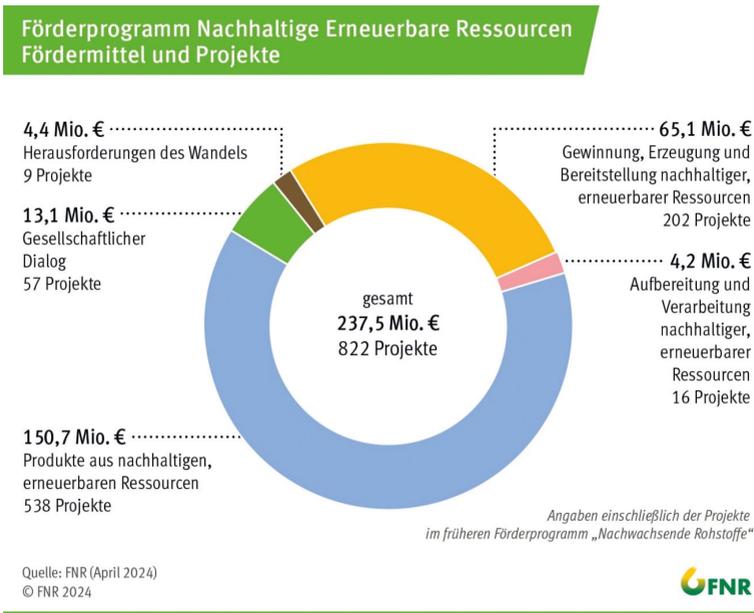


Abb. 2: Anzahl der Vorhaben und Fördervolumen des Förderprogramms Nachhaltige Erneuerbare Ressourcen nach Förderbereichen

Abweichend zum vorhergehenden Förderprogramm wird der Forschungsbedarf des BMEL vornehmlich über thematisch fokussierte und zeitlich begrenzte Förderaufrufe adressiert, um spezifische und/oder aktuelle Fragestellungen anzu-

sprechen. Die Förderziele des Förderprogramms sind auch innerhalb der jeweiligen Förderaufrufe zu beachten, da diese förderpolitischen Zielsetzungen die Förderfähigkeit von Vorhaben begründen. Initiativskizzen zu den Förderbereichen sind aber weiterhin erwünscht. Eine Vorabanfrage in Form einer Projektidee zur Überprüfung der Zuordnung zum Förderprogramm wird empfohlen.

Die Ergebnisverwertung hat in Förderprogramm Nachhaltige Erneuerbare Ressourcen einen höheren Stellenwert bekommen. Dazu zählen Angaben zum Forschungsdatenmanagement in Form eines Konzeptes in der Skizzenphase und eines Forschungsdatenmanagementplans in der Antragsphase. Zudem ist das neue Formblatt Verwertung einzureichen und im Rahmen des Berichtswesens fortlaufend zu aktualisieren. Es erfolgt eine Kontrolle der Verwertung 24 Monate nach Projektende. Die Anforderungen sind im Merkblatt Verwertung zusammengefasst.

Informationen zum Förderprogramm werden nun auf der Themen-Webseite <https://foerderung.fnr.de/> bereitgestellt. Dort finden sich neben der Beschreibung des Förderprogrammes auch Erläuterungen zur Antragstellung und zur Durchführung von Forschungsvorhaben samt FAQ-Bereich und sogar Erklärvideos. Auch die zur Antragstellung notwendigen Formulare, Merkblätter, Formblätter und Muster, z.B. für den Forschungsdatenmanagementplan, stehen hier zum Download zur Verfügung.

Förderaufrufe und Projektbeispiele

Auch schon im Vorgängerförderprogramm Nachwachsende Rohstoffe wurden Forschungsfragen über Förderaufrufe adressiert. Im Bereich Bioenergie sind dort die folgenden Aufrufe zu nennen:

- Stärkung der landwirtschaftlichen Rest- und Abfallstoffverwertung für die Biogaserzeugung (04/18),
- Minderung von treibhausgasrelevanten Emissionen beim Betrieb von Biomassekonversionsanlagen (05/18),
- Flexibilisierung der Biogaserzeugung (08/18),
- Pilotprojekte zur Erprobung bioenergie-basierter Lösungen als Baustein der ländlichen Energieversorgung (12/18),
- Saubere Verbrennung von festen Biobrennstoffen in Kleinf Feuerungsanlagen (KFA) mit sehr geringen Schadstoffemissionen (09/19),
- Optimierung der Biomethanherzeugung (03/20),
- Energetische und emissionsmindernde Nutzung von Wirtschaftsdüngern (05/20),
- Modell- und Demonstrationsvorhaben zur Erhöhung des Anteils von Wirtschaftsdüngern in Biogasanlagen (09/21) und
- Emissionsvermeidung durch die Vergärung von Wirtschaftsdüngern und hof-eigenen Reststoffen (12/22).

Die geförderten Vorhaben sind in der Projektdatenbank der FNR unter <http://www.fnr.de/projektfoerderung> einsehbar. Ausgewählte Vorhaben werden auch auf der Portalseite <https://bioenergie.fnr.de/> und den Themenseiten <https://biogas.fnr.de/> und <https://biokraftstoffe.fnr.de/> präsentiert. Beispielhaft werden nachfolgend drei kürzlich erfolgreich beendete Fördervorhaben aus dem Bereich der Biogaserzeugung beschrieben.

Im Verbundvorhaben „Landwirtschaftliche Rest- und Abfallstoffverwertung – Lösungsansätze zur technischen Anpassung bestehender Biogasanlagen für die Nutzung faseriger Reststoffe (LaRA)“ (Laufzeit 11/19 – 12/22) wurden durch die Verbundpartner TH Ingolstadt - InES (22042218), Leibniz-Institut für Agrartechnik und Bioökonomie e.V. (2219NR158) und C.A.R.M.E.N. e.V. (2219NR196) Lösungsansätze für die vermehrte Verwertung der faserhaltigen Reststoffkategorien Stroh, Landschaftspflegegras und Festmist in landwirtschaftlichen Biogasanlagen untersucht. Dazu wurde eine Bestandsaufnahme an bundesweit verteilten Praxisanlagen durchgeführt, Optimierungspotenziale ausgemacht und zu Handlungsfeldern zusammengefasst. Es wurden technische Lösungen erörtert und Konzepte für die Anpassung der Anlagen an den Reststoffeinsatz erstellt. Diese wurden in dem Handlungsleitfaden: «Zukunftskonzept Koppelprodukte: Biogasproduktion aus Stroh, Mist und Co. – Faserhaltige Substrate richtig einsetzen» veröffentlicht.

Im Verbundvorhaben „PowerLand 4.2 – Smart and innovative Land Power Systems“ (Zeitraum: 10/18-05/22) wurden durch die Partner Uni Hohenheim – Landesanstalt für Agrartechnik und Bioenergie (22404717), HS Reutlingen (22404618) und NOVATECH GmbH (22404718) zur Verknüpfung von PV und Biogasanlage zur vollständigen und ganzjährigen Strom- und Wärmeversorgung eines Dorfes Vorhersagemodelle für die PV- und Biogasproduktion sowie eine Steuerung entwickelt, die eine bedarfsgerechte Biogasproduktion über das Fütterungsregime ermöglicht. Das System konnte erfolgreich im Reallabor Unterer Lindenhof getestet werden.

Die Verringerung des Eigenenergiebedarfes von Biogasanlagen durch eine optimierte Rührwerksentwicklung und eine automatisierte messdatenbasierte Rührwerkssteuerung war das Ziel des Verbundvorhabens „Innovative Rührtechnik in Biogasanlagen zur energieoptimalen Substrateinmischung bei flexibler Fütterung“ (Zeitraum: 10/19-03/23). Die Verbundpartner FH Münster (22042018) und Trilogik GmbH (2219NR137) haben durch eine streng algorithmische Auslegung der Rührwerksgeometrie eine Effizienzsteigerung erreichen können. Die Entwicklung von Regelverfahren zur Steuerung von Rührwerkszyklen auf Basis lokaler, eigens entwickelter Geschwindigkeitsmessungen führte ebenfalls zu einem geringeren Energieverbrauch.

Aktuell sind im Förderprogramm Nachhaltige Erneuerbare Ressourcen zwei Förderaufträge zum Bereich Bioenergie aktiv.

„Künstliche Intelligenz zur Automatisierung der Biogaserzeugung“

Der Aufruf wurde am 01.03.2024 veröffentlicht. Skizzen können bis zum 30.09.2024 eingereicht werden. Das Ziel des Aufrufes ist die Entwicklung von zukunftsfähigen Lösungen für die Überwachung und Regelung des Gesamtprozesses von der Substratbereitstellung über die Biogasproduktion bis zur Nutzung des erzeugten Biogases mithilfe von Vorhersagemodellen und Verfahren des maschinellen Lernens (künstliche Intelligenz).

Tab. 1: Themenbereiche und Teilaspekte des Förderaufrufes Künstliche Intelligenz zur Automatisierung der Biogaserzeugung im Rahmen des Förderprogramms Nachhaltige Erneuerbare Ressourcen des BMEL

Themenbereich	Mögliche Teilaspekte (exemplarisch)
Neu- und Weiterentwicklung von Messtechnik an Biogasanlagen	<ul style="list-style-type: none"> • Optimierung von Verfahren speziell zur Messung von Gasmengen und -zusammensetzung • Entwicklung von Verfahren zur automatisierten Sensorüberwachung
Verbesserung des Datenmanagements	<ul style="list-style-type: none"> • Weiterentwicklung und Automatisierung der Datenerfassung/-aufbereitung/-validierung • Verbesserung der Datenverfügbarkeit mittels Cloud-basierter (Software)Lösungen
Weiter-/Entwicklung maschinelles Lernen zur Anwendung bei der Biogaserzeugung	<ul style="list-style-type: none"> • Weiter-/Entwicklung/Anwendung von Methoden der künstlichen Intelligenz zur Teil-/Automatisierung von Prozessschritten/-techniken/-komponenten der Biogaserzeugung • Entwicklung hybrider Verfahren unter Verwendung konventioneller Automatisierungsmethoden und maschinellem Lernen
Teil-/Automatisierung des Biogaserzeugungsprozesses	<ul style="list-style-type: none"> • Quantifizierung des Nutzens von Maßnahmen zur Teil-/Automatisierung der Biogaserzeugung • Evaluierung modellbasierter Verfahren zur Zustandsüberwachung und Prozessregelung

„Zukunft.Forschung.Biogas“

Der Aufruf wurde am 12.03.2024 veröffentlicht. Skizzen können bis zum 15.07.2024 eingereicht werden. Das Ziel ist die Entwicklung von zukunftsweisenden, effizienten und kostengünstigen Biogastechnologien, -verfahren und -konzepten, die auch einen Beitrag zur Emissionsminderung leisten. Themenbereiche sind die Effizienzsteigerung, die Emissionsvermeidung, der Wirtschafts-

dünger- und Reststoffeinsatz sowie Innovationen zur nachhaltigen und zukunfts-fähigen Weiterentwicklung der Biogaserzeugung und -nutzung.

Tab. 2: Themenbereiche und Teilaspekte des Förderaufrufes Zukunft.Forschung.Biogas im Rahmen des Förderprogramms Nachhaltige Erneuerbare Ressourcen des BMEL

Themenbereich	Mögliche Teilaspekte (exemplarisch)
Effizienzsteigerung	<ul style="list-style-type: none"> • Effizienzsteigerung entlang der gesamten Prozesskette • Entwicklung und Optimierung kostengünstiger, inputflexibler und effizienter Konversions- und Aufbereitungstechnologien
Emissionsvermeidung	<ul style="list-style-type: none"> • Entwicklung von Strategien und Lösungen zur Emissionsvermeidung bei der Biogaserzeugung • Weiterentwicklung und Anwendung geeigneter Messverfahren und -methoden
Wirtschaftsdünger- und Reststoffeinsatz	<ul style="list-style-type: none"> • Wechsel des Substrateinsatzes von Anbaubiomasse zu Wirtschaftsdünger • Konzeptentwicklungen für Substratpooling
Innovationen zur nachhaltigen und zukunfts-fähigen Weiterentwicklung der Biogaserzeugung und -nutzung	<ul style="list-style-type: none"> • Projektvorschläge zur vertieften Bearbeitung von speziellen Fragestellungen in einem „freien“ Themenbereich

Das neue Förderprogramm des BMEL Nachhaltige Erneuerbare Ressourcen setzt neue thematische Anreize und stellt gleichzeitig die Kontinuität der Forschungsförderung im Hinblick auf das Vorgängerprogramm nachwachsende Rohstoffe sicher. Die FNR bleibt auch mit dem Förderprogramm Nachhaltige Erneuerbare Ressourcen Ansprechpartner für die Förderung von anwendungsnahen FuE-Projekten im Bereich Bioenergie.

Kontakt

Dr. Simon Zielonka, Referent Systemintegration der Bioenergie

Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. (FNR)

☎ +49 (0)3843.6930-365 | ✉ s.zielonka@fnr.de | 🌐 <https://www.fnr.de/>

Rechtliche Rahmenbedingungen der Vergütung von Biomasseerzeugnissen

Zusammenfassung: Die Vergütung von Biomasseanlagen wirft zahlreiche Rechtsfragen auf, die sich nicht zuletzt daraus ergeben, dass das EEG alle paar Jahre grundlegend geändert wird. Die technischen Entwicklungen im Bereich der energetischen Nutzung von Biomasse, der immer stärkere Fokus auf den Klimaschutz sowie zuletzt die Bewältigung der Energiekrise infolge des Ukraine-Krieges sind einige der Gründe, warum gerade die Vorschriften des Energierechts ständigem Wandel unterworfen sind.

Der folgende Beitrag möchte sich darum weniger der Darstellung einzelner spezieller Rechtsprobleme widmen als vielmehr die rechtlichen Rahmenbedingungen der Vergütung von Biomasse in der Breite darstellen, um dem Leser einen Einstieg in das Grundsystem der Regeln zu bieten. Nach der Darstellung der Grundzüge und einem kleinen Überblick über die Änderungshistorie des EEG im Bezug auf Biomassevorschriften soll etwas ausführlicher auf die Regelungen des aktuellen EEG 2023 eingegangen werden. Dabei soll insbesondere auf die Unterscheidung von Einspeisevergütung und Direktvermarktung, die Regeln zur Anlagenflexibilisierung sowie zuletzt auf die aktuellen Bestrebungen des Gesetzgebers im Hinblick auf die Förderung von Biomethananlagen eingegangen werden.

Abstract: The remuneration of biomass plants raises numerous legal questions, not least because the EEG is fundamentally amended every few years. The technical developments in the field of biomass energy use, the ever-increasing focus on climate protection and, most recently, overcoming the energy crisis resulting from the war in Ukraine are some of the reasons why the regulations of energy law are subject to constant change.

The following article will therefore focus less on the presentation of individual legal problems, but rather to present the legal framework for the remuneration of biomass in order to provide the reader with an introduction to the basic concept of the rules. Following the presentation of the basic principle and a brief overview of the history of amendments to the EEG in relation to biomass regulations, the regulations of the current EEG 2023 will be discussed in more detail. In particular, the latest efforts of the legislator with regard to the promotion of biomethane plants, as well as the distinction between feed-in tariffs and direct marketing and the rules for plant flexibilization will be discussed.

1 Welches Recht gilt für welche Biomasseanlage?

1.1 Das Grundprinzip

Um die Vergütung einer Biomasseanlage nach dem EEG zu bestimmen, ist es ebenso wie bei allen anderen Anlagentypen nach dem EEG zunächst entscheidend, zu bestimmen, welches EEG überhaupt anzuwenden ist. Denn je nach EEG unterscheiden sich die einzelnen Regelungen bezüglich des Vergütungssatzes, der Degressionsvorschriften, den einzelnen Boni usw. zum Teil erheblich.

Tab. 1: Übersicht über die verschiedenen EEG

Gesetz	Geltung
EEG 2000	bis 31.12.2003
EEG 2004	bis 31.12.2008
EEG 2009	bis 31.12.2011
EEG 2012	bis 31.07.2014
EEG 2014	bis 31.12.2016
EEG 2017	bis 31.12.2020
EEG 2021	bis 31.12.2022
EEG 2023	seit 01.01.2023

Außerdem ist bei der Frage des anzuwendenden Rechts darauf zu achten, ob man es mit einer Bestands- bzw. Altanlage oder einer Neuanlage zu tun hat. Eine Bestandsanlage ist gegeben, wenn die Anlage vor dem aktuell geltenden EEG in Betrieb genommen worden ist. Neu ist die Anlage hingegen, wenn sie ab Geltung des aktuellen EEG in Betrieb genommen worden ist.

Daran anknüpfend lässt sich folgende Faustregel formulieren:

Für **Neuanlagen** gilt grundsätzlich das **aktuelle EEG**.

Bei **Bestandsanlagen** muss genauer geschaut werden: hier erklären die **Übergangsvorschriften** des jeweils neueren EEG häufig bestimmte Altvorschriften für anwendbar, insbesondere bezüglich der Vergütung.

Daraus ergibt sich der folgende Gedankenschritt:

1. Wann wurde Anlage in Betrieb genommen?
2. Welches EEG galt zu diesem Zeitpunkt?
3. Was steht in den Übergangsvorschriften der nachfolgenden EEG?

Das ist freilich eine grob vereinfachende Darstellung, kann aber helfen, sich zunächst in dem Wirrwarr der verschiedenen EEG zurechtzufinden.

1.2 Zum Überblick: Neuerungen der einzelnen EEG

Das EEG 2000 sah noch keine Boni für Biomasseanlagen vor. Die spätere Einführung dieser Boni wurde teilweise auch für Bestandsanlagen nach dem EEG 2000 als anwendbar erklärt.

Im EEG 2004 wurden verschiedene Boni eingeführt, darunter der NawaRo-Bonus, der KWK-Bonus und der Technik- oder Innovationsbonus für innovative Verstromungsmethoden wie ORC-Turbinen, Trockenfermentation und die Aufbereitung auf Erdgasqualität.

Im EEG 2009 wurden zusätzliche Boni eingeführt, darunter der Güllebonus (nicht für Biomethan-BHKW), der Landschaftspflegebonus, der Bonus für Gas-aufbereitung und der Luftreinhaltbonus. Gleichzeitig wurde der Technologiebonus wieder eingeschränkt. Nach neuerer ständiger Rechtsprechung wirkt sich die Beschränkung derart aus, dass etwa bei ORC-Anlagen, die unter das EEG 2009 fallen, nur der Strom mit dem Bonus vergütet wird, der durch die ORC-Anlage erzeugt wurde, während bei ORC-Anlagen, die nach dem EEG 2004 vergütet werden, der von der gesamten Anlage erzeugte Strom mit dem Bonus vergütet wird.

Die Übergangsvorschriften gemäß § 66 EEG 2009 ermöglichten vielen Altanlagen, die unter das EEG 2000 und EEG 2004 fielen, die Teilnahme am Grundvergütungssystem sowie am Bonussystem des EEG 2009.

Mit dem EEG 2012 wurde die Direktvermarktung eingeführt. Damit war es fortan möglich, anstelle der Einspeisevergütung Markt- und Flexibilitätsprämien in Anspruch zu nehmen. In den Folgejahren sollte die Direktvermarktung die Inanspruchnahme der Einspeisevergütung Stück für Stück verdrängen. So war nach dem EEG 2012 für Anlagen, die ab dem 1. Januar 2014 in Betrieb genommen wurden und eine installierte Leistung von mehr als 750 kW hatten, keine Einspeisevergütung mehr vorgesehen. Für diese war somit nur noch die Direktvermarktung möglich.

Im EEG 2014 entfiel das Bonussystem vollständig. Anlagen mit einer Leistung von über 100 kW erhielten nur noch für 50 % der installierten Leistung eine EEG-Vergütung. Stattdessen wurde ein Flexibilitätszuschlag von 40 EUR/kW eingeführt, der die Flexibilitätsprämie ablöste. Die Einspeisevergütung war nur noch für Anlagen mit einer Leistung von ≤ 500 kW (vor dem 1. Januar 2016 in Betrieb genommen) bzw. ≤ 100 kW (ab dem 1. Januar 2016 in Betrieb genommen) möglich.

Seit dem EEG 2017 ist die Vergütung für Anlagen mit einer Leistung von mehr als 150 kW nur noch bei erfolgreicher Teilnahme an Ausschreibungen möglich. Die Einspeisevergütung gilt nur noch für Anlagen mit einer Leistung von ≤ 100 kW oder als Ausfallvergütung für maximal 3 aufeinanderfolgende Monate und maximal 6 Monate pro Jahr.

Mit dem EEG 2021 wurde der Flexibilitätszuschlag auf 65 EUR/kW erhöht. Außerdem gilt seit dem EEG 2021, dass Biomasseanlagen höchstens 40 % Mais oder Getreidekorn verwenden dürfen, und der Strom nur bis zu einer Bemessungsleistung vergütet wird, die 45 % der installierten Leistung entspricht (bei Biomethananlagen nur 15 %).

1.3 Vergütungszeitraum und Degression bei Biomasseanlagen

Der Zeitpunkt der Inbetriebnahme einer Anlage bestimmt nicht nur über die Frage, welches EEG Anwendung findet. Er bestimmt auch die Länge der Vergütung. Denn nach jedem EEG wird die Vergütung grundsätzlich für die Dauer von 20 Jahren ab Inbetriebnahme der Anlage gewährt. Für den gesamte Zeitraum von 20 Jahren gilt dann ein einheitlicher Vergütungssatz.

Außerdem bestimmt sich nach dem Inbetriebnahmezeitpunkt der für den jeweiligen Vergütungssatz geltende Degressionssatz. Die Degressionsvorschriften bestimmen, dass die Vergütung jährlich um einen bestimmten Prozentsatz im Vergleich zum Vorjahr abnimmt.

Die Degressionssätze haben sich im Laufe der Jahre geändert:

Tab. 2: Degressionssätze nach EEG

Gesetz	Degressionssatz
EEG 2000	1 % pro Jahr
EEG 2004	1,5 % pro Jahr nur auf Grundvergütung
EEG 2009	1 % pro Jahr auf die Gesamtvergütung, einschließlich Boni
EEG 2012	2 % pro Jahr für die Grundvergütung
EEG 2014	0,5 % pro Quartal
EEG 2017	1 % jährlich
EEG 2021	01.01.2021 0 %, ab 01.07.2022 0,5 % jährlich.
EEG 2023	Für 2023 ausgesetzt; seit 01.01.2024 1 % für Neu- und 0,5 % für Bestandanlagen

Die Begrenzung des Vergütungszeitraums auf 20 Jahre wird seit ein paar Jahren für viele Anlagen bedeutsam, da insbesondere unter der Geltung des EEG 2004 viele Anlagen in Betrieb genommen worden sind.

Bei vielen Anlagen dürften außerdem im Laufe der Zeit zum Teil erhebliche technische Veränderungen vorgenommen worden sein. Insbesondere bei der Erweiterung einer bestehenden Anlage durch zusätzliche Fermenter oder Blockheizkraftwerke kann sich hier die schwierige Rechtsfrage stellen, ob (ganz oder teilweise) eine neue Anlage vorliegt, welcher Inbetriebnahmezeitpunkt dann gilt und wie und nach welchem EEG die Anlage zu vergüten ist.

2 Was gilt nach dem EEG 2023 für die Vergütung von Biomasseanlagen?

Die gesetzgeberischen Ziele des EEG 2023 im Bezug auf Biomasse sehen einen Ausbaupfad bis zum Jahr 2030 mit einer Zielsetzung von 8.400 MW installierter Leistung vor. Außerdem will der Gesetzgeber einen besonderen Fokus auf hochflexible Spitzenlastkraftwerken legen. Dementsprechend soll Biomethan verstärkt gefördert werden. Zur Umsetzung dieses Ziels werden fortan Biomasse- und Biomethananlagen in der Ausschreibung getrennt. Es ist geplant, den Anteil an Biomethan zu erhöhen, mit zweimal jährlich jeweils 600 MW bis zum Jahr 2028. Gleichzeitig ist ein abnehmender Anteil an Biomasse und Biogas vorgesehen, beginnend mit 600 MW im Jahr 2023 und schrittweise auf 300 MW im Jahr 2028.

2.1 Grundsätzliches zur Vergütung von Biomasseanlagen nach dem EEG 2023

Die Vergütung wird ausschließlich für den Strom gewährt, der aus Biomasse im Sinne der Biomasseverordnung erzeugt wurde.

Nach der Biomasseverordnung umfasst Biomasse tierische oder pflanzliche Bestandteile einschließlich daraus resultierender Folge- und Nebenprodukte, Rückstände und Abfälle mit biologischem Energieträger. Nicht darunter fallen vor allem fossile Brennstoffe, Torf, gemischte Abfälle, Klärschlämme, Altholz, Papier, Textilien, Deponie- und Klärgase usw.

Außerdem definiert die Biomasseverordnung die anerkannten technischen Verfahren zur Erzeugung von Strom aus Biomasse. Darunter fallen ein- oder mehrstufige Verfahren durch Feuerungsanlagen einschließlich ORC-Anlagen, Verbrennungsmotoren, Gasturbinen, Brennstoffzellen und ähnliche klima- und umweltschonende Anlagen.

Im EEG 2023 finden sich technische Vorgaben für die hydraulische Verweilzeit Gärrestläger sowie zur Verhinderung von Gasaustritt.

Der Anlagenbetreiber muss zudem ein Einsatzstoff-Tagebuch führen und Angaben sowie Belege über die Art, Menge und Einheit sowie die Herkunft der eingesetzten Stoffe vorlegen. Dabei muss ersichtlich sein, welche Biomasse und in welchem Umfang Speichergas oder Grubengas eingesetzt werden.

Wenn keine KWK-Anlage zum Einsatz kommt, muss der Betreiber nachweisen, dass keine kosteneffiziente Möglichkeit zur Nutzung als hocheffiziente KWK-Anlage besteht.

KWK-Anlagen werden nur vergütet, wenn sie hocheffizient sind, d.h. wenn sie den Vorgaben der Energieeffizienzrichtlinie entsprechen.

2.2 Die Höhe der Vergütung

Die Höhe der Vergütung (Einspeisevergütung und Marktprämie) richtet sich nach dem anzulegenden Wert. Grundsätzlich wird der anzulegende Wertes wettbewerblich im Ausschreibungsverfahren bestimmt. Ab 150 kW sind Anlagen zur Teilnahme an der Ausschreibung verpflichtet. Bei Anlagen mit einer installierten Leistung von ≤ 150 kW wird der anzulegende Wert hingegen gesetzlich festgelegt.

Die gesetzliche Bestimmung des anzulegenden Wertes hängt von den eingesetzten Rohstoffarten ab:

- Für Biomasse (außer Biomethan) im Sinne der Biomasseverordnung beträgt der anzulegende Wert bis einschließlich 150 kW Bemessungsleistung 12,67 ct/kWh gemäß § 42 EEG.
- Für Biogas aus der anaeroben Vergärung von mindestens 90 % Bioabfällen beträgt der anzulegende Wert 14,16 ct/kWh (bei einer Bemessungsleistung von ≤ 500 kW) bzw. 12,41 ct/kWh (bei einer Bemessungsleistung von ≤ 2 MW) gemäß § 43 EEG.
- Für Biogas aus der anaeroben Vergärung von mindestens 80 % Gülle beträgt der anzulegende Wert 22 ct/kWh (bei einer Bemessungsleistung von ≤ 75 kW) bzw. 19 ct/kWh (bei einer Bemessungsleistung von ≤ 150 kW) gemäß § 44 EEG.

Für alle genannten Werte gilt eine jährliche Degression von 0,5 % zum 01.07. eines jeden Jahres, beginnend ab dem 01.07.2024.

Die Bemessungsleistung meint die Summe der in einem Kalenderjahr erzeugten Kilowattstunden geteilt durch die Zeitstunden des Jahres. Sie ist von der installierten Leistung zu unterscheiden, die die potenzielle Dauerleistung unbeschadet von tatsächlichen Schwankungen darstellt.

2.3 Verringerung der Vergütung

Die Verringerung der Vergütung hängt davon ab, ob es sich um eine Anlage in der Ausschreibung oder außerhalb handelt.

Für Biomasseanlagen in der Ausschreibung mit einer Leistung von mehr als 150 kW (§ 39i Abs. 2 EEG) gilt: Für jede Kilowatt, um die die Höchstbemessungsleistung überschritten wird, wird die Marktprämie auf Null bzw. die Einspeisevergütung auf den Marktwert verringert. Die Höchstbemessungsleistung wird definiert als 55 % des bei Einsatz von Biogas bezuschlagten Gebotsmengenwertes oder als 25 % des bei fester Biomasse bezuschlagten Gebotsmengenwertes.

Für Anlagen außerhalb der Ausschreibung mit einer Leistung von ≤ 150 kW (§ 44b Abs. 1 EEG) gilt hingegen: Bei Anlagen mit einer installierten Leistung

von über 100 kW wird die Förderung auf die erzeugte Menge begrenzt, die einer Bemessungsleistung von 45 % der installierten Leistung entspricht. Für darüber hinausgehende Mengen wird die Marktprämie auf Null oder die Einspeisevergütung auf den Marktwert verringert. Das bedeutet beispielhaft, dass bei einer Anlage mit 1 MW installierter Leistung die Strommenge vergütet wird, die in 8.760 h (= ein Jahr) mit 450 kW (= 45 %) Erzeugungsleistung erzeugt werden könnten, d.h. 3.942.000 kWh.

Zur Verringerung der Erdgasverstromung und der Verhinderung von Gasknappheit infolge des Ukrainekrieges gilt seit dem 03.08.2023 eine wichtige Übergangsvorschrift. Gemäß § 100 Abs. 15 EEG eine Übergangsvorschrift erhalten für die Jahre 2023 und 2024 alle Betreiber neuer und bestehender Biomasseanlagen, die kein Biomethan einsetzen, eine Vergütung für die volle Bemessungsleistung. Dabei werden Mehrerlöse auf den Flexibilitätszuschlag angerechnet, wenn sie den anzulegenden Wert um mehr als 1 ct/kWh übersteigen.

2.4 Die Einspeisevergütung nach dem EEG 2023

Die Einspeisevergütung gemäß dem EEG 2023 gilt ausschließlich für Anlagen mit einer installierten Leistung von ≤ 100 kW. Für Anlagen mit einer Leistung von mehr als 100 kW wird die Einspeisevergütung nur als Ausfallvergütung gewährt und zwar für maximal 3 aufeinanderfolgende Monate und höchstens 6 Monate pro Kalenderjahr.

Um die Einspeisevergütung zu erhalten, müssen bestimmte Voraussetzungen erfüllt sein: Der Netzbetreiber muss den gesamten erzeugten Strom der Anlage zur Verfügung gestellt bekommen, ohne dass ein Verbrauch in unmittelbarer räumlicher Nähe zur Anlage stattfindet. Zudem darf der erzeugte Strom nicht für Netzdurchleitungszwecke genutzt werden und die Anlage darf nicht am Regelenergiemarkt teilnehmen.

Die Höhe der Einspeisevergütung entspricht dem anzulegenden Wert abzüglich 0,2 ct/kWh. Die Ausfallvergütung entspricht 80 % des anzulegenden Wertes.

Die Förderdauer der Einspeisevergütung erstreckt sich bis zum 31. Dezember des 20. Jahres nach der Inbetriebnahme der Anlage.

2.5 Die Marktprämie nach dem EEG 2023

2.5.1 Grundlegendes

Ab 100 kW sind Biomasseanlagen zur Direktvermarktung verpflichtet. Das betrifft den überwiegenden Teil der Anlagen.

Die Marktprämie wird dementsprechend nur in den Kalendermonaten gezahlt, in denen:

- der Strom direktvermarktet wird,
- der Anlagenbetreiber dem Netzbetreiber das Recht einräumt, den Strom als EEG-geförderten Strom zu kennzeichnen und
- der Strom im sortenreinen Bilanzkreis bilanziert wird.

Die Marktprämie wird berechnet als Differenz zwischen dem anzulegenden Wert und dem Marktwert. Der Marktwert entspricht dem Mittelwert des Spotmarktpreises. Für Anlagen, die vor dem 01.01.2023 in Betrieb genommen wurden oder deren Zuschlag vor diesem Datum erfolgte, wird der Monatsmittelwert herangezogen. Seit dem 01.01.2023 wird der Jahresmittelwert verwendet.

Um die Marktprämie zu erhalten, ist bei allein Anlagen über 150 kW ein erfolgreicher Zuschlag im Ausschreibungsverfahren der Bundesnetzagentur erforderlich. In diesem wird dann der anzulegende Wert bestimmt. Anders bei Anlagen ≤ 150 kW: hier wird der anzulegende Wert gesetzlich bestimmt (siehe oben, 2.2).

Die Gebote dürfen eine Kapazität von 20 MW nicht überschreiten.

Zudem beträgt der Höchstwert für die Marktprämie im Jahr 2023 16,07 ct/kWh. Es erfolgt eine Degression von 1 % im Vergleich zum Vorjahr ab dem 01.01.2024.

2.5.2 Spezielle Bestimmungen zur Marktprämie für Biomasseanlagen

Wie schon das EEG 2021 ist auch im EEG 2023 eine Begrenzung des Anteils an Getreidekorn und Mais in der Biomasse vorgesehen. Für das Jahr 2023 darf dieser Anteil höchstens 40 Masseprozent pro Kalenderjahr betragen, während er für die Jahre 2024 und 2025 auf 35 Masseprozent und für die Jahre 2026, 2027 und 2028 auf 30 Masseprozent reduziert wird. Zudem ist der Einsatz von Biomethan nicht gestattet, da für diese ein besonderes Ausschreibungsverfahren gilt.

Des Weiteren ist der anzulegende Wert für durch anaerobe Vergärung von Biomasse mit Bioabfallanteil erzeugtes Biogas auf 14,16 ct/kWh (bei einer Bemessungsleistung von ≤ 500 kW) bzw. 12,41 ct/kWh (bei einer Bemessungsleistung von ≤ 20 MW) begrenzt. Diese Vergütung unterliegt einer jährlichen Degression um 0,5 % ab dem 01.07.2024.

2.6 Zahlungen für Flexibilität nach §§ 50, 50a EEG 2023

Zahlungen für Flexibilität gemäß den §§ 50 und 50a des EEG 2023 sollen zusammen mit der Begrenzung der förderfähigen Bemessungsleistung auf 45 % der installierten Leistung (gemäß § 44b EEG) einen Anreiz schaffen, Stromerzeugungskapazitäten flexibel vorzuhalten. Dadurch soll die Integration in den Strommarkt verbessert werden.

Diese Regelung gilt für Anlagen zur Erzeugung von Strom aus Biogas (daher auch für Biomethananlagen), die entweder an Ausschreibungen teilnehmen oder solche außerhalb der Ausschreibung mit einer Leistung von mehr als 100 kW.

Das Gesetz unterscheidet nach Inbetriebnahmezeitpunkt:

- Der Flexibilitätszuschlag beträgt 65 EUR/kW installierte Leistung pro Jahr und gilt für Anlagen, die nach dem 31.07.2024 in Betrieb genommen wurden.
- Die Flexibilitätsprämie wird gemäß Anlage 3 zum EEG berechnet und gilt für Anlagen, die nach dem 01.01.2023 in Betrieb genommen wurden.

2.7 Das spezielle Ausschreibungsverfahren für Biomethananlagen

Mit dem EEG 2023 hat der Gesetzgeber ein spezielles Ausschreibungsverfahren für Biomethananlagen geschaffen, die fortan also nicht mehr als Biomasseanlagen behandelt werden. Anders als bei Biomasseanlagen gibt es für Biomethananlagen keine Begrenzung der Bemessungsleistung mehr. Bei Biomasseanlagen bleibt die Bemessungsleistung weiterhin auf 20 MW begrenzt.

Damit will sich der Gesetzgeber auf die vorrangige Förderung systemdienlicher hochflexibler Spitzenlastkraftwerke konzentrieren. Biomethan soll künftig nur noch in speziell klassifizierten Biomethananlagen eingesetzt werden. Diese Anlagen dürfen höchstens an 10 % der Stunden eines Jahres Strom erzeugen.

Des Weiteren gilt für Biomethananlagen ein eigener Höchstwert in Höhe von 19,31 ct/kWh. Diese spezifischen Regelungen sollen dazu beitragen, die Nutzung von Biomethan effizienter und gezielter einzusetzen.

Literatur/Quellen

Loibl, H.; Maslaton, M.; von Bredow, H. Freiherr; Walter, R. (4. Aufl. 2016): Biogasanlagen im EEG.

Kontakt

Prof. Dr. Martin Maslaton,

Rechtsanwalt, Fachanwalt für Verwaltungsrecht sowie geschäftsführender Gesellschafter der MASLATON Rechtsanwalts-gesellschaft mbH

MASLATON Rechtsanwalts-gesellschaft mbH

☎ +49 (0)341.149500 | ✉ leipzig@maslaton.de | 🌐 www.maslaton.de

Aufbereitung von überschüssigen biogenen Reststoffen in der Anklamer Energie Region zu kompakten Energielieferanten

Zusammenfassung: Das biogeniV-Bündnis wurde im Rahmen des vom BMBF geförderten WIR!-Programms (in der Programmfamilie Innovation & Strukturwandel) 2021 ins Leben gerufen. Der Fokus der Arbeit des biogeniV-Bündnisses liegt im Aufbau regionaler Wertschöpfungsketten für die Herstellung von erneuerbaren Kraft- und Wertstoffen aus biogenen Reststoffen sowie biogenem CO₂. Dabei nutzen wir die regionalen Potentiale der erneuerbaren Energien, gehen neue Wege, entwickeln innovative Technologien und erschließen neue Anwendungsbereiche für erneuerbare Kraft- und Wertstoffe. Regional anfallende Gärreste aus Biogasanlagen könnten dabei ein Baustein für die Erzeugung von erneuerbaren Kraftstoffen sein. Im vorgestellten Teilvorhaben wird betrachtet, wie Gärreste durch Aufbereitung nutzbar gemacht werden können.

1 Einleitung

Die energetische Nutzung von Biomasse ist ein wichtiger Baustein der Energiewende im östlichen Mecklenburg-Vorpommern, das traditionell landwirtschaftlich geprägt ist. Die Landwirtschaft sowie die Lebensmittelverarbeitung sind wichtige Wirtschaftszweige der Region, in denen biogene Rest- und Abfallstoffe anfallen. Ausgeprägt sind ebenfalls der Tourismus und die maritime Wirtschaft, die von den biogeniV-Produkten profitieren können. /1/ Bislang liegen keine belastbaren Daten zu regional anfallenden biogenen Rest- und Abfallstoffen vor. Im Rahmen des vorgelagerten Starterprojekts bV3 Basiskonzept Bioraffinerie (FKZ: 03WIR4903A-C) und im parallel beantragten Projekt bV-D1 Anklamer EnergieRegion soll in der Bündnis-Region eruiert werden, welche regional anfallenden, biogenen Stoffströme in welchen Mengen für eine energetische Verwertung zur Verfügung stehen könnten. Aufgrund der hohen Anzahl landwirtschaftlicher Biogasanlagen (etwa 250 in ganz Mecklenburg-Vorpommern, davon 59 in der Region Vorpommern Rügen/Greifswald /2/), liegen zunächst Gärreste im Fokus der Betrachtungen.

Viele Biogasanlagenbetreiber stehen vor dem Problem, dass die Gärreste aufwendig transportiert und teilweise zu hohen Kosten gelagert werden müssen. Aufgrund des hohen Wassergehalts (zumeist > 90 Ma.-%) sind größere Lagerbehälter erforderlich. Zusätzlich ist die Ausbringung als organischer Dünger auf bestimmte Zeitfenster eingeschränkt. Beide Faktoren führen dazu, dass bei einer begrenzten Verfügbarkeit der Wettbewerb um Lagerkapazitäten angefacht wird und somit die Lagerkosten steigen. Zudem steckt in Gärresten ein großes Reststoffpotential an biogenem Kohlenstoff, der weiterführend genutzt werden kann. Allerdings erschwert ein Trockensubstanzgehalt (TS) von nur

5-10 Ma.-% eine wirtschaftliche Verwertung. Mit einer hochwertigen Aufbereitung der Gärreste mit akzeptablem Kostenumfang wird der Weg geebnet, dass der biogene Kohlenstoff für eine weitere Wertschöpfung zur Verfügung steht.

Die in der biogenIV-Region ansässige Cosun Beet Company (CBC) verarbeitet gegenwärtig am Standort in Anklam pro Jahr ca. 2 Mio. t Zuckerrüben. Dabei fallen 115.000 t Reststoffe aus der Zuckerrübenverarbeitung an, die in der bestehenden Biogasanlage zu Biogas verwertet werden. Gleichzeitig entstehen aktuell 90.000 t Gärrest mit ca. 5 % TS. Im Sinne des Ausbaus zu einer der innovativsten und ökologischsten Zuckerrüben-Raffinerien der Welt, sollen diese Kapazitäten in naher Zukunft verdoppelt werden, da die direkte Eigennutzung von Biogas ein wichtiger Baustein auf dem Weg zur Treibhausgasneutralität darstellt.

Ziel ist es, durch Kopplung der Stoff- und Energieströme bei der CBC im Zusammenspiel der verschiedenen Aufbereitungsverfahren Effizienzsteigerungen zu erzielen. Dabei geht es hauptsächlich um die Kopplung von mechanischen und thermischen Trocknungs- und Kompaktierungstechnologien sowie Prozessanpassungen an weitere regional anfallende Reststoffe. Hierfür werden Verfahren mit hoher Energieeffizienz, Skalierbarkeit und Flexibilität ausgewählt und getestet, wodurch sich für die CBC und auch der gesamten Biogaserzeugungsbranche eine effektive Verwertungsmöglichkeit überschüssiger Gärreste darstellen soll.

2 Gärreste und deren Eigenschaften

Im Rahmen des Vorhabens wurden zunächst drei regional ansässige Biogasanlagen (BGA) beprobt. Die Gärrestproben wurden nach ISO-Normen analysiert und den chemischen und brennstofftechnischen Grenzwerten der ISO 17225-7 /3/ gegenübergestellt. Die Ergebnisse sind in Tab. 1 zusammengefasst. Dabei bezieht sich die Charge 1 jeweils auf eine unseparierte Probe, direkt aus dem Nachgärer und die Charge 2 auf die separierte und thermisch getrocknete feste Gärrestphase. Die feste Phase bei „CBC 2“ wurde mittels Dekanter und bei „mele 2“ mittels Pressschnecke abgetrennt. Beides sind am jeweiligen Standort vorhandene Technologien. Erwähnenswert ist zudem, dass die Eingangssubstrate für die Biogasanlagen „mele“ und „Anklam“ Maissilage und Rindergülle sind, wohingegen die „CBC“ BGA ausschließlich mit ausgelagten Zuckerrübenschnitzeln betrieben wird.

Tab. 1: Brennstofftechnische Eigenschaften der Gärrestchargen
im Vergleich zur ISO 17225-7 /3/

Eigenschaften	Einheit	ISO 17225-7		BGA	BGA	BGA	BGA	BGA
		A1	B	CBC 1	CBC 2	mele 1	mele 2	Anklam 1
Wassergehalt, M	m-%	≤ 12	> 15	93,8	8,6	92,6	7,9	91,5
Aschegehalt, A	m-% wf	≤ 3	≤ 10	28,3	47,2	24,5	9,6	27,4
Flüchtige Substanzen	m-% wf			62,6	48,6	57,4	68,7	56,6
unterer Heizwert, Q _u	MJ/kg wf			15,7	10,7	16,7	18,0	15,9
unterer Heizwert, Q _u	MJ/kg OS		≥ 14,5	15,2	9,7	16,2	16,5	15,1
Kohlenstoff, C	m-% wf			39,5	27,8	43	47,7	41,4
Wasserstoff, H	m-% wf			5,02	3,44	5,08	5,57	4,79
Stickstoff, N	m-% wf	≤ 1,5	≤ 2,0	5,09	3,48	3,67	2,07	3,7
Gesamtgehalt Schwefel, S	m-% wf	≤ 0,2	≤ 0,3	0,82	0,75	0,58	0,35	0,63
Gesamtgehalt Chlor, Cl	m-% wf	≤ 0,1	≤ 0,3	0,1	0,05	1,97	0,52	1,71
Aluminium, Al	mg/kg wf			3970	9870	1040	478	3190
Arsen, As	mg/kg wf	≤ 1	≤ 1,5	0,96	1,98	0,72	0,62	0,92
Blei, Pb	mg/kg wf	≤ 10		n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
Cadmium, Cd	mg/kg wf	≤ 0,5		2,21	1,53	0,24	0,17	0,32
Calcium, Ca	mg/kg wf			31700	45800	19800	8790	24400
Chrom, Cr	mg/kg wf	≤ 50		14,6	27,3	4,4	0,2	11,1
Cobalt, Co	mg/kg wf			19,3	5,4	3,8	1,0	1,7
Eisen, Fe	mg/kg wf			12500	2030	5130	3630	7600
Kalium, K	mg/kg wf			41300	12100	33400	21600	41800
Kupfer, Cu	mg/kg wf	≤ 20		36,7	36,4	24,0	24,5	24,7
Magnesium, Mg	mg/kg wf			12300	7480	6050	5260	6650
Mangan, Mn	mg/kg wf			498	576	286	208	313
Natrium, Na	mg/kg wf			5010	2910	1890	1860	4470
Nickel, Ni	mg/kg wf	≤ 10		33,0	23,8	6,6	3,8	6,2
Phosphor, P	mg/kg wf			4960	4630	8520	9050	8170
Quecksilber, Hg	mg/kg wf	≤ 0,1		0,01	0,03	0,03	0,02	0,04
Schwefel, S	mg/kg wf			11200	9690	7020	3970	7490
Silicium, Si	mg/kg wf			32600	87000	17800	7480	35500
Titan, Ti	mg/kg wf			270	610	55	29	184
Zink, Zn	mg/kg wf	≤ 100		125	317	147	143	112

n.n. nicht nachweisbar, wf wasserfrei, OS Originalsubstanz

Die Analysewerte zeigen deutlich, dass nahezu alle geforderten Grenzwerte überschritten werden. Hohe mineralische Anteile (vor allem Kalium, Calcium und Silicium) und die enthaltenen Stickstoff-, Schwefel- und Chlorverbindungen weisen auf ein hohes Verschlackungs- und Emissionspotential in Verbindung mit einem erhöhten Risiko für Kesselkorrosionen hin. Weiterhin lassen hohe Aschegehalte abrasive Verschleißerscheinung bei der Weiterverarbeitung bis hin zur Kompaktierung vermuten. Durch Abtrennung der Flüssigphase kann sowohl der Mineralienanteil und somit der Aschegehalt als auch der Stickstoff-, Schwefel- und Chlorgehalt reduziert werden, was sich im Falle der mele BGA deutlich zeigt. Die Proben der CBC stammen von unterschiedlichen Biogasanlagen im Unternehmen und der Ursache der trotz Separation hohen Werte an kritischen Inhaltsstoffen wird gegenwärtig nachgegangen.

Dem Ganzen gegenüber zeichnen sich Gärreste zumeist durch einen vergleichsweise hohen Anteil an Lignin und durch einen hohen Heizwert (zumeist > 15 MJ/kg OS) aus, wodurch in Regionen mit Entsorgungsproblemen der Einsatz als Brennstoff interessant sein kann. Um dies zu untersuchen, wurde neben dem Heizwert über eine sog. Futtermittelanalyse der Ligninanteil nach van Soest /4/ bestimmt. Zur Einordnung werden in Tab. 2 weiterhin Literaturwerte /5/ für Gärreste, Landschaftspflegeheu und Kiefernholz aufgelistet.

Tab. 2: Ligninanteil der verschiedenen Gärreste im Vergleich zu Landschaftspflegeheu und Kiefernholz

Reststoff	Lignin in g/kg TS
Gärrest BGA CBC 1	233,6
Gärrest BGA CBC 2	233,7
Gärrest BGA mele 1	351,6
Gärrest BGA mele 2	n.a.
Gärrest BGA Anklam 1	317,5
Gärreste ^a	272-325
Landschaftspflegeheu ^a	61-66
Holz/Kiefer ^a	292

n.a. nicht analysiert, TS Trockensubstanz; ^a /5/

Die Ligningehalte der Gärrestproben sind mit 233,6-351,6 g/kg TS mit den Anteilen in Kiefernholz oder anderen Gärresten vergleichbar, wobei die Gärreste der CBC mit den ausgelagten Rübenschnitzeln als Inputsubstrat im Vergleich die geringsten Ligningehalte aufweisen.

3 Aufbereitungsprozesse für Gärreste

Der Verarbeitungsprozess von Gärresten zu kompakten Pellets oder Briketts ist in Abb. 1 dargestellt.

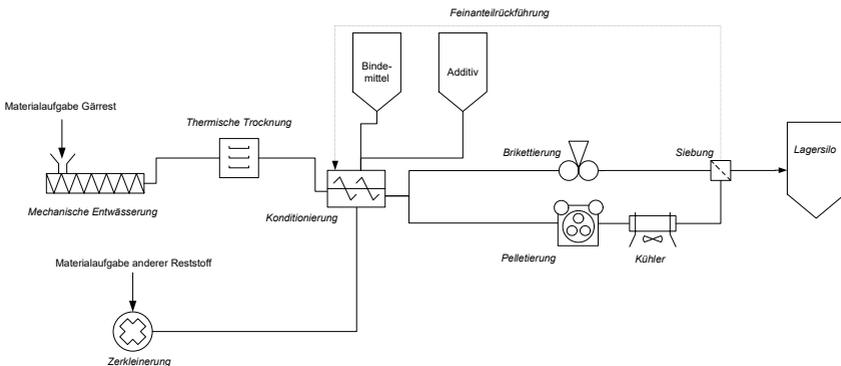


Abb. 1: Prozessabläufe zur Herstellung von Gärrest-Kompaktaten in Form von Pellets oder Briketts

Im Rahmen der biogeniV-Bündnisprojekte (laufende und beantragte) wird jeder Teilprozessschritt zur Verarbeitung der Gärreste ggf. in Zumischung mit anderen regional anfallenden Reststoffen detailliert betrachtet. Im laufenden Starterprojekt bV3 Basiskonzept Bioraffinerie wurden neben Rechercharbeiten zu Infrage kommenden Technologien erste, einfache Brikettierversuche zur Orientierung durchgeführt. Dazu steht am DBFZ eine von aremtech GmbH (ehemals ATNA Industrial Solutions GmbH) entwickelte Forschungsbrikettieranlage als ein Kompaktierungsverfahren zur Verfügung (Abb. 2). Mit einer Anschlussleistung von 30 kW besitzt die Brikettpresse einen materialabhängigen Durchsatz von 50-80 kg/h, wobei das Verdichtungsprinzip der Brikettierung in Abb. 3 zu sehen ist. Im ersten Schritt (1) wird das Material vorverdichtet (geringer Druck bis 40 MPa). Danach erfolgt im zweiten Schritt (2) die Hauptpressung (bis 200 MPa) mit einer definierten Haltezeit von wenigen Sekunden. Im dritten Schritt (3) wird das Brikett ausgestoßen. Die Pressdrücke können maschinenseitig eingestellt werden.



Abb. 2: Brikettieranlage GreenLine S50 am DBFZ © Wolfgang Grote/aremtech GmbH (ehem. ATNA Industrial Solutions GmbH)

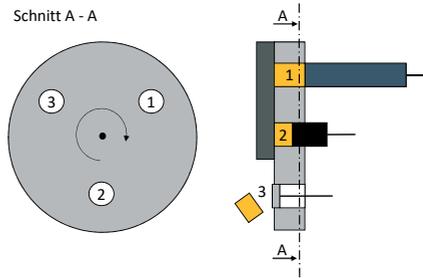


Abb. 3: Verdichtungsprinzip der Brikettieranlage

Aufgrund der mengenmäßigen Verfügbarkeit wurden die ersten Verdichtungsversuche bislang nur mit den getrockneten Gärresten der CBC (Charge BGA CBC 2, Wassergelt von etwa 10 Ma.-%) durchgeführt. Eine Zerkleinerung der Gärreste war nicht notwendig. Tab. 3 zeigt die für die Versuchsdurchführung variierten Prozessparameter wie Vorpress- und Hauptpressdruck sowie Pressdauer und eingesetzte Masse an Gärresten. Je Variation wurden drei Briketts mit einem Durchmesser von 50 mm über den Handbetrieb hergestellt. Zur ersten Bewertung der Briketts erfolgte die Bestimmung der Rohdichte mittels Stereometrie. Auch diese Ergebnisse sind in Tab. 3 dargestellt.

Tab. 3: Variation der Prozessparameter der ersten Brikettversuche; je Charge 3 Briketts (dargestellt Mittelwert)

Charge	Prozessparameter				Briketteigenschaft Rohdichte g/cm ³
	Vorpressdruck MPa	Hauptpressdruck MPa	Pressdauer s	Masse g	
1	40	100	2	65	1,4
2	40	150	2	65	1,5
3	40	200	2	65	1,5
4	40	200	2	85	1,5
5	40	- ^b	- ^b	65	1,0

^b Bei Charge 5 fand nur die Verdichtung über den Vorpressdruck statt – kein Hauptpressdruck mit Pressdauer

In Abb. 4 sind exemplarisch die erste und fünfte Brikettcharge dargestellt.



Abb. 4: Briketts aus 100 Ma.-% Gärrest (Charge BGA CBC 2), links Brikettcharge 1, rechts Brikettcharge 5

Zwischen den ersten vier Brikettchargen gibt es optisch, wie auch im Rohdichtewert keine wesentlichen Unterschiede. Mit einer Rohdichte von 1,4-1,5 g/cm³ liegen diese Werte wesentlich höher als bei Stroh- (0,8 g/cm³) oder Holzbriketts (1 g/cm³), produziert unter vergleichbaren Bedingungen /6/. Zudem werden damit die Vorgaben der ISO 17225-7 Klasse A1 (Mindestanforderung von 0,9 g/cm³) /3/ deutlich übertroffen. Bei Charge 5 (Abb. 4, rechts) wurde lediglich ein Vorpressdruck von 40 MPa zur Verdichtung beaufschlagt und selbst hier wird eine Rohdichte von fast 1 g/cm³ erreicht.

4 Wirtschaftliche Machbarkeit der Gärrestaufbereitung

Aktuell werden die Gärreste der CBC ohne weitere Vorbehandlung auf landwirtschaftlichen Flächen ausgebracht und müssen über die Wintermonate gelagert werden. Mit dem Ausbau der Biogaserzeugung bei der CBC wird sich der Ausbringungsradius noch vergrößern, wofür höhere Transportkosten anfallen. Dies allein macht aber noch keine mehrstufige und energieintensive Gärrestaufbereitung wirtschaftlich. Erst die Nutzung des Potentials an grünem Kohlenstoff,

der noch im Gärrest enthalten ist, gibt dem Gärrest einen höheren Wert. Dieser Wert kann durch die Abtrennung der Nährstoffe wie Stickstoff, Kalium und Phosphor noch erhöht werden. Erst das Upgrade des Gärrests in neue Produkte kann die Aufbereitung wirtschaftlich rechtfertigen. Der grüne Kohlenstoff im Gärrest kann dabei beispielsweise für die Gasifizierung und anschließende Erzeugung von grünem Methanol aus dem Synthesegas genutzt werden. Dies wird auch Bestandteil eines zukünftigen biogeniV-Vorhabens sein.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Ein wichtiger Baustein im biogeniV-Bündnis sowie in der Anklamer Energie-Region ist die energetische Verwertung anfallender biogener Rest- und Abfallstoffe, die aktuell keiner oder in begrenzten Mengen einer Nutzung zugeführt werden. In einem ersten Vorhaben bV3 Basiskonzept Bioraffinerie werden zunächst die in Anklam und der Umgebung anfallenden Gärreste aus Biogasanlagen, u.a. von den Projektpartnern Cosun Beet Company GmbH & Co. KG und der mele Energietechnik GmbH, als potentielle Rohstoffquelle fokussiert. Die chemischen Inhaltsstoffe halten nach jetzigem Stand zwar nicht die Vorgaben der ISO 17225-7 ein, dennoch liegt aufgrund des hohen Ligningehaltes und des hohen Heizwertes in der energetischen Nutzung der festen Gärreste ein gewisses Potential. Durch geeignete Separationstechniken können verbrennungskritische Inhaltsstoffe wie Stickstoff-, Schwefel- und Chlorgehalt, aber auch Phosphor abgetrennt und in der Flüssigphase eingebunden werden. Damit könnten diese Elemente in Form von Flüssigdünger weiter den Landwirten zur Verfügung stehen. Des Weiteren zeigen erste Verdichtungsversuche in Form der Brikettierung vielversprechende Ergebnisse, um physikalisch stabile und transportfähige Kompaktate erzeugen zu können.

Voraussichtlich ab Mitte 2024 startet ein weiteres Bündnis-Projekt, in welchem weitere biogene Reststoffe einbezogen, der Versuchs- und Analyseumfang erweitert sowie innovative Verfahren zur Aufbereitung der Gärreste getestet werden. Diese Vorarbeiten können den Weg für die Etablierung einer Reststoffgemeinschaft in der Anklamer Region ebnen, bei der gemeinsame Anstrengungen unternommen werden, um erneuerbare Kraft- und Wertstoffe z.B. über den Weg der Gasifizierung zu gewinnen.

Literatur/Quellen

- /1/ Vorstudie biogeniV: „Sozioökonomische und wirtschaftliche Technikbewertung ausgewählter Verwertungslinien“, ELViS-ID: E38814283, Stand: 12.04.2021.
- /2/ <https://www.umweltkarten.mv-regierung.de/atlas>, Version 11.07.2021.
- /3/ ISO 17225-7 (2021): Solid biofuels – Fuel specifications and classes – Part 7: Graded non-woody briquettes. 2021-07.
- /4/ Liebetrau, J., Pfeiffer, D., Thrän, D. (Hrsg.): Messmethodensammlung Biogas – Methoden zur Bestimmung von analytischen und prozessbeschreibenden Parametern im Biogasbereich. Bd. 7. Schriftenreihe des BMU-Förder-programms “Energetische Biomassenutzung”, 2015. ISSN 2192–1806.
- /5/ Kirsten, C. (2021). Beitrag zur Optimierung des Pelletierverhaltens von Gärresten und Landschaftspflegeheu sowie deren Mischungen: Dissertations-schrift. (DBFZ-Report, 43). Leipzig: DBFZ. 177 S. ISBN: 978-3-946629-76-4. DOI: 10.48480/pe97-5984.
- /6/ KoSaTZ – Behandlung und kombinierter Einsatz von Stroh- und Getreideausputzmischungen für eine Biogas-Technologieketten mit Zukunft, Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz, 01.01.2020–31.03.2022 (FKZ:03EI5403D)

Kontakt

Dr.-Ing. Claudia Kirsten, AGL Mechanische Veredelungsprozesse im Bereich Thermo-chemische Konversion

DBFZ Deutsches Biomasseforschungszentrum gemeinnützige GmbH
Torgauer Straße 116
04347 Leipzig

☎ +49 (0)341.2434-534 | ✉ claudia.kirsten@dbfz.de | 🌐 www.dbfz.de

Orange is the New Green

Wasserstoff als AddOn für Biogasanlagen

Zusammenfassung: Wasserstoff aus regenerativen Quellen ist für verschiedene Sektoren der bisher einzig bekannte Weg zur klimatechnisch notwendigen, vollständigen Dekarbonisierung. Dennoch werden lediglich 5 % des weltweit produzierten Wasserstoffes durch Elektrolyse bereitgestellt. Eine weitere nachhaltige Wasserstoffbereitstellungstechnologie ist die sogenannte Dunkelfermentation. Dabei können erneuerbare Rohstoffe, Siedlungsabfälle, Gülle oder Abwasser als Substrat verwendet werden, um ein wasserstoffreiches Gas bereitzustellen. Durch Integration der Dunkelfermentation in bestehende Biogasanlagen kann die bereits vorhandene Infrastruktur für die zusätzliche Wasserstoffbereitstellung genutzt werden. Die Biogasausbeute wird durch diese Integration nicht negativ beeinflusst. Allerdings ist die Umrüstung der bestehenden Biogasanlagen nicht in jedem Fall praktikabel oder wirtschaftlich für den Betreiber. Im Rahmen dieses Beitrages wurde eine Standortanalyse durchgeführt, um die am besten geeigneten Biogasanlagen für die Integration der Dunkelfermentation zu identifizieren und das Potenzial der Wasserstoffproduktion durch Dunkelfermentation in Deutschland zu bewerten. Die Standortanalyse basiert auf dem Marktstammdatenregister, der Biogas Datenbank und der Biogaspartner Datenbank.

Abstract: There are many developments in sustainable hydrogen production like the increasing usage of electrolysis which accounts for 5% of the produced hydrogen worldwide, and the current research in biological production methods. One of these methods is the usage of microorganisms to produce hydrogen through the biological pathways of dark fermentation. It can use renewable raw materials, municipal waste, liquid manure, or sewage water as biomass to produce a hydrogen-rich gas. Hydrogen generation with dark fermentation is a promising method because the process can be integrated into existing biogas plants to use the existing infrastructure to produce biogas and hydrogen as an additional product. However, modifying the existing biogas plants is not feasible or economical for the operator in every case. The planned contribution to EUBCE 2024 frames a site analysis conducted to find the most suitable biogas plants for the integration of dark fermentation and to assess the potential of hydrogen production via dark fermentation in Germany. The site analysis was based on Marktstammdatenregister, Biogas Datenbank, and the Biogaspartner database.

1 Zielsetzung, wissenschaftliche Innovation und Relevanz

1.1 Die Farben des Wasserstoffes

Wasserstofftechnologien können in Verbindung mit Sektorkopplung Sektoren dekarbonisieren, die nicht elektrifiziert werden können (z. B. die chemische Industrie, die Stahlindustrie usw.). [1] Dabei kann Wasserstoff durch verschiedene Verfahren bereitgestellt werden. Die Höhe der Treibhausgasemissionen variiert je nach für die Herstellung verwendetem Verfahren. Die Wasserstoff-Farbtheorie ermöglicht Rückschlüsse auf die Emissionen, die bei der Herstellung von Wasserstoff entstehen. Neben grünem Wasserstoff, der durch Elektrolyse aus erneuerbaren Energien hergestellt wird, unterscheidet die Wasserstoff-Farbtheorie zwischen weißem, schwarzem, braunem, grauem, blauem, türkisem und orangem Wasserstoff. Natürlich vorkommender molekularer Wasserstoff wird als weiß bezeichnet. Da er hauptsächlich in Gesteinen außerhalb der Sedimentbecken vorkommt, in denen die Ölgesellschaften normalerweise tätig sind, gibt es derzeit keine Strategien zur Nutzung dieses Wasserstoffs. Bei der Vergasung von Steinkohle entsteht schwarzer Wasserstoff, während bei der Vergasung von Braunkohle brauner Wasserstoff erzeugt wird. Grauer Wasserstoff wird z. B. aus Erdgas durch Dampfreformierung gewonnen. Bei blauem Wasserstoff wird das als Nebenprodukt anfallende Kohlendioxid nach der Produktion abgetrennt und gespeichert. Daher kann blauer Wasserstoff aus Kohle und Erdgas gewonnen werden. Türkisfarbener Wasserstoff wird durch Pyrolyse von Methan gewonnen. Als Nebenprodukt entsteht Kohle, sodass kein Kohlenstoffdioxid in die Atmosphäre entweicht. Biogener Wasserstoff, der durch die Reformierung von Biogas oder durch Dunkelfermentation gewonnen wird, wird als oranger Wasserstoff bezeichnet. [2] In der petrochemischen Industrie und bei der Chlor-Alkali-Elektrolyse fällt Wasserstoff als Nebenprodukt an. Dieser Wasserstoff kann noch nicht mit Hilfe der Wasserstoff-Farbtheorie klassifiziert werden. [3]

1.2 Biologischer Wasserstoff als Lösung für die Herausforderungen des grünen Wasserstoffmarktes

Trotz der Bemühungen um grünen Wasserstoff ist das Standardverfahren für die Wasserstoffherzeugung immer noch die Reformierung von Kohlenwasserstoffen. Auch heute noch werden nur etwa 5 % des weltweit produzierten Wasserstoffs durch Elektrolyse hergestellt. [4] Der Wasserstoff-Farbenmix in Deutschland für das Jahr 2020 ist in Abb. 1 dargestellt.

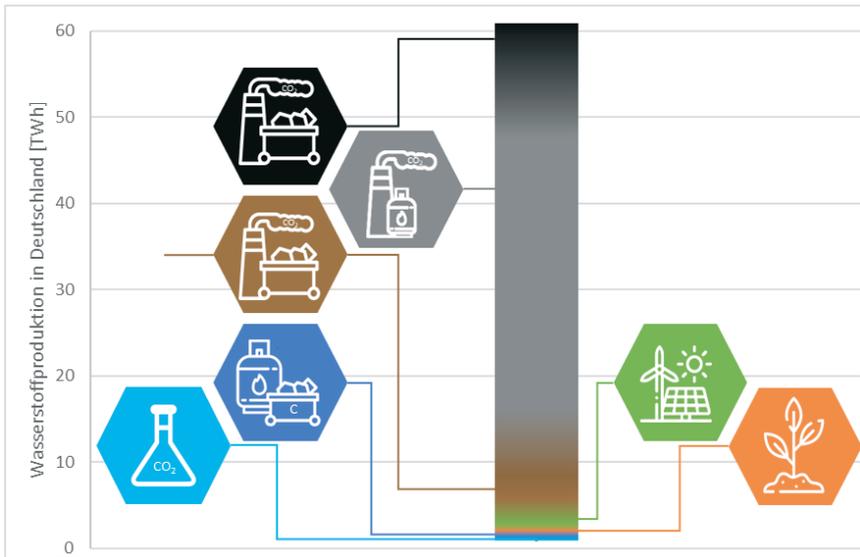


Abb. 1: Wasserstoff-Farbenmix im Jahr 2020
(eigene Darstellung entsprechend der Daten aus [2,3])

Laut DNV-Studien wird grüner Wasserstoff im Jahr 2030 einen Anteil von 0,5 % [1] am Strommix haben. Im Jahr 2050 wird ein Anteil von bis zu 5 % erwartet. Um die Ziele des Pariser Klimaabkommens zu erreichen, muss grüner Wasserstoff jedoch bis 2050 mindestens 15 % [1] des Strommixes ausmachen. Der Ausbau der erneuerbaren Energien und der Elektrolyse-Technologien in dem für die Erreichung der Klimaziele erforderlichen Tempo ist technisch kaum noch möglich. Sowohl erneuerbare Energien als auch elektrolysierbares Wasser sind kritische Ressourcen, die bei falscher Prioritätensetzung zu Versorgungsengpässen führen können. [5] Nach der Wasserstoff-Farbtheorie gilt grüner Wasserstoff derzeit als die einzige nachhaltige Option. [2] Aus der Farbtheorie ergeben sich jedoch mehrere Alternativen für die CO₂-freie und nachhaltige Bereitstellung von Wasserstoff. Während schwarzer, brauner und grauer Wasserstoff aus Umweltgesichtspunkten in Zukunft durch nachhaltige Lösungen ersetzt werden müssen, bietet blauer, türkis und oranger Wasserstoff das Potenzial für eine CO₂-freie Wasserstoffversorgung.

Im Rahmen des HyPerFerment-Projekts wird die Bereitstellung von orangem Wasserstoff durch Dunkelfermentation untersucht. Durch die Integration dieses Verfahrens in bestehende Biogasanlagen kann Wasserstoff bereitgestellt und gleichzeitig der Gesamtwirkungsgrad der Anlage erhöht werden. Das Konzept zur Integration der Dunkelfermentation in bestehende Biogasanlagen ist in Abb. 2 dargestellt. Für die Nutzung des entstehenden Wasserstoffes ergeben sich zwei Verwertungspfade. Zum einen kann das Produktgasgemisch der Dunkelfermentation zusammen mit dem Gärrest in den Biogas Fermenter geleitet wer-

den. So wird die Ausbeute des Rohbiogases erhöht (Abb. 2, Verwertungspfad 1). Zum anderen kann das $\text{CO}_2\text{-H}_2$ -Gemisch aufbereitet und der Wasserstoff direkt beispielsweise im Mobilitäts-, Energie- oder Chemiesektor genutzt werden (Abb. 2, Verwertungspfad 2). Die Gärreste der Dunkelfermentation werden dabei dem Biogas-Fermenter zugeführt, wodurch, entsprechend bisheriger Laborversuche, mindestens genauso viel Rohbiogas bereitgestellt werden kann, wie ohne Integration der Dunkelfermentation.

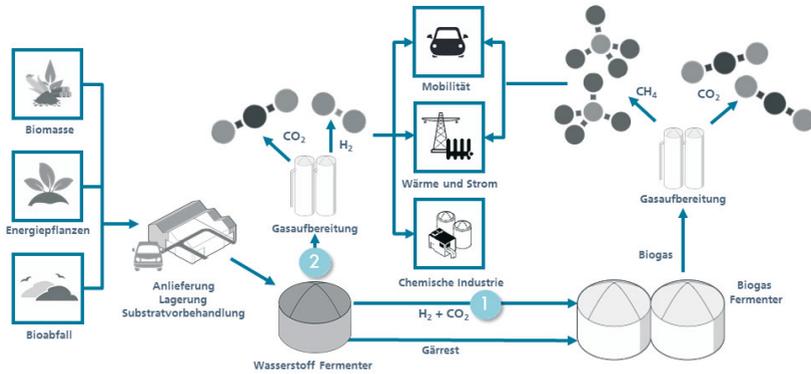


Abb. 2: Prinzipschema des HyPerFerment-Konzeptes zur Integration der Dunkelfermentation in bestehende Biogasanlagen [6]

2 Integrierbarkeit der Dunkelfermentation in bestehende Biogasanlagen in Deutschland

2.1 Kategorisierung von Biogasanlagen in Deutschland

Um das Potenzial der Wasserstoffproduktion durch Integration der Dunkelfermentation in bestehende Biogasanlagen zu spezifizieren und zu quantifizieren, wurde eine Standortanalyse am Beispiel Deutschlands durchgeführt.

Da mehrere Organisationen die Biogasanlagen in Deutschland dokumentieren, haben sich unterschiedliche Angaben über die Gesamtzahl der Biogasanlagen ergeben (vgl. Abb. 3).

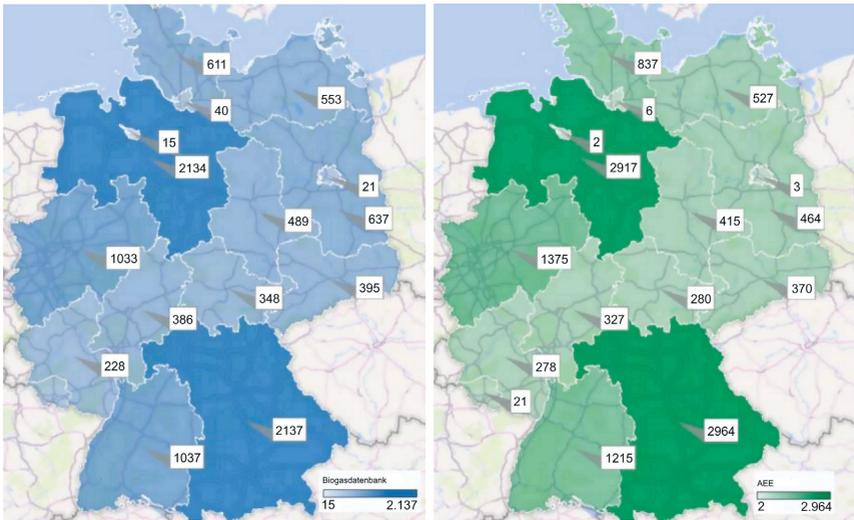


Abb. 3: Anzahl der registrierten Biogasanlagen je Bundesland in Deutschland entsprechend der Biogasdatenbank (links) und der Agentur für erneuerbare Energien (AEE) (rechts) (eigene Darstellung)

Die endgültigen Ergebnisse dieser Untersuchung basieren auf der Biogas Datenbank, die 10.103 Biogasanlagen in Deutschland auflistet. Um jedoch die Genauigkeit der Datenbank zu bewerten, wurde sie mit Daten aus zwei anderen Quellen verglichen: dem Fachverband BIOGAS und der Agentur für Erneuerbare Energien [7].

2.2 Kriterien zur Integration der Dunkelfermentation in bestehende Biogasanlagen

Um herauszufinden, für welche Biogasanlagen in Deutschland eine Integration der Dunkelfermentation wirtschaftlich sinnvoll ist, wurden drei Hauptkriterien definiert:

1. Datum der Inbetriebnahme

Die erste große Welle des Biogasanlagenbaus in Deutschland setzte ein, nachdem das Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG) am 1. April 2000 in Kraft getreten war und die Erzeugung erneuerbarer Energien durch eine 20-jährige Regelung fördern sollte. Das EEG wurde in den letzten zwanzig Jahren mehrmals geändert. Nach zwanzig Jahren der Biogaserzeugung erreicht die erste Welle von Biogasanlagen das Ende der ersten Förderperiode. Mit der Novelle EEG 2017 können die Anlagen, die das Ende ihrer 20 Jahre erreicht haben, eine zweite Förderperiode von 10 Jahren beantragen. Das Datum der Inbetriebnahme wurde gewählt, um die Anlagen herauszufiltern, die in den nächsten fünf Jahren entsprechend des EEGs mit Umbauten und Aktualisierungen beginnen

müssen. Ausgewählt wurden daher Anlagen mit einem Inbetriebnahmedatum zwischen 2004 und 2008.

2. *Eingesetzte Substrate*

Das in den untersuchten Anlagen verwendete Substrat reicht von tierischen Exkrementen wie Schweine- oder Rindergülle bis zu nachwachsenden Rohstoffen wie Mais oder Heu. Einige Anlagen verwenden darüber hinaus Lebensmittelabfälle oder andere organische Abfälle zur Bereitstellung von Biogas.

Bisherige Laborversuche legen nahe, dass der Einsatz von Gülle und organischen Abfällen nicht ohne Vorbehandlung möglich ist. Diese Substrate können nach aktuellem Stand nicht wirtschaftlich mittels Dunkelfermentation zersetzt werden. Biogasanlagen, die vorwiegend diese Substrate nutzen, wurden daher bei dieser Betrachtung ausgeschlossen. Eine Anpassung dieser Betrachtung ist vorgesehen, sobald geeignete Vorbehandlungsmethoden entwickelt wurden. So sind zum jetzigen Zeitpunkt Biogasanlagen, die mit 100 % Energiepflanzen betrieben werden, am besten für die Umsetzung des HyPerFerment-Konzeptes geeignet. Anlagen mit erhöhtem Einsatz von Energiepflanzen von mehr als 80 % sind ebenfalls geeignet, wobei jedoch eine geringere Wasserstoffausbeute zu erwarten ist.

3. *Anlagenkapazität*

Ein wichtiger Faktor bei der Suche nach für die Integration der Dunkelfermentation geeigneten Biogasanlagen ist die Analyse unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten. Dies kann vereinfachend über die elektrische Leistung der Anlagen erfolgen, die einen Hinweis auf die Größe der Biogasanlage gibt. Um die ideale Biogasanlagen-Kapazität für die Umsetzung der Dunkelfermentation zu ermitteln, wurden folgende Fragen analysiert und überschlägig berechnet, um das am besten geeignete Kriterium in Abhängigkeit von der Anlagengröße zu ermitteln:

- Wie viel Volumen muss der neue Fermenter haben, um die hydraulische Verweilzeit gemäß den EEG-Anforderungen zu erhöhen?
- Wie hoch sind die maximalen Kosten für die Einführung der Dunkelfermentation in jeder Modellanlage?
- Wie groß muss die Anlage sein, damit der zu erwartende Wasserstoffvolumenstrom für eine Wasserstoff-Aufbereitung geeignet ist?
- Unter der Annahme, dass die Effizienz des Gesamtsystems um mindestens 10 % steigt und unter Berücksichtigung der spezifischen Anschaffungskosten für die Integration der Dunkelfermentation: Für welche Anlagen würde sich nach fünf Jahren ein Gewinn ergeben?

Anhand dieser Fragestellungen hat sich eine Mindestkapazität von 500 kW ergeben. Aufgrund von Formatvorgaben wurde in diesem Tagungsbandbeitrag auf eine detaillierte Beschreibung des Klassifizierungsverfahrens verzichtet.

3 Ergebnisse und Fazit

3.1 Wasserstoffpotential für Biogasanlagen in Deutschland

Die Analyse hat ergeben, dass die Umsetzung der Dunkelfermentation in mehr als tausend Biogasanlagen in Deutschland wirtschaftlich sinnvoll ist. Es gibt potenziell 1.468 Biogasanlagen und 50 Biomethananlagen, bei denen die Umsetzung in der nächsten halben Dekade machbar wäre. Auf Basis dieser Anlagen wurde eine jährliche zu erwartende Wasserstoffproduktion von 44.429 t in Biogasanlagen und 4.487 t aus Biomethananlagen ermittelt. Somit ergibt sich durch bestehende Biogasanlagen und die Möglichkeit der Integration der Dunkelfermentation für Deutschland Wasserstoffpotential von etwa 50.000 t/a, was 1,63 TWh H_2 pro Jahr entspricht. Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die Dunkelfermentation potenziell 3 % des derzeitigen Wasserstoffbedarfs in Deutschland bzw. etwa 1,5 % des künftigen Bedarfs in Deutschland decken kann, der bis 2030 voraussichtlich 90 bis 110 TWh [1] betragen wird.

3.2 Spezifische Produktionskosten und regulatorische Limitierungen

Die Dunkelfermentation bietet eine gute Möglichkeit für Biogasanlagenbetreiber, entweder ein zusätzliches Produkt bereitzustellen oder die Gesamteffizienz des Prozesses zu erhöhen. Wirtschaftlichkeitsberechnungen am Beispiel der Biogasanlage Gröbern haben ergeben, dass die Kosten für die Wasserstoffbereitstellung mittels Dunkelfermentation mit 1,63 €/kg niedriger sind als die Produktionskosten über die Elektrolyse, sodass die Dunkelfermentation eine sinnvolle Wahl für Biogasanlagenbetreiber ist, die die Anlagen auch zur Wasserstoffbereitstellung nutzen wollen. Die genaue Wirtschaftlichkeit der Umsetzung sollte für jede Biogasanlage individuell untersucht werden, da in dieser Standortanalyse einige Verallgemeinerungen beim Substrateinsatz verwendet wurden und der tatsächliche Substrateinsatz von Biogasanlage zu Biogasanlage unterschiedlich sein kann. Die für jede Biogasanlage aus der Biogasdatenbank übernommenen Daten könnten sich auch von den Echtzeitinformationen der Anlagen unterscheiden, falls die Biogasanlage Änderungen vorgenommen hat, von denen der Datenbankadministrator keine Kenntnis hat. Hinsichtlich der Verordnung könnte die BImSchV kleinere Biogasanlagen belasten, was die Umsetzung behindern würde.

Eine Änderung der Gesetze zur Einbeziehung der biologischen Wasserstoffherzeugung aus Biomasse, wie z.B. der Dunkelfermentation, ist erforderlich. Die Dunkelfermentation weist allein in Deutschland ein großes Potenzial auf und kann Wasserstoff aus Biomasse nachhaltig bereitstellen. Allerdings müssen regulatorische Hürden abgebaut werden und eine großtechnische Umsetzung ist notwendig, um genaue Daten über die Technologie und ihre spezifischen Umsetzungskosten zu erhalten.

3.3 Ausblick

Im Projekt HyPerFerment II wird derzeit der erste 10 m³ Fermenter für die Dunkelfermentation in einer Biogasanlage in Hottendorf, Deutschland integriert. Die Bauarbeiten sind voraussichtlich im Mai 2024 abgeschlossen. Es ist eine Aktualisierung der Standortanalyse auf der Grundlage der tatsächlichen Kosten (Bau- und Betriebskosten) und der Wasserstoffproduktion durch den Betrieb der Demonstrationsanlage unter Berücksichtigung der aktuellen Vorschriften geplant.

Literatur/Quellen

- [1] DNV, „Hydrogen Forecast to 2050“, 2022
- [2] P. Horng und M. Kalis: „Wasserstoff – Farbenlehre, Rechtswissenschaftliche und rechtspolitische Kurzstudie“, Institut für Klimaschutz, Energie und Mobilität e.V., Berlin, Greifswald, Stuttgart (2020)
- [3] BMWK: „Herstellung von Wasserstoff nach Produktionsprozess in Deutschland im Jahr 2020 (in TWh)“, Statista (2020)
- [4] F. Merten, A. Scholz, C. Krüger, S. Heck, Y. Girard, M. Mecke und M. George: „Bewertung der Vor- und Nachteile von Wasserstoffimporten im Vergleich zur heimischen Erzeugung“, Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie, Wuppertal, 2021
- [5] T. Birth, S. Jentsch, S. Hayen, and M. Scheffler. Wasser als kritische Ressource für die Wasserstofferzeugung. *gwf Wasser | Abwasser* 162, 09 (2022), pag. 73-88.
- [6] N. Eggers, F. Giebner, T. Birth-Reichert. HyPerFerment – Increasing the Efficiency of Biogas Plants. *Research2Industry Days*, São Paulo, 2022
- [7] Agentur für Erneubare Energien. Number of Biogas Plants in Germany, 28/02/2021

Kontakt

M.Eng Natascha Eggers, Research Scientist

Fraunhofer-Institut für Fabrikbetrieb und -automatisierung IFF
Joseph-von-Fraunhofer-Str. 1, 39106 Magdeburg.

☎ +49 (0)391.4090-381 | ✉ natascha.eggers@iff.fraunhofer.de

🌐 www.iff.fraunhofer.de

Eric Franke, Sergei Shalnev, Ronny Schimpke, Steffen Krzack, Martin Gräbner

Thermochemische Phosphorrückgewinnung aus Klärschlämmen

Zusammenfassung: *Phosphor ist ein notwendiges Element für alle lebenden Organismen, einschließlich Pflanzen, Tiere und Mikroorganismen. Aufgrund der ungleichen weltweiten Verteilung sind viele Länder stark von Importen abhängig und die Marktmonopolisierung verschärft sich zunehmend, weswegen, Phosphor seitens der EU als kritischer Rohstoff eingestuft wurde. Um die Importabhängigkeit von wenigen phosphorexportierenden Ländern zu verringern, wird Klärschlamm als alternative Phosphorquelle betrachtet. Neben dem hohen Phosphorgehalt ist KS auch aufgrund des hohen Kohlenstoffgehalts als Alternativbrennstoff insbesondere für Braunkohle attraktiv, weswegen ein Großteil des anfallenden KS aktuell mono- oder mit anderen Energieträgern co-verbrannt wird, wobei der Kohlenstoff lediglich thermisch verwertet wird. Durch eine thermochemische Behandlung des Klärschlammes, wie sie beispielsweise mittels Gasifizierung erfolgen kann, ist eine gemeinsame Kohlenstoff- und Phosphornutzung möglich, wobei beide Kreisläufe gemeinsam geschlossen werden können und der jährliche P-Import Deutschlands um ca. 40 % gesenkt werden könnte. Das PhosCOOR-Projekt sowie weitere Vorhaben zielen darauf ab, die thermochemische Phosphorrückgewinnung zu optimieren, wobei Herausforderungen wie die unterschiedliche Zusammensetzung des Klärschlammes berücksichtigt werden müssen.*

Abstract: *Phosphorus is a necessary element for all living organisms, including plants, animals and microorganisms. Due to the uneven global distribution, many countries are heavily dependent on imports and market monopolization is increasing, which is why phosphorus has been classified as a critical raw material by the EU. In order to reduce the import dependency of a few phosphorus-exporting countries, sewage sludge is being considered as an alternative source of phosphorus. In addition to the high phosphorus content, sewage sludge is also attractive as an alternative fuel, e.g. for partial substitution of lignite, due to its high carbon content, which is why a large proportion of the resulting KS is currently mono- or co-incinerated with other energy sources, whereby the carbon is only thermally utilized. Thermochemical treatment of the sewage sludge, such as gasification, makes it possible to recycle both carbon and phosphorus simultaneously, whereby Germany's annual Phosphorus import could be reduced by around 40%. The project PhosCOOR and other research plans aim to optimize thermochemical phosphorus recovery, taking into account challenges such as the different composition of sewage sludge.*

1 Einleitung

In Deutschland werden jährlich mehr als 300 000 Tonnen Phosphor verarbeitet [1], vorwiegend für die Düngemittelherstellung, in der Nahrungsmittelindustrie und in der chemischen Industrie zur Herstellung von beispielsweise Reinigungs-, Korrosionsschutz- oder Flammenschutzmitteln. Deutschland ist dabei vollständig auf Phosphorimporte angewiesen. Phosphor kommt dabei als Rohphosphat vor, wobei es sich vorwiegend um Apatite (Calciumphosphate) magmatischen oder sedimentären Ursprungs handelt. Diese Vorkommen sind global jedoch sehr ungleichmäßig verteilt [2], weswegen Phosphor von der Europäischen Union als kritischer Rohstoff benannt wurde [3]. Eine mögliche alternative Quelle für die Phosphorversorgung Deutschlands stellt Klärschlamm dar. Jährlich fallen in Deutschland ca. 1,7 Mio. Tonnen in Kläranlagen an, wobei ein Großteil davon aktuell thermisch verwertet wird [4]. Nachteilhaft bei einer thermischen Verwertung von Kohlenstoff durch co- oder Monoverbrennung ist, dass der im Klärschlamm enthaltene Kohlenstoff hierbei vollständig als CO_2 emittiert wird, wobei eine stoffliche Nutzung der energetischen Verwertung vorzuziehen ist. Beispielsweise mittels Gasifizierung, also unterstöchiometrischer Zugabe von Sauerstoff, werden die enthaltenen Kohlenwasserstoffe im Klärschlamm lediglich partiell zu CO und H_2 , sogenanntem Synthesegas, umgesetzt. Dieses Synthesegas kann anschließend für weitere Prozesse genutzt werden und in wichtige Basischemikalien wie beispielsweise Methanol oder Olefine als Ausgangsstoff für Kunststoffe umgewandelt werden. Somit ist es möglich den im Klärschlamm enthaltenen Kohlenstoff zu recyceln und damit den Kohlenstoffkreislauf zu schließen.

Bei einem durchschnittlichen Phosphorgehalt von ca. 3 Ma.-% stellt Klärschlamm auch einen interessanten Ausgangsstoff für eine gleichzeitige Phosphorkreislaufwirtschaft dar. Bei einer Nutzung des Phosphors im Klärschlamm lassen sich damit die Phosphorimporte Deutschlands um mehr als 40 % reduzieren, was zu einer Entspannung der Importabhängigkeit führt. Durch eine geschickte Prozessführung und die Wahl geeigneter Prozessparameter ist es möglich, Phosphor bei einer Klärschlammgasifizierung ebenfalls in die Gasphase zu überführen. Damit erfolgt eine Abtrennung des Phosphors aus dem Klärschlamm über die Gasphase und eine Aufreinigung des erhaltenen Phosphorprodukts, welches sonst üblicherweise mit Schadstoffen wie beispielsweise Schwermetallen verunreinigt ist. Der so erhaltene Phosphor kann anschließend dem Wirtschaftskreislauf wieder zugeführt werden. Somit ist ein gemeinsames Schließen des Kohlenstoff- (durch Nutzung des Synthesegases) und Phosphorkreislaufs (durch Nutzung des rückgewonnenen Phosphors) möglich.

2 Aktueller Stand der Technik

2.1 Phosphorvorkommen

Phosphor ist ein Element, welches natürlich nur in gebundener Form vorkommt. Der natürliche Phosphorkreislauf unterliegt keinen Redoxreaktionen, weswegen der gesamte Phosphor im Kreislauf als Phosphat (+V) vorliegt. Die

Phosphatvorkommen beschränken sich dabei vorwiegend auf magmatische oder sedimentäre Apatite, eine Gruppe von Calciumphosphaten, welche als $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3\text{X}$ ($\text{X} = \text{Cl}, \text{F}, \text{OH}$) beschrieben werden können. Die globale Verteilung der Rohphosphate ist in Abb. 1 dargestellt.

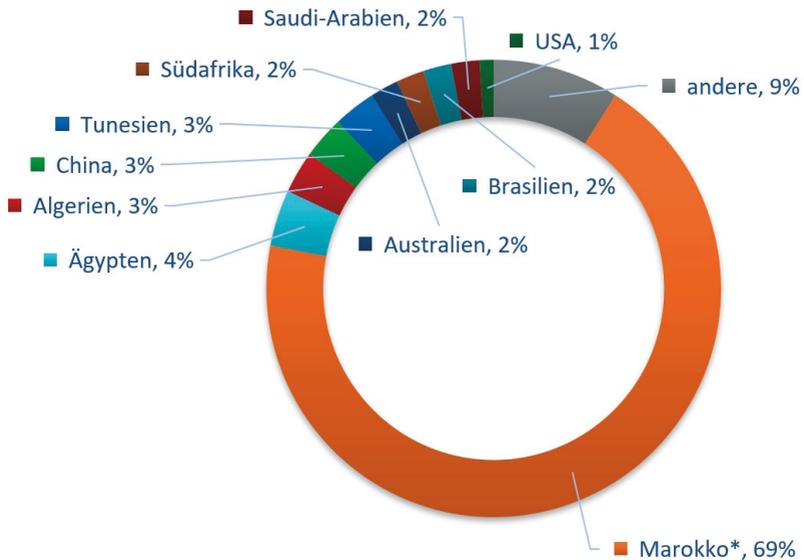


Abb. 1: globale Verteilung der Rohphosphatreserven (2022) [2] * mit Westsahara

Es ist zu erkennen, dass die globale Verteilung der Rohphosphatreserven sehr ungleichmäßig ist. Über zwei Drittel der globalen Reserven befinden sich in Marokko, mehr als 90 % der Reserven sind auf 10 Länder konzentriert. Weiterhin ist erkennbar, dass es keine nennenswerten Vorkommen in Deutschland oder der EU gibt. Der Großteil der weltweiten Phosphorproduktion (über 80 %) wird dabei für die Produktion von Düngemitteln benötigt, gefolgt von kleineren Mengen für die Herstellung von Futtermitteln und Spezialchemikalien wie Flammenschutzmitteln oder Medikamenten [5]. Somit ist Phosphor essentiell für die Sicherung der Nahrungsmittelproduktion.

2.2 Klärschlamm

Bei Klärschlamm handelt es sich um ein Abfallprodukt bei der Aufbereitung von industriellen und kommunalen Abwässern in Kläranlagen. Das Abwasser durchläuft bei der Reinigung verschiedene Reinigungsstufen, welche in Abb. 2 dargestellt sind.

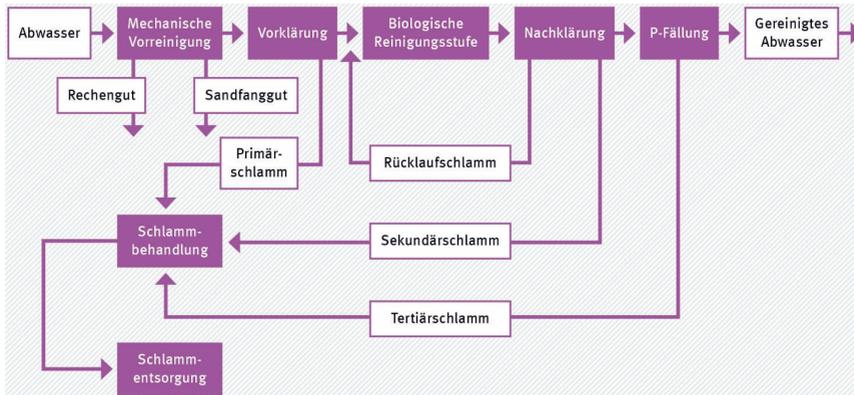


Abb. 2: Reinigungsschritte bei der Abwasserbehandlung [6]

Nach einer mechanischen Abtrennung des sogenannten Rechen- und Sandfangguts erfolgt eine biologische Reinigung des Abwassers, wobei durch Mikroorganismen ein erster Abbau von Schadstoffen stattfindet. Zu dem die biologische Reinigungsstufe verlassenden Abwasser werden verschiedene Fällungs- und Fällungshilfsmittel auf Basis von Eisen-, Aluminium- und/oder Calciumsalzen zugegeben um die im Wasser gelösten Phosphationen chemisch zu binden und auszufällen. Der Rohnschlamm wird anschließend einer Schlammnachbehandlung wie beispielsweise einer Faulung, Entwässerung oder Trocknung unterzogen und anschließend entsorgt. Neben Kohlenstoff, Wasserstoff, Stickstoff, Sauerstoff und Phosphor ist Klärschlamm durch seine Entstehung eine Senke für Schadstoffe wie Pathogene, Arzneimittel und Schwermetalle, was den Umgang mit Klärschlamm erschwert und eine direkte Nutzung beispielsweise als Dünger unmöglich macht.

2.3 Technologien der Phosphorrückgewinnung aus Klärschlamm

Der im Klärschlamm vorhandene Phosphor wird derzeit nicht im großen Maßstab zurückgewonnen, da noch keine wirtschaftlich tragfähigen Verfahren verfügbar sind. Eine direkte Nutzung des Klärschlamm als Düngemittel ist aufgrund der umwelt- und gesundheitsschädlichen Bestandteile (z.B. Keime, Medikamentenreste, Schwermetalle) nur begrenzt möglich. Der Klärschlamm wird derzeit vor allem einer energetischen Nutzung durch Monoverbrennung oder Mitverbrennung zugeführt.

Es sind bereits mehrere Verfahren zur Phosphorrückgewinnung bekannt. Sie lassen sich nach dem Verfahrensprinzip (nasschemisch, biochemisch, physikochemisch, thermochemisch), dem Ausgangsmaterial (Klärschlamm oder Klärschlammmasche aus dem Verbrennungsprozess) sowie dem Zielprodukt (Phosphor, Phosphorsäure oder phosphorhaltige Düngemittel) unterteilen. Eine Übersicht ist in Abb. 3 dargestellt.

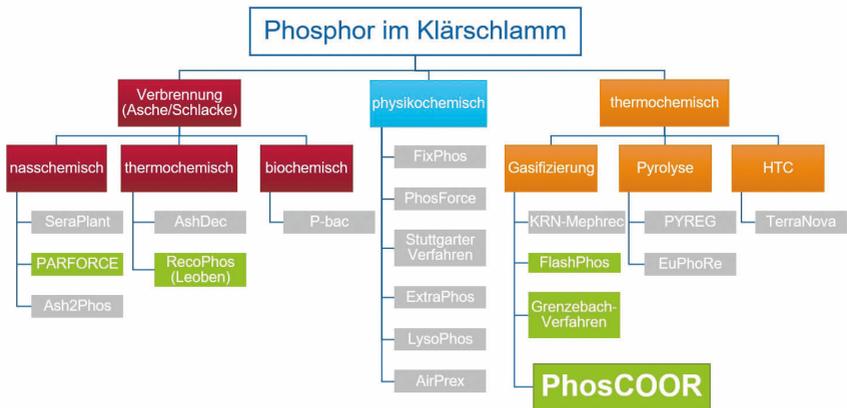


Abb. 3: Übersicht ausgewählter bereits bekannter Verfahren zur Phosphorrückgewinnung, nach [7]

Bei Verfahren, die im blauen und orangenen Pfad eingeordnet sind, wird Klärschlamm als Ausgangsmaterial verwendet. Bei Verfahren im roten Pfad wird der Klärschlamm erst verbrannt und der Phosphor anschließend aus der Klärschlammasche zurückgewonnen. Die grün markierten Verfahren liefern Phosphor oder Phosphorsäure als Produkt. Grau markiert sind Verfahren, bei denen phosphorhaltige Dünger anfallen. Phosphor und Phosphorsäure stellen die prinzipiell höherwertigeren Produkte dar, da daraus verschiedene Folgeprodukte hergestellt werden können (grüne Markierung). Alle diese Verfahren haben aber gemeinsam, dass sie aufgrund der niedrigen Phosphorrückgewinnungsraten, des hohen Aufwands für die Einsatzstoff- und Produktaufbereitung sowie der hohen Betriebskosten noch nicht wirtschaftlich genutzt werden. Weitere Nachteile entstehen durch die Limitation auf eine bestimmte Einsatzstoffgruppe. Viele der düngemittelerzeugenden Verfahren haben beispielsweise ein Problem mit hohen Schwermetallgehalten, da keine effiziente Schwermetallabtrennung stattfindet. Somit sind lediglich Klärschlämme mit geringen Schwermetallgehalten für diese Verfahren zugänglich.

Das an der TU Bergakademie Freiberg entwickelte PARFORCE-Verfahren ist ein nasschemisches Verfahren, wobei Klärschlammasche nasschemisch mit Salz- oder Salpetersäure aufgeschlossen wird. Es können dabei auch andere phosphorhaltige Reststoffe verwendet werden. Die erhaltene Aufschlusslösung wird anschließend abfiltriert und sich in der Säure befindende Metallionen mittels organischer Extraktionsmittel abgetrennt. Die erhaltene Rohphosphorsäure wird mittels Kation- und Anionenaustauschermembranen aufgereinigt, wobei unverbrauchte Aufschlussäure recycelt werden kann. Mittels Vakuumverdampfung werden durch eine anschließende Aufkonzentration Reinheiten von bis zu 99,9 % erreicht [8].

Ein Vorteil von thermochemischen Behandlungen des Klärschlammes gegenüber nasschemischen Aufbereitungsverfahren ist die simultan stattfindende Hygienisierung des Einsatzstoffs, da hierbei Pathogene und Medikamentenrückstände zerstört werden. Ein weiterer Vorteil der thermochemischen Behandlung ist die Abreicherung der Begleitkomponenten wie flüchtige Kohlenwasserstoffe, wodurch eine Anreicherung des Phosphors stattfindet. Simultan findet jedoch auch eine Anreicherung der Schwermetalle statt, was die weitere Aufbereitung erschwert.

Eine der am weitesten entwickelten Technologievarianten ist das RecoPhos-Verfahren [9]. Hierbei handelt es sich um ein thermochemisches Verfahren, bei dem Phosphor aus der Klärschlammmasche durch den direkten Kontakt mit einer heißen Graphitschüttung in einem induktiv beheizten Reaktor reduziert und in Form von flüchtigen Phosphorspezies freigesetzt wird. Die gasförmigen Phosphorprodukte können durch geeignete Gaswäscheverfahren abgetrennt werden. Mit dem RecoPhos-Verfahren wurde gezeigt, dass eine Reduktion von gebundenen Phosphorspezies unter allothermen Bedingungen (sehr niedriger O_2 -Gehalt in der Gasatmosphäre) unter Bildung von flüchtigen Phosphorspezies möglich ist. Die wirtschaftliche Umsetzung des RecoPhos-Verfahrens scheiterte aber bislang an vergleichsweise hohen Betriebskosten aufgrund des hohen Graphitbedarfs, das als Reduktionsmittel zum Einsatz kommt und im Prozessverlauf verbraucht wird. Zusätzlich findet beim RecoPhos-Verfahren eine Nachverbrennung des phosphorhaltigen Abgases statt, um Phosphorsäure auswaschen zu können.

3 PhosCOOR-Projekt

3.1 Allgemeines

Im vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz geförderten PhosCOOR-Projekt („Thermochemische Phosphorrückgewinnung unter stark reduzierenden Bedingungen mit Berücksichtigung der CO_2 -Bilanz“) sowie in weiteren Forschungsvorhaben wird versucht, die Vorteile der thermochemischen Behandlung (simultane Hygienisierung und stoffliche Nutzung des Kohlenstoffs) zu nutzen und gleichzeitig eine Abtrennung des Phosphors von Störkomponenten wie Schwermetallen zu erreichen.

Der Klärschlamm wird dabei zunächst thermisch vorbehandelt, wobei eine Trocknung, Hygienisierung und teilweise Freisetzung und Nutzung des Kohlenstoffs stattfindet. Der erhaltene Klärschlammkoks kann anschließend gasifiziert werden, wobei eine weitere stoffliche Nutzung des Kohlenstoffs ermöglicht wird. Zusätzlich wird im Gasifizierungsschritt Phosphor in die Gasphase überführt und somit von Störkomponenten wie Schwermetallen abgetrennt. Die gasförmigen Phosphorspezies können anschließend abgeschieden und Phosphor somit aus der Gasphase rückgewonnen werden. Das Produkt ist Phosphorsäure, welche entweder wieder für die Düngemittelproduktion genutzt werden kann, für

weitere industrielle Anwendungen für Phosphor-Sauerstoff-Verbindungen verwendet werden kann oder zu Phosphor reduziert und anschließend auch für beispielsweise halogenierte Phosphorverbindungen zur Verfügung steht.

3.2 Aktuelle Ergebnisse

Im Rahmen des PhosCOOR-Projekts wurde festgestellt, dass das in der Kläranlage eingesetzte Fällungsmittel (insbesondere Eisen- und/oder Aluminiumsalze) einen großen Einfluss auf das Phosphorfreisetzungsverhalten der Klärschlammproben hat. Insbesondere eisenhaltige Klärschlämme weisen eine stark verminderte Phosphorfreisetzung im Vergleich zu aluminiumhaltigen Klärschlämmen auf. Dies ist in der Literatur für Klärschlammaschen durch die Bildung schwerflüchtiger Phosphor-Eisen-Legierungen beschrieben [10]. In der Literatur wurde allerdings unter Vakuumbedingungen gearbeitet. Im Labormaßstab konnten bei aktuellen Untersuchungen abhängig vom Einsatzstoff bis zu 95 % des im Klärschlamm enthaltenen Phosphors freigesetzt werden. Die Freisetzung findet dabei im Bereich von ca. 1000 °C bis zur untersuchten Endtemperatur von 1450 °C statt.

Weiterhin ergaben thermodynamische Berechnungen sowie im Labormaßstab durchgeführte experimentelle Arbeiten, dass ein hohes Reduktionspotential (bzw. ein niedriger Sauerstoffpartialdruck) für die Phosphorfreisetzung nötig ist. Dies wurde auch durch die im PhosCOOR-Projekt durchgeführten Versuchskampagnen bestätigt.

Beispielsweise konnte bei der autothermen Gasifizierung, wobei ein Teil des Einsatzstoffs zur Energiebereitstellung oxidiert wird, in einer Wirbelschicht-Pilotanlage mit einer thermischen Eingangsleistung von bis zu 60 kWth (bezogen auf den Heizwert des Klärschlammes) keine ausreichend hohe Phosphorfreisetzung beobachtet werden. Trotz Erhöhung des Reduktionspotentials durch Wasserstoffeinspeisung mit dem Ziel überschüssigen Sauerstoff umzusetzen konnten die für die P-Freisetzung notwendigen Bedingungen nicht erreicht werden.

Um die Freisetzungsvoraussetzungen zu erfüllen müssen allotherme Gasifizierungsbedingungen, bei denen die benötigte Wärme extern, beispielsweise durch die Einkopplung von Elektroenergie, bereitgestellt wird für die Phosphorfreisetzung eingesetzt werden.

Weiterhin wurde ein System zur Abscheidung von gasförmigen Phosphorspezies entwickelt, in Laborversuchen erprobt und zum Patent angemeldet [11]. Im Labormaßstab konnten damit bis zu 96 % des freigesetzten Phosphors aus der Gasphase abgeschieden und somit zurückgewonnen werden.

3.3 Zusammenfassung und Ausblick

Während das grundsätzliche Wirkprinzip durch Laborversuche im Verlauf des PhosCOOR-Projekts nachgewiesen wurde, erfordert die technologische Umsetzung des neuen Verfahrens weiteren Forschungs- und Entwicklungsbedarf, um eine hohe P-Rückgewinnungsrate und die notwendige Synthesegasqualität auch unter Realbedingungen zu gewährleisten. Im Rahmen weiterer Untersuchungen sollen die folgenden weiteren Arbeitsschritte durchgeführt werden:

- Detaillierte Aufklärung des Einflusses der Zusammensetzung des Klärschlammes auf die P-Freisetzungsrate
- Untersuchungen der P-Freisetzungskinetik
- Untersuchungen zu Mechanismen der allothermen P-Freisetzung
- Phosphorwäsche unter realen Bedingungen
- Regenerierung des P-beladenen Waschmediums
- Proof-of-Concept der allothermen Gasifizierung mit Plasma
- Demonstration der gesamten Prozesskette im Technikumsmaßstab

4 Fazit

Phosphor konnte im Labormaßstab nahezu quantitativ aus verschiedenen Klärschlämmen mit unterschiedlichen Zusammensetzungen freigesetzt werden. Der Effekt verschiedener Einflussgrößen wie Eisen- und Aluminiumgehalt, Endtemperatur der Behandlung sowie der Einfluss der vorherrschenden Atmosphäre konnten evaluiert werden. Es stellte sich heraus, dass stark reduzierende bzw. nicht oxidierende Bedingungen vonnöten sind, um eine Phosphorfreisetzung zu gewährleisten. Die Phosphorfreisetzung beginnt dabei bei Temperaturen von ca. 1000 °C und erfolgt bis zur untersuchten Endtemperatur von 1450 °C. Eisensalze sind dabei für die Phosphorfreisetzung hinderlich, weswegen möglichst ausschließlich Aluminiumsalze als Fällungsmittel zur Phosphatfällung in Klärwerken eingesetzt werden sollten. Mithilfe eines patentierten Wäscheverfahrens ist es möglich, bis zu 96 % des freigesetzten Phosphors aus der Gasphase abzutrennen und somit rückzugewinnen.

Literatur/Quellen

- [1] MAYER, Natalie ; KALTSCHMITT, Martin: Closing the phosphorus cycle: Current P balance and future prospects in Germany. In: Journal of Cleaner Production 347 (2022), S. 131272
- [2] U.S. GEOLOGICAL SURVEY: Mineral Commodity Summaries: Phosphate Rock. 2023
- [3] GROHOL, Milan ; VEEH, Constanze: Study on the critical raw materials for the EU : Final report. Luxembourg, 2023
- [4] STATISTISCHES BUNDESAMT: 80% des Klärschlammes aus kommunalen Kläranlagen im Jahr 2022 thermisch verwertet. URL https://www.destatis.de/DE/Presse/Pressemitteilungen/2023/12/PD23_485_32214.html#:~:text=Insgesamt%20wurden%20im%20Jahr%202022,in%20den%20vergangenen%20Jahren%20stetig%20Überprüfungsdatum%202023-04-15
- [5] SCHRÖDER, J. J. ; CORDELL, D. ; SMIT, A. L. ; ROSEMARIN, A.: Sustainable Use of Phosphorus : EU Tender ENV.B.1/ETU/2009/0025. Stockholm, 2010
- [6] ROSKOSCH, Andrea ; HEIDECKE, Patric: Klärschlamm Entsorgung : in der Bundesrepublik Deutschland. 2018
- [7] DEUTSCHE PHOSPHORPLATTFORM E.V.: P-Recyclingtechnologien Tabelle. URL <https://www.deutsche-phosphor-plattform.de/document/tabelle-zu-p-recycling-technologien/> – Überprüfungsdatum 2023-02-13
- [8] FRÖHLICH, Peter ; LOHMEIER, Reinhard ; MARTIN, Gunther ; ESCHMENT, Jürgen: Die Gewinnung von Phosphorsäure aus Reststoffen : Das "Parforce"-Verfahren. In: GIT Labor-Fachzeitschrift 12 (2016), S. 26–28
- [9] WINDISCH, Stefan ; PONAČ, Christoph ; MALLY, Valentin ; RAUPENSTRAUCH, Harald: Phosphorrückgewinnung aus Klärschlammaschen mit dem RecoPhos-Prozess. In: Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft 72 (2020), 9-10, S. 421-428
- [10] MATINDE, Elias ; SASAKI, Yasushi ; HINO, Mitsutaka: Phosphorus Gasification from Sewage Sludge during Carbothermic Reduction. In: ISIJ International 48 (2008), Nr. 7, S. 912-917
- [11] FRANKE, Eric ; SHALNEV, Sergei ; KRZACK, Steffen ; SCHIMPKE, Ronny ; KLEEBERG, Jörg ; GRÄBNER, Martin: Verfahren zur Gewinnung von Phosphor aus phosphorhaltigen organischen Abfallstoffen. TU Bergakademie Freiberg. Anmeldenr. 10 2023 125 795.1, Deutschland

Kontakt

Dipl.-Chem. Eric Franke

TU Bergakademie Freiberg
 Institut für Energieverfahrenstechnik und Chemieingenieurwesen
 Professur Energieverfahrenstechnik

☎ +49 (0)3731.39-4809 | ✉ Eric.Franke@iec.tu-freiberg.de

🌐 www.tu-freiberg.de/fakult4/iec

Erneuerbares Methan aus Biomasse und Wasserstoff

Pilotanlage und Übertragung auf den kommerziellen Maßstab

Zusammenfassung: Das Vorhaben Pilot-SBG adressiert die Bereitstellung von erneuerbarem Methan als Energieträger für schwer elektrifizierbare Verkehrssektoren. Zentraler Bestandteil des Forschungs- und Demonstrationsvorhabens sind die Planung und Errichtung sowie der erfolgreiche Versuchsbetrieb einer Pilotanlage im Technikumsmaßstab. Das Konzept verbindet sowohl etablierte als auch innovative Technologien und verarbeitet biogene Reststoffe, Nebenprodukte und Abfälle sowie grünen Wasserstoff für die Bereitstellung von erneuerbarem Methan als Hauptprodukt und wertigen Nebenprodukten. Es werden umfangreiche Versuche durchgeführt und Prozessparameter iterativ optimiert sowie das Gesamtkonzept aufbauend auf den Versuchskampagnen bewertet, um dessen Skalierung in den kommerziellen Maßstab zu unterstützen.

Abstract: The project Pilot-SBG addresses the provision of renewable methane as a transport fuel. A key component of this research and demonstration project is the design, construction and successful operation of a pilot plant. The concept combines established and innovative technologies and processes biogenic residues, by-products and waste as well as green hydrogen. The aim is to produce renewable methane as the main product and valuable co-products. Extensive trials will be carried out, process parameters will be iteratively optimised and the overall concept will be evaluated on the basis of the trial campaigns to support its scaling up to commercial scale.

1 Hintergrund

Erneuerbares Methan bietet die Möglichkeit, einen großen Beitrag zur Reduktion von Treibhausgasemissionen zu leisten. Methan ist ein vielseitiges Molekül mit verschiedenen sehr wichtigen Anwendungsmöglichkeiten. Neben der Eignung als Kraftstoff in seiner komprimierten oder verflüssigten Form (CNG, LNG) für die Teile des Verkehrssektors die schwer zu elektrifizieren sind, ist es ein Carrier-Molekül für H_2 , eine wichtige Plattformchemikalie für die chemische Industrie oder kann als Erdgassubstitut für diverse Prozesse der Wärme- und Energiebereitstellung verwendet werden.

Mit der Nutzung von biogenen Rest- und Abfallstoffen sowie grünem Wasserstoff werden strategische Themen adressiert wie die Kaskadennutzung von Biomasse, Kreislauf-wirtschaft, Sektorkopplung, CO_2 -Reduktion durch den Power-to-X-Prozess der Biogasmethanisierung sowie dezentrale und regionale Energieerzeugung.

2 Projektziel

Das Vorhaben fokussiert als innovationsunterstützende Dienstleistung auf die Weiterentwicklung von fortschrittlichem erneuerbarem Methan als Kraftstoff in Deutschland. Es baut auf der in einem Vorgängerprojekt geplanten und errichteten Pilotanlage im Technikumsmaßstab und bereits erfolgten Vorversuchen und Machbarkeitsanalysen auf. Der innovative Verfahrensansatz zielt auf die Erhöhung der Methanausbeute aus dem Biogasprozess, unter anderem durch die Verwertung des biogenen CO₂ mit grünem Wasserstoff.

Während der technologische Schwerpunkt im Projekt auf der erfolgreichen Pilotierung und Prozessoptimierung liegt, werden darüber hinaus Rückschlüsse für modulspezifische und konzeptionelle Optimierungsansätze und den Erfolg im kommerziellen Maßstab abgeleitet. Die Optimierungskriterien der Prozessführung und der Prozesskette sind dabei Ressourceneffizienz und die Schließung von Stoffkreisläufen sowie Treibhausgasvermeidungskosten.



Abb. 1: Infografik Pilot-SBG

3 Durchführung

In den zwei Teilpaketen werden praktische Forschungsversuche einerseits und deren Bewertung auf konzeptioneller Ebene andererseits realisiert. Parallel zum reproduzierbaren Routinebetrieb der Gesamtanlage in Versuchskampagnen mit agrarischen und urbanen Ressourcen werden auch modul- und schnittstellen-spezifische Versuchsreihen durchgeführt. Basierend auf der Modellierung und Skalierung der Versuchsergebnisse sowie einer Erweiterung der Bilanzgrenzen auf die gesamte Bereitstellungskette (Abb. 2) werden neben der ökologischen Bewertung auch Kosten- und Erlös-Strukturen betrachtet.

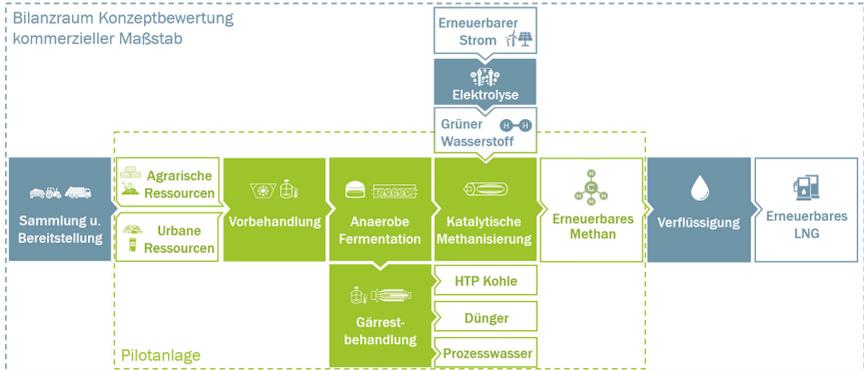


Abb. 2: Fließschema mit Bilanzgrenzen

4 Die Pilotanlage

In der integrierten und hochautomatisierten kontinuierlichen Pilotanlage (Abb. 3), welche auf einer 1.000 m² großen Versuchsfläche betrieben wird, werden 2,5 m³ erneuerbares Methan pro Tag erzeugt. Die Anlage besteht aus verschiedenen etablierten und innovativen Verfahren wie Methanisierung, Fermentation, hydrotthermalen Prozessen und mehreren Separationsanlagen. Der Prozess wird mit 20-30 kg/d biogenen Reststoffen/Abfällen und 7,3 m³/d grünem Wasserstoff gespeist.



Abb. 3: Pilotanlage im Vorhaben Pilot-SBG

5 Weiterführende Literatur

Weiterführende Informationen, Publikationen und Zwischenergebnisse zum Vorhaben Pilot-SBG sind auf der Projektwebseite www.dbfz.de/pilot-sbg zu finden.



Kontakt

Karin Naumann, Arbeitsgruppe Erneuerbare Kraftstoffe
im Verkehr, Fachbereich Bioraffinerien

DBFZ Deutsches Biomasseforschungszentrum gGmbH

✉ karin.naumann@dbfz.de | 🌐 www.dbfz.de

Harnstoff 3.0 – Vision einer kreislaufbasierten und klimaneutralen Wertschöpfung in Mitteldeutschland

Zusammenfassung: Harnstoff ist ein in vielen Lebensbereichen essentielles Produkt der Grundstoffchemie. Die Produktion erfolgt aktuell weltweit vornehmlich auf Basis von Erdgas. Der darin enthaltene Kohlenstoff wird zu beträchtlichen Teilen direkt in den Harnstoff eingebaut. Dessen Kohlenstoff-Anteil beträgt 20 %. In Deutschland sind die SKW Stickstoffwerke Piesteritz GmbH (SKWP) der wichtigste Harnstoff-Produzent. Die Herstellung erfolgt im kontinuierlich optimierten, energie- und rohstoffeffizienten Stamicarbon®-Verfahren. Harnstoff der SKWP weist im Vergleich zu Importware (EU, Russland, Übersee) einen um 40 bis 60 % geringeren CO₂-Fußabdruck auf. Zusätzlich werden bei Anwendung des Düngers ALZON® neo-N der SKWP die Treibhausgas-Verluste in Form von Lachgas nach der Düngung um 50 % reduziert. In den Anlagen der SKWP kann Erdgas schon heute ohne nennenswerte technologische Anpassung durch Biomethan substituiert werden. Damit wäre ein weiterer starker Beitrag zum Klimaschutz quasi sofort möglich. Darüber kann der Kreislauf Biomethan, Harnstoff-Dünger, Gärsubstrat zum Motor einer komplexen klimaneutralen Ökonomie in Mitteldeutschland werden. Selbst effiziente CO₂-Senken lassen sich in diesem Rahmen erschließen, z.B. über CCS-Verfahren auf Basis geernteter Biomasse. Darüber hinaus ließe sicher der hohe Methanbedarf der SKWP (1,2 Mrd. m³ pro Jahr) halbieren, indem als Rohstoff für die der Harnstoff-Produktion vorgelagerte NH₃-Synthese anteilig klimaneutral erzeugter Wasserstoff (H₂) verwendet wird. Da außerdem die Substitution von Erdgas durch Biomethan in beliebig großen Schritten möglich ist, erscheint zumindest die anteilige Produktion von grünem Harnstoff auch im Hinblick auf die Rohstoff-Basis (Gärsubstrat, Biogas) realistisch. Ob und inwieweit es gelingt, die großen und weitreichenden potenziellen Vorteile einer solchen Transformation tatsächlich zu erschließen, wird nicht zuletzt von den politischen und ökonomischen Rahmenbedingungen abhängen.

Abstract: Urea is an essential basic chemical product in many areas of life. Currently, worldwide production is largely based on natural gas. The carbon it contains is incorporated directly into the urea to a considerable extent. The carbon content of urea is 20%. In Germany, SKW Stickstoffwerke Piesteritz GmbH (SKWP) is the most important producer of urea.

The production is using the energy- and raw material-efficient Stamicarbon® process. Urea from SKWP has a 40 to 60% lower CO₂ footprint compared to imported goods (EU, Russia, overseas). In addition, the use of the SKWP fertilizer ALZON® neo-N reduces greenhouse gas emissions (nitrous oxide) from nitrogen fertilization by 50%. Natural gas can be substituted by biomethane in plants of SKWP without any significant technological adjustments. This would allow a further significant contribution to climate protection almost immediately. In addition, the biomethane, urea fertilizer, fermentation substrate cycle can become the engine of a complex climate-

neutral economy in Central Germany. Even efficient CO₂ sinks can be developed within this framework, e.g. via CCS processes based on harvested biomass. The high methane requirement of SKWP (1.2 billion m³ per year) can be halved by using green hydrogen as a proportion of the raw material for the ammonia synthesis upstream of urea production. Since it is also possible to substitute natural gas with biomethane in any number of steps, the production of green urea also appears realistic with regard to the raw material base (fermentation substrate, biogas). Whether and to what extent the major and far-reaching potential benefits of such a transformation can actually be exploited will depend to a decisive extent on the political and economic framework conditions.

1 Einleitung

Harnstoff wird aus Ammoniak (NH₃) und Kohlendioxid (CO₂) synthetisiert. Beides entsteht bei der Dampfreformierung und anteiligen Verbrennung von Methan (CH₄), welches aktuell ausschließlich aus fossilen Quellen (Erdgas) stammt. Ein vereinfachtes Schema der Prozesse ist Abb. 1 zu entnehmen.

Als systemrelevante Verbindung ist Harnstoff auch in Deutschland Hauptbestandteil zahlreicher essentieller Produkte. Hervorzuheben sind neben einer Reihe besonders klima- und ressourceneffizienter Mineraldünger z.B. Entstickungsmittel, AdBlue, Melamin und Grundstoffe für andere Industrien. Hochreiner Harnstoff wird in Medizin, Kosmetik und Tierernährung eingesetzt. Ein beträchtlicher Teil des bei der Produktion umgesetzten Kohlenstoffs (C) ist im Produkt gebunden. Der C-Gehalt im Harnstoff beträgt 20 %. Damit ist das eingesetzte CH₄ bzw. der eingesetzte C nicht nur Energielieferant für die der Harnstoff-Produktion vorgelagerten NH₃-Synthese, sondern fließt auch in die nachgelagerte Wertschöpfung ein. Sollte es gelingen, den Rohstoff Erdgas schrittweise durch grüne Alternativen zu substituieren, ergeben sich aus diesem Fakt komplexe und weitreichende Potenziale für die regionale und nationale Ökonomie. Dabei spielt Biomethan aufgrund der in Kap. 4 aufgeführten Vorzüge eine besondere Rolle.

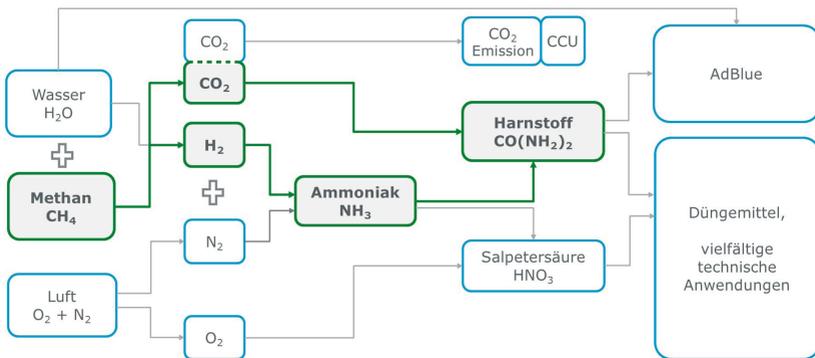


Abb. 1: Prozessablauf der Ammoniak- und Harnstoffsynthese (vereinfachtes Schema) im Kontext der Wertschöpfungsketten bei den SKW Stickstoffwerken Piesteritz

2 CO₂-Fußabdruck des Düngers ALZON® neo-N der SKW Stickstoffwerke Piesteritz

Die SKW Stickstoffwerke Piesteritz GmbH (SKWP) ist der größte NH₃- und Harnstoff-Hersteller in Deutschland. Dank kontinuierlich optimierter und innovativer Verfahren (Stamicarbon®) konnte der Ausstoß von Treibhausgasen bei der Produktion auf ca. 60 % des EU-Standardwertes gesenkt werden (von 3,5 kg auf 2,14 kg CO₂e pro kg Harnstoff-N).

Noch größer ist die Einsparung im Vergleich von Harnstoff aus Russland oder Übersee (> 4 kg CO₂e pro kg Harnstoff-N). SKWP erreicht so die weltweit höchste C-Nutzungseffizienz bei der Harnstoff-Produktion. Zusätzlich lassen sich mit dem Harnstoff-Dünger ALZON® neo-N düngungsinduzierte Lachgasverluste (ca. 4,16 kg CO₂e pro kg Dünger-N) um 50 % (auf ca. 2,08 kg CO₂e) mindern.

Aufgrund einer einmaligen Wirkstoff-Kombination in diesem Produkt wird darüber hinaus eine signifikante N-Austragsminimierung über alle Verlustpfade erreicht. Standortangepasste, ressourceneffiziente Anwendungsstrategien komplettieren die ökonomischen und ökologischen Vorteilswirkungen. Damit erreicht ALZON® neo-N analog zur Produktion auch bei der Anwendung die weltweit höchste Klima- und Ressourceneffizienz im Vergleich synthetischer N-Dünger (Abb. 2).

Emittiertes CO ₂ e pro kg Dünger-N	ALZON neo-N (grün)	ALZON neo-N	Harnstoff (EU)	Harnstoff (Ru)
Rohstoffbezug und Produktion	0,25	2,14	3,5	4,1
Transport, Ausbringung	0,05	0,05	0,1	0,2
Feldemission (Lachgas)	2,08	2,08	4,16	4,16
Summe (CO ₂ -Fußabdruck)	2,38	4,27	7,76	8,46

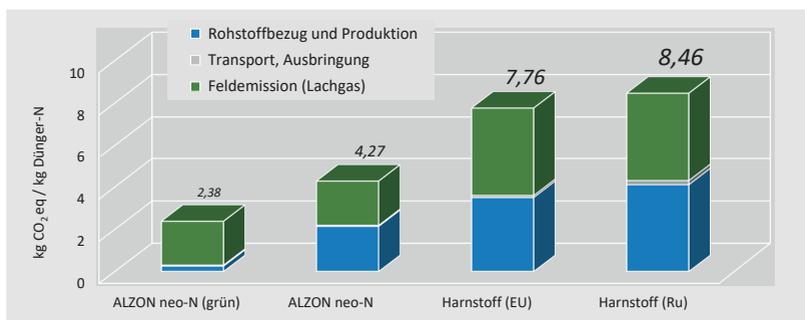


Abb. 2: CO₂-Fußabdruck des Düngers ALZON® neo-N im Vergleich zu importierten Harnstoff-Düngern sowie Effekt der Substitution von Erdgas durch Biomethan

Quellen: Hoxha & Christensen (2018); Ruser & Schulz (2015); GUTcert / SKWP (2023)

3 Klimaneutrale Wertschöpfung auf Basis von Harnstoff aus Biomethan

Aufbauend auf der bereits heute ressourceneffizienten Harnstoff-Produktion (s. Abb. 1), plant SKWP eine schrittweise Substitution von Erdgas durch grüne Alternativen, darunter Biomethan und grüner H₂. Die Nutzung von Biomethan für die Harnstoff-Produktion hat gegenüber anderen klimaneutralen Rohstoffen große Vorteile, denn es wird sowohl H₂ für die NH₃-Synthese als auch CO₂ für die anschließende Harnstoff-Synthese bereitgestellt.

3.1 Grüne Kreislauf-Ökonomie und abzweigende Wertschöpfungsketten

Aus Biogas erzeugter klimaneutraler Harnstoff kann in vielfältige landwirtschaftliche und technische Wertschöpfungsketten einfließen und dort eine starke Verbesserung der Klimabilanz von Prozessen und Produkten bewirken. Eine besondere Rolle spielen dabei grüne Mineraldünger, denn sie verbessern sowohl die Klimabilanz als auch die Verwertungseffizienz landwirtschaftlicher Substrate für die Erzeugung von Biomethan. Sie können damit zum Motor einer klimaneutralen Zirkelökonomie werden (Abb. 3).

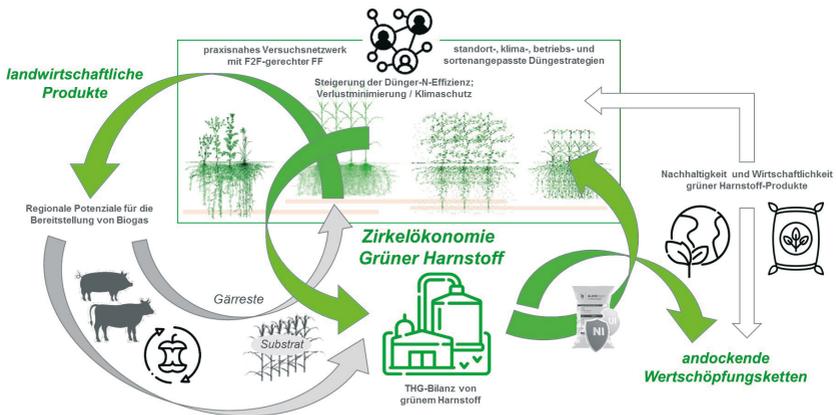


Abb. 3: Schema einer auf weitgehend klimaneutral erzeugtem Harnstoff-Dünger basierenden Zirkelökonomie mit abzweigenden Wertschöpfungsketten

3.2 Rohstoffbedarf und Machbarkeitspotenziale in Mitteldeutschland

Alle technologischen Voraussetzungen für die Nutzung von Biomethan im großtechnischen Maßstab sind bereits vorhanden. Kostenintensive Prozessanpassungen entfallen weitgehend, so dass Investitionen zur weiteren Steigerung der Prozesseffizienz genutzt werden können. Damit wird ein sofortiger und substanzieller Beitrag zu den Klimazielen Deutschlands möglich. Ein großer Vorteil ist

diesbezüglich die Möglichkeit einer schrittweisen Substitution von fossilem Erdgas durch Biomethan (s. Kap. 4).

Der CH_4 -Bedarf für die NH_3 - und Harnstoff-Produktion der SKWP ist bei optimaler, d.h. energie- und kosteneffizienter Auslastung der Anlagen mit 1,2 Mrd. m^3 groß. In der Übersicht in Tab. 1 wird am Beispiel von Biomethan auf Silomais-Basis aufgezeigt, welcher Flächen- und Substratbedarf je nach Ausmaß der Substitution notwendig wäre, um die SKWP-Produktion entsprechend umzustellen.

Bei einer Substitutionsrate von 10 % Biomethan für die Harnstoff-Produktion beträgt der Flächenaufwand noch 43.136 ha, was etwa einem Drittel der Silomais-Anbaufläche im Land Sachsen-Anhalt im Jahr 2023 entsprach (Statistisches Landesamt Sachsen-Anhalt 2023). Aus dem Mais- bzw. Biogas-Ertrag dieser Fläche lassen sich ca. 150.000 t Harnstoff produzieren. Etwa 5 bis 10 % davon reichen aus, um in Kombination mit dem Einsatz des Gärrestes erneut Rohstoff-Pflanzen auf mehr als 40.000 ha bedarfsgerecht mit Stickstoff (N) zu versorgen.

Tab. 1: Hypothetisch notwendige Ackerfläche und Substrat-Ausbeute beim Anbau von Mais als Rohstoff, um die NH_3 - und Harnstoff-Produktion der SKWP anteilig von fossilem Methan auf Biomethan umzustellen

		Substratbasis (für die Substitution): 100 % Silomais			
Substitutionsrate fossiles Methan	[%]	100%	50%	10%	5%
CH_4 Gehalt (%)	[%]	55,00%			
Biogas-Ausbeute / t Frischmasse	[m^3 / t FM]	112,4			
Frischmasseertrag	[t FM/ha]	45			
Jährlicher Bedarf an CH_4	[m^3 /a]	1.200.000.000	600.000.000	120.000.000	60.000.000
Anteil am Biomethan-Angebot ¹⁾	[%]	91,84%	45,92%	9,18%	4,59%
Jährlicher Bedarf an Biogas	[m^3 /a]	2.181.818.182	1.090.909.091	218.181.818	109.090.909
Anteil am Biogas-Angebot ²⁾		12,08%	6,04%	1,21%	0,60%
Jährlicher Substratbedarf	[t/a]	19.411.194	9.705.597	1.941.119	970.560
Jährliche Anbaufläche für Substrat	[ha/a]	431.360	215.680	43.136	21.568
Anteil an der Anbaufläche für Biogas ³⁾	[%]	29,15%	14,57%	2,91%	1,46%
Tägliche Substratdurchsatzmenge	[t/a]	53.181	26.591	5.318	2.659

¹⁾ 1,307 Mrd. m^3 Biomethanproduktion in Deutschland für das Jahr 2022. EBA Statistical report 2023

²⁾ 86 TWh Biogasproduktion in Deutschland für das Jahr 2022. EBA Statistical report 2023

³⁾ 1,48 Mio. ha für das Jahr 2023 als Basis. Statistisches Jahrbuch über Ernährung Landwirtschaft und Forsten 2023. BMEL 2022

Mehr als 90 % des erzeugten grünen Harnstoffs würden also für die vielfältige Wertschöpfung im landwirtschaftlichen und technischen Sektor zur Verfügung stehen. Diese könnte ihrerseits ebenfalls vom geringen CO_2 -Fußabdruck (s. Abb. 1) profitieren.

Ein weiterer Effekt im Kreislauf von Düngung, Substrat-, Biogas- und Dünger-Produktion wäre die sukzessive Verbesserung der CO_2 -Bilanz der eingesetzten Substrate. Damit könnte der Grundstein zu einer weitgehend klimaneutralen Kreislaufökonomie gelegt werden.

Der schrittweise Bau und Ausbau von Biogas-Anlagen, die in das bestehende Erdgasnetz einspeisen können, wäre Bestandteil und Wachstumsgarant dieser Ökonomie. Vor dem Hintergrund rückläufiger Tierbestände und positiver Effekte von Mais in den verschiedensten Fruchtfolgen erscheint ein solches Szenario durchaus realistisch.

Natürlich lassen sich auch pflanzliche Reststoffe, tierische Ausscheidungen oder alternative Rohstoffpflanzen sowie Mischungen, wie in Praxisanlagen üblich, in den Kreislauf integrieren. Die Übersicht in Tab. 2 weist am Beispiel der Produktion von einer Tonne Harnstoff bzw. AdBlue die benötigte Menge an Substrat verschiedener Quellen aus.

Tab. 2: Spezifische Mengen unterschiedlicher Substrate zur Produktion von jeweils einer Tonne Harnstoffdünger oder AdBlue

	Harnstoffdünger [t FM Substrat / t Produkt]	AdBlue [t FM Substrat / t Produkt]
Rindergülle	40,69	12,95
Schweinegülle	56,25	17,90
Rinderfestmist	12,94	4,12
Schweinefestmist	15,27	4,86
Geflügelmist	8,25	2,62
Pferdemist	11,64	3,70
Silomais	6,05	1,93
Grassilage	6,79	2,16
Sorghumsilage	8,51	2,71
Zuckerrübensilage	9,03	2,87
Getreideganzpflanzensilage	6,23	1,98
Weizenstroh	3,24	1,03
Landschaftspflegegras	4,54	1,44

(eigene Berechnung; Basis: Methanerträge lt. KTBL)

Bemerkenswert ist der niedrige spezifische Substrateinsatz und damit hohe Wirkungsgrad der Nebenprodukte bzw. Reststoffe Weizenstroh und Landschaftspflegegras. Bei den tierischen Exkrementen erscheint Geflügelmist als besonders effizient. Durch den Einsatz von Stroh als landwirtschaftlicher Reststoff kann die Konkurrenz zu Nahrungsmitteln sowie der Flächenbedarf reduziert werden. Zu bedenken ist, dass jeder Einsatzstoff einer prozessbedingten Maximal-Einsatzmenge unterliegen kann.

Bei Vorliegen entsprechender Rahmenbedingungen lässt sich der Bedarf an CH₄ (und damit auch an Biogas) bei der Harnstoff-Produktion durch Nutzung von grünem H₂ und eine entsprechende Adaption der Produktionslinien deutlich reduzieren (s. Kap. 3.3).

SKWP arbeitet auf verschiedenen Ebenen an der Konzeption solcher Projekte. Deren Umsetzung ist unter den aktuellen Rahmenbedingungen allerdings

schwierig. So lässt sich der stoffliche Biomethan-Einsatz derzeit nicht nach DIN EN ISO 14067: 2019-02 zertifizieren. Bei der Zertifizierung von Biogas-Quellen wird die Produktion auf Basis von Silomais und anderen zur direkten Substratgewinnung angebauten Rohstoff-Pflanzen vergleichsweise negativ bewertet. Schließlich gefährden billige Import-Harnstoffe ungeachtet ihrer problematischen Klimawirkung die wesentlich effizientere Inlandproduktion. Solche Faktoren bedrohen die geplante Transformation.

3.3 Kombination von grünem Wasserstoff und Biomethan bei der Harnstoff-Produktion

Die hohe Energie- und Rohstoffeffizienz ermöglicht perspektivisch auch die Kombination einer auf Basis von CH_4 bzw. Biomethan betriebenen mit einer auf Basis von grünem H_2 betriebenen NH_3 -Anlage und damit eine weitere Steigerung der CO_2 -Nutzungseffizienz bei der Harnstoff-Produktion. Perspektivisch soll eine der beiden NH_3 -Anlagen der SKWP auf Basis von grünem H_2 laufen. Für die Harnstoff-Produktion aus dem dort erzeugten NH_3 lässt sich bislang noch emittiertes CO_2 aus der zweiten Anlage wiedergewinnen und nutzen. Gegebenenfalls kann diese Kombination aus teilweiser Substitution und Effizienzsteigerung von C-Quellen den Bedarf an Erd- bzw. Biogas erheblich (um 40 bis 50 %) reduzieren. Energetisch funktioniert dies auf Basis des energieeffizienten Stamicarbon®-Verfahrens, bei dem der Bedarf an Dampf für die Harnstoff-Synthese mit ca. 1 Tonne pro Tonne Produkt relativ gering ist. Dieser Dampf wird im 1. Schritt der NH_3 -Synthese aus der CH_4 bzw. Biomethan-Verbrennung und indirekt über die Nutzung chemischer Reaktionswärme, in naher Zukunft zusätzlich durch grün erzeugten Strom gewonnen.

Die Rückgewinnung des bislang noch emittierten CO_2 kann durch Auswaschung aus CO_2 -haltigen Rauchabgasen (Amin-Wäschen) erfolgen. Allerdings ist der Prozess aufwendig und verlangt umfangreiche Investitionen und nach Möglichkeit einen Anschluss an ein CO_2 -Verbundnetz als Backup zur Absicherung der kontinuierlich laufenden Produktionsprozesse.

4 Vorteile der Nutzung von Biomethan für die Harnstoff-Produktion bei SKWP

Generell, aber auch speziell für die Produktionsstätten und Syntheseanlagen der SKWP am Standort Wittenberg hätte die Einspeisung von Biomethan in den Prozess der NH_3 - und Harnstoff-Synthese große und komplexe Vorteile:

- Der CO_2 -Fußabdruck der Harnstoff-Produktion würde minimiert, so dass sich der in Kap. 2 genannte Wert für die Produktion, Logistik und Anwendung des Düngers ALZON® neo-N auf nur noch 2,38 kg CO_2e pro kg Harnstoff-N reduzieren ließe (s. Abb. 1).

- Eine Substitution von Erdgas durch Biomethan ist bei SKWP ohne nennenswerte technologische Anpassungen möglich. Zusätzliche Investitionsmittel werden für eine solche Umstellung kaum notwendig. Über diesen Weg ließe sich folglich eine effektive CO₂e-Minderung sofort umsetzen
- Aus technischer Sicht kann die Substitution in beliebig großen Schritten erfolgen und dynamisch an Biomethan-Angebot, ökonomische Machbarkeit und politische Rahmenbedingungen angepasst werden.
- Der Biomethan-Einsatz in den SKWP-Produktionsanlagen ist besonders lohnenswert, da ein sehr energie- und rohstoffeffizientes Harnstoff-Syntheseverfahren (Stamicarbon®) zum Einsatz kommt, bei dem Druck und Temperaturen vergleichsweise gering bleiben und ein 100-prozentiges Recycling von NH₃- und CO₂ erreicht wird.
- Eine adäquate CO₂-Minderung über grünen H₂ wäre dagegen extrem kostenintensiv. Überdies ist sie in der angestrebten Größenordnung bislang technologisch nicht erprobt. Ein Wasserstoffnetz existiert in Deutschland aktuell nicht, so dass auch die zeitliche und finanzielle Umsetzung nach wie vor unabsehbar ist. Im Gegensatz zu anderen auf Basis von CH₄ oder NH₃ laufenden Wertschöpfungsketten ist eine einfache 1:1-Substitution von Erdgas durch grünen H₂ als Energie- und Rohstoffquelle bei der Harnstoff-Synthese nicht möglich, da insbesondere das C-Atom des CH₄-Moleküls benötigt wird.

5 Schlussfolgerungen und Ausblick

Die Ausführungen in Kap. 1-4 zeigen auf, dass die Nutzung von Biomethan für einen Teil der bereits heute optimierten, energie- und kohlenstoffeffizienten Harnstoff-Produktion bei SKWP realistisch und hinsichtlich seiner ökonomischen und ökologischen Effekte in vielfacher Weise vorteilhaft wäre.

Im Rahmen der Ideen und Projekte zur schrittweisen Treibhausgas-Reduzierung seiner Produktion setzt SKWP weiterhin auf eine qualitätsvolle, vernetzte Forschung und Entwicklung. Notwendig ist in diesem Sinne unter anderem eine umfassende Ökoeffizienzanalyse von grünem Harnstoff als Dünger und Grundchemikalie für die weitere Wertschöpfung. Gemeinsam mit Partnern aus Wissenschaft und Wirtschaft soll am Beispiel konkreter biomassebasierter Wertschöpfungsketten im mitteldeutschen Raum untersucht werden, wie sich die vielfältigen Potenziale und Chancen einer auf grünem Harnstoff basierenden Kreislauf-Ökonomie nutzen lassen. Vor allem im Hinblick auf die Machbarkeit sollen dabei verschiedene Szenarien und Größenordnungen der Transformation betrachtet werden.

Weiterführend soll untersucht werden, wie sich in diesem Kontext CO₂-Senken erschließen lassen. Solche Senken können im landwirtschaftlichen Sektor beispielsweise entstehen, wenn ein moderater Teil der auf Basis der Düngung aufwachsenden Biomasse entnommen und dauerhaft gespeichert wird (CCS, CCU).

Diesbezüglich wird unter anderem die kombinierte Ausbringung von Harnstoff und Biokohle als vielversprechender Ansatz verfolgt.

Das CO₂-Senkenpotenzial von Biomasse ist erheblich, wie folgende Betrachtung zeigt: Der Einsatz eines auf Erdgas-Basis erzeugten ALZON® neo N führt bei einem N-Input von 150 kg/ha zu einem CO₂-Fußabdruck von ca. 640 kg/ha CO₂e (für Produktion, Transport und Ausbringung). Dieser lässt sich durch Entnahme und dauerhafte Speicherung von nur 400 kg Biomasse (Trockensubstanz; C-Gehalt 45 %) pro ha vollständig kompensieren; bei Düngung eines grünen ALZON® neo-N (s. Abb. 1) würden bereits 218 kg/ha ausreichen. Jede weitere Entnahme zu CCS- oder CCU-Zwecken lässt eine CO₂-Senke entstehen (pro 1 t Biomasse ca. 1,6 t CO₂e).

Entscheidend für den Erfolg der skizzierten Transformation werden die politischen und wirtschaftlichen Rahmenbedingungen sein. Ohne gesamtgesellschaftliches Interesse am Erhalt der innovativen und ressourceneffizienten heimischen Harnstoff-Produktion lassen sich die ambitionierten Projekte nicht umsetzen.

Literatur/Quellen

- EBA Statistical Report (2023): Produktion von Biomethan in Deutschland im Jahr 2022; <https://www.europeanbiogas.eu/eba-statistical-report-2023/>
- GUTcert / SKWP (2023): Verifizierung (Nr. C-22-11918) der Konformität mit den Anforderungen der ISO 14067 für Treibhausgas-Berechnungen in Bezug auf Produkte und Wertschöpfungsketten der SKW Stickstoffwerke Piesteritz GmbH
- Hoxha A, Christensen B (2018): The carbon footprint of fertilizer production: Regional reference values. International Fertiliser Society (IFS), Proceedings 805; ISSN 1466-1314
- Ruser R & Schulz R (2015). The effect of nitrification inhibitors on the nitrous oxide (N₂O) release from agricultural soils - a review. Journal of Plant Nutrition and Soil Science 178, 171-188.
- Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (2023): Statistisches Jahrbuch Ernährung, Landwirtschaft und Forsten; Jahrgang 67. www.ble-medienservice.de
- Statistisches Landesamt Sachsen-Anhalt (2023): Pressemitteilung Nr. 254/2023 zur Anbaufläche von Silomais in Sachsen-Anhalt im Jahr 2023. https://statistik.sachsen-anhalt.de/fileadmin/Bibliothek/Landesaemter/StaLa/startseite/Daten_und_Veroeffentlichungen/Pressemitteilungen/2023/e_Mai/151-Anbauflaeche_2023.pdf

Kontakt

*Dr. Thomas Kreuter, Abteilungsleiter
Landwirtschaftliche Anwendungsforschung*

Stickstoffwerke Piesteritz GmbH, Borsdorf

✉ Thomas.Kreuter@skwp.de | 🌐 www.skwp.de

Ökonomische und sozio-technische Evaluation der Herstellung und Anwendung von Pflanzenkohle als Negativemissionstechnologie in Deutschland

Zusammenfassung: Die Herstellung und Anwendung von Pflanzenkohle mittels langsamer Pyrolyse ist ein ausgereifter Technologiepfad zur Entnahme und langfristigen Speicherung von CO₂ aus der Atmosphäre. Durch die kombinierte stoffliche und energetische Verwertung von Biomasse entstehen bei Herstellern und Nutzern von Pflanzenkohle mehrere Zusatzvorteile, wie beispielsweise die Auskoppelung von erneuerbarer Energie und potentiell eine Bodenverbesserung bei Ausbringung auf landwirtschaftlich genutzten Böden. Diese Studie evaluiert die Herstellung und Anwendung von Pflanzenkohle unter Berücksichtigung des ökonomischen und sozio-technischen Kontextes. Dazu wird einerseits die Herstellung von Pflanzenkohle mit der Annuitätenmethode wirtschaftlich bewertet und andererseits werden Bedarfe und Handlungsoptionen für die weitere Entwicklung der Technologie abgeleitet, die auf einer Fokusgruppe basieren. Die Ergebnisse zeigen, dass die Wirtschaftlichkeit für Pflanzenkohleprojekte nicht eindeutig positiv ist und existierende Barrieren im regulatorischen Rahmen den Bau neuer Anlagen erschweren. Zu den politischen Empfehlungen gehört die Schaffung eines stabilen wirtschaftlichen und rechtlichen Rahmens für Pflanzenkohleprojekte, der die Biomasse mit den geringsten Nutzungskonkurrenzen begünstigt.

Abstract: The production and application of biochar is a mature technology pathway for the removal and long-term storage of CO₂ from the atmosphere. The combined material and energetic use of biomass results in several additional benefits for producers and users, such as the decoupling of renewable energy and positive soil effects when applied to agricultural soils. This study evaluates the production and use of biochar by means of slow pyrolysis, taking into account the economic context and the socio-technical barriers to market diffusion. The production of biochar from forest residues, straw and sewage sludge is evaluated using the annuity method in the current legal and economic context. Based on a focus group with different actors from the biochar nexus, socio-technical drivers and barriers are discussed. The results show that the economics for biochar projects are not clearly positive and existing barriers in the regulatory framework impede the construction of new plants. Policy recommendations for the expected market ramp-up phase include the creation of a stable economic and legal framework for biochar projects that favors biomass with the least competition for use.

1 Einleitung

Angesichts der erwarteten langfristigen Entwicklung der anthropogenen Treibhausgasemissionen werden langfristig Negativemissionstechnologien notwendig, um die Ziele des Pariser Klimaabkommens einzuhalten (Calvin et al., 2023). Eine

technologisch ausgereifte Option ist die Herstellung und Anwendung von Pflanzenkohle (PK), d. h. die Pyrolyse von Biomasse unter Ausschluss von Sauerstoff zur Herstellung von Pflanzenkohle (Lehmann & Joseph, 2015). Bei einer entsprechenden Prozessführung entsteht mit der PK eine permanente Kohlenstoffsenke (Azzi et al., 2024; Sanei et al., 2024), die zur Bodenverbesserung in landwirtschaftlichen Böden (Schmidt et al., 2021), in der Bauwirtschaft, kaskadisch auf landwirtschaftlichen Betrieben oder potentiell als Grundstoff für eine weitere industrielle Verarbeitung eingesetzt werden kann. Zusätzlich können Pyrolyseanlagen Wärme und Strom für den Energiesektor liefern. Bis Ende 2023 waren in Europa 171 Produktionsanlagen mit einer jährlichen Gesamtproduktionskapazität von 75.000 t Pflanzenkohle (oder rund 200.000 t entferntem CO₂) installiert, davon 26 % in Deutschland (European Biochar Industry, 2024).

Trotz des starken Wachstums der Branche ist die ungewisse Nachfrage nach PK aufgrund hoher Produktionspreise und fehlenden Handlungsempfehlungen für den breiten Einsatz von PK ein Hemmnis für die weitere Entwicklung und für die Bereitstellung von Negativemissionen. Durch den fehlenden regulatorischen Rahmen ist die Monetarisierung der CO₂-Entnahme bisher nur auf einem freiwilligen Markt möglich¹. Der wirtschaftliche Betrieb einer Pyrolyseanlage ist vor diesem Hintergrund fraglich. Für den deutschen Raum wurden in den letzten 10 Jahren einige Studien zur Wirtschaftlichkeit publiziert (T. Heinrich et al., 2023; Karpenstein-Machan & Bauböck, 2021; Teichmann, 2014), allerdings sind diese durch die dynamische Entwicklung der letzten Jahre entweder veraltet oder weisen einen schwer generalisierbaren Fallstudiencharakter auf. Außerdem hat sich die rechtliche Situation in der Zeit grundlegend geändert: Bis Inkrafttreten der überarbeiteten europäischen Düngemittelverordnung (DüMV) in Juli 2022 war die Nutzung von PK als Bodensubstrat auf holzige Ausgangsbiomasse beschränkt². Seitdem ist die Biomassebasis deutlich erweitert worden, wobei bspw. Klärschlamm nach wie vor nicht eingesetzt werden darf. Vor dem Hintergrund von bestehenden und sich verschärfenden Nutzungskonkurrenzen um holzige Biomasse werden deshalb unter anderem landwirtschaftliche Ernterückstände und Klärschlamm als Einsatzstoffe diskutiert (Bier et al., 2020), die allesamt technische Biomassepotenziale in Deutschland aufweisen (Brödner et al., 2024).

Vor diesem Hintergrund besteht ein Bedarf für eine verallgemeinerbare Analyse der Wirtschaftlichkeit von Pflanzenkohlepyrolyse, die auf aktuellen empirischen Daten beruht und das Potential alternativer Biomasseströme evaluiert. Wir analysieren deshalb die Verwendung von Waldrestholz, Stroh und Klärschlamm zur Herstellung von PK und gehen auf die folgenden Forschungsfragen ein:

¹ Im Februar 2024 wurde PyCCS auch im Eckpunktepapier „Langfriststrategie Negativemissionen zum Umgang mit unvermeidbaren Restemissionen (LNe)“ des Bundesministeriums für Wirtschaft und Klimaschutz als praktikable NET-Option genannt (BMWK, 2024).

² Die nationalen, gesetzlichen Beschränkungen der Düngemittelverordnung für PK als Bodenverbesserungsmittel wurden durch die Verordnung 2019/1009 der EU im Juli 2022 teilweise aufgehoben. Einsatzstoffe wie Klärschlamm dürfen zur Herstellung von Bodensubstraten aber nach wie vor nicht eingesetzt werden.

- Ist die Pyrolyse in Deutschland unter den aktuellen techno-ökonomischen Rahmenbedingungen wirtschaftlich durchführbar und was sind die relevantesten Kosten- und Erlösfaktoren?
- Welche Bedarfe haben die Akteure für die weitere Entwicklung der Pyrolyse und welche Handlungsoptionen bestehen hierfür?

Mit der Adressierung der Fragen wollen wir die wissenschaftliche und politische Diskussion über die Rolle von PK zur Bereitstellung von Negativemissionen mit aktuellen, empirischen Befunden anreichern.

2 Methodik und Daten

Zur Beantwortung der Forschungsfrage wenden wir Methoden aus der Wirtschaftswissenschaft (Annuitätenmethode) und Sozialwissenschaft (Fokusgruppe) an. Zusätzlich wurden Primärdaten im deutsch-sprachigen Raum erhoben.

2.1 Daten

Um eine aktuelle Datenbasis für die Analyse zu schaffen, wurden Primärdaten zu techno-ökonomischen zu Pflanzenkohlepyrolyse mittels Fragebögen erhoben. Von acht kontaktierten Pyrolyseanlagenherstellern aus Deutschland und Österreich haben vier den Fragebogen ausgefüllt, teilweise mit Hilfe von telefonischen und persönlichen Interviews und teilweise für mehrere Anlagengrößen. Die Primärdaten wurden mit Daten aus der Literatur, aus anderen Forschungsprojekten und mit öffentlichen Herstellerangaben ergänzt. Die konsolidierten Daten sind in einer gesonderten Datenzusammenstellung veröffentlicht (Zozmann & Lenk, 2024). Aus den Daten wurden drei generische Prozesskonfigurationen für die Pflanzenkohlepyrolyse in Deutschland abgeleitet, die eine Datenbasis für weitere Analysen liefern. Eine detaillierte Beschreibung der Datenerhebung sowie der abgeleiteten Prozesskonfigurationen findet sich im Begleitdokument zur Datenzusammenstellung.

2.2 Annuitätenmethode

Die Wirtschaftlichkeit der Pflanzenkohlepyrolyse wird mit der Annuitätenmethode nach der VDI-Norm 6025 (VDI, 2012) bewertet. Mit der Methode wird für eine Investition in eine technische Anlage bei einem gegebenen Zinssatz innerhalb eines bestimmten Investitionszeitraums eine Annuität berechnet. Die Annuität stellt eine konstante jährliche Zahlung aus allen während des Investitionszeitraums anfallenden Kosten- und Erlösströmen dar. Dazu gehören beispielsweise einmalige Investitionskosten, periodische Kosten für Wartung und Biomassebezug sowie die anfallenden Erlöse aus dem Verkauf von Pflanzenkohle oder Energie. Bei positiver Annuität ist eine Investition wirtschaftlich, wobei die Annuitäten verschiedener Anlagenkonzepte auch relativ zueinander verglichen werden können. Für die wirtschaftliche Analyse werden sechs Szenarien aus den generischen Prozesskonfigurationen der Datenzusammenstellung (Zozmann & Lenk, 2024)

und den analysieren Biomassen Waldrestholz, Stroh und Klärschlamm abgeleitet. Tab. 1 gibt einen umfassenden Überblick über alle relevanten Faktoren für die sechs Szenarien. Die Szenarien Klein-HS und Klein-ST bewerten den Betrieb einer Pyrolyseanlage auf einem landwirtschaftlichen Betrieb und die Szenarien Mittel-HS und Mittel-ST analysieren das gleiche Setting für einen Zusammenschluss landwirtschaftlicher Betriebe. Die ausgekoppelte Wärmeenergie zur Beheizung landwirtschaftlicher Gebäude oder zur Versorgung eines Nahwärmenetzes genutzt. Im Szenario Industrie-HS wird ein kommerzieller Pyrolyseanlagenbetrieb evaluiert, bei dem die ausgekoppelte thermische und elektrische Energie an die nahe gelegene Industrie verkauft wird³. Im Szenario KS wird die Karbonisierung von Klärschlamm in einer Kläranlage bewertet. Die technisch-ökonomischen Daten für den Pyrolyseprozess weichen in diesem Szenario von den generischen Prozesskonfigurationen ab und basieren auf den Angaben von Heinrich & Heinrich (2022).

Tab. 1: Technische und ökonomische Annahmen für die berechneten Szenarien. Die Angaben für Prozesskonfiguration beziehen sich auf die in der Datenzusammenstellung veröffentlichten, generischen Konfigurationen für Pflanzenkohlepyrolyse (Zozmann & Lenk, 2024). Die Wirtschaftlichkeit wird für einen Zinssatz von 6 % über einen Betrachtungszeitraum von 15 Jahren berechnet. Weitere, übergreifende Annahmen sind: Strompreis (Einkauf) von 27,31 ct/kWh, Strompreis (Verkauf) von 18,6 ct/kWh, Wärmepreis (Verkauf) von 6 ct/kWh, PK-Preis von 300€/t PK (trocken), CO₂-Entnahmepreis von 130 €/t CO₂e. Der Faktor von entnommenen CO₂e pro Tonne PK wird als 2,936 angenommen.

Szenario		Klein-HS	Klein-ST	Mittel-HS	Mittel-ST	Industrie-HS	KS
Biomasse		Waldrestholz (zerkleinert)	Weizenstroh (pelletiert)	Waldrestholz (zerkleinert)	Weizenstroh (pelletiert)	Waldrestholz (zerkleinert)	Klärschlamm (getrocknet, pelletiert)
Biomassedurchsatz	t TS/a	760	760	1.904	1.904	6.400	346,5
Wassergehalt	% (TM)	0,2	0,08	0,2	0,08	0,2	0,1
Heizwert	MJ/kg TM	18,8	17,2	18,8	17,2	18,8	13,6
Konversionsrate	% (TM)	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,41
Biomassepreis	€/t TM	100	226	100	98	100	-98
PK Produktion	t TM/a	190	190	476	476	1.600	141
Kohlenstoffgehalt der PK	% (TM)	0,8	0,6	0,8	0,6	0,8	0,19
Prozesskonfiguration		Wärme (klein)	Wärme (klein)	Wärme (mittel)	Wärme (mittel)	Wärme + Strom (groß)	-
Betriebsstunden	h/a	8.000	8.000	8.000	8.000	8.000	7.700
Stromverbrauch	kW	12	12	12	12	80	4,6
Thermische Nennleistung	kW	160	160	400	400	1.200	0
Elektrische Nennleistung	kW	0	0	0	0	220	0
Wärmesenke		Beheizung Betriebsgebäude	Beheizung Betriebsgebäude	Nahwärmenetz	Nahwärmenetz	Produzierender Betrieb	Nahwärmenetz
Stunden der Wärmeabnahme Betriebsmodell	h/a	6.000	6.000	6.000	6.000	8.000	6.000
		Landw. Betrieb	Landw. Betrieb	Zusammenschluss landw. Betriebe	Zusammenschluss landw. Betriebe	Kommerz. Pyrolyseanlagenbetreiber	Kläranlagenbetreiber
Investitionskosten	€	547.990	567.445	1.316.766	1.342.980	6.211.498	2.251.328
Betriebskosten	€/a	44.366	46.022	72.483	76.779	217.606	52.630

³ Für diese Anlagengröße wird nur die Verwendung von Waldrestholz analysiert, da die wirtschaftliche Machbarkeit der Biomasselogistik für Stroh unrealistisch erschien.

2.3 Fokusgruppe

Um Treiber und Hemmnisse für die Pflanzenkohlepyrolyse im deutschen Kontext zu bewerten, wurde am 7. Juli 2022 eine Fokusgruppendifkussion mit dem Titel „Pflanzenkohle als neue Klimaschutztechnologie in der Landwirtschaft“ durchgeführt. Die Fokusgruppendifkussion als sozialwissenschaftliche Methode zielt darauf ab, das Praxiswissen der Teilnehmenden in den Forschungsprozess einzubeziehen und die Perspektive der Teilnehmenden im diskutierten Gruppenkonsens zu erfassen (Schulz, 2012). Die Fokusgruppe wurde digital mit neun Akteuren aus Praxis und angewandter Forschung für insgesamt drei Stunden durchgeführt. Unter den Teilnehmenden befanden sich ein Pyrolyseanlagenhersteller, drei Projektierer/Berater, zwei Veredler von PK, ein anwendender Landwirt, zwei Vertreter*innen der angewandten Forschung sowie ein Vertreter des Fachverbandes Pflanzenkohle.

3 Ergebnisse

3.1 Ökonomische Bewertung

Zur ökonomischen Bewertung der Szenarien zeigt Abb. 1 die Zusammensetzung der spezifischen Annuität in € pro Tonne produzierter PK für jedes der untersuchten Szenarien. Mit der spezifischen Annuität kann die Wirtschaftlichkeit folglich auch bei unterschiedlichen Anlagengrößen bewertet und verglichen werden. Aus der Abbildung lassen sich sechs zentrale Ergebnisse ableiten: Erstens ist die Wirtschaftlichkeit der Pflanzenkohlepyrolyse in Deutschland kaum gegeben. Nur das Szenario Industrie-HS ist unter den angenommenen Bedingungen wirtschaftlich (positive Annuität), alle anderen Szenarien sind knapp oder deutlich unwirtschaftlich (negative Annuität).

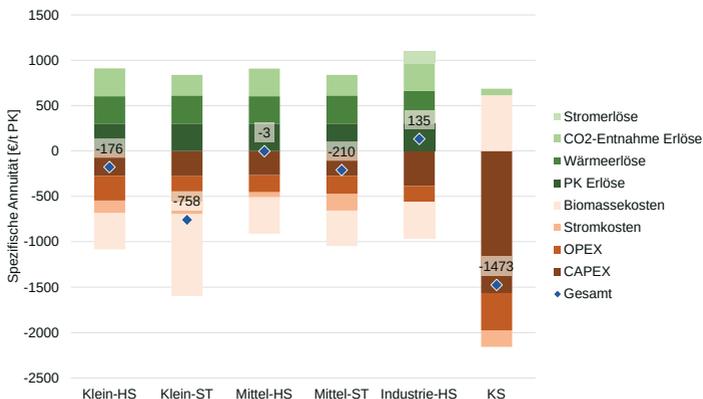


Abb. 1: Zusammensetzung der spezifischen Annuität in € pro Tonne produzierter PK für die untersuchten Szenarien. Die grünen Balken zeigen Erlöse, die roten Balken die Kosten an. Im Fall von Klärschlamm sind die Kosten für Biomasse eine Entsorgungsprämie und somit positiv. Die blauen Quadrate stellen die spezifische Gesamtannuität als Summe der Kosten- und Erlösströme dar. Bei negativer Annuität ist die Investition nicht wirtschaftlich. Quelle: Eigene Berechnungen.

Zweitens sind alle Pyrolyseprodukte (PK, erneuerbare Energie und CO₂-Entnahme) relevante Säulen für ein wirtschaftliches Geschäftsmodell, wie die grünen Balken in Abb. 1 zeigen.

Drittens treten Größenvorteile auf, da größere Anlagen eine höhere Annuität erzielen als kleinere Anlagen, die denselben Biomassetyp verwenden (Klein-HS, Mittel-HS und Industrie-HS). Skalenvorteile ergeben sich nicht nur bei der Pyrolyseanlage selbst, sondern auch bei der notwendigen, für Bioenergieanlagen typischen Infrastruktur, wie z.B. dem Substratlager oder der Fördertechnik. Viertens ist die Verwendung von Waldrestholz wirtschaftlicher als die Verwendung von Stroh (sowohl für Klein- als auch für Mittel-Szenarien). Dies liegt an den höheren Biomassebezugskosten für Strohpellets im Szenario Klein-ST, bei dem eine externe Pelletierung angenommen wird, und an den höheren Kapital- und Stromkosten im Szenario Mittel-ST, bei dem eine eigene Pelletierung angenommen wird. Fünftens führt die ganzjährige Wärmeabnahme in Kombination mit eigener Stromerzeugung die Rentabilität der Pyrolyseanlage (Industrie-HS). Die zusätzliche Stromerzeugung bringt einen zusätzlichen Erlösstrom und senkt die jährlichen Kosten durch Eigenverbrauchsdeckung. Sechstens ist die PK-Produktion aus Klärschlamm (KS) in dieser Analyse die wirtschaftlich ungünstigste Option aufgrund der deutlich höheren Kapitalkosten für die Vorbehandlung, z.B. die Trocknung. Dies ist bedeutet allerdings nicht zwangsweise, dass die Klärschlammpyrolyse wirtschaftlich unvorteilhaft ist. Da Klärschlamm durch seine Abfalleigenschaft im Vergleich zu Waldrestholz und Stroh entsorgt werden muss, wäre ein Vergleich mit anderen Methoden der Klärschlammbehandlung, wie z.B. der Monoverbrennung, sinnvoller.

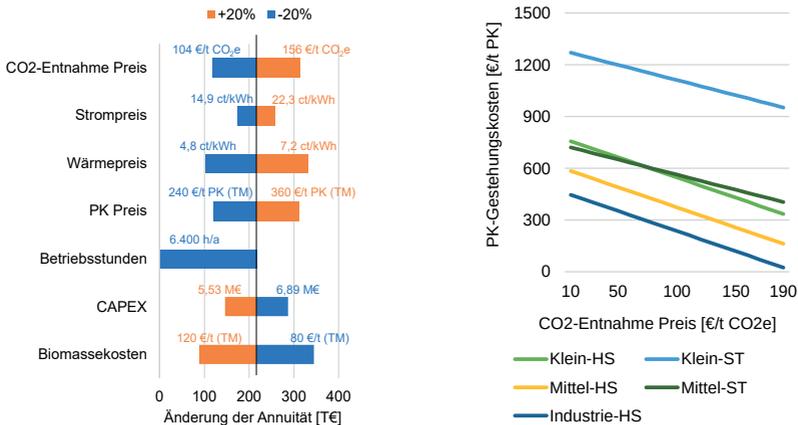


Abb.2: (links): Sensitivitätsanalyse der wichtigsten Kosten-, Ertrags- und Betriebsparameter für das Szenario Industrie-HS. Die Abszisse zeigt die Veränderung der absoluten Annuität in Tausend € bei Erhöhung (orange) oder Verringerung (blau) des Parameters um 20 %. (rechts): PK-Produktionskosten für die verschiedenen Szenarien in Abhängigkeit vom Preis für die Kohlenstoffentfernung. Beachten Sie, dass die Kosten für unbehandelten PK angegeben sind. Eine zusätzliche Behandlung, wie z.B. die Anreicherung des PK mit Nährstoffen, würde die Kosten weiter erhöhen. (eigene Berechnungen)

Um die Unsicherheit der zugrunde liegenden Annahmen abzubilden, zeigt Abb. 2 (links) die Ergebnisse einer Sensitivitätsanalyse für die wichtigsten Kosten-, Erlös- und Betriebsparameter. Die Sensitivitätsanalyse ist für das Szenario Industrie-HS dargestellt, allerdings zeigen die Analysen für die anderen Szenarien ähnliche Ergebnisse. Eine Verringerung der Betriebsstunden um 20 % hat den stärksten Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit und macht das Szenario nahezu unrentabel. Die Biomassekosten haben den zweitstärksten Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit, was ein für eine Bioenergieanlage zu vermuten ist. Auf der Erlösseite hat der für PK, Wärme und CO₂-Entnahme erzielte Preis einen ähnlich starken Einfluss, gefolgt von den Investitionskosten und dem Strompreis. Die Ergebnisse deuten darauf hin, dass die Maximierung der Betriebsstunden aus betriebswirtschaftlicher Sicht sinnvoll ist und dass die Verfügbarkeit und der Preis für den Biomassebezug eines der größten Risiken für die Anlagenbetreiber darstellen. Die Sensitivitätsanalyse hebt noch einmal hervor, dass die Erlöse von allen Pyrolyseprodukten für ein wirtschaftlich tragfähiges Geschäftsmodell notwendig und relevant sind.

Abb. 2 (rechts) zeigt die Abhängigkeit der PK-Gestehungskosten vom erzielten Preis für CO₂-Entnahme für alle Szenarien mit Ausnahme von KS. Die Erlöse aus den anderen Pyrolyseprodukten sind in die Berechnung der PK-Gestehungskosten einbezogen. Entsprechend müsste der dargestellte Marktpreis für PK im Durchschnitt für einen wirtschaftlichen Betrieb erzielt werden. Die dargestellten PK-Gestehungskosten liegen zwischen 24 und 1270 €/t PK. Die Abbildung verdeutlicht die Abhängigkeit der PK-Gestehungskosten vom Preis für die CO₂-Entnahme sowie die wirtschaftliche Vorteilhaftigkeit größerer Pyrolyseanlage und holzartiger Biomasse. Geht man von einem durchschnittlichen Preis für die Kohlenstoffentfernung von 130 €/t CO₂e aus⁴, liegen die PK-Gestehungskosten zwischen 165 und 1058 €/t PK.

⁴ Durchschnittlicher CO₂-Entnahme Preis Index für PK auf einer gängigen Handelsplattform zum Zeitpunkt der Analyse (Nov 2023). <https://puro.earth/corc-carbon-removal-indexes>

3.2. Sozio-technische Evaluation

Die von den Teilnehmenden der Fokusgruppe ermittelten Bedarfe und Handlungsoptionen sind in Tab. 2 dargestellt.

*Tab 2: Bedarfe und Handlungsmöglichkeiten für unterschiedliche Akteure der PK.
Quelle: Auswertung der durchgeführten Fokusgruppe vom 7. Juli 2022.*

Akteure der PK	Bedarfe der Akteure für die Entwicklung von PK-Projekten	Handlungsmöglichkeiten der Akteure
Landwirtschaft tlw. als Hersteller und v. a. Anwender von PK	<ul style="list-style-type: none"> - Information zu wirtschaftlich tragfähigen Geschäftsmodellen - Information zu Erkenntnissen und Erfahrungswerten zur Wirkung von verschiedenen Ausgangsstoffen und Herstellungsprozessen auf die Qualität der PK, sowie zur gebundenen Menge an Kohlenstoff 	<ul style="list-style-type: none"> - Verwertung von Reststoffen in kleinen betriebseigenen Pyrolyse-Anlagen - Zusammenschluss von mehreren Betrieben bei größeren Pyrolyse-Anlagen, inkl. Wärme- & Stromauskopplung - Diversifizierung der PK-Anwendung: Einsatz als Wirtschaftsdünger, Tierfutter, Kohlenstoffsenske
Projektierer von PK-Konzepten (inkl. Hersteller von Pyrolyse-Anlagen), Veredler und Vertrieb	<ul style="list-style-type: none"> - Unterstützung durch Förderung von Pyrolyse-Anlagen und PK-Anwendungen - Einheitliche rechtliche Anforderungen an die Anlagenherstellung und die Qualität der PK; idealerweise gemäß EBC-Zertifizierung - Planungssicherheit bei der Anlagenrealisierung durch abgestimmtes Vorgehen bei der Genehmigung 	<ul style="list-style-type: none"> - Zusammenführung von Angebot und Nachfrage vor Ort - Förderung der Koppel- und Kaskadennutzung über regionale und ganzheitliche Konzepte mit Energieauskopplung, Bodenverbesserung, Zertifizierung der Kohlenstoffbindung - Förderung von landwirtschaftlichen Zusammenschlüssen bei der Herstellung von PK - Austausch und Vernetzung mit Landwirtschaft und Wissenschaft zur Herstellung und Anwendung von PK
Interessenvertretung, Beratung und Forschung	<ul style="list-style-type: none"> - Einheitliche rechtliche Anforderungen an die Anlagenherstellung und die Qualität der PK; idealerweise gemäß EBC-Zertifizierung - Planungssicherheit bei der Realisierung von Pyrolyse-Anlagen durch abgestimmtes Vorgehen bei der Genehmigung - Generierung von wissenschaftlichen Daten zur Wirkung von verschiedenen Ausgangsstoffen und Herstellungsprozessen auf die Qualität der PK, sowie zur gebundenen Menge an Kohlenstoff 	<ul style="list-style-type: none"> - Informationen und Kommunikation zum Nutzen der PK als Maßnahmen zum Klimaschutz, Bodenverbesserung, Energiebereitstellung; zzgl. weiteren Verwertungsoptionen der Koppel- und Kaskadennutzung - Aufzeigen von Synergien mit anderen Bereichen bzgl. Ausgangsstoffen und PK-Anwendung, z. B. Agroforstwirtschaft - Stärkung der EBC-Zertifizierung zur Professionalisierung der industriellen PK-Herstellung - Austausch und Vernetzung mit Wissenschaft, Medien und Politik - Realisierung von Forschung und Entwicklung, mit Fokus auf die Generierung von wissenschaftlichen Daten
Genehmigungsbehörden*)	- K.A.	<ul style="list-style-type: none"> - Auf übergeordneter Ebene: Verständigung auf ein abgestimmtes Vorgehen bei der Genehmigung von Pyrolyse-Anlagen

4 Schlussfolgerungen

Die Ergebnisse der ökonomischen Analyse zeigen, dass die Pflanzenkohlepyrolyse unter den angenommenen Bedingungen nur bedingt profitabel ist und dass alle Pyrolyseprodukte relevant für eine wirtschaftliche Machbarkeit sind, was Ergebnisse aus der aktuellen Literatur bestätigt (Fawzy et al., 2022; Haeldermans et al., 2020; T. Heinrich et al., 2023; Karpenstein-Machan & Bauböck, 2021). Der wirtschaftliche Betrieb einer Pyrolyseanlage auf Ebene von landwirtschaftlichen Betrieben erscheint aktuell kaum machbar, was sich mit einer aktuellen Studie über die PK-Produktion aus Spätlesegras in Deutschland deckt (T. Heinrich et al., 2023). Die ökonomische Vorteilhaftigkeit von Waldrestholz bestätigt die Ergebnisse von Karpenstein-Machan & Bauböck (2021), die die Wirtschaftlichkeit einer Pyrolyseanlage in einem Wärmenetz untersuchen. Gleichzeitig wirft es die Frage auf, inwieweit die aktuellen wirtschaftlichen Rahmenbedingungen die richtigen Anreize für die Verwendung von nicht-holzartigen Reststoffströmen setzen. Vor dem Hintergrund der kommenden, nationalen Biomassestrategie stellt sich die Frage, ob die Pyrolyse eine höherwertige Verwendung als die reine Biomasseverbrennung darstellen kann, da sie zwar weniger thermische Energie bereitstellt, allerdings die zukünftig immer wichtiger werdenden Negativemissionen. Entsprechende Zielkonflikte zwischen politischen Strategien sind noch zu adressieren. Die in diesem Papier ermittelte Spanne der PK-Produktionskosten steht im Einklang mit den Ergebnissen der aktuellen Literatur mit Bezug zum deutschen wirtschaftlich-rechtlichen Rahmen (T. Heinrich et al., 2023; Karpenstein-Machan & Bauböck, 2021; Radloff, 2017), Europa (Fawzy et al., 2022; Haeldermans et al., 2020) und aktuellen beobachteten Marktpreisen⁵. Die Ergebnisse der Fokusgruppe zeigen, dass neben hohen Kosten für die PK zugängliche Informationen und Handlungsempfehlungen über die Anwendung und Wirkung von PK im Boden fehlen. Für eine weitere Kostensenkung ist insbesondere ein verlässlicher politischer Rahmen für eine Monetarisierung der Erlöse aus der CO₂-Entnahme zentral. Zusätzlich können Förderungen für Pyrolyseanlagen und für die Ausbringung von PK, aber auch eine Vereinfachung der Genehmigungsprozesse die weitere Entwicklung der Pflanzenkohlepyrolyse befördern. Schließlich können Kommunen als lokale Akteure eine Vorbildfunktion einnehmen und Investitionsrisiken verringern.

⁵ Es ist zu beachten, dass es sich bei PK nicht um ein homogenes Produkt handelt und die Preise je nach Nachbehandlung der PK und der EBC-Zertifizierungsklasse variieren.

Literatur/Quellen

- Azzi, E. S., Li, H., Cederlund, H., Karlton, E., & Sundberg, C. (2024). Modelling biochar long-term carbon storage in soil with harmonized analysis of decomposition data. *Geoderma*, 441, 116761. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2023.116761>
- Bier, H., Gerber, H., Huber, M., Junginger, H., Kray, D., Lange, J., Lerchenmüller, H., & Nilsen, P. J. (2020). EBI Whitepaper Biochar-based carbon sinks to mitigate climate change. European Biochar Industry Consortium e.V. (EBI).
- BMWK. (2024). Langfriststrategie Negativemissionen zum Umgang mit unvermeidbaren Restemissionen (LNe) – Eckpunkte. https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Downloads/E/240226-eckpunkte-negativemissionen.pdf?__blob=publicationFile&v=4
- Brödner, R., Cyffka, K.-F., Fais, A., Günther, S., Kalcher, J., Kazmin, S., Naegeli de Torres, F., Radtke, K. S., Selig, M., Sittaro, F., Thrän, D., & Wilske, B. (2024). Biomassepotenziale aus Abfällen und Reststoffen: Hintergrundpapier Stand und Perspektiven der DBFZ Ressourcendatenbank und der aktuellen Datenlage (12/2023). <https://doi.org/10.5281/ZENODO.10404435>
- Calvin, K., Dasgupta, D., Krinner, G., Mukherji, A., Thorne, P. W., Trisos, C., Romero, J., Aldunce, P., Barrett, K., Blanco, G., Cheung, W. W. L., Connors, S., Denton, F., Diongue-Niang, A., Dodman, D., Garschagen, M., Geden, O., Hayward, B., Jones, C., ... Péan, C. (2023). IPCC, 2023: Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland. (First). Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). <https://doi.org/10.59327/IPCC/AR6-9789291691647>
- European Biochar Industry. (2024). European Biochar Market Report 2023 | 2024. <https://www.biochar-industry.com/market-overview/>
- Fawzy, S., Osman, A. I., Mehta, N., Moran, D., Al-Muhtaseb, A. H., & Rooney, D. W. (2022). Atmospheric carbon removal via industrial biochar systems: A techno-economic-environmental study. *Journal of Cleaner Production*, 371, 133660. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.133660>
- Haeldermans, T., Campion, L., Kuppens, T., Vanreppelen, K., Cuypers, A., & Schreurs, S. (2020). A comparative techno-economic assessment of biochar production from different residue streams using conventional and microwave pyrolysis. *Biore-source Technology*, 318, 124083. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.124083>
- Heinrich, K., & Heinrich, S. (2022). Vom Abfall zum Gartengold: Klärschlammveredlung mit Pyrolyse. Mironde Verlag.
- Heinrich, T., Hyunjin, P., Orozco, R., Ding, Z., Álvarez-López, V., Mosquera-Losada, M. R., Steinbeis, L., & Hoffmann, T. (2023). Biochar production from late-harvest grass – Challenges and potential for farm-scale implementation. Elsevier.
- Karpenstein-Machan, M., & Bauböck, R. (2021). Bioenergiedörfer im Wandel. Berichte über Landwirtschaft - Zeitschrift für Agrarpolitik und Landwirtschaft, Aktuelle Beiträge. <https://doi.org/10.12767/BUEL.V99I2.385>
- Lehmann, J., & Joseph, S. (Hrsg.). (2015). Biochar for Environmental Management: Science, Technology and Implementation (0 Aufl.). Routledge. <https://doi.org/10.4324/9780203762264>

- Radloff, S. (2017). Modellgestützte Bewertung der Nutzung von Biokohle als Bodenzusatz in der Landwirtschaft. KIT Scientific Publishing.
- Sanei, H., Rudra, A., Przyzwitt, Z. M. M., Kousted, S., Sindlev, M. B., Zheng, X., Nielsen, S. B., & Petersen, H. I. (2024). Assessing biochar's permanence: An inertinite benchmark. *International Journal of Coal Geology*, 281, 104409. <https://doi.org/10.1016/j.coal.2023.104409>
- Schmidt, H., Kammann, C., Hagemann, N., Leifeld, J., Bucheli, T. D., Sánchez Monedero, M. A., & Cayuela, M. L. (2021). Biochar in agriculture—A systematic review of 26 global meta-analyses. *GCB Bioenergy*, 13(11), Article 11.
- Schulz, M. (2012). Quick and easy!? Fokusgruppen in der angewandten Sozialwissenschaft. In M. Schulz, B. Mack, & O. Renn (Hrsg.), *Fokusgruppen in der empirischen Sozialwissenschaft* (S. 9–22). VS Verlag für Sozialwissenschaften. https://doi.org/10.1007/978-3-531-19397-7_1
- Teichmann, V. I. (2014). Klimaschutz durch Biokohle in der deutschen Landwirtschaft: Potentiale und Kosten. *DIW: Wochenbericht*, 81 1/2, Article 81 1/2.
- VDI. (2012). VDI Richtlinie 6025: Betriebswirtschaftliche Berechnungen für Investitionsgüter und Anlagen. Verein Deutscher Ingenieure.
- Zozmann, E., & Lenk, C. (2024). Pflanzenkohle als C-Senke: Technische, ökonomische und ökologische Aspekte [dataset]. Zenodo. <https://doi.org/10.5281/zenodo.11079949>

Kontakt

Elmar Zozmann, Wissenschaftlicher Mitarbeiter

Institut für ökologische Wirtschaftsforschung (IÖW) GmbH, gemeinnützig

☎ +49 (0)30.884594-66 | ✉ elmar.zozmann@ioew.de | 🌐 www.ioew.de

BREC – Bridging the gap between Research and Education for the Circular Bioeconomy

Zusammenfassung: Zu den wichtigsten regionalen Zielen für die zirkuläre Bioökonomie in Mecklenburg-Vorpommern zählen die vollständige Umstellung der Energieerzeugung auf erneuerbare Energiequellen sowie effizientere Produktions-, Verwertungs- und Recyclingverfahren. Gerade im Agrarsektor hat sich eine enorme technologische Entwicklung vollzogen, was die nachhaltige Implementierung zunehmend erschwert. Im Rahmen des EU-Projektes BREC wurden mehrere Schlüsseltechnologien identifiziert – wie z.B. die Biogasproduktion, die Proteinextraktion, die Phosphor-Rückgewinnung, die Stickstoffanreicherung, die Biokohleproduktion und die dazugehörigen Vor- und Nachbehandlungsprozesse -, die für den Übergang zu einer Kreislaufwirtschaft von zentraler Bedeutung sind. Eines der Hauptziele des Projektes BREC ist es, in Zusammenarbeit mit einem internationalen Team von Forschern und Pädagogen eine Informationsdatenbank zu erstellen, in der detailliert beschrieben wird, wie die verschiedenen Technologien spezifische landwirtschaftliche Herausforderungen wirksam angehen können. Diese Ressource wird als umfassendes Toolkit dienen, das sowohl landwirtschaftlichen Ausbildungsstätten bei der Schulung der nächsten Generation von Landwirten als auch erfahrenen Praktikern, Beratern und Verbänden sowie Wirtschaftsvertretern zugutekommt. In diesem Bericht werden die wichtigsten Erkenntnisse aus der Projektarbeit dargestellt und im Kontext der aktuellen Herausforderungen und Ziele einer zirkulären Bioökonomie in der Projektregion diskutiert.

Abstract: The most important regional goals for the circular bioeconomy in Mecklenburg-Western Pomerania include the complete conversion of energy production to renewable energy sources as well as more efficient production, utilization and recycling processes. The agricultural sector in particular has undergone enormous technological development, which is making sustainable implementation increasingly difficult. The EU BREC project has identified several key technologies - such as biogas production, protein extraction, phosphorus recovery, nitrogen enrichment, biochar production and the associated pre- and post-treatment processes - that are central to the transition to a circular economy. One of the main objectives of the BREC project is to work with an international team of researchers and educators to create an information database detailing how the different technologies can effectively address specific agricultural challenges. This resource will serve as a comprehensive toolkit that will benefit agricultural education institutions in training the next generation of farmers as well as experienced practitioners, advisors and associations, and business representatives. This report presents the most important results of the project work and discusses them in the context of the current challenges and goals of a circular bioeconomy in the project region.

Das EU-Projekt BREC

Das Small Project „BREC – Bridging the gap between research and education for the circular bioeconomy“ ist Teil des Interreg Baltic Sea Region Programmes 2021-2027 und kofinanziert durch die Europäische Union. Das im Oktober 2022 gestartete Projekt formiert ein Konsortium um 7 Partner aus 5 Ländern des baltischen Raumes (Abb. 1). Durch die Kooperation zwischen den Regionen sollen Vorschläge für die Erprobung neuer und kommerziell verfügbarer Technologien und Praktiken erarbeitet werden, welche die zirkulare Bioökonomie vorantreiben. Darüber hinaus wird in enger Kooperation mit internationalen Partnern aus Forschung und Lehre eine Informations-Plattform eingerichtet, mit der Vertreter aus Wirtschaft und Politik aus detailliert beschriebenen Konzepten verschiedenster landwirtschaftlicher Prozessketten, Strategien und Lösungen für die aktuellen Herausforderungen im Agrarsektor entwickeln können. Diese Ressource wird sowohl landwirtschaftlichen Ausbildungsstätten bei der Schulung der nächsten Generation von Landwirten als auch erfahrenen Praktikern, Beratern und Verbänden sowie Wirtschaftsvertretern zugutekommen. Durch die Schaffung einer internationalen Gruppe von Interessenvertretern, sollen diese relevanten Zielgruppen mit Informationen über neue Kreislaufwirtschaftspraktiken erreicht werden.



Abb. 1: Projektkonsortium des EU-Projektes BREC

Die Hauptaufgabe der **Professur für Abfall- und Stoffstromwirtschaft** der Universität Rostock beinhaltet neben der organisatorischen Maßnahmenplanung auch die wissenschaftliche Begleitung des Projektes. Es sollen dabei Daten über den Stand der Technik in der Landwirtschaft sowie Potenziale ermittelt werden. Aus diesen Erkenntnissen erfolgt die Konzeptentwicklung für eine zirkuläre Bioökonomie im baltischen Raum. In einem zweiten Arbeitsbereich sollen die Inhalte der landwirtschaftlichen Ausbildung evaluiert und um nachhaltige Ansätze im Sinne einer kreislaufbasierten Wirtschaftsweise ergänzt werden. Dazu soll in eigens ein Modul für die Lehre entwickelt werden. Unterstützt wird die Professur für Abfall- und Stoffstromwirtschaft dabei unter anderem durch

die **Region Västra Götaland** aus Schweden. Sie hat den Auftrag, die berufliche Bildung auf der Ebene der Sekundarstufe II und der höheren Berufsbildung im Projekt zu verwalten sowie landwirtschaftliche Ausbildungsstätten und Unternehmen in der Region als Testumgebung für die Entwicklungen und Innovationen zu nutzen. So können Wissenschaft, Hochschulen und Industrie im Rahmen des Projektes zusammenkommen, um gemeinsam Wachstum und Entwicklung im Bereich der zirkularen Bioökonomie zu fördern. Die entsprechenden Pilot-Konzepte können sowohl im labor- als auch im industriellen Maßstab in einer simulierten oder realen Benutzerumgebung erprobt werden. Jede Testumgebung besteht dabei sowohl aus der jeweiligen physischen Infrastruktur (z.B. Geräte, Einrichtungen, Landschaften) als auch aus weicheren Werten wie Kompetenz, Organisation und Außenbeziehungen.

Im Bereich Technologieentwicklung wird die Professur für Abfall- und Stoffstromwirtschaft durch den Partner **RISE Research Institutes of Sweden AB (RISE)**, **Abteilung Biorefinery and Energy** unterstützt. **RISE** ist ein schwedisches staatliches Forschungsinstitut, das mit Universitäten und Unternehmen für Innovationsentwicklung und nachhaltiges Wachstum zusammenarbeitet. RISE widmet sich der industriellen Forschung und Innovation und führt Tests und Zertifizierungen durch, insbesondere mit dem Fokus auf Bioökonomie, Umwelt, Materialien, Transport und Sicherheit. RISE, mit Hauptsitz in Göteborg ist an rund 35 weiteren Standorten in ganz Schweden tätig und sowohl in Norwegen, in Frankreich als auch in Belgien vertreten. Die Aufgabe im EU-Projekt BREC liegt für RISE darin, eine Bedarfsanalyse für biobasierende Produkte in der Landwirtschaft der teilnehmenden Regionen durchzuführen. Geeignete Technologiemodule für ein Bioraffinerie-Pilotanlagekonzept sollen hierbei identifiziert werden. Ein besonderer Fokus im Pilotanlagenkonzept liegt in der Kombination der Nährstoffrückgewinnung, der Biokraftstoffproduktion sowie proteinhaltiges Futtermittel zu generieren. Das Anlagenkonzept soll den Grundstein für den Bau neuer oder für die Modernisierung bestehender Pilotanlagen legen. Die ausgewählten Technologieansätze und Prozessschritte sollen nachfolgend in den regionalen Wissenstransfer sowie in das Lehrplanmaterial für die landwirtschaftlichen Schulen in den Partnerregionen fließen.

Herausforderungen und Möglichkeiten für die Region

Das Projekt BREC-Projekt vernetzt landwirtschaftliche Schulen, Behörden, Anlagenbetreiber und Forschungsinstitutionen miteinander, um landwirtschaftliche Kreislaufverfahren unter zukünftigen Fachkräften und Vertretern aus der Praxis, die sich mit der Kreislaufwirtschaft beschäftigen, zu verbreiten. Für die Schaffung einer zukunftsfähigen Bildungslandschaft zur nachhaltigen Implementierung technologischer Entwicklungen im Agrarsektor ist die Struktur der Aus- und Weiterbildung von entscheidender Bedeutung. In der Projektregion lässt sich der Qualifikationsrahmen auf die Bereiche Schulen (Sekundarstufe II), Berufsschulen, Fachhochschulen sowie Hochschulen eingrenzen. Die Auseinandersetzung mit den aktuellen Bildungs- und Ausbildungsangeboten sowie

Lehrplänen innerhalb der Projektregion offenbart, dass die Bioökonomie bereits einen Anteil in den unterschiedlichen Lehr- und Ausbildungsmodulen einnimmt. Dieser ist in seiner Ausprägung sehr variabel. So scheint die Idee der Bioökonomie in der Lehre zwar präsent, jedoch variieren die Komplexität und Detailstufe der zu vermittelnden Inhalte stark. Die Gründe hierfür liegen vor allem in der Vielfalt der Ausbildung im Agrarsektor. Es existieren diverse unterschiedliche Job-Profile, deren wirklicher Bezug zur zirkularen Bioökonomie stark voneinander abweichen. Hinzukommt, dass die einzelnen Berufsfelder oft stark voneinander isoliert sind, sodass keine echte Verbindung vorhanden ist. Dies stellt nicht nur für die Lehrkräfte, sondern auch für die künftigen Fachkräfte eine Herausforderung dar. Die größte Lücke in der Vermittlung der Prinzipien und Werte besteht aus unserer Sicht durch den fehlenden ganzheitlichen Blick auf die zirkuläre Bioökonomie. Dieses Themenfeld weist eben auch aktuell eine noch zu unterschiedliche Relevanz in den diversen Job-Profilen und Studiengängen auf.

Eine der Lösungen wäre die Vermittlung der Lehrinhalte in einem übergeordneten Lehrmodul zur Schaffung eines generellen Überblicks über die zirkuläre Bioökonomie, welches in den Lehrplan aller Bildungs- und Ausbildungsangebote integriert und als Block-Seminar abgehalten wird. Ergänzend dazu werden dann in profilspezifischen Kursen die jeweils relevanten angewandten Konzepte und Beispiele mit Fokus auf den praktischen Charakter vermittelt. Die Komplexität und Detailsstärke lassen sich dabei individuell an das entsprechende Bildungsniveau anpassen. Im Zuge von Seminaren erfolgt zudem die Verbindung der unterschiedlichen Felder der zirkulären Bioökonomie im Agrarsektor miteinander. Im Rahmen eines digitalen Tools könnten durch den Entwurf eines fiktiven Bioökonomie-Modells, welches sektorübergreifend zukunftsfähige Technologien und Konzepte in sich vereint und beispielhaft exerziert, die diversen Lehrinhalte kombiniert und über Videos sowie Animationen attraktiv illustriert werden.

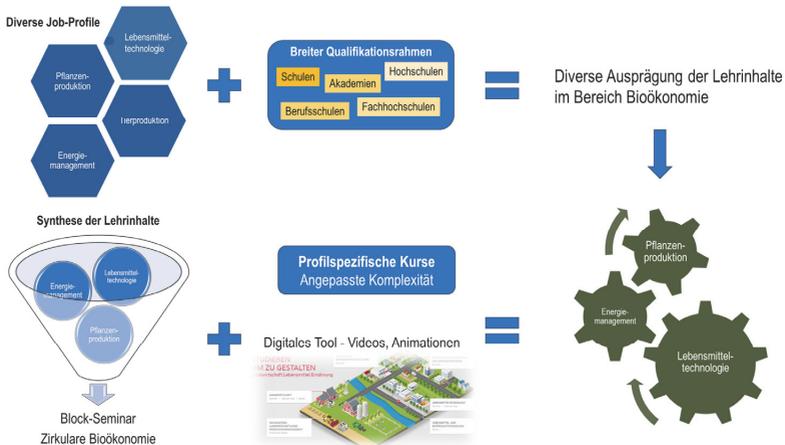


Abb. 2: Vielfalt der Ausbildung im Agrarsektor – Herausforderungen und Lösungen

Zudem kann durch verstärkte Zusammenarbeit und Erfahrungsaustausch zwischen Forschungseinrichtungen, landwirtschaftlichen Schulen und Unternehmen innerhalb der Projektregion ein Beitrag zum Wissenstransfer über die zirkulare Bioökonomie geleistet werden.

Aus wirtschaftlicher Sicht liegen die Herausforderungen bei der Implementierung der im Projekt identifizierten Schlüsseltechnologien im Zuge der Umstellung der Energieerzeugung auf erneuerbare Energiequellen sowie der Integration effizienterer Produktions-, Verwertungs- und Recyclingverfahren neben dem Fachkräftemangel auch in der Attraktivität des Standorts sowie der Bereitschaft von Unternehmen zur industriellen Vernetzung. Um Getreide, Fleisch, Milch und Eier zu produzieren, muss die Landwirtschaft in der Projektregion Rohstoffe wie Brennstoffe, Mineraldünger und Kraftfutter, vor allem aber Eiweiß, importieren. Der Landwirtschaftssektor könnte sich mit diesen Rohstoffen selbst versorgen, dies würde aber Veränderungen beim Anbau von Pflanzen, der Fruchtfolge sowie eine effizientere Nutzung der betriebsinternen Ströme von Biomasserückständen voraussetzen. Eine Möglichkeit, eine höhere Selbstversorgung und eine optimierte Bioökonomie zu erreichen, ist der Bau regionaler Bioraffinerien, die Reststoffe aus der Landwirtschaft nutzen. Diese regionalen Bioraffinerien können aus lokal angebauten stickstofffixierenden und eiweißreichen Pflanzen wie Leguminosen Eiweißfuttermittel für die Viehzucht (Schweine und Geflügel) gewinnen, wobei Pflanzenreste aus der Eiweißgewinnung zur Biogaserzeugung verwendet werden. Die Bioraffinerie kann auch lignozellulosereiche Ernterückstände aus der Landwirtschaft wie Stroh zur Herstellung von Biokraftstoffen und Biokohle verwenden, die in der Landwirtschaft als erneuerbare Rohstoffe eingesetzt werden können. Gülle kann sowohl für die Biogaserzeugung als auch für die Gewinnung von Phosphor verwendet werden, was eine Umverteilung zwischen den landwirtschaftlichen Betrieben zur effizienteren Nutzung ermöglicht und den Bedarf an Phosphorimporten über Mineraldünger verringert. In einer Bioraffinerie können auch entsprechende Aufbereitungsschritte durchgeführt werden, um die Ammoniak- und Methanemissionen beim Umgang mit Gülle in den landwirtschaftlichen Betrieben zu verringern, die andernfalls beim Einsatz unbehandelter Gärreste entstehen könnten. Durch nationale und internationale Zusammenarbeit zwischen Unternehmen aus dem Agrarsektor, die auf unterschiedliche Lösungen spezialisiert sind, können in diesem Zusammenhang Konzepte zur Erprobung neuer und kommerziell verfügbarer Technologien und Praktiken erarbeitet und umgesetzt werden. Das Projekt BREC kann durch die Initiierung einer internationalen Gruppe von Interessenvertretern aus Landwirtschaft und Politik, die Entwicklung und Beschreibung möglicher Pilotanlagenkonzepte als Grundlage für kommende Projekte sowie die Vermittlung von Informationen über neue Kreislaufwirtschaftspraktiken vorantreiben.

Methodische Ansätze im Projekt

Die Bearbeitung des Projektes BREC erfolgt über diverse methodische Ansätze. In einem ersten Schritt erfolgte die Entwicklung und Bearbeitung eines Fragebogens durch die Projektpartner in Zusammenarbeit mit Vertretern aus Wirtschaft und Politik. Die Ergebnisse dienen unter anderem zur Darstellung verfügbarer Ressourcen und Rohstoffe sowie erzeugter Wirtschaftsgüter in der Projektregion. Darüber hinaus wurden sowohl relevante Problembereiche, wie Umweltbelastungen als auch priorisierte Aktionsbereiche in den Bereichen Wirtschaft und Gesellschaft zusammengefasst. Weitere Ziele waren die Beschreibung zukunftsfähiger Technologien, ein Überblick über bestehende Pilotprojekte sowie die Identifizierung kooperativer Partner aus Wirtschaft, Forschung und Lehre, die zur nachhaltigen Implementierung technologischer Entwicklungen in der Projektregion beitragen können.

Im Zuge dieses Vorhabens wurde intensive Netzwerkarbeit betrieben. Dies galt neben der Findung regionaler Partner auch der Schaffung internationaler Verbindungen. Hierzu wurden durch das Projektkonsortium verschiedene Informationsveranstaltungen, Workshops und Webinare angeboten. Die überwiegend im Agrarsektor und der Abfallwirtschaft verorteten Partner wurden im Laufe des Projektes bei der Erreichung der Projektziele durch die Organisation von Arbeitsgruppen und die Durchführung regelmäßiger Partner-Meetings in die Konzeption von Pilot-Technologien und Inhalten der landwirtschaftlichen Ausbildung einbezogen. Bei der Identifikation von geeigneten Technologien sowie der Entwicklung von Pilot-Konzepten waren vor allem Unternehmen aus der Region beteiligt, die sich bereits in den Bereichen Flächennutzung, Substratauswahl und -vorbehandlung, Recycling von Rest- und Nebenproduktströmen sowie Schaffung industrieller Symbiosen engagieren. Im Rahmen dieser Kooperation wurden verschiedene Ideen konzipiert und entsprechende Fallstudien durchgeführt.

Eines der wichtigsten Ziele von BREC ist die Entwicklung neuer Lehrmaterialien für die landwirtschaftlichen Ausbildungseinrichtungen in den Partnerregionen. Um den Wissenstransfer über den Projektrahmen hinaus zu gewährleisten, werden innerhalb einer Referenzgruppe Strategien und Produkte zur Kompetenzentwicklung in der Lehre erstellt. Neben Schulungen für Lehrkräfte zur Erweiterung ihrer Kenntnisse und Fähigkeiten, umfasst die Produktpalette auch diverse Materialien für Vorlesungen, Kurse und Seminare sowie Lehrpläne, die in verschiedenen Kursen umgesetzt werden können, um die kreislaforientierte Bioökonomie in die Lehre im Agrarsektor nachhaltiger einzubeziehen.

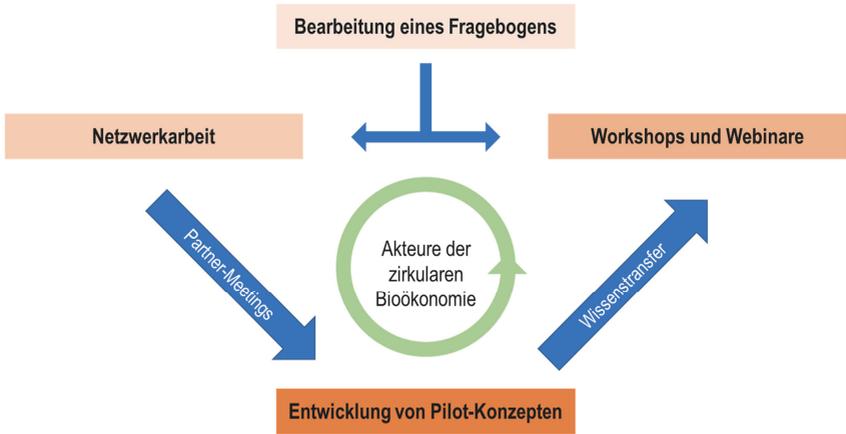


Abb. 3: Fließschema methodische Ansätze im EU-Projekt BREC

Beispiele aus der Projektarbeit und ausgewählte Ergebnisse

Bearbeitung eines Fragebogens

Mit der Kartierung der biologischen Ressourcen in den Partnerregionen (Abb.4) liegen seit September 2023 die ersten vorläufigen Ergebnisse des Projekts vor. Mit Hilfe der ermittelten Biomasse-Potenziale sowie relevanter Problem- und priorisierter Aktionsbereiche konnte der Bedarf an verschiedenen Technologien und Produkten in der Partnerregion ermittelt werden (Abb. 5).

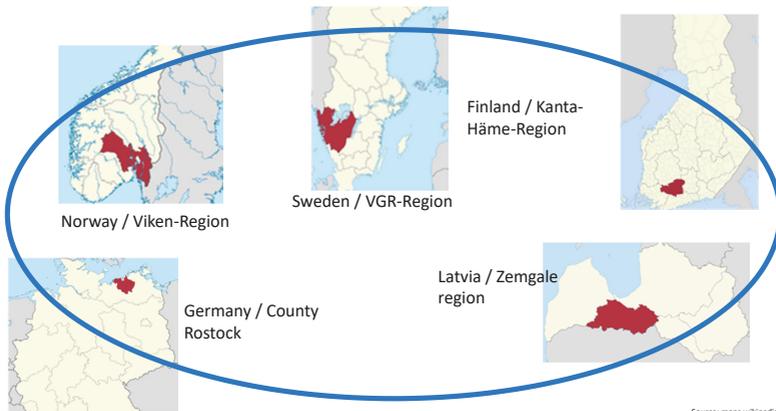


Abb. 4: Beteiligte Partner-Regionen im EU-Projekt BREC 2023-2024
(Quelle Karten: www.wikipedia.org)

Die Ergebnisse liefern zudem einen Überblick über bestehende Pilotprojekte und bildeten die Grundlage für die Identifizierung und Beschreibung der relevanten Technologien, potenzieller Projektpartner, Forschungsakteure sowie Schulen für die Implementierung.

Ein Ergebnis der Umfrage ist, dass bereits in allen beteiligten Regionen Biogasanlagen zur Energiegewinnung im Pilot- und Demonstrationsmaßstab vorhanden sind. Besonders in den Regionen der Länder Schweden, Norwegen und Deutschland befinden sich erweiterte Pilot- und Demonstrationsanlagen mit den Technologieschritten Gärrestseparation und Nährstoffrückgewinnung aus Gärresten. In Deutschland befinden sich auch bereits Biogas-Pilotanlagen in Kombination mit Methanisierung von Synthesegasen in Planung bzw. in Betrieb. Insbesondere in Schweden werden auch Pilotanlagen mit nachgeschalteten Biogasaufbereitungseinheiten zur Kraftstoffgewinnung (Biomethan) und CO₂-Verflüssigungs-Einheiten demonstriert. Weiterhin werden in Schweden Demonstrationsanlagen für die Faserstoffgewinnung sowie Proteingewinnung aus ligninhaltigen Substraten wie z.B. Grünschnitt getestet. In Finnland liegt der Fokus neben der üblichen Biogaserzeugung als Energieträger auch in der Produktion von Biokohle aus Gärresten.

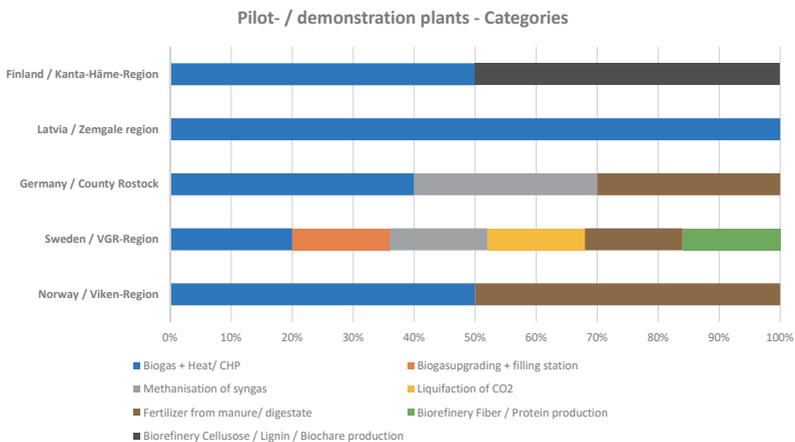


Abb. 5: Anteile und Technologieeinsatz der laufenden Pilot- und Demonstrationsvorhaben in den Regionen

Im Rahmen des Projektes BREC wurden in der gesamten Projektregion diverse regionale und überregionale Verbindungen zu unterschiedlichsten Institutionen und Unternehmen aufgebaut. In Mecklenburg-Vorpommern hat die Professur für Abfall- und Stoffstromwirtschaft der Universität Rostock einen intensiven Austausch mit Akteuren aus den unterschiedlichen Bereichen der Landwirtschaft sowie innerhalb ihrer Schnittmengen zu anderen Sektoren gepflegt. Daraus ist unter anderem eine Kooperationsvereinbarung mit der Gut Dummerstorf GmbH

hervorgegangen, die der Entwicklung von Pilot-Konzepten und Feldforschung auf dem Gebiet der zirkularen Bioökonomie zugutekommt. Darüber hinaus steht die Hochschule Neubrandenburg sowohl in beratender Funktion im Rahmen der Kompetenzentwicklung im Lehrbereich als auch für die Erprobung der entwickelten Lehrpläne und -materialien zur Verfügung. Es ist damit erfolgreich gelungen Partner aus Forschung, Lehre und Wirtschaft für die Erreichung der Ziele über den Projektrahmen hinaus zu gewinnen.

Workshops und Webinare

Online Workshop und virtuelle Studienreise Biogasproduktion und Insektenzucht

Im Oktober 2023 veranstaltete die **Professur für Abfall- und Stoffstromwirtschaft** der Universität Rostock ein Seminar zur Vorstellung innovativer Raffineriekonzepte mit regionalem und nachhaltigem Hintergrund. Zu diesem Thema wurde ein virtueller Rundgang entlang der Biogasproduktion der Gut Dummerstorf GmbH organisiert. Bei dieser virtuellen Studienreise wurden aktuelle und zukünftige Herausforderungen der landwirtschaftlichen Produktion erläutert. Darüber hinaus wurde einen Einblick in Möglichkeiten der Prozessoptimierung im Bereich der Substratauswahl und -vorbehandlung sowie der Gasaufbereitung geleistet. Ein Highlight dieser Veranstaltung war die Vorstellung des jungen Rostocker Unternehmens ENTAVA GmbH aus Roggentin. Diese Insektenfarm produziert seit 2022 hochwertige Proteine auf Basis landwirtschaftlicher Reststoffe. Ein autarkes Konzept zur Energieversorgung rundet das Nachhaltigkeitskonzept ab. Darüber hinaus wurden aktuelle Informationen zur Ausbildung im Agrarbereich vermittelt. Zielgruppen für diese Veranstaltung waren Lehrer, Schüler und alle anderen Akteure, die ebenfalls zu einer zirkularen Bioökonomie und einer effizienteren Bewirtschaftung in der Projektregion beitragen.

Webinar: Technologien für eine zirkuläre Bioökonomie

Im Rahmen des EU-Projekts BREC werden im Zuge von Webinaren Praktiken der kreislauforientierten Landwirtschaft vermittelt, die erheblich weniger Umweltauswirkungen haben als die konventionelle Landwirtschaft. Im April 2024 fanden dazu drei kostenfreie Online-Veranstaltungen zu verschiedenen Themen aus dem Bereich der zirkularen Bioökonomie in der Projektregion statt. Der Fokus lag dabei auf den im Projekt untersuchten Schlüsseltechnologien und Konzepten, wie der landwirtschaftlichen Bioraffinerie. Zudem wurde die Veranstaltung genutzt, um innovative Pilot-Projekte vorzustellen sowie eine Einführung in das ausgearbeitete Lehrmaterial mit dem dazugehörigen Unterrichtsplan zu Kreislauftechnologien in der Bioökonomie zu geben.

Technologien und Entwicklung von Pilot-Konzepten

Im Rahmen der EU-Projektes BREC wird ein Pilot- Konzept entwickelt, bei dem die Landwirtschaft ILUC-freie Biomasse an eine Bioraffinerie liefert (Abb. 6). ILUC steht hierbei für „Indirect Land Use Change“ und betrachtet die Auswirkungen, die durch den Anbau von Energiepflanzen indirekt entstehen können. Im vorliegenden Konzept sollen daher ausschließlich Restbiomassen und keine Energiepflanzen zum Einsatz kommen. Das Konzept kombiniert die lokale Produktion von Futtermitteln, Energie, Kraftstoff und Kohlenstoffspeicherung und besteht bisher aus 6 Prozessschritten zur Erzeugung von Grasprotein, Biogas, Biomethan, Nährstofffraktionen, Biokohle und transportablen verflüssigten Kohlendioxid. Die in den landwirtschaftlichen Betrieben der Region verfügbaren Restströme wie flüssiger Gülle, Festmist und Stroh sollen als Inputmaterialien für das Bioraffineriekonzept verwendet werden. Aber auch Reststoffströme aus Garten- und Obstanbau wie z.B. Apfel- und Traubentrester sind mögliche Inputbiomassen.

Das Konzept einer landwirtschaftlich basierten Bioraffinerie kann wie folgt beschrieben werden:

Die Proteingewinnung aus Gras- und Hülsenfrüchten erfolgt entweder durch ein Verfahren, das an erntefrischen Pflanzen angepasst ist und ein Proteinkonzentrat erzeugt, oder durch die Verwendung von silierten Pflanzen zur Erzeugung eines flüssigen Proteinfutters.

Landwirtschaftliche Restströme sowie fasrige Rückstände aus der Proteingewinnung aus Gras/Leguminosen werden zur Biogaserzeugung genutzt. Die Gärreste werden nachfolgend in der Nährstoffrückgewinnungseinheit durch verschiedene Nährstoffanreicherungsverfahren behandelt und in folgende Fraktionen getrennt: Fasern, stapelbare Gärreste (P-Dünger), flüssige Gärreste (N- und K-Dünger).

Die Pflanzenfasern, die bei der Vergärung nicht abgebaut werden, werden vom Gärrest durch Separationsverfahren abgetrennt und zu einer HTC-Anlage transportiert, die die Fasern in einem bei hoher Temperatur und hohem Druck betriebenen Verfahren in Biokohle umwandelt.

Das erzeugte Biogas wird einer Biogasaufbereitungsanlage zugeführt, um Biomethan mit Kraftstoff- bzw. Erdgasqualität zu erzeugen. Der durch die Aufbereitungsanlage abgetrennte Kohlenstoffdioxidstrom wird einer Verflüssigungseinheit zugeführt. Das CO₂ liegt dann als transportfähiges Endprodukt vor.

Im Rahmen einer ergänzenden Fallstudie in Kooperation mit der Gut Dummerstorf GmbH geht es um die Untersuchung der Akquise, Vorbehandlung und Verwertung alternativer Substrate in landwirtschaftlichen Produktionsprozessen am Beispiel von Schnittgut aus der Gewässerunterhaltung. Ziel der laufenden Untersuchungen ist die Entwicklung von Pilot-Konzepten zur Nährstoffrückge-

winnung und Energieproduktion sowie ggf. die Konzeption bautechnischer Maßnahmen zur Prozessoptimierung.

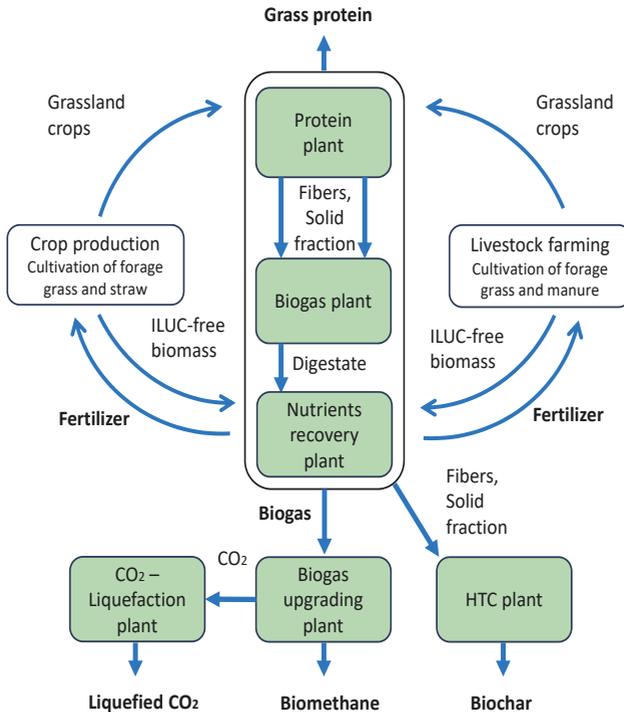


Abb. 6: Pilot-Anlagenkonzept landwirtschaftlich basierte Bioreffinerie (Beispiel)

In einer ersten Versuchsphase wurde die Verwertung von Schnittgut aus der Gewässerunterhaltung zur Erzeugung von Biogas untersucht. Hierzu wurden umfangreiche Bemühungen zur Vernetzung der relevanten Akteure aus Gewässermanagement und Landwirtschaft angestellt. Gemeinsam mit dem Wasser- und Bodenverband „Untere Warnow-Küste“ wurde an einem, im direkten Umfeld der Gut Dummerstorf GmbH gelegenen, Gewässerabschnitt ein angepasstes Konzept zur Gewässerunterhaltung entwickelt und umgesetzt. Im Zuge dieser Studie konnten verschiedene technische Applikationen zur mechanischen und thermischen Vorbehandlung der gewonnenen Biomasse aus der Gewässerpflege erprobt und auf ihre wirtschaftliche Betriebsweise hin untersucht werden. Der Betrieb Gut Dummerstorf GmbH ist an der wirtschaftlich rentablen teilweisen Substitution herkömmlicher Biogas-Substrate sowie innovativer Wege zur Nährstoffrückgewinnung interessiert und stellte dafür die Kapazitäten und Ressourcen des Betriebes sowie vorhandene Technik für diesen Versuch zur Verfügung.

In einer zweiten Versuchsphase wird derzeit die Verwertung von Schnittgut aus der Gewässerunterhaltung zur Nährstoffrückgewinnung erprobt. Der Teil der Biomasse, der für die Biogasferzeugung nicht geeignet erscheint, wird direkt für die Herstellung von organischem Dünger verwendet. In einem technisch optimierten Kompostierungsprozess (Abb. 7) wird das aus der Biomasse austretende Sickerwasser aufgefangen und im Pflanzenbau als Ergänzung zu den dabei erzeugten Erden verwertet. Die Auswertung der Experimente und Feldversuche sollen Aufschluss darüber geben, ob die aus der Gewässerunterhaltung gewonnene Biomasse mittels verschiedener Verfahren in landwirtschaftliche Produktionsprozesse integriert und sowohl stofflich als auch energetisch vollständig und wirtschaftlich verwertet werden kann.



Abb. 7: Kompost-Sickersaft-Reaktor

Wissenstransfer

Arbeit der Referenzgruppe für Lehrkräfte in der Projektregion

Im Frühjahr 2023 versammelte sich die Referenzgruppe der Lehrkräfte im Projekt für das erste Webinar zur Kompetenzentwicklung. Die Forscher vermittelten den Pädagogen theoretisches Wissen über Lösungen und Technologien der zirkularen Bioökonomie. Auf Grundlage dieses Wissens entwickelte die Gruppe dann Lernziele für künftige Unterrichtsmaterialien, die an Berufsschulen der Sekundarstufe II sowie an höheren (Berufs-)Bildungszentren in der Projektregion eingesetzt werden können. Faktoren wie avisierte Altersgruppen, Lehrinhalte, gewünschte Fähig- und Fertigkeiten der Schüler und Studenten sowie Vermittlungspfade waren Grundlage für die Entwicklung entsprechender Lernziele. Als visuelles Werkzeug dient hierfür ein „Bioökonomie-Wissens- und Kompetenzbaum“, an dessen Wurzeln das Wissen, im Baumstamm das Verständnis und in der Krone neue Fähigkeiten wachsen.

Zwischen dem 17. und 19. Oktober 2023 reiste die Referenzgruppe der Lehrkräfte nach Finnland zu einer Studienreise im Rahmen von zwei Hauptveranstaltungen zur Kompetenzentwicklung für Lehrkräfte in der Projektregion. Die Teilnehmer besuchten zunächst die NEVEL-Anlage zur Verarbeitung von Lebensmittelabfällen und Klärschlamm. Ziel war es, die wesentlichen Prozesse zur Aufreinigung organischer Abfälle und Überschüsse aus der Lebensmittelindustrie sowie die Verwertung in Biogasfermentern zu vermitteln. Zudem besichtigte die Referenzgruppe die Labors des LUKE-Forschungszentrums, wo Einblicke in Biogas-, Bio-raffinerie- und Biokohleprozesse und -forschung gewonnen wurden. Die Reise diente auch der Entwicklung neuer Bildungsmaterialien, Strategien für Kooperationsmöglichkeiten sowie der nachhaltigen Nutzung von Projektideen und -produkten. Es wurden Ideen über Praktikumsmöglichkeiten für Berufsschulen und Universitätsstudenten und Austauschprogramme zwischen den an diesem Projekt beteiligten Ländern diskutiert, mit dem Ziel, auf den bestehenden Partnerschaften aufzubauen und die Nachhaltigkeit der Ergebnisse im Auge zu behalten. Im Zuge dessen wurde vom 18.03.-28.03.2024 ein Studentenpraktikum für Auszubildende aus Schweden zwischen der Universität Rostock und der „Biologiska Yrkeshögskolan“ in Uddetorp zum Thema „Landwirtschaft in Deutschland – Nachhaltige Pflanzenproduktion“ organisiert. Im Rahmen von Führungen, Seminaren und Exkursionen wurden die unterschiedlichen Fassetten des nachhaltigen Pflanzenbaus auf verschiedenen Skalenebenen vermittelt. Dabei wurden auch Erfahrungen, Techniken und Materialien der BREC-Referenzgruppe für Lehrkräfte angewendet.

Die Entwicklung der Lehrmaterialien für die Aus- und Weiterbildung im Agrarsektor umfasst mittlerweile eine umfangreiche Produktpalette. Neben dem geplanten e-Book für Lehrkräfte, welches Inhalte für die Gestaltung von Vorlesungen und Seminaren bereitstellt befindet sich das Modul „Bioökonomie“, welches in den Lehrplan aller Bildungs- und Ausbildungsangebote integriert werden soll, in einem fortgeschrittenen Stadium. Es werden derzeit Lehrmaterialien sowie -pläne fertiggestellt, welche die Ideen und Prinzipien einer zirkularen Bioökonomie in der Landwirtschaft in unterschiedlicher Detailschärfe vermitteln sollen. Für den Entwurf eines fiktiven Bioökonomie-Modells im Rahmen eines digitalen Tools wurden anschauliche Piktogramme und Animationen zur Illustration zukunftsfähiger Technologien und Konzepte in der Landwirtschaft generiert.

Diskussion

Das EU-Projekt BREC widmet sich der Entwicklung von zukunftsfähigen Technologiekonzepten im Hinblick auf eine optimierte Nutzung von Reststoffströmen in der Landwirtschaft. Dies steht im Einklang mit den Zielen einer zirkularen Bioökonomie in der Projektregion und ist gleichzeitig eine wichtige Grundlage für die vollständige Umstellung der Energieerzeugung auf erneuerbare Energiequellen (Ministerium für Wirtschaft, Infrastruktur, Tourismus und Arbeit MV 2015). Während die Forschung zur Entwicklung neuer Technologien und Lösungen für aktuelle und künftige Herausforderungen schnell voranschreitet, hinken

die Ausbildung und die Ausstattung mit neuem Wissen und Fähigkeiten hinterher; bei gleichzeitig stetig wachsendem Bedarf an komplex geschulten Fachkräften. (Thrän & Moesenfechtel 2020). Gerade im Agrarsektor existieren diverse unterschiedliche Ausbildungs-Profile, in denen oft der ganzheitliche Blick auf zirkuläre Bioökonomie fehlt. Die einzelnen Berufsfelder sind stark voneinander isoliert, was nicht nur eine Herausforderung für die Auszubildenden, sondern auch für die Lehrkräfte darstellt. Der Aufbau einer Referenzgruppe für Lehrer zur Kompetenzentwicklung im Rahmen des Projektes BREC bietet die Chance durch den Entwurf eines profilspezifischen Ausbildungsprogramms Lehr- und zukünftige Fachkräfte optimal auf die anstehenden Aufgaben vorzubereiten. Am wichtigsten ist dabei die Vermittlung der Inhalte. Die Vielfalt an Definitionen und Leitbildern für eine zirkuläre Bioökonomie ist mittlerweile so groß, dass es schwierig ist einen roten Faden durch die vielfältigen Ausbildungsprofile zu spinnen (Perbandt et al. 2021). Die Referenzgruppe des Projektes stellt daher Grundlagen zu den Prinzipien einer nachhaltigen Bioökonomie im Agrarsektor zusammen. Das Wissen zu den einzelnen Bereichen bezieht sich dabei auf verschiedene Glieder von größeren Prozessketten und verbindet diese in unterschiedlichen Formaten miteinander.

Um Ziele für eine zukunftsfähige Bioökonomie zu definieren, ist generell, wie auch in der Landwirtschaft, die Identifikation von Ressourcen, Kapazitäten und Potentialen in der Region von entscheidender Bedeutung (Thrän & Moesenfechtel 2020). Ein umfassendes Monitoring, welches Daten über den Stand der Technik sowie über verfügbare Ressourcen und Wirtschaftsgüter in der Projektregion in einer Informationsdatenbank bündelt und diese so den Akteuren aus Forschung, Lehre, Politik und Wirtschaft bereitstellt, ist eines der Kernziele von BREC.

Basierend auf den Informationen aus der Region wurden Schlüsseltechnologien identifiziert und Zukunftskonzepte entwickelt, welche, gemäß den Zielen einer zirkulären Bioökonomie, die Landwirtschaft als industriellen Zweig unabhängiger von Rohstoffimporten machen und dem Ersatz fossilbasierter Produkte dienen (Perbandt et al. 2021). Hierzu liegt als Ergebnis mit dem Konzept einer Bioraffinerie, zur effizienteren Nutzung von Reststoffströmen aus der Landwirtschaft ein erstes Beispiel vor, welches die geplanten Prozessschritte sowie die eingesetzten Ressourcen und erzeugten Produkte detailliert beschreibt. Die Implementierung dieser und weiterer Ideen in die Praxis bedarf einer fruchtbaren Kooperation zwischen unterschiedlichsten Akteuren, die in der Region ihre Potentiale bündeln und so wirtschaftlich erfolgreich zusammenwirken (Hassel et al. 2024).

Zusammenfassung und Ausblick

Die Strategie für den Ostseeraum umfasst viele Herausforderungen, und der Schwerpunkt des Projektes BREC liegt im Politikbereich der zirkulären Bioökonomie. Die Überbrückung der Kluft zwischen Forschung und Bildung ist eine Grundvoraussetzung für die erfolgreiche Implementierung neuer Technologien

und zukunftsfähiger Kreislaufwirtschaftspraktiken. Die Ergebnisse und Produkte des EU-Projektes BREC helfen der Projektregion auf diesem Weg. Die geschaffene Informationsdatenbank, die entwickelten Technologiekonzepte, das gestaltete Ausbildungsprogramm sowie die aufgebauten Netzwerkstrukturen sind eine gute Basis für die Umsetzung im Rahmen eines größeren Projektes nach Ablauf dieses im September 2024. Die Zusammenarbeit zwischen den Partnern war sehr vertrauensvoll sowie konstruktiv und soll, gemäß Plänen des Konsortiums in Zukunft fortgeführt werden. Das Projekt BREC kann durch die Initiierung einer internationalen Gruppe von Interessenvertretern aus Landwirtschaft und Politik, die Entwicklung und Beschreibung möglicher Pilotanlagenkonzepte als Grundlage für kommende Projekte sowie die Vermittlung von Informationen über neue Kreislaufwirtschaftspraktiken vorantreiben. Zudem kann durch verstärkte Zusammenarbeit und Erfahrungsaustausch zwischen Forschungseinrichtungen, landwirtschaftlichen Schulen und Unternehmen innerhalb der Projektregion ein Beitrag zum Wissenstransfer über die zirkulare Bioökonomie geleistet werden.

Interreg
Baltic Sea Region



Co-funded by
the European Union



Literatur/Quellen

- Hassel, A.; Schiller, D.; Seiberling, S.; Theel, C.; Fleßa, S. (2024): Bioökonomie und regionaler Strukturwandel Wertschöpfung, Innovation und Nachhaltigkeit planen und umsetzen, Springer-Verlag
- Ministerium für Wirtschaft, Infrastruktur, Tourismus und Arbeit M-V (2015): Energiepolitische Konzeption für Mecklenburg-Vorpommern, Gesamtkonzeption für eine integrierte Energie- und Klimaschutzpolitik der Landesregierung, Schwerin
- Perbandt, D.; Vogelpohl, T.; Beer, K.; Töller, A. Böcher, M. (2021): Zielkonflikte der Bioökonomie, Biobasiertes Wirtschaften im Spannungsfeld von Ökonomie und Ökologie, Springer-Verlag
- Projekt Website: <https://interreg-baltic.eu/project/brec/>
- Quelle Karten: www.wikipedia.org
- Thrän, D.; Moesenfechtel, U. (2020): Das System Bioökonomie, Springer-Verlag

Kontakt

M. Sc. Sebastian Foth, Wissenschaftlicher Mitarbeiter

Professur Abfall- und Stoffstromwirtschaft, Universität Rostock

☎ +49 (0)381.498-3149 | ✉ sebastian.foth2@uni-rostock.de

FACHFORUM

BIOGAS

Hannes Richter, Adrian Simon, Marcus Weyd, Udo Lubenau,
Jeremias Zill, Holger Testrich, Andre Naumann,
Lennart Dörtelmann, Stefan Laumann

Aufbereitung von Biogas mit keramischen Membranen

Zusammenfassung: Kohlenstoffmaterialien haben einen Netzebenenabstand im Bereich des kinetischen Durchmessers kleiner Gasmoleküle, was sie für Gastrennmembranen interessant macht. Auf der Innenseite keramischer Trägerrohre wurden dünne Kohlenstoffschichten ($< 1 \mu\text{m}$ Dicke) hergestellt. Bei Gaspermeationstests permeieren die kleineren CO_2 -Moleküle 50-mal schneller als das größere CH_4 . Aufgrund des Molekularsiebverhaltens wurde in synthetischen CO_2/CH_4 -Gemischen über einen weiten Variationsbereich von Druck (von 0,2 MPa bis 1,2 MPa) und Gaszusammensetzung (von 10 % bis 90 % CO_2) eine nahezu konstante Trennleistung gefunden. Durch nur einen Membranschritt wurde ein Gemisch einer typischen Biogaszusammensetzung von 0,57 $\text{CH}_4/0,43 \text{CO}_2$ in einen konzentrierten CH_4 -Strom von 94 % und einen konzentrierten CO_2 -Strom von 91 % getrennt. Bei realen Biogasaufbereitungen auf zwei verschiedenen Biogasanlagen konnte eine robuste Membranleistung während des Testzeitraums von mindestens einem Monat beobachtet werden. Aus dem Biogas wurde in nur einem Membranschritt 94 % CH_4 erzeugt. Sowohl Wasser als auch H_2S (bis zu 180 mg/m^3) durchdrangen die Membran, ohne dass die Membran beschädigt wurde. Beide können auch in einem Schritt durch die Membran vom Biogas abgetrennt werden. Zeolithmembranen (CHA) wiesen in Einzelgaspermeationstests und Versuchen mit synthetischen Gemischen noch höhere Selektivitäten auf und sind daher aussichtsreiche Kandidaten für weitere Anwendungstests in Biogas. Kohlenstoff- und Zeolithmembranen sind eine robuste Alternative zu Polymermembranen mit geringerer chemischer Stabilität und Druckstabilität. Die Biogasaufbereitung mit Kohlenstoffmembranen bietet klare Vorteile hinsichtlich Kosten, Energieverbrauch, Flexibilität und Komfort im Vergleich zu klassischen Technologien wie PSA und Wäsche.

Abstract: Carbon materials have a lattice plane distance in the range of the kinetic diameter of small gas molecules making them interesting for gas separating membranes. Thin carbon layers ($< 1 \mu\text{m}$ thickness) were prepared on the core side of ceramic support tubes. In gas permeation tests the smaller CO_2 -molecules permeate 50 times faster than the bigger CH_4 . Because of the mole sieving behavior nearly constant separation performance was found in synthetic CO_2/CH_4 -mixtures over a wide range of variation in pressure (from 0.2 MPa to 1.2 MPa) and gas composition (from 10% to 90% CO_2). By only one membrane step a mixture of a typical biogas composition of 0.57 $\text{CH}_4/0.43 \text{CO}_2$ was separated in a concentrated CH_4 -stream of 94 % and a concentrated CO_2 -stream of 91%. In real biogas treatments on two different biogas plants a robust membrane performance during the testing period of at least one month was observed. CH_4 of 94% was produced from the biogas in only one membrane step. Water as well as H_2S (up to 180 mg/m^3) permeated through the

membrane without any damage of the membrane. Both can be also separated from the biogas by the membrane in one single step. Zeolite membranes (CHA) showed even higher selectivities in single gas permeation tests and tests with synthetic mixtures and are therefore promising candidates for further application tests in biogas. Carbon and zeolite membranes are a robust alternative to polymeric membranes of lower chemical and pressure stability. There are clear advantages in costs, energy consumption, flexibility and convenience of biogas upgrading with carbon membranes in comparison to classical technologies like PSA and scrubbing.

1 Einleitung

Biogas ist ein CO_2 -neutraler Energieträger. Neben dem Hauptbestandteil Methan (CH_4) enthält Biogas bis zu 50 % CO_2 , etwas H_2S und ist mit Wasser gesättigt. Biogas kann in das Erdgasnetz und unterirdische Speichersysteme eingespeist werden. Dafür muss es auf > 94 % CH_4 gereinigt werden. Mehrere Technologien zur CO_2/CH_4 -Trennung wie Druck- oder Temperaturadsorption, Wasserwäsche und Aminwäsche sind kommerziell erhältlich. Diese Technologien sind jedoch sehr energieaufwendig und für die Behandlung kleiner und mittlerer Biogasanlagen recht teuer [1]. Heutzutage steht auch Membrantechnologie zur Biogasaufbereitung zur Verfügung. Die begrenzte chemische Stabilität der polymeren Membranmaterialien machen allerdings eine Vorbehandlung (H_2O - und H_2S -Eliminierung) des Biogases vor der CO_2/CH_4 -Trennung erforderlich [2]. Darüber hinaus begrenzt die Verdichtung und Plastifizierung den maximal anwendbaren Druck [3]. Eine robuste Alternative sind poröse anorganische Membranen. Poren in der Größe kleiner Gasmoleküle ermöglichen die Gastrennung nach Molekülgröße. Polare Zentren in den Materialien unterstützen die CO_2/CH_4 -Trennung durch bevorzugte CO_2 -Adsorption und -Permeation. Für Membranen aus verschiedenen Zeolithtypen werden hervorragende Selektivitäten und Flüsse in synthetischen CO_2/CH_4 -Gemischen berichtet [4-7]. Auch in Kohlenstoff kann eine Gaspermeation durch die Gitterebenen der Graphitstruktur gefunden werden. Kohlenstoff kann leicht durch Pyrolyse von Polymeren hergestellt werden [8-15]. Im ersten Test zur Biogasaufbereitung mit Kohlenstoffhohlfasern wurde eine bemerkenswerte Selektivität, aber eine sehr geringe CO_2 -Durchlässigkeit festgestellt [16, 17]. Durch die Beschichtung der Kohlenstoff- und Zeolithmembran als dünne Filterschicht auf mechanisch stabile, poröse Keramikstützrohre wurden Membranen mit sehr hohen Permeanzen hergestellt und erstmals in realen Biogasanwendungen getestet.

2 Experimentelles Vorgehen

2.1 Membransynthese

Poröse Keramikrohre mit einem Innendurchmesser von 7 mm und einem Außendurchmesser von 10 mm sowie einer Länge von bis zu 500 mm wurden innen mit einer Lösung eines Phenolharzes 0235DP nach [12] beschichtet. Nach der Vernetzung wurde das Harz in einem Ofen bei 800 °C in N_2/Ar pyrolysiert, um das

Polymer in Kohlenstoff zu überführen. Zeolithmembranen (SAPO-34) wurden durch Beschichtung eines Trägers mit einem Schlicker aus Zeolithkristallen und einen anschließenden hydrothermalen Wachstumsschritt synthetisiert.

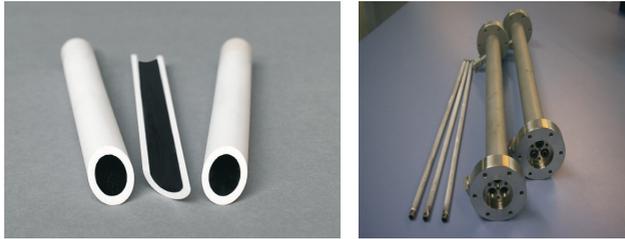


Abb. 1: Kohlenstoffmembranen auf der Innenseite eines porösen Keramikrohrs (links) sowie als 0,5 m lange Rohre mit Edelstahlgehäusen (rechts)

2.2 Membrancharakterisierung

Die Mikroanalyse der Membranen wurde durch Rasterelektronenmikroskopie des Membranquerschnitts, durch Transmissionselektronenmikroskopie einer ionenstrahlgeätzten Membranprobe und durch Elektronenbeugung durchgeführt.

Die Gaspermeationsleistung wurde durch einzelne Gaspermeationsmessungen unter Verwendung der Druckerhöhungsmethode bestimmt, wie in [18] beschrieben. Für die Mischgaspermeation wurden CO_2 und CH_4 in unterschiedlichen Verhältnissen durch MFCs im Bereich von 10 % CO_2 bis 90 % CO_2 gemischt und ein Feeddruck im Bereich von 0,2 MPa bis 1,2 MPa absolut eingestellt. Der Permeatfluss wurde mit einem Blasenähler erfasst. Alle Gasströme (Feed, Permeat, Retentat) wurden mittels Gaschromatographie analysiert.

2.3 Biogastests

Drei Kohlenstoffmembranen von 0,5 m Länge wurden parallel in einem Edelstahlgehäuse eingebaut. Für eine Filteranlage wurden drei Gehäuse parallel oder alternativ in einer Kaskade geschaltet. Die gesamte Membranfläche betrug $0,1 \text{ m}^2$. Die Filteranlage wurde in direkter Verbindung mit zwei verschiedenen Biogasanlagen (Leipzig und Helmsgrün, Deutschland) installiert. Das Biogas wurde auf bis zu 0,7 MPa absolut unter Druck gesetzt. Das Biogas wurde in der Regel vorbehandelt, um durch Kühlung und Adsorption Wasser (Taupunkt -20°C) und H_2S -Gehalt ($< 1 \text{ mg/m}^3$) zu entfernen. Für Membrantests wurden beide Vorbehandlungsschritte für mehrere Stunden abgeschaltet. Alle Membrantests liefen an jedem Standort 4 Wochen lang.



Abb. 2: Einbau von Kohlenstoffmembranen in Edelstahlgehäuse (links), verbundene Membrangehäuse in Membrananlage (Mitte) und Membrananlage in Verbindung mit Biogasanlage in Leipzig (rechts)

3 Ergebnisse

Auf der Innenseite des porösen Keramikträgerrohres wurde mittels REM eine homogene Kohlenstoffschicht mit einer Dicke zwischen $0,7\ \mu\text{m}$ und $1,0\ \mu\text{m}$ beobachtet (Abb. 3, links). In der TEM-Analyse sind Bereiche paralleler und leicht gekrümmter Gitterebenen von Kohlenstoff deutlich zu erkennen (Abb. 3, Mitte). In der Elektronenbeugung wurde der Abstand der Gitterebenen von etwa $0,42\ \text{nm}$ bestimmt (Abb. 3, rechts).

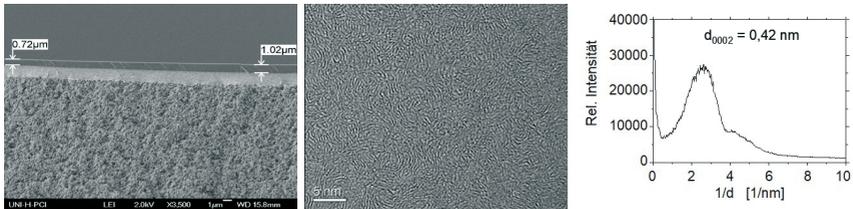


Abb. 3: REM-Abbildung der Kohlenstoffmembranschicht auf dem porösen Keramikträger (Querschnitt, links), TEM-Abbildung (Mitte) und Intensitätsverteilung, die sich aus dem Elektronenbeugungsmuster ergibt (rechts)

Bei der Einzelgaspermeation konnte eine deutliche Abhängigkeit der Gaspermeanz vom kinetischen Durchmesser der Gasmoleküle beobachtet werden: Je kleiner die Moleküle, desto höher die Permeanz (Abb. 4, links). Moleküle, deren kinetischer Durchmesser größer ist als der gemessene Netzebenenabstand der Kohlenstoffmembranen, permeieren sehr langsam und mit der gleichen Permeanz. Diese Permeanz ist die Permeation durch Membrandefekte. Die Einzelgaspermeationsmessung bestätigt die Permeation der kleinen Gasmoleküle durch die Gitterebenen des Kohlenstoffs. Aufgrund des Unterschieds im kinetischen Durchmesser dringt CO_2 etwa 50-mal schneller durch die Membran als das größere CH_4 . Bei Zeolithmembranen wird gar keine Permeation von größeren Molekülen gemessen (Abb. 4, rechts). Die Membranen sind folglich nahezu defektfrei. Aufgrund des geringeren Porendurchmessers sowie der Polarität der Zeolithkristalle permeiert CO_2 bis zu 1.300 mal schneller als CH_4 .

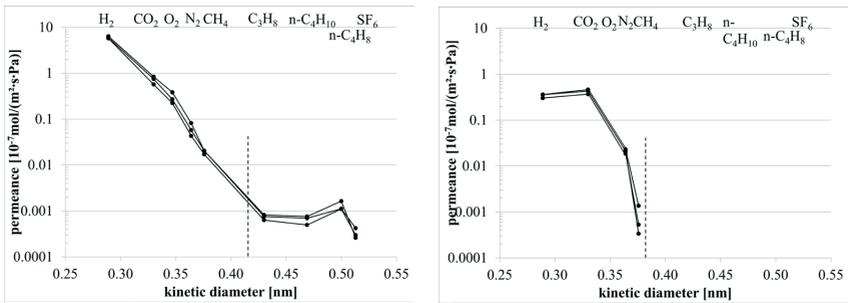


Abb. 4: Ergebnisse von Einzelgaspermeationsmessungen mit identisch präparierten Kohlenstoffmembranen (links,) und identisch präparierten Zeolith-Membranen (SAPO-34, rechts) gestrichelte Linien = Porengröße

Bei Mischgaspermeationsmessungen mit synthetischen CO₂/CH₄-Mischungen wurden nahezu konstante CO₂-Permeanzen über einen weiten Bereich der Feedzusammensetzung und des Drucks beobachtet (Abb. 5, links). Aufgrund der bevorzugten CO₂-Permeation nimmt die CH₄-Permeation bei hoher CO₂-Konzentration ab und es kann nahezu reines CO₂ abgetrennt werden (Abb. 5, rechts), was zu CO₂/CH₄-Selektivitäten von > 1000 führt.

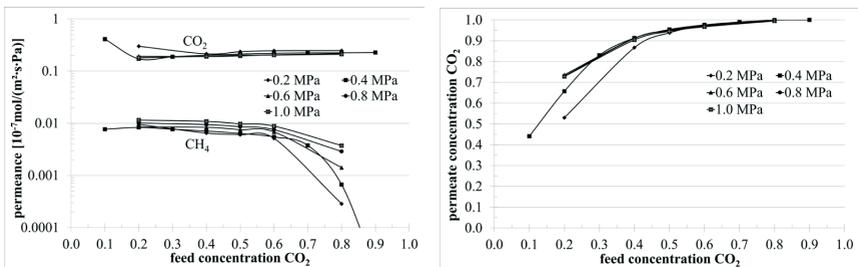


Abb. 5: CO₂- und CH₄-Permeanzen bei Mischgaspermeationsmessungen mit synthetischen CO₂/CH₄-Gemischen unterschiedlicher Zusammensetzung und mit unterschiedlichen Feeddrücken

Ein synthetisches Gemisch mit einer realistischen Biogaszusammensetzung von 0,43 CO₂/0,57 CH₄ konnte durch nur einen Membrantrennschritt in einen konzentrierten CO₂-Strom von 91 % (Permeat) und einen CH₄-Strom von 94 % (Retentat) aufgeteilt werden (Tab. 1). Auch bei den realen Biogasversuchen über einen Zeitraum von 4 Wochen wurde an jedem Standort die gleiche hohe CH₄-Konzentration erreicht. Aufgrund des geringeren CO₂-Gehalts im Feed, der Anwesenheit anderer Komponenten wie N₂ und O₂ und der anderen Trennbedingungen hatte der Permeatstrom nur eine CO₂-Konzentration von 61 %. Dieser Permeatstrom kann durch einen zweiten Membranschritt leicht an CO₂-Gehalt angereichert werden. Der CH₄-reiche Strom, der mit 0,7 MPa empfangen wurde, konnte auf bis zu 2 MPa komprimiert werden.

Tab. 1: Ergebnisse von Mischgasmessungen und echten Biogastests mit Kohlenstoffmembranen von 0,5 m Länge

Condition	Feed pressure (MPa)	Feed stream (l/h)	CO ₂ feed	CH ₄ feed	CO ₂ permeate	CH ₄ retentate
Synthetic gas mixture	1.2	10	0.43	0.57	0.91	0.94
Real biogas	0.7	3.5	0.37*	0.58*	0.61	0.94**

*additional components 0.038 N₂, 0.009 O₂, 0.003 H₂

**additional components 0.021 N₂, 0.030 CO₂, 0.004 H₂, 0.005 O₂

Bei sehr geringem Feedstrom wurde die Trocknung des Biogases vor der Membranstufe schrittweise reduziert, was zu einem erhöhten Taupunkt führte (Tab. 2). Durch die Erhöhung des Taupunktes konnte ein Rückgang des CO₂-Gehalts im Permeat beobachtet werden, was auf eine Verstopfung der aktiven Membranporen hindeutet. Die verbleibende Permeation bestand nur aus dem nicht selektiven Fluss durch einige Membrandefekte. Nach der Rückkehr zu trockenem Biogas wurde jedoch die gleiche Selektivität beobachtet wie zuvor. Durch H₂O kommt es zu keiner Membranschädigung. Unter Bedingungen der Wasserdesorption von der Membranrückseite (höhere Temperatur, niedrigerer Permeatdruck) könnte auch Wasser durch die Membran transportiert und Biogas durch den Membranprozess getrocknet werden.

Tab. 2: Einfluss des Wassergehalts von Biogas auf die Permeatkonzentration (Feedstrom < 3,5 l/h)

H ₂ S-content (mg/m ³)	CO ₂ permeate
< 1	0.62
180	0.59
< 1	0.60

Durch die Ausschaltung der Entschwefelung vor der Filteranlage erhöhte sich der H₂S-Gehalt dramatisch bis auf einen Wert von 180 mg/m³ (Tab. 3). Dieser hohe Wert hatte jedoch weder während der H₂S-Exposition noch danach einen signifikanten Einfluss auf die Membranselektivität.

Tab. 3: Einfluss des H₂S-Gehalts von Biogas auf die Permeatkonzentration

H ₂ S-content (mg/m ³)	CO ₂ permeate
< 1	0.62
180	0.59
< 1	0.60

4 Schlussfolgerung

Kohlenstoffmembranen sind in der Lage, Gasmoleküle entsprechend ihrem kinetischen Durchmesser durch unterschiedliche Permeation durch die Gitterebenen der mikrokristallinen graphitähnlichen Struktur zu trennen, was mit den Ergebnissen früherer Arbeiten [13], [14] und [15] korreliert. Dieses Molekularsiebverhalten ermöglicht die effektive Trennung von CO₂ und CH₄ in einem breiten Spektrum an Zusammensetzungen und Druckbedingungen. In realistischen Biogastests zeigen die Kohlenstoffmembranen eine hohe Robustheit, insbesondere gegenüber kritischen Verunreinigungen wie Wasser und H₂S. Beide Moleküle können in die Membranporen eindringen, schädigen die Membranstruktur jedoch nicht, was die Ergebnisse von Haider et al. voll und ganz bestätigt. [16, 17]. Im Gegensatz zu Haider et al. wurden eine zehn- bis hundertfach höhere CO₂-Durchlässigkeit erreicht, die eine einstufige Biogasaufbereitung ermöglichte. Die hohe Membranleistung reduziert bemerkenswert CAPEX und OPEX und macht die Membrantechnologie deutlich effizienter. Zeolithmembranen (SAPO-34) wiesen in Einzelgaspermeationstests noch deutliche höhere Permeabilitäten für CO₂ und CH₄ auf, als die untersuchten Kohlenstoffmembranen, was sie zu besonders aussichtsreichen Kandidaten für die Biogasaufbereitung macht. Deren Skalierung und Tests in realem Biogas ist Gegenstand des Projektes „Biomethanmembran“ in Wir!-Bündnis biogeniV.

5 Danksagung

Dem Bundesministerium für Bildung und Forschung danken wir für die finanzielle Unterstützung (Projekt „Prokosys“ 0033RC008 und biogeniV Biomethanmembran 03WIR4906).

Literatur/Quellen

- [1] US Department of Energy, Materials for Separation Technologies, 2005
- [2] M. Scholz, T. Melin, M. Wessling, *Renew. Sustain. Energy Rev.*, 17 (2013), pp. 199-212
- [3] S. Kanehashi, T. Nakagawa, K. Nagai, X. Duthie, S. Kentish, G. Stevens, *J. Membr. Sci.*, 298 (2007), pp. 147-155

- [4] B. Wang, N. Hu, H. Wang, Y. Zheng, R. Zhou, J. Mater. Chem. A, 2015, 3, 12205
- [5] M. L. Carreon, S. Li, M. A. Carreon, Chem. Commun., 2012, 48, 2310-2312
- [6] S. Himeno, T. Tomita, K. Suzuki, K. Nakayama, K. Yajima, S. Yoshida, Ind. Eng. Chem. Res. 46 (2007) 6989-6997
- [7] T. Wu, M. C. Diaz, Y. Zheng, R. Zhou, H. H. Funke, J. L. Falconer, R. D. Noble, Journal of Membrane Science 473(2015)201-209
- [8] Y Hishiyama, A. Yoshida, Y. Kaburagi, M. Inagaki, Graphite films prepared from carbonized polyimide films, Carbon 30 (1992) 333-337
- [9] X. He, M.-B. Hägg, Structural, kinetic and perform. characterize. of hollow fiber carbon membranes, J. Membr. Sci. 390/391 (2012) 23-31
- [10] W. N. W. Salleh, A. F. Ismail, Carbon membr. for gas sep. proc.: Rec. progress and future perspective, J. Membr. Sci. & Res. 1 (2015) 2-15
- [11] M. A. L. Tanco, D. A. P. Tanaka, Recent advances on carbon molecular sieve membranes (CMSMs) and reactors, Processes 4 (2016) 29-50
- [12] H. Voss, J. Therre, N. Kaltenborn, H. Richter, I. Voigt, Process for producing carbon membranes US8608828B2 (17.12.2013)
- [13] N. Kruse, Y. Schießer, S. Kämnitz, H. Richter, I. Voigt, G. Braun, J. Repke, High pressure gas separation of binary CO₂ mixtures with carbon membranes, Sep. Pur. Techn., 164, (2016,) 132–137
- [14] A. Wollbrink, K. Volgmann, J. Koch, K. Kanthasamy, C. Tegenkamp, Y. Li, H. Richter, S. Kämnitz, F. Steinbach, A. Feldhoff, J. Caro, Amorphous, turbostratic and crystalline carbon membranes with hydrogen selectivity, Carbon 106 (2016) 93-105.
- [15] H. Richter, H. Voss, N. Kaltenborn, S. Kämnitz, A. Feldhoff, J. Caro, S. Roitsch, I. Voigt and A. Wollbrink, High-flux carbon molecular sieve membranes for gas separation, Angew. Chem. Int. Ed. 2017, 56, 7760-7763
- [16] S. Haider, A. Lindbräthen, M.-B. Hägg, Techno-economical evaluation of membrane based biogas upgrading system: A comparison between polymeric membrane and carbon membrane technology, Green Energy & Environment 1 (2016) 222-234
- [17] S. Haider, A. Lindbräthen, J. A. Lie, P. V. Carstensen, T. Johannessen, M.-B. Hägg, Vehicle fuel from biogas with carbon membranes; a comparison between simulation predictions and actual field demonstration, Green Energy & Environment 1 (2018) 1-11
- [18] H. Richter, H. Voss, I. Voigt, A. Diefenbacher, G. Schuch, F. Steinbach, J. Caro, Sep. Pur. Techn., 72, (2010), 388-394

Kontakt

Dr. Hannes Richter, Abteilungsleiter Nanoporöse Membranen

Fraunhofer IKTS

☎ +49 (0)36601.93011866 | ✉ hannes.richter@ikts.fraunhofer.de

🌐 www.ikts.fraunhofer.de

Jan Sprafke, Elisa Uta Deiß, Tommy Ender, Hans Korte,
Michael Nelles

Viskositätsmessung in Biogasanlagen – Erkenntnisse aus dem Projekt Biogas-Kohle

Zusammenfassung: Die Viskositätsmessung in Biogasanlagen ist bedingt durch substratspezifische Eigenschaften komplex und nicht einheitlich. Während industrielle Biogasanlagen bei Verwendung von flüssigen Reststoffen und Nebenprodukten gleichbleibende Eigenschaften aufweisen, durchlaufen landwirtschaftliche Biogasanlagen im Regelfall diverse Substratwechsel, die Auswirkungen auf die Prozessstabilität und Viskosität haben. Bedingt durch gesetzliche Vorgaben und wegfallende Vergütungen wird der Anteil an Wirtschaftsdüngern im anaeroben Prozess weiter steigen. Hohe Wirtschaftsdüngeranteile können beispielsweise zu Prozessbeeinträchtigungen durch Hemmung führen. Um diese Hemmungen zu minimieren und bestenfalls zu beseitigen, werden vielfältige Hilfsstoffe im Betrieb eingesetzt. Da diese Hilfsstoffe auch Auswirkungen auf die Wirtschaftlichkeit von Anlagen haben können, wird im Projekt Biogas-Kohle der Einsatz und die Auswirkungen von Pyrolysekohle geprüft, die unter definierten Bedingungen hergestellt wurde.

Pyrolysekohle als kostengünstige Alternative wird in den letzten Jahren kontrovers in der Branche diskutiert, wobei die resultierenden Wirkungsketten weitestgehend unbekannt sind. Im Praxisbetrieb wird Kohle bereits als Additiv für Einstreu, Futter, oder Bodenverbesserung eingesetzt. Partiiell wird Pflanzkohle in Biogasanlagen schon eingesetzt und ist bereits als „Spezialkohle“ erhältlich.

Der im Projekt Biogas-Kohle untersuchte Ansatz, dass die eingesetzte Pyrolysekohle zu einer Änderung der rheologischen Eigenschaften führt, wurde unter Laborbedingungen geprüft und durch Mehrfachwiederholung validiert.

Da es noch keine einheitliche Methodik gibt, um die rheologischen Eigenschaften von Gärsubstraten zu bestimmen, wurde im Projektverlauf eine Methodik zur Probenvorbereitung und Messung entwickelt.

Abstract: Viscosity measurement in biogas plants is complex and not standardised due to substrate-specific properties. While industrial biogas plants have consistent properties when using liquid residues and by-products, agricultural biogas plants generally undergo various substrate changes that have an impact on process stability and viscosity. As a result of legal requirements and the loss of remuneration, the proportion of manure in the anaerobic process will continue to increase. High proportions of manure fertiliser can, for example, lead to process limitations due to inhibition. In order to minimise and ideally eliminate these inhibitions, a wide range of additives are used on the farm. As these additives can also have an impact on the economic efficiency of plants, the biogas coal project is investigating the use and effects of pyrolysis coal produced under defined conditions.

Pyrolysis coal as a cost-effective alternative has been the subject of controversial debate in the industry in recent years, whereby the resulting chains of action are largely unknown. In practice, coal is already being used as bedding, feed or biochar. In some cases, coal is already being used in biogas plants and is already available as "speciality coal".

The approach investigated in the biogas coal project, i.e. that the pyrolysis coal used leads to a change in the rheological properties, was tested under laboratory conditions and validated by repeating the test several times.

As there is still no standardised method for determining the rheological properties, a method for sample preparation and measurement was developed during the course of the project.

1 Einsatz von Wirtschaftsdüngern

Der Einsatz von Wirtschaftsdüngern aus der Nutztierhaltung ist etabliert und diese sind gängiges Co-Substrat in landwirtschaftlichen Biogasanlagen. Im Prozess entstehende Gärreste werden idealerweise ortsnah eingesetzt, um einen Nährstoffkreislauf zu schaffen, der nur geringe oder keine konventionellen Düngemittel einsetzt. Bedingt durch die Krisen und Konflikte in den zurückliegenden Jahren, hat sich die Notwendigkeit des Aufbaus und Einsatzes regionaler Nährstoffketten ergeben.

Nach aktuellem Stand setzen fast alle Biogasanlagenbetreiber von landwirtschaftlichen Biogasanlagen Wirtschaftsdünger ein, wobei ein Großteil des technisch nutzbaren Potenzials energetisch ungenutzt bleibt (Majer et al. 2019; Rensberg et al. 2023). Von besonderer Relevanz bezüglich des Massenaufkommens sind dabei Wirtschaftsdünger aus Rinder- und Schweinehaltung mit einer Einsatzmenge von 58,4 Mil. t FM (Rensberg et al. 2023). Rund 66 % der flüssigen und 91 % der festen Wirtschaftsdünger werden nicht anaerob behandelt und bleiben energetisch ungenutzt (Statistisches Bundesamt 2020). Um die Anteile von Wirtschaftsdüngern im anaeroben Prozess zu erhöhen, ist die Bundesregierung bestrebt, die Verwendung tierischer Exkrememente zur Energieerzeugung zu fördern und attraktiver zu gestalten.

Neben der durch das EEG 2023 festgelegten Vergütung von 19 ct/kWh bzw. 22 ct/kWh für Anlagen bis maximal 150 kW_{el}, beruht die finanzielle Unterstützung auf dem positiven Beitrag, den die Vergärung zum Klimaschutz leistet (Bundesamt für Justiz 2024). Für Anlagenkapazitäten über 150 kW_{el} gibt es die Möglichkeit der Ausschreibung mit Vergütungen zwischen 13,60 ct/kWh bis 19,49 ct/kWh (Bundesnetzagentur 2023).

Die Vergärung kann sich für Landwirte und Biogasanlagenbetreiber auch vor dem Hintergrund der 2020 novellierten Düngeverordnung als sinnvoll erweisen. Diese sieht längere Sperrfristen für die Düngerausbringung in den Herbst- und

Wintermonaten vor, wodurch auch die Düngung mit Gülle stark eingeschränkt ist (FNR 2024). Um einem Gülleüberschuss in diesem Zeitraum entgegenzuwirken, bietet sich ihre Nutzung in Biogasanlagen als mögliche Alternative und Ergänzung zur verpflichtenden Lagerung an.

2 Viskositätsmessung

Die Viskosität nimmt Einfluss auf wesentlich ablaufende strömungstechnische und stoffliche Transportprozesse und ist daher insbesondere für die Biogaserzeugung von großer Bedeutung (Brehmer et al. 2012; Liebetrau et al. 2020). Sie ist prägend für das Prozessergebnis und die damit einhergehende Methanerausbeute. Ebenfalls von Relevanz ist die Kenntnis der Viskosität, aufgrund der daraus möglichen Rückschlüsse auf Transportvorgänge in Pumpen und Rohrleitungen, Mischvorgänge in Rührwerken und Reaktoren sowie Wärmeaustauschvorgänge (Friedrich-Schiller-Universität Jena 1994).

Obwohl es verschiedene Methoden zur Messung der Viskosität in Flüssigkeiten und pastösen Medien gibt, existiert für rheologische Untersuchungen von Gärresten kein standardisiertes Verfahren. Herausfordernd bei der Methodenentwicklung sind verschiedene Einflussgrößen wie Temperatur, Faserlänge und Partikelgröße welche die Probenmatrix und Messung beeinflussen. Brehmer et al. (2012) stellten fest, dass es deutliche Unterschiede bei den eingesetzten Substraten gibt und für faserhaltige Substrate (z.B. Mais und Gras) kaum vergleichbare Messdaten vorliegen. Fasern können durch Einsatz von nachwachsenden Rohstoffen und Einstreu bedeutende Teile des Gärrestes ausmachen.

Ziel der Arbeit im Projekt „Biogas-Kohle“ ist es, neben der Eruiierung der Kohlewirkung auf den Gärprozess, eine Methode zur Bestimmung der Viskosität in verschiedenen Gärmedien zu entwickeln. Gärreste bestehen aus einer wässrig flüssigen Phase, einer festen Phase (Substratreste und inerte Komponenten aus Anhaftungen) sowie einer gasförmigen Phase (Methan, Kohlenstoffdioxid, Schwefelwasserstoff und Spurengase) (Schneider et al. 2020). Diese Bestandteile beeinflussen alle die rheologischen Eigenschaften des Gärmediums.

Die Viskosität ist nach DIN 1342-1 definiert als:

Die „Eigenschaft eines Stoffes [Gas, Flüssigkeit oder Festkörper], unter Einwirkung einer Spannung [...] zu fließen (viskos=zähflüssig) und irreversibel deformiert werden.“ (DIN 1342-1:2003-11)

Die Spannung ist derweil nur von der Verformungsgeschwindigkeit abhängig und kann gleichzeitig als Ursache dieser angesehen werden.

Die Viskosität ist somit ein Maß für die Kraft, die ein Körper oder ein Fluid seiner aufgezwängten Verformung entgegenbringt (Koll 2012), bzw. für die innere Reibung eines Fluids (Friedrich-Schiller-Universität Jena 1994). Sie kann

quantitativ über den Viskositätskoeffizienten, die dynamische Viskosität η oder die Viskositätsfunktion beschrieben werden. Eine ausführliche Beschreibung der maßgeblichen Viskositätsparameter findet sich in der Norm DIN 1342-1 (DIN 1342-1:2003-11).

Steigt die Viskosität, so verringert sich die Strömungsgeschwindigkeit bei einer bestimmten Drehzahl und der Fermenterinhalt wird schlechter durchmischt (Schneider et al. 2020). Eine geringere Viskosität hingegen erfordert einen geringeren Einsatz von zusätzlicher Rührtechnik und kann so den Energiebedarf der Biogasanlage senken und ökonomische Effekte generieren. Gegebenenfalls kann der Einsatz von Substraten in Verbindung mit der organischen Raumbelastung erhöht werden.

M. Türk et al. (1990) untersuchten den biochemischen Prozess sowie das sich mit der Zeit verändernde Fließverhalten von Frischgülle und stellten mehrere Umwandlungsprozesse im Prozessverlauf unter mesophilen Bedingungen fest. Die beobachteten Veränderungen durch den Abbau großer Moleküle, wie beispielsweise Zellulose und rohproteinhaltige Substanzen, bewirken eine Veränderung der strukturellen Bindungen und Wechselwirkungen innerhalb der Suspension. Diese Änderungen führen zur Bildung von Fasern, die häufig bei einer Viskositätsmessung zu Messfehlern durch Schwimmschichtbildung und Sedimentation führen. Die Temperatur und Trockenmasse beeinflussen ebenfalls die Viskositätseigenschaften, wobei das eingesetzte Substrat maßgebliche Auswirkungen auf die Viskosität hat, da sich Partikelgrößenverteilungen und Schleimstoffanteile auch bei gleichen Einsatzstoffen unterscheiden (Schneider et al. 2020).

Da bei Gärsubstraten die Viskosität selbst vom Geschwindigkeitsprofil abhängig ist und nicht konstant bleibt, wurde der Begriff der „scheinbaren Viskosität“ eingeführt (Liebetrau et al. 2020). Die scheinbare Viskosität ist ein Maß für nicht-newtonsche Flüssigkeiten, welche ein zeit- oder schergeschwindigkeitsabhängiges Verhalten aufweisen (Schneider et al. 2020). Ihre Berechnung erfolgt auf Basis des Scherwinkels in der Flüssigkeit und nicht, wie bei newtonschen Flüssigkeiten, über den Geschwindigkeitsgradienten.

Die Bestimmung der Viskosität von Gärsubstraten ist in den meisten Fällen herausfordernd, zumal herkömmliche, standardisierte Messsysteme häufig nicht bei Gärsubstraten anwendbar sind (Liebetrau et al. 2020; Schneider et al. 2020). Es fehlt an einheitlichen Vorgaben zur Probenvorbereitung, dem Versuchsaufbau sowie dem Messverfahren. Aus diesem Grund lassen sich experimentelle Ergebnisse aus verschiedenen Studien bisher nur ansatzweise vergleichen.

3 Material und Methoden

Für die Durchführung der rheologischen Versuche wurden die zu untersuchenden Proben in 500 ml Weithalsdosen abgefüllt und sowohl bei Zimmertemperatur als auch in einer Wärme-, Kälte- und Gefrierkammer gelagert. Die Temperierung erfolgte in der Wärmekammer bei 38 °C, in der Kühlkammer bei 5 °C und bei -16 °C in der Tiefkühlung bzw. bei Raumtemperatur.

Die Probenhomogenisierung erfolgte mit einem Multizerkleinerer (Profi Cook PC-UM 1006; Maximalleistung von 1.200 W), um die Einwirkung und damit verbundene Messfehler von zerkleinerten Probenbestandteilen auszuschließen.

Abweichend von den Herstellerangaben und bedingt durch das Probenvolumen erfolgte die Viskositätsmessung in 250-ml-Bechergläsern. Eine Beeinflussung der Messung durch den geringeren Abstand zur Becherglaswandung konnte durch Vorversuche ausgeschlossen werden. Die Temperatur wurde in einem zweiten Becherglas in einer zweiten Teilprobe (Referenz) erfasst, um eine Messwertbeeinflussung durch den Temperaturfühler im Becherglas ebenfalls ausschließen zu können.

Für die Viskositätsbestimmung wurde ein Rotationsviskosimeter IKA ROTAVISC me vi mit einem Temperaturmessfühler mit Viskosimeterstativ IKA ROTASTAND verwendet. Die eingesetzten Messspindeln entstammten dem „Standardspindelset IKA SP Set-2“ und dem „Offenen DIN-Spindelset IKA O DIN S-1“.

Der Versuchsaufbau ist in folgender Abbildung dargestellt.

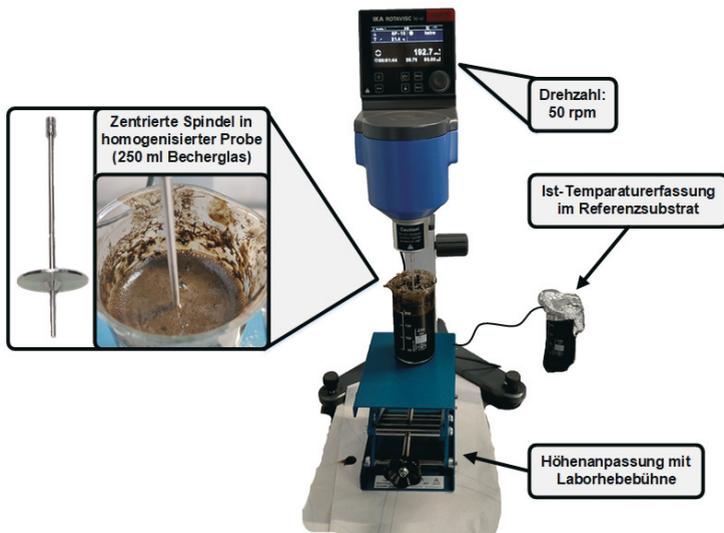


Abb. 1: Versuchsaufbau der Viskositätsmessung

Um den Einfluss der Pyrolysekohle auf das Viskositäts- und Schaumverhalten von Gärsubstraten zu untersuchen, bedurfte es mehrerer Versuchsreihen mit unterschiedlichen Substraten verschiedener Herkunft, Kohlepartikeln verschiedener Körnung sowie Vergleichsreihen. Für die Vorversuche wurde zum einen drei Monate ausgefauter Gärrest einer landwirtschaftlichen Biogasanlage, zum anderen biologisch aktiver Gärrest aus einem laufenden kontinuierlichen Vergärungsversuch genutzt. Für die Kohleapplikationsversuche wurde eine frische Probe aus einer landwirtschaftlichen Biogasanlage verwendet.

Die Messungen erfolgten stets mit 50 Umdrehungen pro Minute für einen Zeitraum von 150 Sekunden in 250 ml Bechergläsern. Dabei wurden alle 10 Sekunden die Ist-Drehzahl [rpm], die scheinbare Viskosität [mPas], Temperatur [°C] und der Drehmomentbereich [%] erfasst. Um mögliche Effekte und Fehlmessungen bei Versuchsbeginn auszuschließen wurde die Datenerfassung in zwei Phasen unterteilt:

1. Phase: Einfahrphase (Dauer: 30 Sekunden)
2. Phase: Datenerfassungsphase (Dauer 120 Sekunden)

Die statistische Auswertung der in der 2. Phase erfassten Messdaten erfolgte mittels der Software IBM SPSS Statistics 26.

Um einheitliche Versuchsbedingungen zu schaffen, wurden sämtliche Proben vor den Viskositätsmessungen mit einem Multizerkleinerer über 120 Sekunden lang homogenisiert. Das lag darin begründet, dass die Proben je nach Herkunft und Alter (z.B. frisch aus den Fermentern entnommen oder bereits eingefroren und wieder aufgetaut) Fasern mit bis zu 2 cm Länge sowie Bodensatz, bestehend aus Kohle und/oder organischen Partikeln, enthielten. Durch die Homogenisierung wurden enthaltene Fasern zerkleinert, bis sie nur noch eine Länge von maximal 5 mm aufwiesen. Langfaserige Substrate können zu einer Umwicklung des Rührers führen und den Messwert verfälschen (Brehmer et al. 2012; M. Türk et al. 1990). Des Weiteren sorgte die Vorbehandlung für eine ausgiebige Durchmischung der Proben und machte die aufgrund der Lagerung eingetretene Phasentrennung wieder rückgängig, womit die Ausgasung während der Konditionierungsphase gesteigert wurde.

Der Vorgang wurde für jede Teilprobe einzeln durchgeführt und das Mixgerät zwischen den Durchgängen mit Wasser gereinigt und getrocknet. Dadurch konnten Fasern, die sich eventuell um das Rührwerk gewickelt hatten, vor der darauffolgenden Probenbehandlung entfernt werden. Mit Ausnahme von zwei Proben, die keinen Wirtschaftsdünger enthielten, wiesen alle anderen ein stark schäumendes Verhalten beim Mixen auf. Dieses manifestierte sich nach der Entleerung des Mixgerätes in der Bildung eines ca. 1 cm hohen Bläschenfilms.

Um die Auswirkung dieser Schaumbildung durch den Homogenisierungsvorgang zu minimieren und die Probe ausgasen zu lassen, ist es zweckdienlich, die Probe still zu lagern bis keine Schaumbildung mehr auftritt. Für die Lagerung wurde eine Verweildauer von 24 h gewählt.

Eine Homogenisierung der Proben war notwendig, um eine geringe Fehlerquote bei den Viskositätsmessungen zu gewährleisten sowie Vergleiche durchführen zu können. Der Umstand, dass durch die Zerkleinerung großer Partikel das Fließverhalten der Gärsubstrate verändert wurde, musste gegenüber dem hohen Potenzial möglicher Messfehler durch Faserumwicklungen und Sedimentation akzeptiert werden.

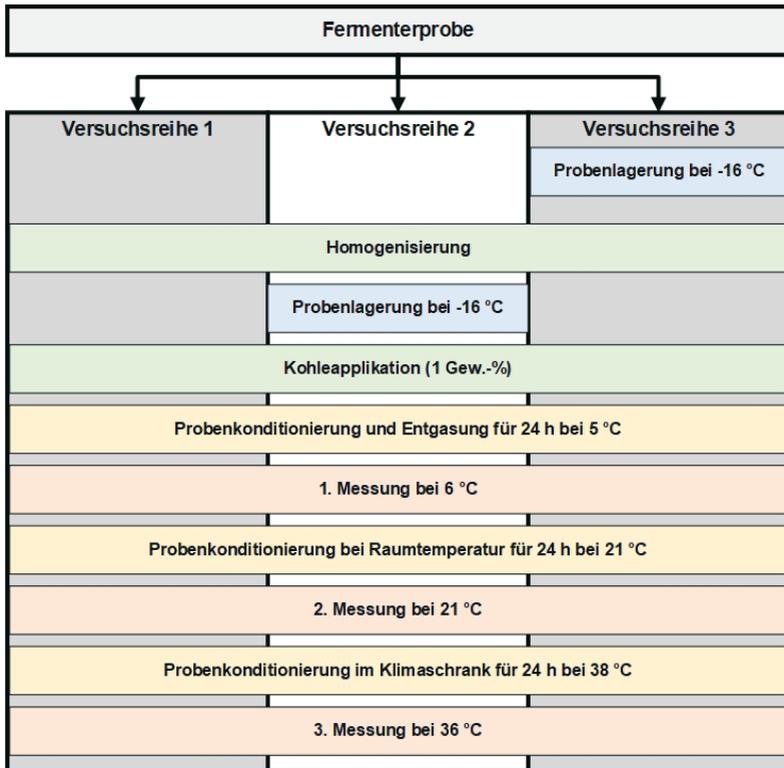


Abb. 2: Versuchsablauf der Versuchsreihen 1 bis 3

Für die Versuchsreihen 1 bis 3 wurde je eine frische Fermenterprobe aus einer landwirtschaftlichen Biogasanlage in drei Teilprobensätze folgendermaßen aufgeteilt:

Teilprobe 1 (Blank): Unbehandelt

Teilprobe 2 (Kohle 10 μm): Nadelholzkohle mit der Körnung $\leq 10 \mu\text{m}$

Teilprobe 3 (Kohle 70 μm): Nadelholzkohle $\leq 2 \text{ mm}$, im Durchschnitt $\approx 70 \mu\text{m}$

Die Kohlezugabe betrug jeweils 1 % bezogen auf die Frischmasse und erfolgte 24 h vor der ersten Messung.

Der Versuchsaufbau ist in nachfolgender Abbildung dargestellt. Die erste Versuchsreihe wurde an einer frischen Probe durchgeführt. Um den Lagereinfluss auf die Rheologie einer tiefgekühlten Probe zu eruieren, wurden die Versuchsreihen 2 und 3 nach der Probennahme eingefroren und drei Monate später wieder aufgetaut. Dabei wurden bei Versuchsreihe 2 die Proben bereits vor der Kühlung homogenisiert, die der Versuchsreihe 3 hingegen erst nach dem Auftauen.

4 Versuchsdurchführung

Versuchsreihe 1

Die Wirkung der Kohleapplikation auf die rheologischen Eigenschaften ist in Versuchsreihe 1 (Abb. 3) deutlich zu erkennen. Den größten Effekt hat die Kohle mit 70 μm , die im Mittel eine deutliche Viskositätsabnahme von 177 auf 73 mPas aufweist.

Die Kohle mit einem Durchmesser von 10 μm hat ebenfalls viskositätssenkende Auswirkungen auf die rheologischen Eigenschaften, welche aber nicht so stark ausgeprägt sind wie bei der grobkörnigeren Kohle. Die Viskosität sinkt von 177 auf durchschnittlich 101 mPas.

Gleichfalls ist zu erkennen, dass es trotz der Homogenisierung der Proben zu deutlichen Abweichungen bei den Messwerten kommt. Dies ist insbesondere bei der feinkörnigeren Kohle (10 μm) zu erkennen. Da die prozentuale Abnahme in Abhängigkeit von Temperatur bei allen Variationen nahezu identisch ist, kann diese Schwankung durch die Zusammensetzung und Heterogenität der Probe sowie mögliche Variationen innerhalb der Kohlekorndimension erklärt werden.

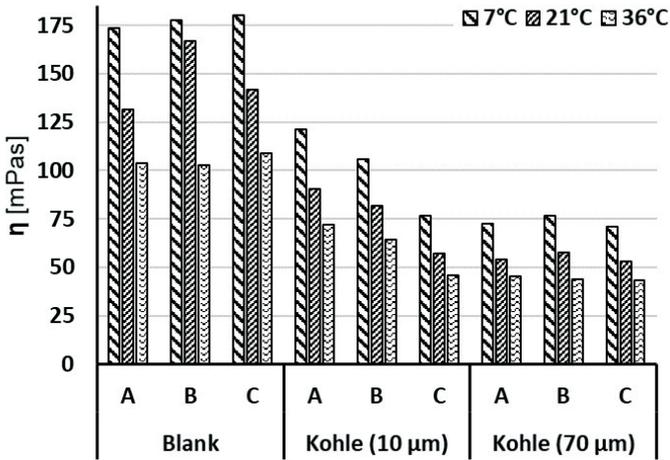


Abb. 3: Versuchsreihe 1

Versuchsreihe 2

Die Abnahme der Viskosität und der Einfluss der Tiefkühlung ist in Abb. 4 klar ersichtlich. Die Temperaturabhängigkeit, die sich schon in der Versuchsreihe 1 gezeigt hat, ist ebenfalls erkennbar. Die Lagerung bei -16 °C hat die Reaktion der Ausgangsprobe auf Kohleapplikation massiv beeinflusst. Während die scheinbare Viskosität im Blank um durchschnittlich 36 bis 43 Prozent zurückgeht, liegt der Rückgang bei der 10 μm Kohle bei allen Temperaturen bei rund 28 Prozent und in der 70 μm zwischen 15 und 25 Prozent.

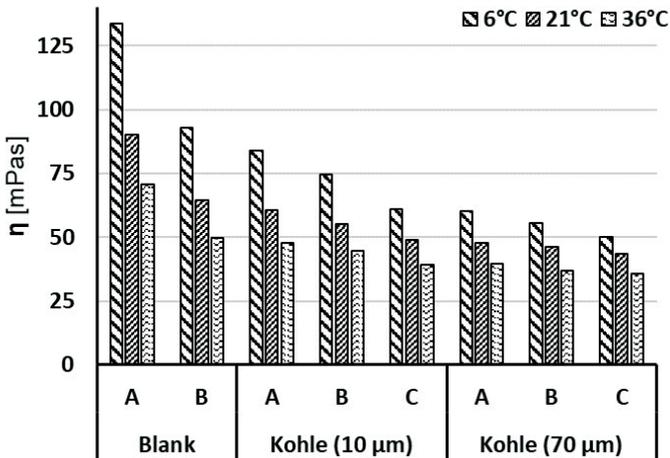


Abb. 4: Versuchsreihe 2

Versuchsreihe 3

Die Versuchsreihe 3 zeigt ebenfalls einen Rückgang der scheinbaren Viskosität. Die Beeinflussung der Ausgangsprobe durch die Tiefkühlung unterscheidet sich deutlich von der Variante 2, wobei die Messwerte eine geringere Varianz aufweisen. Die Temperatur der Messung beeinflusst ebenfalls die scheinbare Viskosität wobei die Ausprägung dieser Änderung gleichfalls durch die Lagerung bei -16 °C beeinflusst wird.

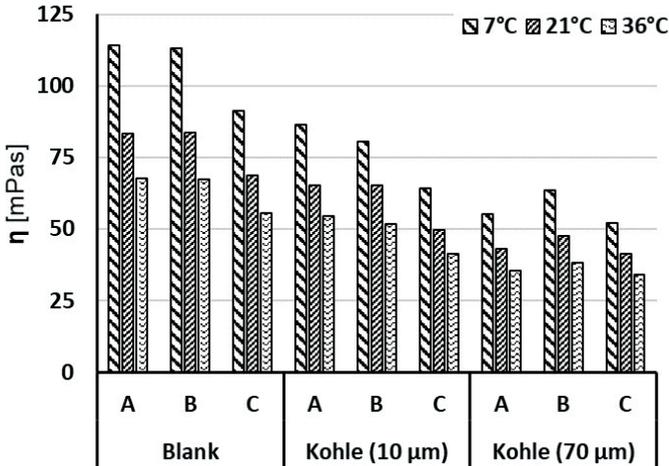


Abb. 5: Versuchsreihe 3

Temperatureinfluss

In allen Versuchsreihen ist bei steigender Temperatur ein Rückgang der scheinbaren Viskosität feststellbar (Tab. 1 und Abb. 6). Insbesondere aus Versuchsreihe 1 wird ersichtlich, dass die applizierte Kohle keine Auswirkungen auf das temperaturabhängige Verhalten der Suspension aufweist und dass durch entsprechende Korrekturfaktoren auf die Viskosität im Fermenter geschlossen werden kann. Die Temperaturabhängigkeit in den beiden Versuchsreihen mit den gefrorenen Proben ist hingegen inhomogener.

Tab. 1: Temperaturabhängiger Rückgang der scheinbaren Viskosität

Versuchsreihe		6-7 °C	21 °C	36 °C
V1	Blank	100 %	77 %	60 %
	Kohle 10	100 %	77 %	60 %
	Kohle 70	100 %	75 %	60 %
V2	Blank	100 %	68 %	53 %
	Kohle 10	100 %	75 %	60 %
	Kohle 70	100 %	83 %	68 %
V3	Blank	100 %	74 %	60 %
	Kohle 10	100 %	78 %	64 %
	Kohle 70	100 %	78 %	63 %

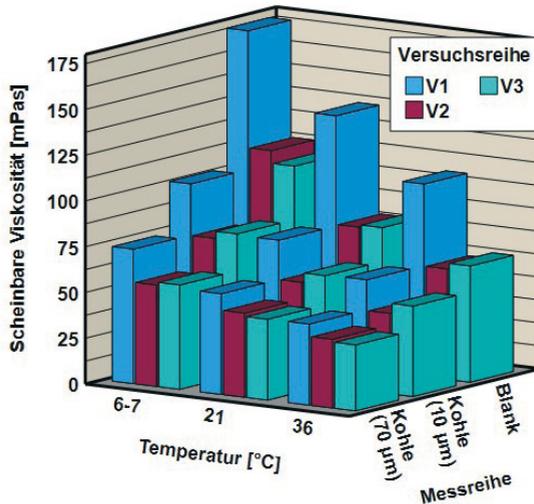


Abb. 6: Mittelwerte der scheinbaren Viskosität

5 Auswertung

Mit der vorgestellten Methodik zur Bestimmung der Viskosität in Gärsuspensionen ist die Messung auch von faserigen und schwierigen Substraten möglich. Auf eine Probenkühlung und anschließende Messung sollte verzichtet werden, da dadurch die Viskosität der Probe durch die thermische Vorbehandlung beeinflusst wird. Ebenfalls wird die Probenmatrix durch die Homogenisierung beeinflusst. Da die Homogenisierung vorwiegend vorhandene Fasern und grobe Partikel und Agglomerationen aufschließen soll die eine Messung der Viskosität beeinflussen und verhindern können muss dieses Faktum akzeptiert werden.

Die Applikation von Kohle führt in allen Versuchsreihen zu einer signifikanten Absenkung der Viskosität. Die Körnung der Kohle beeinflusst dabei die Stärke der Änderung. Durch eine gezielte Applikation von Kohle in großtechnischen Biogasanlagen sind vielfältige ökonomische Effekte zu erwarten.

Gleichermaßen wurde festgestellt, dass es einen direkten Zusammenhang zwischen Viskosität und Temperatur gibt. Durch weitere Messungen kann ein Korrekturfaktor spezifiziert werden.

Literatur/Quellen

- Brehmer, M.; Eppinger, T.; Kraume, M. (2012): Influence of Rheology on the Flow Pattern in Stirred Biogas Plants. In: Chemie Ingenieur Technik, 84 (11), S. 2048–2056. <https://doi.org/10.1002/cite.201200062>.
- Bundesamt für Justiz (Hrsg.) (2024): Gesetz für den Ausbau erneuerbarer Energien. Erneuerbare-Energien-Gesetz vom 21. Juli 2014 (BGBl. I S. 1066), das zuletzt durch Artikel 1 des Gesetzes vom 5. Februar 2024 (BGBl. 2024 I Nr. 33) geändert worden ist.
- Bundesnetzagentur (2023): Öffentliche Bekanntgabe der Zuschläge. Online verfügbar unter <https://www.bundesnetzagentur.de/DE/Fachthemen/ElektrizitaetundGas/Ausschreibungen/Biomasse/BeendeteAusschreibungen/Gebotstermin01042023/start.html>, zuletzt geprüft am 13.02.2024.
- Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. (FNR): Düngeverordnung. Online verfügbar unter <https://biogas.fnr.de/rahmenbedingungen/duengeverordnung-duev>, zuletzt geprüft am 13.02.2024.
- Koll, C. (2012): Aufnahme, Auswertung und Beurteilung rheologischer Parameter zur Auslegung und Simulation von Fördereinheiten sowie Rühraggregaten in Biogasanlagen. Masterarbeit, Leibniz Universität Hannover (Hrsg.). Online verfügbar unter <https://serwiss.bib.hs-hannover.de/frontdoor/deliver/index/docId/386/file/MA-Koll-2012.pdf>, zuletzt geprüft am 13.02.2024.
- Liebetrau, J.; Pfeiffer, D. (Hrsg.) (2020): Collection of Methods for Biogas. Methods to determine parameters for analysis purposes and parameters that describe processes in the biogas sector. Leipzig: Deutsches Biomasseforschungszentrum gemeinnützige GmbH. Online verfügbar unter <https://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:101:1-2020120712002544871918>.
- M. Türk; r. Deckert (1990): Rheologische Eigenschaften von Faulschlamm nach anaerobischer Fermentation von Gülle im Biogasreaktor. Berlin: Forschungszentrum für Mechanisierung und Energieanwendung in der Landwirtschaft Schlieben, zuletzt geprüft am 13.02.2024.
- Majer, S.; Kornatz, P.; Daniel-Gromke, J.; Rensberg, N.; Brosowski, A.; Oehmichen, K.; Liebetrau, J. (Hrsg.) (2019): Stand und Perspektiven der Biogaserzeugung aus Gülle. Leipzig: Deutsches Biomasseforschungszentrum gemeinnützige GmbH. Online verfügbar unter <https://edocs.tib.eu/files/e01fn21/1770081690.pdf>.
- Rensberg, N.; Denysenko, V.; Daniel-Gromke, J. (2023): Biogaserzeugung und -nutzung in Deutschland. <https://doi.org/10.48480/zptb-yy32>.

- Schneider, N.; Gerber, M. (2020): Rheological properties of digestate from agricultural biogas plants: An overview of measurement techniques and influencing factors. In: Renewable and Sustainable Energy Reviews, 121, S. 109709. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.109709>.
- Statistisches Bundesamt (2020): Wirtschaftsdünger tierischer Herkunft in landwirtschaftlichen Betrieben – Landwirtschaftszählung, Fachserie 3, Reihe 2.2.2. Online verfügbar unter https://www.destatis.de/DE/Service/Bibliothek/_publikationen-fachserienliste-3.html#489902, zuletzt geprüft am 23.04.2024.
- Viskosimetrie (1994), Friedrich-Schiller-Universität Jena (Hrsg.), Jena. Online verfügbar unter <https://www.chemgeo.uni-jena.de/chegemedia/ituc/praktikum/viskosimetrie.pdf>, zuletzt geprüft am 13.02.2024.
- DIN 1342-1:2003-11. Viskosität.

Danksagung

Die Arbeiten wurden im Rahmen des Verbundvorhaben: Einsatz von definierten Holzkohlen zur Prozessintensivierung im Biogasprozess (FKZ: 2220WD007A) durch das Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

Kontakt

Dr.-Ing. Jan Sprafke

Universität Rostock
Professur Abfall- und Stoffstromwirtschaft

Justus-von-Liebig-Weg 6, 18059 Rostock

☎ +49 (0)381.498-3421 | ✉ jan.sprafke@uni-rostock.de

🌐 www.auf.uni-rostock.de/professuren/a-g/aw/

Experimentelle Untersuchung von den Eluaten aus Rest- und Abfallstoffen der Biomasseverarbeitenden Industrie und des Gewerbes zur Biogasaufbereitung

Zusammenfassung: Biomasse wird in der Industrie in den unterschiedlichen Produkten und Verfahren eingesetzt und verarbeitet. Die Reste und Abfälle aus diesen Verfahren werden üblicher Weise in Kompostierungsanlage oder in anderen biogenen Abfallverwertungsverfahren entsorgt. Diese enthalten jedoch noch interessante Wert- und Inhaltsstoffe. Organische Säuren und Aminosäure spielen hierbei eine besondere Rolle. Sie können in verschiedenen Prozessen, z.B. bei der Gasreinigung, eingesetzt werden. Außerdem können diese am Ende der Nutzung in den Fermenter zurückgeführt werden und energetisch genutzt werden. Auf diese Weise könnte der Prozess der Biogasaufbereitung nachhaltiger und kostengünstiger gestaltet werden. Die untersuchten Waschlösungen wurden durch ein Elutionsverfahren aus den Reststoffen hergestellt. Um verschiedene Eluate zu testen, wurde eine kontinuierlich arbeitende Versuchsanlage im Labormaßstab aufgebaut und im Betrieb genommen. Darüber hinaus wurde die CO₂ Abscheideleistung bzw. Arbeitskapazität der verschiedenen Waschlösungen bewertet.

Abstract: Biomass is used and processed in industry in various products and processes. The residues and waste from these processes are usually disposed of in composting plants or in other biogenic waste recycling processes. However, these still contain interesting valuable substances and ingredients. Organic acids and amino acids play a special role here. They can be used in various processes, e.g. in gas purification. They can also be returned to the fermenter at the end of the process and used to generate energy. In this way, the biogas upgrading process could be made more sustainable and cost-effective. The investigated washing solutions were produced from the residues using an elution process. In order to test different eluates, a continuously operating laboratory-scale test plant was set up and put into operation. In addition, the CO₂ separation performance and working capacity of the various washing solutions were evaluated.

1 Einleitung

Die auf Absorption basierende Aminwäsche hat sie sich zur wichtigsten Technologie für die CO₂-Abscheidung entwickelt und wird nun in verschiedenen Industriezweigen eingesetzt. So wird diese Technik z. B. auch in der Biogasaufbereitung angewendet, wo sie zur Abtrennung von CO₂ aus Rohbiogas zur Erhöhung der Methankonzentration für eine weitere höherwertige Nutzung verwendet wird. Im Vergleich zu herkömmlichen Amin-Waschlösungen wie Diethanolamin (DEA) oder Monoethanolamin (MEA) können auch Aminosäuresalze als Waschlösung verwendet werden. Wesentliche Vorteile sind ihre Ungiftigkeit und leichte

Abbaubarkeit, was im Hinblick auf die Umweltverträglichkeit von großer Bedeutung ist.

Aminosäure kommen in vielen Früchten und Silage natürlich vor (Burroughs 1957). Heute werden Aminosäuren überwiegend gentechnisch mit Mikroorganismen oder großtechnisch aus Mineralölen hergestellt. Die entsprechenden Produkte werden weltweit über Pharmafirmen vermarktet. Eine eigene und ggf. kleinskalige Gewinnung aus Früchten oder Substrat wie Silage aus Biogasanlage, vorrangig aus Reststoffen, z.B. der Obstverarbeitung, wäre ein wichtiger Fortschritt zu mehr Eigenständigkeit.

Unter dem Begriff „Elution“ versteht man das Extrahieren einer Probe (Feststoff) mit wässrigen Lösungen (Hirner 2000). Die ist ein typischer Verfahren zur Bestimmung organischer Komponente im Feststoffen. Durch erste Laborversuche konnte bereits gezeigt werden, dass sich organische Säuren aus Silagen mit Wasser eluieren lassen. Für biogene Rest- und Abfallstoffe aus industrieller Verarbeitung werden ähnliche Resultate erwartet.

Aus der Literatur ist bekannt, dass bei neutralem pH-Wert die Aminosäure in wässrigen Lösungen als Zwitterion vorliegen. Reagiert dieses Zwitterion mit Kaliumhydroxid (KOH), wird die Säuregruppe neutralisiert und von der Aminogruppe wird ein Proton abgespalten (Greenhouse Gas Control Technologies 7 2005). Aus diesem Grund kann die Aminogruppe reversibel mit CO_2 reagieren. Der Einsatz von Aminosäuresalzen in chemischen Absorptionsverfahren wird deswegen im Bereich der CO_2 -Abrennung bei Biogasaufbereitung diskutiert.

2 Extraktionsmethode

Als Vorstudie wurde ein erstes Screening von Absorptionslösungen aus natürlichen Quellen mit Batchversuchen im Labormaßstab durchgeführt. Abb. 1 (oben links) und (oben rechts) zeigen die Verläufe der gemessenen CO_2 -Konzentration des austretenden Gases in Vol.-% aus dem Absorber bzw. Desorber. Im Gleichgewichtszustand wurden jeweils Proben entnommen und die CO_2 -Beladung der Lösung analysiert (siehe Abb. 1, unten).

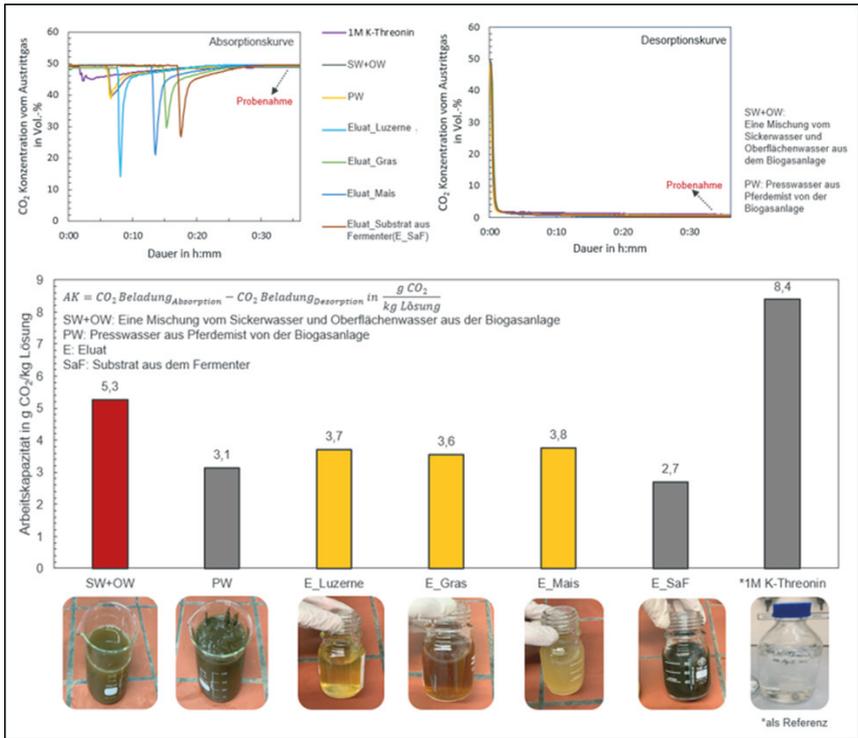


Abb. 1: Ergebnisse der Batch-Versuche, (linksoben) Absorptionskurve, (rechts oben) Desorptionskurve und (unten) CO₂ Absorptionskapazität der Waschlösung

Insgesamt lassen die Kurvenverläufe keine großen Unterschiede erkennen. Da die Proben im Gleichgewichtszustand der Versuche entnommen wurden, kann davon ausgegangen werden, dass hier die maximale Beladung der Waschlösungen vorliegt. Dabei zeigt die Mischung aus Sickerwasser und Oberflächenwasser die höchste und damit beste Arbeitsfähigkeit der Waschlösung von 5,3 gCO₂/kgLM. Die Zusammensetzung sowie die Qualität der Eluate sind jedoch stark von den Umgebungsbedingungen wie Temperatur und Niederschlagsmenge abhängig, was eine technische Nutzung erschwert. Aus diesem Grund wurden die drei Eluate (Mais und Gras) für weitere Untersuchungen als besser eingestuft.



Abb. 2: Schüttelverfahren zur Herstellung des Eluats

Die Eluate wurden durch ein Schüttelverfahren hergestellt (siehe Abb. 2). Die Originalprobe (250 g) wurde mit Zugabe einer Kalilauge (50 Gew.-% KOH) in 1 l PP-Flasche eingewogen und mit 1,25 l deionisiertem Wasser versetzt. Die Probenflasche wurde 24 Stunden lang im Überkopfschüttler geschüttelt. Nach dem Absetzen der Feststoffe in der Suspension (15 Minuten) wurde eine Filtration mit Hilfe eines Glasfasermikrofilters durchgeführt.

3 CO₂-Abscheidung mit Eluat

3.1 Versuchsaufbau

Um die hergestellten Eluate zu testen, wurde eine kontinuierlich arbeitende Versuchsanlage im Labormaßstab aufgebaut und in Betrieb genommen.

In Abb. 3 ist ein Schema des Absorptions- und Desorptionsprozesses für CO₂ dargestellt. Der 5-Liter-Vorratstank wird mit der Absorptionslösung (Eluaten) gefüllt, die für den Absorptions-/Desorptionsprozess verwendet wird und mit einer Heizplatte auf die gewünschte Temperatur aufgeheizt. Die Absorptionslösung gelangt kontinuierlich durch die Absorptionskolonne (befüllt mit Füllkörpern, um die Kontaktzeit und den Oberflächenzustand des Fluids zu optimieren), während es im Gegenstrom auf das synthetische Rohgas trifft, aus dem das CO₂ absorbiert wird.

Die mit CO₂ beladene Absorptionslösung („CO₂-reiche Lösung“) kehrt in den Tank zurück und durchläuft die Desorberkolonne mit einer höheren Temperatur als die Absorberkolonne, um das zuvor absorbierte CO₂ aus dem Gemisch zu trennen. Gleichzeitig wird Strippluft im Gegenstrom durch die Desorberkolonne geleitet, um die Regeneration der Waschlösung zu steigern.

Ein Kühlaggregat dient dazu, die aus der Desorberkolonne stammende Flüssigkeit zu kühlen und so das Temperaturniveau der Absorptions- und Desorptionskolonne zu regeln.

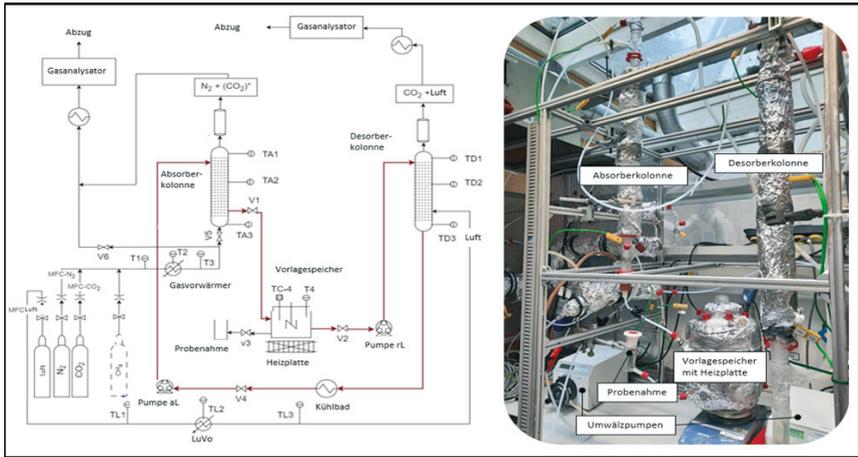


Abb. 3: Versuchsaufbau zur Untersuchung von Absorption und Regeneration

Tab. 1: Übersicht der untersuchten Eluate

Rohstoff von dem Eluat	Zugabe der KOH vor dem Schüttelverfahren	
Maissilage	Ja	
Grassilage	Ja	
Apfelschale von Dietz	Ja	Nein
Bio-Äpfelschale von Beutelsbacher	Ja	Nein

In den Versuchen wurden Absorptionsgleichgewichtsdaten für die sechs untersuchten Eluate ermittelt. In Tab. 1 sind die untersuchten Proben zusammenfassend dargestellt. Um den Einfluss der Zugabe von Kaliumhydroxid auf die Elution bei den Absorptionsexperimenten zu untersuchen, wurden zwei verschiedene Apfelschalenproben vor und nach der Elution mit KOH versetzt.

3.2 Ergebnisse der Laborversuche

In Tab. 2 sind die Versuchsbedingungen. Der Rohgasstrom besteht aus 1 l/min CO_2 und 1 l/min N_2 . Da die Regeneration der Absorptionslösung im Vergleich zur Absorption langsamer ist, wird der Durchfluss von der CO_2 -reichen Lösung auf 180 ml/min eingestellt.

Tab. 2: Übersicht der Versuchsbedingungen

Parameter	Wert	Einheit	
Gasdurchsatz	Rohgas	2	
	Strippluft	5	l/min
Temperaturen	Absorber	35 - 40	°C
	Desorber	50 - 65	
Umwälzpumpen	CO ₂ -arme Lösung	90	ml/min
	CO ₂ -reiche Lösung	180	

Abb. 4 zeigt die Verlaufskurve der CO₂-Konzentrationen im Reingas (am Absorberaustritt) bzw. in der Abluft (am Desorberaustritt) von der kontinuierlichen Laboranlage mit verschiedene Absorptionslösungen. Es ist deutlich zu sehen, dass zu Beginn der Versuche die CO₂-Konzentration des Reingases auf stark abnimmt. Gleichzeitig wird noch kein CO₂ im Desorber desorbiert. Dies liegt daran, dass zu diesem Zeitpunkt der Arbeitsbereich der Laboranlage noch nicht erreicht wurde. Danach steigt die CO₂-Konzentration des Reingases langsam wieder und CO₂ wird im Desorber desorbiert. Dies ist aus dem Anstieg der CO₂-Konzentration am Desorberaustritt ersichtlich. Nach etwa eine Stunde stabilisiert sich die CO₂-Konzentration im Reingas. Die CO₂-Konzentrationen im Reingas liegen jedoch bei allen Versuchen deutlich über dem Zielwert. Dies kann daran liegen, dass die Kontaktfläche zwischen Gas und Eluat zu klein und die Verweilzeit zu kurz ist, so dass kein ausreichender Stoffübergang stattfindet. Daher liegt der Schwerpunkt weiterer Versuche auf der Verbesserung des Stoffübergangs durch Optimierung des Flüssig-Gas-Verhältnisses.



Abb. 4: Gaskonzentrationsverläufe, zwei Apfelschalen-Eluate mit KOH-Zusatz vor dem Schütteln

Die CO_2 -Aufnahmefähigkeit von vier verschiedenen Eluaten nach der Absorption wurde ebenfalls gravimetrisch bestimmt. Wie Abb. 5 zeigt, weist das Eluat von Maissilage eine ähnliche CO_2 -Beladung von $11,5 \text{ gCO}_2/\text{kgLM}$ (Lösungsmittelphase – rote Punkte) wie L-Threonin ($12,8 \text{ gCO}_2/\text{kgLM}$) auf, während die Eluate von Grassilage bzw. Apfelschalen eine geringere Kapazität zwischen $2,7 \text{ gCO}_2/\text{kgLM}$ und $4,4 \text{ gCO}_2/\text{kgLM}$ aufweisen. Der Grund dafür könnte folgender sein:

Die Zugabe von Kaliumhydroxid während der Elution führte zu einigen Veränderungen in der Zusammensetzung der Eluaten. In Abb. 6 ist auch zu erkennen, dass die Lösung mit dem nach der Elution zugesetzten Kaliumhydroxid eine deutliche höhere CO_2 -Beladung und bessere CO_2 -Abscheideleistung aufweist. Darüber hinaus zeigen die Abb. 6 (b-d), dass die Eluate, die durch Zugabe von Kaliumhydroxid zur Elution erhalten wurden, bei den CO_2 -Absorptionsexperimenten mehr Schaum erzeugen kann. Dies kann bei Experimenten zu Problemen führen, z.B. die Schaumbildung in Gasleitung zu ungenauen Analysen der Zusammensetzung des Reingases, zu Beschädigung am Messgerät und zu Messfehlern führen.

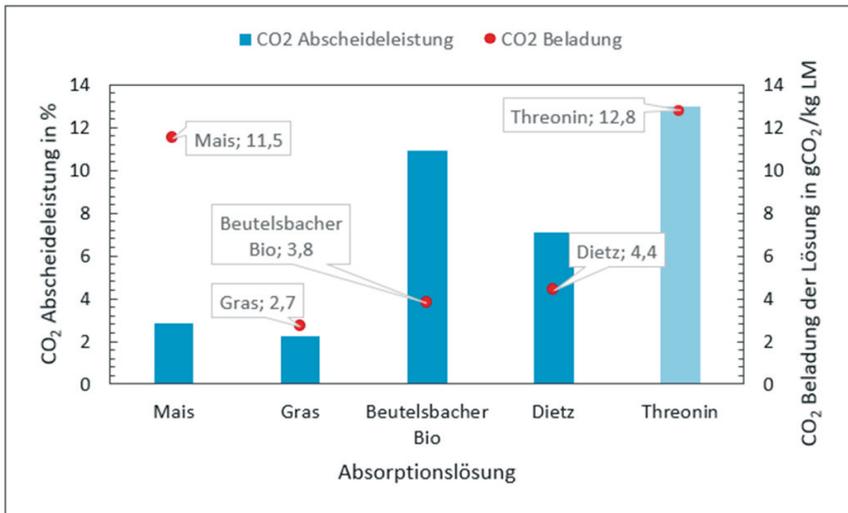


Abb. 5: Abscheideleistung und CO_2 -Beladung der verschiedenen Eluate, zwei Apfelschalen-Eluate mit der Zugabe von KOH vor dem Schütteln, L-Threonin als Referenz

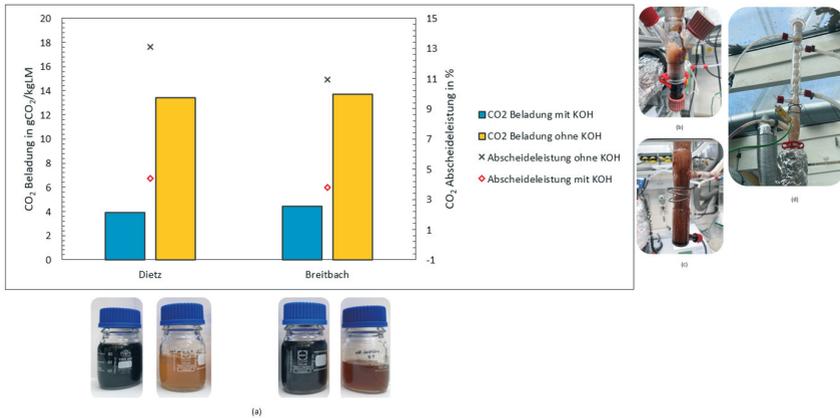


Abb. 6: Einfluss der Zugabe von KOH vor dem Schüttelverfahren auf die CO₂-Absorption von Apfelschalen-Eluaten: (a) CO₂ Absorptionskapazität der Eluate, (b - d) Schaumbildung an verschiedenen Stellen (b: Absorberkolonne, c: Desorberkolonne, d: Kondensator)

4 Zusammenfassung und Ausblick

Laborergebnisse haben gezeigt, dass aus Rest- und Abfallstoffen hergestellte Eluate CO₂ absorbieren können, daher haben sie großen Potenzial für die künftige Verwendung für die Biogasaufbereitung. Vor diesem Hintergrund gewinnen sie in der Kreislaufwirtschaft an Bedeutung.

Weitere Forschungsarbeiten können durchgeführt werden, um das Potenzial nachhaltiger Aminosäuren (natürlichen Ursprungs) für die Biogasaufbereitung weiterzuentwickeln, wobei folgende Faktoren im Mittelpunkt stehen sollten:

- Langzeitstabilität der Eluate (Degradation): Für eine nachhaltige CO₂-Absorptionsleistung ist die Langzeitstabilität von Eluaten von entscheidender Bedeutung. Aminosäuren, die für Abbauprozesse wie Oxidation oder mikrobielle Aktivität anfällig sind, können die langfristige Effizienz des Eluats beeinträchtigen. Künftige Forschungsarbeiten könnten untersuchen, was die tatsächlichen Einschränkungen sind und sogar Stabilisierungszusätze oder Methoden entwickeln, um die Langlebigkeit von Eluaten zu verbessern und ihre Wirksamkeit über längere Zeiträume zu gewährleisten.
- CO₂-Absorptions-/Desorptionsleistung: Künftige Forschungsarbeiten könnten sich auf die Verbesserung der Absorptionskapazität und -effizienz des Eluats konzentrieren, wobei innovative Methoden wie die Änderung der Zusammensetzung des Eluats oder die Einführung von Katalysatoren zur Verbesserung der Reaktionen untersucht werden können.

- Chemische Laboranalysen: Die Eluate sollten durch die wichtigsten Parameter wie TS, pH-Werte, Nährstoffgehalt sowie organische Säuren orientierend charakterisiert. Außerdem wird das Biogasertrag aus den gewonnenen Eluaten nach CO₂-Wäsche für die Rückführung der verbrauchten Stoffe nach Gasreinigung in den Biogasprozess bestimmt.
- Einfluss von Kaliumhydroxid: Kaliumhydroxid, das häufig als „Aktivator“ verwendet wird, hat einen erheblichen Einfluss auf die Stabilität und Leistung von Aminosäuren in Eluaten. Hierfür sind können genauere Analysemethoden entwickelt werden, um eine passgenaue Dosierung der tatsächlich erforderlichen Kalilauge zu bestimmen. Des Weiteren können weitere mögliche Aktivatoren untersucht werden.
- Reduzierung der Schaumbildung durch Zugabe von Entschäumern

Literatur/Quellen

- Burroughs, L. F. (1957): The amino-acids of apple juices and ciders. In: J Sci Food Agric 8 (3), S. 122–131. DOI: 10.1002/jsfa.2740080304.
- Greenhouse Gas Control Technologies 7 (2005): Elsevier.
- Hirner, Alfred V. (2000): Elutions- und Extraktionsverfahren zur Bestimmung mobiler anorganischer und organischer Kontaminanten in Feststoffen. In: Helmut Günzler, A. Müfit Bahadir, Klaus Danzer, Werner Engewald, Wilhelm Fresenius, Rudolf Galensa et al. (Hg.): Analytiker-Taschenbuch, Bd. 21. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg (Analytiker-Taschenbuch), S. 151–177.

Kontakt

Jianing Song

Institut für Feuerungs- und Kraftwerkstechnik,
Universität Stuttgart
Pfaffenwaldring 23, 70569 Stuttgart

☎ +49 (0)711.682-66210 | ✉ jianing.song@ifk.uni-stuttgart.de
🌐 www.ifk.uni-stuttgart.de

MuD SlurryUpgrade

Optimierung der Wirtschaftsdünger für eine nachhaltige Landwirtschaft und Energieerzeugung

Zusammenfassung: Das MuD-Vorhaben: „Umsetzung regionaler Nährstoffkonzepte bei der Gülleaufbereitung“ (SlurryUpgrade) unterstützt Verfahren zur Aufbereitung von Wirtschaftsdünger. Ziel ist unter anderem die Schließung von Nährstoffkreisläufen und die Reduktion von Treibhausgasemissionen. Durch eine Kaskadennutzung von Wirtschaftsdüngern kann eine stoffliche und energetische Verwertung ermöglicht werden. Voraussetzung dafür ist eine Separation der Wirtschaftsdünger in eine feste und flüssige Phase. Die Dünngülle verbleibt auf dem Betrieb und kann emissionsarm gedüngt werden. Die Feststoffe bieten höhere Methanerträge und könnten eine nachhaltige Alternative zu traditionellen Substraten in Biogasanlagen darstellen. Die Zweifachnutzung von Wirtschaftsdüngern könnte dabei helfen Emissionen zu senken und Nährstoffe (insbesondere Phosphor) aus Überschussregionen zu exportieren.

Abstract: The MuD project: Implementation of regional nutrient concepts in slurry processing (SlurryUpgrade) supports processes for the processing of farm manure. Among other things, the aim is to close nutrient cycles and reduce greenhouse gas emissions. Cascade utilisation of farm manure enables material and energy recovery. The pre-requisite for this is the separation of farm manure into a solid and liquid phase. The liquid manure remains on the farm and can be fertilised with low emissions. The solids offer higher methane yields and could represent a sustainable alternative to traditional substrates in biogas plants. The dual use of manure could help to reduce emissions and export nutrients (especially phosphorus) from surplus regions.



Gefördert durch



Projektträger



aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages

1 Einleitung

Das MuD-Vorhaben: „Umsetzung regionaler Nährstoffkonzepte bei der Gülleaufbereitung“ (SlurryUpgrade) begleitet verschiedene Verfahren zur Aufbereitung von Wirtschaftsdüngern mit dem Hauptziel, die entstehenden Produkte bestmöglich stofflich zu verwerten. Dabei werden Kooperationsbetriebe in fünf Modellregionen (Bayern, Nordrhein-Westfalen, Niedersachsen, Mecklenburg-Vorpommern und Schleswig-Holstein) unterstützt. Insgesamt zielt das Projekt darauf ab, Nährstoffkreisläufe zu schließen und dabei regionale Unterschiede zu berücksichtigen.

Um das Ziel der Klimaneutralität bis 2045 zu erreichen, ist eine deutliche Reduktion des Ressourcen- und Energieverbrauchs sowie der Treibhausgasemissionen unumgänglich. Es erfordert zudem den Aufbau eines vollständig erneuerbaren Energiesystems und die Implementierung einer Kreislaufwirtschaft. Innerhalb dieses Rahmens sollte der Einsatz von Wirtschaftsdüngern, insbesondere separierter Feststoffe für die Energieerzeugung aus biogenen Rest- und Abfallstoffen verstärkt und gezielt optimiert werden. Hierbei ist die zweifache Nutzung des Ausgangsmaterials besonders interessant, um einen möglichst effizienten Verwertungsweg zu etablieren, da nach erfolgter Vergärung dieses auch als wertvoller Dünger genutzt werden kann. Dies bedeutet eine längere Verwertungs- und Prozesskette, die ökonomische und ökologische Vorteile für beide Seiten bietet.

Auch können durch den Ausbau eines Kaskadensystems zur Wirtschaftsdüngernutzung potenzielle Emissionen eingespart werden. Derzeit kommen über 90 % der Ammoniakemissionen aus der Landwirtschaft. Davon entstehen bereits 30 % der Emissionen im Stall, etwa 20 % bei der Lagerung und etwa 50 % bei der Ausbringung (Pöllinger 2018; Anderl et al. 2017). Auch Daten des Umweltbundesamtes zeigen, dass die Treibhausgasemissionen im Bereich Wirtschaftsdüngermanagement seit 1990 nur unbedeutend gesunken sind. Insgesamt fand zwar eine Reduktion der Treibhausgasemissionen in der Landwirtschaft von 1990 mit 72,6 Millionen Tonnen Kohlenstoffdioxid-Äquivalenten zu 55,5 Millionen Tonnen Kohlenstoffdioxid-Äquivalenten im Jahr 2022 statt, dies ist aber insbesondere auf den Bereich Verdauung und Tierhaltung zurückzuführen (UBA 03/2023). Im Bereich Wirtschaftsdüngermanagement besteht somit weiterhin großes Potenzial Emissionen einzusparen. Eine Möglichkeit bietet dabei die Aufbereitung von Wirtschaftsdüngern. Hier kann bei kurzer Lagerungsdauer der Feststoffe mit zeitnaher Vergärung in der Biogasanlage und durch die verbesserten Infiltrationseigenschaften der Dünngülle das Risiko der Ammoniakemissionen gesenkt werden. Außerdem besteht die Möglichkeit durch weitere Aufbereitungsschritte nach der Vergärung das Gärprodukt bis zu einem mineraldüngerähnlichen Produkt zu konditionieren.

2 Kaskadennutzung von Wirtschaftsdüngern

Durch die Separation der Wirtschaftsdünger in eine feste Fraktion und eine flüssige Fraktion ist sowohl eine stoffliche Verwertung auf landwirtschaftlichen Flächen, als auch eine energetische Verwertung in Biogasanlagen möglich (Abb. 1). Viele Betriebe nutzen die Separation der tierischen Rohgülle (insbesondere Rindergülle), um den Trockensubstanzgehalt zu reduzieren. Die resultierende flüssige Phase weist eine erhöhte Infiltrationskapazität auf und wird effizient zur Düngung auf landwirtschaftlichen Flächen eingesetzt. Die feste Phase aus Rinder- oder Schweinegülle hingegen erweist sich als handelsfähiges Gut, welches von Biogasanlagen für die Vergärung und somit sowohl für die Energiegewinnung, als auch für die Produktion eines nährstoffreichen Gärproduktes genutzt werden kann. Anschließend kann das Gärprodukt direkt auf landwirtschaftlichen Flächen als Dünger verwendet, oder weiteren Aufbereitungsschritten zugeführt werden. Dabei stellt eine erneute Separation die einfachste Form der Aufbereitung dar. Oftmals ist außerdem bei Biogasanlagen eine Trocknung der Feststoffe nachgeschaltet. Beim Trocknungsprozess wird dabei durch eine Abluftreinigung das entstehende Ammoniak aufgefangen. Dadurch entstehen weniger Ammoniak-Verluste während der Lagerung und Ausbringung. Das getrocknete Gut kann entweder direkt ausgebracht oder in Pellets gepresst werden, welche eine höhere Verteilgenauigkeit aufweisen. Eine weitere Möglichkeit der Aufbereitung ist eine Vakuumverdampfung der flüssigen Phase, hier entstehen als Düngeprodukte ein Dickschlamm und eine mineraldüngerähnliche Ammoniumsulfatlösung (ASL). Die Aufbereitung des Gärproduktes stellt somit, neben der Lagerraumeinsparung, eine Möglichkeit dar die Düngeeigenschaften weiter zu verbessern.

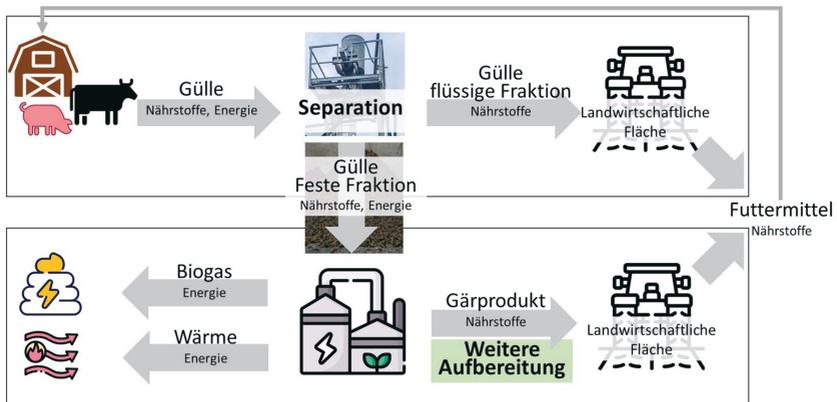


Abb. 1: Kaskadennutzung von Wirtschaftsdüngern (eigene Darstellung nach Warnecke et al. 2009 und Brauckmann 2014)

2.1 Separation

Die Separation von Wirtschaftsdüngern stellt ein einfaches mechanisches und somit relativ kostengünstiges Verfahren der Aufbereitung dar. Dabei kann eine Separation durch einen Pressschneckenseparator oder einer Zentrifuge erfolgen. Üblicherweise werden für die Separation von Rindergülle Pressschnecken-separatoren verwendet. In Abb. 2 sind Projekt-Ergebnisse aus der Separation von Rindergülle mit Pressschneckenseparatoren aus den Bundesländern Niedersachsen, Nordrhein-Westfalen und Schleswig-Holstein dargestellt. Dabei handelt es sich um Daten, die auf Praxisbetrieben erhoben wurden. Dargestellt sind die Mittelwerte von drei verschiedenen Betrieben aus fünf Stichproben. Durch die Separation kann eine Reduktion des TS-Gehaltes der Dünn-gülle erzielt werden. Außerdem ist eine Reduktion des Ges.-N-Gehaltes und des P_2O_5 -Gehaltes sowie eine Erhöhung des NH_4 -N Anteils in der Dünn-gülle festzustellen. Es findet somit eine Anreicherung von Ges.-N sowie von P_2O_5 in den Feststoffen statt (Abb. 2).

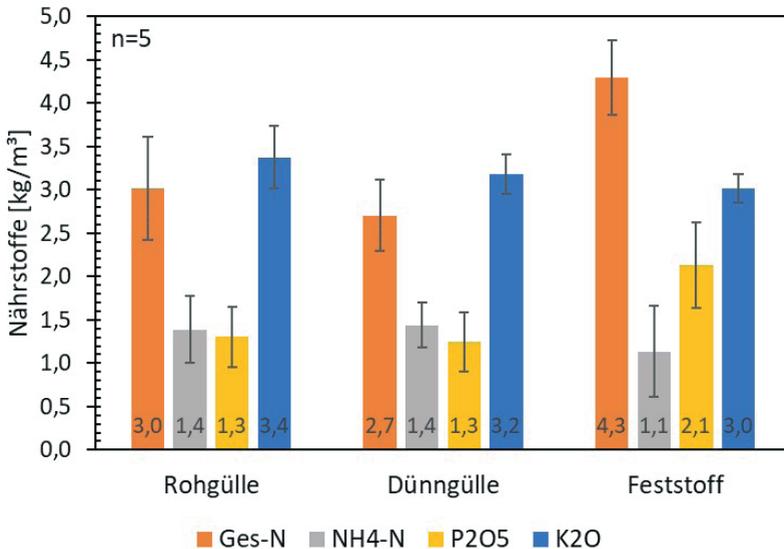


Abb. 2: Nährstoffgehalte [kg/m³] von separierter Rindergülle. Dargestellt ist die unseparierte Rohgülle, die Dünn-gülle und Feststoffe aus 5 verschiedenen Gülleproben der Modellregionen NRW, SH und NDS.

In Abb. 3 sind die Ergebnisse aus den Jahren 2022-2024 einer, mittels Pressschneckenseparators, separierten Mastschweinegülle dargestellt. Die verwendete Mastschweinegülle stammt von der Versuchsstation der LWK Niedersachsen in Wehnen. Insgesamt wurden 16 Proben ausgewertet. Die Ergebnisse zeigen, dass bei der Separation von Mastschweinegülle durch einen Pressschneckenseparator eine Anreicherung von Ges.-N und P_2O_5 in den Feststoffen festgestellt werden kann. Dabei ist der Nährstoffabscheidegrad abhängig vom

TS-Gehalt der Rohgülle. Im Mittel liegt die P_2O_5 -Abscheidung in die Feststoffe bei etwa 35 % und die N-Abscheidung bei etwa 19 %. Es findet somit insbesondere eine Reduktion des P_2O_5 -Gehaltes in der Dünnphase bei der Separation von Mastschweinegülle statt.

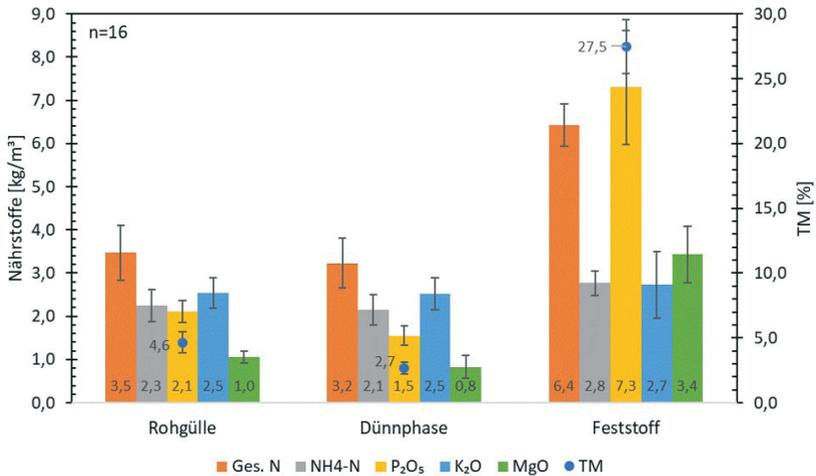


Abb. 3: Nährstoffgehalte [kg/m³] einer separierten Mastschweinegülle. Dargestellt ist die unseparierte Rohgülle, die Dünngülle und Feststoffe aus 16 Gülleproben der Modellregion NDS

Die P_2O_5 -Abscheidung in die Feststoffe lässt sich durch den Einsatz einer Zentrifuge nochmals wesentlich erhöhen, so dass diese bei der Separation von Mastschweinegülle maßgeblich eingesetzt wird. Jedoch sind die Kosten für die Separation mit einer Zentrifuge im Vergleich zu einem Pressschneckenseparator in etwa doppelt so hoch (Landwirtschaftliches Wochenblatt, 2022). Letztlich bietet eine Separation der Mastschweinegülle die Möglichkeit Phosphor mit einer höheren Nährstoffdichte aus Regionen mit P-Überschüssen in Regionen mit einer P-Unterversorgung zu transportieren.

2.2 Nutzung der Dünngülle

Die Dünngülle verbleibt nach der Separation zu meist auf dem Veredlungsbetrieb und wird zur Düngung der landwirtschaftlichen Flächen eingesetzt. Der Separationsprozess führt zu einem deutlich reduzierten Trockensubstanzgehalt. Dies ist insbesondere für rinderhaltende Betriebe interessant, da die Dünngülle wesentlich besser in den Boden infiltriert und somit zu geringeren Ammoniakemissionen bei der Ausbringung führt. So wird beispielsweise in Österreich ein 20%iger Minderungsfaktor bei der Düngung mit separierter dünner Rindergülle angenommen (UBA 2021). Zwar spielen Methan- und Lachgasemissionen bei der Ausbringung von Wirtschaftsdüngern, im Vergleich zu Ammoniakemissionen, eine eher untergeordnete Rolle, dennoch konnte auch hier eine Reduktion

der Methanemissionen bei der Düngung mit separierter dünner Rindergülle festgestellt werden (Amon 2001).

Mit dem verbesserten Infiltrationsvermögen geht ebenfalls eine erhöhte Nährstoffverfügbarkeit einher, da weniger Verluste in Form von Emissionen auftreten. Außerdem ist die Nährstoffzusammensetzung der Dünngülle verändert (Abb. 2, Abb. 3), so dass insgesamt ein höherer Anteil an schnell verfügbarem $\text{NH}_4\text{-N}$ in der Dünngülle und ein geringerer Ges.-N-Gehalt vorliegt. Die veränderte Nährstoffzusammensetzung ist bei der Düngung zu beachten.

2.3 Nutzung der Feststoffe

Die Nutzung separierter Feststoffe aus Wirtschaftsdüngern bietet sowohl die Möglichkeit diese direkt zu düngen und als Mehrnährstoff- und Organiklieferant zu nutzen, oder aber diese zunächst in Biogasanlagen für die Energiegewinnung zu vergären. Wenn Feststoffe aus Wirtschaftsdüngern als Düngemittel genutzt werden, sollten diese möglichst kurz und emissionsmindernd gelagert und bei der Düngung unbedingt sofort eingearbeitet werden, da ansonsten die Ammoniakverluste nicht zu vernachlässigen sind (Amon et al. 2001; Amon 2006). Außerdem ist zu beachten, dass die Verteilgenauigkeit auf Grund des hohen TS-Gehaltes technisch sehr anspruchsvoll ist. Des Weiteren ist die Düngung im Jahresverlauf nur in kurzen Zeiträumen möglich und sinnvoll. Daher bietet die Nutzung der Feststoffe in einer Biogasanlage eine ganzjährige Abnahmemöglichkeit.

Die Auswahl der Substrate für den Einsatz in einer Biogasanlage wird von verschiedenen Faktoren beeinflusst. Darunter fallen beispielsweise die Kosten für Substrateinkauf sowie die Verfügbarkeit und damit einhergehend die Transportkosten. Außerdem ist die Zusammensetzung der Substrate, insbesondere ihr Gehalt an organischen Stoffen und das Kohlenstoff- zu Stickstoffverhältnis entscheidend für die Biogasproduktion und die Qualität des produzierten Gases. Eine Schlüsselgröße für die Bemessung einer effizienten Biogasproduktion ist hierbei das Methanpotenzial oder die Biogausausbeute.

Die Tab. 1 präsentiert den Methanertrag [$\text{m}^3/\text{t FM}$] in Abhängigkeit vom Inputmaterial, wobei Daten und Berechnungen der Bayrischen Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL) und des Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V. (KTBL) mit eigenen Proben und Berechnungen verglichen wurden. Bei einem Input von 1 t Maissilage variieren die Methanerträge je nach Substratbeschaffenheit zwischen 96,7 - 104,0 m^3 Methan. Im Vergleich dazu liegt der Methanertrag von unseparierter Milchviehgülle zwischen 11,1 - 16,7 m^3 Methan. Separierte feste Milchviehgülle erzielt hingegen einen Methanertrag von etwa 25,3 - 37,9 m^3 . Bei unseparierter Mastschweinegülle beträgt der Methanertrag etwa 12,2 m^3 , während er bei einer sehr TS-armen Mastschweinegülle zwischen 3,0 und 4,5 m^3 Methan pro Tonne Inputmaterial liegt. Eine separierte Mastschweinegülle (feste Phase) weist hingegen potenzielle Methanerträge von etwa

32,2-48,2 m³ auf. Im Vergleich dazu liegen Schweinemist und Rindermist bei 44,5 bzw. 49,5 m³ und somit in einem ähnlichen Bereich.

Tab. 1: Zusammenstellung Methanerträge verschiedener Inputsubstrate für Biogasanlagen.

Substrat	TM	Theor. Biogasertrag (ber. nach Baserge)		Biogasertrag (real)		CH ₄ [%]	Methanertrag [m ³ /t FM]	Datenquelle
		Ni/kg oTM	Nm ³ /t FM	Ni/kg oTM	Nm ³ /t FM			
Maissilage	33			586,1	185,3	52,2	96,7	Berechnung der LfL
Maissilage	33			650	200	52	104,0	Berechnung KTBL
Mastrindergülle	10			400	34	55	18,7	Literatur nach LfL
Milchviehgülle	8,5			280	20,2	55	11,1	Literatur nach LfL
Milchviehgülle einschließlich Futterresten	8,5			350	25,3	55	13,9	Literatur nach LfL
Milchviehgülle	9,6	558	41	215 – 322,5	20,5 – 30,75	54,3	11,1 – 16,7	Eigene Probenahme*
Rindermist frisch	25			450	90	55	49,5	Literatur nach LfL
Milchviehgülle separiert (fest)	20,1	561	96	280,5 – 420,75	48 – 72	52,7	25,3 – 37,9	Eigene Probenahme*
Schweinegülle	6			400	20,4	60	12,2	Literatur nach LfL
Schweinegülle	2,3	634	10	317 – 475,5	5 – 7,5	60,2	3,0 – 4,5	Eigene Probenahme*
Schweinemist	22,5			400	74,3	60	44,6	Literatur nach LfL
Schweinegülle (fest)	25,7	562	123	281 – 421,5	61,5 – 92,25	52,3	32,2-48,2	Eigene Probenahme*

*Berechnung durch Lufa Nord West. Hinweis: Bei einer Verweilzeit von ca. 100 – 150 Tagen ist das real zu erzielende Biogaspotential mit etwa 50 % – 75 % der hier ermittelten theoretischen Werte anzusetzen.

Der Einsatz separierter Milchviehgülle kann laut Brauckmann (2014) zu etwa doppelt so hohen Methanerträgen wie unseparierte Gülle führen. Die eigens erhobenen Proben bestätigen dies mit etwa 2,3-fach höheren Methanerträgen. Separierte feste Schweinegülle erreicht nach Brauckmann (2014) etwa siebenmal höhere Methanerträge als Rohgülle, wobei die eigene Stichprobe eine 12,3-fach höhere Methanproduktion zeigt. Wird hingegen der Methanertrag mit einer Maissilage verglichen, dann lässt sich durch den Einsatz separierter Feststoffe in Biogasanlagen ein Viertel bis die Hälfte des Methanertrages der Maissilage erreichen. Dabei liegen die Kosten für eine Tonne Mais zwischen 25-30 €, wohingegen die Kosten für separierte Feststoffe zwischen 6-8 €/t liegen. Somit können die Kosten für Methan aus einer Tonne Maissilage auf etwa 0,25-0,30 €/m³ geschätzt werden. Bei 1 t separierter Milchviehgülle kann ein mittlerer Methanertrag von 31,6 m³ angenommen werden, die Kosten liegen demnach zwischen 0,19 und 0,25 €/m³ Methan. Für 1 t separierte Mastschweinegülle mit einem mittleren Methanertrag von 40,2 m³ betragen die Kosten etwa 0,15-0,20 €/m³ Methan. Die niedrigeren Kosten für den Substrateinkauf können somit die geringeren Methanerträge kompensieren.

Wie der Tab. 1 zu entnehmen weisen die Methanerträge deutliche Unterschiede zwischen unseparierten und separierten Wirtschaftsdüngern auf. Separierte Feststoffe können im Allgemeinen höhere Methanerträge erzielen als unseparierte Wirtschaftsdünger, was auf ihr verbessertes Potenzial für die Biogasproduktion hinweist. Durch die geringeren Kosten für den Einkauf der Feststoff-Substrate im Vergleich zu traditionellen Substraten wie Maissilage, kann der

Einsatz von Feststoffen pflanzliche Substrate teilweise substituieren und eine nachhaltige Alternative darstellen. Jedoch ist bei dem Einsatz separierter Feststoffe in Biogasanlagen zu beachten, dass diese in ihrer Zusammensetzung stark variieren, was die Erreichung einer gleichbleibenden Qualität des Substrats erschwert. Auch können separierte Feststoffe Verunreinigungen wie Sand, Steine oder Kunststoffe enthalten, die den Vergärungsprozess stören oder die Anlagen beschädigen können. Dennoch zeigen sie Potenzial für eine nachhaltige Biogasproduktion im Vergleich zu traditionellen Substraten.

4 Fazit und Ausblick

Insgesamt kann eine Separation von Wirtschaftsdüngern dazu führen, dass Nährstoffe mit einer höheren Transportwürdigkeit verbracht werden können und Veredlungsbetriebe einen emissionsarmen und effizienten Dünger, in Form der Dünngülle, erhalten. Die Dünngülle verbleibt somit auf dem Veredlungsbetrieb, während die Feststoffe für die Energieerzeugung genutzt werden. Außerdem könnten Biogasanlagen durch den Einsatz separierter Feststoffe Substratkosten einsparen und durch eine Reduktion des Flächenbedarfs profitieren. Allerdings bringt der Einsatz von separierten Feststoffen aus Wirtschaftsdüngern in Biogasanlagen auch Herausforderungen mit sich. So ist beispielsweise zu beachten, dass die variierende Zusammensetzung und mögliche Verunreinigungen die Effizienz und Prozessstabilität beeinträchtigen und den Einsatz begrenzen können. Insgesamt überwiegen die potenziellen Vorteile, insbesondere im Hinblick auf die ganzjährige Verfügbarkeit und die Möglichkeit einer nachhaltigen Nutzung im Rahmen einer Kaskadennutzung von Ressourcen. Daher sollte die Nutzung separierter Feststoffe in Biogasanlagen weiter erforscht werden. Ziel sollte dabei die Optimierung der Substratzusammensetzung und eine vertiefte Kosten-Nutzen-Analyse sein, um die finanziellen und umwelttechnischen Auswirkungen zu bewerten und fundierte, sowie nachhaltige Entscheidungen zu treffen und gegebenenfalls Anreizsysteme zu schaffen.

Neben dieser energetischen Verwertung entsteht noch ein zweites wertvolles Produkt – das Gärprodukt. Dieses bildet einen wertvollen Dünger und kann wiederum durch weitere Aufbereitungsschritte hinsichtlich der Nährstoffverfügbarkeit optimiert werden. Die Zweifachnutzung der Wirtschaftsdünger für Gaserzeugung und Düngung schafft somit eine längere Verwertungs- und Prozesskette, die ökonomische und ökologische Vorteile für beide Seiten bieten könnte.

Literatur/Quellen

- Amon, B.; Amon, T.; Boxberger, J.; Alt, Ch. (2001): Emission of NH_3 , N_2O and CH_4 from dairy cows housed in a farmyard manure tying stall (housing, manure storage, manure spreading). Nutrient Cycling in Agroecosystems, Vol. 60; P. 103-113.
- Amon B., Moitzi G., Wagner-Alt C., Kryvoruchko V., Amon Th., Boxberger J. (2001): Methane, Nitrous Oxide and Ammonia Emissions from Management of Liquid and Solid Maures, Final Report 2001, Universität für Bodenkultur, Wien.

- Amon, B.; Kryvoruchko, V.; Amon, T.; Zechmeister-Boltenstern, S. (2006): Methane, nitrous oxide and ammonia emissions during storage and after application of dairy cattle slurry and influence of slurry treatment. In: *Agriculture, Ecosystems and Environment* 112 (2-3), S. 153-162. DOI: 10.1016/j.agee.2005.08.030.
- Anderl M.; Gangl M.; Haider S., Poupa S.; Purzner M.; Schieder W.; Titz M.; Tista M.; Stranner G.; Zechmeister A. (2017) Emissionstrends 1990-2015. Ein Überblick über die Verursacher von Luftschadstoffen in Österreich (Datenstand 2017). Report 0625. Umweltbundesamt Wien. ISBN 978-3-99004-440-7.
- Bayrische Landesanstalt für Landwirtschaft (o.J.): Biogasausbeuten verschiedener Substrate. <https://www.lfl.bayern.de/iba/energie/049711/> (zuletzt aufgerufen am 17.04.2024).
- Brauckmann, H-J.; (2014): Nährstoffgehalte und Biogaserträge separierter Gülle. Universität Osnabrück, Forschungsstelle Nachhaltige Biogaserzeugung.
- Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V. (KTBL) (2010): Gasaubeute in landwirtschaftlichen Biogasanlagen, Heft 88.
- Landwirtschaftliches Wochenblatt (2022): Gülleseparation bietet einige Vorteile, Ausgabe 35/2022, S. 14-18 lw-heute.de – Gülleseparation bietet einige Vorteile | Gülleseparation bietet einige Vorteile (zuletzt aufgerufen am 17.04.2024).
- Pöllinger, A. (2018): Ammoniak-Emissionen aus der Landwirtschaft – Quellen und Minderungsmöglichkeiten. Höhere Bundeslehr- und Forschungsanstalt für Landwirtschaft Raumberg-Gumpenstein, 6. Umweltökologisches Symposium 2018, 27-30 ISBN: 978-3-902849-53-3.
- Umweltbundesamt (UBA) (2023): Nationale Treibhausgas-Inventare 190 bis 2021 (Stand 03/2023), für 2022 vorläufige Daten (Stand 15.03.2023).
- Umweltbundesamt (2021): Austria's National Inventory Report 2021. Submission under the United Nations Framework Convention on Climate Change and under the Kyoto Protocol. REP-0761, ISBN 978-3-99004-583-1.

Förderhinweis

Gefördert durch das Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft auf-grund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages.

Projekträger: Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung (BLE), Förderkennzeichen 2820ABS300

Kontakt

Christin Meyer, Projektmitarbeiterin „MuD SlurryUpgrade“

Landwirtschaftskammer Niedersachsen

☎ +49 (0)441.801-343 | ✉ christin.meyer@lwk-niedersachsen.de

🌐 <https://slurryupgrade.de/>

Gefördert durch



Bundesministerium
für Ernährung
und Landwirtschaft

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Projekträger



Bundesanstalt für
Landwirtschaft und Ernährung

Emissionsminderung bei der Ausbringung von Gärresten durch Ansäuerung (AcidDigSoil)

Zusammenfassung: Am Versuchsstandort Gülzow wurde in einer dreijährigen Feldversuchsreihe in den Fruchtarten Winterweizen, Silomais und Winterraps untersucht, unter welchen Bedingungen eine Ansäuerung von flüssigen Wirtschaftsdüngern während der Ausbringung sinnvoll ist und welche positiven Wirkungen auf Emissionsminderung, Ertrag, Nährstoffeffizienz und die Qualität des Erntegutes entstehen. Die Ammoniakemissionen ließen sich durch die Absenkung der pH-Werte der mit Schleppschlauchtechnik ausgebrachten Substrate auf pH 5,5 an allen Ausbringterminen deutlich reduzieren. Somit bietet die Ansäuerung die Möglichkeit einer emissionsarmen Ausbringung flüssiger Wirtschaftsdünger in wachsende Bestände. Durch die zur pH-Wert-Absenkung der Substrate eingesetzte Schwefelsäure werden teils hohe Mengen an Schwefel mit ausgebracht, diese sind in der Düngebilanz zu berücksichtigen und auf eine weitere mineralische Schwefeldüngung kann verzichtet werden. In allen Versuchsjahren konnte ein positiver Effekt der Ansäuerung auf den Rohproteingehalt der Weizenkörner festgestellt werden. Eine Steigerung des Kornertrages konnte nicht in allen Versuchsjahren beobachtet werden. Auch die Silomaiserträge und Rohproteingehalte im Erntegut wurden durch die Ansäuerung positiv beeinflusst. Besteht die Möglichkeit, die Substrate bereits vor der Aussaat auf der zu bestellenden Fläche direkt einzuarbeiten, sollte diese genutzt werden, denn auch die direkte Einarbeitung der Gärreste reduzierte die Ammoniakemissionen im Vergleich zur herkömmlichen Schleppschlauchausbringung deutlich. Die Mehrkosten der Ansäuerung (Säurekosten, Ausbringtechnik, Säurelogistik) von flüssigen Wirtschaftsdüngern in der landwirtschaftlichen Praxis lassen sich bisher kaum durch die Einsparung an Mineraldünger und eventuelle Mehrerträge oder Qualitätssteigerungen der Ernteprodukte decken, somit entsteht ein Förderbedarf für diese emissionsmindernde Ausbringtechnik.

Abstract: It was the aim in a three-year series of field experiments at the Gülzow site in the crops winter wheat, maize and winter oilseed rape to investigate the conditions under which acidification of liquid farm fertilisers makes sense and which positive effects on emission reduction, yield, nutrient efficiency and crop quality can be achieved. The measurements of ammonia emissions started immediately after the application of fertilisers and continued for at least 5 days. Ammonia emissions were significantly reduced by lowering the pH values of the substrates applied using drag hose technology to pH 5.5 on all application dates. Acidification thus offers the possibility of low-emission application of liquid farm fertiliser to growing crops. The sulphuric acid used to lower the pH value of the substrates leads to high quantities of sulphur also applied in some cases. This must be taken into consideration in the fertiliser balance. Furthermore mineral sulphur fertilisation can be reduced. A positive effect of acidification on the raw protein content of the wheat grains was observed in all experiment years however an increase in grain yield could not be proved in all cases. Acidification also had a positive effect on maize yields and raw protein content in the

harvested crop material. Whenever it is possible to dig the substrates directly into the soil to be cultivated before sowing, this should be done, as the direct digging of digestate also significantly reduces ammonia emissions compared to conventional drag hose application. The additional costs of acidification (acid price, application technology, acid logistics) of liquid farm fertilisers in agricultural practice can hardly be covered by the savings in mineral fertilisers and possible increased yields or quality improvements in the harvested products. Therefore, there is a demand on financial support for this emission-reducing application technology.

1 Material und Methoden

Im Winterweizen erfolgte die Düngung mit flüssigen Wirtschaftsdüngern zu Vegetationsbeginn. Es wurden 80 kg/ha N anrechenbarer Stickstoff mit einem Anrechnungsfaktor (Mineraldüngeräquivalent) von 0,6 mittels Schleppschlauchtechnik in den wachsenden Bestand in unterschiedlichen Ansäuerungsstufen ausgebracht. Im weiteren Vegetationsverlauf wurden alle Varianten, außer den mineralischen Steigerungen, mit 80 kg N aus Kalkammonsalpeter auf eine Gesamtstickstoffmenge von 160 kg/ha N aufgedüngt. Um Ertragseffekte des durch die Ansäuerung mit Schwefelsäure ausgebrachten Schwefels auszuschließen, wurde über den gesamten Versuch ein Schwefelausgleich von 25 kg/ha S in Form von Kieserit vorgenommen.

In den Silomaisversuchen erfolgte die Düngung mit Gärresten direkt zur Aussaat bzw. im 6-8-Blatt-Stadium etwa 7 Wochen nach dem Legen (Mitte Juni). Zur Aussaat wurden zwei Prüfglieder mit unangesäuerten Gärresten, ausgebracht mittels Schleppschlauchtechnik bzw. Güllegrubber, gedüngt. Ein Prüfglied wurde vor der Aussaat ausschließlich mineralisch gedüngt, ein weiteres verblieb als Nullvariante ohne Düngung. Die verbliebenen 4 Prüfglieder erhielten ihre Stickstoffgabe über Gärreste in unterschiedlichen Ansäuerungsstufen zum zweiten Düngetermin. Es wurde eine anrechenbare Stickstoffmenge von 130 kg/ha N ausgebracht. Analog zum Winterweizenversuch wurde hier ein Anrechnungsfaktor von 0,6 genutzt. Auch im Silomaisversuch wurde ein Schwefelausgleich über Kieserit vorgenommen.

Die Ansäuerung der Gülle/Gärreste auf den gewünschten pH-Wert erfolgte unmittelbar vor der Ausbringung durch schrittweise Zugabe von 37- bzw. 50-prozentiger Schwefelsäure unter ständigem Umpumpen mittels der Güllepumpe des Ausbringers in einem separaten Container.

Die Messungen der Ammoniak-Emissionen wurden durch den Unterauftragnehmer A.F.E.R. e.V. Hohen Luckow realisiert. Diese wurden unter Verwendung von Dräger Polytron C300 Sensoren in der „closed-chamber-Methode“ durchgeführt. Die Messfühler zeichneten alle 10 Sekunden die Konzentration des Ammoniaks unter der, unmittelbar nach der Düngerapplikation in der Kernparzelle aufgesetzten, Messhaube (Abb. 1) auf. Die Messungen wurden ununterbrochen über mindestens 5 Tage ausgeführt.



Abb. 1: Messhauben der Emissionsmessung im Winterweizen im April 2023

Die Auswertung der Rohdaten erfolgte anschließend am PC. Positive Anstiege, außerhalb der erhobenen Blindwerte der einzelnen Sensoren, wurden aufsummiert, mit dem Ergebnis einer Summenkurve der Ammoniakkonzentration über den gesamten Messverlauf. Diese aufsummierten Gehalte ließen sich dann unter Einbeziehung von Temperatur, Luftdruck, Gaskonstante und molarer Masse des Ammoniaks in einen Ammoniakverlust in kg/ha $\text{NH}_3\text{-N}$ umrechnen.

2 Ergebnisse

2.1 Emissionsmessungen

Die Düngung mit flüssigen Wirtschaftsdüngern im Winterweizen erfolgte zu Vegetationsbeginn, sobald die Befahrbarkeit der Versuchsfläche im jeweiligen Versuchsjahr gegeben war. Abb. 2 zeigt die kumulierten Ammoniakverluste ($\text{NH}_3\text{-N}$ kg/ha) im Messzeitraum (bis 168 h nach Ausbringung) im Mittel der drei Versuchsjahre. Trotz noch kühler Witterung und teils Nachfrösten im Zeitraum der Ausbringung zwischen Anfang März und Anfang April in den jeweiligen Versuchsjahren zeigten die Emissionsmessungen der unbehandelt mittels Schleppschläuchen ausgebrachten Substrate (pH 7,5 bis 7,8) Ammoniakstickstoff-Verluste von bis zu 25 kg/ha. Vor allem die pH-Wert-Absenkung auf 5,5 der beiden ausgebrachten Gärreste resultierte in deutlichen Minderungen der Ammoniakemissionen um über 80 Prozent.

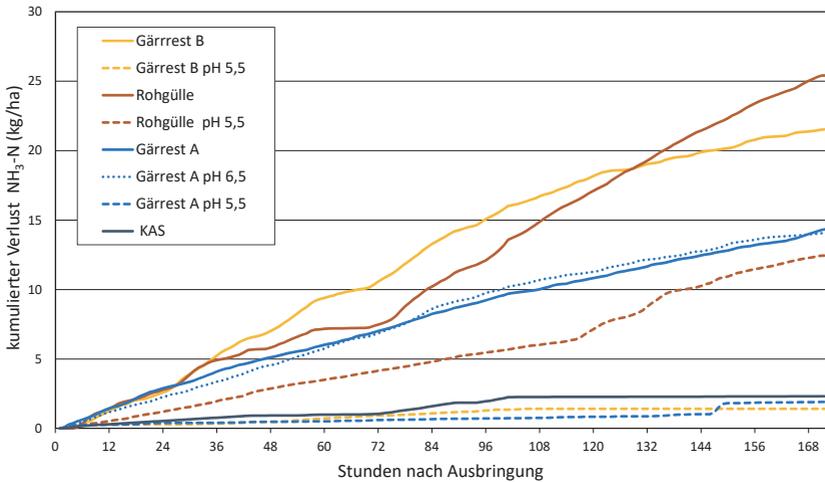


Abb. 2: Kumulierte Ammoniakverluste gemessener Prüfglieder im Messzeitraum im Winterweizen nach der Gärrestdüngung im März/April im Mittel der Versuchsjahre

Zum ersten Düngetermin im Silomais direkt zur Aussaat Ende April fand keine Ansäuerung des ausgebrachten Gärrestes statt. Hier wurden die Ammoniakemissionen einer ungedüngten Nullvariante, einer mineralisch gedüngten KAS-Variante, direkt eingegrubberten Gärresten und mittels Schleppschläuchen ausgebrachten Gärresten in zwei Wiederholungen gemessen. In Abb. 3 sind die Mittelwerte des kumulierten Ammoniakstickstoff-Verlustes der beiden Messwiederholungen der Jahre 2021 bis 2023 über die Messdauer von 7 Tagen darstellt.

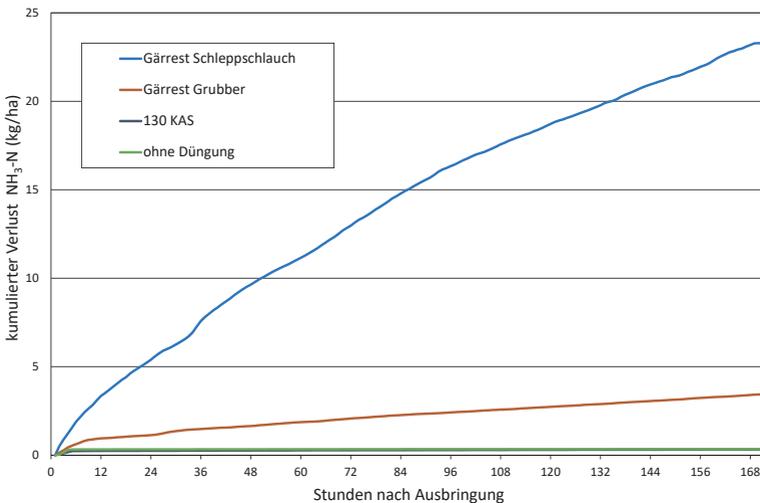


Abb. 3: Kumulierte Ammoniakverluste gemessener Prüfglieder im 7-tägigen Messzeitraum im Silomais nach der Gärrestdüngung zur Aussaat im Mittel der Versuchsjahre

Abb. 4 zeigt die Emissionen der auf unterschiedliche pH-Werte angesäuerte Gärreste der Messungen im 6-8-Blatt-Stadium der Silomaisversuche. Die unbehandelten Gärreste mit einem Ausgangswert von pH 7,7 emittierten zum zweiten Düngezeitpunkt ähnlich viel Ammoniak wie beim ersten Düngetermin nach der Aussaat Ende April. Im Gegensatz zu den Messungen im Winterweizen konnte hier im Messzeitraum durch die Ansäuerung auf pH 6,5 eine Emissionsreduktion von etwa 4 kg/ha Ammoniakstickstoff beobachtet werden. Eine Herabsetzung des pH-Wertes auf pH 6,0 und pH 5,5 reduzierte die Ammoniakemissionen noch weiter. Der größte Emissionsminderungseffekt, mit einer durchschnittlichen Minderung von über 60 % im Vergleich zum unbehandelten Gärrest, konnte bei der Ansäuerungsstufe pH 5,5 festgestellt werden.

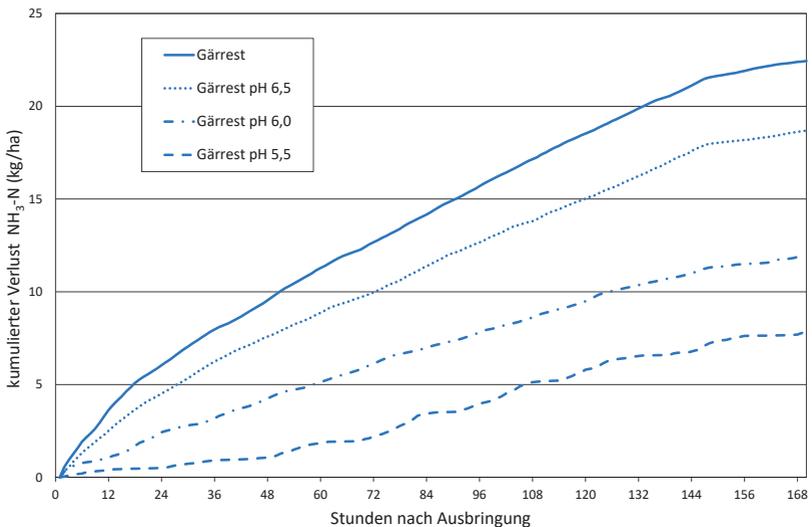


Abb. 4: Kumulierte Ammoniakverluste gemessener Prüfglieder im 7-tägigen Messzeitraum im Silomais nach der Gärrestdüngung im 6-8-Blatt-Stadium im Mittel der Versuchsjahre

2.2 Erträge und Qualitäten

Die adjustierten Mittelwerte des Kornertrages (Säulen) und der Rohproteingehalt im Korn (Rauten) der Serienauswertung der durchgeführten Winterweizenversuche sind in Abb. 5 dargestellt. Unterschiedliche Säulenfarben stellen die verschiedenen ausgebrachten Substrate dar. In den Mineraldüngervarianten steigen mit zunehmender Stickstoffgabe Kornerträge und Rohproteingehalte im Korn. Durch die Ansäuerung der Wirtschaftsdünger mit Schwefelsäure konnte eine signifikante Steigerung des Rohproteingehaltes im Korn festgestellt werden. Im Mittel der Jahre betrug diese 0,7 Prozentpunkte. Auch die Kornerträge ließen sich durch die Ansäuerung in zwei der drei Versuchsjahre geringfügig, aber dennoch signifikant steigern. Es handelte sich 2022 und 2023 aber um Jahre mit ausgesprochener Vorsommertrockenheit und niedrigen Erträgen. Es

ist davon auszugehen, dass ein positiver Ertragseffekt vor allem dann auftritt, wenn andere Faktoren als die Düngung, hier die Trockenheit, ertragsbegrenzend wirken.

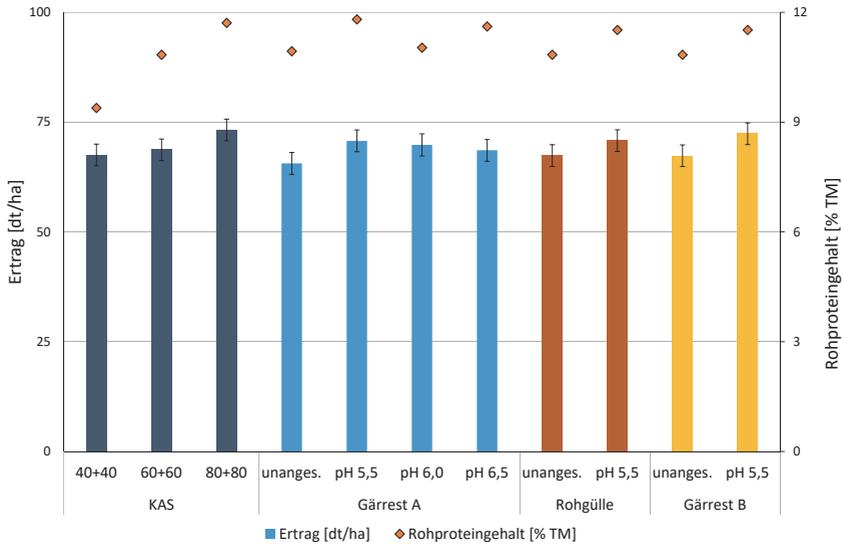


Abb. 5: Adjustierte Mittelwerte des Trockenmasseertrages (dt/ha) und Rohproteingehaltes (%TM) der Prüfglieder im Silomais im Mittel der Versuchsjahre

Abb. 6 stellt die adjustierten Mittelwerte der Trockenmasseerträge (Säulen) und Rohproteingehalte (Rauten) des Silomaisversuches im Mittel der drei Versuchsjahre dar. Unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Ertragsunterschiede. Unter den vier Prüfgliedern, welche ihre Stickstoffgabe zur Saat zum ersten Düngetermin erhalten haben, wies die Variante, bei der die Gärreste mittels Güllegrubber ausgebracht wurden, die höchsten Erträge auf. Bei annähernd gleich hohen Rohproteingehalten in der Trockenmasse des Erntegutes war die Grubber-Variante im Hinblick auf den Trockenmasseertrag auch der Variante mit rein mineralischer Stickstoffdüngung überlegen. Zum zweiten Düngetermin im 6-8-Blatt-Stadium wurde eine unbehandelte Schleppschlauch-Variante mit drei Ansäuerungsstufen verglichen. Sowohl die Trockenmasseerträge als auch die Rohproteingehalte stiegen mit zunehmender Absenkung des pH-Wertes an. Das Ertragsniveau der Grubber-Variante konnte mit der Ansäuerung der Gärreste jedoch nicht erreicht werden. Hierfür wird aber auch die relativ große Zeitspanne zwischen den beiden Düngeterminen und die damit verbundene langsamere Jugendentwicklung der Maispflanzen in den Varianten, welche ihre gesamte Stickstoffdüngung erst im 6-8-Blatt-Stadium erhalten haben, verantwortlich sein.

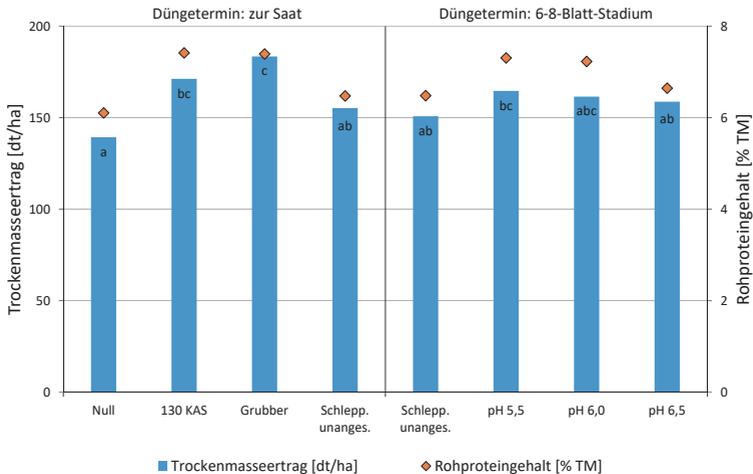


Abb. 6: Adjustierte Mittelwerte des Trockenmasseertrages (dt/ha) und Rohproteingehaltes (%TM) der Prüfglieder im Silomais im Mittel der Versuchsjahre

Eine differenzierte Düngerform, Ausbringtechnik und die Ansäuerung der mit Schleppschauchtechnik ausgebrachten Gärreste vor der Aussaat des Winterrapes auf die Gerstenstopeln hatte keinen signifikanten Effekt auf den Kornertrag, Ölgehalt und Rohproteingehalt der einzelnen Prüfglieder im Winterrapes. Im Hinblick auf die emissionsmindernde Wirkung der Ansäuerung und der direkten Einarbeitung der Gärreste konnten die bereits im Winterweizen und Silomais beobachteten Effekte bestätigt werden.

3 Fazit

Die Ansäuerung während der Ausbringung bietet die Möglichkeit eines emissionsarmen Einsatzes von flüssigen Wirtschaftsdüngern in wachsenden Beständen. Neben der deutlichen Reduktion der Ammoniakemissionen lassen sich vor allem im Getreide die Erntegutqualitäten (Rohproteingehalte im Korn) durch den Einsatz der Feldansäuerung steigern. Die nötige Großtechnik hierfür ist deutschlandweit flächendeckend vorhanden und wird u.a. im Modell- und Demonstrationsvorhaben „Säure“ im Feld“ eingesetzt. Bedenken zur bodenversauernden Wirkung des Einsatzes von Schwefelsäure und negativen Effekten auf das Bodenmikrobiom konnten im Projekt AcidDigSoil widerlegt werden. Die Mehrkosten der Ansäuerung (Säurekosten, Ausbringtechnik, Säurelogistik) von flüssigen Wirtschaftsdüngern in der landwirtschaftlichen Praxis lassen sich bisher kaum durch die Einsparung an Mineraldünger und eventuelle Mehrerträge oder Qualitätssteigerungen der Ernteprodukte decken. Somit entsteht ein Förderbedarf für Ansäuerungsmaßnahmen, um die Wirtschaftlichkeit dieser Klimaschutz-Maßnahmen zu erhöhen und eine weitere Verbreitung in der Praxis zu ermöglichen.

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages mit Mitteln des Bundesministeriums für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL) über die Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR) als Projektträger des BMEL für das Förderprogramm Nachwachsende Rohstoffe unterstützt. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei der Autorenschaft.

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Ernährung
und Landwirtschaft

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Kontakt

Michael Dau, Projektbearbeiter

Landesforschungsanstalt für Landwirtschaft und Fischerei
Mecklenburg-Vorpommern
Institut für Pflanzenproduktion und Betriebswirtschaft
Dorfplatz 1/OT Gülzow, 18276 Gülzow-Prüzen

☎ +49 (0)385.588-60226 | ✉ m.dau@lfa.mvnet.de | 🌐 www.lfamv.de

Ökonomische Effekte der Pflanzenkohle im Fermentationsprozess

Zusammenfassung: Ob ein positiver ökonomischer Effekt durch den Einsatz von Pflanzenkohle im Fermentationsprozess eintritt, hängt zuerst davon ab, ob sich die Energiedichte der eingesetzten Rezeptur (hier ausschließlich Gülle/Mist) erhöhen lässt, der Massestrom reduziert werden kann und die daraus folgende Ersparnis größer ist, als die Kosten der Pflanzenkohle. Die nachfolgenden Aussagen beziehen sich ausschließlich auf den Sektor der Erzeugung von fortschrittlichen Kraftstoffen (Biomethan aus Gülle/Mist und landwirtschaftlichen Reststoffen wie Stroh).

Da der Bonus von 111,92 g CO₂äq/MJ nur für Gülle und Mist Geltung hat, beschränkt sich die Rezeptur auf diese Stoffe. Die Stromerzeugung nach dem Erneuerbaren Energien Gesetz wird nicht betrachtet.

Durch die „richtige“ Pflanzenkohle kann der Einsatz von Geflügelmist erhöht werden ohne eine Hemmung im Fermentationsprozess zu verursachen, die Energiedichte der eingesetzten Rezeptur kann erhöht werden.

Sollte eine Verbuchung der eingesetzten Menge an Pflanzenkohle unter dem Term ECCS (geologische Speicherung) für fortschrittliche Kraftstoffe möglich sein, würden sich weitere positive ökonomische Effekte ergeben.

Abstract: Whether the use of biochar in the fermentation process has a positive economic effect depends first of all on whether the energy density of the formulation used (in this case exclusively slurry/manure) can be increased, the mass flow can be reduced and the resulting savings are greater than the cost of the biochar. The following statements refer exclusively to the sector of the production

of advanced fuels (biomethane from liquid manure/dung and agricultural residues such as straw), and since the bonus of 111.92 g CO₂eq/MJ only applies to liquid manure and dung, the formulation is limited to these substances; electricity generation according to the EEG is not considered. The „right“ biochar can increase the use of poultry manure without causing an inhibition in the fermentation process, the energy density of the recipe used can be increased, and if it is possible to book the amount of biochar used under the term ECCS (geological storage) in RED III for advanced fuels, there would be further positive economic effects.

1 Einleitung

Auf Grund der energiepolitischen Herausforderungen ist die ökonomische Potenzialbetrachtung der anaeroben Behandlung von besonderer Bedeutung. Zur Prozessoptimierung ist der Einsatz von Additiven ein bewährtes Mittel. Der Einsatz von Pflanzenkohle ist dabei eine vielfältig diskutierte Möglichkeit. Unter

ökonomischen Gesichtspunkten ist der Einsatz begrenzt. Da die Kosten der Kohle die Gesamtkosten massiv beeinflussen. Um die Auswirkungen der Applikation zu eruieren sollen anhand von drei Varianten die ökonomischen Auswirkungen aufgeführt werden.

Beschreibung der Ausgangsdaten: Es handelt sich um eine bestehende Nawaro-BGA die um eine BGAA und eine CO₂-Verflüssigung zum Zweck der Erzeugung von fortschrittlichem Kraftstoff aus Gülle/Mist erweitert werden soll. Das vorhandene Lagervolumen beträgt 22.899 m³. Das Zusatzinvest beträgt 6.440.310 € und beinhaltet die PSA, die Verflüssigung von CO₂, den CarboScan für CO₂ in Lebensmittelqualität, die bauseitigen Leistungen, die Planungskosten, Genehmigungskosten und den Gasanschluss.

Ziel sei in allen gezeigten Varianten immer die Erzeugung von 52.558.293 kWh(Hs). In der **1. Variante** ohne Pflanzenkohle wird folgende Rezeptur zu der gewünschten Energie führen:

617.427 t Schweinegülle werden fermentiert. Diese hypothetische Variante dient einzig dem Zweck, die Bedeutung der Energiedichte aufzuzeigen. Der Einsatz von 100 % Rindergülle führt zu einem vergleichbar schlechten ökonomischen Ergebnis.

In der **2. Variante** ohne Pflanzenkohle wird folgende Rezeptur zu der gewünschten Energie führen: Gesamtmasse = 183.836 t, Quoten = 50 % Rindermist mit 381 kWh(Hi)t und 50 % Rindergülle mit 161 kWh(Hi)/t.

In der **3. Variante** mit Pflanzenkohle wird folgende Rezeptur zu der gewünschten Energie führen: 18.825 t Rindermist mit 381 kWh(Hi)t und 28.195 t Geflügelmist/Masthähnchen mit 1.512 kWh(Hi)/t. Gesamtmasse = 47.020 t, Quoten = 60 % Geflügelmist/Masthähnchen und 40 % Rindermist. An Pflanzenkohle werden 0,5 % der Gesamtmasse oder 235 t zugegeben.

Die energetischen Angaben stammen für Geflügelmist/-Masthähnchen, Rindergülle, Schweinegülle und Rindermist aus dem Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft KTBL[1].

1.1. Die Bedeutung der Energiedichte

Der Begriff der Energiedichte steht im Bereich der Biogaserzeugung synonym für:

a) Transportkosten, b) Ausbringkosten, c) Lagerkosten. Je geringer die Energiedichte pro Tonne Rohstoff ist, umso höher werden die Kosten. Aus diesem Grund ist eine Rezeptur mit hoher Energiedichte entscheidend für den ökonomischen Erfolg. Der Einsatz von Pflanzenkohle ermöglicht diese Erhöhung.

1.2. Erläuterungen zu dem Begriff der Risikokosten

Unter Risikokosten ist jener Unternehmerlohn zu verstehen, der kein zufälliges Ergebnis der unternehmerischen Handlung ist. Risikokosten stellen den angemessenen Ausgleich für den möglichen Totalverlust der gegebenen Sicherungsgüter (Grundsulden auf den Ackerflächen) dar.

Ermittelt werden sie über einen an die Investitionssumme gebundenen Prozentsatz und werden wie laufende Betriebskosten behandelt. Da das Ergebnis am Ende des gesamten Betrachtungszeitraumes 0 sein soll, variiert der Prozentsatz bis die 0 iterativ gefunden ist. Ist er negativ oder unangemessen gering, sollte von der Investition Abschied genommen werden.

Eine angemessene Bepreisung des unternehmerischen Risikos ist allein deswegen unerlässlich, weil die Dauer der jeweiligen RED 5 Jahre beträgt. Würde zukünftig der erste Sammelpunkt zur Berechnung der Transportemissionen [2] geändert, hätte dies erhebliche Auswirkungen auf die Rentabilität. Derzeit wäre ein Transport von Rindermist aus Rosenheim in Bayern vom Erzeuger zum Abnehmer in Flensburg frei von Emissionen zu berechnen, da der Abnehmer gleichzeitig der erste Sammelpunkt wäre. Würde der Erzeuger hingegen in Rosenheim den Rindermist in 20 Metern Entfernung lagern und der Transport von dort nach Flensburg erfolgen, wären alle Transportemissionen durch die Berechnung von triangulierten Geodaten mit einer Genauigkeit von 20 Metern zu erfassen.

Unter Berücksichtigung solcher politischer Risiken sind kurze Tilgungsdauern eine Pflicht.

1.3. V1 ohne Pflanzenkohle mit 100 % Schweingülle und einer Energiedichte von 81 kWh(Hi)/t

Tabelle Nr. 1: 100 % Schweinegülle			
Zielwert feucht	55.253.456 kWh(Hs)		
Zielwert trocken	52.558.293 kWh(Hs)		
Masse	617.427 t		
Masse oTR	21.546 t		
Masse Gärrest (85 % Abbaurate)	599.113 t		
Rohgas feucht	7.433.824 Nm³		
Rohgas trocken ohne Spurengase	7.071.054 Nm³		
CH ₄ trocken	4.751.748 Nm³·CH ₄		
CH ₄ -Gehalt	× 67,20%		
CO ₂ trocken	2.319.306 Nm³·CO ₂		
CO ₂ bei 1,848 kg/Nm³	4.286 t		
Verbrauch der BGAA (0,23 kWh/Nm³)	1.709.780 kWh(Hi)		
Verbrauch der CO ₂ -Verflüssigung (0,225 kWh/kg)	964.367 kWh(Hi)		
Energiekosten bei 20,00 ct/kWh	534.829 €		
In MV würden 186 Schweinehalter oder 57 % aller schweinehaltenden Betriebe für derartige Mengen benötigt [3]			
Die Transportentfernung für derartige Masse wird mit einem Radius von 200 km angesetzt, auf die Rohstoffkosten von 3,00 €/t kommen zusätzliche Transportkosten* von 30,53 €/t.			
Rohstoffpreise/t inkl. Transport	33,53 €/t		
Masse Kohle = 0,50 % der Gesamtmasse	0 t		
Kosten der Kohle (650 €/t)	0 t		
Faktor Kohle	3,4585 t CO ₂ -Äq./t		
THG Kohle/MJ	0,00 g CO ₂ -Äq./MJ		
Emission aus der CO ₂ -Verflüssigung	30.967.762 g		
t-CO ₂ Einsparung	4.255 t		
THG CO ₂	-24,96 g-CO ₂ Äq./MJ		
Bonus Gülle/Mist nach allen Abzügen	-95,40 g-CO ₂ Äq./MJ		
THG-Wert nach allen Gutschriften	-120,36 g-CO₂Äq./MJ		
Basispreis bei -100 g-CO ₂ Äq./MJ	11,77 ct/kWh(Hs)		
Umsatzerlös nach THG-Wert incl VNN ⁶	14,50 ct/kWh(Hs)		
Umsatzerlös incl 10 €/t für Lebensmittel-CO ₂	7.664.591 €		
Rohstoffkosten im Jahr 1	20.703.924 €		
Betriebskosten inkl. Gärestrecke u. Kohle im Jahr 1	3.204.470 €		
Annuität aus Zusatzinvest (5,30 % Zins, 8 Jahre)	1.008.575 €		
Zusätzliches Gärrestlager	276.658 m³		
Annuität für zusätzliches Gärrestlager	1.707.593 €		
Durch die Investition in das Lagervolumen für 6 Monate (75,00 €/m³) von 20.749.327 € steigt die Gesamtinvestition auf 27.189.637 €.			
Risikokosten im Jahr 1 ohne Inflationsausgleich	-19.308.785 €		
Delta aller Erlöse und Ausgaben nach 8 Jahren inkl. Inflationsausgleich (Ø 2,06 % pro Jahr)			0,00 €

Würden in so einem Szenario noch die Bedingungen zur Berechnung der Transportemissionen geändert, führte dies anstelle der -120,36 g-CO₂Äq./MJ zu einem THG-Wert von -70,09 g-CO₂Äq./MJ. Aufgrund dieses THG-Wertes fällt der Preis je kWh(Hs) auf 4,09 ct/kWh(Hs), der Umsatzerlös auf 528.443 € und die Risikokosten steigen auf -25.934.784 € im 1. Jahr.

Mit dieser Berechnung wird das unternehmerische Risiko (und das Kreditrisiko) und damit die Notwendigkeit von angemessenen Risikokosten verdeutlicht.

1.4. V2 mit Rindermist und Rindergülle bei einer Energiedichte von \bar{x} 271 kWh(Hi)/t

Tabelle Nr. 2: 50 % Rindermist und 50 % Rindergülle ohne Kohle			
		Rindermist	Rindergülle
Zielwert feucht	54.992.361 kWh(Hs)		
Zielwert trocken	52.558.293 kWh(Hs)	36.926.264 kWh(Hs)	15.632.029 kWh(Hs)
Masse	183.836 t	91.853 t	91.983 t
Masse oTR	23.749 t	17.290 t	6.459 t
Masse Gärrest (85 % Abbaurate)	163.649 t	77.156 t	86.493 t
Rohgas feucht	8.531.603 Nm ³	6.051.286 Nm ³	2.480.316 Nm ³
Rohgas trocken ohne Spurengase	8.115.260 Nm ³	5.755.983 Nm ³	2.359.277 Nm ³
CH ₄ trocken	4.751.748 Nm ³ -CH ₄	3.338.470 Nm ³ -CH ₄	1.413.278 Nm ³ -CH ₄
CH ₄ -Gehalt	\bar{x} 58,57%	58,00%	59,90%
CO ₂ trocken	3.363.512 Nm ³ -CO ₂	2.417.513 Nm ³ -CO ₂	945.999 Nm ³ -CO ₂
CO ₂ bei 1,848 kg/Nm ³	6.216 t	4.467.564 kg	1.748.207 kg
Verbrauch der BGAA (0,23 kWh/Nm ³)	1.962.269 kWh(Hi)	1.391.796 kWh(Hi)	570.473 kWh(Hi)
Verbrauch der CO ₂ -Verflüssigung (0,225 kWh/kg)	1.398.548 kWh(Hi)	1.005.202 kWh(Hi)	393.347 kWh(Hi)
Energiekosten bei 20,00 ct/kWh	672.163 €	479.400 €	192.764 €
Rohstoffpreise/t inkl. Transport	\bar{x} 22,27 €/t	23,27 €/t	21,27 €/t
Masse Kohle = 0,50 % der Gesamtmasse	0 t		
Kosten der Kohle (650 €/t)	0 t		
Faktor Kohle	3,4585 t CO ₂ -Äq./t		
THG Kohle/MJ	0,00 g CO ₂ -Äq./MJ		
Emission aus der CO ₂ -Verflüssigung	44.910.187 g	32.279.044 g	12.631.143 g
t-CO ₂ Einsparung	6.171 t	4.435 t	1.736 t
THG CO ₂	\bar{x} -36,19 g-CO ₂ -Äq./MJ	-37,02 g-CO ₂ -Äq./MJ	-34,22 g-CO ₂ -Äq./MJ
Bonus Gülle/Mist nach allen Abzügen	-95,40 g-CO ₂ -Äq./MJ		
THG-Wert nach allen Gutschriften	\bar{x} -131,59 g-CO ₂ -Äq./MJ	-132,42 g-CO ₂ -Äq./MJ	-129,62 g-CO ₂ -Äq./MJ
Basispreis bei -100 g-CO ₂ -Äq./MJ	11,77 ct/kWh(Hs)		
Umsatzerlös nach THG-Wert incl. VnN	15,63 ct/kWh(Hs)		
Umsatzerlös incl 10 €/t für Lebensmittel-CO ₂	8.274.273 €		
Rohstoffkosten im Jahr 1	4.093.224 €		
Betriebskosten inkl. Gärstrecke im Jahr 1	2.035.412 €		
Annuität aus Zusatzinvest (5,30 % Zins, 8 Jahre)	1.008.575 €		
Zusätzliches Gärrestlager	58.926 m ³		
Annuität für zusätzliches Gärrestlager	363.703 €		
Durch die Investition in das Lagervolumen für 6 Monate (75,00 €/m ³) von 58.926 m ³ steigt die Gesamtinvestition auf 10.859.739 €.			
Risikokosten im Jahr 1 ohne Inflationsausgleich	287.111 €		
Delta aller Erlöse und Ausgaben nach 8 Jahren inkl. Inflationsausgleich (Ø 2,06 % pro Jahr)			0,00 €

Bei einer Investitionssumme von 10.859.739 € erscheint ein Unternehmerlohn von Ø 309.216 €/a inkl. Inflationsausgleich in 8 Jahren zum Ausgleich des möglichen Totalverlustes der verpfändeten Grundschulden unangemessen gering. Die Risikokosten betragen 4,46 % der Investitionssumme.

1.5. V3 mit Geflügelmist/Masthähnchen und Rindermist bei einer Energiedichte von \bar{x} 1.059 kWh(Hi)/t und dem Einsatz von Pflanzenkohle

Tabelle Nr. 3: 60 % Geflügelmist und 40 % Rindermist mit Kohle			
		Geflügelmist	Rindermist
Zielwert feucht	55.257.040 kWh(Hs)		
Zielwert trocken	52.558.293 kWh(Hs)	44.990.340 kWh(Hs)	7.567.953 kWh(Hs)
Masse	47.019 t	28.194 t	18.825 t
Masse oTR	17.461 t	13.918 t	3.544 t
Masse Gärrest (85 % Abbaurate)	32.177 t	16.364 t	15.813 t
Rohgas feucht	8.296.658 Nm ³	6.051.286 Nm ³	2.480.316 Nm ³
Rohgas trocken ohne Spurengase	7.891.782 Nm ³	5.755.983 Nm ³	2.359.277 Nm ³
CH ₄ trocken	4.751.748 Nm ³ -CH ₄	3.338.470 Nm ³ -CH ₄	1.413.278 Nm ³ -CH ₄
CH ₄ -Gehalt	\bar{x} 60,23%	60,60%	58,00%
CO ₂ trocken	3.140.033 Nm ³ -CO ₂	2.644.570 Nm ³ -CO ₂	495.464 Nm ³ -CO ₂
CO ₂ bei 1,848 kg/Nm ³	5.803 t	4.887.165 kg	915.617 kg
Verbrauch der BGAA (0,23 kWh/Nm ³)	1.908.231 kWh(Hi)	1.622.986 kWh(Hi)	285.245 kWh(Hi)
Verbrauch der CO ₂ -Verflüssigung (0,225 kWh/kg)	1.305.626 kWh(Hi)	1.099.612 kWh(Hi)	206.014 kWh(Hi)
Energiekosten bei 20,00 ct/kWh	642.771 €	544.520 €	98.252 €
Rohstoffpreise/t inkl. Transport	\bar{x} 33,46 €/t	40,27 €/t	23,27 €/t
Masse Kohle = 0,50 % der Gesamtmasse	235 t	141 t	94 t
Kosten der Kohle (650 €/t)	152.813 €	91.631 €	61.182 €
Faktor Kohle	3,4585 t CO ₂ -Äq./t		
THG Kohle/MJ	0	0	0
Emission aus der CO ₂ -Verflüssigung	35.310.744 g	35.310.744 g	6.615.516 g
t-CO ₂ Einsparung	5.761 t	4.852 t	909 t
THG CO ₂	\bar{x} -33,79 g-CO ₂ äq/MJ	-33,24 g-CO ₂ äq/MJ	-37,02 g-CO ₂ äq/MJ
Bonus Gülle/Mist nach allen Abzügen	-95,40 g-CO ₂ äq/MJ		
THG-Wert nach allen Gutschriften	\bar{x} -129,19 g-CO ₂ äq/MJ	-131,98 g-CO ₂ äq/MJ	-145,68 g-CO ₂ äq/MJ
Basispreis bei -100 g-CO ₂ äq/MJ	11,77 ct/kWh(Hs)		
Umsatzerlös nach THG-Wert incl. Vnn	15,93 ct/kWh(Hs)		
Umsatzerlös incl 10 €/t für Lebensmittel-CO ₂	8.143.790 €		
Rohstoffkosten im Jahr 1	1.573.268 €		
Betriebskosten inkl. Gärstrecke im Jahr 1	1.764.416 €		
Annuität aus Zusatzinvest (5,30 % Zins, 8 Jahre)	1.008.575 €		
Zusätzliches Gärrestlager	0 m ³		
Annuität für zusätzliches Gärrestlager	0 €		
Risikosten im Jahr 1 ohne Inflationsausgleich	3.294.134 €		
Delta aller Erlöse und Ausgaben nach 8 Jahren inkl. Inflationsausgleich (Ø 2,06 % pro Jahr)			0,00 €

Der Einsatz der Pflanzenkohle ermöglicht eine deutlich höhere Energiedichte, die deutlich höhere Risikokosten von Ø 3.547.756 €/a im Betrachtungszeitraum von 8 Jahren ermöglicht.

Müssten die Transportemissionen anders berechnet werden, ergäbe sich ein THG-Wert von -127,27 g-CO₂äq/MJ, demzufolge 15,19 ct/kWh(Hs) und Risikokosten von Ø 3.447.165 €/a im Betrachtungszeitraum von 8 Jahren.

Wäre eine Verbuchung der Pflanzenkohle unter eccs (geologische Speicherung) möglich, ergäbe sich ein THG-Wert von -133,96 g-CO₂äq/MJ, demzufolge 15,97 ct/kWh(Hs) und Risikokosten von Ø 3.798.387 €/a im Betrachtungszeitraum von 8 Jahren.

Fazit

Der Einsatz der Pflanzenkohle ermöglicht die Steigerung der Energiedichte! Von 2004 bis zum Jahr 2022 wurden insgesamt 248 Biomethananlagen errichtet.[6] Die Möglichkeiten zur Teilhabe an der Erzeugung von fortschrittlichen Kraftstoffen ist lokal ebenso unterschiedlich wie das Gülle/Mist-Aufkommen auf Landkreisebene.

Die hohen Anschaffungskosten von kleinen Aufbereitungsanlagen oder CO₂-Verflüssigungsanlagen führen zu größeren Anlagen und einem größeren Massstrom der in der Region langfristig verfügbar sein muss (oder über weite Strecken transportiert werden muss).

Der Effekt der CO₂-Verflüssigung liegt in Abhängigkeit zur Rezeptur zwischen -24,96 g-CO₂äq/MJ in V1, -36,19 g-CO₂äq/MJ in V2 und -33,79 g-CO₂äq/MJ in V3. Unter ökonomischen Aspekten darf der Effekt aus der CO₂-Verflüssigung nicht unterschätzt werden.

Danksagung

Die Arbeiten werden im Rahmen des Verbundvorhaben: Einsatz von definierten Holzkohlen zur Prozessintensivierung im Biogasprozess (FKZ: 2220WD007A) durch das Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

Literaturangaben/Quellen

- 1 (2021): Gasausbeute in landwirtschaftlichen Biogasanlagen. Potenziale, Erträge, Einflussfaktoren. Darmstadt, Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V. (KTBL), Tabelle 4, Seiten 30, 31. Mittelwerte aus Laborversuchen (ohne Rundungen)
- 2 <https://www.redcert.org/redcert-systeme/systemdokumente.html>
- 3 <https://www.destatis.de/DE/Themen/Branchen-Unternehmen/Landwirtschaft-Forstwirtschaft-Fischerei/Produktionsmethoden/Publikationen/Downloads-Produktionsmethoden/wirtschaftsduen-ger-2030222209004.html> und https://www.lwk-niedersachsen.de/lwk/news/30422_Wieviel_Guelle_produzieren_Mast-schweine
- 4 Telefonisches Interview zu typischen Transportkosten mit Herrn Tilo Matthaei vom 16.11.2023 um 10:22 Uhr <https://www.matthaei.de/geschäftsfelder/logistik>
- 5 VNn = Vermiedene Netznutzung, vergütet mit 0,70 ct/kWh(Hs) für 10 Jahre.
- 6 DBFZ Report Nr. 50

Kontakt

Rainer Casaretto, Dr. Hans Korte, Dr.-Ing. Jan Sprafke

Dr.-Ing. Jan Sprafke

Universität Rostock, Professur Abfall- und Stoffstromwirtschaft

☎ +49 (0)381.498-3421 | ✉ jan.sprafke@uni-rostock.de

🌐 www.auf.uni-rostock.de/professuren/a-g/aw/

*Franziska Schäfer, Reinhard Pätz, Alfons Himmelstoss,
Reik Ellmann, Jürgen Pröter*

Kombination anaerober und aerober Verfahren zur Güllebehandlung – GülleKOM

Zusammenfassung: *Die Überdüngung der Felder mit unbehandelten tierischen Exkrementen (Rindergülle, Schweinegülle) trägt maßgebend zu einem Stickstoffüberschuss aus der Landwirtschaft bei. Ein Übermaß an Stickstoff kann gravierende Auswirkungen auf Umwelt und Gesundheit haben (Grundwasserbelastung, Auswirkung auf Luftreinheit: Ammoniak und Treibhausgas N₂O). Um den Stickstoff-Gehalt zu senken, ist Gülleentstickung auf Basis von biologischen Verfahren (Nitrifikation/Denitrifikation) das weltweit meistgenutzte Verfahren. Nachteile dieses Verfahrens sind relativ hohe Kosten und dass der Hauptteil des Stickstoffs in elementaren Stickstoff umgewandelt wird und damit für eine Weiternutzung als Dünger in stickstoffarmen Regionen verloren geht. Im Rahmen des GülleKOM-Projektes soll ein optimiertes aerobes Verfahren zur Gülleaufbereitung mit dem Ziel der Stickstoffreduzierung mit einer anaeroben Güllevergärung kombiniert werden, um damit eine energetische Nutzung und Kostenreduzierung zu ermöglichen. Die oben genannte Optimierung hat zudem das Ziel möglichst viel der in der Gülle gelösten Stickstoffverbindungen in Biomasse umzuwandeln und diese als Proteinquelle (Mikrobenprotein) aus der Gülle auszuschleusen. Dieses Konzept wird zusammen mit Industriepartnern entwickelt und vom Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL) gefördert.*

Abstract: *The excessive fertilization of farmland with untreated animal excrements (cattle manure, pig slurry) is a major source of excess nitrogen from agriculture. Excess nitrogen can have serious environmental and health impacts (groundwater pollution, impact on air purity: ammonia and greenhouse gas N₂O). To reduce the nitrogen content, manure treatment based on biological processes (nitrification/ denitrification) is the most widely used process worldwide. Disadvantages of this process are relatively high costs and that the main part of the nitrogen is converted into elemental nitrogen and thus lost for further use as fertilizer in nitrogen-poor regions. Within the framework of this research project (GülleKOM), an optimized aerobic process for manure treatment with the aim of nitrogen reduction is to be combined with anaerobic manure fermentation in order to thus enable energetic use and cost reduction. The above-mentioned optimization also aims to convert as much as possible of the nitrogen compounds dissolved in the slurry into biomass (microbial protein) in order to enable nitrogen recycling. This concept is developed together with industrial partners and is funded by the Federal Ministry of Food and Agriculture (BMEL).*

1 Einleitung

Zur Reduzierung des Stickstoffgehaltes in GülLEN, Gärresten und Abwässern gibt es eine Vielzahl von physikalischen (u.a. Strippen, Umkehrosmose), chemischen (u.a. Fällung) und biologischen Verfahren (Fuchs & Drosch, 2010). Auf die erstgenannten Verfahrensprinzipien soll hier nicht näher eingegangen werden. Biologische Verfahren wie Nitrifikation/Denitrifikation oder Anammox zur Stickstoffreduzierung sind in der Abwasserbehandlung Stand der Technik (Janke, 2008). Auch zur aeroben Behandlung von Gülle oder stark stickstoffhaltigen Abwässern sind seit längerem Verfahren bekannt (Wedekind et al., 1981; Leendert & Koster, 1993; Koster & Klapwijk, 1990; Heppe & Pätz, 1993). Relativ neu ist der großtechnische Einsatz aerober Verfahren zur Entstickung von Gärresten und GülLEN. Durch die Firma Bio Armor sind 60-70 Anlagen zur Entstickung von Gülle (sowohl Schweine- als auch Rindergülle) mit einer Kapazität von 7.500 bis zu 90.000 m³/Jahr vorrangig in Belgien und den Niederlanden gebaut worden (Bio Armor, 2024). Das Verfahren hat sich in der Praxis bewährt. Erste Anlagen gingen vor 15 Jahren in Betrieb. Rohgülle wird dabei einer Fest-Flüssig-Trennung unterzogen. Der Feststoff wird als fester Dünger verwertet, die Aufbereitung der Flüssigphase erfolgt nach dem Prinzip der Nitrifikation/Denitrifikation. Nach Angaben des Unternehmens werden eine Stickstoffreduzierung von 90 % und eine Phosphatreduzierung von 75 % erreicht. Die Phosphatreduzierung erfolgt allein durch die Separation im Vorfeld. Es gibt keine Geruchsbelästigung, Lachgasemissionen konnten nicht nachgewiesen werden. Die GÜlleaufbereitungsanlagen von Bio Armor sind nicht mit Biogasanlagen gekoppelt. In der Folge werden nicht nur die Möglichkeiten der Energiegewinnung außer Acht gelassen, sondern auch ein erhöhter Aufwand bei der Abwasserreinigung in Kauf genommen. Das hier verwendete Verfahren beruht auf der biologischen Stickstoffreduzierung mittels Nitrifikation/Denitrifikation. Die Nitrifikation ist ein zweistufiger, oxidativer Vorgang und wird in Nitritation (Umwandlung von Ammonium zu Nitrit durch Ammonium oxidierende Bakterien) und Nitratation (Umwandlung von Nitrit zu Nitrat durch Nitrit oxidierende Bakterien) unterteilt (Ottow & Bidlingmaier, 1997). Bei der anschließenden Denitrifikation wird Nitrat über Lachgas (N₂O) zu elementarem Stickstoff (N₂) durch fakultativ anaerobe Bakterien reduziert unter Anwesenheit einer organischen Kohlenstoffquelle (Janke, 2008).

Ein alternatives Verfahren zur biologischen Stickstoffreduzierung in Gärresten wurde von Ellmann (2013) beschrieben (Ellmann, 2013). Eine technische Umsetzung der Gärrest-Behandlung mittels Anammox-Verfahren durch die Ellmann Engineering GmbH ist bereits erfolgt, wobei einige Schwachstellen (vor allem die langen Anfahrzeiten > 1 Jahr) erkennbar wurden. Das Anammox-Verfahren ist auf Grund der langen Anfahrzeiten des Prozesses nur schwer in der Praxis realisierbar. Dennoch gibt es auf Grund wesentlicher Vorteile (keine zusätzliche Kohlenstoffquelle notwendig, weniger Energieverbrauch, Kostenersparnis) Anwendungen für die Abwasserbehandlung im Industriemaßstab (Wett & Hell, 2008). Eine weitere Möglichkeit den Stickstoffgehalt von GülLEN zu reduzieren stellt im ersten Schritt die Umsetzung des gelösten Ammoniumstickstoffes in feste Biomasse dar, die in einem zweiten Schritt aus der fermentierten Gülle

abgetrennt wird. Hauptziel dieser Verfahren war die Gewinnung von Futtermitteln (Wendland et al., 1987; Kartchner, 2003; Shuler et al., 1979). Aktuell wird in China ein Verfahren zur Nährstoffrückgewinnung aus Gärresten von Biogasreaktoren in Form von bakterieller Biomasse mittels Airlift Reaktoren untersucht (Sobhi et al., 2020).

Im hier vorgestellten Projekt wurde die aerobe Gülle-/Gärrestbehandlung mit der anaeroben Güllevergärung kombiniert. Bei der Verfahrensentwicklung im Labormaßstab wurde die optimale Kombination/zeitliche Anordnung beider Verfahrenskomponenten ermittelt. Es folgte eine Auswertung der Labordaten mittels Massenbilanzierung, auf Basis dieser wurde das optimale Konzept in den Pilotmaßstab übertragen.

2 Verfahrensentwicklung im Labormaßstab

Die optimale Kombination der Verfahren zur aeroben Gülleaufbereitung und anaeroben Güllevergärung wurde im Labormaßstab untersucht (Abb. 1). Die Laborkläranlage wurde mit vorgeschalteter Denitrifikation und einem insgesamten Arbeitsvolumen von 10 L betrieben. Die hydraulische Verweilzeit (HRT) betrug 25 d, die Schlamm-Verweilzeit (SRT) durchschnittlich 30 d. Der durch Belüftung eingestellte Sauerstoff-Gehalt in der Nitrifikation betrug $0,9\text{--}1\text{ mg L}^{-1}$. Als Substrat kam Schweinegülle (Flüssigphase nach Separation) eines Schweinemastbetriebs aus der Region zum Einsatz. Die Separation im Vorfeld der Behandlung erfolgte mittels Siebung (Maschenweite 2 mm). Die Versuche wurden im Anschluss an das Vorgängerprojekt Nred (FKZ: 22042118) durchgeführt. Die in den Prozessstufen etablierte Mikrobiologie (Gärrestbehandlung) diente als Inokulum. Zur Prozessüberwachung wurden regelmäßig folgende Parameter analysiert: pH-Wert, Trockensubstanz (TS), organische Trockensubstanz (oTS), flüchtige organische Säuren (FOS), chemischer Sauerstoffbedarf (CSB), Ammoniumstickstoff ($\text{NH}_4\text{-N}$), Nitritstickstoff, Nitratstickstoff, Kjeldahl-Stickstoff (TKN) (Liebetrau et al., 2015). Der Gesamtstickstoff (TN) entspricht der Summe aus TKN, Nitritstickstoff und Nitratstickstoff.

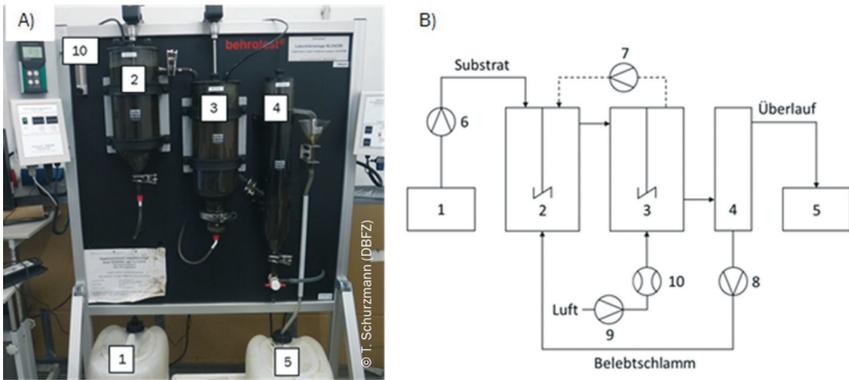


Abb. 1: A) Laborkläranlage zur aeroben Güllebehandlung, B) Schematischer Aufbau
 (1) Substratorvorlage, (2) Denitrifikation, (3) Nitrifikation, (4) Nachklärung (beinhaltet Klarlauf im Überstand und Überschussschlamm im Bodensatz), (5) Sammelbehälter Klarlauf, (6 bis 8) Schlauchpumpen, (9) Belüftungspumpe, (10) Durchflussmesser

Schwerpunkt dieser Untersuchungen war die biologisch oxidative Stickstoffreduzierung in der Flüssigphase von Schweinegülle bei einem gleichzeitig großen Biomassezuwachs. Unabhängig von der eingesetzten Substratcharge wurde eine Reduzierung des Ammoniumstickstoff-Gehalts von bis zu 99 % (Abb. 2 A) und des Gesamtstickstoff-Gehalts von bis zu 83 % im Vergleich zum Ausgangssubstrat erreicht (Abb. 2 B).

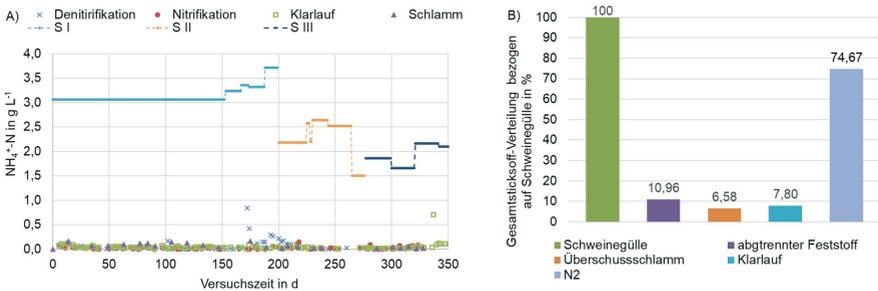


Abb. 2: Ammoniumstickstoff-Gehalt in den einzelnen Prozessstufen während der Güllebehandlung an der Laborkläranlage. Der Inhalt der Nachklärung unterteilt sich in Klarlauf und Schlamm. S, Substratcharge I-III. B) Gesamtstickstoff-Verteilung der Stoffströme aus der Schweinegülle-Behandlung mittels Laborkläranlage bezogen auf das Ausgangssubstrat

Um die wirtschaftlich sinnvollste Anordnung der Prozesskomponenten aerobe und anaerobe Schweinegülle-Behandlung zu ermitteln, wurden die Methanpotenziale der einzelnen Stoffströme (Substrat unsepariert, separierter Feststoff, Klarlauf und Überschussschlamm) in Batch-Versuchen AMPTS (Automatic Methane Potential Test System) bestimmt. Hieraus ging hervor, dass bei

der Vergärung von Überschussschlamm und abgetrenntem Feststoff nur 40 % des potenziellen Methanertrags der Schweinegülle genutzt werden (Abb. 3). Der Rest des Potenzials würde einer energetischen Nutzung verloren gehen. Daher scheint es zunächst einmal sinnvoller, den Biogasprozess einer aeroben Behandlung voranzustellen.

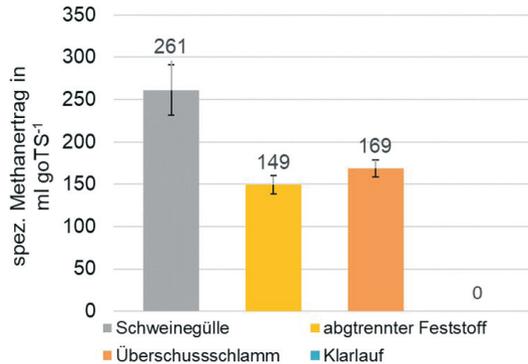


Abb. 3: Spezifischer Methanertrag der Schweinegülle und der Stoffströme aus der Schweinegülle-Behandlung mittels Laborkläranlage.

3 Konzeptentwicklung und Durchführung im Pilotmaßstab

Auf Basis der Ergebnisse aus den Laborversuchen wurden Stickstoff- und Massenbilanzen erstellt. Diese Daten dienen im Vergleich zu den im Vorgängerprojekt ermittelten Ergebnissen zur Diskussion verschiedener Varianten der Einbindung der Anaerobstufe (vor oder nach Stickstoffreduzierung). Dabei stand sowohl die Energiebilanz der Kombinationslösung beider Systeme (anaerob und aerob) im Vordergrund, als auch die Nährstoffkonzentrationen im Verhältnis zum verfügbaren Kohlenstoff (wichtig für den Betrieb der Denitrifikation). Ziel war die Bewertung beider Konzepte hinsichtlich der Biogasgewinnung, Stickstoffreduzierung und Biomassegewinnung. In die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung wurden weitere Faktoren einbezogen:

- Einsparung der notwendigen Erwärmung der Gülle, wenn die aerobe Stufe zuerst abläuft
- Minimierung des Einsatzes externer Kohlenstoffquellen
- Minimierung des Verbrauches an Elektroenergie
- Transportwürdigkeit der abgetrennten festen Reststoffe unter Beachtung des Standortes der Anlage
- Integration von Wärmenutzungskonzepten
- Größe der Biogasanlage

Das finale Konzept für die Umsetzung im Pilotmaßstab basiert auf einer Teilstrombehandlung (Abb. 4). Dieses wird aktuell an der Pilotanlage umgesetzt.

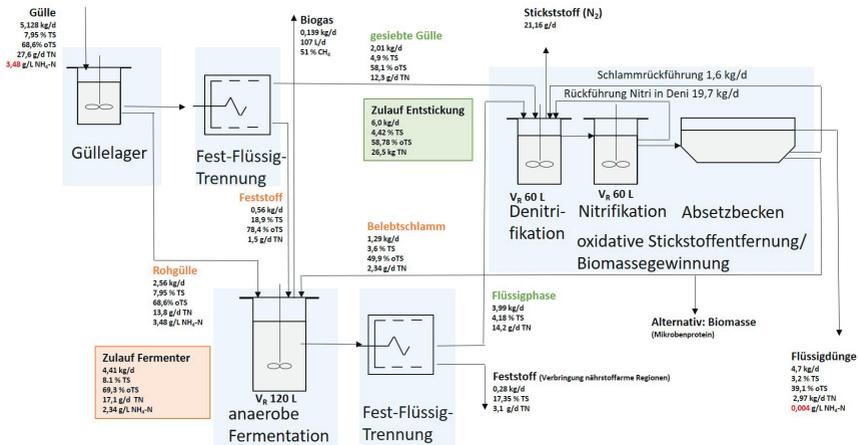


Abb. 4: Konzept zur Teilstrombehandlung von Schweinegülle an der GülleKOM Pilotanlage, J. Pröter (DBFZ)

Die Pilotanlage besteht aus einem Biogasreaktor (anaerobe Behandlung), der mit Schweinegülle (Rohgülle), separiertem Feststoff der Schweinegülle und Überschussschlamm (Belebtschlamm) aus der aeroben Behandlung betrieben wird. Der aerobe Verfahrensteil setzt sich aus einer Denitrifikations-Vorstufe, der Nitrifikation und einem Absetzbecken zusammen. Hier findet die aerobe Behandlung der gesiebten Gülle und der Flüssigphase des separierten Gärrestes statt.

Der Biogasreaktor wurde bei einer Verweilzeit von 29 d und einer Raumbelastung von 1 bis 2 g oTS L⁻¹ d⁻¹ (je nach Qualität der Substratcharge) betrieben. Eine Übersicht der Substratchargen ist in Tab. 1 gezeigt. Als Inokulum wurde zu gleichen Anteilen aktiver Gärrest der Forschungsbiogasanlage des DBFZ (Vergärung von Maissilage und Rindergülle) und an höhere Ammoniumstickstoff-Konzentrationen adaptierter Gärrest aus dem Vorgängerprojekt Nred (Vergärung von Rindermist, Maissilage und Hühnertrockenkot) sowie Rindergülle verwendet. Die aerobe Behandlung erfolgt in drei Behältern, Denitrifikation, Nitrifikation und Nachklärung (Absetzen von Überschussschlamm, Klarlauf im Überstand), bei einer Verweilzeit von 27 d und einem Schlammalter von 30 d. In der Nitrifikation wird ein Sauerstoffgehalt von 0,9-1 mg L⁻¹ eingestellt. Als Inokulum kam Impfschlamm aus den entsprechenden Behandlungsstufen des Klärwerks AZV Parthe zum Einsatz. Um unabhängig von Schwankungen der Außentemperatur zu sein, wird die Anlage bei 25° C betrieben. Es erfolgt eine 4-fache Rückführung von Überschussschlamm in die Denitrifikation (Schlammrückführung: 24 L d⁻¹) und für den internen Kreislauf zwischen Nitrifikation und Denitrifikation (24 L d⁻¹). Der Behandlung war eine Fest-Flüssig-Trennung der Gülle und des Gärrestes vorangestellt (Siebung durch 2 mm Maschenweite).

Tab. 1: : Analyseergebnisse der eingesetzten Schweinegülle-Chargen

Charge	Versuchszeitraum in d	pH [-]	TS [%]	oTS [%TS]	FOS [g L ⁻¹]	NH ₄ -N [g L ⁻¹]	TKN [g kg TS ⁻¹]
I	1 - 39	7,4	9,3	79	5,7	2,5	54
II	40 - 59, 105 - 120	7,7	3,7	74	3,3	2,1	-
III	60 - 104	7,38	4,1	77	3,5	1,9	65
IV	121 - 150	7,45	5,9	79	5,4	3,2	-
V	151 - ...	7,48	5,8	78	6,5	3,3	-

Abb. 5 zeigt die spezifische Methanproduktion und Prozessparameter aus dem Betrieb des Biogasreaktors. Der erwartete Methanertrag auf Basis der KTBL-Werte für unseparierte Schweinegülle (spezif. Gasertrag von 345 mL goTS⁻¹, bei 50 % Methan-Gehalt, KTBL, 2021) wurde phasenweise erreicht (Versuchstag 50 bis 80 und 140 bis 160, Abb. 5). Dass die gemessenen Methanerträge etwas niedriger waren, ist auf die Teilstrombehandlung zurückzuführen. Nur die Hälfte des Substrats bestand aus Rohgülle. Dieser wurden der Feststoff aus der Gülle-Separation und der Überschussschlamm aus der aeroben Behandlung beige-mischt (Abb. 4). Die Schwankungen kommen maßgeblich durch die sehr unterschiedlich beschaffenen Substrat-Chargen zustande (Tab. 1). Im Gärrest wurde anfangs ein NH₄-N-Gehalt von 3-3,5 g L⁻¹ gemessen. Mit dem Einsatz von Überschussschlamm aus der aeroben Behandlung als Teil des Substrates ab Versuchstag 58 ist die NH₄-N-Konzentration kontinuierlich zurückgegangen bis auf Werte zwischen 1,5 und 2 g L⁻¹. Der FOS-Gehalt lag zu Beginn zwischen 1,6 und 2,5 g L⁻¹. Im weiteren Verlauf verringerte sich der FOS-Gehalt auf einen Bereich zwischen 0,7 und 0,9 g L⁻¹. Trotz der Schwankungen im spezifischen Methanertrag, ist der Prozess als stabil zu bewerten, da der FOS-Gehalt nicht anstieg. Eine Säure-Akkumulation wäre ein Zeichen für eine Prozessstörung.

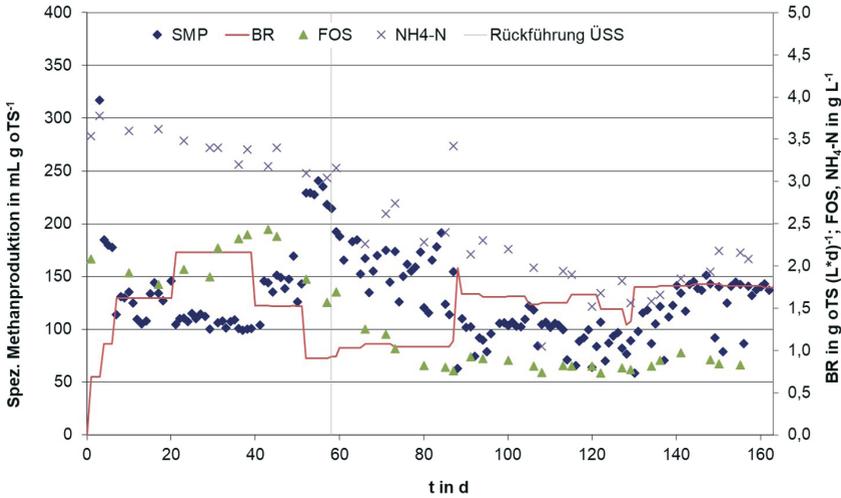


Abb. 5: Spezifische Methanproduktion (SMP), FOS-Gehalt, NH₄-N-Gehalt und Raumbelastung (BR) im Biogasreaktor der GülleKOM Pilotanlage. ÜSS, Überschussschlamm

Abb. 6 A zeigt den NH₄-N-Gehalt in den einzelnen Stufen der aeroben Behandlung der GülleKOM-Pilotanlage. Zu Beginn des Betriebs der Anlage war der NH₄-N-Gehalt in allen Prozessstufen sehr niedrig (< 0,1 g L⁻¹). Im Laufe der Versuchszeit erhöhte sich dieser Wert auf 0,6-0,8 g L⁻¹, durch die Zugabe von separierter Gülle und Gärrest (durchschnittlicher NH₄-N-Gehalt im Zulauf lag bei 1,5 g L⁻¹). Auf Basis dieser Werte wurde ein NH₄-N-Umsatz von etwa 30 % berechnet. Durch Optimierung der technischen Voraussetzungen (Belüftung, Sauerstoffeintrag, Schlammrückführung), hat sich von Versuchstag 120 bis 150 ein stabiler Prozess in allen drei Stufen etabliert (pH-Wert von 7,5 bis 8,4, Abb. 6 B). Dabei wurde der eingetragene NH₄-N fast vollständig umgesetzt. Direkt nach der Umstellung der Prozessführung war in allen drei Stufen ein Peak sowohl im Nitritstickstoff- als auch im Nitratstickstoff-Gehalt zu verzeichnen (Abb. 6 C und D). Dies ist vermutlich auf eine zeitliche Verzögerung beim Anlaufen der Prozesse (zuerst Nitrifikation, mit etwas Verzögerung Denitrifikation) zurückzuführen.

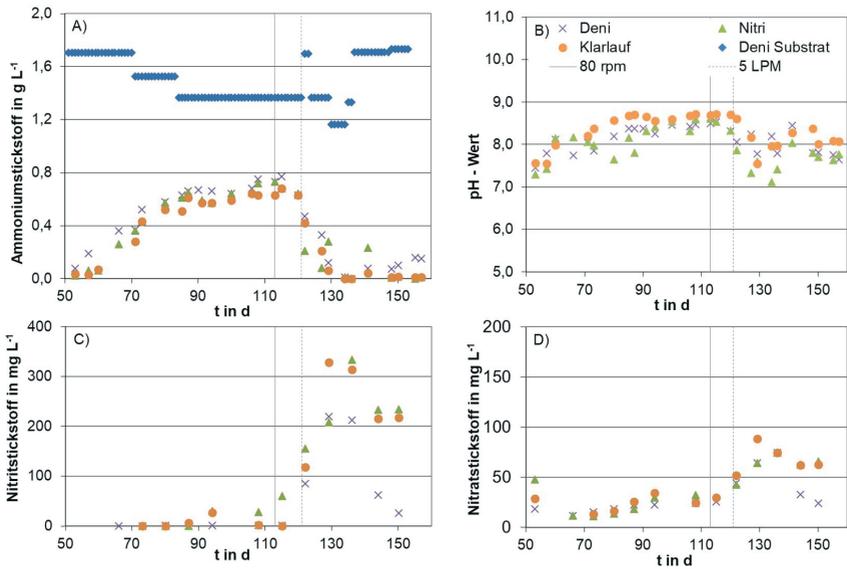


Abb. 6: $\text{NH}_4\text{-N}$ -Gehalt (A), pH-Wert (B), Nitritstickstoff-Gehalt (C) und Nitratstickstoff-Gehalt (D) in den einzelnen Stufen der aeroben Behandlung der GülleKOM-Pilotanlage. Deni, Denitrifikation; Nitri, Nitrifikation; Deni Substrat, Zulauf in Denitrifikation; 80 rpm, Verdopplung der Durchmischungsintensität auf 80 rpm; 5 LPM, Steigerung der Belüftungsintensität von 3 auf 5 Liter pro Minute

4 Fazit und Ausblick

Es wurde ein Konzept zur Einbindung einer Aerobstufe in eine großtechnische Biogasanlage entwickelt. Dieses wird derzeit im Pilotmaßstab untersucht. Dazu werden die Zusammenhänge von Biogasproduktion, Stickstoffreduzierung und Biomasseproduktion untersucht. Darauf basierend soll das Verfahren ökologisch und wirtschaftlich optimiert werden. Im zweiten Teil des Projektes sollen Versuche zur Hefekultivierung auf Schweinegülle erfolgen. Bei dieser Form der aeroben Güllebehandlung soll möglichst viel Stickstoff in Form von abtrennbarer Biomasse (Mikrobenprotein) gebunden werden, die das Potenzial für technische Anwendungen (Schmierstoffe, Klebstoffe, Bindemittel) hat.

Literatur/Quellen

- Bio Armor (2024) http://www.bioarmor.be/de_DE/page/homepage
- Ellmann, R. (2013). Verfahren zur Aufbereitung eines aus einem Fermenterreaktor stammenden Reststoffes. Patent-Nr.: DE 10 2013 018 833 A1
- Fuchs, W.; Drosig, B. (2010): Technologiebewertung von Gärrestbehandlungs- und Verwertungskonzepten. Wien: Eigenverlag der Universität für Bodenkultur Wien, 215 S. - ISBN 978-3-900962-86-9
- Heppe, A., Pätz, R. (1993): Verfahren und Anlage zur biologischen Reinigung von Abwasser. Patent-Nr.: EP0739860A1
- Janke, H. D. (2008). Umweltbiotechnik: Grundlagen und Verfahren. UTB. ISBN: 3-8252-8380-3
- Kartchner, H. H. (2003). Process for recovering feed-grade protein from animal manure U.S. Patent No. 6,524,632. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.
- Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V. (2021): Gasausbeute in landwirtschaftlichen Biogasanlagen. ISBN 978-3-945088-85-2
- Koster, I. W., Klapwijk, A. (1990). Method and installation for processing manure, fermented manure and Kjeldahl-N containing waste water. Patent-Nr.: EP 0 423 889 A1
- Leendert, A.; Koster, I. W. (1993): Verfahren zur Behandlung eines flüssigen stickstoffreichen Abfallprodukts.nach diesem Verfahren hergestellte Düngemittellösung sowie seine Herstellung. Patent-Nr.: DE 693 20 473 T2
- Liebetrau, JP; Thrän, D. (2015). Messmethodensammlung Biogas. Leipzig, DBFZ
- Ottow, J. C., & Bidlingmaier, W. (1997). Umweltbiotechnologie. Stuttgart: Fischer. ISBN: 3-437-25230-5
- Shuler, M. L., Roberts, E. D., Mitchell, D. W., Kargi, F., Austic, R. E., Henry, A., ... & Seeley Jr, H. W. (1979). Process for the aerobic conversion of poultry manure into highprotein feedstuff. *Biotechnology and Bioengineering*, 21(1), 19-38.
- Sobhi, M., Han, T., Stinner, W., Cui, X., Sun, H., Li, B., ... & Dong, R. (2020). Hybrid technology for nutrients recovery as microbial biomass and ammonium sulfate from un-diluted biogas liquid digestate using a modified airlift reactor. *Journal of Cleaner Production*, 121976.
- Wedekind, P., Reimann, W., Linke, B., Franz, J. (1981). Verfahren zur mechanisch-mikrobiologischen Behandlung von Schweinegülle. Patent-Nr.: D 147 091 A1
- Wendland, K-D., Pätz, R., Wandt, A., Skrowny, H., Brühl, E., Heine, M., Hubald, M. (1987) Verfahren zur Gewinnung von Biomasse., Patent-Nr.: DD 241 916 A1
- Wett, B., & Hell, M. (2008). Betriebserfahrungen mit dem DEMON®-Verfahren zur Deammonifikation von Prozesswasser. *KA Abwasser Abfall*, 55(3), 245

Kontakt

Dr. Franziska Schäfer, Dr. Jürgen Pröter, Reinhard Pätz

DBFZ - Deutsches Biomasseforschungszentrum gGmbH
Torgauer Straße 116, 04347 Leipzig.

☎ +49 (0)341.2434-443 | ✉ franziska.schaefer@dbfz.de

🌐 www.dbfz.de

Dipl.-Ing. Alfons Himmelstoss

AEV Energy GmbH
Torgauer Straße 116, 04347 Leipzig.

☎ +49 (0)351.467-1301 | ✉ a.himmelstoss@aev-energy.de

🌐 www.aev-energy.de

Dipl.-Ing. Reik Ellmann

Ellmann EE Engineering GmbH
Torgauer Straße 116, 04347 Leipzig.

☎ +49 (0)34462.60722 | ✉ reik@ellmann-gmbh.de

🌐 www.ellmann-gmbh.de

KURZBEITRÄGE

Bioenergie in Thüringen – aktueller Stand und Rolle auf dem Weg zur Klimaneutralität

Zusammenfassung: Die Bioenergie spielt eine entscheidende Rolle in Thüringens Energiemix. Mithilfe eines Energiesystemmodell im Rahmen des ZO.RRO-Projekts wurde ihre Bedeutung untersucht. Methodisch wurden aktuelle Bioenergiepfade analysiert und EEG-Daten ausgewertet. Ergebnisse zeigen, dass Verbrennungsmotoren und Biogas dominieren, während Biomethan-Potenziale noch nicht ausgeschöpft sind. Substratanalysen und Wärme aus Biomasse bieten erste Einblicke für zukünftige Szenarien. Es wird weiterhin an der Optimierung des Energiesystemmodells gearbeitet, um die Rolle der Bioenergie unter verschiedenen politischen und technologischen Bedingungen zu prognostizieren.

Abstract: Bioenergy plays a significant role in Thuringia's energy mix. Its importance was examined with the help of an energy system model as part of the ZO.RRO project. Current bioenergy paths were analyzed and EEG data evaluated. Results show that combustion engines and biogas dominate, while biomethane potentials have not yet been exhausted. Substrate analyses and heat from biomass provide initial insights for future scenarios. The energy system model is being further optimized in order to forecast the role of bioenergy under different political and technological conditions.

1 Einleitung

Die Bioenergie hat derzeit in Thüringen einen Anteil von 25 % an der Netto-Stromerzeugung Thüringens aus erneuerbaren Energien [1]. Auch in Zukunft spielt die Bioenergie eine Rolle in einem klimaneutralen Energiesystem. Dies ist ein Ergebnis des Energiesystemmodells für ein klimaneutrales Thüringen, welches im Rahmen eines Teilprojektes des BMWi-Projekts „ZO.RRO-Zero Carbon Cross Energy System“ entwickelt wurde [2]. Mithilfe dieses Modells wird die Forschungsfrage, wie sich politische Vorgaben und Entwicklungen in der Landwirtschaft auf das Bioenergiesystem am Beispiel von Thüringen auswirken, untersucht.

2 Methodik

Die Ist-Stand Analyse des Bioenergiesystems in Thüringen bildet dabei die Grundlage für eine detailliertere Abbildung im Modell. Dazu wurden die derzeit genutzten Bioenergiepfade in Thüringen identifiziert, die eingesetzte Biomasse-Art und Mengen, sowie Energiemengen ausgewiesen. Für die Auswertung werden Stammdaten, Bewegungsdaten und Marktstammdaten miteinander kombiniert [3,4,5]. Dazu wurde ein Python-Programm geschrieben, welches es ermöglicht die aktuellen Datensätze nach Energieträger gefiltert auszuwerten. Diese Auswertung ist somit für ganz Deutschland und alle Energieträger mög-

lich. Zudem werden die Vergütungskategorien mithilfe von EEG-Vergütungstabellen und EEG-Umlagekategorien [6] und der Beschreibung für die Bonusregeln entschlüsselt.

Durch diese Kombination können Rückschlüsse über Substrateinsatz, Vergütung und genutzte Technologien herausgefunden werden. Neben den Vergütungskategorien kann ermittelt werden, welche Strommengen eingespeist wurden. Aus diesen Daten und mit Ergebnissen von DBFZ [7] und TLLR [8] kann überschlägig berechnet werden, welche Substratmengen eingesetzt und benötigt werden, dazu werden weitere Parameter wie Wirkungsgrade, Verluste und Biomethanbildungspotenziale verwendet. Dieses Ergebnis kann daraufhin für weitere Berechnungen und Analysen verwendet werden, wie der Abgleich mit den Biomassepotenzialen.

Als weitere Datengrundlagen werden Daten von der ThEGA [9] bezüglich der Wärmanlagen, die mit Biomasse betrieben werden, untersucht. Dazu liegen Daten bezüglich der verwendeten Technologie, Leistung und Ort vor. Über weitere Annahmen wie Benutzungsstunden kann so ebenfalls die benötigte Menge an Holz ermittelt werden.

Erste Auszüge zu den Ergebnissen zu dem Stand der Bioenergie in Thüringen und der zukünftigen Rolle im Energiesystem werden nachfolgend dargestellt.

3 Ergebnisse

3.1 Auswertung Datensätze

Insgesamt gibt es 340 EEG-Anlagen, die Biomasse als Energieträger nutzen und speisen etwa 1.400 GWh in das Stromnetz ein. Diese Anlagen können aus mehreren Einheiten, also BHKW's, Nachverstromungseinheiten, bestehen. Insgesamt gibt es 474 Einheiten, diese lassen sich nach eingesetztem Hauptbrennstoff, sowie genutzter Technologie unterscheiden. In der folgenden Tabelle ist die Auswertung auf Technologiebasis dargestellt.

Tab. 1: Auswertung der Biomasse-Technologie-Anzahl in Thüringen

Verwendete Technologie	Anzahl
Dampfmotor	2
Gasturbinen mit Abhitzekeessel	6
Gasturbinen ohne Abhitzekeessel	7
Gegendruckmaschine ohne Entnahme	1
Kondensationsmaschine mit Entnahme	7
Kondensationsmaschine ohne Entnahme	2
ORC (Organic Rankine Cycle)-Anlage	8
Sonstige	3
Stirlingsmotor	2
Verbrennungsmotor	436
Gesamt	474

Dabei werden 362 der 436 Verbrennungsmotoren mit Biogas betrieben, 28 mit Biomethan und 16 mit Palmöl oder andere Pflanzenöle, um die größten Anteile zu nennen. Kondensationsmaschinen werden hauptsächlich mit fester Biomasse (Holz) betrieben und ORC-Anlagen sowie Gasturbinen mit Biogas. Somit haben Verbrennungsmotoren und Biogas den größten Anteil an der Energiebereitstellung durch Biomasse. Insgesamt gibt es in Thüringen 11 Biomethan-Erzeugungsanlagen und 31 Stromerzeugungsanlagen auf Basis von Biomethan. [3–5], dies zeigt, dass das Biomethan-Potenzial nicht ausgeschöpft ist. Ausgehend von den Verbrennungsmotoren, die Biogas und Biomethan nutzen und Strom einspeisen, könnten nach überschlägiger Rechnung etwa 190 Mio. m³ Biomethan zur Verfügung gestellt werden, und als Erdgas-Äquivalente genutzt werden. Dabei muss jedoch berücksichtigt werden, dass etwa 800 GWh Strom somit nicht eingespeist werden.

3.2 Blockschaltbild Energiesystem

Anhand dieser Ist-Stand-Analyse kann das Blockschaltbild für das Energiesystemmodell erstellt werden, welches die Grundlage für die Optimierung und Ergänzung bildet.

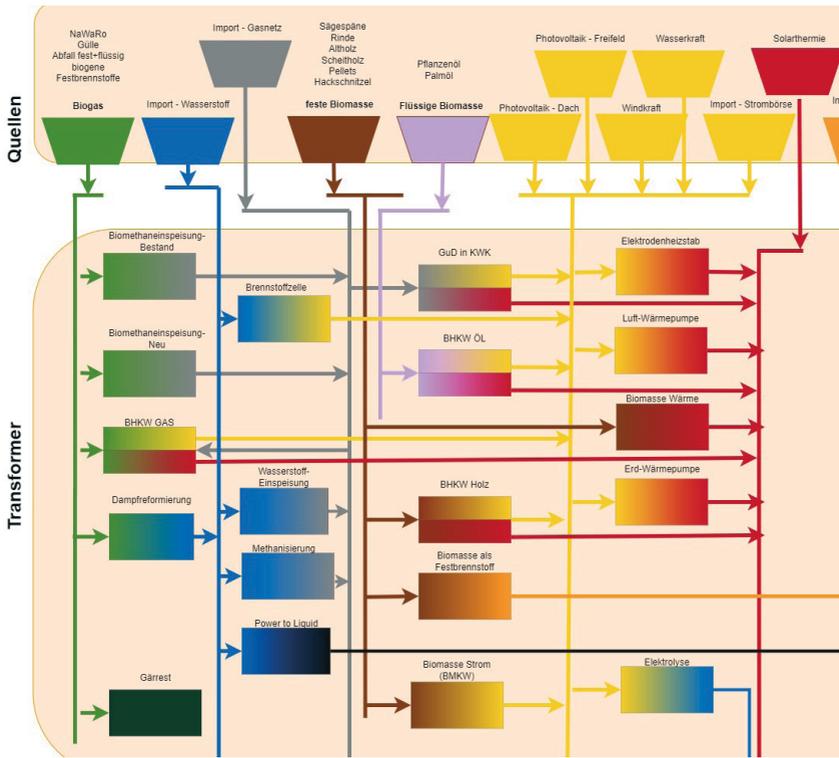


Abb. 1: Ausschnitt des Blockschaltbildes des Energiesystemmodells

In dem Blockschaltbild gibt es eine Quelle für Biogas (grün), welches aus NawaRo, Gülle, Abfällen etc. generiert wird, eine Quelle für feste Biomasse (braun), wie Holz und für flüssige Biomasse (lila). Diese werden in verschiedenen Transformern wie, BHKW, Biomethananlagen und Gasturbinen zu Strom (gelbe Linie) und Wärme (rote Linie) umgewandelt, oder der stofflichen Nutzung zugeführt

Entsprechend des Blockschaltbildes werden weitere verschiedene Parameter für die Quellen und Transformer in das Modell eingegeben, dazu zählen Potenziale, Wirkungsgrade und Kosten (CAPEX, OPEX) und das Energiesystem kann entsprechend der Klimaziele optimiert werden und es können verschiedene Szenarien entwickelt werden, um die Rolle der Bioenergie für Thüringen darzustellen.

3.3 Substrateinsatzanalyse Biogas

Die Auswertung der Substratanalyse ergibt, dass der Substrateinsatz in den landwirtschaftlichen Biogas-Anlagen zu etwa 73 % aus Exkrementen und zu etwa 27 % aus NawaRo besteht. Dies ist positiv für die Zukunft der Bioener-

gie, da eine Steigerung der Verwertung von Reststoffen angestrebt wird und NawaRo's eine unter geordnete Rollen spielen sollen. Daraus lassen sich Szenarien bezüglich des Substrateinsatzes entwickeln, wie bspw. weitere Reduktion der NawaRo's, Reduktion Tierbestand und weitere Szenarien werdend darauf aufbauend entwickelt.

3.4 Wärme aus Biomasse

Aus den Daten der ThEGA lassen sich folgende Werte für Wärme aus Biomasse ermitteln, dabei sind nur Kleinanlagen vertreten.

Tab. 2: Technologie-Anzahl Biomasse-Wärmeanlage

Technologie	Leistung [kW]	Anzahl
Hackschnitzelkessel	7.721	156
Kombinationsk. Hack. + Scheitholz	60	2
Kombinationsk. Pellet + Scheitholz	7.854	318
Pelletkessel	133.942	6.123
Pelletofen	6.128	555
Pelletofen mit Wassertasche	394	24
Scheitholzessel	258.349	9.475
Gesamtergebnis	414.449	16.653

Insgesamt gibt es in Thüringen 16.653 „Kleinf Feuerungsanlagen“, davon sind 9.475 Scheitholzessel, welche nur für kurzzeitige Wärmebereitstellung genutzt werden. Darauf aufbauend kann unter Berücksichtigung von Betriebsstunden und Heizwerten ermittelt werden, welche Mengen an Holz benötigt werden, um den aktuellen Bestand zu versorgen. Auch diese Daten werden mit den Potenzialen abgeglichen. Diese Analyse bietet auch die Möglichkeit Szenarien zu entwickeln, wie der Austausch der Biomasse-Wärmeanlagen.

4 Ausblick

Um die zukünftige Rolle der Bioenergie darzustellen, werden die vorangegangenen Analysen und Ergebnisse weitergeführt und in das Energiesystem integriert. Darüber hinaus werden verschiedene Szenarien aufgrund von politischen Vorgaben, Entwicklungen und Prognosen erstellt und untersucht.

Literatur/Quellen

- [1] THÜRINGER LANDESAMT FÜR STATISTIK: Thüringer Stromproduktion 2022. Pressemitteilung 026/2024. 7.02.2024 – Überprüfungsdatum 2024-04-17
- [2] FRENKEL, Christoph ; HOFMANN, Laura ; LIEBE, Jana ; ODERDORFER, Amélie ; REINHARDT, Theresa ; SCHMIDT, Christoph ; VOSWINCKEL, Sebastian ; WESSELAK, Viktor: So geht's : Wie Thüringen klimaneutral wird - die Ergebnisse der Energiesystemmodellierung. Nordhausen : Institut für Regenerative Energietechnik (in.RET), 2021
- [3] BUNDESNETZAGENTUR: Marktstammdatenregister : Erweiterte Einheitenübersicht. URL <https://www.marktstammdatenregister.de/MaStR/Einheit/Einheiten/ErweiterteOeffentlicheEinheiteneubersicht> – Überprüfungsdatum 2024-04-16
- [4] 50HERTZ TRANSMISSION GMBH; AMPRION GMB; TRANSNETBW GMBH TENNET TSO GMBH: EEG-Jahresabrechnungen: Bewegungsdaten. URL <https://www.netztransparenz.de/de-de/Erneuerbare-Energien-und-Umlagen/EEG/EEG-Abrechnungen/EEG-Jahresabrechnungen/EEG-Jahresabrechnungen-2022-2000>. – Überprüfungsdatum 2024-04-16
- [5] 50HERTZ TRANSMISSION GMBH; AMPRION GMBH; TENNET TSO GMBH; TRANSNETBW GMBH: EEG-Anlagenstammdaten. URL <https://www.netztransparenz.de/de-de/Erneuerbare-Energien-und-Umlagen/EEG/EEG-Abrechnungen/EEG-Jahresabrechnungen/EEG-Anlagenstammdaten>. – Überprüfungsdatum 2024-04-16
- [6] 50HERTZ TRANSMISSION GMBH; AMPRION GMBH; TRANSNETBW GMBH; TENNET TSO GMBH: Abwicklungshinweise und Umsetzungshilfen: EEG-Vergütungstabellen und EEG-Umlagekategorien. URL https://www.netztransparenz.de/xsproxy/api/staticfiles/ntp-relaunch/dokumente/erneuerbare%20energien%20und%20umlagen/eeg/eeg-abrechnungen/abwicklungshinweise-und-umsetzungshilfen/eeg-verguetungskategorien_eeg_2024_20240318.xlsx. – Überprüfungsdatum 2024-04-17
- [7] NADJA, Nadja ; DENYSENKO, Velina ; DANIEL-GROMKE, Jaqueline: Biogaserzeugung und -nutzung in Deutschland. 2023
- [8] REINHOLD, Gerd: Integration der Biogaserzeugung in die Landwirtschaft Thüringens. Januar 2017 (Projekt-Nr. 96.08)
- [9] BAFA, Bearbeitung durch ThEGA: Wärme Biomassebestand. 2022

Kontakt

M.Eng Lynn Vincent, wissenschaftliche Mitarbeiterin, Promovendin

Institut für Regenerative Energietechnik (in.RET)
Weinberghof 4, 99734 Nordhausen.

☎ +49 (0)3631.420-837 | ✉ lynn.vincent@hs-nordhausen.de

🌐 www.hs-nordhausen.de

Kompostierung von biogenen Reststoffen im kleinskaligen Labormaßstab

Zusammenfassung: In der Landwirtschaft und der Lebensmittelindustrie ist die Bewirtschaftung von Abfällen (z.B. Speisereste, Grünabfälle und Wirtschaftsdünger) eine große Herausforderung. Die Kompostierung ist dabei ein wirksames und bewährtes Verfahren zur aeroben Behandlung organischer Materialien, bei dem diese in eine stabile Form umgewandelt werden und ihr Volumen mikrobiell verringert wird. Angesichts der einzigartigen Eigenschaften verschiedener organischer Abfälle unterstreicht diese Studie die Bedeutung der Untersuchung der Ko-Kompostierung verschiedener Substrate. Dieser Ansatz zielt darauf ab, die Effizienz und Effektivität des Kompostierungsprozesses zu verbessern, indem auch die optimalen Prozessparameter bestimmt werden. Flächen zur natürlichen Kompostierung benötigen jedoch viel Platz und der Prozess kann sich bis zu zwei Jahre hinziehen. Der Einsatz von Laborkompostierungsreaktoren die Einführung effizienterer und nachhaltigerer Verfahren für die Bewirtschaftung organischer Abfälle erleichtern und Mischungsverhältnisse optimieren. In dieser Studie wird der Aufbau von drei kleinen Kompostierungsversuchsreaktoren mit einem Fassungsvermögen von circa 10 Litern vorgestellt. Die Ergebnisse, über einen Zeitraum von 28 Tagen unter Verwendung von Grünabfällen und reifem Kompost als Kompostierungssubstrat bzw. Starterkultur, zeigen eine Temperaturkurve, die bei zwei der drei Reaktoren innerhalb eines Tages thermophiler Bedingungen erreicht. Darüber hinaus wurde das Material alle 7 Tage gemischt und zur Charakterisierung beprobt. Zu den gemessenen Parametern gehörten pH-Wert, elektrische Leitfähigkeit, Feuchtigkeitsgehalt, Gehalt an organischem Kohlenstoff sowie der Kohlenstoffdioxid- und der Sauerstoffgehalt.

Abstract: In agriculture and the food industry, the management of waste (e.g. food waste, green waste and farm manure) is a major challenge. Composting is an effective and proven method for the aerobic treatment of organic materials, converting them into a stable form and microbially reducing their volume. Given the unique characteristics of different organic wastes, this study emphasizes the importance of investigating the co-composting of different substrates. This approach aims to improve the efficiency and effectiveness of the composting process by also determining the optimal process parameters. However, areas for natural composting require a lot of space and the process can take up to two years. The use of laboratory composting reactors will facilitate the introduction of more efficient and sustainable organic waste management practices and optimize mixing ratios. This study presents the construction of three small composting test reactors with a capacity of approximately 10 liters. The results, over a period of 28 days using green waste and mature compost as composting substrate and starter culture respectively, show a temperature curve that reaches thermophilic conditions in two of the three reactors within one day. In addition, the material was mixed every 7 days and sampled for characterization. The parameters measured included pH, electrical conductivity, moisture content, organic carbon content, carbon dioxide content and oxygen content.

1 Einleitung

In der Landwirtschaft und Lebensmittelindustrie fallen umfangreiche Mengen an festen und flüssigen Abfällen an, diese Reststoffe besitzen energetisches und stoffliches Potenzial als Wirtschaftsdünger. In Deutschland wurden im Jahr 2021 etwa 16,1 Millionen Tonnen biogene Abfälle behandelt, zu denen Bioabfälle, Grünschnitt, Abfälle aus der Landwirtschaft, Gärreste und Klärschlamm gehören (Statistisches Bundesamt, 2023; Umwelt Bundesamt, 2023). Die festen Abfälle stellen eine wertvolle Quelle für Nährstoffe dar, die durch Kompostierung in der Landwirtschaft wiederverwendet werden können. Die Kompostierung ist ein effektives und bekanntes aerobes Behandlungsverfahren für organische Stoffe. Neben der Volumenreduzierung durch den organischen Abbau wird die organische Substanz in eine stabile Form überführt. Durch die Kombination verschiedener Arten biologisch aerob abbaubaren festen Abfällen kann ein Substrat hergestellt werden, das für die Mikroorganismen im Kompostierungsprozess optimal ist.

Dennoch benötigen traditionelle Kompostierungsanlagen vergleichsweise viel Platz und der Prozess kann, abhängig von den eingesetzten Materialien, der Größe des Komposthaufens und der Umsetzungsfrequenz, bis zu zwei Jahre in Anspruch nehmen. Einen Beitrag zur nachhaltigen Landwirtschaft könnte der Einsatz von Kleinreaktoren zur Prozessentwicklung eine effiziente Möglichkeit darstellen, um die Ko-Kompostierung verschiedener Substrate zu untersuchen und optimale Prozessparameter für Praxisanlagen zu identifizieren.

Im laufenden Projekt „AManDA“ wird die Kompostierung von biogenen Abfällen und Nebenprodukten aus der Schweinehaltung und stofflichen Verwertung im Labormaßstab untersucht. Dazu wurde ein kleinskaliger Kompostversuchsreaktor mit einem Arbeitsvolumen von circa 10 Litern entwickelt. Im ersten Versuch wurden Grünabfälle und reifer Kompost als Substrat verwendet, um den Prozess in den kleinen Kompostreaktoren zu testen und zu überprüfen, ob die für die Kompostierung erforderliche Temperatur im Labor erreicht werden kann.

2 Material und Methoden

2.1 Substrat

Als Substrat für unsere Studie diente eine Mischung aus reifem Kompost und Grüngut im Verhältnis von 5 bis 7, um einem Feuchtigkeitsgehalt von 59 % zu erreichen. Diese Substratzusammensetzung wurde im ersten Reaktor (KR1) verwendet. In den folgenden Reaktoren variierte die Substratzusammensetzung: Der zweite Reaktor (KR2) enthielt 75 % dieser Mischung, während im dritten Reaktor (KR3) 50 % verwendet wurden. Der verbleibende Prozentsatz entspricht Strukturmaterial, insbesondere mit Grünabfallpartikeln mit einem Durchmesser von weniger als 10 mm, um die auf die Substratvariationen zwischen den Reaktoren zurückzuführenden Betriebsunterschiede zu bewerten. Tab. 1 zeigt eine detaillierte Charakterisierung des Grundmaterials (GM) sowie die Eigenschaften des verwendeten Strukturmaterials (SM).

Tab. 1: Charakterisierung des Substrats und des Strukturmaterials

Material	Einheit	Grundmaterial	Strukturelles Material
pH	-	7,79	7,92
TM	%	50,8	76,1
oTM	%FM	20,7	55,1
C/N	-	15,03	12,55
TOC	g/kg	195,3	344,9

2.2 Konstruktion des Reaktors

Es wurden drei Kompostierungsreaktoren gleichzeitig untersucht. Abb. 1 zeigt den schematischen Aufbau der Reaktoren, die jeweils ein Volumen von etwa 10 Litern haben. Diese Reaktoren verfügen über einen Lufteinlass am Boden, wo die Luft gleichmäßig durch eine perforierte Platte verteilt wird. Eine peristaltische Pumpe (Typ: Ismatec VC-380) befördert die Luft mit einem einstellbaren Volumenstrom von 1 L/min in jeden Reaktor. Die Durchflussmenge wird von einzelnen Durchflussmessern, die in jedem Reaktor installiert sind, geregelt. Um die Wärmeabgabe zu verringern, sind die Reaktoren mit 15 mm dickem Isoliermaterial ummantelt. Außerdem ist eine Ablassschraube für das während der Kompostierung anfallende Sickerwasser installiert.

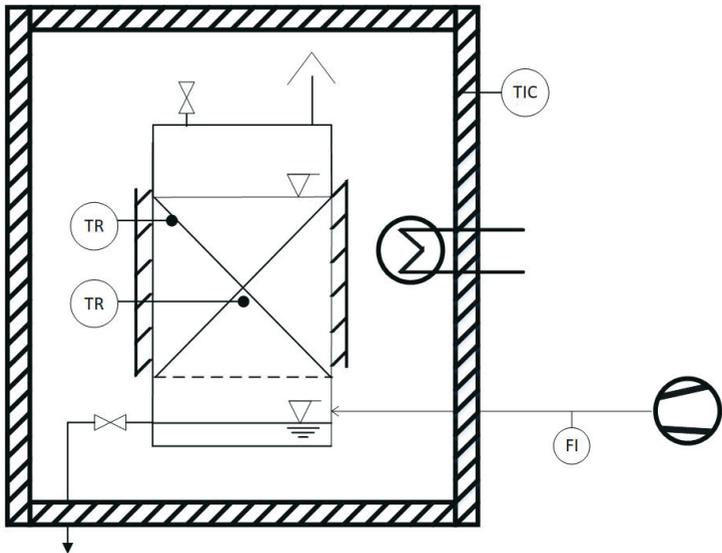


Abb. 1: Schematische Darstellung des Kompostreaktors

Zur Überwachung der Temperaturveränderungen sind in jedem Reaktor zwei Thermoelemente installiert. Diese Sensoren sind strategisch in einem Abstand von 50 mm und 150 mm von der Oberseite des Reaktors positioniert, so dass sie die Temperaturen im Kern und an der Seitenwand erfassen können. Die Temperaturdaten werden in 10-Minuten-Intervallen erfasst, so dass ein detailliertes und kontinuierliches Profil während des gesamten Prozesses entsteht. Außerdem befinden sich die Reaktoren in einer klimatisierten Kammer, in der die Temperatur in den ersten 14 Tagen bei 30 °C gehalten und danach auf 27 °C angepasst wurde. Die Temperatur in der Kammer wird ebenfalls aufgezeichnet, um ein umfassendes Verständnis der Umweltbedingungen während des Kompostierungsprozesses zu gewährleisten. Die Reaktoren wurden 28 Tage lang betrieben. Während dieser Zeit wurden der Sauerstoff (O₂) und der Kohlenstoffdioxidgehalt (CO₂) gemessen. Alle sieben Tage wurde eine Probenahme durchgeführt, um den pH, Wassergehalt und das C/N-Verhältnis der Proben zu bestimmen.

3 Ergebnisse

Abb. 2 zeigt die Temperaturentwicklungen für die drei Reaktoren über einen Zeitraum von 28 Tagen. Es ist zu beobachten, dass alle Reaktoren in den ersten Tagen des Betriebs thermophile Temperaturen erreichen. Die Reaktoren 1 und 2 erreichten jedoch bereits nach einem Tag Temperaturen von bis zu 69 °C. Andererseits erreichte Reaktor 3 bereits am zweiten Tag 62 °C, was darauf hindeutet, dass die Menge der Materialstruktur die mikrobielle Aktivität erheblich beeinflusst. Das Gemisch im ersten Reaktor enthält genügend organisches Material, um Temperaturen von über 55 °C zu erreichen, die für den Hygienisierungsprozess notwendig sind. Im Gegensatz dazu erreicht Reaktor 3, der zu 50 % aus Strukturmaterial besteht, aufgrund seines geringeren organischen Gehalts keine so hohen Temperaturen, was die mikrobielle Aktivität einschränkt. Interessanterweise werden trotz der niedrigeren Anfangstemperaturen in den Reaktoren mit Strukturmaterial die Mikroorganismen nach dem Spinnprozess reaktiviert. Diese Reaktivierung wird durch manuelles Wenden noch verstärkt, das, wie neuere Studien zeigen, die effektivste Methode zur Wiedererwärmung und Reaktivierung der Kompostreaktion ist (Sungsomboon et al., 2013). Dies geschieht, wenn diese Reaktoren während des Mischens neues organisches Material erhalten, was die entscheidende Rolle des manuellen Eingriffs und des organischen Gehalts bei der Optimierung der mikrobiellen Aktivität unterstreicht.

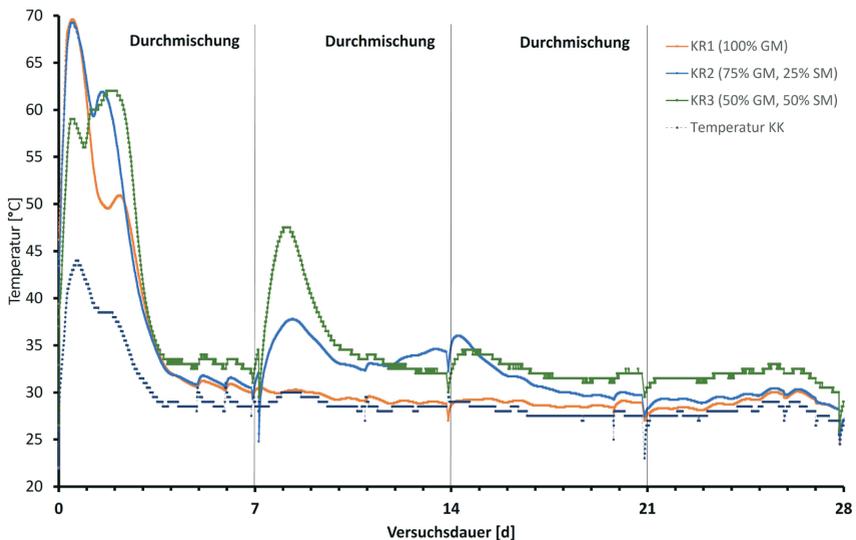


Abb. 2: Temperatur in die Kleinerkompostreaktoren

Die Ergebnisse der alle 7 Tage durchgeführten Probenahmen sind in Tab. 1 dargestellt. Der pH-Wert war anfangs in allen Reaktoren neutral, stieg dann aber an und stabilisierte sich im alkalischen Bereich mit Werten nahe 9 für die Dauer des Tests. Wie von Waqas et al. (2018) erwähnt, kann dieser Anstieg des pH-Werts auf den Abbau und die Mineralisierung komplexer Substrate in einfachere Verbindungen zurückgeführt werden, was zur Bildung von freiem Ammoniak (NH_3) führt.

Der Feuchtigkeitsgehalt, ein kritischer Parameter für die Kompostierungseffizienz, wurde in Reaktor 1 während des gesamten 28-tägigen Bewertungszeitraums bei etwa 50 % gehalten. Im Gegensatz dazu wiesen die Reaktoren 2 und 3, in die zusätzliches Strukturmaterial eingebracht wurde, um die Auswirkungen auf die Kompostierungseffizienz zu bewerten, anfänglich einen niedrigeren Feuchtigkeitsgehalt von 40 % auf. Zur Optimierung der mikrobiellen Aktivität und der Zersetzungsraten wurde am siebten Tag Wasser zugegeben, um den Feuchtigkeitsgehalt auf 45-50 % einzustellen. Konkret wurden 350 ml in Reaktor 2 und 450 ml in Reaktor 3 zugegeben. Am 28. Tag erhielt jeder Reaktor zusätzlich 100 ml Wasser. Diese Anpassungen wurden vorgenommen, um ein ideales Umfeld für die mikrobielle Zersetzung zu schaffen, was die entscheidende Rolle des Feuchtigkeitsmanagements bei Kompostierungsprozessen unterstreicht. Der Literatur zufolge liegt der optimale Feuchtigkeitsgehalt in der Regel zwischen 50 und 60 % (Alkoaik, 2019).

Tab. 2: Charakterisierung Substrat der verschiedenen Reaktoren

Reaktor	R1					R2					R3				
	1	7	14	21	28	1	7	14	21	28	1	7	14	21	28
pH	7,79	9,2	9,25	9,23	9,09	7,27	9,16	9,02	9,22	9,15	6,98	9,21	9,21	9,29	9,19
Lf [mS/cm]	2	1,98	1,59	1,03	0,97	2,19	2,31	2,13	1,18	1,15	2,36	3,21	2,8	1,63	1,42
TM [%]	48,8	50,4	48,2	49,8	51	57,6	60,6	55,9	52,5	51,2	65	62,9	48	52,4	52,9
WG [%]	51,2	49,6	51,8	50,2	49	42,4	39,4	44,1	47,5	48,8	35	37,1	52	47,6	47,1
oTM [% TM]	40,8	36,0	34,7	30,9	33,1	48,5	46,3	41,0	38,1	36,1	54,7	53,5	47,2	43,3	40,6
TC [g/kg]	220	214	191	196	-	263	241	257	221	-	306	293	237	276	253
TOC [g/kg]	195	212	187	185	-	220	227	238	216	-	258	273	234	267	246
CO ₂ [%]	-	0,7	0,3	0,5	0,7	-	0,8	2,6	1	0,5	-	1,6	1,2	2,8	2,4
O ₂ [%]	-	20,2	20,1	19,9	20,2	-	19,9	17,2	19,2	20,3	-	19	18,6	17,3	18,2

Die Verringerung des Gehalts an organischer Substanz in allen drei Reaktoren bestätigt den laufenden Abbauprozess und entspricht den Erwartungen an einen effektiven Kompostierungsprozess. Ein solcher Rückgang ist ein Indiz für die mikrobielle Assimilation und Umwandlung organischer Stoffe in Biomasse, CO₂ und andere Abbauprodukte. Wie von (Kopčič et al., 2014) erwähnt, beinhaltet der Kompostierungsprozess in der Regel eine anfängliche Phase des schnellen Abbaus, gefolgt von einer längeren Phase des langsameren Abbaus. Dieses Muster war in unseren Ergebnissen deutlich zu erkennen, insbesondere in den Reaktoren 2 und 3. In diesen Reaktoren verringerte sich die organische Substanz in den ersten 14 Tagen um 10 %, gefolgt von einem geringeren Abbau von nur 5 % in den folgenden 14 Tagen.

Darüber hinaus gibt die Analyse des Kohlenstoffgehalts – sowohl des gesamten als auch des organischen – Aufschluss über die Effizienz des Kompostierungsprozesses. Die Verringerung des Gesamtkohlenstoffs (TC) dient als Indikator für die Reife des Komposts (Waqas et al., 2018). Unsere Ergebnisse deuten auf eine Abnahme dieses Parameters in allen Reaktoren hin; die Stabilität konnte jedoch noch nicht bestätigt werden.

4 Fazit

Der Vorteil von Reaktoren im Labormaßstab wird in dieser Studie aufgezeigt. Die Analyse der über einen Zeitraum von 28 Tagen gesammelten Ergebnisse zeigt den Einfluss einiger Parameter auf den Zersetzungsprozess organischer Stoffe, wie z. B. den pH-Wert. Darüber hinaus zeigt das Erreichen der thermophilen Temperaturen die Effizienz des Kompostierungsprozesses in den Reaktoren, aber auch den Einfluss des Substrats auf die Schaffung günstiger Bedingungen für eine hohe Zersetzungsrate. Zusammenfassend zeigt diese Studie die Möglichkeit, verschiedene Substrate in kürzerer Zeit mit Hilfe von kleinen Kompostreaktoren zu testen, so dass neue Entwicklungen bei der Verwendung von landwirtschaftlichen Reststoffen entwickelt werden können und die Verwendung verschiedener Reststoffe für einen Kompostierungsprozess getestet werden kann, der bessere Ergebnisse liefert.

Literatur/Quellen

- Alkoaik, F. N. (2019). Integrating aeration and rotation processes to accelerate composting of agricultural residues. *PLoS One*, 14(7), e0220343. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0220343>
- Kopčić, N., Vuković Domanovac, M., Kučić, D. et Briški, F. (2014). Evaluation of laboratory-scale in-vessel co-composting of tobacco and apple waste. *Waste Management (New York, N.Y.)*, 34(2), 323-328. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2013.11.001>
- Sungsomboon, P., Chaisomphob, T., Bongochgetsakul, N. et Ishida, T. (2013). Pilot-scale tests of an innovative 'serial self-turning reactor' composting technology in Thailand. *Waste Management & Research: The Journal of the International Solid Wastes and Public Cleansing Association, ISWA*, 31(2), 212–222. <https://doi.org/10.1177/0734242X12469675>
- Umwelt Bundesamt. (2023, novembre 23). Bioabfälle: Sammlung von Bioabfall. <https://www.umweltbundesamt.de/daten/ressourcen-abfall/verwertung-entsorgung-ausgewaehlter-abfallarten/bioabfaelle#bioabfalle-gute-qualitat-ist-voraussetzung-fur-eine-hochwertige-verwertung>
- Waqas, M., Almeelbi, T. et Nizami, A.-S. (2018). Resource recovery of food waste through continuous thermophilic in-vessel composting. *Environmental Science and Pollution Research International*, 25(6), 5212–5222. <https://doi.org/10.1007/s11356-017-9358-x>

Kontakt

M.Sc. Cinthya Lara, wissenschaftliche Mitarbeiterin/Doktorandin

Universität Rostock, AUF

Professur Abfall- und Stoffstromwirtschaft

✉ cinthya.lara@uni-rostock.de

Biomass briquette production using a novel binder: A comparative quality analysis between two types of rice husk in Nigeria

Abstract: *Nigeria is among the countries with the highest rate of deforestation globally. The processing of lignocellulosic biomass into briquettes is one of the alternative forms of energy to abate deforestation. This study evaluates the quality parameters of briquettes made from two rice husk milling stages using the African locust bean pulp as a binder. The feedstocks were characterized, pretreated, and densified using a manually operated hydraulic piston press with a pressure of 4.5 MPa. The quality parameters evaluated are compressed density, relaxed density, relaxation ratio, impact resistance index, and compressive strength. The results revealed a compressed density between 0.496 and 0.706 g/cm³, relaxed density between 0.221 and 0.312 g/cm³, relaxation ratio between 1.96 and 2.53, impact resistance between 45% and 83.35%, and compressive strength between 20 and 630 kN/m². The results demonstrate that the briquettes produced from single-stage rice husks have a significantly higher quality than those of the double-stage rice husks. This study recommends the use of single-stage rice husks over double-stage in briquette production and suggests that rice husks briquettes have the potential to replace the use of fuelwood and charcoal in Nigeria, thereby curtailing deforestation and climate change.*

Zusammenfassung: *Nigeria gehört zu den Ländern mit der höchsten Entwaldungsrate weltweit. Die Verarbeitung von lignozellulosehaltiger Biomasse zu Briketts ist eine alternative Energieform zur Eindämmung der Entwaldung. Diese Studie bewertet die Qualitätsparameter von Briketts, die aus Reisschalen, in zwei Mahlstufen gemahlen, und unter Verwendung von afrikanischem Johannisbrotkernmehl als Bindemittel, hergestellt wurden. Die Rohstoffe wurden mithilfe einer manuell betriebenen hydraulischen Kolbenpresse mit einem Druck von 4,5 MPa charakterisiert, vorbehandelt und verdichtet. Die bewerteten Qualitätsparameter sind Pressdichte, Quelledichte, Quellrate, Schlagzähigkeitsindex und Druckfestigkeit. Die Ergebnisse ergaben eine Pressdichte zwischen 0,496 und 0,706 g/cm³, eine Quelledichte zwischen 0,221 und 0,312 g/cm³, eine Quellrate zwischen 1,96 und 2,53, eine Schlagfestigkeit zwischen 45 % und 83,35 % und eine Druckfestigkeit zwischen 20 und 630 kN/m². Die Ergebnisse zeigen, dass die aus einstufig gemahlene Reishülsen hergestellten Briketts eine deutlich höhere Qualität aufweisen als die aus zweistufig gemahlene Reishülsen. Diese Studie empfiehlt die Verwendung von einstufigen Reisschalen anstelle von zweistufigen bei der Brikettproduktion und legt nahe, dass Reisschalensbriketts das Potenzial haben, die Verwendung von Brennholz und Holzkohle in Nigeria zu ersetzen und dadurch die Entwaldung und den Klimawandel einzudämmen.*

1 Introduction

The continuous rise in the cost of energy in many parts of the world is alarming. This, coupled with the inaccessibility to clean energy, especially in rural and peri-urban parts of developing countries has compelled billions of people to use fuelwood and charcoal which contributes enormously to deforestation. On this premise, the scientific community has made enormous advances in harnessing energy from lignocellulosic biomass. Briquetting is one common approach employed in processing biomass into solid fuel. This involves densifying loosed biomass into a solid and a more compact form called a briquette. The technology improves the density and energy content of the biomass and also makes it easy for transportation and storage.

Factors such as application pressure, residence time, temperature, particle size, etc., influenced the quality and thermal properties of briquettes (Yunusa et al., 2023a). In the same vein, the type of feedstock involved is equally pertinent. The selection of a suitable feedstock depends on factors such as availability, sustainability, and the physical and thermochemical properties of the feedstock. For briquette production, feedstocks with moisture content between 6% and 14%, volatile matter between 50% and 90%, ash content less than 4%, and fixed carbon between 9% and 25% are generally preferred (Nikiema et al., 2022).

Rice husk is one of the most abundant biomass feedstocks in developing countries. This is because rice is largely cultivated as it is an important dietary staple (Jyothsna et al., 2024). Rice husk has good energy content and has been estimated to have an energy production potential of about 16 EJ/a (Baetge & Kaltschmitt, 2018). With more than 8.4 million tons of rice produced in Nigeria per year (FAO, 2021), Nigeria is classified as the largest producer of rice in Africa and one of the largest producers globally. Based on this, a huge amount of rice husks is generated in the country to the tune of 2.4 million tons per year. However, there is still no strategy in place for managing or recycling this mammoth waste, as they are often landfilled or burned, contributing to environmental pollution. Thus, harnessing energy from rice husks is perceived to be sustainable in the country. This would not only address the energy deficit in the country but would serve as a means of curtailing the rate of deforestation and climate change.

There are two common methods of rice processing in Nigeria (single-stage and double-stage) based on which two forms of rice husks are generated. Viz; single-stage and double-stage rice husks (Yunusa et al., 2023b). The single-stage rice husks are obtained from one-stage milling, while double stage from two-stage milling. In one-stage milling, the removal of rice husk and rice bran is achieved in a single pass while the kernel is obtained directly from the paddy, while in two-stage milling, the husk and bran are removed in different stages (Dhankhar, 2014). Because of this variation in types, it is therefore imperative to determine the most suitable for briquette production.

Previous studies on briquette production from rice husks mainly focused on double-stage rice husks, without an adequate report on the suitability of single-stage rice

husks in briquette production. Thus, the novelty of this study is that it evaluates the suitability of the two rice husk types, and also evaluates locust bean pulp as a binder in briquette production. Hence, the objective of the study is to determine the most suitable type of rice husks for briquette production in Nigeria.

2 Materials and Methods

2.1 Material collection and sample preparation

Single-stage rice husk was obtained from a one-stage rice mill in Zaria, Kaduna State Nigeria (latitude 11°10'5.658" N and longitude 7°39'25.88" E), while the double-stage sample was obtained from a two-stage rice mill in Shika Kaduna State, Nigeria (latitude 11°12'1.8" N and longitude 7°33'23.2" E). The samples were screened for foreign materials and were kept in an airtight plastic to avoid moisture absorption. Because the single-stage rice husk has small grade sizes, it became necessary to mill the double-stage husk to simulate the grade sizes of the single-stage husk. Thus, the samples were milled through a 2 mm screen mesh in a hammer mill (Yank et al., 2016).

2.2 Thermochemical Properties of rice husks

2.2.1 Higher heating value (HHV) and lower heating value (LHV)

The higher heating value is a measure of the total energy present in a fuel per unit mass (Musabbikhah et al., 2019). It was determined using a Bomb Calorimeter (Model: 6100, Parr Instrument Company, USA) following the method described in ASTM D5865-10a (2010). The LHV was estimated from the higher heating value using Equation 1 as given by Ebeling & Jenkins (1985).

$$LHV = (1 - MC) \left[HHV - \lambda \left(\frac{MC}{1 - MC} \right) + (0.09H) \right] \quad (1)$$

Where MC is the moisture content of the biomass sample on a wet basis (decimal), H is the hydrogen concentration (percent by weight dry basis) and A is the latent energy of vaporization of water (MJ/kg) (2.26MJ/kg).

2.2.2 Proximate analysis

Proximate analysis was performed to determine the volatile matter, ash content, and fixed carbon content in the samples.

a. Volatile matter

The volatile matter was determined using the modified procedure described in (ASTM D3175-07, 2007) for all sparking fuels, while the percentage of volatile matter was estimated using Equation 2 (Mitchual et al., 2014a).

$$\text{Percentage volatile matter (\%)} = \frac{A-B}{A} \times 100 \quad (2)$$

Where A is the weight of the oven-dried sample and B is the weight of the sample after heating in the furnace.

b. Ash content

The ash content was estimated as per ASTM D3174-02 (2002), and the percentage ash content was determined using Equation 3 (Mitchual et al., 2014a).

$$\text{Ash content (\%)} = \frac{M_{\text{ash}}}{M_{\text{oven-dry}}} \times 100 \quad (3)$$

Where M_{ash} is the mass of the ash and M_(oven-dry) is the mass of the oven-dried sample.

c. Fixed carbon

The fixed carbon is the remaining residue or portion of fuel after volatile matter, moisture, and ash content have been removed (Sarkar, 2015). The fixed carbon (FC) was estimated by subtracting the value of the volatile matter (VM) and ash content from 100% as given in Equation 4 (Mansaray & Ghaly, 1997).

$$\% FC = [100 - (\% Ash + \% VM)] \quad (4)$$

2.2.3 Ultimate analysis

The elemental analysis was limited to carbon, nitrogen, sulfur, hydrogen, and oxygen. Nitrogen was determined by the Micro-Kjeldahl method and sulfur was determined using the aluminum block method. The contents of carbon, hydrogen, and oxygen were however determined from the result of proximate analysis with an accuracy of $\pm 2\%$ using Equations 5 to 7 (TT et al., 2022).

$$\text{Carbon (\%)} = 0.635FC + 0.460VM - 0.095AC \quad (5)$$

$$\text{Hydrogen (\%)} = 0.059FC + 0.060VM + 0.010AC \quad (6)$$

$$\text{Oxygen (\%)} = 0.340FC + 0.469VM - 0.023AC \quad (7)$$

Where FC = Fixed Carbon, AC = Ash Matter, and VM = Volatile Matter

2.3 Briquette Production

In the production phase, two variables were considered. These are the binder content of 5% and 10% and dwell time of 30 and 60 seconds (Table 1). The binder was prepared by mixing the required quantity in raw form with 100 ml of water at room temperature until it dissolved into a paste without clogs. 500 ml of boiled water was added to the paste and stirred continuously for about 5 minutes to form a gel. Rice husk was poured into the binder while it was still hot and 140 ml water at room temperature was added and manually mixed for about 10 minutes to homogenize. 200g of each sample mix was fed into the mold and densified using a 5-ton hydraulic jack. The production was done at an average room temperature of 28 °C and constant pressure of 4.5 MPa using a manually operated

hydraulic piston press with a cylindrical mold of 8 cm diameter and height of 16 cm. Being a four-cylinder machine, 4 briquette samples were produced per run in triplicate and were sun-dried for a week. The dried samples were further kept at room temperature for about three weeks to attain a total post-ejection period of 30 days before evaluation.

Table 1: Process variables of briquette production

S/No	Sample	Binder ratio (%)	Dwell time (sec)
1	OSB	5	30
		10	60
2	TSB	5	30
		10	60

Note: OSB = One-Stage Briquette (produced from single-stage rice husk), TSB=Two-Stage Briquette (produced from double-stage rice husk)

2.4 Briquette Quality Test

The briquettes were tested for compressed density, relaxed density, relaxation ratio, impact resistance, and compressive strength.

2.4.1 Density

The maximum or compressed density was measured immediately after ejection from the mold, while the relaxed density was measured 30 days after ejection from the mold. Both densities were determined by directly measuring the diameter and length in two perpendicular directions (± 0.01 mm) using a digital vernier caliper and dividing by an estimate of the mass (± 0.1 g) as given in Equation 8 (Gendek et al., 2018).

$$\rho = \frac{m}{\frac{\pi}{4}d^2l} \quad (8)$$

Where ρ is the density (g/cm^3), m is the mass of the briquette (g), d is the averaged diameter (cm) and l is the averaged length (cm).

2.4.2 Relaxation ratio

The relaxation ratio is a measure of the briquette's dimensional stability in terms of shape, structure, and form after production (Onyango et al., 2020). The closer the value is to 1 the better the stability and quality of the briquette (Onyango et al., 2020). The relaxation ratio was computed as the ratio of compressed density to relaxed density as expressed in Equation 9.

$$\text{Relaxation ratio} = \frac{\text{Compressed density}}{\text{Relaxed density}} \quad (9)$$

2.4.3 Impact resistance

The impact resistance test is regarded as the overall best diagnostic of briquette quality (Richards, 1990). The impact resistance test was carried out as per (ASTM D440 - 86, 2002). The briquettes were dropped twice from a height of 2 m onto a steel plate. Then, the impact resistance index (IRI) was estimated following the Equation of Richards (1990) (Eqn. 10). Only pieces that weighed 5% or more of the initial weight of the briquette were considered in the IRI estimation (Mitchual et al., 2014b).

$$IRI = \frac{N}{n} \times 100 \quad (10)$$

Where N is the number of drops and n is the number of pieces that weighed 5% or more of the initial weight of the briquette after N drops.

2.4.4 Compressive strength

Compressive strength is the maximum crushing force that briquettes can withstand before failure (cracking or breaking) (Marreiro et al., 2021). The parameter is very important as it simulates the maximum compressive load a briquette can withstand during transportation, handling, and storage (Obi et al., 2022). The compressive strength was determined using a universal test machine (SM1000-TecQuipment Ltd., Nottingham, UK) with a load cell capacity of 100 kN.

2.5 Statistical Analysis

To determine the statistical differences between the quality of the two types of briquettes, the data were first tested for normality using Shapiro-Wilk's test. Normally distributed parameters were analyzed using an independent t-test, while non-normal parameters were analyzed using the Wilcoxon rank-sum (Mann-Whitney) test. Statistical analyses of variables were performed with Stata/SE version 16.1.

3 Results and Discussion

3.1 Material characterization

3.1.1 Moisture content

The initial moisture contents of the samples as received were 6.6% for single-stage rice husks and 7.7% for double-stage rice husks. However, to account for moisture loss during pretreatment, the samples were re-evaluated and were found to have moisture content of 5.9% and 4.8%, respectively. As the moisture content of both samples was below 10%, they were not dried further (de Oliveira Maia et al., 2018). The obtained values are within the agreed range of moisture for feedstocks intended for briquette production. This equally conforms with the permissible range (6-10%) as reported by Kumar et al. (2012) and (5.1-15.5 %) as reported by Asamoah et al. (2016) for rice husk intended for briquette production.

3.2 Thermochemical properties

Table 2 presents the results of the thermochemical analysis. A high volatile matter of 85.6% and 82.8% with corresponding ash content, fixed carbon and energy values of 7.9% and 12.9%, 6.5% and 4.3%, and 22.85 and 21.78 MJ/kg were recorded in single-stage and double-stage rice husk samples, respectively.

Table 2: Result of thermochemical properties of one-stage and two-stage rice husk

Sample	Ultimate					Proximate				
	C (%)	N (%)	O (%)	H (%)	S (%)	VM (%)	AC (%)	FC (%)	HHV (MJ/kg)	LHV (MJ/kg)
SS-RH	42.75	0.84	42.18	5.59	0.38	85.6	7.9	6.5	22.85	21.84
DS-RH	39.59	1.33	39.99	5.35	0.32	82.8	12.9	4.3	21.78	21.08

Note*: SS-RH = single-stage rice husk, DS-RH = double-stage rice husk

The result of the single-stage sample was found to be higher than that of the double-stage sample. Overall, the results obtained are better in performance than those reported by Mansaray & Ghaly (1997) which covered six rice husk varieties with energy value, volatile matter, and ash content of 14.72-18.31 MJ/kg, 63.00-70.20%, and 15.30 -24.60%, respectively, as well as Asamoah et al. (2016) that reported a calorific value, volatile matter, and fixed carbon of 14.2-20.5 MJ/Kg, 56.1-68.3 %, and 14.2-17.5 %, respectively. However, the ash content in the same report was observed to be in line with that of this study (7.9-23.5%). Fig. 1 shows the pictorial view of the samples after heating for volatile matter and ash content.



Fig. 1: Rice husk after heating for volatile matter and ash content (a) single-stage sample (after heating for the volatile matter), (b) single-stage ash content, (c) double-stage sample (after heating for the volatile matter), (d) double-stage ash content

Generally, quality briquettes are expected to have a volatile matter between 70% to 86% (Deepak et al., 2019). Thus, having obtained the rice husk of both samp-

les with the volatile matter within the stated range is an indication that the feed-stocks will yield thermally efficient briquettes.

3.3 Ultimate Analysis

The result of the ultimate analysis is presented in Table 2. Generally, the result depicts the major elemental constituents of the samples to be carbon, oxygen, and hydrogen with elemental content of 42.75% and 39.59%, 42.18% and 39.99%, and 5.59% and 5.35%, for single and double-stage rice husk samples, respectively. Whereas nitrogen and sulfur were found to be of very low concentrations. This conforms with the findings of Mansaray & Ghalys (1997).

The low concentration of nitrogen and sulfur content indicates the amount of nitrogen and sulfur-based toxic pollutants that can be formed during combustion (Mitchual et al., 2014a), and further verified that rice husk has very low to neutral emission levels. Single-stage rice husk had the highest values of the major constituents indicating that it has better heating value and is more suitable to be used as fuel. However, it showed a slightly higher level of sulfur depicting the potential of emitting more sulfur-based pollutants. The result of H, O, N, and S conformed with the range of values reported by Asamoah et al. (2016) as 4.1% -8.1%, 32.8% - 42.1%, 0.2% -2.7%, and 0.1% - 0.4%, respectively.

3.4 Briquette Quality Parameters

Fig. 2 shows the pictorial view of the densified briquettes from single-stage and double-stage rice husk

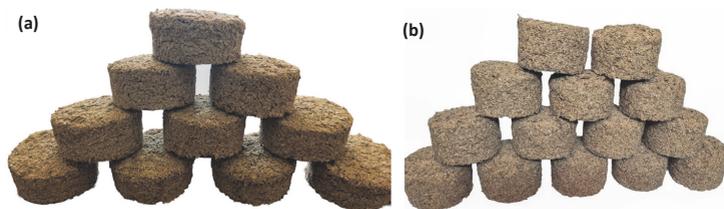


Fig. 2: Briquettes of (a) single-stage rice husk, (b) double-stage rice husk

3.4.1 Density

The results of compressed and relaxed densities are presented in Figs. 3 and 4, respectively. The values were observed to increase as binder content increases from 5% to 10%, and as dwell time increases from 30 to 60 seconds. The briquette with the highest compressed density (0.706 g/cm^3) was made from single-stage rice husk, 10% binder content, and a dwell time of 60 seconds (OSB2),

while that with the highest relaxed density (0.312 g/cm^3) was made from single-stage rice husk, 5% binder and 30 seconds dwell time (OSB1). Both densities were observed to be higher in one-stage briquettes compared to the two-stage samples. This may not be unrelated to the fact that the one-stage rice husk contains a higher percentage of finer particles depicting it to have more surface areas which enhances interparticle bonding during compression. Miao et al. (2019) also observed that small particle sizes homogenize better during mixing, thereby enhancing the briquette performance.

The highest values of compressed density agree with the value (0.86 g/cm^3) reported by Suryaningsih et al. (2018) for rice husk briquettes, while the lowest value conforms with the values ($0.35\text{-}0.46 \text{ g/cm}^3$ and $0.382\text{-}0.471 \text{ g/cm}^3$) reported by Magnago et al. (2020) and Yank et al. (2016) for briquette of rice husk and citrus peel, as well as rice husk and bran, densified at low pressure.

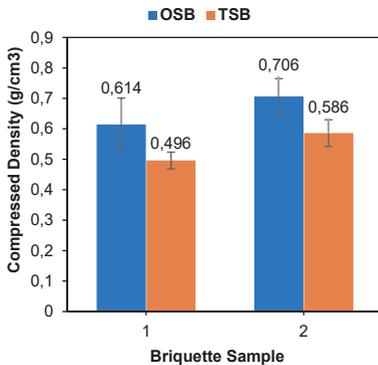


Fig. 3: Compressed density

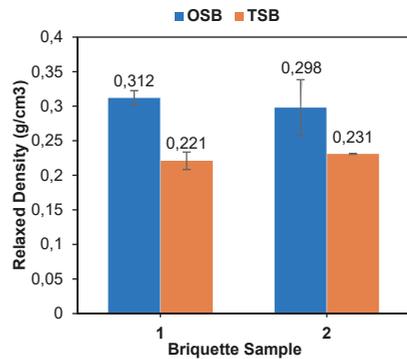


Fig. 4: Relaxed density

3.4.2 Relaxation ratio

The result of the relaxation ratio is presented in Fig. 5. The values were found to have increased with an increase in binder content and dwell time. The obtained values (1.96-2.53) are in agreement with the values (2.21 to 2.94) reported by Ajimotokan et al. (2019). The closer the value is to 1 the better the stability and quality of the briquette (Onyango et al., 2020). Based on this, with lower values of relaxation ratio (1.96 and 2.38) obtained from one-stage briquettes, it can be inferred that briquettes made from single-stage rice husk have better dimensional stability than those of two-stage.

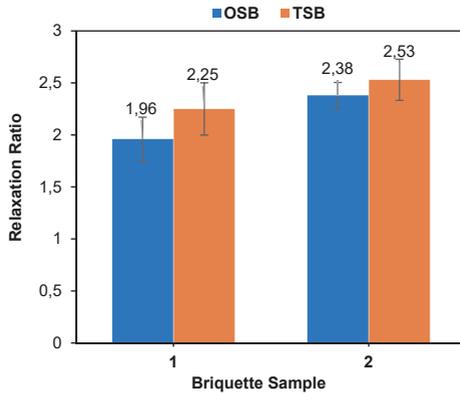


Fig. 5: Relaxation ratio

3.4.3 Impact Resistance Index (IRI)

The result of impact resistance is presented in Fig. 6. Similar to previously measured properties, the impact resistance was observed to increase with an increase in binder content and dwell time. The highest value (83.35%) was recorded in sample OSB2. This is better than the maximum value (61.3%) reported by (Sawadogo et al., 2018), possibly due to the difference in biomass. The highest value recorded in OSB2 is related to its high-density value which made both core and outside layers to be stronger than other samples. Overall, going by (Richards, 1990), who sets the minimum permissible impact resistance to be 50%, all the samples except TSB1 passed the impact resistance test.

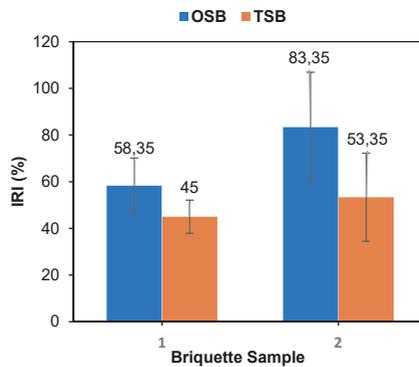


Fig. 6: Impact resistance

3.4.4 Compressive strength

Fig. 7 presents the result of compressive strength. The highest value (630 kN/m²) was recorded on sample OSB2. It was observed that as binder content increases from 5% to 10% and the dwell time increases from 30% to 60%, the compressive strength increases. Similarly, briquettes made from one-stage rice husk had a significantly higher compressive strength than those of two-stage briquettes. This was attributed to the fact that the one-stage samples were effectively bonded and denser at both core and surface layers, thereby improving their strength over the two-stage samples which were observed to be denser at the surface layer with low bonding uniformity at the core layer. Thus, they fracture very fast during the compression test. Although the obtained values are low, being occasioned by the use of low pressured technique, the maximum compressive strength (630 kN/m²) is higher than the maximum value (111 kN/m²) obtained by (Ajimotokan et al., 2019) for briquettes made from the mixture of rice husk and corn cob and the value (0.37 MPa) obtained by (Magnago et al., 2020) for briquette of rice husk and citrus peel.

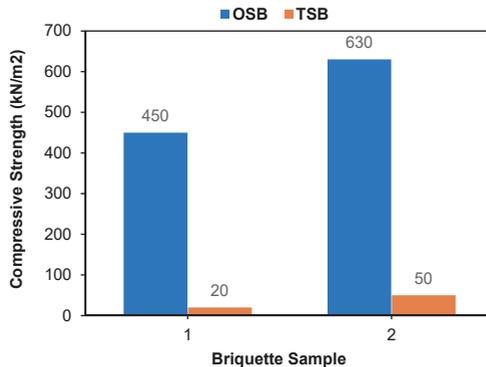


Fig. 7: Compressive strength

3.5 Summary of t-test and Mann-Whitney test

The results of the t-test and Mann-Whitney test are presented in Tables 3 and 4. Although the results of quality performance presented (Fig. 3 to 7) depict the briquettes made from one-stage rice husk to have better performance than those of two-stage rice husk, the result of the t-test and Mann-Whitney test depicts no significant difference in terms of quality except for relaxed density of briquettes made from 5% binder, and compressive strength that was found to be statistically different.

Table 3: Summary of *t*-test analysis

Variable	Pr ($ T > t $) OSB1 vs TSB1	Pr ($ T > t $) OSB2 vs TSB2
i. Compressed density	0.2089 ^{ns}	0.1474 ^{ns}
ii. Relaxed density	0.0157*	0.1467 ^{ns}
iii. Relaxation ratio	0.3380 ^{ns}	0.4557 ^{ns}
iv. Compressive strength	0.0002*	0.0008*

* = Significant at Pr < 0.05 ^{ns} = not significant at Pr > 0.05

Table 4: Summary of Mann-Whitney test analysis

Variable	Pr > $ z $ OSB1 vs TSB1	Pr > $ z $ OSB2 vs TSB2
i. Impact resistance	0.2207 ^{ns}	0.2207 ^{ns}

* = Significant at Pr < 0.05 ^{ns} = not significant at Pr > 0.05

4 Conclusion

The suitability of single and double-stage rice husks in briquette production was assessed in this paper. Previous studies focus largely on double-stage rice husk despite having a growing scale of single-stage rice processing, especially in Africa. Similarly, the potential of using locust bean pulp as a binder in briquette production was also examined.

The study discovered that single-stage rice husk possesses better physical and thermochemical properties, suggesting it to be the best for briquette production. It also confirmed that briquettes produced from single-stage rice husks have better quality than those of double-stage rice husks. However, it is worth noting that sustainability is essential in the use of biomass materials. Hence, the study suggests the use of the most available type of rice husk as the difference in properties and briquette quality was found to be insignificant except for the compressive strength. Furthermore, as the findings from the briquette quality testing conform with some standards and previous studies on low-pressured compression, the study therefore, recommends the use of gelatinized locust bean pulp as a binder in briquette production. This would help in bridging the gap in the use of inorganic binders which are expensive and highly emissive.

Acknowledgment

The Authors are grateful to the German Federal Ministry of Education and Research (BMBF) for funding the study through the West African Science Service Centre for Climate Change and Adapted Land Use (WASCAL), under the Graduate Research Programme on Climate Change & Land Use (CCLU), College of Engineering, Kwame Nkrumah University of Science and Technology, Kumasi, Ghana.

References

- Ajimotoke, H. A., Ibitoye, S. E., Odusote, J. K., Adesoye, O. A., & Omoniyi, P. O. (2019). Physico-mechanical Properties of Composite Briquettes from Corn cob and Rice Husk. *Journal of Bioresources and Bioproducts*, 4(3), 159–165. <https://doi.org/10.12162/jbb.v4i3.004>
- Asamoah, B., Nikiema, J., Gebrezgabher, S., Odonkor, E., & Njenga, M. (2016). A review on production, marketing and use of fuel briquettes. In *Resource Recovery and Reuse Series* (Vol. 23). <https://doi.org/10.5337/2017.200>
- ASTM D3174-02. (2002). ASTM: Standard test method for ash in the analysis sample of coal and coke from coal. In *Annual Book of ASTM Standards*. www.astm.org.
- ASTM D3175-07. (2007). Standard Test Method for Volatile Matter in the Analysis Sample of Coal and Coke. In *ASTM International*. <https://doi.org/10.1520/D3175-07.2>
- ASTM D440 - 86. (2002). Standard Test Method of Drop Shatter Test for Coal. In *ASTM International*.
- ASTM D5865-10a. (2010). Standard Test Method for Gross Calorific Value of Coal and Coke. In *Annual Book of ASTM Standards*. <https://doi.org/10.1520/D5865-10A.2>
- Baetge, S., & Kaltschmitt, M. (2018). Rice straw and rice husks as energy sources—comparison of direct combustion and biogas production. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 8(3), 719–737. <https://doi.org/10.1007/s13399-018-0321-y>
- de Oliveira Maia, B. G., de Oliveira, A. P. N., de Oliveira, T. M. N., Marangoni, C., Souza, O., & Sellin, N. (2018). Characterization and production of banana crop and rice processing waste briquettes. *Environmental Progress and Sustainable Energy*, 37(4), 1266–1273. <https://doi.org/10.1002/ep.12798>
- Deepak, K. B., Manujesh, B. J., Vivek, & Yashas, B. K. (2019). Development and study of fuel briquettes from areca leaves: A potential renewable energy source. *AIP Conference Proceedings*, 2080(030004). <https://doi.org/10.1063/1.5092907>
- Ebeling, J. M., & Jenkins, B. M. (1985). Physical and Chemical Properties of Biomass Fuels. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers*, 28(3), 898–902. <https://doi.org/10.13031/2013.32359>
- FAO. (2021). Nigeria Agriculture at a Glance. *FAO in Nigeria*, 3–4. <http://www.fao.org/nigeria/fao-in-nigeria/nigeria-at-a-glance/en/>
- Gendek, A., Aniszewska, M., Malaták, J., & Velebil, J. (2018). Evaluation of selected physical and mechanical properties of briquettes produced from cones of three coniferous tree species. *Biomass and Bioenergy*, 117, 173–179. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2018.07.025>

- Jyothsna, G., Bahurudeen, A., & Sahu, P. K. (2024). Sustainable utilisation of rice husk for cleaner energy: A circular economy between agricultural, energy and construction sectors. *Materials Today Sustainability*, 25, 100667. <https://doi.org/10.1016/j.mtsust.2024.100667>
- Kumar, A., Mohanta, K., Kumar, D., & Parkash, O. (2012). Properties and industrial applications of rice husk: a review. *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*, 2(10).
- Magnago, R. F., Costa, S. C., Assunção Ezirio, M. J. de, Godoy Saciloto, V. de, Cremona Parma, G. O., Gasparotto, E. S., Gonçalves, A. C., Tutida, A. Y., & Barcelos, R. L. (2020). Briquettes of citrus peel and rice husk. *Journal of Cleaner Production*, 276(123820). <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123820>
- Mansaray, K. G., & Ghaly, A. E. (1997). Physical and thermochemical properties of rice husk. *Energy Sources*, 19(9), 989–1004. <https://doi.org/10.1080/00908319708908904>
- Marreiro, H. M. P., Peruchi, R. S., Lopes, R. M. B. P., Andersen, S. L. F., Eliziário, S. A., & Junior, P. R. (2021). Empirical studies on biomass briquette production: A literature review. *Energies*, 14(8320). <https://doi.org/10.3390/en14248320>
- Miao, Z., Zhang, P., Li, M., Wan, Y., & Meng, X. (2019). Briquette preparation with biomass binder. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization and Environmental Effects*. <https://doi.org/10.1080/15567036.2019.1682722>
- Mitchual, S. J., Frimpong-mensah, K., & Darkwa, N. A. (2014a). Evaluation of Fuel Properties of Six Tropical Hardwood Timber Species for Briquettes. *Journal of Sustainable Bioenergy Systems*, 4, 1–9.
- Mitchual, S. J., Frimpong-mensah, K., & Darkwa, N. A. (2014b). Relationship between Physico-Mechanical Properties, Compacting Pressure and Mixing Proportion of Briquettes Produced from Maize Cobs and Sawdust. *Journal of Sustainable Bioenergy Systems*, 4, 50–60.
- Musabbikhah, Saptoadi, H., Subarmono, & Wibisono, M. A. (2019). Analysis and Selection of the Best Model of Biomass Briquette Based on Calorific Value. *Journal of Physics: Conference Series*, 1175. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1175/1/012270>
- Nikiema, J., Asamoah, B., Egblewogbe, M. N. Y. H., Akomea-agyin, J., Cofie, O. O., Felix, A., Gebreyesus, G., Zipporah, K., & Njenga, M. (2022). Resources, Conservation & Recycling Advances Impact of material composition and food waste decomposition on characteristics of fuel briquettes. *Resources, Conservation & Recycling Advances*, 15, 200095. <https://doi.org/10.1016/j.rcradv.2022.200095>
- Obi, O. F., Pecenka, R., & Clifford, M. J. (2022). A Review of Biomass Briquette Binders and Quality Parameters. *Energies*, 15(2426). <https://doi.org/10.3390/en15072426>
- Onyango, J., Babu, K., Njuguna, S., Wanzala, W., & Yan, X. (2020). Harnessing the potential of common water hyacinth as an industrial raw material for the production of quality biofuel briquettes. *SN Applied Sciences*, 2(1316). <https://doi.org/10.1007/s42452-020-3109-1>
- Richards, S. R. (1990). Physical Testing of Fuel Briquettes. *Fuel Processing Technology*, 25, 89–100.
- Sarkar, D. K. (2015). Fuels and Combustion. In *Thermal Power Plant* (pp. 91–137). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-801575-9.00003-2>

- Sawadogo, M., Tchini Tanoh, S., Sidibé, S., Kpai, N., & Tankoano, I. (2018). Cleaner production in Burkina Faso: Case study of fuel briquettes made from cashew industry waste. *Journal of Cleaner Production*, 195, 1047–1056. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.05.261>
- Suryaningsih, S., Nurhilar, O., Yuliah, Y., & Salsabila, E. (2018). Fabrication and characterization of rice husk charcoal bio briquettes. *AIP Conference Proceedings*, 1927(030044). <https://doi.org/10.1063/1.5021237>
- TT, A. K., Mech, N., Ramesh, S. T., & Gandhimathi, R. (2022). Evaluation of composite briquettes from dry leaves in energy applications for agrarian communities in India. *Journal of Cleaner Production*, 350, 131312. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.131312>
- Yank, A., Ngadi, M., & Kok, R. (2016). Physical properties of rice husk and bran briquettes under low pressure densification for rural applications. *Biomass and Bioenergy*, 84, 22–30. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2015.09.015>
- Yunusa, S. U., Mensah, E., Preko, K., Narra, S., Saleh, A., & Sanfo, S. (2023a). A comprehensive review on the technical aspects of biomass briquetting. *Biomass Conversion and Biorefinery*. <https://doi.org/10.1007/s13399-023-04387-3>
- Yunusa, S. U., Mensah, E., Preko, K., Narra, S., Saleh, A., & Sanfo, S. (2023b). Evaluation of selected physical and thermochemical properties of rice husk of one- and two-stage milling for briquette production. *Proceedings of the Nigerian Institution of Agricultural Engineers*, 43, 430–442.

Kontakt

Suleiman Usman Yunusa

WASCAL Graduate Research Programme on Climate Change and Land Use,
Department of Civil Engineering, KNUST-Kumasi, Ghana

Department of Agricultural
and Bio-resources Engineering, Ahmadu Bello University Zaria, Nigeria

✉ yunusa.s@edu.wascal.org

Prof. Dr. Satyanarayana Narra, Wissenschaftlicher Mitarbeiter

Professur Abfall- und Stoffstromwirtschaft
Universität Rostock

✉ satyanarayana.narra@uni-rostock.de

Thomas Schliermann, René Bindig, Bettina Stolze, Lukas Lange,
Felix Öffner, Giuliano Ercolano

Entwicklung eines preisgünstigen und ressourceneffizienten Systems zur Abgasnachbehandlung für Holzgas-BHKW

Zusammenfassung: *Minderwertige Hölzer wie verschiedene Resthölzer weisen ein großes Potenzial für die gekoppelte Wärme- und Stromerzeugung auf. Andererseits sind strengere Emissionsgrenzwerte in der Diskussion oder bereits in Kraft, z.B. in der Schweiz, die den Markteintritt von KWK-Anlagen im kleinen und mittleren Leistungsbereich erheblich erschweren. Ziel des Projektes ist daher die Entwicklung eines kostengünstigen, ressourcenschonenden Systems zur Abgasnachbehandlung für solche Holzgas-BHKW-Anlagen. Um stabile, niedrige Emissionen für NO_x , CO und HC zu erreichen und so die Wettbewerbsfähigkeit und Wirtschaftlichkeit von Holzgas-BHKWs auch in Zukunft sicherzustellen, wird eine Kombination aus einem Drei-Wege-Katalysator und einem Oxidationskatalysator entwickelt.*

Mit einer an die geplante Technologie anzupassenden mobilen Katalysator-test-anlage (MoKatTA) werden in der ersten Projektphase des Projekts TWOx klein-technische Laborkatalysatoren im realen Abgas eines Holzgas-BHKW untersucht mit dem Ziel, geeignete Katalysatorkombinationen und einen optimierten Betrieb zu ermitteln. Darüber hinaus werden mit der MoKatTA auch Alterungserscheinungen im Realabgas erfasst. Darauf aufbauend wird das Full-Size-Katalysatorsystem entwickelt und auf einem LiPRO HKW 50 installiert. Zusätzlich zur Systementwicklung des Full-Size-Systems am Holzgas-BHKW sowie Dauertests zur Ermittlung der Lebensdauer werden zur Markteinführung Wirtschaftlichkeitsstudien und ein Workshop durchgeführt für eine Gesamtbewertung. Im Beitrag wird ein Überblick über das TWOx-Projekt gegeben.

Abstract: *Low quality wood such as various residual wood exhibits a large potential in terms of coupled heat and power generation. On the other hand, stricter emission limits are under discussion or already in place e.g. in Switzerland which make it considerably more difficult for small to medium-sized CHP plants to enter the market. Therefore, the aim of the project is the development of an inexpensive, resource-efficient system for exhaust gas aftertreatment for such wood gas CHPs. A combination of a three way catalytic converter and an oxidation catalyst is being developed in order to achieve stable, low emissions for NO_x , CO and HC and thus ensure the competitiveness and economic viability of wood gas CHPs also in future.*

Using a mobile catalyst test apparatus (MoKatTA) to be adapted for the planned technology, in the first phase of the project TWOx small-scale laboratory catalysts are examined in the real exhaust gas of a wood gas CHP with the aim of determining suitable catalyst combinations and optimized operation. Furthermore, ageing phenomena are also detected in real exhaust gas environment using the MoKatTA. Based

on this, the full-size catalytic converter system is developed and installed on a LiPRO HKW 50. In addition to the system development of the full-size system on the wood gas CHP and endurance tests to determine service life, economic feasibility studies and workshops for the market launch are carried out for an overall assessment. The article provides an overview of the project TWOx.

1 Hintergrund und Zielstellung

Schon heute werden Emissionsgrenzwerte (bezogen auf 5 % O₂, i.N.) für NO_x von 100 mg/m³ und für CO von 300 mg/m³ in der Schweizer LRV ab einer Feuerungsleistung von 1 MW gefordert. Diese Grenzwerte sind demnach bereits für Anlagenstandorte mit mehr als fünf LiPRO HKW 50 anzuwenden. Nach aktuellen Erkenntnissen sind NO_x-Grenzwerte in dieser Größenordnung nur durch den Einsatz von SCR-Systemen einzuhalten, welche jedoch durch ihre hohen Investitions- und Betriebskosten einen wirtschaftlichen Anlagenbetrieb erheblich erschweren. Die Verfügbarkeit einer robusten und kostengünstigen Abgasnachbehandlungstechnologie führt hier zu einer signifikanten Verbesserung der Anlagenwirtschaftlichkeit und eröffnet so einen bisher nicht erschlossenen Markt.

In Deutschland sind die Grenzwerte für NO_x aktuell weniger scharf. Hier gelten nach TA-Luft (bezogen auf 11 % O₂, i.N.) für NO_x 250 mg/m³ und für CO 150 mg/m³. Das entspricht ca. 400 mg/m³ NO_x und 240 mg/m³ CO (bei 5 % O₂, i.N.). In der 44. BImSchV werden für Biogasanlagen ab 1 MW Feuerungsleistung seit 2023 ebenfalls NO_x-Grenzwerte von 100 mg/m³ (bei 5 % O₂, i.N.) gefordert. Hier bildet Holzgas aktuell noch eine Ausnahme, weshalb die weniger scharfen Grenzwerte der TA-Luft anzuwenden sind. Mit voranschreitender Entwicklung wird auch für Deutschland eine weitere Verschärfung der Emissionsgrenzwerte auch für Holzgas-KWK Anlagen erwartet. Daraus folgt, dass die Bedeutung der im TWOx-Projekt angestrebten Entwicklung auch in Deutschland mittel- und langfristig für den wirtschaftlichen Betrieb von Holzgas KWK-Anlagen relevant sein wird. Längerfristig ermöglicht das Vorhandensein eines stabilen und robusten Emissionsminderungssystems, auch potenziell problematische holzbasierte Rest- und Abfallstoffströme zur gekoppelten Strom- und Wärmeerzeugung unter ökonomischen und zugleich ökologisch vertretbaren Bedingungen zu nutzen. Stark brennstoffabhängige Rohemissionsniveaus bei Einsatz verschiedener Reststoffe in verschiedenen Qualitäten stellen hier eine starke Anforderung an die BHKW-Betriebsweise und die Abgasnachbehandlung dar.

Das Gesamtziel des geplanten Vorhabens „TWOx“ ist daher die Entwicklung eines preisgünstigen, ressourceneffizienten Systems zur Abgasnachbehandlung für Holzgas-BHKWs, um so die Wirtschaftlichkeit von Holzgas-KWK-Anwendungen auch in Zukunft unter verschärften Emissionsgrenzwerten sicherzustellen.

Das Gesamtziel kann folgendermaßen zusammenfasst werden:

1. Entwicklung einer preisgünstigen und robusten Abgasnachbehandlungstechnologie für Holzgas auf LiPRO HKW
2. Ressourceneffizienz (Kein AdBlue-Verbrauch; Edelmetalleinsparung)
3. Zielemissionen (bei 5 % O₂, i.N.): NO_x: < 100 mg/m³ und CO: < 240 mg/m³.

2 Verfahrensprinzip und Schwerpunkte

Um die preiswerte und vergleichsweise einfache Verwendung eines 3-Wege-Katalysators mit den Vorteilen eines SCR-Systems hinsichtlich hoher Flexibilität des BHKW-Betriebspunktes zu kombinieren, wurde im Forschungsvorhaben GasAsh (Schliermann et al., 2022) ein kombiniertes System aus 3-Wege-Katalysator und nachgeschaltetem Oxidationskatalysator entwickelt (vgl. Abb. 1). Hierbei wird ein 3-Wege-Katalysator in einem leicht fetten BHKW-Betriebspunkt eingesetzt, um die NO_x-Emissionen effektiv zu mindern. Diesem leicht unterstöchiometrisch verbrannten Abgas wird Luft beigemischt, um in einem nachgeschalteten Oxidationskatalysator CO sowie längere Kohlenwasserstoffe zu oxidieren.

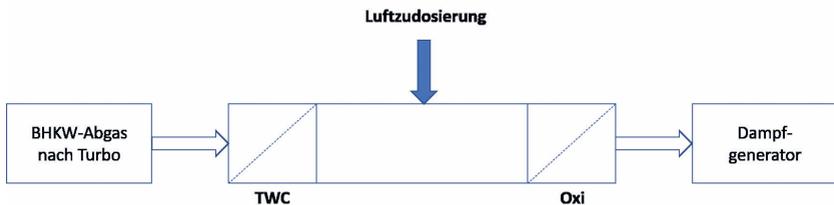


Abb. 1: Schematische Darstellung des zweistufigen TWC-Verfahrens am BHKW-Abgas. Dreiwegekatalysator (TWC), Oxidationskatalysator (Oxi) und Luftzudosierung.

Abhängig vom genauen Betriebspunkt entsteht über dem 3-Wege-Katalysator Ammoniak, was die sehr genaue Abstimmung der beiden Katalysatoren hinsichtlich Beschichtungen und Betriebsparameter erfordert. Die anfängliche Entwicklung im Vorgängerprojekt GasAsh soll im TWC-Projekt nun umfassend bis zu einem Prototypen im Einsatz (TRL 7) weiterentwickelt werden.

Die Schwerpunkte des Projektes liegen auf folgenden Fragestellungen:

- Beschichtungsentwicklung
- Ressourceneffizienz
- Charakterisierung und Verhinderung von Katalysatoralterung
- Mobile Katalysatorortanlage für Untersuchungen von kleinskaligen Katalysatoren mit Realabgas des BHKW
- Robustheit des Katalysatorsystems bezüglich Schwankungen im Betrieb
- Weiterentwicklung der BHKW-Regelung bezüglich einer präziseren Einstellung des Lambda-Wertes

- Langzeittestbetrieb des Full-Size-Systems
- Wirtschaftlichkeit
- Einschätzung der Marktfähigkeit
- Effektive Markteinführung – u.a. per Workshop

3 Projektsteckbrief

Das auf zwei Jahre (Januar 2024 bis Dezember 2025) angelegte TWOx-Projekt gliedert sich in drei Teilprojekte – entsprechend den drei beteiligten Projektpartnern:

- 1) Teilvorhaben 1 (Emission Partner):**
Entwicklung von Katalysatoren zur Emissionsminderung bei Holzgas-BHKWs
- 2) Teilvorhaben 2 (DBFZ):**
Erweiterung einer mobilen Katalysator-testanlage zur Katalysatorvermessung und In situ-Alterung sowie Laborversuche zur Katalysatorcharakterisierung
- 3) Teilvorhaben 3 (LiPRO Energy):**
Entwicklung, Systemintegration und Evaluierung einer effizienten und preisgünstigen Abgasnachbehandlungstechnologie für verschärfte Abgas-Emissionsgrenzwerte

4 Vorgehen und Status

Das prinzipielle Vorgehen orientiert sich an den folgenden hauptsächlichen Arbeitspaketen (wobei die Wirtschaftlichkeit durchgehend geprüft wird):

- 1) Katalysatorentwicklung beginnend an kleinskaligen Katalysatoren
- 2) Effektive Katalysatorauswahl mit mobiler Katalysator-testanlage (MoKatTA; vgl. Abb. 2) an kleinskaligen Katalysatoren und Katalysatorkombinationen im Realabgas am Holzgas-BHKW (inklusive Labormessungen bei DBFZ und Emission Partner; 30-Tage-Alterung)
- 3) Anfertigung und Optimierung der Leistung der Full-Scale-Katalysatoren am Holzgas-BHKW (vgl. Abb. 3)
- 4) Einschätzung des Langzeitbetriebs des Full-Scale-Systems
- 5) Wirtschaftlichkeitsbetrachtung und Maßnahmen zur Markteinführung (z.B. Workshop)

Die erste Phase der Entwicklung der Katalysatoren ist von Emission Partner abgeschlossen und die entsprechenden Katalysatoren wurden dem DBFZ zur Charakterisierung und Betrieb in der MoKatTA übergeben. Die MoKatTA wird aktuell erweitert für das zu entwickelnde zweistufige Katalysatorverfahren, um nach entsprechenden Kalibrierungen in den nächsten Monaten für längere Feldmessungen zur Ermittlung der geeignetsten Katalysatorkombination und ersten Alterungsuntersuchungen direkt im BHKW-Abgas des Projektpartners LiPRO Energy zu Verfügung zu stehen. Die Standortauswahl bei LiPRO für das zu betrachtende Holzgas-BHKW steht kurz vor dem Abschluss.



Abb. 2: Örtlich mobile Katalysortestanlage (MoKatTA) zum Einsatz am Realabgas.
A: MoKatTA installiert am BHKW-Abgaskanal am DBFZ (© T. Schliermann 2024).
B: Bisherige einstufige MoKatTA-Konfiguration zum Projektstart bestehend aus Abgassonde, Rohröfen und Katalysatorhalterung für kleinskalige monolithische Katalysatoren (© René Bindig, 2019).



Abb. 3: Holzgas-BHKW des Projektpartners LiPRO Energy (© LiPRO Energy, 2024).

Danksagung

Das Projekt TWOx wird gefördert
vom BMWK/PtJ (03EI5470A-C).



Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Literatur/Quellen

Schliermann, T.; Hartmann, I.; Herrmann, A.; Wiest, W.; Ho, J.; Zimmermann, G.; Lange, L; Öffner, F. (2022): Thermo-chemische Konversion von Reststoffen in einem Vergaser-BHKW mit gekoppelter Aschegewinnung, FKZ: 03KB139A-C (BMWK/PtJ). Unveröffentlichter Projektbericht.

Kontakt

Dipl.-Phys. Thomas Schliermann

DBFZ Deutsches Biomasseforschungszentrum gemeinnützige GmbH

☎ +49 (0)341.2434-463 | ✉ thomas.schliermann@dbfz.de

🌐 www.dbfz.de

Physics for Food: Physikalische Hochtechnologien für die Land- und Ernährungswirtschaft

Zusammenfassung: Das Projekt „Physics for Food“ zielt darauf ab, innovative physikalische Hochtechnologien in der Land- und Ernährungswirtschaft zu entwickeln, um die Produktivität, Nachhaltigkeit und Lebensmittelqualität in diesem Sektor zu verbessern. Durch die Anwendung fortschrittlicher physikalischer Verfahren sollen neue Lösungen entwickelt werden, um Herausforderungen wie die Steigerung der Lebensmittelsicherheit, die Reduzierung von (Nach-)Ernteverlusten und somit auch Lebensmittelverlusten sowie die Optimierung von Produktionsprozessen anzugehen. In Zusammenarbeit mit relevanten Unternehmen und Forschungseinrichtungen aus den Bereichen der Landwirtschaft, Lebensmitteltechnologie und Physik werden interdisziplinäre Lösungsansätze entwickelt, die auf einem fundierten Verständnis physikalischer Prinzipien basieren und sich an der realen Praxis orientieren. Ein zentrales Ziel des Projekts ist der Einsatz von kaltatmosphärischem Plasma als Schlüssel zur Reformierung der Land- und Ernährungswirtschaft. Durch gezielte Anwendungen des Verfahrens in Silos und auf Förderbändern soll die Dekontamination von Getreide effektiv durchgeführt werden, indem Schädlinge wie Kornkäfer und Schimmelpilze bekämpft werden. Besonders wichtig ist, dass diese physikalische Methode die bisherigen chemischen Bekämpfungsmaßnahmen ersetzen soll, um den zunehmenden Einschränkungen bei der Verwendung von chemischen Pestiziden, wie hochgiftigem Phosphan-Gas, entgegenzuwirken. Der Einsatz von kaltatmosphärischem Plasma bietet eine facettenreiche, umweltfreundliche und nachhaltige Alternative, die nicht nur den Anforderungen an die Lebensmittelsicherheit und Qualität erfüllt, sondern auch die Belastungen für Umwelt und Gesundheit reduzieren kann.

Abstract: The "Physics for Food" project aims to develop innovative high-tech physics in the agriculture and food sectors to improve productivity, sustainability and food quality in this sector. By applying state-of-the-art physical procedures, new solutions will be developed to address challenges such as increasing food safety, reducing food waste, and optimizing production processes. In collaboration with leading companies and research institutions in the fields of food technology, physics, and agriculture, interdisciplinary solution approaches will be developed, based on a sound understanding of physical principles and oriented towards practical applications. A central objective of the project is to promote the use of cold atmospheric plasma as a key to reforming agriculture and the food industry. Through targeted applications in silos and on conveyor belts, the decontamination of grain will be effectively carried out, with pests such as grain weevils and mold being combated. Of particular importance is that this physical method aims to replace previous chemical methods, in response to increasing restrictions on the use of chemicals such as glyphosate. The use of cold atmospheric plasma provides an environmentally friendly and sustainable alternative that not only meets the requirements for food safety and quality but also reduces the burden on the environment and health.

Einleitung

Das Projekt „Physics for Food“ hat das Ziel, landwirtschaftliche Praktiken mittels innovativer kaltatmosphärischer Plasma (CAP)-Technologie zu revolutionieren. Diese Technologie bietet eine nachhaltige Lösung zur Steigerung unserer Lebensmittelsicherheit und -qualität und berücksichtigt gleichzeitig die sich wandelnden Bedürfnisse in der Gesellschaft, der Agrar-Umweltpolitik und Landwirtschaft sowie die Herausforderungen begrenzter Ressourcen und des Klimawandels.

In den letzten Jahren sah sich die Agrarwirtschaft wachsendem Druck ausgesetzt, strengere Richtlinien für die Lebensmittelsicherheit durchzusetzen, Auswirkungen auf die Umwelt weiter zu reduzieren und die Produktivität von begrenzten Ressourcen zu steigern. Als Antwort auf diese Herausforderungen wurde das Projekt „Physics for Food“ entwickelt, um unter anderem die Anwendung der CAP-Technologie in der Landwirtschaft zu erforschen. Die Implementierung der CAP-Technologie bietet einen vielversprechenden Ansatz, um Verluste von der Ernte bis zur Lebensmittelverarbeitung zu reduzieren und die Umweltbelastungen zu minimieren, da die Anwendung nur mit el. Strom und Umgebungsluft betrieben wird. Durch die effiziente Dekontamination von Oberflächen und die Eliminierung von Pathogenen, bietet die CAP-Technologie außerdem eine vielversprechende Lösung zur Verbesserung der Lebensmittelsicherheit entlang der Produktions- und Verarbeitungskette vom Saatgut bis zum Konsum.

Ziele

Das Hauptziel des Projekts „Physics for Food“ sind die Entwicklung und Evaluierung eines physikalischen Verfahrens in der Lebensmittelerzeugung und -verarbeitung sowie die ökonomische Bewertung der CAP-Technologie einzuschätzen. Konkret beinhaltet das die Bewertung der Auswirkung der CAP-Behandlung auf lebensmittelspezifische Pathogene und Stoffwechselprodukte, die Bewertung der Qualitätsänderung von Erntegütern sowie vereint aus Wirtschaft und Wissenschaft eine Identifizierung praktischer Anwendungsszenarien für die CAP-Technologie in der landwirtschaftlichen Produktion.

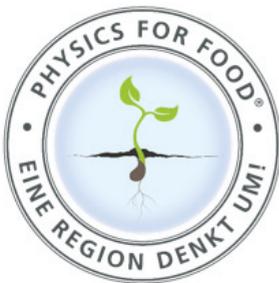


Abb. 1: Physics for Food-Logo

Methoden

Das Projekt verfolgt einen interdisziplinären Ansatz mit der Beteiligung von Forschern, Landwirten und Industriepartnern. Plasma, der vierte Aggregatzustand der Materie, bietet aufgrund seiner einzigartigen und vielseitigen Eigenschaften eine Vielfalt von potentiellen Anwendungen in der Landwirtschaft. Im

Rahmen des Projektes wurden verschiedene Demonstratoren mit teils direkten bzw. indirekten Plasmatechnologien konstruiert und verschiedenste Laborexperimente durchgeführt, um beispielsweise die antimikrobielle (insb. antifungale) Wirksamkeit der CAP-Behandlung auf verschiedene Arten landwirtschaftlicher Güter und Prozesse durchzuführen. Die Behandlung von Saaten (Gerste, Raps, Lupine) mit CAP und die Applikation von Plasma behandeltem Wasser sowie UVC zeigten in mehreren Feldversuchen an drei Standorten in drei Jahren erste Erfolge. Darüber hinaus werden ökonomische Analysen durchgeführt, um die Wirtschaftlichkeit der Einführung der CAP-Technologie im kommerziellen Maßstab zu beurteilen.

Das Forschungsprojekt zielt außerdem auf die Integration von CAP-Behandlungen auf Förderbändern zur Dekontamination von Schüttgütern ab. Bei der Verladung von Getreide soll diese innovative und physikalische Behandlungsmethode den Einsatz von chemisch-synthetischen Pestiziden in Zukunft ersetzen und BIO- LandwirtInnen eine weitere Möglichkeit bieten, ihre Ernte und dessen Qualität zu erhalten. Der gezielte Einsatz von Plasma in Silos ermöglicht zudem, die Lagerstabilität für Agrarprodukte zu verbessern. Beispielsweise produzieren Schadinsekten und Mikroorganismen Feuchtigkeit und Wärme und können hohe Wert- und Lagerverluste erzeugen, die in Deutschland volkswirtschaftlich auf 250 Mio. Euro geschätzt werden. Durch die Anwendung von Plasma können neben schädlichen Mikroorganismen, wie Bakterien und Schimmel, auch Insekten, wie der Kornkäfer, effektiv eliminiert werden. Dies führt zu einer längeren Haltbarkeit der Schüttgüter, reduziert den Bedarf an chemischen Pflanzenschutzmitteln und somit auch die Kosten für Material, Schädlingsbekämpfer und den Einsatz. Für Spekulationen am Markt muss das Getreide über einen längeren Zeitraum lagerfähig bleiben, um höhere Erlöse erzielen zu können.



Abb. 2: Förderband – entwickelt zur Plasma-anwendung verschiedener Getreidearten



Abb. 3: Förderband – Plasma-anwendung am Korn

Das Plasmaförderband nutzt CAP, um Schädlinge in gefördertem Schüttgut wie Getreide zu immobilisieren. Es bietet ein variables Konzept zur optimalen Wirkung gegen verschiedene Schadinsekten sowie eine präzise Dosiervorrichtung. Das direkte Plasma trifft die Körner mit dessen Besatz im Gutsstrom

(Abb. 3) und erzielt somit eine Variationsbreite an positiven Eigenschaften, da die Schadinsekten, Mikroorganismen und auch Schimmelpilzgifte physikalisch bekämpft werden. Dies macht die Technologie nicht nur effektiv, sondern auch umweltfreundlich und nachhaltig.

Die landwirtschaftliche Praxis ist mit volatilen Marktpreisen konfrontiert, die auf verschiedene Faktoren wie Umwelteinflüsse und Schädlinge zurückzuführen sind. Qualitätseinbußen führen zu Abzügen im Erlös. Die Entwicklung von Silos mit CAP-Behandlung (Abb. 4) zielt darauf ab, diesen Verlusten entgegenzuwirken und die Effizienz der Lagerung erheblich zu verbessern.

Das Wirkprinzip des Silos basiert darauf, dass das Plasmagas pathogene Keime durch „Reaktive Sauerstoff und Stickstoff Spezies“ (RONS), die aus Luft entstehen, inaktiviert. Dabei wird keine Chemie benötigt. Die angesaugte Luft fließt durch den Generator. Die Plasmaluft mit den RONS bekämpft die Schadinsekten, Mikroorganismen und Schimmelpilzgifte im resp. zwischen dem Getreide



Abb. 4: Silo-Demonstrator

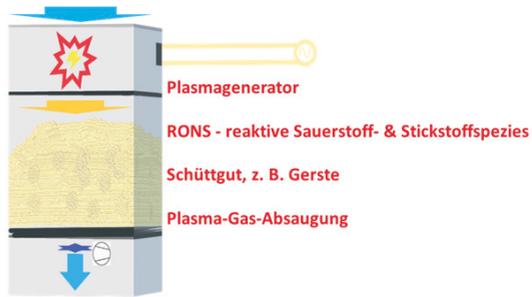


Abb. 5: Wirkprinzip des Silo-Demonstrators

Ergebnisse

Die Ergebnisse aus Labor und Demonstrator-Versuchen belegen die Effektivität der CAP-Behandlung in der Reduzierung von mikrobieller Belastung auf den behandelten Schüttgütern und weiterer Saaten. Die CAP-Technologie hat sich als wirksam erwiesen, indem sie die Kontaminationen reduziert und die Qualität der Saaten verbessert. Den gesammelten Erkenntnissen nach kann die Keimgeschwindigkeit und die potentielle Keimfähigkeit gesteigert werden.

Die vielfältigen sowie innovativen Anwendungen der CAP-Technologie zielen darauf ab, die Saatgutqualität zu verbessern, Kulturpflanzen widerstandsfähig-

ger zu machen, Schadinsekten und Schimmelpilzen in unseren Erntegütern physikalisch zu bekämpfen sowie industrielles Brauchwasser wieder aufzubereiten. Beispielsweise werden durch die Anwendung von Plasma Behandeltem Wasser (PBW) auf Kultur- und Ackerpflanzen natürliche Abwehrmechanismen gestärkt, was ihnen ermöglicht, besser mit biotischen und abiotischen Stressfaktoren wie Krankheiten oder Trockenheit umzugehen. Darüber hinaus fördert die PBW-Applikation das Wurzelwachstum, wodurch die Pflanzen tiefere Wasserreservoirs erschließen können und auch die allgemeine Keimung beschleunigt vorliegt.

Im Silo Demonstrator haben die Forscher die Bekämpfung von Schadinsekten (Kornkäfer, Reismehlkäfer) in allen Stadien (Ei, Larve, Puppe, Adulte) nachgewiesen. Auch die mikrobielle Belastung (insbesondere die Schimmelpilze) auf dem Korn sowie Schimmelpilzgifte (wie Zearalenon, Ochratoxin A) wurden signifikant reduziert. Ebenso erfolgreich sind die direkten Behandlungsversuche mit dem Förderband.

Bündniszusammensetzung

Die Bündniszusammensetzung für das Projekt „Physics for Food“ spiegelt die gesamte Wertschöpfungskette der landwirtschaftlichen Erzeugung bis zur Verarbeitung und die vielfältigen Anforderungen dieses ambitionierten Vorhabens wider. In enger Zusammenarbeit mit führenden Unternehmen und Forschungseinrichtungen aus den Bereichen der Lebensmitteltechnologie, Forschung, Wirtschaft sowie Landwirtschaft wurde ein starkes Netzwerk geschaffen, um die Ziele des Projekts bestmöglich zu erreichen.

Das Bündnis setzt sich aus Experten verschiedener Fachgebiete zusammen, darunter Lebensmitteltechnologe, Physiker, Agrarwissenschaftler und Ingenieure. Diese Experten bringen ein breites Spektrum an Fachwissen und Erfahrungen mit, um die komplexen Herausforderungen des Projekts anzugehen. Die Partnerschaft mit Unternehmen ermöglicht zudem den Zugang zu modernsten Technologien und Ressourcen, während die Zusammenarbeit mit Forschungseinrichtungen die wissenschaftliche Expertise stärkt. Darüber hinaus sind auch Landwirte und andere wichtige Akteure der Lebensmittelbranche Teil des Bündnisses, um sicherzustellen, dass die entwickelten Lösungen praxisorientiert und marktfähig sind.

Durch diese facettenreiche Bündniszusammensetzung ist das Projekt „Physics for Food“ optimal aufgestellt, um innovative Ansätze zur Verbesserung der Lebensmittelsicherheit und -Qualität entlang der Wertschöpfungskette voranzutreiben und einen nachhaltigen Beitrag zur Entwicklung der Land- und Ernährungswirtschaft zu leisten.

Initiatoren



HOCHSCHULE
NEUBRANDENBURG
University of Applied Sciences



Partner und Unterstützer



Abb. 6: Projektpartner – Physics for Food

Erfolgspotential

In den vergangenen Jahren haben sich die Bedürfnisse und Herausforderungen für Landwirte erheblich gewandelt. Eine Vielzahl von Faktoren hat dazu beigetragen, darunter veränderte Umweltbedingungen, strengere regulatorische Vorgaben und ein zunehmender Druck, die Produktivität auf immer weniger verfügbarer Ackerfläche zu steigern, um die wachsende Weltbevölkerung zu ernähren. Eine der Hauptveränderungen besteht darin, dass Landwirte mit einer zunehmenden Anzahl von Vorschriften und Standards konfrontiert sind, die sie einhalten müssen. Diese reichen von Umweltschutzmaßnahmen bis hin zu Lebensmittelsicherheitsstandards. Das Projekt „Physics for Food“ ist eine wegweisende Initiative, die darauf abzielt, Lebensmittelverluste in der Landwirtschaft durch den präzisen Einsatz von Plasma signifikant zu reduzieren. Indem Plasma dazu verwendet wird, Ressourcen wie Wasser wiederaufzubereiten und gelagerte Lebens- und Futtermittel effizienter zu schützen, verspricht das Projekt nicht nur ökologische, sondern auch ökonomische Vorteile für die Landwirtschaft, die Lebensmittelindustrie und die Gesellschaft insgesamt. Das Kaltplasma, das lediglich mit elektrischem Strom und Umgebungsluft erzeugt wird, könnte künftig die Hygienemaßnahmen in der Landwirtschaft und im Vorratsschutz ergänzen und den Einsatz von chemisch-synthetischen Pestiziden zumindest teilweise ersetzen.

Besonderes Augenmerk des Projektes wird dabei auch auf den Wissenstransfer gelegt, um sicherzustellen, dass die erzielten Fortschritte und Erkenntnisse weitreichend und nachhaltig genutzt werden können. Durch die Anwendung innovativer Technologien trägt das Projekt maßgeblich dazu bei, die Effizienz, Sicherheit und Nachhaltigkeit in der Landwirtschaft zu steigern. Durch die Gründung von Spin-offs soll die Technologie in die Wirtschaft transferiert und dort etabliert werden.

Literatur/Quellen

- Adler, C. Julius Kühn Institut für ökologische Chemie, Pflanzenanalytik und Vorratsschutz
- Feizollahi (2023) – Mycotoxin degradation in food and feed grains by atmospheric cold plasma technology. Department of Agricultural, Food and Nutritional Science, Kanada
- Humpisch et. al. (2014) – Getreide und Ölsaaten lagern DLG – Futter- und Substratkonservierung (2012); 8. Auflage
- Kaur et. al. (2020) – Cold plasma: exploring a new option for management of postharvest fungal pathogens, mycotoxins and insect pests in Australian stored cereal grain. Crop & Pasture Science, Australia
- Keiser et. al. (2013) – Getreidetrocknung – Handbuch: Trocknen, Fördern, Lagern
- KTBL (2007) – Konservierung und Lagerung von Druschfrüchten
- Rao et. al. (2022) – The Application of Cold Plasma Technology in Low Moisture Foods. Food Engineering Reviews, China
- Unveröffentlichte Daten – Projekt Physics for Food
- Veerana et. al. (2021) – Application of Non-Thermal Plasma to Fungal Resources. Journal of Fungi, Korea
- WIR!-Bündnis: Physics for Food – Eine Region denkt um! Mit innovativer physikalischer Hochtechnologie den Strukturwandel im ländlichen Raum gestalten – Neubrandenburg: Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) (2024), Verfügbar unter: https://www.innovation-strukturwandel.de/strukturwandel/shareddocs/entries/de/InnovationUndStrukturwandel/WIR/wir-1-foerderrunde-umsetzungsphase/physics-for-food_825.html

Kontakt

Prof. Dr. rer. nat. habil. Leif-Alexander Garbe

Hochschule Neubrandenburg
Fachbereich Agrarwirtschaft und Lebensmittelwissenschaften
Brodaer Str. 2, 17003 Neubrandenburg

☎ +49 (0)395.5693-1004 | ✉ garbe@hs-nb.de | 🌐 www.hs-nb.de

Klimaschutzorientierte und ressourcenschonende Prozessgestaltung der Kompostierung

Im Verbundvorhaben „Klimaschutzorientierte Bioabfallverwertung in der Landwirtschaft“ (KlimaBioHum) wurden Bioabfallanlagen emissionsseitig untersucht, um zu bewerten, wie der Prozess der Anlagen – insbesondere der Rotteprozess – emissionsmindernd gestaltet werden kann. Das Verbundvorhaben KlimaBioHum wurde mit wissenschaftlichen Partnern und Praxispartnern unter Leitung vom Förderverband Humus e.V. (FVH) mit dem DBFZ Deutsches Biomasseforschungszentrum gemeinnützige GmbH und TERRA URBANA GmbH als Projektpartnern durchgeführt. Für die Analyse und Auswertung der Porengaszusammensetzung der Rotteprozesse einschließlich der Mietenbeschreibung und Laboranalysen wurde die Hochschule Magdeburg-Stendal als Unterauftragnehmer des DBFZ eingebunden.

Das Vorhaben umfasste insgesamt 4 Messkampagnen für die Emissionsmessungen an den Anlagen im Zeitraum 2019 – 2022. Die Messphase 1 beinhaltete Emissionsmessungen zur Erfassung von Methan, Lachgas und Ammoniak an 12 ausgewählten Bioabfallanlagen. Bei ausgewählten Anlagen wurden in Messphase 2 bis 4 Variationen der Miete im Betriebsverlauf durchgeführt, um den Einfluss verschiedener Parameter (u.a. Mietengeometrie, Belüftung, Umsetzung) auf das Emissionsverhalten zu untersuchen. Die untersuchten Anlagen umfassen Kompostierungsanlagen und Vergärungsanlagen mit nachgeschalteter Kompostierung.

Zielstellung war, vor allem die Entstehung von Methan (CH_4), Lachgas (N_2O) und Ammoniak (NH_3), als indirekt klimawirksames Gas (Daniel-Gromke et al. 2015), während der Kompostierung und die Interaktion diverser Betriebsparameter genauer zu untersuchen, um Strategien zur Vermeidung der klimawirksamen Gase bei der Behandlung von Bioabfällen ableiten zu können. Emissionen aus dem Behandlungsprozess sind nicht nur schädlich für das Klima, sondern stellen gleichzeitig Verluste für das Endprodukt „Kompost“ dar (Luo et al. 2014). Stickstoffhaltige Emissionen wie Lachgas (N_2O) und Ammoniak (NH_3) sind Nährstoffverluste, die dem Kompostprodukt zum Pflanzenaufbau fehlen (Shan et al. 2021).

Zur Quantifizierung der Emissionsmassenströme (CH_4 , N_2O und NH_3) aus der offenen Kompostierung wurden sogenannte Einzelquellmethoden (i. d. R. offene Hauben bzw. Windtunnel und seltener auch geschlossene Hauben, z.B. in Liebetrau et al. 2013; Phong 2012; Andersen et al. 2010 eingesetzt. Im Rahmen des Vorhabens wurde ein offenes (zwangsbelüftetes) System, ein sogenannter Windtunnel, verwendet. Das grundlegende Messprinzip mobiler Hauben oder Windtunnel beruht auf dem Aufsetzen der Haube auf ein Teilstück der emissionsaktiven Oberfläche. Die Haube schließt somit eine definierte, emissi-

onsaktive Fläche bzw. Volumen ein (siehe Abb. 1). Durch die Bestimmung eines oberflächen- bzw. volumenspezifischen Emissionsfaktors lässt sich die Emissionsrate der gesamten Miete extrapolieren. In Abhängigkeit des eingeschlossenen Volumens bzw. der eingeschlossenen Fläche müssen mehrere Einzelmessungen auf verschiedenen Teilstücken der Oberfläche durchgeführt werden um die Messunsicherheit bei der Extrapolation der Emissionsrate auf ein Minimum zu reduzieren. Um die Anzahl von Einzelmessungen bei einer Messung je Miete zu halten, wurde daher ein Windtunnel mit sehr großer Grundfläche auf die Mieten aufgesetzt. Die Bestimmung des Gesamt-C bzw. Methans erfolgte entsprechend der VDI 3481 Blatt 4 und wurde durch eine kontinuierliche Probenahme über einen Flammenionisationsdetektor (FID) bestimmt. Des Weiteren wurden diskontinuierlich Proben gezogen und in evakuierte Vials überführt. Die Proben in den Vials wurden im Labor mit Hilfe eines Gaschromatographen mit Autosampler und (FID) für Methan (DIN EN ISO 25139:2011-08) und Elektroneneinfangdetektor (ECD) für Lachgas (VDI 2469 Blatt 1) analysiert. Ammoniak wurde über zwei in Reihe geschaltete Gaswaschflaschen mit 0,05 molarer H_2SO_4 -Lösung in dem Windtunnel beprobt und im Labor photometrisch (VDI 3496 Blatt 1) bestimmt.



Abb. 1 a) Versuchsaufbau und Nutzung des FID an einer Vergärungs-/Kompostierungsanlagen mit Dreiecksmiete

1 b) Installierte Gaswaschflaschen für die nasschemische Analyse von NH_3 (© DBFZ)

Die emissionsseitigen Untersuchungen setzen sich aus vier Messphasen mit unterschiedlichen Schwerpunkten zur Identifikation der Betriebsparameter, die das Emissionsgeschehen während des Kompostierungs- bzw. Rotteprozesses beeinflussen können, zusammen. In der 1. Messphase der Bestandsaufnahme aller zwölf Bioabfallbehandlungsanlagen wurden neben dem priorisierten Ziel, der Quantifizierung rottebezogener Emissionen, an geschlossenen Anlagen weitere Messungen, wie die Ermittlung und Quantifizierung von Leckagen an gasführenden Anlagenteilen, Messung des Biofilters und Abluftmessung am BHKW vorgenommen. Die 2.-4. Messphase bezieht sich ausschließlich auf die Untersuchung der Rotteprozessemissionen mit verschiedenen Parametervariationen. Die Abb. 2 zeigt die Anlagenemissionen in Abhängigkeit der verschiedenen THG für jede Anlage im Vergleich.

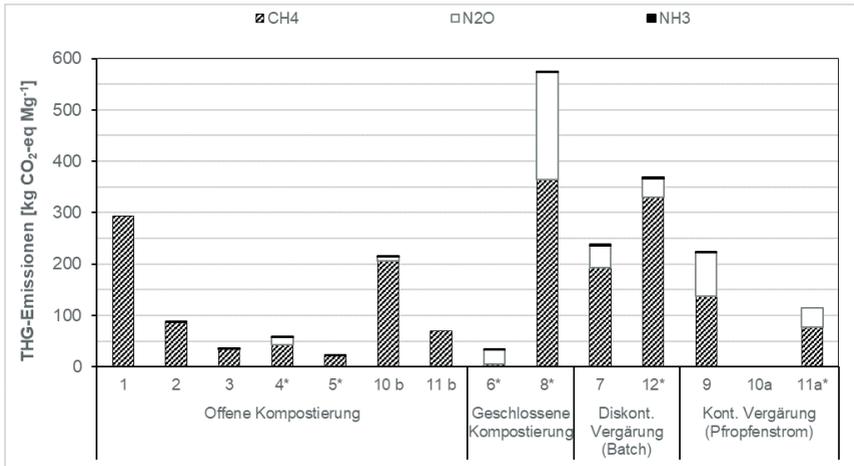


Abb. 2: Gesamt-THG-Emissionen der untersuchten Abfallbehandlungsanlagen

** Zwangsbelüfteter Kompostierungsprozess*

Anlage 8 – Geschlossene und belüftete Kompostierung von organischen Abfällen in einer Halle bis zur 6. Woche; danach Kompostierung in Dreiecksmieten

Anlage 10a – Kontinuierliche trocken AD-Anlage mit Fest-Flüssig-Trennung (nicht untersucht)

Anlage 10b – offene Nachkompostierung von festen Gärresten; nicht gasdichte Lagerung von flüssigen Gärresten

Anlage 11a – Vergärung von organischen Abfällen mit geschlossener und belüfteter Nachkompostierung von Gärresten in Boxen

Anlage 11b – Kompostierung von Grünabfällen in Dreiecksmieten

Die ermittelten Anlagenemissionen der ersten Messphase zeigen insgesamt, unabhängig von der Art der Kompostierung, eine hohe Bandbreite von rund 22 (A05) bis 574 (A08) kg CO₂-Äquivalente (Äq.) je Mg Feuchtmaterial (FM). Werden nur die offenen Kompostierungsanlagen betrachtet, ergibt sich ein mittlerer Emissionswert von 112 kg CO₂-Äq. je Mg FM (Median 70 kg CO₂-Äq. je Mg FM). Dem gegenüber stehen die Vergärungsanlagen mit einem mittleren Emissionswert von 235 kg CO₂-Äq. je Mg FM (Median 230 kg CO₂-Äq. je Mg FM). Die Summe der gemessenen Emissionen (CH₄, N₂O und NH₃ als indirektes Treibhausgas) der Mieten umgerechnet in CO₂-Äquivalente (CO₂-Äq.) zeigten generell eine hohe Schwankungsbreite von 20,9 ± 3,7 kg CO₂-Äq. je Mg FM an Anlage A06 bis 373,1 ± 155,8 kg CO₂-Äq. je Mg an Anlage A12.

Die Parametervariationen an Anlage 04 in Messphase 2 & 3 wurden mit betriebsüblichen Ausgangssubstraten (Gärprodukt bzw. Biogut mit Strukturmaterial) und Mietenquerschnitten (3,5 m hohe Tafelmieten) im Winter sowie im Sommer durchgeführt. Das Gärprodukt stammte aus einer Vergärungsanlage mit Batchverfahren. Das Material war etwa 8 Wochen alt und wurde nach dem Austrag aus dem Fermenter direkt zur Kompostierungsanlage 04 transportiert und dort

für weitere 6 Wochen kompostiert. Jeweils zwei Mieten wurden zwangsbelüftet, was dem üblichen Betriebszustand der Anlage entspricht und die beiden anderen Mieten wurden nicht aktiv belüftet. Die Windtunnelmessungen wurden in der Rotteweche 1, 2, 4 und 6 durchgeführt. Während der überdachten Intensivrotte (Woche 1-4) wurde die Miete einmal nach zwei Wochen Rottedauer umgesetzt. Die Nachrotte erfolgte nicht überdacht von Woche 4-6.

Die Untersuchungen der Parametervariationen im Sommer und Winter haben gezeigt (siehe Abb. 3), dass die Emissionen bei aktiver Belüftung während des Kompostierungsprozesses von Gärprodukten und Bioabfällen deutlich geringer ausfallen. Während der Wintermessphase lagen die Methanemissionen der unbelüfteten Mieten deutlich über denen der Sommermessphase.

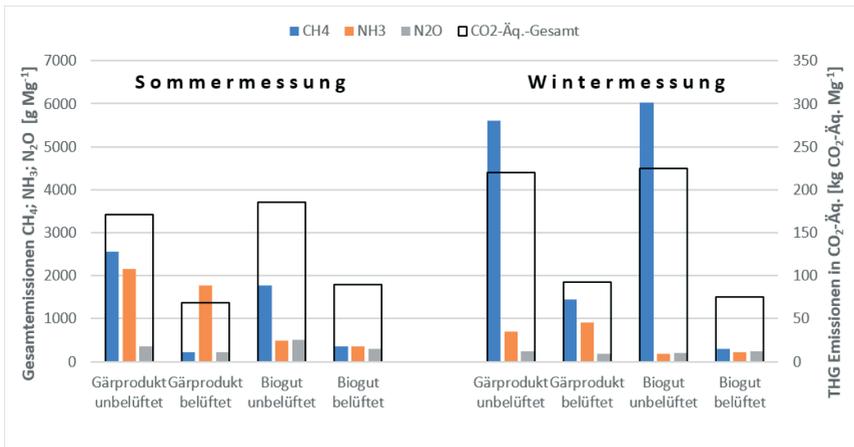


Abb. 3: Emissionsaufkommen in Abhängigkeit vom Substrat und Art der Belüftung an der teilgeschlossenen Kompostierungsanlage A04

Weitere Untersuchungen der Parametervariationen erfolgten an der Anlage 09 ebenfalls in der 2. & 3. Messphase. Bei der Anlage 09 handelt es sich um eine Vergärungsanlage (kontinuierliches Pfropfenstromverfahren) mit einer überdachten Nachrotte. Die Gärsubstrate werden nach dem Austrag aus dem Fermenter separiert. Flüssige Gärprodukte werden in einem gasdichten Gärproduktlager bis zur Ausbringung zwischengelagert. Die festen Gärprodukte werden mittels einer Aerobisierungstrommel weiter aufbereitet und daraufhin zu 1,5 m hohen Dreiecksmieten aufgesetzt und für vier bis fünf Wochen kompostiert. Der Gärproduktkompostierung werden beim Ansetzen der Mieten etwa 18 % Grüngutabfälle, als strukturreiche Substanz beigemischt.

Für die Versuchsreihen an der Anlage 09 wurden die Gärproduktmieten in der Sommer- und Wintermessphase hinsichtlich des Einflusses verschiedener Umsetzregime (2x/Woche, 1x/Woche und 0,5x/Woche) auf das Emissionsgeschehen untersucht. Die Untersuchungen an der Anlage 09 zeigen (siehe

Abb. 4), dass unabhängig der Umsetzregime die massenspezifischen Mietenemissionen umgerechnet in CO_2 -Äquivalente in der Wintermessphase höher ausfallen. Bei der Betrachtung der Gesamtmietenemissionen von CH_4 , N_2O und NH_3 fällt auf, dass während der Sommermessphase die NH_3 Werte deutlich höher sind als in der Wintermessphase. In der Wintermessphase hingegen wurden deutlich höhere CH_4 Emissionen gemessen.

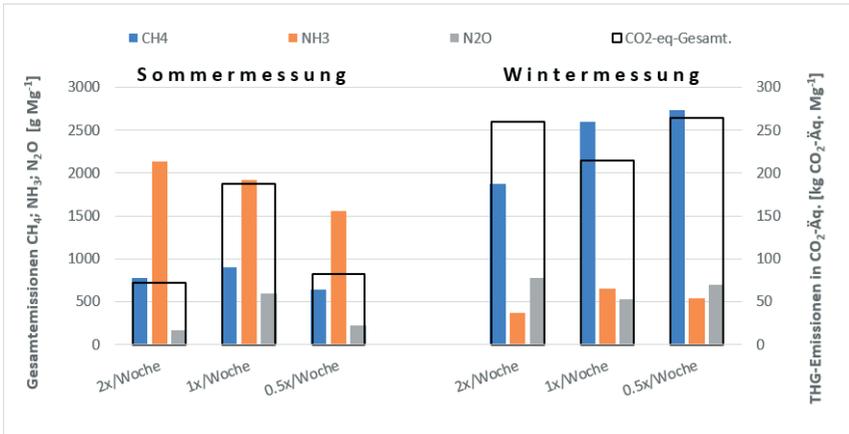


Abb. 4: Emissionsaufkommen in Abhängigkeit von Jahreszeiten und Umsetzintervallen an der Vergärungsanlage mit teilgeschlossener Nachrotte A09

Zusammenfassend können aus den Emissionsmessungen folgende Erkenntnisse abgeleitet werden:

- Aktiv belüftete Mieten (Zwangselüftung) zeigen gegenüber unbelüfteten Mieten (passiv belüftet) deutlich geringere Emissionen.
- Mietenemissionen können bei zu großen Mieten höher ausfallen (vgl. A01 mit bis zu 5 m sehr hohe Miete), so dass anaerobe Zonen entstehen, die die Methanbildung fördern; ansonsten waren bei zu kleinen Mieten tendenziell höhere Emissionen feststellbar.
- Jahreszeiten können einen erheblichen Einfluss auf die Mietenemissionen haben. An Anlage A09 lagen die Mietenemissionen während der Wintermessphase bis zu 3,5 Mal höher als während der Sommermessphase.
- Umsatzhäufigkeiten müssen nicht linear zur THG-Emissionsmenge verlaufen, sondern können auch vom Strukturmaterial abhängen. Jedoch konnte keine klare Tendenz abgeleitet werden, was den Einfluss des Umsetzintervalls auf die Gesamtemissionen der Miete betrifft.

- Hohe Lachgasemissionen können sich ergeben, wenn sehr feuchtes Biogut eingesetzt wird und der Einsatz eines sauren Wäschers vor dem Biofilter fehlt (vgl. A08).

Aus den Ergebnissen der Untersuchungen lassen sich folgende Optimierungsmaßnahmen für eine klimaschutzorientierte und ressourcenschonende Mietenkompostierung ableiten:

- eine aktive Belüftung vor allem bei zu hohen Mieten verhindert die Bildung von anaeroben Zonen (vgl. A01)
- die Mietenhöhe muss so angepasst sein, dass sie den diffusiven Lufttransport ins Mieteninnere gewährleistet und vor Vernässung durch Regenereignisse schützt
- Bei kälteren Außentemperaturen ist darauf zu achten, dass die Anteile des Strukturmaterials erhöht werden.

Literaturverzeichnis

- Andersen, Jacob K.; Boldrin, Alessio; Samuelsson, Jerker; Christensen, Thomas H.; Scheutz, Charlotte (2010): Quantification of greenhouse gas emissions from windrow composting of garden waste. In: *Journal of Environmental Quality* 39 (2), S. 713–724. DOI: 10.2134/jeq2009.0329.
- Daniel-Gromke, Jaqueline; Liebetrau, Jan; Denysenko, Velina; Krebs, Christian (2015): Digestion of bio-waste - GHG emissions and mitigation potential. In: *Energ Sustain Soc* 5 (1). DOI: 10.1186/s13705-014-0032-6.
- Liebetrau et al. (2013): Analyse von Emissionen klimarelevanter Gase durch Biogasanlagen im Hinblick auf die ökologische Bewertung der Biogasgewinnung aus Abfällen - 03KB027. Unter Mitarbeit von Dr. Jan Liebetrau, Christian Krebs, Jaqueline Daniel-Gromke. Hg. v. DBFZ. Leipzig.
- Luo, Wen Hai; Yuan, Jing; Luo, Yi Ming; Li, Guo Xue; Nghiem, Long D.; Price, William E. (2014): Effects of mixing and covering with mature compost on gaseous emissions during composting. In: *Chemosphere* 117, S. 14–19. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2014.05.043.
- Phong (2012): Greenhouse Gas Emissions from Composting and Anaerobic Digestion Plants. Dissertation. Unter Mitarbeit von Nguyen Thanh Phong. Hg. v. Institut für Nutzpflanzenwissenschaften und Ressourcenschutz (INRES). Lehr- und Forschungsbereich Pflanzenernährung der Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität zu Bonn. Bonn.
- Shan, Guangchun; Li, Weiguang; Gao, Yujuan; Tan, Wenbing; Xi, Beidou (2021): Additives for reducing nitrogen loss during composting: A review. In: *Journal of Cleaner Production* 307, S. 127308. DOI: 10.1016/j.jclepro.2021.127308.

Kontakt

M.Sc. Julian Matlach
wissenschaftlicher Mitarbeiter

DBFZ Deutsches Biomasseforschungszentrum gemeinnützige GmbH
Torgauer Straße 116
04347 Leipzig

✉ Julian.Matlach@dbfz.de | www.dbfz.de

Einsatzmöglichkeiten von Bioethanol als Kraftstoff für handgehaltene Arbeitsgeräte, eine Übersicht

1 Einleitung

Um die anthropogen verursachten Treibhausgasemissionen zu reduzieren, ist es notwendig den Einsatz fossiler Kraftstoffe zu verringern. Neben den Maßnahmen im Transportsektor, dem Hauptverbraucher an flüssigen fossilen Kraftstoffen, sollten auch alle kleinen Verbrauchsbereiche an flüssigen Kraftstoffen ihr Reduzierungspotenzial ausnutzen. Daher wurde in einer Studie das Ziel das Potenzial der Minderung der Kohlendioxidemissionen durch die Nutzung von Bioethanol als Kraftstoff für handgehaltene Arbeitsgeräte ermittelt sowie die technischen Randbedingungen. Diese Potentialabschätzung basiert auf der Verknüpfung des zu erarbeitenden Wissens über die Eignung der Motoren, die Nutzungsdauer derselben und die Eigenschaften der Bioethanolkraftstoffe die weltweit im Einsatz sind. Der Kraftstoff Ethanol ist in bestimmten, nicht zu vernachlässigen Mengen weltweit verfügbar und genormt. Genauso sind die Motoren in den kleinen Arbeitsmaschinen „Weltmotoren“, die ohne regionale Unterschiede (mit Ausnahme Kalifornien) hergestellt, verkauft und betrieben werden. Damit sind in dem Projekt auch das Potenzial eine über die Grenzen von Deutschland und der EU hinausgehende Treibhausgaseinsparung, die zum Klimaschutz beitragen können betrachtet worden.

2 Technische Zielstellungen

Im Rahmen der Studie wurden folgende Fragestellungen auf Literaturbasis bearbeitet:

- Ermittlung der Anzahl des Einsatzes der genannten Motoren nach geografischen Einsatzbereichen
- Spezifikation der genutzten Motoren nach Größenordnung und Einsatzdauer pro Jahr
- Abschätzung des Jahresumsatzes an Kraftstoff der genannten Motoren nach geografischen Einsatzbereichen
- Ermittlung des Potenzials zur Treibhausgaseinsparung bei Einsatz von Bioethanol als ein auch zukünftig vorhandener Kraftstoff
- Ein wesentliches Ziel der Recherche ist, zu ermitteln, an welchen Kleinmotoren es in den letzten 10 Jahren zum Einsatz von Bioethanol gekommen ist.

Neben diesen äußeren Merkmalen des Bioethanoleinsatzes wurde auch dokumentiert, wie die genutzten Motoren eventuell konstruktiv, aber auch durch Änderungen der Motorsteuerung oder Gemischbildung an den Betrieb mit Bioethanol angepasst und welche Betriebsergebnisse damit erzielt wurden. Wesentliche Beurteilungspunkte hierbei sind Leistung, Brennstoffverbrauch, Bauteilbeanspruchung, Geräuschemission und Betriebssicherheit. Zuletzt genanntes Merkmal ist für eine erfolgreiche Marktdurchdringung von Bioethanolmotoren wesentlich, da Betriebsstörungen das Vertrauen des Anwenders in das Arbeitsgerät deutlich mindern und meist mit erheblichen finanziellen Einbußen verbunden sind.

3 Stand der Wissenschaft und Technik

Die Nutzung von Verbrennungsmotoren als Antrieb für handgehaltene Arbeitsgeräte ist weltweiter Stand der Technik. Diese Motoren sind weltweit stark verbreitet und im Einsatz. Die Antriebssysteme haben Kupplungsleistungen zwischen 0,8 und 7 Kilowatt.

Die jährliche Produktions- und Verkaufsmenge beträgt ca. 20 Millionen Motoren (2- und 4-Takt-Verfahren), wovon allein 10 Millionen 4-Takt-Motoren durch die Firma „Briggs & Stratton“ produziert werden. Deutsche Firmen wie z.B. Stihl und AS-Motoren sind Markt- und Technologieführer auf dem Gebiet der 2-Takt-Motoren für handgehaltene Arbeitsgeräte. Zu diesen Geräten zählen beispielsweise:

- Kettensägen
- Laubbläser
- Motorsensen
- Rasenmäher
- Motorhäcksler
- Trennschleifer

4 Ergebnisse der Studie

Motorspezifische Eigenschaften von Bioethanol

Im Vergleich zum Benzin, ist Bioethanol ein alkoholischer Kraftstoff, der aus erneuerbaren Quellen hergestellt wird. Die Haupteigenschaften der beiden wird zusammengefasst in Tab. 1 aufgezeigt.

Tab. 1: Eigenschaften von Bioethanol und Benzin [4]

Eigenschaft	Einheit	Ethanol	Benzin
Heizwert	MJ/kg	26,77	43,5
Heizwert	MJ/dm ³	21,55	32,8
Luftbedarf	kg/kg	9,0	14,7
Verdampfungsenthalpie	kJ/kg	904	380 - 500
Zündgrenzen	% Vol. in Luft	3,5-18	1,3-7,6
Zündenergie	mJ	0,63	0,25-0,3
RON	-	100-112	88-89
Flammpunkt	°C	12	-35

Ethanol verbessert als Oxygenat durch seine hohe Oktanzahl die Klopfestigkeit von herkömmlichen Ottokraftstoffen. Als Reinkraftstoff kann Ethanol mit hohem Wirkungsgrad verbrannt und so eine vergleichsweise höhere Motorleistung erzielt werden. Ethanol hat einen höheren Flammpunkt als handelsüblicher Ottokraftstoff und ist mit Wasser lösbar. Dies führt zu einer höheren Anwendungssicherheit. Die hohe Verdampfungsenthalpie bewirkt eine Innenkühlung des Brennraumes und verringert damit die NO_x-Emissionen.

Nachteilig ist, dass Ethanol einen um ein Drittel niedrigeren Energiegehalt als Ottokraftstoff besitzt. Ein Liter Ethanol ersetzt somit nur etwa 0,66 Liter Benzin.

Vorteile und Herausforderungen beim Einsatz von Bioethanol in Kleinmotoren

Im Vergleich zu batteriebetriebenen Geräten haben Bioethanolantriebe geringe spezifische Leistungsgewichte und erlauben so bei gleichem Gewicht höhere Leistungen und höhere Drehmomente, welche die Flexibilität und die Robustheit der Geräte erhöhen. Außerdem können sie im definiert ausgeschalteten Zustand schadlos gelagert werden. Betriebspausen von 24 Monaten sind für Verbrennungsmotoren kein Problem, wodurch sie sich an die verschiedenen grundsätzlichen Einsatzstrukturen im Garten anpassen lassen. Darüber hinaus ist die Flexibilität beim Tanken ein positiver Aspekt für die Geräte, die mit flüssigen Bioethanol arbeiten, bei denen der Tank nur mit Kraftstoff befüllt werden muss, was nur wenige Minuten dauert. Andererseits sind akkubetriebene Gartengeräte billiger, als solche für flüssiges Bioethanol, da ihre Teilezahl und Komplexität deutlich geringer sind. Akkugeräte sind eher für kleinere Flächen geeignet, da der Leistungszyklus durch die Kapazität des Akkus begrenzt ist. Wenn die batteriebetriebenen Geräte unter schweren Bedingungen verwendet werden, sind zusätzliche Austauschakkus erforderlich, was mehr Kosten bedeutet. Weiterhin haben die Akkus eine bestimmte Lebensdauer (Ladezyklenzahl) und können dem Gerät danach nicht mehr die angemessene benötigte Energiemenge liefern. Bioethanolbetriebene Geräte (aber auch Kabelgeräte) können

Lebensdauern von 25 Jahren und mehr erreichen, wodurch sich der „CO₂-Fußabdruck“ der Herstellung auf mehr Betriebsstunden verteilt. In Bezug auf örtlichen Lärm und Umweltverschmutzung haben die batteriebetriebenen Maschinen Vorteile. Sie werden in Hotelanlagen und öffentlichen Schulen bevorzugt, da sie nur geringe Schallbelästigungen verursachen. Außerdem muss sehr oft kein Gehörschutz getragen werden. Weiterhin haben batteriebetriebene Geräte weniger bewegliche Teile als ihre benzinbetriebenen Äquivalente, was geringere Wartungskosten bedeutet. In dem Kriterium der örtlichen Emissionen am Einsatzort sind die batteriebetriebenen Geräte sehr umweltfreundlich, da sie dort keine schädlichen Emissionen produzieren. Die Emissionen entstehen eventuell am Ort der Stromerzeugung.

In Gartengeräten wie Rasenmähern, Kettensägen, Trimmern und Laubbläsern kann Bioethanol jedoch Schäden am Verbrennungsmotor und seinen Komponenten verursachen. Der Grund dafür sind die höheren Wassergehalte im Bioethanol. Ethanol absorbiert Wasser und Feuchtigkeit, wodurch es in Summe zu schlechteren Motorparametern kommen kann. E10-Kraftstoff nimmt bis zu 50-mal mehr Wasser auf als alkoholfreies Benzin. Das hochpolare Ethanol ist auch ein sehr starkes Lösungsmittel, das Kunststoff, Gummi und Glasfaser angreift und möglicherweise zu Problemen bei Motordichtungen und Leitungen führen kann.

Weiterhin ist die Mischbarkeit mit unpolarem mineralischen Motorenschmieröl nicht so gut wie bei fossilem Benzin. In der Literatur wird erwähnt, dass dies zu schlechterer Schmierung, Leistungsproblemen und kostspieligen Reparaturen geführt hat. [4].

Gemäß Briggs & Stratton [5] ist der Betrieb von Briggs & Stratton Motoren mit dem Kraftstoff E10 mit 95 Oktan möglich. Da der Kraftstoff E10 auf längere Lagerzeiten und andere Umwelteinflüsse empfindlicher reagiert, sollte der verwendete Kraftstoff nicht älter als 30 Tage sein und bei einer längeren Standzeit des Motors der Kraftstofftank und der Vergaser entleert werden.

Honda gibt an, „Alle Honda Power Equipment-Produkte mit Benzinmotoren, die seit 1993 für den EU-Markt hergestellt werden, sind mit maximal E10-Benzin kompatibel“. Dazu gehören stationäre Motoren und komplett gebaute Honda-Einheiten. E10 ist allerdings vorsichtiger zu behandeln als das herkömmliche Benzin, weil der neue Treibstoff Kunststoffe und Lacke stärker angreift. Spritzer, die beim Betanken auf dem Gehäuse landen, sollte man deshalb gleich abwischen. Zudem reagiert der Biosprit stärker auf Lichteinstrahlung, Temperatur, Lagerzeit, und Luftfeuchtigkeit. E10 verdampft etwas schneller, verliert Masse und ändert seine Eigenschaften und damit an Zündwilligkeit. Honda empfiehlt daher, nur E10 zu verwenden, „das nicht älter als 30 Tage ist und vorher in einem zugelassenen Kraftstoffbehälter aufbewahrt wurde“. Die Empfehlungen von Husqvarna (einem der größten Hersteller von Gartengeräten) betonen, dass in ihren Geräten ethanolfreier Kraftstoff verwendet werden sollte. Aus diesen

Aussagen der Hersteller und der Literatur ist zu entnehmen, dass noch einiger Forschungsbedarf besteht, um alle Vorbehalte gegen Bioethanol als Kraftstoff objektiv zu bewerten und technische Lösungen zu finden.

5 Forschungsbedarf

Der Einsatz von Bioethanol als Kraftstoff in handgehaltenen Arbeitsgeräten unter besonderer Beachtung der Land- und Forstwirtschaft ist noch sehr wenig verbreitet.

Die Ursachen für diese geringe Verbreitung sind vielfältig:

- derzeit nicht vorhandene sichere lokale Verfügbarkeit (Versorgungsnetz)
- höhere Energiepreise je kWh in Bezug auf klassisches Benzin
- schlechtes Image von Alkohol/Ethanol als Kraftstoffkomponente, seit der Missglücken Einführung von E10 nach DIN EN 228 für Straßen-PKW
- Werbung der Motoren- und Gerätehersteller für ihre, über den Ersatzteilvertrieb, angeboten fossilen, aromatenfreien Sonderkraftstoffe

Dass der Einsatz, von für den PKW-Einsatz optimiertem Benzin nach DIN EN 228 nicht optimal für handgehaltene Arbeitsgeräte ohne Katalysator ist, wird an mehreren Stellen erkannt. Um die Abgasbelastung durch die Motoren, insbesondere für die Bediener zu reduzieren, haben die Motorenhersteller ein Sonderbenzin (Sonderkraftstoff) auf den Markt gebracht. In der Tab. 3 sind die Eigenschaften von Motomix von der Firma ST. (Marktführer bei Kettensägen) im Vergleich zu Benzin Super EN 228 aufgeführt.

Tab. 2: Sonderbenzin für Kettensägen [4]

Vergleichsdaten	EN 228 Super	Motomix ohne Motorenöl
Oktanzahl ROZ	95	> 95
Oktanzahl MOZ	85	> 90
Dampfdruck kPA	45 – 100	50 – 65
Schwefel mg/kg	< 150	< 10
Aromatengehalt %V	< 42	< 0,5
Benzolgehalt %V	< 1	< 0,05
Olefine %V	< 18	< 0,1
Oxidationsstabilität min.	> 360	> 720
Haltbarkeit	ca. 3 Monate	> 2 Jahre*

(*) Bei kühler und trockener Lagerung in gut verschlossenen Originalgebinden

Dieses Sonderbenzin praktisch ohne Ringstrukturen in den Molekülen wird mit folgenden Vorteilen angeboten:

- Bis zu 70 % weniger Abgasschadstoffe – ein Plus für Gesundheit und Umwelt
- Maximale Lebensdauer der Motoren, wenig Wartungsaufwand, geringere Kosten
- Benzindämpfe sind praktisch frei von Substanzen wie Olefinen und Aromaten (z.B. Benzol)
- Saubere Verbrennung
- Beigemischtes ST. HP Ultra ist biologisch abbaubar (über 80 Prozent bereits innerhalb von 21 Tagen)
- Haltbarkeit bis mehr als 2 Jahre bei geeigneter Aufbewahrung (luftdicht verschlossen in dafür technisch freigegebenen Gebinden, bei einer Raumtemperatur von max. 20°C, in möglichst trockenen und dunklen Lagerräumen)

Der Marktpreis des Sonderbenzins liegt derzeit über 5 Euro je Liter, also deutlich über dem von normalem Benzin oder Ethanol. Dies zeigt auf, dass es eine Bereitschaft gibt, für Kraftstoffe mit geringen Emissionen in der Nähe des Bedienpersonals, mehr Geld zu bezahlen.

Diese Sonderkraftstoffe führen jedoch nicht zu einer Defossilierung des Betriebes der Geräte. Dies ist der wesentliche Vorteil des Einsatzes von Bioethanol gegenüber Ottokraftstoff nach EN 228 als Kraftstoff neben der deutlich geringen Wassergefährdungsklasse und der Aromatenfreiheit.

Die Studie ergab wissenschaftlich-technische Arbeitsbedarfe, um den Einsatz von Bioethanol und dessen Markteinführung für Kleinmotoren zu unterstützen:

- Verbesserung der Lagerfähigkeit insbesondere in den Motoren, Gerätetanks und Vergasern
- Verringerung der Wasseraufnahme in kleinen Lagern in Abhängigkeit von der Lagergröße
- Untersuchung des Wassereinflusses auf die Motorenbauteile unter Berücksichtigung einer möglichen Essigsäurebildung des Ethanols
- Absicherung der Funktion der synthetischen 2-Takt-Schmieröle bei Einsatz von Ethanolkraftstoffen

Jeder Kraftstoff nimmt Wasser auf und kann bestimmte Mengen „physikalisch“ lösen, ohne dass es zu einer Phasentrennung (Tropfenbildung) kommt. Dieses „Lösungsvermögen“ ist von der Grundstruktur und der Temperatur des Kraftstoffes abhängig. Unpolare Kraftstoffe (wie fossiles Benzin oder Diesel) können nur geringe Mengen Wasser lösen und haben damit kaum „Wasserprobleme“, da bei Temperaturänderung nur wenig Wasser in Tropfenform ausgeschieden wird.

Im Gegensatz dazu kann Ethanol beliebig viel Wasser aufnehmen (Mischbar in jedem Verhältnis) und hochkonzentriertes trockenes Ethanol besitzt zu den die Eigenschaft, Wasser aus der Luft Feuchtigkeit aufzunehmen. Dieses aufgenommene Wasser ist nur physikalisch gebunden und kann mit den Materialien des Motors reagieren.

Das Problem bei den kleinen Arbeitsmaschinen ist ihr sehr ungünstiges Verhältnis von Tankvolumen zu Tankoberfläche, wodurch bezogen auf den Tankinhalt viel Wasser aufgenommen wird. Es ist zu untersuchen, wie hoch die Wasseraufnahmeraten bei den verschiedenen Tankgrößen, Füllständen und Wassergehalten der Umgebungsluft in Abhängigkeit der Temperatur sind. Weiterhin ist es wichtig, wie hoch der Maximalwert des Wassergehaltes im Ethanol unter den üblichen Praxisbedingungen ist.

Ein analoges Problem tritt in den dezentralen Kraftstofflagertanks auf. Diese reichen für die kleinen Arbeitsgeräte vom tragbaren 5-Liter-Kanister bis zu 200-Liter-Fässern. Hier sind sehr ähnliche Tests wie für die Tanks direkt an den Motoren sinnvoll.

Da Bioethanol in der Praxis wie oben beschrieben immer Wasser aufnimmt, ist gezielt zu untersuchen, wie die Materialien des Motors darauf reagieren. Die brennraumumschließenden Bauteile bestehen (bis auf die Ventile) aus verschiedenen Aluminiumlegierungen. Das Ansaugsystem und das Gemischbildungssystem bestehen ebenfalls aus Aluminium und unterschiedlichen Kunststoffen. In einer Versuchsmatrix aus den genannten Materialien und wassergesättigten Kraftstoffen, ist der Einfluss hoher Wassergehalte auf die Bauteilmaterialien in Verträglichkeitstests zu ermitteln.

Ein weiterer Untersuchungspunkt ist das Mischungsverhalten mit 2-Takt-Motorschmierölen. Da 2-Takt-Motoren mit Gemischschmierung arbeiten, ist in Labor- und Prüfstandstests zu untersuchen, ob die Schmierung mit den heutigen synthetischen 2-Takt-Ölen gesichert ist oder ob andere Mischungsverhältnisse notwendig sind. Das erprobte, gut geeignete Rizinusöl steht in den Mengen, die für eine breite Markteinführung notwendig sind, nicht zur Verfügung.

6 Zusammenfassung

In Bereich der handgehaltenen Arbeitsgeräte hat es in den letzten 10 Jahren eine starke Elektrifizierung durch den Einsatz von Geräten mit Akkumulatoren als Energiespeicher gegeben. Trotz dieser Elektrifizierung ist der Absatz von handgehaltenen Arbeitsgeräten mit Verbrennungsmotoren nicht zurückgegangen und wird nach Prognosen von Wirtschaftsinstituten auch in den nächsten Jahren nicht zurückgehen. Diese große Anzahl von Motoren, die weltweit im kommerziellen Einsatz in der Land- und Forstwirtschaft sind, produzieren erhebliche Mengen von Schadstoffen, insbesondere Kohlenwasserstoffen und CO₂ als Treibhausgas. Diese Motoren werden aus Gewichtsgründen ohne Katalysator zur Abgasnachbehandlung betrieben. Damit besteht der Bedarf eine Strategie zu entwickeln, mit welchen Kraftstoffen diese Motoren in Zukunft betrieben werden können und sollen. Der zukünftige Kraftstoff muss erstens eine schadstoffarme Verbrennung auch ohne Abgasnachbehandlung ermöglichen und zweitens den Anspruch haben nicht aus fossilen Quellen zu stammen.

Die erste Forderung, die insbesondere durch die Berufsgenossenschaften vorangetrieben wird (TRGS 600 Substitution), führte zur Markteinführung eines Sonderkraftstoffes für diese Motoren. Dieser Sonderkraftstoff (fast 100 % Isoparaffine) ist fossilen Ursprungs, aber ansonsten extrem gut auf die Kleinmotoren abgestimmt. Der derzeitige Marktpreis beträgt ca. 6,00 Euro je Liter.

Durch den Einsatz von Bioethanol als Kraftstoff in Motoren von Arbeitsgeräten kann sowohl eine schadstoffarme als auch eine CO₂-neutrale Verbrennung realisiert werden. Nachteilig ist seine starke Polarität, wodurch es stark hygroskopisch ist. Die Recherche ergab, dass die hygroskopischen Eigenschaften von Ethanol die Kleinmotorenhersteller bisher von einem breiten Einsatz dieses Kraftstoffes abgehalten hat. Sie weisen in entsprechenden Unterlagen auch Ihre Kunden auf diesen negativen Aspekt hin, zumal die Kraftstoffe für Kleinmotoren in Behältern mit geringen Volumen gelagert werden, die diesbezüglich besonders empfindlich sind. Wasser im Kraftstoff kann zu Korrosion im Kraftstoffsystem führen, was Motorschäden zur Folge haben könnte.

Um den aus Umweltschutzgründen sinnvollen Einsatz von Bioethanol zu fördern, sind Forschungsaktivitäten sinnvoll, die sich mit den konkreten Auswirkungen der hygroskopischen Eigenschaften auf den Motor beschäftigen und geeignete Maßnahmen zur Verhinderung von Motorschäden ermitteln.

Durch die hohen Kosten für die Iso-paraffinischen Sonderkraftstoffe ist der Einsatz von Bioethanol wirtschaftlich, zumal Bioethanol aus verschiedensten Reststoffen weltweit regional gewonnen werden kann.

Literatur/Quellen

- [1] Frankl, Maximilian: Realemissionen eines Flexible Fuel Vehicles (FFV) beim Betrieb mit ethanolhaltigen Kraftstoffe, Masterarbeit, TU-München 2017
- [2] Jens Reiser: Ethanol als Kraftstoff von Motoren für kleine Arbeitsmaschinen, Masterarbeit Universität Rostock 2020 unveröffentlicht
- [3] Saskia Katharina Stingl: Ethanol als Kraftstoff in Motoren unter 10 KW; Bachelorarbeit Universität Rostock 2021 unveröffentlicht
- [4] Mina Abaskharon; Volker Wichmann: Studie zu Einsatzmöglichkeiten von Bioethanol als Kraftstoff für handgehaltene Arbeitsgeräte unter besonderer Beachtung der Land- und Forstwirtschaft Abschlussbericht zur FNR Projekt Förderkennzeichen 2220NR257X, 2023
- [5] Briggs & Stratton technical support.https://www.briggsandstratton.com/eu/en_gb/support/faqs/browse/E10-petrol-usage.html

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages mit Mitteln des Bundesministeriums für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL) über die Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR) als Projektträger des BMEL für das Förderprogramm Nachwachsende Rohstoffe unterstützt. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei der Autorenschaft.

FNR Projekt Förderkennzeichen 2220NR257X, 2023

Kontakt

Dr.-Ing. Volker Wichmann

Universität Rostock
Lehrstuhl für Kolbenmaschinen und Verbrennungsmotoren
Albert-Einstein-Straße 2
18059 Rostock

✉ volker.wichmann@uni-rostock.de | 🌐 www.lkv.uni-rostock.de

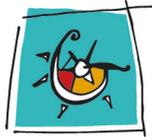
18. ROSTOCKER BIOMASSEFORUM

UNSERE FÖRDERER

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages



VRD STIFTUNG
FÜR ERNEUERBARE
ENERGIEN



SCHAUMANN
BioENERGY



VRD STIFTUNG
FÜR ERNEUERBARE
ENERGIEN

Mit der kleinen Renntaus lernen



Die „Renntaus-Welt“ richtet sich an etwa drei- bis achtjährige Kinder, die spielerisch an die Themen „Umwelt“ und „erneuerbare Energie“ herangeführt werden.

Im neuen Buch „Die kleine Renntaus und die Zauberbäume“ lernt Renntaus Lena, wie wichtig Bäume für Umwelt und Landwirtschaft sind. Die Geschichte knüpft an das mit dem Kinder-Medienpreis ausgezeichnete Werk „Die kleine Renntaus und ihr Zauberhaus“ an.



Abenteuer Umwelt

Wie man mit Bäumen auf den Äckern gesunde Lebensräume schafft



NEU

Kinderbuch
„Die kleine Rennmaus und die Zauberbäume“

- mit Liedern zum Mitsingen (www.karenmusik.de)
- über den Buchhandel und die VRD Stiftung beziehbar
- vermittelt ca. drei- bis achtjährigen Kindern das Umweltthema „Agroforstwirtschaft“ (Bäume in der Landwirtschaft) auf verständliche und lebensfrohe Weise



36 Seiten, DIN A4,
mit 7 Kinderliedern
ISBN: 978-3-9816231-1-6
Preis: 12,50 €

Unterstützt von Teilnehmern der



2023 (1. Auflage): Beratung durch Gabriele Hoffmann,
Diplom-Pädagogin und Kinderbuch-Expertin
Komposition und Liederproduktion: Karen Kassulat

Abenteuer Energie

Womit man
eigenen Strom
machen kann –
und mit anderen
teilen kann



Kinderbuch

„Die kleine Rennmaus und ihr Zauberhaus“

- mit Hörbuch- und Lieder-CD
- 2014 ausgezeichnet mit dem Kinder-Medienpreis „Der weiße Elefant“
- über den Buchhandel und die VRD Stiftung beziehbar
- ermöglicht ca. drei- bis achtjährigen Kindern einen emotionalen Zugang zum Thema „erneuerbare Energie“



36 Seiten, DIN A4,
Hörbuch-CD 28 Minuten Spieldauer
ISBN: 978-3-9816231-0-9
Preis: 12,99 €

2017 (3. Auflage): Beratung durch Gabriele Hoffmann,
Diplom-Pädagogin und Kinderbuch-Expertin
Sprecherin auf der CD: Viktoria Brams
Lieder und CD-Produktion: Karen Kassulat

Handpuppe, interaktive Lesungen und Kindertheater



Lesungen buchbar unter:
leserattenservice.de

Die kleine Rennmaus gibt es (auf Anfrage über die Stiftung) auch als **Handpuppe**: Ihr hören die Kinder im Unterricht oder bei einer interaktiven Buchlesung besonders aufmerksam zu.

Bei der **interaktiven Lesung** mit Gesang, Basteln und Experimenten überlegen die Kinder gemeinsam, was „Energie“ eigentlich ist. Sie erleben den vielfältigen Einfluss, den Energie auf uns hat, und was man mit Strom aus Sonne, Wind und Wasser alles machen kann.

Auf Anfrage kann die „kleine Rennmaus“ als **Theaterstück** aufgeführt werden.



VRD STIFTUNG
FÜR ERNEUERBARE
ENERGIEN

VRD Stiftung für Erneuerbare Energien
Heinrich-Fuchs-Straße 94-96
69126 Heidelberg

Telefon+49 6221 39539-00
dialog@vrd-stiftung.org
www.vrd-stiftung.org

<https://vrd-stiftung.org/projekt-bereich/agroforstsysteme/>

18. ROSTOCKER BIOMASSEFORUM

UNSERE KOOPERATIONSPARTNER



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 Marktakteuren 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 Fach-ausschüssen 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 Beitrittsunterlagen erhalten Sie unter www.bioenergie.de

Den Mitgliedsantrag können Sie hier herunterladen:
www.bioenergie.de/mitglied-werden

BBE BUNDESVERBAND Bioenergie e.V.

Werden Sie Mitglied im Bundesverband Bioenergie e.V.

Ein Team im Dienst der Bioenergie!

- ☞ Gemeinsame Stimme der deutschen Bioenergiebranche seit 1998
- ☞ Zusammenschluss von 23 nationalen Verbänden, 130 Unternehmen und 7 wissenschaftlichen Institutionen
- ☞ Ein einzigartiges Experten-Netzwerk aus den Bereichen Strom, Wärme und Kraftstoffe aus Biomasse

Unsere Themenbereiche

- Strom
- Kraftstoffe
- Wärme
- Wirtschaft
- Klimaschutz

Unsere Arbeitsgruppen

Treten Sie unseren Arbeitsgruppen bei, die als Drehscheiben der Entscheidungsfindung dienen und die es den Mitgliedern des Bundesverbands Bioenergie e.V. ermöglichen, aktuelle politische und wirtschaftliche Entwicklungen, neue Technologien und Herausforderungen zu diskutieren.

- ☞ Holzheiz/kraftwerke
- ☞ Holzwärme
- ☞ Roh- und Brennstoffe
- ☞ Nachhaltigkeit
- ☞ Holzrasche
- ☞ Energieholzsanbau
- ☞ Öffentlichkeitsarbeit
- ☞ Regenerative Kraftstoffe

Drei gute Gründe für Ihre Mitgliedschaft:

Gestalten Sie die Bioenergiepolitik aktiv mit

- 1. **Beteiligen Sie sich an den Arbeitsgruppen des BBE, um Einblicke von Experten aus Politik und Industrie zu erhalten. Aktuelle Trends zu diskutieren und Positionen zu wichtigen Fragen der Branche zu erarbeiten.**
- 2. **Tragen Sie zur Erarbeitung von gemeinsamen Positionen bei, die vom BBE auf nationaler sowie internationaler Ebene vertreten werden. Auf nationaler Ebene erfolgt eine enge Zusammenarbeit mit dem Bundesverband Erneuerbare Energien e.V. (BEE), auf europäischer Ebene mit Bioenergy Europe.**
- 3. **Setzen Sie aktiv Themen und Schwerpunkte der Verbandsarbeit und bringen Sie Ihre Erfahrungen und Herausforderungen in die Arbeit des BBE ein.**

Netzwerken Sie mit Gleichgesinnten aus der Bioenergiebranche

- **Genießen Sie alle Netzwerkeveranstaltungen und -möglichkeiten des BBE, mit 90 Mitgliedern und über 1000 Experten aus Wirtschaft, Wissenschaft und Politik auf unserem jährlichen Branchenevent.**
- **Nutzen Sie die Kontakte des BBE zur Vernetzung mit anderen Stakeholdern im Bereich der Bioenergie und Erneuerbare Energien.**
- **Steigern Sie Ihren Bekanntheitsgrad durch Veröffentlichungen in den Kommunikationsmaterialien des BBE sowie durch die Teilnahme an Kongressen und Seminars des Verbandes.**
- **Profitieren Sie von Rabatten für alle Veranstaltungen des BBE.**

3 Erhalten Sie exklusive Informationen und Hintergrund

- Erhalten Sie Zugang zu aktuellen politischen Informationen durch unsere regelmäßigen Hauptstadtrbriefe, Tagungsaktuelle Newsletter, ACF-Informationen, Diskussionsforen, weiteren Veröffentlichungen sowie Termin- und Veranstaltungskalender.
- **Profitieren Sie zudem von der Kammer 1-Mitgliedschaft des BBE beim Bundesverband Erneuerbare Energie e.V. (BEE), dem Dachverband der Erneuerbaren Energien in Deutschland, und den damit verbundenen Vorteilen.**

Klicken Sie hier, um Mitglied zu werden!

Mitglieder werden Mitglieder

Mitglieder, die nachweislich ein neues Mitglied mit einer bei der BBE-Geschäftsstelle eingereichten Bankvermerkung geworben haben, erhalten zur Honorierung einmalig pro geworbenem Neumitglied einen passiven Beitrag im Höhe von 100,- €.

Diese Regelung gilt auch für Nicht-Mitglieder, welche ein neues BBE-Mitglied werben.

Haben Sie noch Fragen? Kontaktieren Sie unsere Geschäftsführer

Bernd Geisen +49(0)281/8102-59 geisen@bioenergie.de

Gerolf Bücheler +49(0)39/7758179-21 buecheler@bioenergie.de

www.bioenergie.de

BBE Bundesverband Bioenergie e.V. | Hauptgeschäftsbereich Erneuerbare Energien | 10000 Berlin | 10000 Berlin



**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

Von-der-Heydt-Str. 2
10785 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 zahlreiche umwelt- und energietechnische Projekte mit deutschen und internationalen Partnern, bei denen das Ziel verfolgt wird, funktionierende Strukturen in den jeweiligen Ländern (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 Projektanbahnungen und -implementierungen
- Planung und Optimierung von abfall- und energietechnischen Anlagen
- Wissenschaftliche Begleitung von Projekten (Forschung, Entwicklung und Gutachtertätigkeit)
- 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

ENVERO GmbH
Zur Mooskuhle 3
18059 Rostock
Germany

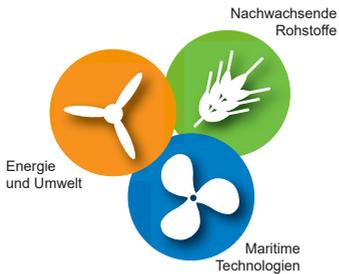
Fon +493814033895
Fax +493814033797
www.envero.eu
info@envero.eu

Deutsche Bank Rostock
BLZ 13070024
KTO 114243900
StNr. 079 10806097
Amtsgericht Rostock
HRB 10913

BIC (SWIFT)
DEUTDEBROS
IBAN DE93
1307 0024 0114243900

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: Nachhaltige 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, Wachsende 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/Holzminde/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

☎ +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

☎ +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 Fallingbommel

☎ +49 (0)5162.8850-474 | 📠 +49 (0)5162.9856 297

✉ heidekreis@3-n.info | 🌐 www.3-n.info

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.



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
- Netzworfbildung (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 Öl- 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 Aufgabengebiete:

✓ Politische Interessenvertretung in nationalen und internationalen Gremien

✓ Optimierung der landwirtschaftlichen Produktion durch Forschungsförderung und Unterstützung des Sortenprüfwesens

✓ 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-Waldoff-Straße 7, 10117 Berlin
Tel. (030) 235 97 99-0 Fax. (030) 235 97 99-99 E-Mail: info@ufop.de

www.ufop.de

18. ROSTOCKER BIOMASSEFORUM

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 Klimaschutz – geleistet.

Team

Für die laufenden Arbeiten steht ein interdisziplinäres Team, bestehend aus Ingenieuren, Agrar- und Wirtschaftswissenschaftlern, Technikern, Doktoranden sowie studentischen Mitarbeitern, 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 Ecksteinen unserer Arbeit. Zu den eigenen nationalen und internationalen Veranstaltungen gehören u.a.:

- Dialog Abfallwirtschaft M-V
- Rostocker Biomasseforum
- Internationale Umweltkonferenzen in Europa, Asien, Afrika
- Aus- und Weiterbildungsangebote für Fach- und Führungskräfte auf internationaler Ebene, z.B. arabischer und asiatischer Raum, Südamerika, zunehmend in Afrika

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 Praxisanlagen für Projektpartner an den jeweiligen Standorten im In- und Ausland betrieben und wissenschaftlich begleitet.

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 Sekundärrohstoffen
- Mechanisch-biologische Abfallbehandlung (MBA)
- Deponietechnik und -betrieb
- Aufbereitung und Verwertung fester Bioenergieträger
- Einsatz, Verwertung und Entsorgung von Biopolymeren
- Umwelttechnologietransfer, Schwerpunkt Schwellen- und Entwicklungsländer
- Wasserstoff aus bzw. mit Biomasse

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 im Jahr 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 technische Lösungen sowie 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 Mitarbeitenden des DBFZ umfassend analysiert und Gestaltungsansätze vorausschauend entwickelt. Mit der Arbeit des DBFZ 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 Forschungsschwerpunkte orientieren sich an aktuellen und zukünftigen forschungspolitischen Herausforderungen und Rahmenbedingungen (z.B. der nationalen Bioökonomiestrategie, der Mobilitäts- und Kraftstoffstrategie, dem EU Green Deal und der künftigen nationalen Biomassestrategie). Wichtige Eckpunkte für die wissenschaftliche Ausrichtung der Forschungsschwerpunkte sind außerdem die förderpolitischen Rahmenbedingungen, die Alleinstellungsmerkmale in der Forschungslandschaft sowie die sehr gute infrastrukturelle Ausstattung des DBFZ.

Die Forschungsschwerpunkte des DBFZ

- Systembeitrag von Biomasse
Ansprechpartner: Dr. rer. nat. René Backes
- 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: Prof. Dr. rer.nat. Ingo Hartmann



Kontakt

DBFZ Deutsches Biomasseforschungszentrum gemeinnützige GmbH

Torgauer Str. 116 | 04347 Leipzig

☎ +49 (0)341 2434-112 | ✉ 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 (Gülzow)
- Institut für Tierproduktion (Dummerstorf)
- Institut für Fischerei (Rostock, Born, Hohen Wangelin)
- Gartenbaukompetenzzentrum (Gülzow)

Die LFA ist eine nachgeordnete Einrichtung des Ministeriums für Klimaschutz, Landwirtschaft, ländliche Räume und Umwelt Mecklenburg-Vorpommern. 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:

- Wasserrahmenrichtlinie und Nährstoffeffizienz
- Ressourceneffizienz und Klimaschutz
- Zukunftsorientierte Tierhaltung
- Ökologischer Landbau
- Gartenbau und Sonderkulturen
- Biostatistik und Sortenwesen
- Aquakultur
- Fischereimanagement der Binnen- und Küstengewässer
- Agrarökonomie

Kontakt

Landesforschungsanstalt für Landwirtschaft und Fischerei

Mecklenburg-Vorpommern (LFA)

Dorfplatz 1/OT Gülzow – 18276 Gülzow-Prüzen

☎ +49 (0)385.588-0 | ✉ poststelle@lfa.mvnet.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 Wloczyk

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.

Ostseeverseuchung 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 aerobiologischen 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 Schwimmschlamm-Bildung.

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 Mashkook

Untersuchungen zur Adsorption und biologischen Aktivität an Aktivkohlefilter 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 Milchsäurebakteriensilierungsmittel

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

Spurenelementkonzentrationen 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 Körstel

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 – **K**ommunale **G**ewässer **G**emeinschaftlich **E**ntwickeln

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 Ölhavarievorsorge 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

Band 95

14. Rostocker Bioenergieforum und 19. DIALOG Abfallwirtschaft MV
Tagungsband, erschienen im Juni 2020, ISBN 978-3-86009-507-2
DOI: https://doi.org/10.18453/rosdok_id00002650

Band 96

Safwat Hemidat
Feasibility Assessment of Waste Management and Treatment in Jordan
Dissertation, erschienen im Juli 2020, ISBN 978-3-86009-509-6

Band 97

Andreas Heiko Metzging
Verdichtung von ungebundenen Pflasterdecken und Plattenbelägen -
Untersuchungen zur Lagerungsdichte des Fugenmaterials
Dissertation, erschienen im Juli 2020, ISBN 978-3-86009-510-2
DOI: https://doi.org/10.18453/rosdok_id00002742

Band 98

Ying Zhou
Research on Utilization of Hydrochars Obtained by the Organic Components of
Municipal Solid Waste
Dissertation, erschienen im November 2020, ISBN 978-3-86009-515-7

Band 99

Mathias Gießler
Ein prozessbasiertes Modell zur wirtschaftlich-technischen Abbildung von
Abwasserunternehmen – Beispielhafte Anwendung für eine ländliche Region
mit Bevölkerungsrückgang
Dissertation, erschienen im November 2020, ISBN 978-3-86009-516-4
DOI: https://doi.org/10.18453/rosdok_id00002790

Band 100

Dodiek Ika Candra
Development of a Virtual Power Plant based on a flexible Biogas Plant and a
Photovoltaic-System
Dissertation, erschienen im Dezember 2020, ISBN 978-3-86009-518-8
DOI: https://doi.org/10.18453/rosdok_id00002814

Band 101

Thomas Zeng
Prediction and reduction of bottom ash slagging during small-scale combustion
of biogenic residues
Dissertation, erschienen im Dezember 2020, ISBN 978-3-86009-519-5

Band 102

Edward Antwi

Pathways to sustainable bioenergy production from cocoa and cashew residues from Ghana

Dissertation, erschienen im Dezember 2020, ISBN 978-3-86009-520-1

DOI: https://doi.org/10.18453/rosdok_id00002818

Band 103

Muhammad Waseem

Integrated Hydrological and Mass Balance Assessment in a German Lowland Catchment with a Coupled Hydrologic and Hydraulic Modelling

Dissertation, erschienen im Januar 2021, ISBN 978-3-86009-521-8

DOI: https://doi.org/10.18453/rosdok_id00002884

Band 104

Martin Rinas

Sediment Transport in Pressure Pipes

Dissertation, erschienen im März 2021, ISBN 978-3-86009-523-2

DOI: https://doi.org/10.18453/rosdok_id00002962

Band 105

15. Rostocker Bioenergieforum

Tagungsband, erschienen im Juni 2021 ISBN 978-3-86009-524-9

DOI: https://doi.org/10.18453/rosdok_id00003024

Band 106

Jan Sprafke

Potenziale der biologischen Behandlung von organischen Abfällen zur Sektorenkopplung

Dissertation, erschienen im Oktober 2021, ISBN 978-3-86009-527-0

DOI https://doi.org/10.18453/rosdok_id00003118

Band 107

Mingyu Qian

The Demonstration and Adaption of the Garage - Type Dry Fermentation Technology for Municipal Solid Waste to Biogas in China

Dissertation, erschienen im Oktober 2021, ISBN 978-3-86009-528-7

Band 108

Haniyeh Jalalipour

Sustainable municipal organic waste management in Shiraz, Iran

Dissertation, erschienen im November 2021, ISBN 978-3-86009-526-3

https://doi.org/10.18453/rosdok_id00003116

Band 109

Michael Cramer

Umgang mit stark verschmutztem Niederschlagswasser aus Siloanlagen

Dissertation, erschienen im Dezember 2021, ISBN 978-3-86009-530-0

https://doi.org/10.18453/rosdok_id00003358

Band 110

16. Rostocker Bioenergieforum und 20. DIALOG Abfallwirtschaft MV

Tagungsband, erschienen im Juni 2022, ISBN 978-3-86009-535-5

DOI: https://doi.org/10.18453/rosdok_id00003615

Band 111

Fachtagung Wasserwirtschaft – Gute Stadt-Land-Beziehungen für eine nachhaltige Entwicklung in MV

Tagungsband, erschienen im Juni 2022, ISBN 978-3-86009-538-6

DOI: https://doi.org/10.18453/rosdok_id00003915

Band 112

Zelalem Abera Angello

Selection of Optimal Pollution Management Strategy for the Little Akaki River, Ethiopia, Based on Determination of Spatio-temporal Pollutant Dynamics and Water Quality Modeling

Dissertation, erschienen im Oktober 2022, ISBN 978-3-86009-542-3

https://doi.org/10.18453/rosdok_id00003948

Band 113

Qahtan Thabit

Hybrid waste Incineration – Solar Parabolic System with Thermal Energy Recovery in Sea water Disalination in MENA Region

Dissertation, im Druck, ISBN 978-3-86009-545-4

https://doi.org/10.18453/rosdok_id00004181

Band 114

17. Rostocker Bioenergieforum

Tagungsband, erschienen im Juni 2023, ISBN 978-3-86009-547-8

https://doi.org/10.18453/rosdok_id00004269

Band 115

Megersa Kebede Leta

Modeling Optimal Operation of Nashe. Hydropower Reservoir under LandUse Land Cover Changes in blue Nile River Basin, Ethiopia

Dissertation, ISBN 978-3-86009-548-5

https://doi.org/10.18453/rosdok_id00004427

Band 116

13. Rostocker Abwassertagung. Bewirtschaftung und Behandlung von Nieseschlagswasser.

Tagungsband, erschienen im November 2023, ISBN 978-3-86009-549-2

https://doi.org/10.18453/rosdok_id00004432

Band 117

Semaria Moga Lencha

Estimating pollutant fluxes and their impact on Lake Hawassa in Ethiopia's Rift Valley basin based on combined monitoring and modelling

Dissertation, ISBN 978-3-86009-550-8

https://doi.org/10.18453/rosdok_id00004446

Band 118

Fabian Gievers

Vergleichende Untersuchungen und Bilanzierungen von Prozessketten zur Herstellung und Nutzung von Biokohlen aus Klärschlämmen

Dissertation, ISBN 978-3-86009-551-5

https://doi.org/10.18453/rosdok_id00004455

Band 119

Tim Jurisch

Untersuchungen hydraulischer Eigenschaften von Baggergut im Deichbau am Beispiel des Rostocker Forschungsdeiches

Dissertation, ISBN 978-3-86009-552-2

https://doi.org/10.18453/rosdok_id00004489

Band 120

Projekt PROSPER-RO

Prospektive Synergistische Planung von Entwicklungsoptionen in Regiopolen am Beispiel des Stadt-Umland-Raums Rostock.

Abschlussbericht, erschienen im Februar 2024, ISBN 978-3-86009-553-9

https://doi.org/10.18453/rosdok_id00004532

Band 121

Roberto Eloy Hernández Regalado

Optimization of the efficiency and flexibility of agricultural biogas plants by integrating an expanded granular sludge bed reactor

Dissertation, ISBN 978-3-86009-554-6

https://doi.org/10.18453/rosdok_id00004560

Band 122

Clement Owusu Prempeh

Generation of biogenic silica from biomass residues for sustainable industrial material applications

Dissertation, ISBN 978-3-86009-555-3

https://doi.org/10.18453/rosdok_id00004559

Band 123

Frauke Kachholz

Model-based Generation of High-Resolution Flood Flow Characteristics for Small Ungauged Streams in the Northeast German Lowlands

Dissertation, ISBN 978-3-86009-556-0

https://doi.org/10.18453/rosdok_id00004530

Schriftenreihe Umweltingenieurwesen

Agrar- und Umweltwissenschaftliche Fakultät

Band 124

Tagungsband

18. Rostocker Biomasseforum

20. und 21. Juni 2024

Veranstalter

Universität Rostock

Landesforschungsanstalt für Landwirtschaft und Fischerei MV

Deutsches Biomasseforschungszentrum gemeinnützige GmbH

Bd.
124



18 . ROSTOCKER BIOMASSEFORUM