

Schriftenreihe Umweltingenieurwesen

Band 131

Tagungsband

19. ROSTOCKER BIOMASSEFORUM

Veranstalter

Universität Rostock

Landesforschungsanstalt für Landwirtschaft und Fischerei MV

Deutsches Biomasseforschungszentrum gemeinnützige GmbH

am 19. und 20. Juni 2025

Professur

Abfall- und Stoffstromwirtschaft

Fakultät für Agrar, Bau und Umwelt

Tagungsband zum 19. Rostocker Biomasseforum

HERAUSGEBER

Prof. Dr. Michael Nelles
Universität Rostock
Fakultät für Agrar, Bau und Umwelt
18051 Rostock

CIP-KURZTITELAUFNAHME

19. Rostocker Biomasseforum
Universität Rostock
Fakultät für Agrar, Bau und Umwelt
Rostock, 2025

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

ISBN 978-3-86009-570-6

DOI https://doi.org/10.18453/rosdok_id00004784

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

*Michael Nelles, René Backes, Karl-Friedrich Cyffka, Arne Gröngröft,
Peter Kornatz, Volker Lenz*

Die künftige Rolle der zirkulären Bioökonomie in der Kreislaufwirtschaft Verwertung biogener Abfälle und Reststoffe – Kohlenstoffquelle, Bioenergie & negative Emissionen	13
---	----

Volker Lenz

Klimaneutrale biobasierte Wärmeversorgung	33
---	----

Martin Maslaton

Aktuelle rechtliche Rahmenbedingungen, Rechtsprechung und Entwick- lungen – unter besonderer Berücksichtigung neuester EEG-rechtlicher Änderungen im Zusammenhang mit der Förderung von Biogasanlagen.....	45
--	----

*Roman Adam, Ludwig Bork, Hans Werner, Sophie Hirschelmann,
Uta Berghöfer*

MOOReturn – Moor-Klimaschutz und Wertschöpfung verbinden durch Wiedervernässung und Paludikultur	51
---	----

Hartwig Kalhöfer, Thomas Zeng

Auf dem Weg zur klimaneutralen Wärmeversorgung – Die Rolle der kommunalen Wärmeplanung und nachhaltiger Bioenergie im Erzeugungsportfolio der Leipziger Stadtwerke.....	65
---	----

Claudia Ellgoth

Eine Region macht sich auf den Weg – Kommunale Wärmeversorgung durch Biomasse und Wasserstoff	69
--	----

Marco Zühlke

Nationale Umsetzung der RED III im Verkehrssektor	75
---	----

Anika Neumann, Fanny Langschwager, Ulrike Schümann, Bert Buchholz
Hydriertes, biomassebasiertes Pyrolyseöl – eine Alternative
zu konventionellen Marinekraftstoffen?

	83
--	----

Dirk Hollmann, Minh Le Tuan Nguyen

Mehr als nur Abfall: Biologisch abbaubare Folien auf Zellulosebasis aus Bioreststoffen im Rahmen eines Cradle-to-Cradle-Ansatzes	95
---	----

Guido Reinhardt, Maximilian Breyer

Ungenutzte nachhaltige Biomasse kann enorme Mengen CO₂ einsparen:
Eine Synopse am Beispiel der Reststoffe aus der Palmölproduktion 101

Fachforum Biogas

Jessica Hudde

VisuFlex– flexibilisierte Biogasanlagen sichern die Energiewende ab..... 113

*Jan Sprafke, Hans Korte, Jana-Nigeri Zielonka, Abdullah Juma Al-Saadi,
Michael Nelles*

Erkenntnisse aus dem Projekt Biogas-Kohle 123

Markus Daldrup, Dietmar Ramhold

Entwicklung einer praxisnahen Methode zur Prüfung der schnellen
Wirksamkeit von Eisenprodukten..... 133

Frederik Bade, Marvin Ranjit, Lucie Moeller

Einfluss der Eigenschaften des Gärmaterials auf die Schaumbildung
bei der Vergärung von Triticale 139

Laura García Laverde, Ronja Wollnik

Marktdurchdringung von Biomethan in Europa: Herausforderungen,
Chancen und strategische Ausrichtungen 151

Paul Stopp, Jakub Krajewski

Kombinierte Vergärung von vorbehandelten stickstoffhaltigen Wirtschafts-
düngern 163

Fachforum Organische Abfälle

Hinnerk Bormann, Ludger Wahrheit, Stefan Vodegel

Vorstellung eines neuen Verfahrens zur Hochtemperaturpyrolyse
und -vergasung von organischen Rest- und Abfallstoffen 175

Cintha Lara, Ewald Kramer, Jan Sprafke, Alberto Bezama, Michael Nelles

Einfluss der Siliermittelapplikation auf den Carbon Footprint von Maissilage.. 183

Björn Schwarz

Projekt IRRMA – Interkommunales Reststoffmanagement – Potenziale
und Herausforderungen für Grasmahd und Grünschnitt..... 193

Eric Franke, Andreas Herrmann, Felix Baitalow, Martin Gräbner

Bewertung von Vergasungsverfahren zur stofflichen Nutzung
von Klärschlamm..... 205

Kurzbeiträge

Hartmann Hieber, Bernd Stollberg

Robuste One-Site-Gasmesstechnik für Biogasprozesse – Charakterisierung der Prozesskinetik mittels dynamischer Sensorsignalfunktionen219

Susanne Henne, Daniel Schiller

Entwicklung und Erprobung ganzheitlicher Nachhaltigkeitschecks für Geschäftsmodelle und Wertschöpfungssysteme in Bioökonomie-regionen (NaGeWe-Bio)..... 225

Marco Selig, Kim Schmidt

Digitale Erschließung geeigneter Nutzungspfade für Biomasse 235

KOOPERATIONSPARTNER247

DIE VERANSTALTER261

In dieser Reihe bisher erschienen 269

Das 19. 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 sichere und nachhaltige energetische und stoffliche Wertschöpfungsketten sind. Das gesetzlich festgeschriebene Ziel der Klimaneutralität lässt sich in Deutschland bis 2045 nur erreichen, wenn der deutschlandweite Ressourcen- und Energieverbrauch massiv verringert, ein 100 % Erneuerbare-Energien-System aufgebaut und eine wirkliche Kreislaufwirtschaft implementiert werden. Die nachhaltige kombinierte stoffliche und energetische Nutzung von Biomasse kann und muss hier einen wesentlichen Beitrag leisten.

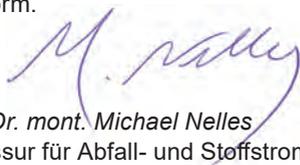
Das ambitionierte Ziel der langfristigen Integration von Biomasse – und hier insbesondere der biogenen Abfälle und Reststoffe – in ein nachhaltiges Energie- und Bioökonomiesystem ist nur erreichbar, wenn diese effizient, umweltverträglich und mit höchstmöglichem volkswirtschaftlichem Nutzen eingesetzt wird. Neue Technologiekonzepte und Formen der stofflichen und energetischen Kaskadennutzung werden ebenso benötigt wie „negative“ Emissionen.

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.

Im Rahmen des Biomasseforums werden relevante Entwicklungen diskutiert und wir freuen uns auf die Vorträge zu den diesjährigen Schwerpunktthemen „stoffliche und energetische Verwertung von Biomassen, einschließlich organischen Abfällen“, „klimaneutrale, biobasierte Wärmeversorgung“, „kommunale Wärmeplanung“, „biobasierte Kraftstoffe“ und „Bioökonomie“.

In Mecklenburg-Vorpommern aber auch in anderen Bundesländern existieren bereits gute Beispiele in der Praxis, die neben den wissenschaftlichen Forschungsergebnissen präsentiert und diskutiert werden sollen. Insbesondere das direkte Gespräch zwischen Forschern, Praktikern und Politikern soll zu einem Erkenntnisgewinn für alle und zu neuen Lösungsansätzen führen.

Das seit Jahren 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, René Backes, Karl-Friedrich Cyffka,
Arne Gröngröft, Peter Kornatz, Volker Lenz

Die künftige Rolle der zirkulären Bioökonomie in der Kreislaufwirtschaft

Verwertung biogener Abfälle und Reststoffe – Kohlenstoffquelle, Bioenergie & negative Emissionen

Zusammenfassung: Deutschland hat zum Ziel, bis 2045 klimaneutral zu werden. Dies setzt voraus, den Material- und Energieverbrauch erheblich zu verringern und sich auch sonst nachhaltiger aufzustellen, denn die Klimaneutralität basiert auf zwei wesentlichen Säulen: zum einen die Umstellung der Energieversorgung vollständig auf Erneuerbare Energien, d.h. Wind- und Solarenergie, Bioenergie, Geothermie und Wasserkraft, zum anderen die Entwicklung der noch mehrheitlich linearen Wertschöpfungsketten zu einer wirklichen Kreislaufwirtschaft. Beide Transformationen stehen global am Anfang, aber auch in Deutschland haben wir noch einen langen Weg vor uns. Daher müssen wir zusätzlich CO₂-Senken (Negativemissionen) generieren. Die zentrale Herausforderung (technisch, ökologisch und ökonomisch) für die Versorgung der Wirtschaft mit organischen Grundstoffen liegt darin, möglichst weitgehend von petro- auf biobasierte, zirkuläre (Recycling-)Kohlenstoffquellen umzustellen. Dabei spielt die stofflich-energetische Verwertung biogener Abfälle und Reststoffe eine besondere Rolle und die Optimierung derselben ist ein wesentlicher Arbeitsschwerpunkt des Deutschen Biomasseforschungszentrums (DBFZ) in Leipzig in enger Zusammenarbeit v.a. mit der Universität Rostock. Im vorliegenden Beitrag werden der aktuelle Stand der stofflichen und energetischen Verwertung biogener Abfälle und Reststoffe in Deutschland erläutert und erforderliche Entwicklungen für die o.g. Transformationen dargestellt.

Anmerkung: Dieser Beitrag wurde bereits in der Aprilausgabe von M&A – Fachzeitschrift für Kreislauf- und Ressourcenwirtschaft veröffentlicht und für den Tagungsband zum Rostocker Biomasseforum lediglich die Einleitung aktualisiert [32].

Abstract: Germany aims to become climate-neutral by 2045. This will require us to significantly reduce consumption of materials and energy, and to become a more sustainable society in general: climate neutrality is based on two main pillars, an energy supply based entirely on renewables (wind, solar, bio- and geothermal energy, and hydropower) and a transformation of today's mainly linear economy to a truly circular one. Both transformations are still in their infancy not just at global scale, but Germany also has a long way to go as yet. CO₂ sinks (negative emissions) will therefore be needed as well. In supplying industry with organic raw materials, the key challenge is to shift from petro-based to bio-based, circular (recycled) carbon sources. It will be essential to use biogenic wastes and residues for materials and energy in an optimal way – and this exactly is one major focus of work of the DBFZ (Deutsches Biomasseforschungszentrum, German Biomass Research Centre) in Leipzig,

in close cooperation especially with University of Rostock. This article summarises how biogenic wastes and residues are currently used for material and energy in Germany, and which developments are required in order to achieve the abovementioned transformation.

Note: The article was already published in the April issue of M&A - Fachzeitschrift für Kreislauf- und Ressourcenwirtschaft and only the introduction was updated for the conference proceedings of the Rostock Biomass Forum [32].

Einleitung

Vor dem Hintergrund der aktuellen Kriege und anderen gewalttätigen Auseinandersetzungen scheinen die Klima- und Umweltprobleme nicht mehr so wichtig zu sein. Dies ist zwar verständlich, aber dieser Schein trügt!

Wenn wir auf diesem Globus langfristig (über)leben wollen, müssen wir den Ressourcenverbrauch stark verringern. Das ist nun wirklich keine neue Erkenntnis und hier sieht das aktuelle Zwischenfazit weder international noch auf nationaler Ebene gut aus. Der „Erdüberlastungstag“ ist der Tag im Jahr, wo wir die verfügbaren natürlichen Ressourcen verbraucht haben. Im Jahr 2025 wird dies global gesehen Anfang August sein und in Deutschland haben wir bereits am 2. Mai die uns zur Verfügung stehenden Ressourcen für 2025 verbraucht [1]. In Deutschland ist der ökologische Fußabdruck somit viel zu hoch und wenn alle Menschen so leben würden, bräuchten wir 3 Erden!

Deshalb ist die Transformation in eine klimaneutrale Gesellschaft eine der zentralen globalen Zukunftsaufgaben und dafür brauchen wir insbesondere Folgendes:

Klimaneutrale Gesellschaft = Suffizienz + Erneuerbare Energien + Kreislaufwirtschaft

Suffizienz ist eine dringend notwendige Strategie zur Reduktion von Produktion und Konsum sowie deren Umsetzung, u.a. durch Verhaltensänderungen, da sich die Transformation eben nicht nur durch technische Innovationen erreichen lässt. Der EE-Anteil im Energiesystem Deutschlands liegt bei rund 20 % [2] und die Zirkularitätsrate (CMU), d.h. der Anteil der anfallenden Abfälle und Reststoffe in Produktionsprozessen, beträgt lediglich rund 14 % [3]. In Umfragen sind wir ja gerne Weltmeister in Sachen Klima- und Ressourcenschutz, aber in der Praxis klemmt es dann doch gewaltig.

Trotz der o.g. nationalen Unzulänglichkeiten lässt sich im internationalen Vergleich festhalten, dass Deutschland nach wie vor zu den führenden Ländern in der Abfall- und Kreislaufwirtschaft gehört und diese maßgeblich zum Ressourcen- und Klimaschutz beiträgt. So ist die Abfallwirtschaft z.B. der erfolgreichste Sektor bei der Verringerung der CO₂-Emissionen seit 1990. Hinzu kommt, dass viele positive Effekte nicht der Abfallwirtschaft angerechnet werden, sondern

der Energiewirtschaft oder anderen Sektoren, denen die Entsorgungsbranche Sekundärbrennstoffe und -ressourcen zur Verfügung stellt.

Ein klimaneutrales Deutschland im Jahr 2045 wird es nur mit erheblicher Verringerung des Material- und Energieverbrauchs geben, d.h. mit signifikanten Effizienzsteigerungen und Konsumverzicht. Darauf aufbauend sind die Umstellung der Energieversorgung vollständig und in allen Sektoren auf erneuerbare Energien (EE) und zusätzliche negative Emissionen erforderlich. Zentral ist aber die Weiterentwicklung unseres „linearen“ Wirtschaftssystems zu einer wirklichen Kreislaufwirtschaft. Leider ist der Koalitionsvertrag der neuen Regierung hier wenig ambitioniert. Es wird zwar am Ziel der Klimaneutralität bis 2045 festgehalten aber die dafür notwendigen Maßnahmen zur Umsetzung sind in dem Regierungsprogramm für die Jahre 2025 bis 2028 leider nicht zu finden. Vor diesem Hintergrund ist festzuhalten, dass wir sowohl bei der „Energiewende“ als auch bei der „Rohstoffwende“ erst am Anfang eines langen Weges stehen, während die Ziellinie „klimaneutrales Deutschland bis 2045“ im Klimaschutzgesetz klar festgelegt ist.

Die Bundesregierung hat in den letzten Jahren mit mehreren Novellierungen des Klimaschutzgesetzes [4] einen sog. „Generationenvertrag für das Klima“ [5] geschaffen. Dieser sieht vor, die deutschen Treibhausgasemissionen bis 2030 um mindestens 65 % und bis 2040 um 88 % gegenüber 1990 zu senken. 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. An dieser Zielsetzung hält auch die neue Regierung fest, spielt mit dem Koalitionsvertrag aber auf Zeit bei der Festlegung und Umsetzung der notwendigen Maßnahmen!



Abb. 1: Stark vereinfachte Darstellung der künftigen Energieversorgung und (biobasierten) Kreislaufwirtschaft als zentrale Bausteine für eine klimaneutrale Gesellschaft, DBFZ.

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. 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 den Bedarf an einer nachhaltigen Kaskaden- und Koppelnutzung in Zukunft deutlich verstärken.

Als wesentliche Basis für den Transformationsprozess zu einer nachhaltigen, zirkulären biobasierten Wirtschaft bzw. Gesellschaft hatte sich die letzte Bundesregierung im Koalitionsvertrag von 2021 vorgenommen, eine Nationale Biomassestrategie (NABIS) zu erarbeiten. Die Entwicklung der NABIS wurde federführend von 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 [6]. 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 und Leitplanken in der NABIS festgeschrieben werden. Allerdings sollten bei der Umsetzung der NABIS kleinteilige Regelungen vermieden werden, da diese typisch deutsche Herangehensweise zu sehr hohen volkswirtschaftlichen 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 errei-

chen kann noch ob und ggf. wann diese beschlossen wird. Nach der inzwischen abgeschlossenen Regierungsbildung wird man sehen, ob die NABIS überhaupt noch kommt oder die Inhalte in die aktualisierende Nationale Bioökonomiestrategie integriert werden?!

Es ist aber klar, dass der Einstieg in die angestrebte zirkuläre Bioökonomie nur gelingen kann, 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 das sind auch die zentralen Arbeitsschwerpunkte im Rahmen der Kooperation des DBFZ mit dem Lehrstuhl für Abfall- und Stoffstromwirtschaft an der Universität Rostock.

Vor diesem Hintergrund werden im Folgenden zunächst die Potenziale und aktuelle Nutzung der biogenen Abfälle und Reststoffe dargestellt. Anschließend werden der aktuelle Stand sowie die notwendigen Entwicklungen für die Teilbereiche „Alt- und Restholz“, „Biogastechnik“, „Biokraftstoffe und Bioraffinerien“ sowie „Negative Emissionen“ erläutert.

Anmerkung: Der Beitrag wurde bereits in der Aprilausgabe von M&A – Fachzeitschrift für Kreislauf- und Ressourcenwirtschaft veröffentlicht und für den Tagungsband zum Rostocker Biomasseforum lediglich die Einleitung aktualisiert [32].

Potenziale und Nutzung biogener Abfälle und Reststoffe in Deutschland

Um das Aufkommen und die Verfügbarkeit biogener Ressourcen als eine entscheidende Grundlage für die Bewertung von Chancen und Risiken der bestehenden und potenziellen Nutzung zu berücksichtigen, entwickelt das DBFZ für verschiedene geographische Regionen Rohstoffmonitoringsysteme, implementiert sie und macht sie in standardisierten Formaten verfügbar. Berücksichtigt werden aktuell 77 verschiedene biogene Reststoffe aus zahlreichen Sektoren. Alle Ergebnisse inkl. deren Dokumentation stehen für eine individuelle Datenauswertung in einer Online-Datenbank im DE-Biomassemonitor zur Verfügung, die unter <https://datalab.dbfz.de> erreichbar ist. Enthalten sind Nebenprodukte aus der Land- und Forstwirtschaft, Siedlungsabfälle, Klärschlamm, industrielle Reststoffe sowie Reststoffe von sonstigen Flächen. Auf dieser Grundlage beläuft sich das jährliche anfallende technische Biomassepotenzial in Deutschland auf rund 91,7 bis 128,9 Mio. t Trockenmasse (tTM) im Jahr 2020. Zwischen 68 und 83 % befinden sich bereits in einer stofflichen und/oder energetischen Nutzung. Das DBFZ geht davon aus, dass neben der Optimierung der bestehenden Nutzung noch eine Menge von 15,7 bis 41,8 Mio. tTM für weiterführende Anwendungen mobilisiert werden kann. Eine Stoffstromaggregation der jährlich anfallenden biogenen Abfälle und Reststoffe ist in 2 für das Jahr 2020 und die Mittelwerte der oben beschriebenen Bandbreiten dargestellt.

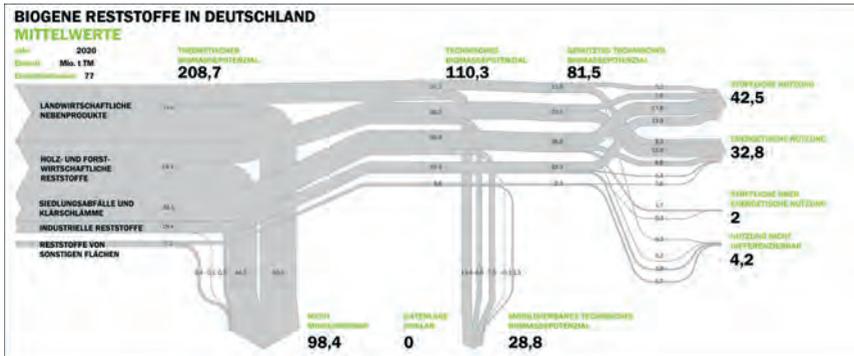


Abb. 2: Aggregierter Stoffstrom von biogenen Reststoffen, Nebenprodukten und Abfällen als Mittelwerte in Millionen Tonnen Trockenmasse (Mio. tTM),
 Quelle: DBFZ-Ressourcendatenbank, <https://datalab.dbfz.de>

Hierbei ist hervorzuheben, dass die Mengen als Trockenmasse (TM) angegeben werden. Das heißt die real zur Verwertung anfallenden Mengen sind wesentlich höher. Beispielsweise fallen allein bei der Tierhaltung in Deutschland im Mittel als technisches Potenzial 17,6 Mio. tTM pro Jahr in Form von Rinder- und Schweinefestmist, Rinder- und Schweinegülle sowie Hühnertrockenkot etc. an, wobei die Menge Feuchtmasse (FM) je nach TS-Gehalt des jeweiligen tierischen Exkremments weitaus höher (bis zu Faktor 7) liegt. Durch geringe Trockenmassegehalte (z.B. 4-8 % bei Schweinegülle) ergeben sich für die Erschließung noch verfügbarer Einsatzstoffe besondere Herausforderungen auf Grund der geringen Transportwürdigkeit [7].

Biogene Abfälle und Reststoffe setzen sich aus einem sehr breiten Spektrum verschiedener Stoffströme zusammen und die Ressourcenwirtschaft wird, insbesondere außerhalb des Abfallrechts, schon heute sehr differenziert umgesetzt. Die o.g. sehr großen Mengen an biogenen Reststoffen, die bereits heute unabhängig von den kommunalen Mengen aus privaten Haushalten und Gewerbe getrennt erfasst werden, werden in vielfältigen Folgenutzungen verwertet. Beispielsweise gibt es für Schlachtabfälle sehr differenzierte Verwertungsverfahren, die in der Pharma- oder der Futter- und Lebensmittelindustrie enden und zur Substitution von sogenannten Primärrohstoffen beitragen. Große Mengen fallen auch in der Agrar- und Fischwirtschaft und in deren verarbeitenden Wertschöpfungsstufen an. Auch die Produktionsrückstände aus der Nahrungsmittelindustrie werden in ähnlicher Weise wieder für Futtermittelherstellung oder als Grundlage für weitere Produktionsprozesse eingesetzt.

Stoffströme, die sich nicht zu hochwertigen Produkten verarbeiten lassen, werden als Basis für die Umwandlung zu Biogas, festen oder flüssigen Biokraftstoffen, Elektrizität oder Wärme energetisch genutzt. In der klassischen Abfallwirtschaft und der Öffentlichkeit werden meist nur die kommunalen Bioabfälle aus den Haushalten, Garten- und Parkanlagen betrachtet und diskutiert. Mit

rund 14 Mio. tTM (Mittelwert) technisches Potenzial bilden diese mengenmäßig einen bedeutenden, aber keinesfalls dominierenden Teil der biogenen Abfälle und Reststoffe insgesamt. Besondere Bedeutung haben sie vielmehr innerhalb der Siedlungsabfälle, sowohl für die Siedlungshygiene als auch die Erfüllung von spezifischen Recycling- und Verwertungsquoten.

Weitere mengenmäßig relevante biogene Abfälle und Reststoffe sind nachfolgend in Abb. 3 dargestellt. Im Jahr 2020 ergibt sich das technische Biomassepotenzial insgesamt vor allem aus 15 Biomassen, welche zusammen 93,7 Mio. tTM oder 85 % des gesamten technischen Potenzials der biogenen Abfälle und Reststoffe von 110,3 Mio. tTM ausmachen. Mengenmäßig sind dabei vor allem Altpapier (14,5 Mio. tTM), Grüngut (11,2 Mio. tTM) und Getreidestroh (9,7 Mio. tTM) hervorzuheben.

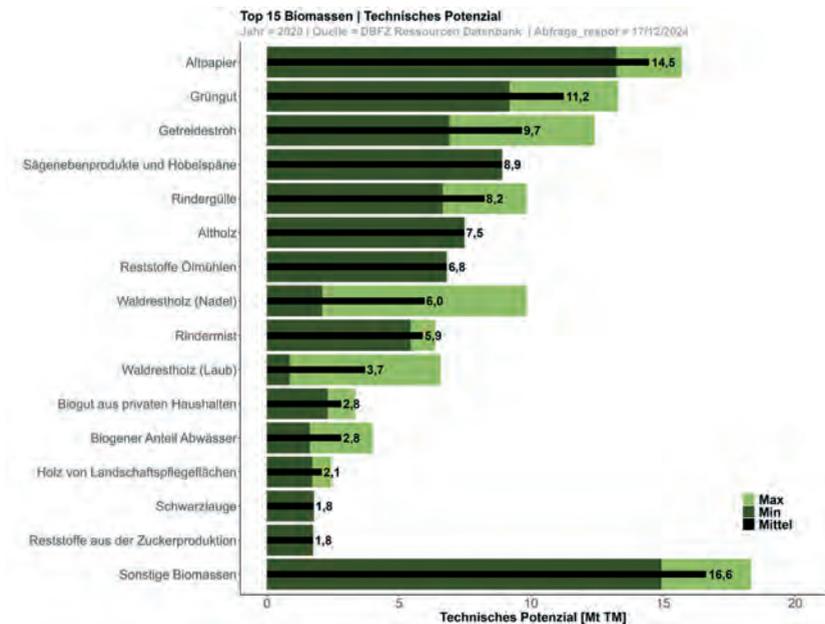


Abb. 3: Top 15 Biomassen des technischen Potenzials in 2020 nach Minimum, Maximum, und Mittelwert in Millionen Tonnen Trockenmasse (Mio. tTM),
 Quelle: DBFZ-Ressourcendatenbank, <https://datalab.dbfz.de>

Neben tierischen Exkrementen sind es jedoch vor allem holzartige Reststoffe und Nebenprodukte, welche unter den Top 15 Biomassen stark vertreten sind. Die fünf Biomassen aus dem Sektor Holz- und forstwirtschaftliche Nebenprodukte, also Sägenebenprodukte und Hobelspäne, Altholz, Waldrestholz Nadel, Waldrestholz Laub und Schwarzlauge, machen in Summe 27,9 Mio. tTM bzw. 29 % des technischen Potenzials aus. Es ist jedoch darauf hinzuweisen, dass relevante Mengen dieser Potenziale bereits in Nutzung sind. So werden 76 %

(Mittelwert) der fünf Biomassen aus dem Sektor Holz- und forstwirtschaftliche Nebenprodukte bereits stofflich bzw. energetisch verwertet. Dabei bestehen mobilisierbare Potenziale nur bei Waldrestholz (Nadel und Laub), da Sägenebenprodukte und Hobelspäne, Altholz und Schwarzlauge bereits vollständig in Nutzung sind. Eine stärkere Nutzung von Waldrestholz gilt es jedoch insbesondere mit Blick auf perspektivische Nachhaltigkeitsanforderungen (z.B. EU-Vorgaben zu Biodiversität und Senkenzielen (LULUCF)) zu hinterfragen, diese könnten eine Entnahmefähigkeit je nach Standort in Zukunft einschränken. Jedoch bestehen auch bei Sägenebenprodukte und Hobelspäne, Altholz und Schwarzlauge erhebliche Potenziale für eine anderweitige Nutzung, da bereits genutzte Mengen anders genutzt werden könnten. Insbesondere aufgrund der auslaufenden EEG-Förderung von Altholz könnten perspektivisch große Mengen (~ 50 % des Aufkommens in EEG-Förderung) anderweitig stofflich oder energetisch genutzt werden [8]. Aufgrund von zunehmenden Kaskadenfaktoren von Holz und steigenden stofflichen Holznutzungen durch z.B. Plastik-Einweg-Verbote und Holzbau-Initiativen ist davon auszugehen, dass das Aufkommen von Altholz bis 2030 weiter ansteigt [9].

Verwertung von Alt- und Restholz

Die Trennung zwischen Primärholz und Rest- und Altholz ist in der Praxis nicht immer einfach. Während für Altholz zumindest formal rechtlich eine Klassifizierung vorliegt, ist bei Resthölzern die Situation deutlich schwieriger. Letztlich bringt die praktische Anwendung die Unterscheidung durch Holzfraktionen (Stämme), die in einem Sägewerk verarbeitet werden, wobei in der Summe je nach Verarbeitungsverfahren 30 bis 50 % Rinde, Schwarten und Spreißel, Kappstücke, Säge- und Hobelspäne sowie Sägemehl als Resthölzer entstehen. Daneben fallen auch im Wald und der Landschaftspflege beim notwendigen Freischnitt, bei Durchforstungen, der Holzernte und bei der teilweise notwendigen Entnahme von Kalamitätenholz weitere Holzfraktionen an. Diese können nicht in der Sägewirtschaft verwertet werden, sondern werden bisher vor allem energetisch genutzt zugeführt und der Kategorie Resthölzer zugeordnet. Eine energetische Primärholznutzung findet vor allem dann statt, wenn sägefähiges Holz aus dem Forst zu Scheitholz für Endkunden verarbeitet wird – privat oder durch kommerzielle Holzaufbereiter. Grundsätzlich sind in Deutschland aber alle hier aufgezählten Kontingente dadurch charakterisiert, dass eine ökonomisch vorteilhaftere Nachfrage aus der stofflichen Nutzung bisher nicht zu verzeichnen ist. Hierbei ist zu berücksichtigen, dass Förderanreize (z.B. EEG oder Investitionsförderung für Holzfeuerungen) zu einer Verzerrung der wirtschaftlichen Situation zwischen stofflicher und energetischer Nutzung führen können. Umgekehrt konnte in der Vergangenheit aber auch beobachtet werden, dass ohne finanzielle Anreize für die energetische Nutzung die Preise im Holzbereich in der Kopplung von stofflicher und energetischer Nutzung derart fallen, dass die Holzbereitstellung zurückgefahren wurde. Dies würde zwar kurzfristig zu einer Zunahme des im Wald gespeicherten Kohlenstoffs führen, erhöht aber in absehbarer Zeit im Zuge des Klimawandels und des dann verschlepten Waldumbaus

das Risiko des klimaschädigenden Totalverlusts durch Waldbrände mit hohen Rußemissionen.

Resthölzer und Altholz werden bisher energetisch vor allem zur Voll- oder Grundlastversorgung mit Wärme und im Falle von Altholz zur Strombereitstellung in Altholzkraftwerken innerhalb des EEG eingesetzt. Die Feuerungsanlagen sind kostenintensiver als Gas- oder Ölf Feuerungen, sowohl in der Wärme als auch im Strom- und KWK-Bereich. Daher gilt es die höheren Investitionskosten durch eine möglichst hohe Auslastung der Anlage mit kostengünstigeren Holzbrennstoffen zu refinanzieren. Abgesehen von Holzpellets (in Deutschland zu über 90 % Restholz) werden Rinde, Holzhackschnitzel aus Sägewerksnebenprodukten oder Altholz und Schwarzlauge vor allem in größeren Anlagen (über 100 kWth, z.T. deutlich über 1 MW) eingesetzt. Zudem hat sich die energetische Nutzung von Rest- und Althölzern in der Industrie vor allem dort etabliert, wo diese Brennstoffe im Verarbeitungsprozess anfallen, d.h. in Sägewerken und der Holzverarbeitenden Industrie inkl. Papierherstellung. Aufgrund der Nachfrage nach Strom und Wärme für Koch- und Trocknungsprozesse liegen die benötigten Temperaturen meist unter 200 °C. Holzpellets werden im deutschsprachigen Raum vor allem im Endkundenbereich für Raumwärme mit max. 90 °C verwendet. In der Summe kommt es bei den Rest- und Althölzern vornehmlich zu einer energetischen Nutzung im unteren Temperaturbereich mit der Folge, dass die vorhandenen Kapazitäten nur für eine begrenzte Anzahl an Feuerungsanlagen ausreichen. Gleichzeitig lässt die Erarbeitung der gesetzlich geforderten kommunalen Wärmepläne erkennen, dass viele Wärmenetze zur Defossilisierung auf erhebliche Anteile und damit in Summe für Deutschland auf zu große Mengen an Holz setzen.

Insofern ist ein Umdenken und eine Transformation der Rest- und Altholznutzung unter dem Blick einer systemdienlichen Gesamtschau notwendig. (1) Es gilt die stofflichen Kaskaden zu verlängern. Hier bieten sich Säge- und Hobelspäne sowie Sägemehl als Rohstoff für chemische Grundrohstoffe an, da sie eine sehr homogene Ausgangsbiomasse mit deutlich unter 1 % Verunreinigungen (mineralische Aschen) darstellen. Rinde kann nachweislich als Ausgangsstoff für Torfersatzstoffe genutzt werden [10], wie auch Hackschnitzel aus verschiedenen Baumarten mit und ohne Behandlung in Biogasanlagen [11] [12]. Für diese naturbelassenen Biomassen ist auch eine Aufbereitung zu Einwegessensverpackungen und Einweggeschirr Standard. Im Bereich der Althölzer bietet sich für die Klassen A I bis A III die Herstellung von Bauelementen an, die je nach Altholzklasse (Arbeits- und Gesundheitsschutz) für den freien Handwerkervertrieb oder nur für den Einsatz im industriellen Kontext in Frage kommen. Nicht zuletzt gibt es Ansätze, Schwarzlauge für chemische Grundstoffe weitergehend zu nutzen, anstatt sie direkt thermisch zu verwerten [13]. Einen Überblick über die Optionen gibt Abb. 4.



Abb. 4: Entwicklungsoptionen für innovative Nutzungskonzepte für Rest- und Abfallhölzer.
Eigene Darstellung DBFZ

Immer da, wo eine energetische Nutzung aus technischen oder ökonomischen Gründen immer noch vorteilhaft erscheint, ist darauf zu achten einen maximalen Systemnutzen zu generieren. D.h. die Biomasse sollte vor allem in Spitzenlastanwendungen in Kombination mit anderen erneuerbaren Wärmeerzeugern (Hybride insbesondere mit Wärmepumpen) sowie in Hochtemperaturanwendungen, für die industrielle Prozesswärme eingesetzt werden [14]. Die hybriden Konzepte sollten so gestaltet sein, dass je nach Preissituation und Bereitstellung erneuerbaren Stroms flexibel die Anteile zwischen Biomasse und Strom (Umgebungswärme) verändert werden können. Mittelfristig sind Optionen für negative Emissionen zu integrieren. So könnte für die Materialien aus der Landschaftspflege, die häufig sehr inhomogen sind und auch eher lokal in kleineren Mengen anfallen, der Einsatz in kleinskaligen Pyrolyseanlagen zur Wärmeversorgung und Biokohlenherstellung ein zukünftiger Pfad sein. Neben der ggf. notwendigen Spitzenlastwärmeabdeckung entstehen hier zusätzlich langfristig stabile Biokohlen für stoffliche Anwendungen (z.B. Bodenverbesserer, Zuschlagstoffe für Straßenbau, Beton usw. [15] [16] [17]). Für A IV-Holz ist der Einsatz in Abfallheiz(kraft)werken weiterhin interessant, wobei zukünftig auch hier die Lagerfähigkeit der Biomasse und ein Fokus der Verbrennung in den Wintermonaten zur Wärmenetzversorgung anzustreben ist. Zudem gilt es mittelfristig in diesen eher sehr großen Anlagen auch eine CO₂-Abscheidung (BeCCS) vorzusehen. Vielversprechend dürfte in diesem Kontext insbesondere der Einsatz in der Zementindustrie sein, da diese aufgrund der prozessbedingten CO₂-Emissionen nicht an einer CO₂-Abscheidung vorbeikommen wird. Daneben können A I- und ggf. auch A II-Hölzer, so sie keine andere stoffliche Verwendung finden, für Spitzenlastheizwerke in Nahwärmenetzen aufbereitet werden, wobei auch hier mittelfristig Pyrolyseheizanlagen mit gleichzeitiger Biokohlenproduktion an Relevanz gewinnen sollten.

Biogastechnik zur Verwertung von biogenen Abfällen und Reststoffen

Die Biogastechnologie spielt eine wesentliche Rolle bei der nachhaltigen Verwertung von biogenen Abfällen und Reststoffen, insbesondere aus der Landwirtschaft und der Lebensmittelproduktion. Durch die anaerobe Vergärung werden organische Materialien unter Ausschluss von Sauerstoff von Mikroorganismen abgebaut, wobei Biogas entsteht, das hauptsächlich aus Methan und Kohlendioxid besteht. Diese Methode bietet nicht nur eine umweltfreundliche Energiequelle, sondern trägt auch zur Reduzierung von Treibhausgasemissionen bei, die bei der herkömmlichen Lagerung und Entsorgung, insbesondere von landwirtschaftlichen Reststoffen entstehen [18]. Bisher werden in Biogasanlagen vor allem Energiepflanzen (wie Silomais) und Wirtschaftsdünger (vornehmlich Gülle) eingesetzt [19]. So betrug die energiebezogene Einsatzmenge von nachwachsenden Rohstoffen im Jahr 2023 ca. 68 % und 19 % Wirtschaftsdünger. Kommunale Bioabfälle werden mit ca. 4 % und sonstige Abfallstoffe aus Industrie und Gewerbe mit ca. 9 % energiebezogen beziffert. Von 2010 bis 2023 ist festzustellen, dass der energiebezogene Anteil von nachwachsenden Rohstoffen zugunsten von Wirtschaftsdüngern und industriellen Reststoffen leicht abgenommen hat (siehe Abb. 5).

Dem Anbau von Energiepflanzen wird generell die Konkurrenz zur Nahrungsmittelproduktion zugeschrieben, sowie negative ökologische Folgen angenommen. Daher rückt in Politik und Gesellschaft die Nutzung von biogenen Abfällen und Reststoffen zunehmend in den Fokus. Die Nutzung dieser Einsatzstoffe soll die Konkurrenz um landwirtschaftliche Flächen mindern. Zu den in der Landwirtschaft anfallenden Reststoffen zählen unter anderem Gülle, Mist, Ernterückstände und Landschaftspflegematerialien. Landschaftspflegematerialien können jedoch Abfallcharakter haben, vor allem Straßenbegleitgrün, was für die rechtliche Stellung einer Biogasanlage ausschlaggebend ist und sich auf Auflagen und Genehmigungen auswirkt. Gülle und Mist sind besonders geeignete Substrate für die Biogaserzeugung, da sie kontinuierlich anfallen und durch ihre Vergärung die Emission von Methan, einem potenten Treibhausgas, reduziert werden kann [20]. Ernterückstände wie Stroh bieten weiteres Potenzial, werden jedoch häufig noch unzureichend genutzt, was vor allem am hohen Aufwand für Bergung und Vorbehandlung liegt. Durch physikalische, chemische oder biologische Vorbehandlungsverfahren kann die Struktur dieser Materialien aufgebrochen und somit für die Mikroorganismen besser zugänglich gemacht werden, was einerseits die Biogasausbeute aber auch die Handhabung im Prozess durch Verbesserung der Durchmischbarkeit mit Verminderung von Schichtbildung im Fermenter. Bei Stroh ist zudem die Nutzungskonkurrenz als Einstreu in der Tierhaltung gegeben, so dass Stroh je nach Region ein sehr kostenintensives Substrat mit Bezugskosten von durchschnittlich 120 €/t ist [21]. Das Beispiel zeigt, dass biogenen Abfälle und Reststoffe durchaus einen hohen Preis haben können, was der oft getroffenen Annahme der Kostenneutralität widerspricht. Hier ist eine Prüfung im Einzelfall erforderlich.

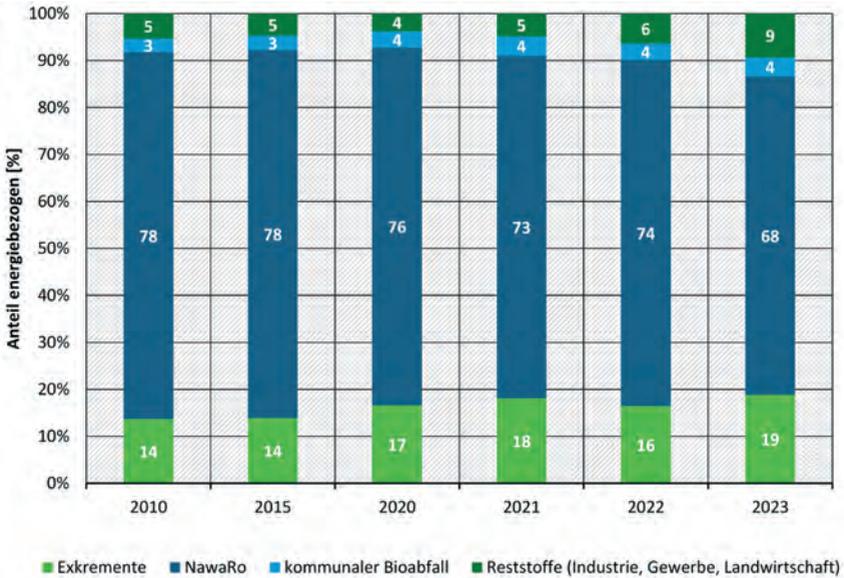


Abb. 5: Energiebezogener Substratinput in deutschen Biogasanlagen. DBFZ 2024.

Nichtöffentliche Datenbasis: DBFZ-Betreiberbefragungen der Jahre 2011, 2016, 2021-2024 (Bezugsgröße jew. Vorjahr).

Abfälle aus der Lebensmittelproduktion und der verarbeitenden Industrie für landwirtschaftliche Rohstoffe besitzen oft einen hohen Energiegehalt und sind daher gut für die Biogaserzeugung geeignet. Hier fallen erhebliche Mengen an biogenen Abfällen und Reststoffen an, darunter Produktionsabfälle oder nicht verkaufsfähige Produkte bzw. Kalamitätschargen wie z.B. durch Mykotoxine verunreinigtes Getreide. Aber auch Reststoffe, die vorher andere Absatzmärkte hatten, diese aber mittlerweile wegbrechen, wie z.B. die Verwendung von Reststoffen aus der Stärkeproduktion für die Schweinemast, sind interessant. Die stagnierenden Tierbestände erfordern hier neue Verwertungslösungen. Je nach Stärkefabrik können hier Reststoffmengen von 100.000 bis 500.000 t/a bezogen auf die Frischmasse an einem Standort zur Verfügung stehen. Der geringe Trockenmassegehalt von ca. 20 % birgt wirtschaftliche Herausforderungen bei der Logistik. Eine direkte Einleitung in das Abwassersystem ohne Vorbehandlung ist auf Grund der hohen organischen Last ausgeschlossen. Um die Abwasseraufbereitung mit einem Zusatznutzen zu versehen, kann durch Integration einer anaeroben Fermentation Biogas erzeugt werden. Darüber hinaus kann ein Mehrwert durch die Gärrestaufbereitung und -verwertung generiert werden, einerseits als Dünger, andererseits durch Stoffe, die sich als Basischemikalien aus dem Gärrest isolieren lassen. Besonders neue Einsatzstoffströme aus der verarbeitenden Industrie erfordern die Anpassung der bisher im hauptsächlich landwirtschaftlichen Bereich eingesetzten Biogastechnologie. Vor allem die Vergärung homogener Einzelstoffe birgt Herausforderungen bei der Versorgung der Mikroorganismen mit z.B. Mikronährstoffen oder der Regulierung des pH-Werts im Prozess.

Technologische Innovationen spielen eine wesentliche Rolle bei der effizienten Nutzung dieser heterogenen Abfallströme. Moderne Biogasanlagen sind in der Lage, eine Vielzahl von Substraten zu verarbeiten und dabei optimale Prozessbedingungen aufrechtzuerhalten. Fortschritte in der Prozessüberwachung und -steuerung ermöglichen es, die Vergärung dynamisch an die Eigenschaften der eingesetzten Materialien anzupassen und so die Stabilität des Prozesses bei heterogenen Substratströmen aufrecht zu erhalten. Dies ist bei biogenen Abfällen und Reststoffen entscheidend, da die Zusammensetzung und Mengen saisonale Spannbreiten aufweisen können.

Neben der Energieerzeugung bietet die Biogastechnologie weitere Vorteile. Die bei der Vergärung entstehenden Gärreste sind nährstoffreiche Dünger, die in der Landwirtschaft eingesetzt werden können und somit den Einsatz von mineralischen Düngemitteln reduzieren. Zudem trägt die Nutzung von biogenen Abfällen und Reststoffen zur Schließung von Stoffkreisläufen bei und reduziert die Menge an zu beseitigenden Abfällen. Trotz der genannten Vorteile gibt es Herausforderungen bei der Integration von biogenen Abfällen und Reststoffen in die Biogaserzeugung. Die heterogene Zusammensetzung der Substrate erfordert flexible Anlagentechnologien und eine sorgfältige Prozessüberwachung. Zudem müssen logistische Aspekte wie die Sammlung, der Transport und die Lagerung der Materialien berücksichtigt werden. Darüber hinaus stehen rechtliche Aspekte der gemeinsamen Nutzung von biogenen Abfällen und Reststoffen oft im Weg und sind ein wesentliches Hemmnis. Zukünftig wird es entscheidend sein, die Effizienz der Biogastechnologie weiter zu steigern und neue, bislang ungenutzte Abfall- und Reststoffströme zu erschließen. Forschung und Entwicklung müssen sich auf die Optimierung der Prozessführung, die Entwicklung neuer Vorbehandlungsverfahren und die Integration der Biogaserzeugung in bestehende landwirtschaftliche und industrielle Systeme konzentrieren. Insgesamt bietet die Biogastechnologie ein großes Potenzial für die nachhaltige Verwertung von biogenen Abfällen und Reststoffen. Durch innovative technische Ansätze und die Erschließung neuer Substratquellen kann sie einen wesentlichen Beitrag zur Energiewende und zur Kreislaufwirtschaft leisten.

Biokraftstoffe und Bioraffinerien auf Basis biogener Abfälle und Reststoffe

Im Jahr 2022 wurden durch die Nutzung von Biokraftstoffen in Deutschland Emissionen in Höhe von 11,6 Mio. t CO_{2-eq} vermieden. Dabei entfielen 46 % der insgesamt 140 PJ auf Biokraftstoffe aus Abfällen und Reststoffen sowie 54 % auf solche aus Anbaubiomasse [22]. Die rechtlichen Rahmenbedingungen für biobasierte Kraftstoffe wurden in den vergangenen Jahren bereits so angepasst, dass der Anteil von Abfällen und Reststoffen als Ausgangsstoff für die Produktion deutlich zugenommen hat. Auf Basis der aktuellen Vorgaben der Erneuerbaren Energien Richtlinie der EU (RED II) lassen sich grundsätzlich folgende Biomasseklassen für Biokraftstoffe unterscheiden [23]:

1. Konventionelle Biomasse: sog. Nahrungs- und Futtermittelpflanzen
2. Fortschrittliche Biomasse: Rohstoffe gemäß Annex IX A der RED II, die nicht als Nahrungs- oder Futtermittel geeignet sind
3. Abfallbasierte Biomasse: Rohstoffe gemäß Annex IX B der RED II
4. Biomasse mit hohem Risiko indirekter Landnutzungsänderungen: Palmöl
5. Sonstige Biomasse: Rohstoffe ohne explizite Zuweisung zu einer der anderen Kategorien

In einer vergleichenden Analyse zu nachhaltigen Biomasse- und Substitutionspotenzialen wurde untersucht, wieviel biogene Abfälle und Reststoffe für eine Verarbeitung zu Biokraftstoffen in Deutschland und Europa verfügbar sind [24]. Betrachtet wurden dazu fünf Studien zur Quantifizierung der Potenziale biogener Nebenprodukte, Abfälle und Reststoffe. Neben der Quantifizierung von Biomassepotenzialen ist auch deren Mobilisierbarkeit von zentraler strategischer Bedeutung. Das heißt, es braucht auch geeignete und für eine Marktetablierung entsprechend weit entwickelte Produktionstechnologien. Bestenfalls sind sogar Verarbeitungskapazitäten vorhanden oder es können beispielsweise vorhandene Anlagen aus dem Bereich der Verarbeitung fossiler Ressourcen umgenutzt oder ertüchtigt werden.

Basierend auf den fünf untersuchten Studien wurde für Deutschland und Europa berechnet, welche Menge biogener Substitute für Diesel, Kerosin, Naphtha, Ethanol, Methan und Methanol produziert werden könnten. Anhand dieser Betrachtung könnte in Deutschland 7-28 % und in der Europäischen Union 10-45 % des derzeitigen Raffinerieoutputs substituiert werden (Abb. 6). Betrachtet man hinreichend ausgereifte Konversionsverfahren, so ergibt sich ein Substitutionspotenzial, das vor allem aus der Umwandlung von biogenen Nebenprodukten sowie Abfällen und Reststoffen zu Biomethan und Biomethanol resultiert. So wird beispielsweise die effiziente Verwertung von agrarischen und urbanen Reststoffen zu Biomethan für den Verkehr am DBFZ untersucht [25]. In einer integrierten Pilotanlage (Pilot-SBG) werden Module zum Biomasseaufschluss, zur Vergärung, zur Gärrestaufbereitung und zur katalytischen Methanisierung von CO₂ miteinander verschaltet und weiterentwickelt.

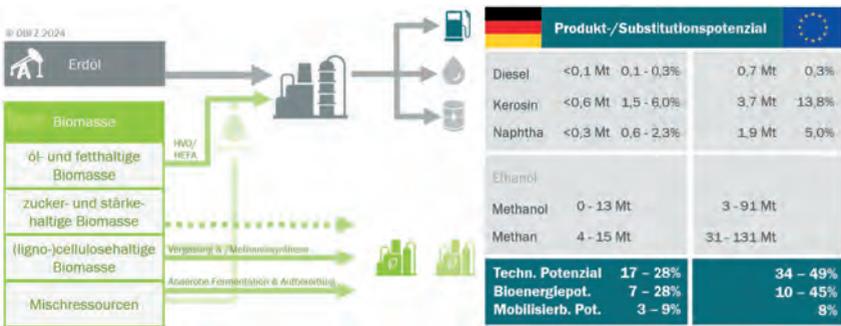


Abb. 6: Substitutionspotenzial für bisher mineralölbasierte Kraftstoffe durch biobasierte Alternativen, jeweils mit dem Betrachtungsrahmen Deutschland und EU (entnommen aus [24]).

Die große Bandbreite der resultierenden Substitutionspotenziale liegt an den Unterschieden zwischen den Biomassepotenzialstudien. Diese ergeben sich aufgrund der betrachteten Potenzialebenen, der Anzahl der betrachteten Biomassen, der Annahmen zur Mobilisierung und Nutzung der Biomassen sowie der verwendeten Datengrundlage und dem Bezugsjahr. Unter der Annahme von einem zukünftig vor allem aufgrund von Elektrifizierung deutlich reduzierten Bedarf an Kraft- und Brennstoffen wären die ermittelten Substitutionsanteile jedoch noch deutlich höher. Die Verwertung von biogenen Abfällen und Reststoffen für die Herstellung von Biokraftstoffen leistet demnach bereits heute einen erheblichen Anteil zum Klimaschutz im Verkehr. Für die Versorgung der mittelfristig verbleibenden Verbrennungsmotoren können zudem weitere biogene Abfälle und Reststoffe verwertet werden.

Auch die Herstellung von Grund- und Feinchemikalien aus biobasierten Abfällen und Reststoffen wird zunehmend angestrebt [26]. Hier sind zwar prinzipiell höhere spezifische Erlöse mit den Produkten zu erzielen, gleichzeitig sind aber auch die Qualitätsanforderungen an Produktreinheit deutlich höher und erfordern in der Regel längere Verarbeitungsketten. Da sich häufig nur Teile der Biomasse zu den gewünschten Produkten verarbeiten lassen, spielt das Konzept der Bioraffinerien eine große Rolle bei der Herstellung von biobasierten Grundstoffen für die stoffliche Nutzung in der chemischen Industrie. In Bioraffinerien wird durch eine Kombination von Konversions- und Trennverfahren so die Ausgangsbiomasse zu unterschiedlichen Produkten sowie biogenen Abfällen und Reststoffen verarbeitet [27].

Beispielsweise wurde in einer Kooperation zwischen dem DBFZ dem Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung (UFZ) ein Konzept entwickelt, mit dem Chemikalien für die Bioökonomie aus regionalen Reststoffen hergestellt werden können [28]. Zuletzt wurde mit dem entwickelten Fermentationsverfahren erfolgreich gezeigt, dass Capron- und Caprylsäure auch aus feuchten Reststoffen wie Obsttrester, Ernterückstände oder andere Reststoffe aus der Lebensmittelindustrie hergestellt werden können. Das gesamte Verfahren, inklusive der Aufbereitung der Carbonsäuren, wurde im Pilotmaßstab demonstriert. Es konnten so Mustermengen der Produkte für Anwendungstests im Schmierstoffsektor hergestellt werden. Das Verarbeitungsverfahren ist darauf ausgelegt, in Biogasanlagen integriert zu werden, sodass neben den Carbonsäuren auch Biomethan hergestellt wird und die Nährstoffe am Ende wieder über den Gärrest als Sekundärdünger in der Landwirtschaft ausgebracht werden können. So werden Biogasanlagen zu Bioraffinerien, die Abfälle und Reststoffe mit hoher Wertschöpfung verarbeiten können.

Negative Emissionen

BECCS steht für Bioenergy with Carbon Capture and Storage (dt.: Bioenergie mit CO₂-Abscheidung und -Speicherung). Grundlage der Bioenergie ist Biomasse, deren Aufbau einhergeht mit der CO₂-Abscheidung aus der Luft über

das Wachstum der Pflanzen. BECCS umfasst die technische Umwandlung von Biomasse in Bioenergieprodukte (z.B. Biokraftstoffe, Wärme/Kälte, Strom), bei gleichzeitiger Abscheidung von Kohlenstoff in Form von Kohlendioxid oder festen Kohlenstoffprodukten, einschließlich dessen dauerhafter Speicherung. Damit ist BECCS eine der bekannteren Technologien aus dem Bereich Carbon Dioxide Removal (CDR).

Welchen Beitrag können BECCS-Optionen in Deutschland nun für die Abscheidung von CO₂ in den kommenden Jahren leisten? Hierbei stehen vor allem die biogenen Abfälle und Reststoffe im Fokus, deren Verwertung mit einem hohen Klimaschutzbeitrag verbunden ist.

Die in Abb. 7 aufgezeigten, wesentlichen Bioenergieflüsse (> 10 PJ) sind in CO₂-Flüsse übersetzt. Dazu wird das CO₂-Potenzial berechnet, das freigesetzt werden würde, wenn die Biomassen vollständig in CO₂ umgewandelt werden würden. Diese Berechnung basiert auf dem Kohlenstoffgehalt der Biomasse und der Bioenergieprodukte sowie dem Wirkungsgrad der damit verbundenen Bioenergieanlage. Insgesamt beträgt das CO₂-Potenzial, das durch die Biomasse in das Bioenergiesystem eingespeist wird, ca. 150 Mio. t CO₂/Jahr (exemplarisch für das Jahr 2021). Davon stammen knapp 50 Mio. t CO₂/Jahr aus biogenen Abfällen und Reststoffen.

Eine Einschränkung gilt aber: Es ist nicht jede Bioenergiebereitstellung in gleichem Maße für die Erweiterung um BECCS-Komponenten geeignet. Die aussichtsreichen Routen stellen sich wie folgt dar:

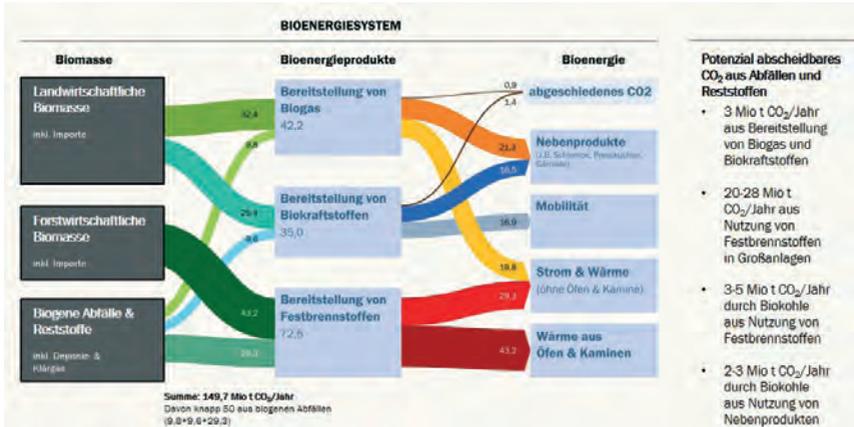


Abb. 7: Wesentliche CO₂-Flüsse (Mio. t CO₂/Jahr) von der Biomasse bis zur Bioenergie für das Jahr 2021 (eigene Berechnungen, basierend auf den Energieflüssen > 10 PJ)

Abgeschiedenes CO₂ aus der Bereitstellung von Biogas und Biokraftstoffen: Schon heute werden rund 2 Mio. t CO₂/Jahr aus der Aufbereitung von Bioethanol und Biogas abgeschieden. Die CO₂-Abscheidung könnte jedoch verdoppelt

werden, wenn große Biogasanlagen, die Abfälle und Reststoffe nutzen, auf die Produktion von Biomethan umstellen und eine entsprechende Aufbereitung mit CO₂-Abscheidung einrichten. Etwa 3 Mio. t CO₂/Jahr erscheinen möglich [29].

Abscheidbares CO₂ aus der Nutzung von Festbrennstoffen in Großanlagen: 25-35 Mio. t CO₂/Jahr könnten aus der Verbrennung von Abfällen und Reststoffen (z.B. Altholz, Industrierestholz) in bestehenden Abfallverbrennungsanlagen und großen Biomasseheiz(kraft)werken abgeschieden werden. Bei einer angenommenen Abscheidungsrate von 80 % ([30], eigene Abschätzungen zu den weiteren Verlusten in der Praxis) könnte damit ein Beitrag von 20-28 Mio. t CO₂/Jahr erreicht werden.

Abscheidbares CO₂ durch Biokohle aus der Nutzung von Festbrennstoffen: Auch Biokohle kann aus dem heutigen Bioenergiesystem heraus entwickelt werden. Unterstellt man die Weiterentwicklung und großskalige Umrüstung von Heizwerken und Heizkraftwerken auf Pyrolysegas, könnten bis zu 10 Mio. t CO₂/Jahr aus forstwirtschaftlichen Reststoffen in diesen Systemen umgesetzt werden. Klärschlamm, der wegen des sehr hohen Wassergehaltes zwar auch zu Biokohle umgewandelt werden kann, dabei aber keine Energie bereitstellt, ist bei dieser Abschätzung nicht berücksichtigt. Bei einer angenommenen Abscheidungsrate von 30-50 % [31] wären auf diese Weise weitere 3-5 Mio. t CO₂/Jahr abscheidbar.

Abscheidbares CO₂ durch Biokohle aus der Nutzung von Nebenprodukten: Auch die erzeugten Nebenprodukte aus der Biogas- und Biokraftstoffproduktion (38 Mio. t CO₂/Jahr) beruhen zu ca. 10 % auf Abfällen und Reststoffen. Sie könnten weitere 2-3 Mio. t CO₂/Jahr dauerhaft gespeichertes CO₂ in Form von Biokohle bereitstellen.

In Summe ist im aktuellen Bioenergiesystem, auf Basis der eingesetzten Abfälle und Reststoffe bei Etablierung verschiedener BECCS-Optionen, eine Entnahme von 28-39 Mio. t CO₂/Jahr denkbar. Hierbei ist zu beachten, dass die Umstellung nicht in allen Fällen brennstoff- oder anlagenseitig technisch und wirtschaftlich sinnvoll sein wird.

Literatur/Quellen

- [1] Global Footprint Network (2024): Footprint Calculator. URL: <https://www.footprint-network.org/resources/footprint-calculator/>, abgerufen am 02.12.2024.
- [2] Umweltbundesamt (2024): Erneuerbare Energien in Zahlen. URL: <https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/erneuerbare-energien/erneuerbare-energien-in-zahlen#wuerme>, abgerufen am 20.01.2025.
- [3] Eurostat (2024): Circular material use rate database. URL: https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/env_ac_cur/default/table?lang=en, abgerufen am 20.01.2025.

- [4] Bundes-Klimaschutzgesetz (2024): Bundes-Klimaschutzgesetz vom 12. Dezember 2019 (BGBl. I S. 2513), zuletzt durch Artikel 1 des Gesetzes vom 15. Juli 2024 (BGBl. 2024 I Nr. 235) geändert. URL: <https://www.gesetze-im-internet.de/ksg/KSG.pdf>, abgerufen am 21.11.2024.
- [5] Bundesregierung (2022): Generationenvertrag für das Klima. Pressemitteilung zur Änderung des Klimaschutzgesetzes 2022. URL: <https://www.bundesregierung.de/breg-de/service/archiv/klimaschutzgesetz-2021-1913672.pdf>, abgerufen am 21.11.2024.
- [6] BMEL/BMU/BMWK (2022): Eckpunkte für eine Nationale Biomassestrategie (NABIS). URL: <https://www.bmuv.de/download/eckpunkte-fuer-eine-nationale-biomassestrategie-nabis>, abgerufen am 21.11.2024.
- [7] Krause, T., Mantau, U., Mahro, B., Noke, A., Richter, F., Raussen, T., Bischof, R., Hering, T., Thrän, D., Brosowski, A. (2020): Nationales Monitoring biogener Reststoffe, Nebenprodukte und Abfälle in Deutschland Teil 1: Basisdaten zu Biomassepotenzialen. <https://doi.org/10.48480/6mz1-zs78>.
- [8] Matschoss, P. (2020): Keynote: Bioenergie und Energiewende – Die „Post-EEG“-Frage im größeren energiepolitischen Rahmen. Vortrag zur Veranstaltung „Folgekonzeppte für die post-EEG-Phase von Bioenergieanlagen“ am 19.02.2020, URL: https://www.dbfz.de/fileadmin/user_upload/Fachgespraeche/Sonstige/Vortraege/2020-02_Bioenergie-Post-EEG_Vortraege.pdf, abgerufen am 21.11.2024.
- [9] Mantau, U. (2023): Holzrohstoffbilanzierung, Kreislaufwirtschaft und Kaskadenutzung – 20 Jahre Rohstoffmonitoring Holz, Gülzow, FNR. URL: https://www.fnr.de/fileadmin/Projekte/2024/Mediathek/FNR_Brosch_Rohstoffmonitoring_Holz_2024.pdf. Abgerufen am 20.01.2025.
- [10] Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe (2024a): Gärtnern ohne Torf: Mit Rindenumus. URL: <https://torfersatz.fnr.de/torfersatz/torfalternativen/rindenumus#:~:text=Es%20hat%20eine%20deutlich%20h%C3%B6here,N%C3%A4hrstoff%2D%20und%20pH%2DPufferung>, abgerufen am 31.01.2025.
- [11] Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe (2024b): Gärtnern ohne Torf: Mit Holzfasern. URL: <https://torfersatz.fnr.de/torfersatz/torfalternativen/holzfasern>, abgerufen am 31.01.2025.
- [12] Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe (2022a): Zwei Fliegen mit einer Klappe: Pappelholz für Biomethan und Torfersatzstoffe. Pressemitteilung vom 24.02.2022, URL: <https://torfersatz.fnr.de/presse/pressemitteilungen/aktuelle-nachricht/zwei-fliegen-mit-einer-klappe-pappelholz-fuer-biomethan-und-torfersatzstoffe>, abgerufen am 31.01.2025.
- [13] Fraunhofer-Gesellschaft (2025): Lignin – eine nachhaltige Alternative zu fossilen Rohstoffen. URL: <https://www.fraunhofer.de/de/forschung/fraunhofer-strategische-forschungsfelder/biooekonomie/lignin.html>, abgerufen am 31.01.2025.
- [14] Jordan, M.; Lenz, V.; Millinger, M.; Oehmichen, K.; Thrän, D. (2019). "Future competitive bioenergy technologies in the German heat sector: Findings from an economic optimization approach". Energy (ISSN: 0360-5442), H. 189. DOI: 10.1016/j.energy.2019.116194W

- [15] RWTH Aachen (2024): Biochar – Neue Generation von mit Biokohle modifizierten, durchlässigen Straßenbelagsmaterialien. URL: <https://www.isac.rwth-aachen.de/cms/isac/forschung/projekte/strassenbau-laufende-projekte/abgeschlossene-forschungsprojekte-strassenbau/~tkijr/biochar/>, abgerufen am 31.01.2025.
- [16] Vaupel, M. (2023): Pflanzenkohle in Beton – Gebäude und Infrastruktur werden zur Kohlenstoffsенke. In: Technik in Bayern – das Regionalmagazin des VDI Bezirksverein München, Ober- und Niederbayern e.V., Ausgabe 01/2023. URL: <https://www.technik-in-bayern.de/bauen-und-gebaeudetechnik/nachhaltiges-bauen/mensch-raum-und-pflanze>, abgerufen am 31.01.2025.
- [17] Wollnik, R., Borchers, M., Seibert, R., Abel, S., Herrmann, P., Elsasser, P., Hildebrandt, J., Mühlich, M., Eisenschmidt, P., Meisel, K., Henning, P., Radtke, K. S., Selig, M., Kazmin, S., Thrän, D., & Szarka, N. (2023). Steckbriefe für biobasierte Kohlenstoffdioxidentnahme-Optionen in Deutschland. Verfügbar unter: <https://datalab.dbfz.de/bionet>.
- [18] Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe (2022b): Biogas aus landwirtschaftlichen Rest- und Abfallstoffen <https://biogas.fnr.de/biogas-gewinnung/gaersubstrate/rest-und-abfallstoffe>, abgerufen am 29.01.2025.
- [19] Rensberg et al. 2013. Biogaserzeugung und -nutzung in Deutschland Report zum Anlagenbestand Biogas und Biomethan. DBFZ Report 50, URL: https://www.dbfz.de/fileadmin/user_upload/Referenzen/DBFZ_Reports/DBFZ_Report_50.pdf, abgerufen am 05.02.2025.
- [20] Umweltbundesamt (2019): Biogasproduktion aus Gülle und Bioabfall ausbauen. URL: <https://www.umweltbundesamt.de/themen/biogasproduktion-aus-guelle-bioabfall-ausbauen>, abgerufen am 05.02.2025.
- [21] TopAgrar online (2024): Welchen Preis erzielen Heu und Stroh derzeit? Kostenlos mit Rechner ermitteln. <https://www.topagrar.com/markt/news/hier-koennen-landwirte-kostenlos-den-strohpreis-berechnen-k-20007220.html>, abgerufen am 05.02.2025.
- [22] Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung (2024a): 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?__blob=publicationFile&v=1, abgerufen am 07.02.2025.
- [23] Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung (2024b): KRAFTSTOFF Nabisy-Biomassearten Stand 03.2024. URL: <https://www.ble.de/SharedDocs/Downloads/DE/Klima-Energie/Nachhaltige-Biomasseherstellung/Nabisy/Biomassearten.xlsx>, abgerufen am 07.02.2025.
- [24] Naumann, K., Cyffka, K.-F. und Karras, T. (2024): Hintergrundpapier Bio2x - Vergleichende Analyse zu nachhaltigen Biomasse- und Substitutionspotenzialen. URL: https://www.dbfz.de/fileadmin/user_upload/Referenzen/Statements/Hintergrundpapier_Bio2x_Okt_2024.pdf, abgerufen am 07.02.2025.
- [25] Röder, L., Nitzsche, R., Etzold, H. und Oehmichen, K. (2024): Beispielkonzept zur Bereitstellung von erneuerbarem LNG aus biogenen Rest- und Abfallstoffen und erneuerbarem Wasserstoff im kommerziellen Maßstab: Fokusheft im Projekt Pilot-SBG. [Dx.doi.org/10.48480/jsct-z879](https://doi.org/10.48480/jsct-z879).

- [26] Nitzsche, R., Gröngröft, A., Köchermann, J., Meisel, K., Etzold, H., Verges, M., Leschinsky, M., Bachmann, J., Saake, B., Torkler, S., Patzsch, K., Rößiger, B., Pufky-Heinrich, D., Unkelbach, G. (2020): Platform and fine chemicals from woody biomass: demonstration and assessment of a novel biorefinery, doi: 10.1007/s13399-020-00769-z.
- [27] Bundesregierung (2012): Roadmap Bioraffinerien, Berlin, Mai 2012.
- [28] Braune, M., Yuan, B., Sträuber, H., McDowall, S. C., Nitzsche, R., Gröngröft, A. (2021): A Downstream Processing Cascade for Separation of Caproic and Caprylic Acid from Maize Silage-Based Fermentation Broth, *Front. Bioeng. Biotechnol.*, Bd. 0, 2021, doi: 10.3389/fbioe.2021.725578.
- [29] Rensberg, N.; Denysenko, V.; Daniel-Gromke, J. (2023): Biogaserzeugung und -nutzung in Deutschland. Report zum Anlagenbestand Biogas und Biomethan, DBFZ Report Nr. 50. URL: https://www.dbfz.de/fileadmin/user_upload/Referenzen/DBFZ_Reports/DBFZ_Report_50.pdf, abgerufen am 14.11.2024.
- [30] Markewitz, P.; Zhao, I.; Robinius, M. (2017): Technologiebericht 2.3. CO₂-Abscheidung und -Speicherung (CCS) innerhalb des Forschungsprojekts TF_Energie-wende. Forschungszentrum Jülich GmbH. URL: https://wupperinst.org/fileadmin/redaktion/downloads/projects/TFE_Downloads_Technologieberichte_de.pdf, abgerufen am 14.11.2024.
- [31] Kaltschmitt, M.; Hofbauer, H.; Lenz, V. (Hrsg.) (2024): Energie aus Biomasse. Thermo-chemische Konversion. Band 2. Wiesbaden: Springer.
- [32] Nelles, M.; Backes, R.; Cyffka, K-F.; Gröngröft, A.; Kornatz, P. & Lenz, V.: Verwertung biogener Abfälle und Reststoffe - Kohlenstoffquelle, Bioenergie & negative Emissionen; Beitrag in Müll und Abfall – Fachzeitschrift für Kreislauf und Ressourcenerwirtschaft; Seiten 180 – 188 in Heft 4/2025; ISSN 0027-2957

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, Fakultät für Agrar, Bau und Umwelt

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/>

Klimaneutrale biobasierte Wärmeversorgung

Zusammenfassung: Das geltende Klimaschutzgesetz der Bundesrepublik Deutschland sieht die Klimaneutralität bis 2045 vor [Bundesregierung, 2024]. Sollen faktische Nutzungsverbote fossiler Wärmeerzeugungsanlagen vermieden werden, dürfen im Grunde ab sofort nur noch erneuerbare Systeme oder solche, die zukünftig ohne großen Aufwand mit klimaneutralen Brennstoffen betrieben werden können, installiert werden. Deutschland wies zumindest bisher ein vergleichsweise gemäßigtes Klima mit erheblichen Biomassepotenzialen auf (ca. 1 670 PJ [FNR, 2021]). Als auch in menschlichen Maßstäben schnell nachwachsende Ressource ist Biomasse als erneuerbar zu klassifizieren. Über die Wirkung der energetischen Biomassenutzung auf das Klima gibt es unterschiedliche Positionen [BMUV, 2022], [ifeu, 2013], [DBFZ, 2023]. Insofern stellen sich drei zentrale Fragen für die Zukunft der Wärme aus Biomasse: (i) Kann es 2045 eine ökonomisch effiziente klimaneutrale Wärmeversorgung ganz ohne Biomasse geben, (ii) kann die energetische Biomassenutzung im Wärmebereich klimaneutral sein und (iii) wie lässt sich die begrenzte Biomasse im Wärmebereich zu einer möglichst klimaeffizienten Nutzung lenken?

Grundsätzlich ließe sich eine klimaneutrale Wärmeversorgung ohne energetische Biomassenutzung konstruieren, dabei wären dann aber zum Einen die Frage einer nicht-energetischen Entsorgung aller biogener Abfälle zu klären und zum Anderen wäre gerade im Hochtemperaturbereich mit hohen Umwandlungsverlusten und -kosten zu rechnen, so dass ein derartiges System nicht kosteneffizient und daher wahrscheinlich auch nicht sinnvoll bis 2045 umzusetzen wäre. Darüber hinaus ist in einem entsprechenden Kontext die energetische Biomassenutzung nicht nur klimaneutral, sondern kann sogar mit negativen Emissionen verbunden sein. D.h. es gilt in weiteren Arbeiten zu klären, wo und wie genau welche Mengen an Biomasse in einem vollständig erneuerbaren Energiesystem einzusetzen sind, wie der Transformationspfad aussehen kann und wie dieser zu erreichen ist. Für die klimaeffiziente Lenkung der Biomasse braucht es Anpassungen im Abfallrecht, punktuelle Anschubförderungen und ggf. Pönalen für wenig effiziente Verwendungen.

Abstract: The current Climate Protection Act of the Federal Republic of Germany aims to achieve climate neutrality by 2045 [Bundesregierung, 2024]. If factual bans on the use of fossil heat generation systems are to be avoided, only renewable systems or those that can be operated with climate-neutral fuels in the future without great effort may be installed with immediate effect. Germany has had a comparatively moderate climate with considerable biomass potential, at least until now (about 1 670 PJ [FNR, 2021]). As a rapidly regrowing resource, even on a human scale, biomass can be classified as renewable. There are different positions on the effect of biomass use for energy on the climate [BMUV, 2022], [ifeu, 2013], [DBFZ, 2023]. In this respect, three central questions arise for the future of heat from biomass: (i) Can there be an economically efficient, climate-neutral heat supply without any biomass in 2045, (ii) can the use of biomass for energy in the heating sector be climate-

neutral and (iii) how can the limited biomass in the heating sector be directed towards the most climate-efficient use possible?

In principle, a climate-neutral heat supply could be constructed without the use of biomass as an energy source, but on the one hand the question of non-energetic disposal of all biogenic waste would have to be clarified and on the other hand high conversion losses and costs would have to be expected, especially in the high-temperature range, so that such a system would not be cost-efficient and therefore probably not be sensible to implement by 2045. Furthermore, in an appropriate context, the use of biomass for energy is not only climate-neutral, but can even be associated with negative emissions. This means that further work is needed to clarify where and how exactly what quantities of biomass should be used in a fully renewable energy system, what the transformation path could look like and how this can be achieved. The climate-efficient management of biomass requires adjustments to waste legislation, selective start-up subsidies and, if necessary, penalties for less efficient uses.

1 Einleitung

Das Jahr 2024 hat neue Hitzerekorde mit sich gebracht. Für Deutschland war ein Anstieg der jährlichen Durchschnittstemperatur gegenüber dem vorindustriellen Zustand von rund 2 °C [DWD, 2025] und für Europa von fast 1,5 °C zu beobachten [Copernicus, 2025]. Dieser Temperaturanstieg ist wissenschaftlich zweifelsfrei auf die von Menschen bedingte Freisetzung von Treibhausgasen, insbesondere durch die Verbrennung fossiler Energien, zurückzuführen. Die Folgen des Klimawandels, wie z.B. Extremwetterereignisse und Todesfälle durch Hitze, sind unverkennbar, trotzdem steigen die jährlichen Treibhausgasemissionen absolut mit der gleichen Geschwindigkeit wie in den 60er Jahren [Statista, 2025]. Die globale Weltgemeinschaft muss sehr zeitnah entscheiden, ob sie diese Erde verwüsten und die Lebensgrundlage heutiger Gesellschaften gefährden will, oder ob sie das Pariser Klimaschutzabkommen ernst nimmt und wenigstens das 2 °C-Ziel bzw. eine maximale Konzentration von CO₂ in der Atmosphäre von 450 ppm einhalten wird. Wenn ja, ist der Rahmen für die noch verbrauchbaren fossilen Kohlenstoffmengen physikalisch gesetzt. Nach einer fairen Verteilung (z.B. nach Bevölkerung, Wohlstand und historischen Emissionen) ist der Minderungspfad mathematisch definiert. Diesen vereinbarten Pfad der maximalen jährlichen Freisetzung von Treibhausgasen muss jedes Land einhalten. Wenn die nicht mehr zulässige fossile Kohlenstoffnutzung nicht durch klimaneutrale Optionen ausgeglichen werden kann, ist der Verzicht auf die nicht realisierbaren Nutzungen unumgänglich. Dieser Nutzungsverzicht kann später über einen überproportionalen Ausbau klimaneutraler Optionen kompensiert werden. Grundsätzlich ist die Umsetzung der Reduktion auch unabhängig davon, ob dies freiwillig, über Ordnungsrecht oder finanzielle Signale erfolgt (CO₂-Preis, Förderung). Fragen der sozialen Gerechtigkeit und der Akzeptanz müssen berücksichtigt werden, dürfen aber nicht zu einem Aufschieben oder Abschwächen der Transformation führen.

Bei einem derart klar gesetzten Ziel der Klimaneutralität, das auch den Ersatz fossilen Kohlenstoffs in Produkten mit begrenzter Lebensdauer umfasst, ergibt sich sehr schnell eine Verteilungsdiskussion zwischen allen betroffenen Akteuren um die vorhandenen erneuerbaren Energien und nachwachsende Kohlenstoffquellen.

Hier stellt sich die Frage nach dem Einsatz des nachhaltig gewinnbaren Potenzials an Biomasse sowohl in der stofflichen Nutzung als auch für die Bereitstellung speicherbarer Energie aus Biomasse. Bisherige Studien haben gezeigt, dass im Strombereich v.a. der flexible Einsatz von Biogas und Biomethan relevant ist und im Verkehrsbereich Biomasse als Übergangslösung sowie im Langstrecken-Flugverkehr als flüssige Biomasse zum Einsatz kommen könnte. Das Gros des energetischen Einsatzes in Form von v.a. fester Biomasse wird voraussichtlich im Wärmebereich und hier vorrangig im Hochtemperaturbereich liegen [Jordan, 2019].

Während die stoffliche Nutzung von nachhaltig gewonnener Biomasse auch aus Klimaschutzgründen auszuweiten ist, wird über die Klimaneutralität der energetischen Biomassenutzung auch im Wärmebereich diskutiert. Umgekehrt ist die Frage legitim, ob ein klimaneutrales Energiesystem ganz ohne energetische Biomassenutzung etabliert werden kann bzw. angestrebt werden sollte.

2 Braucht es Biomasse für eine klimaneutrale Wärmeversorgung 2045?

Wärmebedarfe sind regional und anwendungsabhängig sehr unterschiedlich und unterliegen abgesehen von der Industrie häufig großen tages- und jahreszeitlichen Schwankungen. Grundsätzlich könnten technisch alle Wärmebedarfe mit erneuerbarem Strom und „grünem“ Wasserstoff (oder alternativen aus erneuerbarem Strom gewonnenen Energieträgern) bedient werden. Allein für die Gebäudewärmeversorgung mittels Stromheizsystemen (inklusive Wärmepumpen) und die chemische Industrie in Deutschland bräuchte es dann allerdings zusätzlich rund 500 TWh/a an erneuerbarem Strom [DBFZ, 2025b] [VCI, 2023] (derzeitiger Bruttotromverbrauch 522 TWh 2024 [AGEEstat, 2025]). Gleichzeitig zeigt die Ressourcendatenbank des DBFZ für 2020 ein Potenzial von rund 1.000 PJ an biogenen Rest- und Abfallstoffen, die derzeit ungenutzt oder in energetischer Nutzung sind und bei einer klimaneutralen Wärmeversorgung ohne Biomasse in anderen Sektoren eingesetzt oder ohne energetischen Vorteil entsorgt werden müssten [DBFZ, 2025a].

Grundlegende volkswirtschaftliche Betrachtungen legen nahe, dass die stoffliche Verwertung von biogenen Rest- und Abfallstoffen mit sinkender Qualität und steigenden Verunreinigungen zunehmend kostenintensiver wird, während gleichzeitig die Versorgung mit erneuerbarem Strom und erneuerbarem Wasserstoff auch in der letzten Bedarfsspitze zu extremen Preisspitzen führen wird.

Insofern ist für den Einsatz von erneuerbarer Biomasse ein ökonomisches Optimum zwischen stofflicher und energetischer Nutzung auch für ein klimaneutrales Deutschland 2045 zu erwarten. Aufgrund der nur noch verbleibenden zwei Jahrzehnte ist sogar vielmehr davon auszugehen, dass das Ziel nur mit einem gewissen Anteil an biogener Wärmeversorgung zu erreichen sein wird. An einer Abschätzung von Größenordnung arbeiten UFZ und DBFZ aktuell in einem gemeinsamen Projekt [UFZ, 2025].

3 Klimaneutralität der Wärmebereitstellung aus Biomasse

Biomasse ist eine nachwachsende Ressource und somit grundsätzlich als erneuerbar einzuschätzen. Aspekte wie Biodiversität und Erhalt der Bodenfruchtbarkeit können das erneuerbare Potenzial der gewinnbaren Biomasse einschränken. Schnell nachwachsende Biomassen (weniger als 5 bis 10 Jahre) können auch grundsätzlich in einer energetischen Nutzung als klimaneutral angesehen werden, solange die Aufbereitungsketten klimaneutral gestaltet werden und weder beim Wachstum noch bei der energetischen Nutzung Treibhausgase ausgestoßen werden, die nicht anderweitig kompensiert werden (z.B. Verbrennung von Landschaftspflegeholz in Pyrolyseheizanlagen, so dass mit der stofflich genutzten Biokohle mögliche Ruß- und Methanemissionen der Konversion kompensiert werden). Schwieriger ist die Einschätzung der Klimaneutralität bei der energetischen Nutzung von Baumstämmen, da hier bei industriell nutzbaren Sortimenten Wachstumszeiten von über 20 Jahren und damit länger als der Frist bis zur Klimaneutralität Deutschlands anzusetzen sind. Hinzu kommt, dass industriell nutzbare Stämme zu langlebigen Produkten und damit stabilen Kohlenstoffspeichern verarbeitet werden können, so dass zwar grundsätzlich die energetische Nutzung im Rahmen einer nachhaltigen Waldwirtschaft in der Flächenbilanz über Deutschland klimaausgeglichen ist (Freisetzung und Wachstum pro Jahr gleichen sich aus), aber aufgrund der stofflichen Nutzung eine höhere Klimaschutzwirkung erreicht werden könnte. Wird also eine funktionierende Kaskadenwirtschaft im Rahmen einer zirkulären Kreislaufwirtschaft unterstellt, werden nur solche Kontingente energetische genutzt, die am Ende der Kaskade nicht anderweitig verwertbar sind und solche, die zu Beginn der Kaskade in Qualitäten anfallen, die stofflich nicht oder nicht ohne erheblichen wirtschaftlichen Mehraufwand nutzbar sind. Wärme aus Biomasse kann und ist somit häufig klimaneutral. Wie bereits in Kapitel 2 erläutert ist es für das 2045 Ziel zusätzlich wichtig die begrenzte Biomasse jeweils im regionalen Nachfrage- und Angebotskontext mit der höchsten Klimateffizienz einzusetzen – d.h. mit den geringsten Treibhausgasvermeidungskosten inkl. der Bereitstellung negativer Emissionen und der Vermeidung von THG-Emissionen in substituierten fossil basierten Produkten.

4 Biomasse in Stoff- und Wärmeanwendungen in Deutschland

Um mögliche Lenkungsnotwendigkeiten und -ansätze zu identifizieren wird im Folgenden ein grobes Mengengerüst abgebildet.

Im Jahr 2020 wurden insgesamt rund 126 Mio. m³ an Holz inklusive Holzabfällen genutzt. Davon wurden etwas über 53 % stofflich und der Rest energetisch eingesetzt. Gleichzeitig wurden rund 114 Mio. t an Trockenmasse (TM) in der Landwirtschaft gewonnen. Davon wurden rund 78,9 Mio. t_{TM} für die Tierhaltung verwendet. Lediglich 2,9 Mio. t_{TM} wurden für eine stoffliche Nutzung produziert. Für die Ernährung wurden Agrarprodukte und die produzierten Fleischprodukte in einem Umfang von 21,1 Mio. t_{TM} konsumiert und aus Anbaubiomasse und biogenen Rest- und Abfallstoffen 23,6 Mio. t_{TM} für energetische Zwecke verwendet [ifeu, 2024].

Im Jahr 2024 wurden rund 485 PJ für Wärme aus fester Biomasse (fast ausschließlich Holz und Holzabfälle) eingesetzt [AGEEstat, 2025]. Dabei handelt es sich gerade im Haushaltsbereich bei Einzelraumfeuerungsanlagen häufig um Primärholz, während in Kesselanlagen v.a. Nebenprodukte und Landschaftspflegematerial zum Einsatz kommen. Für größere Anlagen und zur Stromerzeugung werden vielfach Althölzer genutzt, während in den Müllverbrennungsanlagen der biogene Anteil des Abfalls energetisch verwertet wird (Abb. 1).

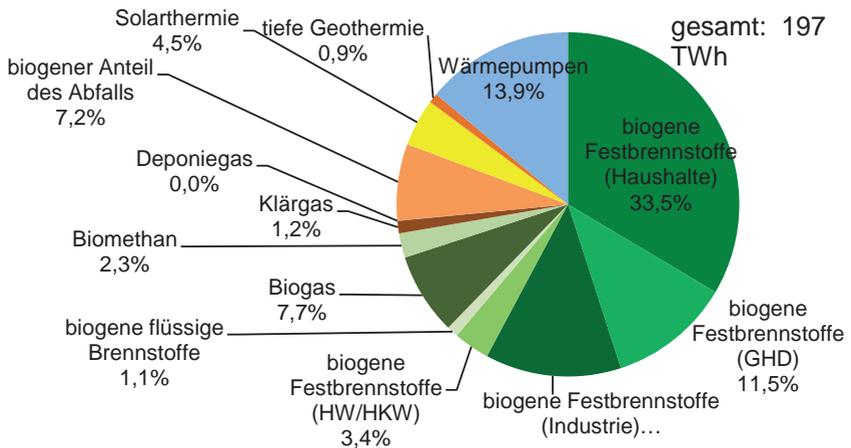


Abb.1: Anteil der unterschiedlichen erneuerbaren Energien an der erneuerbaren Wärmebereitstellung in Deutschland 2024 [AGEEstat, 2025]

Bisher wird als feste Biomasse für Energie vor allem Holz eingesetzt. Auch wenn die Verwendung von alternativen Brennstoffen technisch möglich und selbst im kleinen Leistungsbereich rechtlich zulässig ist [Adam, 2020], [Adam, 2024]. Im

Gründe war bisher Holz in ausreichenden Mengen in Deutschland verfügbar und der Preis selbst für Primärholzsortimente in einer Größenordnung, dass sich der höhere technische Aufwand für nicht-holzartige Brennstoffe wie Miscanthus, Stroh u.a. vom Betriebsaufwand und den höheren Investitionskosten nur selten gelohnt hat (Tab. 1).

Tab. 1: Einsatz von Holz 2018 in Deutschland für energetische Zwecke [UBA, 2022]

in PJ/a	Hausheizungen	Biomasseanlagen < 1 MW	Biomasseanlagen > 1 MW	Summe
Waldholz	185,5	13,1	3,5	202,0
forstliche Reststoffe	3,0	35,5	18,8	87,3
Garten- und Landschafts- pflege	22,3	7,0	11,5	40,7
agrar. Anbaubiomasse		0,5	0,5	1,1
Industrierestholz	34,8	17,5	14,8	67,1
Altholz	12,0	2,9	90,4	105,3
Sonstige feste Biobrenn- stoffe		1,5	7,8	9,3
Summe	257,5	77,9	147,0	482,8

Für den Einsatz der aufgeführten Biomassemengen für Hochtemperaturwärme gibt es bisher keine ausreichende Datenbasis. Aufgrund der technischen Anforderungen und größerer Investitionen zur Umstellung von Hochtemperaturanwendungen auf Biomasse sind die eingesetzten Biomassemengen im Feststoffbereich noch gering [Lenz, 2020].

Aufgrund vielfältiger Konkurrenzsituationen, wie z.B. Ausweitung des Holzbaus, Etablierung von neuen biobasierten Produkten, an Wärmebereitstellung gekoppelte Biokohlegewinnung (reduziert Wärmefreisetzung), wird die für energetische Zwecke verfügbare Biomasse aller Voraussicht nach nicht über die heute genutzte Menge von rund 500 PJ ansteigen [AGEEstat, 2025]. Soll gleichzeitig verstärkt die Hochtemperaturnachfrage im industriellen Bereich defossilisiert werden, muss es eine Verschiebung in den derzeitigen Nutzungsmengen geben.

5 Biomasseverschiebungen zur Hochtemperatur-Prozesswärme

Ein verstärkter Einsatz der energetisch genutzten Holzmenngen für Hochtemperaturprozesswärme bringt folgende Vorteile mit sich:

- hochexergetisch chemisch gebundene Energie wird sinnvollerweise für die Bereitstellung möglichst hoher Temperaturen genutzt.

- für Prozesswärme (deutlich) über 200 °C stehen in Deutschland außer direkter elektrischer Beheizung und noch sehr begrenzter grüner Wasserstoffmengen als erneuerbare Optionen fast nur Biomassen zur Verfügung.
- größere Anlagen können technisch und ökonomisch mit verbrennungstechnisch und emissionsseitig schwierigeren Brennstoffen, d.h. minderwertigeren Holzsortimenten und biogenen holzartigen Abfällen, umgehen.
- große industrielle Prozesswärmeanlagen können neben der Bereitstellung von Biokohlen auch über die CO₂-Abscheidung sogenannte negative Emissionen generieren (BeCCS) [Thrän, 2024].

Welche Mengen können grundsätzlich umgelenkt werden?

Zunächst ist zu berücksichtigen, dass der Ansatz eines weitgehend festen Potentials zur energetischen Holznutzung nicht der Beobachtung widerspricht, dass regional (gerade durch den klimabedingt notwendigen Waldumbau) zusätzliche energetisch nutzbare Holzsortimente frei sein können. Diese Potenziale werden aber häufig dadurch kompensiert, dass an anderen Orten durch einen bereits weiter fortgeschrittenen Waldumbau die verfügbaren Holzmengen zumindest für einige Jahrzehnte zurückgehen. In Summe führt ein zusätzlicher Einsatz von Holz im Hochtemperaturbereich also zwangsweise zu einer Reduktion des Einsatzes von holzartigen Biomassen oder zum Ausweichen auf alternative biogene Festbrennstoffe in Niedertemperaturanwendungen (wie der Gebäudeheizung und bei Wasch- und Trockenprozessen in der Industrie).

Weniger als 20 % erneuerbare Energien im Wärmebereich in Deutschland verdeutlichen wie dringend hier die Transformation zu beschleunigen ist. Gleichzeitig bindet jede neue Biomasseanlage im Niedertemperaturbereich für 15 bis 25 Jahre eine gewisse Biomassenachfrage. Daher gilt es möglichst sofort bei neu installierten Anlagen mindestens regelungs- und technikseitig die Möglichkeit einer nachträglichen Einbindung einer Wärmepumpe oder zumindest einer direkten Stromzuheizung zur Reduktion der Biomassenachfrage vorzusehen (ggf. auch rechtlich verpflichtend).

Wärmepumpen für die Gebäudeheizung erreichen durch steigende Stückzahlen, sowie damit verbundenen technischen Innovationen, zunehmend höhere Heizvorlauftemperaturen, höhere Jahresarbeitszahlen und sinkende Investitionskosten – im Unterschied zu Biomassefeuerungsanlagen, die bei gleichbleibender Qualität insbesondere aufgrund sich verschärfender emissionsseitiger Vorgaben im Preis tendenziell eher steigen. Insofern bestehen ernsthafte Restriktionen für Wärmepumpen im Heißwasserbereich unter 95 °C bald nur noch in der ganzjährig ausreichenden Verfügbarkeit von Strom in den lokalen Verteilnetzen. Insofern können Wärmepumpen-Biomassehybridtechnologien mit vergleichsweise kleinen Biomassenachfragen erheblich zur Versorgungssicherheit beitragen. Als Hybridkomponente können neben weitgehend automatisierten Pelletfeue-

rungen auch Scheitholzkaminöfen (möglichst mit Wassertaschen), Scheitholzvergaserkessel mit Pufferspeicher und je nach Leistungsbedarf Holzhackschnitzelkessel zum Einsatz kommen. Je mit einer Stromheizung nachgerüsteter Biomassefeuerung sollten sich im Schnitt mindestens 70 % des Biomasseeinsatzes einsparen lassen. Bei einer Nachrüstung von 50 % aller Kesselanlagen in den kommenden 10 Jahren könnten rund 60 PJ an Holz freigesetzt werden. Für die rund 11 Millionen Einzelraumfeuerungsanlagen (ERF) könnte bei Nachrüstung einer Wärmepumpe und objektivem Kostenvergleich ggf. 50 % des Holzeinsatzes je Anlage eingespart werden. Würden etwa 50 % der Anlagen in den kommenden 10 Jahren nachgerüstet, bedeutet das eine weitere Einsparung an Holz in Höhe von rund 30 PJ. Gleichzeitig ist natürlich davon auszugehen, dass im Segment der Gebäudeheizung noch eine Reihe von Biomasseanlagen installiert werden. Geht man hier für die kommenden 10 Jahre von zusätzlich einer Millionen ERF in hybriden Systemen und ebenfalls 1 Mio. Kesselanlagen in hybriden Anwendungen aus, so würde ein Mehrbedarf an Holz von rund 40 PJ entstehen. In Summe ergäbe sich jedoch eine Einsparung von rund 50 PJ.

Für den GHD-Sektor kann davon ausgegangen werden, dass durch den Einsatz von Wärmepumpen rund 80 % der derzeit eingesetzten Biomassen ersetzt werden können (ca. 55 PJ). Ein zusätzlicher Einsatz ist für die kommenden 10 Jahre nicht zu erwarten, da bei einer Hybridpflicht eher Optionen von Wärmepumpe und Gaskessel zum Einsatz kommen dürften.

Von den in der Industrie eingesetzten Biomassemengen dürften sogar bis zu 90 % der bisherigen Biomassenutzungen im Niedertemperaturbereich liegen und zu etwa 80 % durch Wärmepumpen und E-Direktheizungen ersetzbar sein (ca. 55 PJ). Dies liegt unter anderem am Abfallrecht. Typischerweise fallen biogene Reststoffe in der Verarbeitung in der Holzwirtschaft und der Lebensmittelindustrie an. Dort fallen vielfach aber nur Wärmebedarfe unter 150 bis 200 °C an. Da aus den Reststoffen mit Verlassen des Geländes häufig rechtlich Abfall wird, lohnt sich die Weitergabe an Industrieanlagen mit Hochtemperaturwärmebedarf bisher nur selten. Hier braucht es eine entsprechende Anpassung des Abfallrechts.

Aus einer auslaufenden Stromerzeugung mittels Festbrennstoffen dürften weitere rund 60 PJ verfügbar werden.

Allein diese erste Abschätzung zeigt ein Potenzial von rund 220 PJ, das allein durch ein Umschichten der bisherigen energetischen Holzverwendung für Hochtemperaturprozesse verfügbar gemacht werden könnte. Dies steht im Vergleich zu einem Bedarf in Chemie, Steine und Erden und NE-Metallen von rund 400 PJ.

6 Ansätze zur Umlenkung der Biomasse

Wie schwierig Eingriffe in das Heizverhalten von Privatpersonen ist, hat die Diskussion um das Gebäudeenergiegesetz 2023/2024 gezeigt. Insofern braucht es in diesem Segment eine umfangreiche und frühzeitige Aufklärung kombiniert mit eher marktwirtschaftlichen Anreizen: Förderung für hybride Systeme bzw. die Nachrüstung von Wärmepumpen an Biomasseheizanlagen. Zudem könnten flexible Stromtarife einen hybriden Betrieb von Heizsystemen anregen (Wärmepumpe bei niedrigen oder negativen Strompreisen, Biomasse bei sehr hohen Strompreisen). Außerdem könnte ein Nachhaltigkeitsaufschlag auf den Preis von Holzbrennstoffen im Endkundenbereich eine Lenkungswirkung in der gewünschten Form entfalten.

Für den GHD-Bereich sollte ein ähnliches Lenkungs-Setup die gewünschte Wirkung erreichen.

Bei der Industrie ist die Förderung für neue Biomasseheizanlagen konsequent auf Hochtemperaturanwendungen auszurichten. Ggf. wäre eine Förderung auch auf die gewünschten Industriezweige zu fokussieren. Bestehende Verwendungen im Niedertemperaturbereich sollten zunächst über Aufklärungsmaßnahmen und später dann ggf. auch über eine Nachhaltigkeitsabgabe reduziert werden.

7 Fazit und Empfehlungen

Aus wissenschaftlicher Sicht ist eine konsequente Klimaschutzpolitik zwingend notwendig, wobei das Erreichen der Klimaneutralität vor dem Beibehalten eines gewohnten Konsums steht. Die energetische Nutzung von Biomasse auch für Wärmeanwendungen ist unter Berücksichtigung gewisser Rahmenbedingungen klimaneutral bis hin zur Bereitstellung negativer Emissionen und wird für eine erfolgreiche, d.h. wirtschaftlich auch machbare, Transformation der Wärmebereitstellung bis 2045 für entsprechende Biomassesortimente in ausgewählten Anwendungsfällen (z.B. biogene Reststoffe in industriellen Hochtemperaturanwendungen, winterliche Spitzenlastabdeckung in Wärmeversorgungslösungen) benötigt. Während vielfältige Wärmeanwendungen unter 200 °C in großen Teilen auch über andere erneuerbare Energien als Biomasse bereitgestellt werden können, benötigen viele Industriezweige im Hochtemperaturbereich Biomasse, entweder aufgrund fehlender Optionen zur Elektrifizierung, zu geringer Anschlussleistungen im Verteilnetz oder fehlender H₂-Infrastruktur. Eine grobe Abschätzung zeigt einen Bedarf von rund 400 PJ, während gleichzeitig durch eine weitgehende Hybridisierung bestehender Biomassewärmeeinrichtungen und neu gebauter Niedertemperaturheizanlagen ein Potenzial von etwa 220 PJ aus der bestehenden Wärmenutzung für Hochtemperaturanwendungen verfügbar gemacht werden könnte.

Hierzu benötigt es aber eine positive und konstruktive Aufklärung der Nutzenden durch Wissenschaft, Kommunen und Politik, ein angepasstes Abfallrecht, sowie eine geschickte finanzielle Anreizsetzung durch Förderung und Nachhal-

tigkeitsabgaben. Neue Biomassefeuerungsanlagen sollten nur noch mit wenigstens einer technischen und steuerungsseitigen Nachrüstmöglichkeit für eine Hybridisierung mit Strom oder Wärmepumpen erlaubt sein und auf Hochtemperaturbedarfe oder die Absicherung von Bedarfsspitzen fokussieren.

Literatur/Quellen

- [Adam, 2020] Adam, R.; Zeng, T.; Ulbricht, T.; Kirsten, K.; Schneider, P.; Dobler, U.; Lenz, V. (2020): Erfolgreiche Demonstration des Prüfbrennstoffkonzeptes zum Einsatz nicht-holzartiger Festbrennstoffe im Geltungsbereich der 1. BImSchV. Müll und Abfall 07/2020. DOI: <https://doi.org/10.37307/j.1863-9763.2020.07.06>
- [Adam, 2024] Adam, R.; Zeng, T.; Röver, L.; Schneider, P.; Werner, H.; Birnbaum, T.; Lenz, V. (2024): Erfolgreiche Demonstration des Einsatzes von Laub-Holz-Mischpellets als »sonstiger nachwachsender Rohstoff« gemäß § 3 (1) Nr. 13 der 1. BImSchV. MÜLL und ABFALL. <https://doi.org/10.37307/j.1863-9763.2024.01.05>
- [AGEEstat, 2025] Arbeitsgruppe Erneuerbare Energien-Statistik, Umweltbundesamt (2025): Zeitreihen zur Entwicklung der erneuerbaren Energien in Deutschland
- [BMUV, 2022] Bundesministerium für Umweltschutz (2022): Ist Heizen mit Holz klimaneutral? www.bmuv.de [Zugriff: 07.05.2025]
- [Bundesregierung, 2024] Bundesregierung (2024): Bundes-Klimaschutzgesetz (KSG) vom 12. Dezember 2019 (BGBl. I S. 2513), das zuletzt durch Artikel 1 des Gesetzes vom 15. Juli 2024 (BGBl. 2024 I Nr. 235) geändert worden ist"
- [Copernicus, 2025] Copernicus Climate Change Service (2025): The 2024 Annual Climate Summary. Global Climate Highlights 2024. www.climate.copernicus.eu (Zugriff: 07.05.2025)
- [DBFZ, 2023] Schindler, H.; Majer, S.; Thrän, D.; Lenz, V. (2023): Nachhaltigkeit von Holzenergie, DBFZ Diskussionspapier, Leipzig
- [DBFZ, 2025a] Deutsches Biomasseforschungszentrum gemeinnützige GmbH (2025): DBFZ Resource Database <https://datalab.dbfz.de>
- [DBFZ, 2025b] Deutsches Biomasseforschungszentrum gemeinnützige GmbH (2025): eigene Abschätzungen auf Basis [AGEEstat, 2025]
- [DWD, 2025] Deutscher Wetterdienst (2025): Klimastatusbericht für Deutschland Jahr 2024, Offenbach am Main, Selbstverlag des Deutschen Wetterdienstes
- [FNR, 2021] Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (2021): Bioenergiepotenziale 2050. Was kann Bioenergie leisten? www.bioenergie.fnr.de (Zugriff: 07.05.2025)
- [ifeu, 2013] Gärtner, S.; Hienz, G.; Keller, H.; Müller-Lindenlauf, M. (2013): Gesamtökologische Bewertung der Kaskadennutzung von Holz. Umweltauswirkungen stofflicher und energetischer Holznutzungssysteme im Vergleich. Heidelberg
- [ifeu, 2024] Hennenberg, K.; Köppen, S.; Banse, H.; Brödner, R.; Cyffka, K-F.; Fehrenbach, H.; Iost, S.; Jordan, M.; Kilian, D.; Morland, C.; Pfeiffer, M.; Reise, J.; Richter, S.; Scheinle, J.; Schindler, H.; Weimar, H. (2024): Hintergrundinformationen zum Status Quo der Land- und Forstwirtschaft in Deutschland und zukünftigen Bioenergiepotenzial für die Erarbeitung der NABIS. Darmstadt, Berlin, Braunschweig, Hamburg, Heidelberg, Leipzig

- [Jordan, 2019] Jordan, M.; Lenz, V.; Millinger, M.; Oehmichen, K.; Thrän, D. (2019). "Future competitive bioenergy technologies in the German heat sector: Findings from an economic optimization approach". Energy (ISSN: 0360-5442), H. 189. DOI: 10.1016/j.energy.2019.116194
- [Lenz, 2020] Lenz, V.; Szarka, N.; Jordan, M.; Thrän, D. (2020): Status and perspectives of biomass use for industrial process heat for industrialized countries, with emphasis on Germany. Chemical Engineering & Technology, Vol. 43, Nr. 8. S. 1469–1484. DOI: 10.1002/ceat.202000077
- [Statista, 2025] Statista (2025): CO₂-Emissionen weltweit in den Jahren 1960 bis 2023 www.de.statista.com (Zugriff: 07.05.2025)
- [Thrän, 2024] Thrän, D. et.al. (2024): BECCS – ein nachhaltiger Beitrag zur CO₂-Entnahme in Deutschland?
- [UBA, 2022] Umweltbundesamt (Hrsg.) (2022): Aktuelle Nutzung und Förderung der Holzenergie. Climate Change 12/2022, Dessau-Roßlau
- [UFZ, 2025] Helmholtz Zentrum für Umweltforschung: SoBio II Modellierung von Szenarien einer kostenoptimalen Biomasseverteilung in der Bioökonomie im Kontext der Klimaschutzziele und SDGs bis 2050 (laufendes Projekt)
- [VCI, 2023] Verband der chemischen Industrie (2023): Chemistry 4 Climate. Wie die Transformation der Chemie gelingen kann. Abschlussbericht. <https://www.vci.de/vci/downloads-vci/publikation/broschueren-und-faltblaetter/final-c4c-broschure-langfassung.pdf> (Zugriff: 08.05.2025)

Kontakt

Prof. Dr. Volker Lenz, Bereichsleiter Thermo-chemische Konversion

Deutsches Biomasseforschungszentrum gGmbH Leipzig

✉ volker.lenz@dbfz.de

Aktuelle rechtliche Rahmenbedingungen, Rechtsprechung und Entwicklungen – unter besonderer Berücksichtigung neuester EEG-rechtlicher Änderungen im Zusammenhang mit der Förderung von Biogasanlagen

I Einleitung

Die Bioenergiebranche steht im Jahr 2025 vor einschneidenden strukturellen und regulatorischen Veränderungen. Der Gesetzgeber hat mit dem sogenannten „Biomasse-Paket“ auf die absehbare Förderlücke vieler Bestandsanlagen reagiert und zugleich die Umstellung der Förderlogik des EEG für Biogas hin zu einem flexiblen und bedarfsorientierten Anlagenbetrieb weiter vorangetrieben. Parallel werfen aktuelle Rechtsprechung und marktpraktische Entwicklungen – etwa die Insolvenz eines zentralen Biomethanversorgers – komplexe rechtliche Folgefragen auf. Der folgende Beitrag gibt einen systematisierten Überblick über die aktuellen legislativen Änderungen, ordnet sie in die langfristige Strategie zur Energiewende ein und beleuchtet wesentliche rechtliche Fragestellungen anhand aktueller Judikatur.

II Aktuelle Gesetzesänderungen im EEG – das Biomasse-Paket: Inhalt, Zielrichtung und Systemwechsel – eine Einordnung

1 Regelungskontext und Hintergrund

Zahlreiche Biogasanlagen im Bestand erreichen nunmehr nach und nach das Ende ihrer 20-jährigen EEG-Förderung. Für viele Betreiber bestand angesichts überzeichneter Ausschreibungen keine realistische Perspektive auf Anschlussförderung. Dies hätte erhebliche Folgen für den Strom- und Wärmemarkt nach sich gezogen, gerade im ländlichen Raum, wo Biogasanlagen wichtige Funktionen in der kommunalen Wärmeplanung übernehmen. Mit dem Gesetz zur Änderung des Erneuerbare-Energien-Gesetzes zur Flexibilisierung von Biogasanlagen und Sicherung der Anschlussförderung („Biomasse-Paket“) reagierte der Gesetzgeber kurzfristig, wenngleich die für den Großteil der neuen Vorschriften benötigte beihilferechtliche Genehmigung der EU-Kommission (§ 101 Abs. 2 EEG 2023) noch aussteht.¹ Die beschlossenen Gesetzesänderungen verfolgten zusammengefasst die Intention, Planungssicherheit für Bestandsanlagen zu

¹ Stand vom 25. April 2025; aktuelle Informationen werden u.a. auf der Internetseite der Bundesnetzagentur im Vorfeld der jeweiligen Gebotstermine bereitgestellt, vgl. <https://www.bundesnetzagentur.de/DE/Fachthemen/ElektrizitaetundGas/Ausschreibungen/Biomasse/GtApr2025/start.html> [zuletzt abgerufen am 25.04.2025].

schaffen, sowie die Systematik der EEG-Förderung in Richtung eines stark flexibilitätsorientierten und wärmeintegrierten Betriebs fortzuentwickeln.

2 Flexibilisierung der Anlagenfahrweise – neue Vergütungssystematik

Ein zentraler Aspekt der Novelle ist der Wechsel der Förderlogik: Statt anteiliger Förderung auf Basis der Bemessungsleistung (§ 39i EEG a.F.) wird künftig Strom aus Biogasanlagen nur für die 11.680 Betriebsviertelstunden mit der höchsten Einspeisung vergütet (§ 39i Abs. 2a EEG) – abnehmend ab dem fünften Jahr nach Zuschlagserteilung, § 39i Abs. 2a S. 3 EEG. Dies soll den generell intendierten flexibleren und marktorientierteren Anlagenbetrieb initiieren. So werden nach dem neuen Förderregime gerade präzise gesteuerte Anlagen, die nicht auf Dauerlast fahren, begünstigt. Kleine Anlagen bis 350 kW erhalten einen erweiterten Förderzeitraum (16.000 Viertelstunden).

Die Umsetzungsfrist für notwendige Umstellungen bei Bestandsanlagen für eine Anschlussförderung nach dem EEG 2023 wurde auf dreieinhalb Jahre, bei vormals fünf Jahren, verkürzt. Es bestehen Zweifel, ob dieser Zeitraum – angesichts notwendiger Investitionen, Genehmigungen und Lieferzeiten – ausreicht. Flexibilisierungsmaßnahmen (bspw. größere Gasspeicher etc.) erfordern teils komplexe infrastrukturelle Nachrüstungen.

Der Flexibilitätszuschlag (§ 50a EEG) wurde von 65 €/kW auf 100 €/kW erhöht, wobei auch hier kritisch abzuwarten bleibt, ob hiermit die zusätzlich nötig gewordenen Investitionen für Anlagenbetreiber – gerade im Hinblick auf die Flexibilisierung – wirtschaftlich aufgefangen werden können.

3 Ausschreibungen und Anschlussförderung

Zur Entzerrung des Bewerberandrangs auf die Ausschreibungen wurde die Teilnahmemöglichkeit für Anschlussförderungen auf fünf Jahre vor Förderende reduziert (§ 39g EEG), verbunden mit einer Verlängerung des Förderzeitraums von zehn auf zwölf Jahre (§ 39h Abs. 3 EEG). Die Ausschreibungsvolumina wurden für 2025/2026 signifikant erhöht (§ 28c EEG) – allerdings ohne tragfähige Perspektive über das Jahr 2027 hinaus. Eine gesetzliche Privilegierung erhalten Anlagen, die an eine leitungsgebundene Wärmeversorgung angeschlossen sind (§ 39d EEG), für die bis 2027 ein separiertes Ausschreibungssegment besteht.

4 Strommarktorientierung: Entfall der Förderung bei schwach positiven Preisen

Ergänzend regelt nunmehr § 51b EEG, dass der Vergütungsanspruch bei bestimmten Biogasanlagen auf null reduziert ist, wenn der Spotmarktpreis bei 2 ct/kWh oder weniger liegt – und nicht wie bisher erst bei negativen Preisen. Auch dies verstärkt den Anreiz, nur bei hoher Nachfrage und entsprechendem

Marktbedarf einzuspeisen. Kritiker sehen hierin ein zusätzliches Erschwernis Anlagen in Zukunft wirtschaftlich betreiben zu können.

5 Reduzierung, Verschärfung des sog. Maisdeckels

Mit § 39i Abs. 1 EEG wird die Nutzung von Mais und Getreidekorn auf 25 Masseprozent für bezuschlagte Anlagen ab 2026 begrenzt. Ziel ist das verstärkte Ersetzen von Anbaubiomasse zugunsten von Reststoffen. Dies ist grundsätzlich zu begrüßen. Jedoch ist die zu befürchtende zusätzliche wirtschaftliche Belastung für Anlagenbetreiber nicht aus dem Blick zu verlieren. So gilt gerade Mais als besonders energiereiches Substrat. Der Einsatz alternativer Einsatzstoffe lässt damit höhere Kosten für den Anlagebetrieb befürchten.

6 Fazit und Ausblick

Die gesetzgeberischen Eingriffe des „Biomasse-Pakets“ markieren einen Wendepunkt in der Förderung und Rolle der Bioenergie. Von einer Grundversorgungstechnologie wandelt sich Biomasse zunehmend zu einer flexiblen Ergänzungsoption für das Stromsystem. Dieser Systemwechsel ist technisch und wirtschaftlich anspruchsvoll und bedarf auch in den Folgejahren einer rechtssicheren, praktikablen Ausgestaltung.

Künftig muss eine konsistente Biogasstrategie entwickelt werden, die auch Fragen der Substratnutzung, der Speicherintegration und der Marktdesignreform berücksichtigt. Die Branche ist im Aufbruch – aber nicht ohne Risiko.

III Bioenergie im Koalitionsvertrag – Ausblick auf den politischen und rechtlichen Rahmen

Der Koalitionsvertrag unterstreicht die zentrale Rolle der Bioenergie bei Wärmeversorgung, Mobilität und steuerbarer Stromproduktion (Rn. 1051 ff.). Die staatliche Förderung soll mittelfristig entfallen; Investitionsanreize sollen marktlich abgesichert werden. Die Potenziale kleiner, wärmegeführter Anlagen und die stärkere Nutzung von Reststoffen sind erklärtes Ziel – in klarer Kontinuität zum eingeschlagenen Kurs des Biomasse-Pakets.

IV Rechtsprechungsüberblick zum EEG und Strompreisrecht

1 Verfassungsrechtliche Überprüfung der Strompreisbremse

Das BVerfG (Urt. v. 28.11.2024 – 1 BvR 460/23) wies Verfassungsbeschwerden gegen das Strompreisbremsegesetz zurück. Die im Gesetz teils vorgesehene Differenzierung zwischen Verstromung aus fester Biomasse und Biogasanlagen war nicht gleichheitswidrig, ein entsprechender Verstoß konnte nicht hinreichend dargelegt werden.

Die Abschöpfung von Übererlösen wurde überdies als verhältnismäßiger und damit gerechtfertigter Eingriff in die Berufsfreiheit (Art. 12 GG) anerkannt. Die Maßnahmen galten der Bewerkstelligung einer außergewöhnlichen Störung der wirtschaftlichen Lage infolge der Einstellung der Gaslieferung nach dem russischen Angriffskrieg auf die Ukraine und damit einem legitimen Ziel. Vor dem Hintergrund der besonderen Ausnahmesituation und dem existenziellen Bedürfnis von bezahlbarem Strom als unverzichtbares Gebrauchsgut war das gesetzgeberische Vorgehen auch verhältnismäßig im engeren Sinne.

2 Technologiebonus bei ORC-Anlagen

Der BGH (Urt. v. 12.11.2024 – XIII ZR 3/24) begrenzt die Zahlung des Technologiebonus nach § 8 Abs. 4 EEG 2004 auf den durch die ORC-Anlage erzeugten Stromanteil. Dies widerspricht der bislang herrschenden Rechtsprechung zahlreicher Landgerichte (vgl. LG Kassel, Urteil vom 04.09.2019 – 4 O 1049/17; LG Münster, Urteil vom 19.04.21 – 015 O 107/19; LG Stade, Urteil vom 07.02.2023 – 3 O 118/22; LG Braunschweig, Urteil vom 26. 06.2023 – 6 O 4528/21 und vom 14.09.2023, 6 O 2149/22; LG Traunstein, Urteil vom 15.09.2023 – 5 O 2799/22; LG Halle, Urteil vom 21.09.2023 – 4 O 182/22; LG Frankfurt (Oder), Urteil vom 12.01.2024 – 11 O 284/22), die eine Gesamtvergütung vorsah. Maßgeblich sei, so der BGH, die Zielsetzung des Gesetzgebers: Innovationsanreize ohne Mitnahmeeffekte.

3 Formaldehydbonus bei Veränderungen an einer Biogasanlage

Der BGH (Urt. v. 25.06.2024 – XIII ZR 10/22) entschied, dass ein Anspruch auf Formaldehydbonus auch nachträglich entstehen kann, wenn die Anlage infolge einer Entdrosselung genehmigungspflichtig wird und die Emissionsanforderungen erfüllt sind. Entscheidend ist der Zeitpunkt der Erfüllung der Voraussetzungen, nicht der ursprüngliche Inbetriebnahmestatus.

4 Fernsteuerbarkeit und Netzanschlusspflichten

Das OLG Brandenburg (Urt. v. 23.04.2024 – 6 U 39/19) stellte klar: Ohne Erfüllung der technischen Anforderungen des § 6 EEG 2009 – insbesondere zur

Fernsteuerbarkeit – entfällt für diesen Zeitraum der Vergütungsanspruch gemäß § 16 EEG 2009 endgültig. Dem Anlagenbetreiber obliegt die Beweislast hinsichtlich der Erfüllung der technischen Vorgaben zur Fernsteuerbarkeit.

V Die Insolvenz der Landwärme GmbH, insolvenzrechtliche Implikationen

1 Sachverhalt und Marktstellung

Die Landwärme GmbH war ein großer und zentraler Anbieter für Biomethan in Deutschland und Europa. Seit der Eröffnung des Insolvenzverfahrens im November 2024 (AG Berlin-Charlottenburg) übernimmt nunmehr ein neuer Investor (Anew Climate LLC) die Betreuung fortgeführter Verträge. Neugeschäft wird durch die Landwärme nicht mehr betrieben.²

2 Problem: Nachweiserbringung nach EEG

Biogasanlagenbetreiber sind mitunter verpflichtet, Herkunfts- und Nachhaltigkeitsnachweise für das eingesetzte Biomethan zu erbringen (vgl. § 46 Nr. 3 EEG 2009). Ist dies vertraglich dem Biogaslieferanten übertragen, stellt sich die Frage nach der Durchsetzbarkeit bzw. der Betroffenheit solcher Verpflichtungen im Insolvenzfall.

3 Insolvenzzrechtliche Einordnung – eine Problemdarstellung

Fraglich – und rechtlich bislang abschließend nicht geklärt – ist die insolvenzrechtliche Einordnung einer vertraglichen Pflicht des Biogaslieferanten zur Erbringung der Herkunfts- und Nachhaltigkeitsnachweise. Im Zentrum steht die Frage, ob hierin eine Insolvenzforderung mit entsprechender Insolvenzvermögensbezogenheit im Sinne des § 38 InsO zu sehen ist. Dies könnte zu verneinen sein, wenn die Nachweiserbringung als eine sogenannte unvertretbare Handlung einzuordnen ist, die nur durch den Schuldner persönlich und nicht rechtlich, wirtschaftlich oder tatsächlich gleichwertig durch einen Dritten, erbracht werden kann.

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

² vgl. für aktuelle Informationen, <https://www.landwaerme.de/> [zuletzt abgerufen am 25.04.2025].

Roman Adam, Ludwig Bork, Hans Werner, Sophie Hirschelmann,
Uta Berghöfer

– MOOReturn –

Moor-Klimaschutz und Wertschöpfung verbinden durch Wiedervernässung und Paludikultur

Zusammenfassung: Das Projekt MOOReturn verbindet Moor-Revitalisierung mit wirtschaftlicher Wertschöpfung in der Region Malchin. Durch die schrittweise Wiedervernässung von mehreren hundert Hektar Moorflächen entlang der Oberen Peene wird eine jährliche THG-Einsparung von etwa 5.000 Tonnen erreicht werden. Das interdisziplinäre Forschungsprojekt, getragen von neun Partnern aus Wissenschaft, Wirtschaft und Kommunalverwaltung, erforscht innovative Aufbereitungstechniken für Paludibiomasse und deren vielfältige Verwertungswege. Insbesondere die Produktpfade Papier- und Verpackungsmaterial, für Faserplatten und Baustoffe sowie chemische Grundstoffe stehen im Fokus. Das Aufbereitungsverfahren soll rückstandsfrei erfolgen, wodurch ebenfalls die Herstellung von Düngemitteln aus Nebenprodukten des Aufbereitungsprozesses untersucht wird. Neben ökologischen Vorteilen durch reduzierte Treibhausgasemissionen und erhöhte Biodiversität werden wirtschaftliche Anreize für Landwirte geschaffen. Die eingesetzte florafuel-Aufbereitungsanlage ermöglicht eine flexible Verarbeitung verschiedener Biomassen und stellt damit eine belastbare Wertschöpfungskette sicher.

Abstract: The MOOReturn project combines peatland revitalization with economic value creation in the Malchin project region. Through the gradual rewetting of several hundred hectares of peatland along the Upper Peene, an annual greenhouse gas reduction of approximately 5,000 tons will be achieved. This interdisciplinary research project, supported by nine partners from science, industry, and local government, explores innovative processing techniques for paludiculture biomass and its diverse utilization pathways. The focus is particularly on product streams for paper and packaging materials, fiberboards & building materials, as well as chemical raw materials. The processing method aims to be residue-free, which also enables research into the production of fertilizers from by-products of the processing chain. In addition to ecological benefits through reduced greenhouse gas emissions and increased biodiversity, economic incentives are created for farmers. The deployed florafuel processing plant enables flexible processing of various biomasses, thereby ensuring a resilient value chain.

1 Einleitung

Klimaschutz braucht nasse Moore! Moore sind bedeutende Kohlenstoffspeicher und im nassen Zustand bleibt dieser im Torf gespeichert und es kann sogar Torfneubildung stattfinden (Kohlenstoffsенke). Außerdem sind sie für den Grund- und Hochwasserschutz und den Erhalt von moortypischen Tier- und Pflanzenarten ausgesprochen wichtig. Deutschlandweit sind trockengelegte Moore für

ca. 7 % der Treibhausgas-Emissionen verantwortlich und emittieren mehr als ein Drittel der durch Landwirtschaft und landwirtschaftliche Bodennutzung entstehenden Treibhausgase [1].

Die Moorböden Deutschlands, welche ca. 5% der Landfläche bedecken, sind zu 95 % entwässert und zumeist in landwirtschaftlicher Nutzung [1]. Dabei ist der Lebensunterhalt zahlreicher Flächeneigentümer*innen und Landnutzer*innen eng mit den entwässerten Moorflächen verknüpft. Grünlandnutzung und Ackerbau sind die derzeit am weitesten verbreiteten Nutzungsformen [2]. Damit steht die entwässerungsbasierte Landnutzung konträr zum Klimaschutz. Die Moor-Revitalisierung ist die entscheidende Maßnahme, um den anhaltenden anthropogenen Ausstoß von Treibhausgasen aus Mooren zu unterbinden und gleichzeitig eine natürliche Kohlenstoffsequestrierung mit langfristiger Speicherung für die Zukunft zu ermöglichen. Das Konzept der Paludikultur eröffnet Perspektiven für eine angepasste Nutzung und neue Wertschöpfungsmöglichkeiten.

Gegenwärtig wird die Umsetzung von Paludikultur-Wertschöpfungsketten indirekt blockiert, da sich die Biomassebereitstellung und der dazugehörige Verwertungsweg bedingen und somit gleichzeitig durch glaubwürdige Akteure entwickelt werden müssen. Das geplante Vorhaben wird einen wesentlichen Beitrag zum Überwinden dieser Herausforderungen leisten. Der bestehende Investitionsstau im Moorschutz und die offensichtliche Dringlichkeit für Moor-Klimaschutz erfordern einen möglichst robusten und damit auch flächeneffektiven Lösungsansatz. Während eine stoffliche Nutzung bisher nicht industriell etabliert ist, können energetische Verwertungswege eine flächenwirksame Übergangslösung für den derzeitigen Stau an nötigen Moor-Revitalisierungsprojekten bieten. Gleichzeitig wird ein späterer Wechsel auf die stoffliche Verwertung aus bereits praktizierter Paludikultur umgesetzt.

2 Mögliche Moorflächen in und um die Modellregion Malchin

Entwässerte Moore sind starke THG-Quellen [3,4], vorrangig emittiert als CO_2 [5]. Insbesondere bei Wechselfeuchte oder nur mäßig tiefen mittleren jährlichen Wasserständen kommen N_2O -Emissionen hinzu (ebd.). Von entwässerten Moorflächen wird kein CH_4 emittiert, aber die Gräben entwässerter Moore können erhebliche Mengen an CH_4 freisetzen [6,7], werden aber in der Bilanzierung oft nicht berücksichtigt. Diese Emissionen können nur durch die Revitalisierung der Moore reduziert werden. Revitalisierte Moore sind im Allgemeinen trotz der teilweise zumindest am Anfang recht hohen CH_4 -Emissionen [8] besser für das Klima als entwässerte Moore, selbst wenn ihre biogeochemische Funktionsweise insgesamt auch für längere Zeiträume nicht der von naturnahen Mooren entspricht [9].

Mittlerweile gibt es einige Publikationen zum THG-Austausch von Moorflächen nach Revitalisierung [3] jedoch kaum THG-Bilanzen nach Moor-Revitalisierung von Niedermoorgrünland mit anschließender Nutzung als Nasswiesen. Studien von Karki et al. [10], Kandel et al. [11] und Huth et al. [12] nähern sich der Thematik an, aber die betreffenden Ökosysteme können nur eingeschränkt als Nasswiesen bezeichnet werden. In Tiemeyer et al. [3] sind Jahresbilanzen zu einigen dieser Kategorie zuordbaren Ökosysteme enthalten. Diese wenigen verfügbaren Bilanzen basieren jedoch auf unterschiedlichen Methoden und weichen hinsichtlich ihrer Systemgrenzen (z.B. Beobachtungszeitraum, Elemente im Produktionssystem, bestandsbildende Pflanzenarten) sowie den Bestimmungsverfahren deutlich voneinander ab und erfassen in keinem Fall den vollständigen Lebenszyklus der Paludikulturen.

Ökologisch gesehen gehören Moorhabitats zu den am stärksten bedrohten Lebensräumen in Deutschland. Das gilt für die Pflanzenwelt [13] ebenso wie für die Tiere [14]. Auch wenn die Population vieler Libellenarten in Deutschland in den vergangenen 30 Jahren wieder anstieg, gilt dies, ebenso wie in anderen Artengruppen, nicht für die trockengelegten Moore. Auf diesen Flächen sind viele Tierarten weiterhin kontinuierlich im Rückgang begriffen. Kreyling et al. [9] konnten zeigen, dass die Vegetation auf revitalisierten Niedermooeren auf absehbare Zeit nicht in den Zustand vor der Entwässerung zurückkehrt. Dennoch werden für viele Artengruppen positive Entwicklungen erwartet.

Die Revitalisierung von trockenen Mooren, ob nun im Kontext eines Forschungs- oder Demonstrationsprojektes, einer privatwirtschaftlichen Initiative oder als Eingriffs-Ausgleichsmaßnahme bspw. für städtische Bau-Großprojekte, unterliegt definierten Regelungen und Vorgehensweisen. Die hierfür nötigen Schritte können in Einzelfällen abweichen, vor allem entscheidet der Umfang der Umsetzung über die Notwendigkeit der Durchführung von unterschiedlichen Planverfahren oder sogar Flurneuordnungsverfahren. Generell werden die Einzelschritte bspw. in der Honorarordnung für Architekten und Ingenieure (HOAI), oder aber auch als einzelne DIN-Norm für jede Leistungsphase des Bauwesens definiert. Die Planung, Durchführung und Nachbetreuung von Moor-Revitalisierungen kann durch fachlich geschultes Personal abgedeckt werden.

Das Projekt fokussiert für die Moor-Revitalisierung, Wasserstandsoptimierung und Biomasse-Ernte auf verschiedene Moorflächen entlang der Oberen Peene im Umkreis der Stadt Malchin (Mecklenburgische Seenplatte). Auf diesen Flächen bewirtschaften der Landwirtschaftsbetrieb Voigt und andere bereits Nasswiesen-Flächen auf Moor, welche für die Biomasse-Ernte zur Verwertung im Projekt zur Verfügung stehen (siehe Abb. 1, blau markierte Flächen). Sie weisen bereits eine typische Moorvegetation (Seggen, Rohrglanzgras, etc.) auf. Hier von kann dauerhaft Biomasse von ca. 150 ha bereitgestellt werden. Für den gesamten Polder Retzow liegt bereits eine hydrologische Vorstudie vor, welche nötige Maßnahmen für die Wasserstandsanehebung im Polder darlegt und als Grundlage für die Vorplanung im hier skizzierten Vorhaben dienen kann. Vorge-

sprache mit Bewirtschafter*innen des Polders und weitere Akteure zu Szenarien von Moor-Revitalisierung und Paludikultur fanden im Projekt MoKli bereits statt und bilden eine gute Grundlage für die ersten Schritte im Vorhaben.

Zusätzlich wurden Flächen im Polder Retzow zwischen Remplin und Malchin für eine mögliche Moor-Revitalisierung ausgewählt (siehe Abb. 1, orange markierte Flächen).

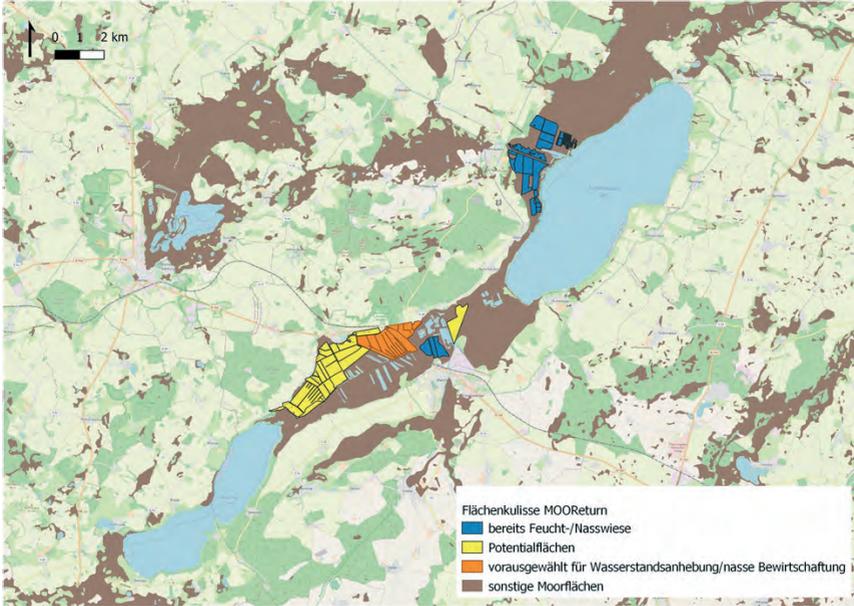


Abb. 1: Darstellung der projektrelevanten Moorflächen in der Umgebung der Stadt Malchin

Die übrigen Flächen im Polder Retzow (419 ha) sowie weitere kleine Flächen wurden als prioritärer Suchraum für weitere Moor-Revitalisierungsflächen ausgewählt (siehe Abb. 1, gelb markierte Flächen). Im Bereich der Oberen Peene befinden sich weitere umfangreiche Moorflächen, die ein großes Flächenpotential für weitere Moor-Revitalisierungen darstellen. In einem Umkreis von 20 km um die Stadt Malchin befinden sich insgesamt 4.589 ha entwässerte Moorfläche (siehe Abb. 2 und Tab. 1). Die Bestimmung der Gesamtfläche erfolgte auf Basis der Moor-Karte des LUNG Mecklenburg-Vorpommern (2016) [15]. Eine Benennung einzelner Teilflächen oder Polder erfolgt in Abb. 2, in Kombination mit Tab. 1. Die angegebenen Kulissen entsprechen den Klassen der Paludikultur-Kulisse des Landes Mecklenburg-Vorpommern [16].

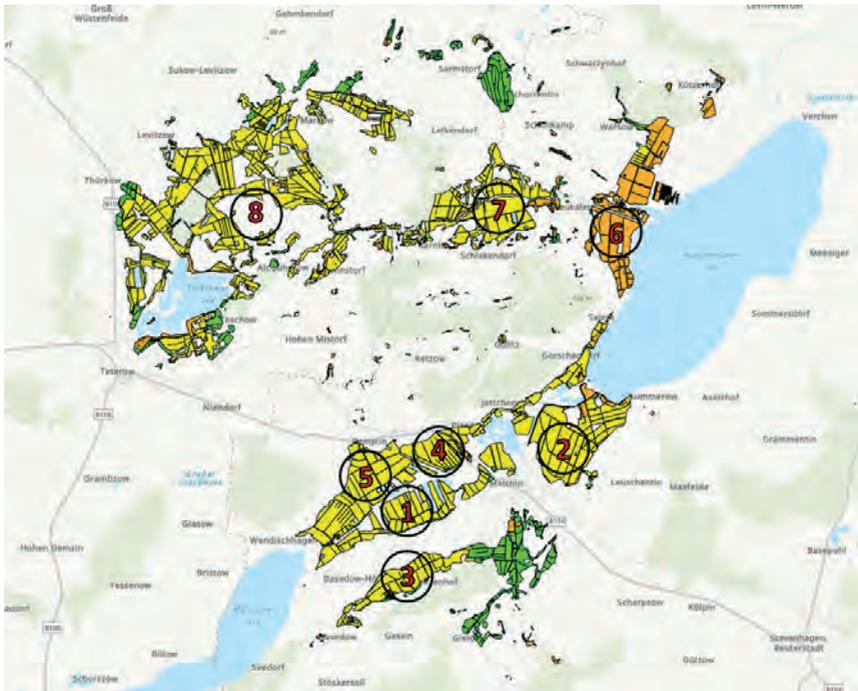


Abb. 2: Darstellung der projektrelevanten Moorkomplexe und ihrer Einteilung nach Klassen der Paludikultur-Kulisse (mit Zuordnungsnummern für Tab. 2), (Klasse 1 (grün): ohne Prüfaufgabe, alle Paludikulturen möglich, Klasse 2 (gelb): mit Prüfaufgabe, Klasse 3 (orange): nur Nasswiese, mit Prüfaufgaben)

Tab. 1: Flächengrößen der Moorkomplexe an der Oberen Peene, unterteilt nach Klassen der Paludikultur-Kulissen (Vgl. Nummerierung Abb. 2)

Nummer	Bezeichnung	Kulisse 1	Kulisse 2	Kulisse 3+4	Einheit
1	Polder Basedow	2	330	0	ha
2	Polder Malchin Ost	5	465	32	ha
3	Biergaben	38	231	4	ha
4	Polder Retzow (Ost)	0	126	1	ha
5	Polder Retzow	0	457	5	ha
6	Moorwiesen bei Neukalen	4	27	493	ha
7	Teichweide	3	518	32	ha
8	Teterower Niederung	178	1560	78	ha
	Gesamter Suchraum	230	3714	645	ha

3 Verwertung und Nutzungsmöglichkeiten

3.1 Aufbereitungstechnik

Die Moorbio­masse aus dem natürlichen Grasbewuchs der projektrelevanten Flächen (vorwiegend Sauergräser wie Seggen) ist in der chemischen Zusammensetzung sowie Partikelgröße ein diverser Biomassestoffstrom [17]. Zur Erhöhung der Lagerfähigkeit und damit ganzjährigen Auslastung der weiterverarbeitenden Technik kann die Biomassesilierung eine sinnvolle Rohmateriallagerung sein [18]. Die Anforderung für eine erfolgreiche Aufbereitung an die Rohbio­masse ist ein Wassergehalt >50 Ma.-% (keine Verholzung). Dieser wird in den Sommermonaten in der Ausgangsbio­masse mit durchschnittlich 55 bis 75 Ma.-% erreicht [17]. In Tab. 2 wird beispielhaft die chemische Zusammensetzung von pelletierter Segge und pelletiertem Rohrglanzgras [17] mit den Grenzwerten der Brennstoffnorm für nicht-holzartige Pellets ISO 17225-6 [19] verglichen. Es zeigt sich, dass die Grenzwerte grundsätzlich eingehalten werden können, wenngleich kritische Inhaltstoffe (wie N, S, Cl) bzgl. der energetischen Nutzung (Verschlackungen) und der zu erwartenden Emissionsniveaus (für NO_x, Staub etc. insbesondere im Vergleich zu Holzpellets) weiterhin als kritisch zu bewerten sind. Aus diesem Grund muss eine weitere Brennstoffaufbereitung erfolgen, um einen störungsarmen und emissionsarmen Anlagenbetrieb zu gewährleisten.

Tab. 2: Rohmaterialanalyse einer exemplarischen Moor-Bio­masse im Vergleich mit der Brennstoffnorm für nicht-holzartige Bio­masse ISO 17225-6 [17,19]

Parameter	Einheit	ISO 17225-6, Klasse A	ISO 17225-6, Klasse B	Segge, Sommerernte	Rohrglanzgras, Sommerernte
Wassergehalt	Ma.-% OS	≤12	≤15	8	8
Aschegehalt	Ma.-% TS	≤6	≤10	5,3	6,3
Heizwert	MJ/kg	≥14,5	≥14,5	17,6	17,4
Mech. Festigkeit	Ma.-%	≥97,5	≥96	98,7	98,7
Schüttdichte	kg/m ³	≥600	≥550	683	733
Stickstoff, N	Ma.-% TS	≤1,5	≤2,0	1,0	0,9
Schwefel, S	Ma.-% TS	≤0,2	≤0,3	0,2	0,2
Chlor, Cl	Ma.-% TS	≤0,1	≤0,4	0,5	0,8

OS: Originalsubstanz; TS: Trockensubstanz, *rot markiert bei Grenzwertüberschreitung Klasse A*

Die Aufbereitung von Bio­masse kann durch Waschen und anschließendes Abpressen im hohen Maße zur Reduktion von verbrennungskritischen Bestandteilen wie Stickstoff, Chlor und Schwefel sowie aschebildenden Elementen (z.B. Kalium, Kalzium, Magnesium, Phosphor, Natrium) beitragen und die Grenzwertein­haltung damit ermöglichen [20]. Joseph et al. [21] untersuchten die Reduktion von verbrennungskritischen Elementen durch das Waschen und anschließende

Abpressen von Grassilage von 11 Standorten. Die Aufbereitungsanlage hatte einen täglichen Durchsatz von 300 kg. Eine signifikante Reduktion der Elementkonzentration wurde für fast alle Elemente (siehe Abb. 3) im Mittelwert erzielt.

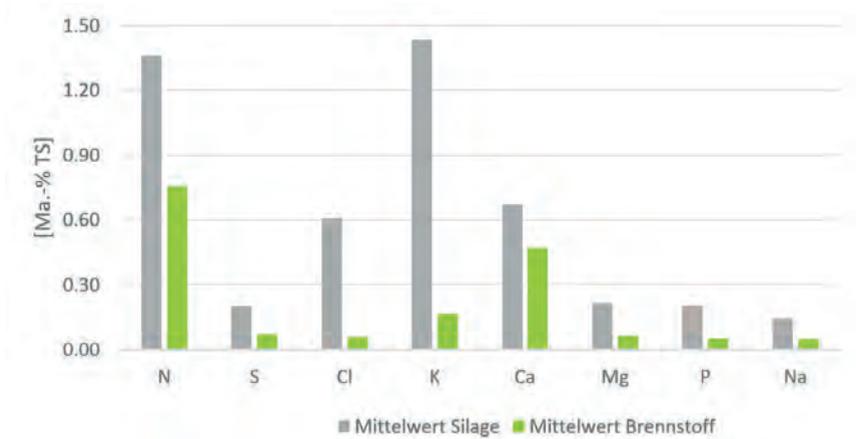


Abb. 3: Reduktion von verbrennungskritischen Elementen durch das Waschen und Abpressen von Biomasse (Mittelwerte aus Silage von je 11 Grasschnitten); MW: Mittelwert

Der Gesamtaschegehalt konnte um 51 % von 8,59 Ma.-% auf 3,97 Ma.-% reduziert werden. Am höchsten ist der Abscheidegrad mit 89 % bei Chlor. Ähnlich stark reduziert wird Kalium mit 89 %, Schwefel mit 64 % und Stickstoff mit 44 % [21]. Das Waschverfahren für Parklaub bzw. Grasschnitt im industriellen Maßstab wurde mit Durchsatzleistungen von ca. 300 kg FM (30 % TM Gehalt) pro Tag [21] bzw. 400 kg FM/h (20 % TM-Gehalt) bereits realisiert [20, 22]. Das Waschverfahren für Parklaub und Grasschnitt ist in eine Prozesskette zur Biomasseaufbereitung mittels florafuel-Verfahren integriert. Vergleichbare Abscheidegrade, wie in Abbildung 3, können auch mit der florafuel-Aufbereitungstechnik realisiert werden [20]. Die Prozesskette umfasst Grobzerkleinerung, Waschen und mechanische Entwässerung (Abpressen) sowie anschließende Trocknung und Brennstoffagglomeration. Unter anderem ist die Feinstzerkleinerung mittels Wasserstrahlschneider wesentlich, um die einzelnen Biomassefasern freizulegen bzw. die Zellwände aufzubrechen und die Biomassepartikel zu vereinzeln. Während des Waschprozesses werden Fremdpartikel (Steine, Plastik, Glassplitter, etc.) abgeschieden. Beim anschließenden Abpressen der Biomasse konzentrieren sich die verbrennungskritischen Bestandteile im Flüssiganteil auf [20]. Der bei der mechanischen Entwässerung gewonnene Feststoff kann getrocknet und im Anschluss brikettiert werden. Für die Herstellung von Brennstoffbriketts müssen die Grenzwerte der ISO 17225-7 [23] eingehalten werden.

Der getrocknete und brikettierte Brennstoff weist erhöhte Homogenität und Transportwürdigkeit im Vergleich zum Rohmaterial oder Ballen auf [24, 25]. Darüber hinaus weisen Briketts durch die thermische Trocknung geringere Wasserge-

halte auf und sind damit deutlich länger lagerfähig als Silageballen [26, 27]. Weiterhin ist durch die Weiterverarbeitung zu runden Briketts mit 2-5 cm Durchmesser eine Brennstoffdosierung und damit ein kontinuierlicher und störungsfreier Feuerungsanlagenbetrieb realisierbar [28, 29]. Im Vergleich zur Pelletierung ist die Brikettierung verschleißärmer, was insbesondere bei nicht-holzartiger Biomasse mit erhöhtem Aschegehalt der Biomasse betriebswirtschaftliche Vorteile aufgrund geringerer Anlagenstillstandzeit mit sich bringt [30].

3.2 Presswasseraufbereitung

Das Presswasser aus der mechanischen Entwässerung der florafuel-Anlage enthält Proteine, freie Aminosäuren, wasserlösliche Kohlenhydrate, organische Säuren und gelöste anorganische Bestandteile [31]. Die Konzentrationen dieser Bestandteile sind stark abhängig von der Art der abgepressten Biomasse sowie der Art und den Bedingungen der Vorbehandlung. Die Aufbereitung von Presswasser aus grüner Biomasse wird häufig mit dem Ziel der Proteingewinnung verfolgt. Dazu wird aus Presssäften proteinreicher Pflanzen (z.B. Luzerne) ein sogenanntes leaf nutrient concentrate (LNC) abgetrennt, welches als Tierfutter oder in der Lebensmittelindustrie eingesetzt werden kann. Nach der Proteinabtrennung bleibt ein sogenannter brown juice über, welcher aufgrund des geringen Proteingehaltes der Moorbio-masse mit dem Presssaft des florafuel-Verfahrens vergleichbar ist.

Brown juice wurde als geeignetes Fermentationsmedium identifiziert für Milchsäurebakterien, zur Herstellung von Fettsäuren (volatile fatty acids) und für *Saccharomyces cerevisiae* sowie als Biogassubstrat untersucht [32, 33]. Auch die Möglichkeiten der Nährstoffgewinnung aus dem brown juice wurden untersucht. Je nach Biomasse wurden zwischen 60 und 79% des C und zwischen 52 und 63 % des N, P und S der frischen Biomasse im Presskuchen gefunden, während nur 6-10 % des C, 8-15 % des N, aber bis zu 27% des P und bis zu 26 % des S im brown juice gefunden wurden. Im Gegensatz dazu gingen weniger als 45 % des K in den Presskuchen über und 19-31 % des K landeten im brown juice [34]. Eine direkte Aufkonzentrierung dieser Nährstoffe aus Presssaft ohne vorherige Proteinabtrennung ist aus der Literatur bislang nicht bekannt. Der Bedarf zu weiteren Entwicklungen für die Nutzung der Nährstoffe aus brown juice wurde auch kürzlich in einem Übersichtsartikel von Møller et al. hervorgehoben [35].

3.3 Energetische Biomassenutzung mit anschließender Ascheverwertung

Der störungsfreie und emissionsarme Betrieb von Biomassefeuerungsanlagen erfordert neben einer guten Feuerungstechnik und einem aufgeklärten Betreiber eine definierte, hochwertige Brennstoffqualität. Biogene Reststoffströme wie Paludibiomassen weisen jedoch im Vergleich zu Stammholz mit wenigen Einschränkungen wesentlich höhere Gehalte an Stickstoff, Schwefel, Chlor und Alkalimetallen wie Natrium und Kalium auf (vgl. Tab. 2). Durch den Ver-

brennungsprozess werden diese Elemente zum Teil freigesetzt und sind bei stabilen Verbrennungsbedingungen und einem vollständigen Gasphasenausbrand die Ursache für die Entstehung der gasförmigen Emissionen, Stickstoffoxide (NO_x), Schwefeloxide (SO_2) und Chlorwasserstoff (HCl), sowie für die Gesamtstaubemissionen. Neben den genannten Emissionen tragen insbesondere die Alkalimetalle K und Na auch zu einer hohen Versinterungs- und Verschlackungsneigung in der Feuerraumasche bei, die wiederum Probleme bei der Verbrennungsführung verursachen. Anhand von Verbrennungsversuchen mit unbehandelten Brennstoffen aus Paludibiomasse konnte bereits gezeigt werden, dass aschebedingte Probleme (Staubemissionen, Verschlackungen in der Feuerraumasche) als auch CO -, HCl- und NO_x -Emissionen insbesondere auch beim Einsatz in Ballenform entstehen können [36]. Um die Emissions- und Verschlackungsprobleme effektiv zu mindern, konnte anhand von mehreren Studien [29, 36] gezeigt werden, dass der Einsatz von Waschverfahren ggf. in Kombination mit nachgeschalteter Abpressung zu homogenen Brennstoffeigenschaften und signifikanten Reduktionen bei den Staub-, NO_x - und HCl-Emissionen während der Verbrennung führen kann. Zudem weisen die Brennstoffe keine Verschlackungen in der Feuerraumasche auf, die sonst zu teuren Anlagenstillstandzeiten und hohem Wartungsaufwand führen.

Derzeit gibt es bundesweit ca. 600 Feuerungsanlagen mit EEG-Vergütung (installierte Leistung ca. 1.400 MW_e) sowie mehrere Tausend Holzfeuerungsanlagen > 100 kW Feuerungswärmeleistung. Hingegen gibt es mit dem BEKW Bioenergiekraftwerk Emsland GmbH aktuell nur ein Strohheizkraftwerk sowie bundesweit wenige hundert Heizanlagen, die mit nicht-holzartigen Brennstoffen befeuert werden [16]. Entsprechend fallen in Deutschland bei der Konversion naturbelassener Biomasse ca. 160.000 t Biomasseasche pro Jahr an, die derzeit nur zu schätzungsweise 10 % bis 20 % verwertet wird [16].

Aktuelle Ergebnisse [37] zeigen, dass Holzaschen im Durchschnitt 33 Ma.-% alkalisch aktive Bestandteile, 29 Ma. % Kalzium (berechnet als CaO), 3,9 Ma.-% Magnesium (berechnet als MgO), 6,3 Ma.-% Kalium (berechnet als K_2O) und 2,6 Ma.-% Phosphor (berechnet als P_2O_5) aufweisen. Die Grenzwerte der DüMV wurden für Chrom(VI) (62 % der Aschen), Cadmium (12 %) und Blei (4 %) überschritten. Wenn Chrom(VI) durch eine geeignete Behandlung reduziert werden könnte, würden 85 % der Feuerraumaschen die geforderten Grenzwerte einhalten. Es wurde auch darauf hingewiesen, dass der Einsatz inhomogener Brennstoffsportimente eine qualitätsgesicherte Verwertung der Feuerraumaschen als Dünger negativ beeinflussen kann. In einer weiteren aktuellen Studie des TLLLR [16] wurden neben Holz auch Aschen aus der Stroh, Heu und Miscanthusverbrennung untersucht, wobei die Feuerraumaschen in zwei von drei Fällen alle rechtlichen Anforderungen bzgl. Schadstoffgrenzwerten, Nährstoffmindestgehalten und Aufbereitungsoptionen für eine land- bzw. forstwirtschaftliche Verwertung einhalten. Die Biomasseaschen lassen sich als mineralischer Kaliumdünger, mineralischer PK-Dünger, Kalkdünger oder organisch-mineralischer PK-Dünger einordnen.

3.4 Stoffliche Biomassenutzung

Die allgemeine Nutzung wiedervernässter Moore birgt Vorteile für Klima sowie Biodiversität und kann auch in ökonomischer Hinsicht einen positiven Beitrag leisten [38]. Insbesondere die stoffliche Nutzung der Paludikultur vereint zwei positive Effekte der Kultivierung wiedervernässter Moore. Zum einen wird der Torfaufbau aktiv gefördert, zum anderen stellt die geerntete Biomasse ein Ausgangsprodukt für vielfältige stoffliche Nutzungswege dar [39]. Die stoffliche Nutzung von Paludikultur kann zunächst auf den etablierten Kenntnissen über die Verwertung klassischer nachwachsender Rohstoffe aufgebaut werden. Hier kann auf die umfangreichen Erfahrungen aus der Herstellung von Graspapier aus Heu und Papier aus der Durchwachsenen Silphie und Sida zurück gegriffen werden und auch eine Einordnung der Qualität erfolgen [40]. Zur Einschätzung der Baustoffeigenschaften von Dämmplatten (z.B. bzgl. Biege- und Zugfestigkeit sowie Dämmwert) können Erfahrungen, z.B. aus Rharbarbertrester- und Miscanthus-Platten herangezogen werden [41,42]. Die stoffliche Nutzung der Paludikultur im Speziellen wurde bereits in einigen Untersuchungen betrachtet. So spielt insbesondere der Erntetermin und die Biomasseaufbereitung eine zentrale Rolle in der späteren Nutzung [43-45]. Die im Projekt aufbereiteten heterogene Nasswiesenbiomasse (siehe Abb. 4a) ist nach der homogenisierenden und qualitätssteigernden Aufbereitung als Vorprodukt (siehe Abb. 4b) für mehrere stoffliche weiterführende Nutzungspfade (z.B. Papier- & Verpackungsmaterialien, Faserplatten & Baustoffe oder chemische Grundstoffherstellung) geeignet.



Abb. 4: (a) heterogene Nasswiesenbiomasse, (b) qualitativ hochwertige, homogene Paludifaser nach dem florafuel-Aufbereitungsverfahren

Die stoffliche Nutzung der Paludikultur kann neben der reinen Produktentwicklung auch als Kohlenstoffsенke fungieren. Primär sind hier zwei Effekte zu nennen: Das in den Produkten gespeicherte CO_2 , welches die Pflanzen im Wachstumszyklus aufnehmen und zum anderen Substitutionseffekte, da moorbiomassebasierte Produkte herkömmliche CO_2 -intensive Produktionswege ersetzen können [46].

Literatur/Quellen

- [1] Sophie Hirschelmann, Franziska Tanneberger, Sabine Wichmann, Felix Reichelt, Monika Hohlbein, John Couwenberg et al. Moore in Mecklenburg-Vorpommern im Kontext nationaler und internationaler Klimaschutzziele – Zustand und Entwicklungspotenzial; 2019.
- [2] Tanneberger F, Moen A, Barthelmes A, Lewis E, Miles L, Sirin A et al. Mires in Europe - Regional Diversity, Condition and Protection. *Diversity* 2021;13(8):381. <https://doi.org/10.3390/d13080381>.
- [3] Tiemeyer B, Albiac Borraz E, Augustin J, Bechtold M, Beetz S, Beyer C et al. High emissions of greenhouse gases from grasslands on peat and other organic soils. *Glob Chang Biol* 2016;22(12):4134-49. <https://doi.org/10.1111/gcb.13303>.
- [4] Tiemeyer B, Freibauer A, Borraz EA, Augustin J, Bechtold M, Beetz S et al. A new methodology for organic soils in national greenhouse gas inventories: Data synthesis, derivation and application. *Ecological Indicators* 2020;109(5):105838. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2019.105838>.
- [5] Jurasinski G, Glatzel S, Hahn J, Koch S, Koch M, Koebsch F. Turn on, fade out - methane exchange in a coastal fen over a period of six years after rewetting. EGU General Assembly Conference Abstracts 2016.
- [6] Köhn D, Günther A, Schwabe I, Jurasinski G. Short-lived peaks of stem methane emissions from mature black alder (*Alnus glutinosa* (L.) Gaertn.) – Irrelevant for ecosystem methane budgets? *Plant-Environment Interactions* 2021;2(1):16–27. <https://doi.org/10.1002/pei3.10037>.
- [7] Köhn D, Weipelo C, Günther A, Jurasinski G. Drainage Ditches Contribute Considerably to the CH₄ Budget of a Drained and a Rewetted Temperate Fen. *Wetlands* 2021;41(6):1. <https://doi.org/10.1007/s13157-021-01465-y>.
- [8] Günther A, Barthelmes A, Huth V, Joosten H, Jurasinski G, Koebsch F et al. Prompt rewetting of drained peatlands reduces climate warming despite methane emissions. *Nat Commun* 2020;11(1):1644. <https://doi.org/10.1038/s41467-020-15499-z>.
- [9] Kreyling J, Tanneberger F, Jansen F, van der Linden S, Aggenbach C, Blüml V et al. Rewetting does not return drained fen peatlands to their old selves. *Nat Commun* 2021;12(1):5693. <https://doi.org/10.1038/s41467-021-25619-y>.
- [10] Karki S, Kandel TP, Elsgaard L, Labouriau R, Lærke PE. Annual CO₂ fluxes from a cultivated fen with perennial grasses during two initial years of rewetting. *Mires & Peat* 2019(25):1-22.
- [11] Kandel TP, Karki S, Elsgaard L, Lærke PE. Fertilizer-induced fluxes dominate annual N₂O emissions from a nitrogenrich temperate fen rewetted for paludiculture. *Nutr Cycl Agroecosyst* 2019;115(1):57-67. <https://doi.org/10.1007/s10705-019-10012-5>.
- [12] Huth V, Hoffmann M, Bereswill S, Popova Y, Zak D, Augustin J. The climate warming effect of a fen peat meadow with fluctuating water table is reduced by young alder trees. *Mires & Peat* 2018(21):1-18.
- [13] Berg C, Dengler J, Abdank A. Pflanzengesellschaften Mecklenburg Vorpommerns und ihre Gefährdung – Textband. Weissdorn 2004.

- [14] Bowler DE, Eichenberg D, Conze K-J, Suhling F, Baumann K, Benken T et al. Winners and losers over 35 years of dragonfly and damselfly distributional change in Germany. *Divers Distrib* 2021;27(8):1353–66. <https://doi.org/10.1111/ddi.13274>.
- [15] LUNG Landesamt für Umwelt, Naturschutz und Geologie MV. Konzeptbodenkarte 1:25000 – Moorbodenformengesellschaften; Available from: https://www.lung.mv-regierung.de/dateien/moor_kbk25.pdf.
- [16] LM M-V. Umsetzung von Paludikultur auf landwirtschaftlich genutzten Flächen in Mecklenburg-Vorpommern: Fachstrategie zur Umsetzung der nutzungsbezogenen Vorschläge des Moorschutzkonzeptes; 2017.
- [17] Dahms T, Oehmke C, Kowatsch A. *Paludi-Pellet-Broschüre: Halmgutartige Festbrennstoffe aus nassen Mooren*. 2nd ed. Greifswald; 2017.
- [18] Cai Y, Zheng Z, Schäfer F, Stinner W, Yuan X, Wang H et al. A review about pretreatment of lignocellulosic biomass in anaerobic digestion: Achievement and challenge in Germany and China. *Journal of Cleaner Production* 2021;299(1–2):126885. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126885>.
- [19] ISO International Organization for Standardization. ISO 17225-1: Solid biofuels – Fuel specifications and classes – Part 1: General requirements. Berlin: Beuth Verlag; 2021. <https://doi.org/10.31030/3223041>.
- [20] Khalsa J, Döhling F, Berger F. Foliage and Grass as Fuel Pellets—Small Scale Combustion of Washed and Mechanically Leached Biomass. *Energies* 2016;9(5):361. <https://doi.org/10.3390/en9050361>.
- [21] Joseph B, Hensgen F, Bühle L, Wachendorf M. Solid Fuel Production from Semi-Natural Grassland Biomass – Results from a Commercial-Scale IFBB Plant. *Energies* 2018;11(11):3011. <https://doi.org/10.3390/en11113011>.
- [22] Adam R, Pollex A, Zeng T, Kirsten C, Röver L, Berger F et al. Systematic homogenization of heterogenous biomass batches – Industrial-scale production of solid biofuels in two case studies. *Biomass and Bioenergy* 2023;173:106808. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2023.106808>.
- [23] ISO International Organization for Standardization. ISO 17225-7: Solid biofuels – Fuel specifications and classes – Part 7: Graded non-woody briquettes. Berlin: Beuth Verlag; 2021.
- [24] Pradhan P, Mahajani SM, Arora A. Production and utilization of fuel pellets from biomass: A review. *Fuel Processing Technology* 2018;181:215-32. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2018.09.021>.
- [25] Mostafa ME, Hu S, Wang Y, Su S, Hu X, Elsayed SA et al. The significance of pelletization operating conditions: An analysis of physical and mechanical characteristics as well as energy consumption of biomass pellets. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2019;105:332–48. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.01.053>.
- [26] Bajwa DS, Peterson T, Sharma N, Shojaeiarani J, Bajwa SG. A review of densified solid bio-mass for energy production. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2018;96:296-305. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.07.040>.
- [27] Fang Z, Smith RL, Tian X-F. *Production of Materials from Sustainable Biomass Resources*. Singapore: Springer; 2019.

- [28] Adam R, Zeng T, Röver L, Schneider P, Werner H, Birnbaum T et al. Erfolgreiche Demonstration des Einsatzes von Laub-Holz-Mischpellets als „sonstiger nachwachsender Rohstoff“ gemäß § 3 (1) Nr. 13 der 1. BImSchV. Müll und Abfall 2024(1). <https://doi.org/10.37307/j.1863-9763.2024.01.05>.
- [29] Adam R, Zeng T, Röver L, Schneider P, Werner H, Birnbaum T et al. Long-term emission demonstration using pretreated urban non-woody biomass residues as fuel for small scale boilers. *Renewable Energy* 2024;237:121815. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2024.121815>.
- [30] Adam R, Yiyang D, Kruggel-Emden H, Zeng T, Lenz V. Influence of pressure and retention time on briquette volume and raw density during biomass densification with an industrial stamp briquetting machine. *Renewable Energy* 2024;120773. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2024.120773>.
- [31] Kromus S, Kamm B, Kamm M, Fowler P, Narodoslawsky M. Green Biorefineries: The Green Biorefinery Concept Fundamentals and Potential. In: Kamm B, Gruber PR, Kamm M, editors. *Biorefineries-Industrial Processes and Products*. Weinheim, Germany: Wiley-VCH Verlag GmbH; 2005, p. 253-294.
- [32] Weimer PJ, Digman MF. Fermentation of alfalfa wet-fractionation liquids to volatile fatty acids by *Streptococcus bovis* and *Megasphaera elsdenii*. *Bioresour Technol* 2013;142:88–94. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2013.05.016>.
- [33] Boakye-Boaten NA, Xiu S, Shahbazi A, Wang L, Li R, Schimmel K. Uses of miscanthus press juice within a green biorefinery platform. *Bioresour Technol* 2016;207:285-92. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2016.02.030>.
- [34] Santamaria-Fernandez M, Ytting NK, Lübeck M, Uellendahl H. Potential Nutrient Recovery in a Green Biorefinery for Production of Feed, Fuel and Fertilizer for Organic Farming. *Waste Bi-omass Valor* 2020;11(11):5901-11. <https://doi.org/10.1007/s12649-019-00842-3>.
- [35] Møller AH, Hammershøj M, Dos Passos NHM, Tanambell H, Stødkilde L, Ambye-Jensen M et al. Biorefinery of Green Biomass – How to Extract and Evaluate High Quality Leaf Protein for Food? *J Agric Food Chem* 2021;69(48):14341-57. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.1c04289>.
- [36] Daniel Kuptz, Carina Kuchler, Elisabeth Rist, Tim Eickenscheidt, Robert Mack, Claudia Schön et al. Combustion Behaviour and Slagging Tendencies of Kaolin Additivated Pellets from Fen Paludicultures in a Small-Scale Biomass Boiler. 29th European Biomass Conference and Exhibition, 2021, 26 April 2021.
- [37] Bachmaier H, Kuptz D, Hartmann H. Wood Ashes from Grate-Fired Heat and Power Plants: Evaluation of Nutrient and Heavy Metal Contents. *Sustainability* 2021;13(10):5482. <https://doi.org/10.3390/su13105482>.
- [38] Jong M de, van Hal O, Pijlman J, van Eekeren N, Junginger M. Paludiculture as paludifuture on Dutch peatlands: An environmental and economic analysis of *Typha* cultivation and insulation production. *Sci Total Environ* 2021;792:148161. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.148161>.
- [39] Wichtmann, Wendelin, and Hans Joosten. Paludiculture: peat formation and renewable resources from rewetted peatlands. *IMCG Newsletter* 2007;3:24-8.

- [40] Höller M, Lunze A, Wever C, Deutschle AL, Stücker A, Frase N et al. Meadow hay, *Sida hermaphrodita* (L.) Rusby and *Silphium perfoliatum* L. as potential non-wood raw materials for the pulp and paper industry. *Industrial Crops and Products* 2021;167(18):113548. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2021.113548>.
- [41] Schulte M, Lewandowski I, Pude R, Wagner M. Comparative life cycle assessment of bio-based insulation materials: Environmental and economic performances. *GCB Bioenergy* 2021;13(6):979–98. <https://doi.org/10.1111/gcbb.12825>.
- [42] Moll L, Wever C, Völkening G, Pude R. Increase of *Miscanthus* Cultivation with New Roles in Materials Production – A Review. *Agronomy* 2020;10(2):308. <https://doi.org/10.3390/agronomy10020308>.
- [43] Christian Schröder, Hans Joosten. VIP – Vorpommern Initiative Paludikultur. *Endbericht; 2010-2013*.
- [44] Wendelin Wichtmann, Franziska Tanneberger, Sabine Wichmann, Hans Joosten. Paludiculture is paludifuture: Climate, biodiversity and economic benefits from agriculture and forestry on rewetted peatland. *PEATLANDS International* 2010;1:48-51.
- [45] Ren L, Eller F, Lambertini C, Guo W-Y, Brix H, Sorrell BK. Assessing nutrient responses and biomass quality for selection of appropriate paludiculture crops. *Sci Total Environ* 2019;664:1150–61. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.01.419>.
- [46] Lahtinen L, Mattila T, Myllyviita T, Seppälä J, Vasander H. Effects of paludiculture products on reducing greenhouse gas emissions from agricultural peatlands. *Ecological Engineering* 2022;175(1):106502. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2021.106502>.

Kontakt

Roman Adam

DBFZ Deutsches BiomasseForschungszentrum gGmbH, Leipzig,
☎ +49 (0)341.2434-550 ✉ roman.adam@dbfz.de

Ludwig Bork

Agrotherm GmbH, Basedower Str. 70, 17139 Malchin,
✉ ludwig.bork@web.de

Hans Werner

Florafuel AG, Stahlgruberring 7a, 81829 München
✉ hans.werner@florafuel.de

Sophie Hirschelmann

Michael Succow Stiftung Ellernholzstraße 1/3 17489 Greifswald
✉ sophie.hirschelmann@succow-stiftung.de

Uta Berghöfer

Wasserwerk der Zukunft e.V. Turnplatz 12 17139 Malchin,
✉ uta.berghoefer@gmx.de

Auf dem Weg zur klimaneutralen Wärmeversorgung

Die Rolle der kommunalen Wärmeplanung und nachhaltiger Bioenergie im Erzeugungsportfolio der Leipziger Stadtwerke

Zusammenfassung: *Der Beitrag gibt einen Überblick über die kommunale Wärmeplanung in Leipzig, die strategischen Weichenstellungen der Stadtwerke Leipzig und die Rolle nachhaltiger Bioenergie im zukünftigen Erzeugungsportfolio.*

Abstract: *The article provides an overview of the municipal heat planning in Leipzig, the strategic premises of the Stadtwerke Leipzig and the role of sustainable bioenergy in the future energy generation portfolio.*

1 Ausgangslage

Im Jahr 2020 betrug der Endenergieverbrauch in Leipzig rund 10.000 GWh, wobei fast 60 % auf die Wärmeerzeugung entfielen. Gleichzeitig verursachte die Stadt knapp drei Millionen Tonnen CO₂-Emissionen – davon etwa 46 % allein durch die Wärmeerzeugung. Derzeit basiert die Wärmeversorgung zu etwa 30 % auf Fernwärme aus Erdgas und zu 70 % auf dezentraler Versorgung mit Erdgas und Heizöl. Um den Umstieg auf erneuerbare Energien und den Ausstieg aus fossilen Brennstoffen zu realisieren, erstellt die Stadt Leipzig – wie alle großen Städte in Deutschland – bis Mitte 2026 einen kommunalen Wärmeplan. Der Stadtrat hat bereits 2022 die Weichen dafür gestellt. Der Umbau des Wärmesektors erfordert eine kritische Prüfung bestehender Strukturen und die Nutzung innovativer Lösungen. Ziel ist es, eine klimafreundliche und wirtschaftlich tragfähige Wärmeversorgung für die Zukunft zu gestalten. Nur so kann die Akzeptanz der Wärmewende erreicht werden.

2 Transformation der Fern- und Nahwärmeversorgung

Ein entscheidender Hebel zur Reduzierung der CO₂-Emissionen ist der Umbau der Wärmeversorgung auf klimaneutrale Technologien. Neben dem Ausbau dezentraler Lösungen ist auch der Umbau der Fernwärmeversorgung eine Herausforderung für eine Metropole wie Leipzig. Parallel zur Entwicklung des kommunalen Wärmeplans haben die Stadtwerke Leipzig daher eine Erzeugungsstrategie für die Transformation der Fernwärme erarbeitet, die auf eine langfristig klimaneutrale Wärmeversorgung abzielt.

Kernpunkte dieser Strategie sind:

- Einhaltung der gesetzlichen und kommunalen Vorgaben zur Klimaneutralität bis 2038,
- Verdichtung und Ausbau des Fernnetzes,
- Absenkung der Vor- und Rücklauftemperaturen zur Effizienzsteigerung,
- Wirtschaftlichkeit und Finanzierbarkeit des Umbaus für die Sicherstellung einer bezahlbaren Wärmeversorgung,
- Technologieoffene und flexible Gestaltung der Transformation,
- Berücksichtigung von Versorgungssicherheit und gesellschaftlicher Akzeptanz.

3 Schritte zur klimaneutralen Wärmeversorgung

Der schrittweise Ausstieg aus Erdgas erfolgt durch die Nutzung Erneuerbarer Wärmequellen und industrieller Abwärme. Dies umfasst u.a. auch die Vorbereitung auf alternative Energieträger wie Wasserstoff sowie die Integration neuer Technologien (siehe Abb. 1) darunter:

- Solarthermie auf hohem Temperaturniveau,
- Industrielle Abwärme zur Nutzung von Potenzialen im Großraum Leipzig,
- Um- und Neubau von wasserstofffähigen Kraftwerken,
- Power-to-Heat-Anlagen zur Nutzung regenerativer Stromspitzen,
- Großwärmepumpen zur Nutzung von Umweltwärme,
- Tiefengeothermie zur nachhaltigen Warmegewinnung,
- zusätzliche Wärmespeicher zur besseren Integration erneuerbarer Energien und zur Erhöhung der Flexibilität.

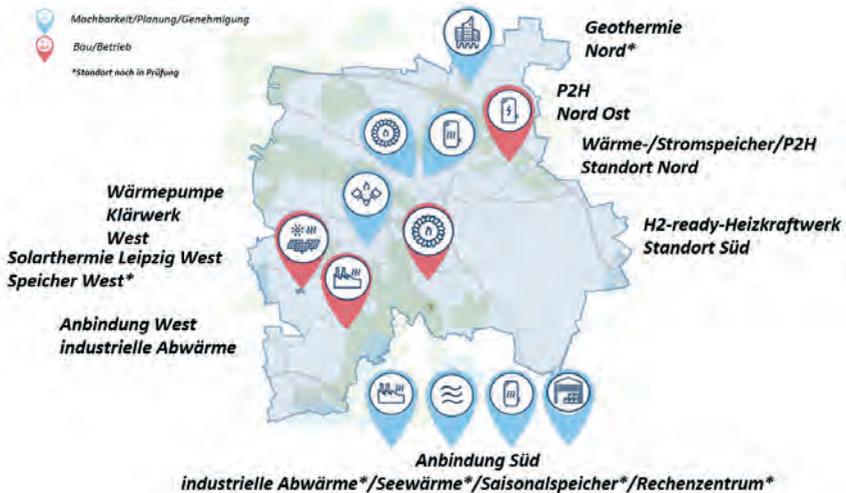


Abb.1: Integration neuer Technologien in das Erzeugungsportfolio der Stadtwerke Leipzig

4 Nachhaltige Bioenergie als ergänzende Lösung

Als weitere Quelle wurde auch Biomasse in verschiedenen Nutzungspfaden untersucht. Die zukünftige Nutzung von Bioenergie muss nachhaltig und regelkonform zur REDIII-Richtlinie erfolgen. Dies bedeutet insbesondere die Fokussierung auf Reststoffnutzung und emissionsarme Technologien. Auch die Förder- und Genehmigungsfähigkeit, etwa im Sinne des Bundesförderprogramms effiziente Wärmenetze (BEW), spielt eine zentrale Rolle:

- Biomethan kann mittelfristig in begrenztem Umfang Erdgas bilanziell ersetzen.
- Holzheizkraftwerke werden aufgrund hoher Investitionskosten und mangelnder Flexibilität voraussichtlich keinen großen Beitrag zur Fernwärmeversorgung leisten.
- Biomasse-Heizwerke können jedoch als Spitzenlast- und Absicherungslösung in Nahwärmenetzen eine sinnvolle Ergänzung sein. Hierbei könnten lokal verfügbare Biomasseressourcen wie Laub und Grasschnitt als Brennstoff genutzt werden.
- Pellets können in dezentralen Versorgungsstrukturen eine Ergänzung sein, sofern keine anderen EE-Quellen zur Verfügung stehen.

5 Fazit

Die Transformation der Wärmeversorgung in Leipzig erfordert eine umfassende Strategie, die technologische Innovationen, wirtschaftliche Tragfähigkeit und Nachhaltigkeit vereint. Bioenergie kann hierbei eine ergänzende Rolle spielen. Im Fernwärmenetz Leipzig ist die Nutzung von Biomasse als Erzeugungstechnologie eine untergeordnete Rolle. Dagegen besteht auch in Leipzig Potenzial in dezentralen Wärmeversorgungsstrukturen.

Kontakt

Hartwig Kalhöfer, Leiter Stabsbereich Geschäftsführung

Stadtwerke Leipzig GmbH

☎ +49 (0)341.121-7200 | ✉ hartwig.kalhoefer@l.de | 🌐 www.l.de

Eine Region macht sich auf den Weg – Kommunale Wärmeversorgung durch Biomasse und Wasserstoff

Zusammenfassung: Die Energiewende in ländlichen Räumen erfordert pragmatische und ganzheitliche Ansätze. Das Amt Treptower Tollensewinkel verfolgt eine vorbildliche Strategie: Mit einer ambitionierten kommunalen Wärmeplanung, einem starken Ausbau der erneuerbaren Energien und zukunftsweisenden Infrastrukturprojekten wie der Wasserstoffpipeline sowie dem Grünen Gewerbegebiet Altentreptow stellt sich die Region aktiv den Herausforderungen der Transformation. Diese Entwicklungen sind nicht nur wegweisend für die eigene Versorgungssicherheit und Klimaneutralität bis 2045, sondern bieten auch wertvolle Impulse für andere Kommunen auf dem Weg zur nachhaltigen Energiezukunft.

1 Einleitung: Altentreptow als Vorreiter

Die Präsentation beginnt mit einem Film, der die Stärken der Stadt Altentreptow eine traditionsreiche Stadt mit hoher Lebensqualität, unberührter Natur und einer lebendigen Wirtschaft. Die Bilder verdeutlichen eindrucksvoll, wie Umweltbewusstsein und wirtschaftliche Entwicklung Hand in Hand gehen – eine ideale Ausgangslage für die Herausforderungen der Energiewende.

Neben seiner kulturellen und wirtschaftlichen Bedeutung hat sich Altentreptow in den letzten Jahren zunehmend als Vorreiter im kommunalen Klimaschutz etabliert. Zielgerichtete Investitionen in erneuerbare Energien und die Förderung nachhaltiger Mobilität leisten einen wichtigen Beitrag zur lokalen Wertschöpfung und zur regionalen Energiewende.

2 Kommunale Wärmeplanung: Strategie und Umsetzung

Die kommunale Wärmeplanung des Amtes Treptower Tollensewinkel bildet das Fundament der regionalen Dekarbonisierungsstrategie mit dem Ziel der Klimaneutralität bis 2045.

2.1 Bestandsanalyse

Die bestehende Fernwärmeversorgung in Altentreptow wird bereits seit mehr als 10 Jahren zu 80 % durch regionale Biogasanlagen gedeckt – ein herausragendes Beispiel für nachhaltige Versorgungssicherheit. Darüber hinaus wird derzeit das Potenzial für die Integration von Solarthermie und industrieller Abwärme geprüft, um weitere regenerative Energiequellen zu erschließen.

2.2 Maßnahmenplanung

Geplant ist der gezielte Ausbau der Fernwärmeinfrastruktur, die Nutzung unvermeidbarer Abwärmequellen sowie die Integration dezentraler erneuerbarer Energien wie Solarthermie und fester Biomasse. Die nächsten Meilensteine beinhalten die detaillierte Netzplanung und die Beantragung von Fördermitteln, insbesondere aus der Bundesförderung für effiziente Wärmenetze (BEW).

2.3 Bürgerbeteiligung

Der Erfolg der Wärmeplanung wird durch umfassende Beteiligung der Bevölkerung unterstützt. Informationsveranstaltungen, Umfragen und kontinuierliche Dialogformate mit den relevanten Akteuren sichern Transparenz und Akzeptanz.

2.4 Soziale Verträglichkeit

Bezahlbare Wärme bleibt das zentrale Ziel. Parallel wird konsequent daran gearbeitet, Fördermittel zu akquirieren, um die finanzielle Belastung für die Bürgerinnen und Bürger zu minimieren.

Die Wärmeplanung verbindet somit technologische Innovationen mit wirtschaftlicher Tragfähigkeit und sozialer Integration.

3 Perspektive Wasserstoffpipeline: Chancen für die Region

Ergänzend zur kommunalen Wärmeplanung wird die Möglichkeit einer regionalen Wasserstoffanbindung intensiv geprüft.

Technische Szenarien

Sowohl die regionale Erzeugung als auch der Anschluss an das nationale Wasserstoffnetz werden detailliert untersucht. Die Machbarkeitsstudie von GP JOULE empfiehlt eine Kombination aus Elektrolysekapazitäten von bis zu 20 MW sowie die schrittweise Transformation der Gasinfrastruktur in eine H₂-taugliche Pipeline. Dabei werden sowohl die Wasserstoffbedarfe der regionalen Industrie als auch das Potenzial aus überschüssigem Windstrom berücksichtigt.

Mögliche Trassen

Die bevorzugte Trassenführung verläuft über Friedland – Altentreptow – Pelsin. Diese Route ermöglicht eine direkte Einbindung in den entstehenden europäischen Wasserstoffkorridor und schafft zudem Anschlussmöglichkeiten für benachbarte Industrie- und Gewerbegebiete. Auch eine Erweiterung in Richtung Nordwesten zur Anbindung an überregionale Verteilnetze wird geprüft.

GP JOULE hebt hier insbesondere die Synergieeffekte zwischen Produktions- und Verbrauchsstandorten hervor.

Wirtschaftlichkeit

Die Wirtschaftlichkeitsanalysen zeigen eine hohe Attraktivität insbesondere in Verbindung mit der Entwicklung industrieller Cluster als Abnehmerstrukturen. Der Einsatz von Wasserstoff als Rohstoff und Energieträger eröffnet neue Wertschöpfungspotenziale für die Region. Besonders energieintensive Unternehmen aus der Metallverarbeitung, Lebensmittelindustrie und Baustoffproduktion sollen durch wettbewerbsfähige Wasserstoffpreise und Versorgungssicherheit gewonnen werden.

Eine erfolgreiche Umsetzung wird die Energieautarkie der Region stärken und gleichzeitig die Innovationskraft des Wirtschaftsstandorts Altentreptow erhöhen. Laut Zeitplan der GP JOULE-Studie sollen erste Netzelemente bis 2028 betriebsbereit sein, die vollständige Integration ist bis spätestens 2035 vorgesehen.

4 Regionale Energielandschaft: Biogas und Windenergie als Schlüsselfaktoren

Das Amt Treptower Tollensewinkel profitiert von ausgezeichneten Voraussetzungen durch bestehende erneuerbare Energiequellen:

Biogas

Etablierte Biogasanlagen gewährleisten eine hohe Versorgungssicherheit und decken einen Großteil des Wärmebedarfs. Die Flexibilisierung dieser Anlagen bietet zusätzlich Potenziale zur Deckung von Lastspitzen im Stromnetz.

Windenergie

Die Region weist erhebliche Überkapazitäten in der Windstromerzeugung auf, die über den Eigenbedarf hinaus genutzt werden können. Überschüssiger Strom kann perspektivisch zur Wasserstoffproduktion durch Elektrolyse oder zur Versorgung zukünftiger Speicherlösungen verwendet werden.

Diese Energielandschaft bildet die Grundlage für eine sektorübergreifende Kopplung zwischen Strom, Wärme und zukünftiger Wasserstoffproduktion und macht die Region zu einem Modellprojekt der Energiewende.

5 Grünes Gewerbegebiet Altentreptow: Zukunftsweisender Wirtschaftsstandort

Zur Veranschaulichung der Vision und Entwicklung des Grünen Gewerbegebiets Altentreptow wird im Rahmen der Präsentation ein Filmbeitrag gezeigt, der die geplanten Entwicklungen und Chancen des Projekts eindrucksvoll darstellt.

Die Machbarkeitsstudie für das Grüne Gewerbegebiet Altentreptow verdeutlicht das Potenzial für eine nachhaltige Standortentwicklung.

Fläche

Rund 74 Hektar, hervorragend infrastrukturell erschlossen und mit direktem Anschluss an die überregionale Verkehrsinfrastruktur.

Energieversorgung

Mindestens 50 % des Energiebedarfs werden durch lokal erzeugte erneuerbare Energien gedeckt. Perspektivisch soll die Energieversorgung durch Integration von Speichertechnologien und Power-to-X-Anwendungen weiter optimiert werden. Laut GP JOULE kann das Gewerbegebiet zukünftig direkt über die regionale Wasserstoffproduktion beliefert werden.

Vorteile

Attraktiver Standort für energieintensive Unternehmen, Nutzung industrieller Symbiosen und regionaler Wertschöpfungsketten. Geplant ist die Ansiedlung von Unternehmen aus den Bereichen Umwelttechnik, Lebensmittelverarbeitung und nachhaltige Baustoffproduktion.

Mit der geplanten Zertifizierung durch das G³-Label wird Altentreptow zu einem Leuchtturm für nachhaltige Unternehmensansiedlungen und zeigt beispielhaft, wie wirtschaftliche Entwicklung und Klimaschutz Hand in Hand gehen können.

6 Herausforderungen: Stromnetzausbau und Partizipation

Trotz erheblicher Fortschritte stellen folgende Aspekte wesentliche Herausforderungen dar:

Netzausbau

Die vorhandenen Stromnetze stoßen vielerorts an ihre Kapazitätsgrenzen. Verzögerungen bei Genehmigungsverfahren und Investitionen bremsen die notwendige Infrastrukturentwicklung. Es bedarf einer stärkeren Förderung durch Bund und Land sowie vereinfachter Genehmigungsprozesse, um die ambitionierten Ausbauziele zu erreichen.

Bürgerbeteiligungsgesetz

Dieses neue gesetzliche Instrument schafft Möglichkeiten zur finanziellen Beteiligung der Bevölkerung an Energieprojekten und stärkt die gesellschaftliche Akzeptanz. Durch gezielte Informationskampagnen und transparente Projektkommunikation sollen möglichst viele Bürgerinnen und Bürger für eine aktive Mitwirkung gewonnen werden.

Neben diesen Faktoren sind auch steigende Netzentgelte und regulatorische Unsicherheiten Hemmnisse für den Ausbau erneuerbarer Energien. Hier bedarf es klarer politischer Rahmenbedingungen und einer engen Zusammenarbeit zwischen Kommune, Netzbetreibern und Projektentwicklern.

7 Fazit und Ausblick

Das Amt Treptower Tollensewinkel demonstriert eindrucksvoll, dass auch ländliche Regionen proaktiv zur Energiewende beitragen können. Durch die Verbindung aus strategischer kommunaler Wärmeplanung, zukunftsorientierten Infrastrukturprojekten und aktiver Bürgereinbindung entsteht eine modellhafte Transformationsstrategie.

Die hier gewonnenen Erkenntnisse bieten wertvolle Impulse für andere Kommunen und Regionen. Als Modellregion für die integrierte Energiewende steht Treptower Tollensewinkel für Innovation, regionale Wertschöpfung und gesellschaftliche Teilhabe.

Alle interessierten Akteure sind eingeladen, diesen Weg gemeinsam mit uns zu beschreiten und von den Erfahrungen der Region zu profitieren.

Literatur/Quellen

Amt Treptower Tollensewinkel (2024): Kommunaler Wärmeplan, Abschlussbericht.

Georg Consulting / Theta Concepts (2024): Machbarkeitsstudie „Grünes Gewerbegebiet Altentreptow“.

GP JOULE (2025): Trassenkonzepte Wasserstoffinfrastruktur Treptower Tollensewinkel, Präsentation vom 14.01.2025.

GP JOULE (2025): Machbarkeitsstudie Wasserstoffinfrastruktur Treptower Tollensewinkel.

Kontakt

Claudia Ellgoth, Bürgermeisterin Altentreptow

Amt Treptower Tollensewinkel | Klimaschutzmanagement

Rathausstraße 1, 17087 Altentreptow

✉ n.bartels@altentreptow.de

Nationale Umsetzung der RED III im Verkehrssektor

Zusammenfassung: Mit der RED III werden die Anforderungen an die Nutzung erneuerbarer Energien im Verkehrssektor auf europäischer Ebene verschärft. Der neue Zielwert von 14,5 % Treibhausgasreduktion (oder 29 % erneuerbare Energien) bis 2030 sowie spezifische Unterquoten für fortschrittliche Biokraftstoffe (Anhang IX Teil A) und erneuerbare strombasierte Kraftstoffe (RFNBOs) stellen die Mitgliedstaaten vor umfangreiche Umsetzungsaufgaben. Der Beitrag zeigt auf, wie Deutschland diese Anforderungen in nationales Recht überführen kann. Dabei ist zu berücksichtigen, dass Deutschland die RED II bereits ambitionierter umgesetzt hat, als es die RED III nun verlangt. Eine bloße 1:1-Übernahme der RED III würde somit keine Anhebung, sondern eine Absenkung des Anspruchsniveaus bedeuten. Deutschland sollte daher über die RED III hinausgehen, unter Beibehaltung der bestehenden Treibhausgas-Quotensystematik, Anhebung der Kappungsgrenze für Biokraftstoffe aus Anbaubiomasse sowie Einführung eines automatischen Anpassungsmechanismus, der Verdrängungseffekte zwischen den Erfüllungsoptionen vermeidet und deren volles Klimaschutzpotenzial nutzbar macht. Eine Fortschreibung der Treibhausgas-Minderungsquote (THG-Quote) über das Jahr 2030 hinaus ist erforderlich, um langfristige Planungssicherheit für Investitionen in erneuerbare Kraftstoffe und Infrastrukturen zu bieten. Ergänzt werden die Vorschläge durch eine kritische Bewertung der faktischen THG-Minderwirkungen.

Abstract: RED III makes the requirements for the use of renewable energies in the transport sector more stringent at European level. The new target value of 14.5 % greenhouse gas reduction (or 29 % renewable energies) by 2030 as well as specific sub-quotas for advanced biofuels (Annex IX Part A) and renewable electricity-based fuels (RFNBOs) present the member states with extensive implementation tasks. The article shows how Germany can transpose these requirements into national law. It should be noted that Germany has already implemented RED II more ambitiously than is now required by RED III. A mere 1:1 adoption of RED III would therefore not mean an increase, but rather a reduction in the level of ambition. Germany should therefore go beyond RED III, retaining the existing greenhouse gas quota system, raising the cap for biofuels from cultivated biomass and introducing an automatic adjustment mechanism that avoids displacement effects between the compliance options and utilises their full climate protection potential. A continuation of the greenhouse gas reduction quota (GHG quota) beyond 2030 is necessary in order to provide long-term planning security for investments in renewable fuels and infrastructure. The proposals are supplemented by a critical assessment of the actual GHG reduction effects.

1 RED II

1.1 RED-II-Umsetzung in Deutschland

Deutschland hat die Vorgaben der Erneuerbare-Energien-Richtlinie II (RED II) zum Verkehr Ende 2021 mit einer Reihe gesetzlicher und regulatorischer Maßnahmen in nationales Recht überführt. Wesentliche Maßnahme war dabei die Weiterentwicklung der Treibhausgasminderungsquote (THG-Quote), die im Bundesimmissionschutzgesetz (BImSchG) sowie in der zugehörigen 38. BImSchV verankert ist. Anders als von der RED II verlangt, legte Deutschland nicht einen Anteil erneuerbarer Energien im Verkehr fest, sondern setzte weiter auf eine THG-Quotenregelung, die einen technologieneutralen Anreiz zur Emissionsminderung schafft.

Die THG-Quote wurde stufenweise angehoben – von 6 % (2020) auf 25 % (2030), was im Ergebnis zu einem höheren Anteil Erneuerbarer Energien führt, als die RED II vorschreibt. Zudem hat Deutschland fortschrittliche Biokraftstoffe gemäß Anhang IX Teil A frühzeitig gefördert, indem eine eigene, schrittweise ansteigende Unterquote eingeführt wurde. Wird diese Unterquote übererfüllt, ist eine doppelte Anrechnung der erzielten THG-Minderung auf die THG-Quote möglich – was den Einsatz dieser Kraftstoffe neben der verbindlichen Unterquote und der fehlenden Deckelung zusätzlich stark begünstigt.

Auch strombasierte Kraftstoffe (RFNBOs) und grüner Wasserstoff wurden in die THG-Quotenregelung einbezogen, sofern sie die Nachhaltigkeitskriterien der RED II und die Anforderungen der 37. BImSchV erfüllen. Erneuerbarer Ladestrom für die Elektromobilität kann ebenfalls auf die THG-Quote angerechnet werden.

Der regulatorische Rahmen der THG-Quote erlaubt also eine technologieoffene Zielerreichung.

Deutschland ist auch über die RED-II-Vorgaben hinausgegangen, indem es die Anrechnung von Biokraftstoffen aus Anbaubiomasse durch eine niedrigere Deckelung limitiert hat – und damit die Nutzung einer wesentlichen Option im Vergleich zu anderen EU-Staaten restriktiver handhabt und aus fachlicher Sicht unnötig einschränkt. Palmölbasierte Biokraftstoffe wurden bereits seit 2023 von der Anrechnung ausgeschlossen und damit früher als von der RED II gefordert.

Insgesamt hat Deutschland die RED II nicht nur umgesetzt, sondern sie in mehreren Punkten ambitionierter interpretiert, nicht zuletzt durch eine konsequent auf THG-Minderung ausgerichtete Systemlogik und die frühzeitige Einbindung neuer Kraftstoffoptionen.

1.2 Szenarien zur RED-II-Umsetzung

In Abb. 1 wird veranschaulicht, wie gemäß dem VDB-Szenario die steigende THG-Quote bis 2030 erreicht werden kann. Der steigende Beitrag von Biokraftstoffen – dargestellt durch den gelben Balken – ist dabei vor allem auf den

wachsenden Einsatz fortschrittlicher Biokraftstoffe gemäß Anhang IX Teil A der Richtlinie zurückzuführen. Im Gegensatz dazu bleiben Biokraftstoffe aus Anbau-biomasse sowie aus Abfällen und Reststoffen gemäß Anhang IX Teil B begrenzt durch die geltenden Obergrenzen (Caps). Der obere, blaue Bereich der Balken stellt hauptsächlich den Beitrag von erneuerbarem Strom für Elektromobilität dar, dessen Bedeutung zur Erfüllung der THG-Quote wächst, der aber in Bezug auf die reale THG-Minderung durch die Mehrfachanrechnung überzeichnet wird.

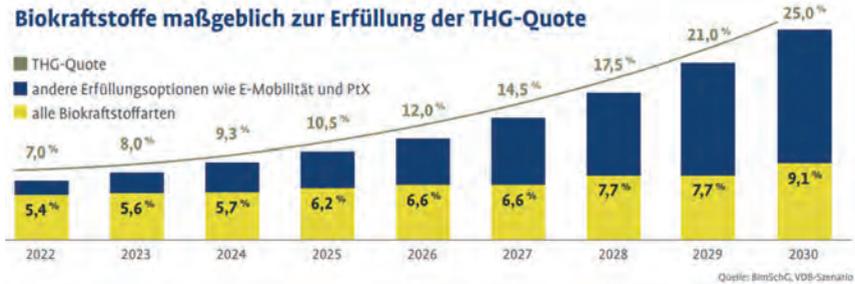


Abb. 1: THG-Quote unter der RED-II-Umsetzung

Fortschrittliche Biokraftstoffe (Anhang IX Teil A) nehmen eine besondere Rolle in der nationalen Treibhausgas-Minderungsstrategie ein: Bei einer Übererfüllung der Unterquote sieht die deutsche Regelung eine doppelte Anrechenbarkeit auf die THG-Quote vor, was einen zusätzlichen Anreiz für ihren Markthochlauf schafft.

In der unten dargestellten Abbildung sind sowohl der gesetzliche Mindestanteil fortschrittlicher Biokraftstoffe (die sogenannte Unterquote) als auch der vom VDB erwartete, reale Anteil bis 2030 abgebildet. Durch die Gegenüberstellung lässt sich erkennen, in welchem Umfang der VDB zum Zeitpunkt der RED-II-Umsetzung (also noch vor den riesigen, mutmaßlich falsch deklarierten IX A-Importmengen aus China ab Ende 2022/Anfang 2023) eine Übererfüllung und damit eine doppelte Anrechnung auf die THG-Quote für möglich gehalten hat:

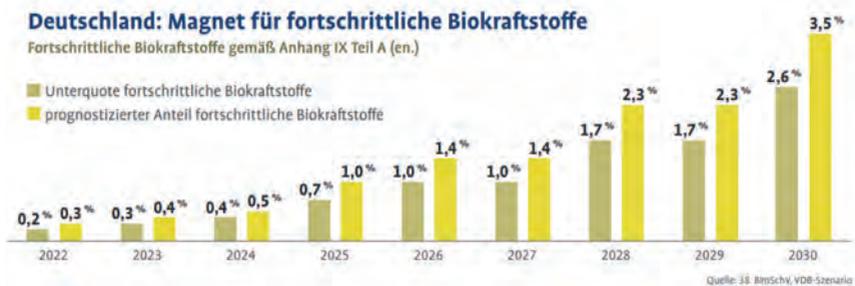


Abb. 2: Fortschrittliche Quote unter der RED-II-Umsetzung

1.3 Status Quo

Die THG-Quote wurde auch im Jahr 2023 deutlich übererfüllt. Laut den von der Generalzollidirektion veröffentlichten Daten lag die nominelle Minderung der Treibhausgasemissionen bei etwa 11 %, während das gesetzlich vorgeschriebene Ziel lediglich 8 % betrug. Besonders ausgeprägt war die Übererfüllung im Bereich der Unterquote für fortschrittliche Biokraftstoffe (Anhang IX Teil A), deren Einsatz mehr als 1.300 % über dem verpflichtenden Mindestanteil lag: 4,2 % statt 0,3 %. Dies stellt eine erneute Steigerung gegenüber dem Vorjahr dar:



Abb. 3: Übererfüllung der fortschrittlichen Quote 2022 und 2023

Die gesetzlichen Vorgaben verpflichteten Mineralölunternehmen im Jahr 2023 dazu, mindestens 0,3 % der von ihnen in Verkehr gebrachten Energiemenge durch fortschrittliche Biokraftstoffe abzudecken. Wird diese Unterquote übererfüllt, können die darüberhinausgehenden Mengen doppelt auf die THG-Quote angerechnet werden. Alternativ besteht die Möglichkeit, Überschüsse bei der Unterquote wie bei der THG-Quote auf das Folgejahr zu übertragen.

Diese Flexibilitätsregelung wurde durch eine Änderung der 38. Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (38. BImSchV), die das Bundeskabinett im November 2024 beschlossen hat, temporär ausgesetzt: Überschüsse aus dem Jahr 2024 können erst im Jahr 2027 erneut angerechnet werden. Diese Maßnahme soll zur Stabilisierung des THG-Quotenpreises beitragen, der infolge eines riesigen Überangebots an fortschrittlichen Biokraftstoffen drastisch eingebrochen war: um 86 % von August 2022 bis November 2024.

Trotz des nominellen Anstiegs der Treibhausgaseminderungsquote ist der tatsächliche Anteil erneuerbarer Energien im Verkehr in den vergangenen Jahren nahezu konstant geblieben; er liegt weiter bei nur rund 7 %. Diese Stagnation ist darauf zurückzuführen, dass die Menge erneuerbarer Energien nicht wächst und das Volumen fossiler Kraftstoffe kaum zurückgeht. Mehrfachanrechnungen der THG-Minderung von E-Mobilität und fortschrittlichen Biokraftstoffen sorgen dafür, dass nominell steigende THG-Quoten erreicht werden, ohne dass dem ein wachsender Einsatz erneuerbarer Energien gegenübersteht. Dies reduziert zugleich den Anreiz, weitere Erfüllungsoptionen im Rahmen der THG-Quote zu nutzen.

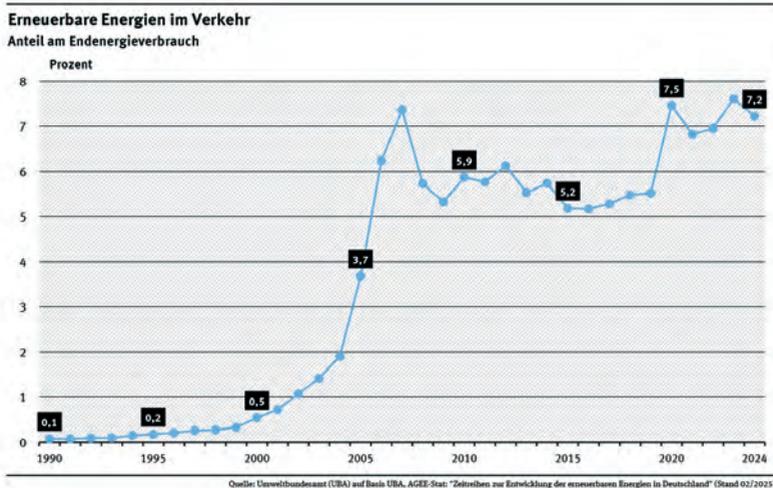


Abb. 4: UBA erneuerbare Energien im Verkehr

Hinzu kommt, dass Investitionen in neue Klimaschutztechnologien für den Straßenverkehr weitgehend ausbleiben, so die Erzeugung und Nutzung von erneuerbarem Wasserstoff und strombasierten Kraftstoffen (RFNBO).

Ein probates Mittel zur Substitution fossiler Energie wäre die Zulassung von Fahrzeugen mit höherer Beimischung von Biodiesel wie B10 für Pkw sowie B20/B30 und B100 für Nutzfahrzeuge. Zurückhaltendes Interesse der Fahrzeughersteller und der fehlende preisliche Anreiz für den Fahrzeugnutzer stehen dem entgegen. Ein wesentliches Hemmnis ist der stark gesunkene THG-Quotenpreis.

Ein dauerhaft niedriger Quotenpreis ruiniert so die wirtschaftliche Attraktivität emissionsarmer Technologien. In der Folge bleibt der Beitrag des Verkehrssektors zu den nationalen Klimaschutzzielen hinter dem technisch und politisch Möglichen zurück.

2 RED III vs. RED II

2.1 RED III

Die überarbeitete Erneuerbare-Energien-Richtlinie legt für den Verkehr ein sektorales Ziel von 14,5 % Treibhausgasminderung oder alternativ einen Anteil von 29 % erneuerbarer Energien am Endenergieverbrauch bis 2030 fest. Dieses Ziel umfasst den gesamten Verkehrsbereich, also den Straßen-, Schienen-, Luft- und Schiffsverkehr.

Für die Zielerreichung gelten mehrere Rahmenbedingungen und Anrechnungsmechanismen. Gleichzeitig werden die Caps beibehalten, die die maximale An-

rechnung bestimmter Biokraftstoffe begrenzen: Für Biokraftstoffe aus Anbau-biomasse gilt ein Höchstwert von 7 % am Energieverbrauch im Verkehr, für Biokraftstoffe gemäß Anhang IX Teil B liegt das Limit bei 1,7 %.

Mehrfachanrechnungen bestimmter erneuerbarer Energieträger sind weiterhin zulässig, allerdings ausschließlich auf das Energieziel. Eine Mehrfachanrechnung auf das THG-Minderungsziel ist nicht vorgesehen.

Darüber hinaus wird ab 2025 eine kombinierte Unterquote für fortschrittliche Biokraftstoffe (Anhang IX Teil A) und strombasierte Kraftstoffe (RFNBO) eingeführt. Diese Unterquote beträgt 1 % des Endenergieverbrauchs im Jahr 2025 und steigt bis 2030 auf 5,5 %. Innerhalb dieses Gesamtanteils müssen im Jahr 2030 mindestens 1 % durch RFNBOs gedeckt werden. Sowohl RFNBOs als auch Kraftstoffe gemäß Anhang IX Teil A können doppelt auf das Energieziel angerechnet werden.

Für den Luft- und Seeverkehr gelten spezifische Anrechnungsfaktoren: Der Einsatz von RFNBOs wird mit dem Faktor 1,5 und der von fortschrittlichen Biokraftstoffen mit dem Faktor 1,2 multipliziert.

Zur Berechnung der Treibhausgasvermeidung durch erneuerbaren Strom im Verkehr wird ein fossiler Vergleichswert (Komparator) von 183 g CO₂-Äquivalenten pro Megajoule (MJ) angesetzt. Dieser Wert liegt deutlich über dem sonst verwendeten Komparator von 94 g CO₂/MJ, der für flüssige und gasförmige Kraftstoffe Anwendung findet. Dadurch ergibt sich eine bevorzugte Bewertung von Strom im Rahmen der THG-Quote, deren Wirkung einer Mehrfachanrechnung gleichkommt.

2.2 RED-III-Umsetzung

Die THG-Minderungsquote nach dem Bundes-Immissionsschutzgesetz (BImSchG) ist seit 2015 das Instrument zur Dekarbonisierung des Verkehrs in Deutschland. Durch ihren marktlichen Charakter ermöglicht sie eine ökonomisch effiziente Reduktion von Treibhausgasemissionen. Im Vergleich zum nationalen Emissionshandelssystem (nEHS) erzeugt die THG-Quote in der Regel einen höheren impliziten CO₂-Preis und setzt damit stärkere Anreize für erneuerbare Energieträger.

Mit der anstehenden Novellierung des BImSchG im Zuge der RED-III-Umsetzung ergibt sich die Chance, Wirksamkeit und Zielgenauigkeit der THG-Quote deutlich zu steigern. Zentral ist die Anhebung der nationalen THG-Quote auf mindestens 40 % bis 2030 (berechnet unter Beibehaltung der geltenden Multiplikatoren für verschiedene Erfüllungsoptionen, entspricht real 20 % THG-Minderung). Dieser Zielwert geht klar über die europäische Mindestvorgabe von 14,5 % THG-Minderung (bzw. 29 % EE-Anteil im Verkehr) hinaus und schafft Investitionsanreize für emissionsarme Technologien.

Die bisherige Anrechnungssystematik mit der Möglichkeit zur Doppelrechnung fortschrittliche Biokraftstoffe hat sich in der Praxis als problematisch erwiesen: Die doppelte Anrechnung bewirkt, dass reale Energiemengen überbewertet und andere Erfüllungsoptionen verdrängt werden. Darüber hinaus schafft die privilegierte Anrechnung einen erheblichen ökonomischen Anreiz zur fehlerhaften Deklaration oder bewussten Fehlklassifizierung von Biokraftstoffen als „fortschrittlich“. Die Abschaffung dieser Mehrfachanrechnung ist daher geboten, um eine technologieoffene und mengenwirksame THG-Minderung zu gewährleisten. Gleichzeitig ist die Anhebung der Unterquote angesichts der enormen Übererfüllung wichtig, um Anreize für Investitionen sicherzustellen.

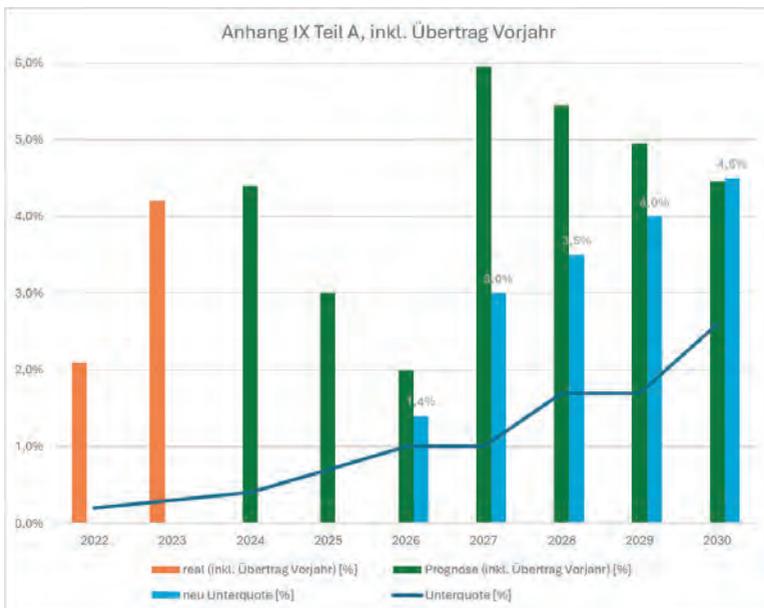


Abb. 5: Neue fortschrittliche Quote

Gleichzeitig erscheint eine moderate Anhebung der bestehenden Deckelung von Biokraftstoffen aus Anbaubiomasse (4,4 %, energetisch) sinnvoll, um das technisch und nachhaltig erschließbare Potenzial dieser Kraftstoffe besser auszunutzen. Zudem ist zu berücksichtigen, dass die Energiemenge im Verkehr sinkt, im Wesentlichen durch den Hochlauf der Elektromobilität. Um die absolute Menge nachhaltig erzeugter Biokraftstoffe trotz sinkendem Gesamtverbrauch zumindest konstant zu halten, muss der prozentuale Wert der Deckelung sukzessive erhöht werden.

Auch die faktische Mehrfachanrechnung von Ladestrom unter der THG-Quote sollte geändert werden, durch eine Anpassung des Komparators oder eine Korrektur im Anrechnungssystem.

Zur Vermeidung von Verdrängungseffekten ist zudem ein dynamischer Anpassungsmechanismus erforderlich, der nicht auf die Elektromobilität begrenzt ist (§ 37h BImSchG), sondern auch für Optionen mit Mindestquoten – insbesondere fortschrittliche Biokraftstoffe und RFNBO – gilt. Der Anpassungsmechanismus sorgt für eine automatische Erhöhung von Unterquoten und THG-Quote, wenn ein jährlicher Schwellenwert überschritten wird. So kann das vorhandene Potenzial von Erfüllungsoptionen genutzt werden, ohne andere Erneuerbare zu verdrängen.

Schließlich sollte die THG-Quote künftig auch auf alle in Deutschland in Verkehr gebrachten Treib- und Brennstoffe der Luft- und Schifffahrt ausgeweitet werden. Diese Verkehrsträger erbringen heute keine nennenswerte THG-Minderung bei ihrer Antriebsenergie. Beim Schienenverkehr sollte die bestehende Regelung beibehalten werden, nach der ausschließlich dort eingesetzter Kraftstoff und nicht der Stromverbrauch quotenrelevant ist.

Eine verkehrsträgerübergreifende THG-Quote, die auf dem Gesamtenergieverbrauch im Straßen-, Schiffs-, Luft- und Schienenverkehr (ohne Bahnstrom) basiert, wäre der nächste logische Schritt für eine kohärente nationale THG-Minderung. Dabei ist sicherzustellen, dass Übererfüllungen nicht zwischen verschiedenen Verkehrsträgern verrechnet werden dürfen, sofern diese auf spezifische Anrechnungsfaktoren oder privilegierte Mechanismen zurückgreifen dürfen.

Kontakt

Marco Zühlke, Referent Nachhaltigkeit und Markt

Verband der Deutschen Biokraftstoffindustrie e. V.

☎ +49 (0)30.726259-13 | ✉ zuehlke@biokraftstoffverband.de

🌐 <https://biokraftstoffverband.de/>

Anika Neumann, Fanny Langschwager, Ulrike Schümann,
Bert Buchholz

Hydriertes, biomassebasiertes Pyrolyseöl – eine Alternative zu konventionellen Marinekraftstoffen?

Zusammenfassung: In dieser Arbeit wurde das Potenzial stabilisierter, teildeoxygenerierter Pyrolyseöle (SDPOs) und hydrierter Pyrolyseöle (HPOs) als alternative Kraftstoffe für die Seeschifffahrt untersucht. Der Fokus lag auf der chemischen Zusammensetzung dieser Biokraftstoffe sowie der Untersuchung ihrer physikalisch-chemischen Eigenschaften und dem Blendverhalten mit konventionellen Schiffskraftstoffen. Die molekularen Veränderungen in den verschiedenen SDPOs wurden mittels hochauflösender Massenspektrometrie (ESI-FT-ICR MS) präzise charakterisiert.

Die Blendingtests verdeutlichten, dass SDPOs eine gute Mischbarkeit mit Biodiesel (fatty acid methyl ester, FAME) aufweisen, wobei in allen getesteten Mischungsverhältnissen eine stabile, homogene Phase beobachtet werden konnte. Im Gegensatz dazu zeigte sich bei Mischungen mit Marinedieselöl (MDO) ab einem MDO-Anteil von über 30 % eine Tendenz zur Sedimentbildung, was auf eine eingeschränkte Kompatibilität hindeutet. Die physikalisch-chemischen Charakteristika der untersuchten HPO-Mischungen lagen weitgehend innerhalb der durch die DIN ISO 8217 definierten Spezifikationen für Schiffskraftstoffe. Da gemäß der Internationalen Maritimen Organisation (IMO) bereits bis zu 30 % biobasierte Kraftstoffe als Beimischung in Marinediesel zulässig sind, ergibt sich daraus ein realistisches Anwendungspotenzial für HPO in nachhaltigen Kraftstoffmischungen.

Ergänzend lieferten die molekularen Analysen der SDPOs mittels ESI-FT-ICR MS aufschlussreiche Erkenntnisse über den Einfluss des Restsauerstoffgehalts auf die chemische Zusammensetzung. Eine systematische Verschiebung der Molekülklassen – insbesondere der O_1 - und O_2 -Klassen – sowie Veränderungen in der Molekularmassenverteilung konnten mit zunehmender Deoxygenierung beobachtet werden. Diese strukturellen Informationen sind von zentraler Bedeutung für das Verständnis der Kraftstoffstabilität und Mischbarkeit und bieten wertvolle Ansätze für die gezielte Optimierung zukünftiger Upgradingprozesse.

Abstract: This study investigates the potential of stabilized, partially deoxygenated pyrolysis oils (SDPOs) and hydrotreated pyrolysis oils (HPOs) as alternative fuels for shipping. The focus was on the chemical composition of these biofuels, as well as the investigation of their physicochemical properties and compatibility with conventional marine fuels. The molecular changes in the various SDPOs were precisely characterized using high-resolution mass spectrometry (ESI-FT-ICR MS).

The blending tests demonstrated that SDPOs exhibit good miscibility with biodiesel (fatty acid methyl ester, FAME), with all tested blending ratios resulting in stable and homogeneous phases. In contrast, mixtures with marine diesel oil (MDO) showed a tendency for precipitation when the MDO content exceeded 30%, indicating limited

compatibility between the components. The physicochemical properties of the HPO blends largely conformed to the specifications defined by DIN ISO 8217 for marine fuels. Since the International Maritime Organization (IMO) already permits up to 30 % bio-based fuels as a blend component in marine diesel, this results in a realistic application potential for HPO in sustainable fuel blends.

In addition, the molecular analyses of the SDPOs using ESI-FT-ICR MS provided valuable insights into the influence of residual oxygen content on the chemical composition. A systematic shift in molecular classes, particularly between the O₁ and O₂ classes, as well as changes in the molecular mass distribution, were observed with increasing degrees of deoxygenation. These structural findings are crucial for understanding fuel stability and blending behaviour, and they offer important directions for the targeted optimisation of future upgrading processes.

1 Einleitung

Alternativen zu fossilen Energieträgern sind essenziell für das Gelingen der Energiewende und den langfristigen Klimaschutz. Insbesondere im maritimen Sektor spielt die Wahl des Kraftstoffs eine zentrale Rolle, um die CO₂-Emissionen bis 2050 signifikant zu reduzieren. Der Einsatz rein batterieelektrischer Antriebssysteme ist aufgrund ihres hohen Gewichts, des großen Platzbedarfs und der Abhängigkeit von landseitiger Ladeinfrastruktur insbesondere für den Langstreckenbetrieb nur begrenzt praktikabel bis unmöglich. Aus diesem Grund liegt der Fokus auf der Entwicklung nachhaltiger, klimafreundlicher Schiffskraftstoffe, die Treibhausgasemissionen deutlich verringern oder im Idealfall keinen zusätzlichen CO₂-Ausstoß verursachen.

Die Lebensdauer von Schiffen beträgt in der Regel mehr als zwanzig Jahre, weshalb viele heute eingesetzte Schiffe noch weit über das Jahr 2040 hinaus im Einsatz sein werden. Für eine zügige und praktikable Umstellung auf klimaneutrale Kraftstoffe ist es daher entscheidend, dass diese weltweit verfügbar sind und sich ohne größere technische Anpassungen in bestehende Antriebssysteme integrieren lassen. Idealerweise sollten sie sich mit fossilen Kraftstoffen mischen lassen und als Drop-in-Kraftstoffe eingesetzt werden können. Auch wenn die Herstellung solcher Kraftstoffe aktuell noch mit höheren Kosten verbunden ist, bieten sie das Potenzial, die Effizienz zu steigern und Emissionen deutlich zu senken.

In den kommenden Jahren wird umfangreiche Forschung notwendig sein, um potenzielle zukünftige Kraftstoffe, die oft zunächst nur im Labormaßstab vorliegen, hinsichtlich ihrer technischen, ökologischen und sicherheitsrelevanten Eigenschaften zu bewerten. Ziel ist es, belastbare Grundlagen für strategische Entscheidungen im maritimen Energiesektor zu schaffen. Nur so können globale Klimaziele erreicht und Umweltkonflikte – insbesondere in Hafen- und Küstenregionen – wirksam vermieden werden.

Um die Klimaziele zu erreichen, wird es erforderlich sein, in Zukunft große Mengen an CO₂-neutralen Kraftstoffen bereitzustellen. Aktuell ist die großtechnische Produktion synthetischer Kraftstoffe jedoch noch nicht in ausreichendem Maß möglich. Daher müssen auch biogene Energiequellen genutzt werden, um die Freisetzung von fossilem CO₂ bereits heute zu reduzieren. Eine vielversprechende Alternative stellen biogene Kraftstoffe wie pflanzliche Öle, Biodiesel (FAME), hydrierte Pflanzenöle (HVO), Biomethan und Pyrolyseöle dar [1, 2]. Biokraftstoffe sind bereits in größeren Mengen verfügbar und bieten als Brückentechnologie eine nachhaltige Möglichkeit, die Treibhausgasemissionen kurz- und mittelfristig erheblich zu reduzieren [3]. Im Kontext der Schifffahrt, die vor der Herausforderung steht, rasch auf klimaneutrale Kraftstoffe umzusteigen, stellen Biopyrolyseöle eine vielversprechende Alternative dar. Diese können durch effiziente Hydrierung und Stabilisierung in der bestehenden Kraftstoffinfrastruktur verwendet werden und bieten eine umweltfreundliche Alternative zu fossilen Schwerölen.

2 Projektvorstellung: REFOLUTION – Fortschrittliche Biokraftstoffe für die Schifffahrt

Das europäische Forschungsprojekt REFOLUTION verfolgt das Ziel, innovative Biokraftstoffe für die Luft- und Schifffahrt zu entwickeln, die eine signifikante Reduktion der Treibhausgasemissionen ermöglichen und gleichzeitig in bestehende Raffinerie- und Antriebssysteme integrierbar sind. Im Fokus stehen dabei insbesondere hydriertes Pyrolyseöl (HPO) und stabilisiertes, teil-deoxygeniertes Pyrolyseöl (SDPO), welche aus lignozellulosischer Biomasse durch thermochemische Umwandlungsprozesse gewonnen werden.

Biopyrolyseöle gelten als besonders vielversprechend, da sie aus Rest- und Abfallstoffen wie Holzresten, Stroh oder anderen biogenen Materialien hergestellt werden können und somit keine Konkurrenz zur Nahrungsmittelproduktion darstellen. Durch die Schnellpyrolyse lassen sich flüssige Energieträger erzeugen, die eine hohe Energiedichte aufweisen und langfristig fossile Schweröle ersetzen könnten. Durch gezielte Stabilisierung und Hydrierung können die gewonnenen Pyrolyseöle so aufbereitet werden, dass sie über eine deutlich verbesserte Lagerstabilität, Mischbarkeit und Kompatibilität mit maritimen Kraftstoffstandards verfügen. Insbesondere durch die Hydrierung werden Sauerstoffverbindungen reduziert, was zu einem niedrigeren Säuregehalt, einer besseren thermischen Stabilität und Mischungsstabilität führt – essenzielle Aspekte für den Einsatz in Schiffsmotoren.

Das REFOLUTION-Projekt wird von einem interdisziplinären Konsortium aus 14 Partnern getragen, welches die gesamte Wertschöpfungskette für fortschrittliche Biokraftstoffe abbildet. Gemeinsam verfolgen die Partner das Ziel, nachhaltige Biokraftstoffe für die Schifffahrt und Luftfahrt zu entwickeln und zur Anwendung zu bringen. Ein wichtiger Beitrag erfolgt durch die Universität Rostock,

vertreten durch den Lehrstuhl für Kolbenmaschinen und Verbrennungsmotoren. Hier werden die potenziellen Kraftstoffkandidaten auf ihre physikalisch-chemischen Eigenschaften analysiert und die vielversprechendsten Kraftstoffkandidaten für vertiefte motorische Bewertung ausgewählt. Neben der experimentellen Untersuchung des Zünd- und Verbrennungsverhaltens in einem mittelschnelllaufenden Einzylinder-Forschungsmotor liegt das Ziel darin, die praktische Eignung der entwickelten Biokraftstoffe unter realistischen Betriebsbedingungen zu evaluieren. Die Ergebnisse liefern wichtige Hinweise zur Optimierung der Kraftstoffe sowie zur Einhaltung der normativen Anforderungen gemäß DIN ISO 8217, die für den Einsatz als Schiffskraftstoff essenziell sind.

3 Charakterisierung und Kompatibilität hydrierter Pyrolyseöle als Schiffskraftstoffkomponente

Um das Potenzial hydrierter Pyrolyseöle als nachhaltige Schiffskraftstoffkomponenten zu bewerten, wurden im Rahmen dieser Studie verschiedene kiefernholz-basierte Pyrolyseöle des Projektpartners BTG untersucht. Darauf aufbauend wurden von dem Projektpartner SINTEF durch Variation der Prozessparameter mehrere stabilisierte, teil-deoxygenierte Pyrolyseöle (SDPOs) mit Rest-Sauerstoffgehalten zwischen 1,6 % und 13,2 % hergestellt. Zusätzlich standen zwei hydrierte Pyrolyseöle (HPOs) von BTG zur Verfügung. Die hydrierten Produkte wurden fraktioniert und die schwereren Fraktionen auf ihre Eignung als Schiffskraftstoff gemäß DIN ISO 8217 analysiert. Im Folgenden werden die physikalisch-chemischen Eigenschaften dieser Proben, ihr Blendverhalten sowie ihre molekulare Zusammensetzung mittels hochauflösender Massenspektrometrie untersucht.

3.1 Chemisch-physikalische Eigenschaften der Pyrolyseöle

3.1.1 Charakterisierung von stabilisierten, teil-deoxygenierten Pyrolyseölen (SDPO)

Aufgrund der begrenzten Probenmengen aus den Laborexperimenten konnten nicht alle relevanten Kraftstoffparameter bestimmt werden. Zudem handelte es sich bei den Proben um nicht fraktionierte Intermediate. Dennoch wurden erste Mischungsversuche durchgeführt, um die Kompatibilität mit fossilen Kraftstoffen zu untersuchen.

Tab. 1: Kraftstoffparameter von zwei teilhydrierten Pyrolyseölen (SDPO)

Parameter	Grenzwert*	SDPO 1	SDPO 2
Dichte bei 15 °C [kg/m ³]	≤ 1010,0	974	938
TAN [mg KOH/g]	≤ 2,5	51,3	7,4
Sauerstoffgehalt [%]	-	13,2	5,8

*gemäß DIN ISO 8217 – Spezifikation für bio-residuale Schiffskraftstoffe

Tab. 1 zeigt die wesentlichen Eigenschaften zweier ausgewählter SDPO-Proben im Vergleich zu den Grenzwerten der DIN ISO 8217 für bioreststoffbasierte Schiffskraftstoffe. Die SDPOs weisen eine hohe Dichte sowie deutlich reduzierte Sauerstoffgehalte im Vergleich zum Ausgangspyrolyseöl (ca. 37 Gew.-%) auf. Infolge der Hydrierung sank der Rest-Sauerstoffgehalt auf 13,2 % bzw. 5,8 %. Parallel dazu verringerte sich auch die Gesamtsäurezahl (TAN), wobei die gemessenen Werte die ISO-Grenzwerte für Reinkraftstoffe noch überschreiten. Dennoch können SDPOs potenziell als Zumischkomponente eingesetzt werden, um normkonforme Mischungen herzustellen.

3.1.2 Charakterisierung von hydrierten Pyrolyseölen (HPO)

Wie in Tab. 2 dargestellt, erfüllen nahezu alle analysierten Parameter die Anforderungen der Norm für Marine Destillat- bzw. Biodestillat-Kraftstoffe. Eine Ausnahme bildet die Dichte von HPO 2, die oberhalb des Grenzwerts liegt, aber durch Fraktionierung bei niedrigeren Temperaturen reduziert werden kann (siehe HPO 1). Die sehr niedrigen Wasser- und Schwefelgehalte sowie die geringen TAN-Werte weisen auf eine hohe Produktqualität hin. Auch das Kälteverhalten der Proben ist mit Pour-Points von bis zu -36 °C sehr vorteilhaft. Insgesamt zeigen die Ergebnisse, dass HPO aufgrund seiner vorteilhaften physikochemischen Eigenschaften als geeignete Komponente für den Einsatz in maritimen Kraftstoffblends bewertet werden kann. Da die Internationale Maritime Organisation (IMO) derzeit bis zu 30 % biobasierte Anteile in konventionellen Schiffskraftstoffen erlaubt, ergibt sich ein realistisches Einsatzpotenzial für HPO in nachhaltigen Schiffskraftstoffen.

Tab. 2: Kraftstoffparameter von zwei vollständig hydrierten Pyrolyseölfractionen (HPO)

Parameter*	Grenzwert**	HPO 1	HPO 2
Dichte bei 15 °C [kg/m ³]	≤ 900,0	891,4	908,9
Viskosität bei 40 °C [mm ² /s]	≤ 11,00	3,99	4,72
TAN [mg KOH/g]	≤ 0,5	0,05	0,08
Wassergehalt (V/V) [ppm]	≤ 3000	21	25
Flammpunkt [°C]	≥ 60,0	61	75
Cloud Point [°C]	-	34,5	-31,1
Pour Point [°C]	≤ -6	-36	-33
Schwefelgehalt [%]	≤ 0,50	< 0,10	< 0,10

**DIN ISO 8217 – Distillate and bio-distillate marine fuels

3.2 Mischungsverhalten und Stabilität von Pyrolyseöl-Kraftstoff-Mischungen (Pretests)

3.2.1 Blending von stabilisierten, teil-deoxygenierten Pyrolyseölen (SDPOs) mit konventionellen und biogenen Kraftstoffen

Zur Bewertung der Mischungsverträglichkeit von stabilisierten, teil-deoxygenierten Pyrolyseölen (SDPOs) wurden verschiedene Mischungsverhältnisse von Marine Destillat Oil (MDO) und Biodiesel (FAME) in kleinem Maßstab getestet. Aufgrund der begrenzten Menge an Probenmaterial konnten die Standardwerte TSE, TSP und TSA nicht ermittelt werden. Stattdessen wurde die Stabilität der Mischungen visuell beurteilt. Nach dem Mischen wurden die Proben für 24 Stunden ruhen gelassen, um mögliche Phasentrennungen zu beobachten.

Die Ergebnisse der Blending-Vortests mit Marinedieselöl (MDO), dargestellt in Abb. 1a, zeigen, dass es unabhängig vom Restsauerstoffgehalt der SDPO-Proben zu keiner sichtbaren Phasentrennung kommt. Dennoch zeigen sich bei Mischungsverhältnissen mit mehr als 30 % MDO-Anteil Sedimente am Boden der Probengefäße, was darauf hinweist, dass Mischungsinstabilitäten zwischen den beiden Komponenten bestehen. Derzeit laufende Untersuchungen sollen klären, ob eine weitergehende Reduzierung des Sauerstoffgehalts in den verarbeiteten Pyrolyseölen zu einer verbesserten Mischbarkeit mit MDO führen kann.

Im Gegensatz zu den Mischungen mit MDO sind alle untersuchten Proben in jedem Verhältnis vollständig mit FAME mischbar, wie in Abb. 1b exemplarisch für das SDPO mit 5.8 % Restsauerstoffgehalt dargestellt. Der Unterschied in der Mischbarkeit von teil-deoxygenierten Pyrolyseölen (polar) in MDO (unpolar) und FAME (polar) lässt sich wahrscheinlich durch die unterschiedlichen Polaritäten der beiden Komponenten erklären. Da FAME bereits zu 100 % in die DIN ISO 8217 aufgenommen worden ist, stellt es eine vielversprechende Alternative dar, um die Mischbarkeitsprobleme zwischen Pyrolyseölen und konventionellen Schiffskraftstoffen zu überwinden.

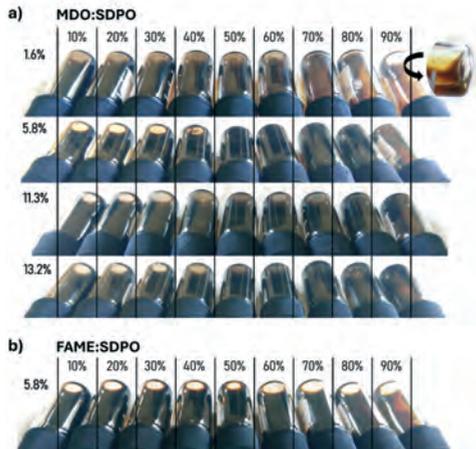


Abb. 1: Ergebnisse der Blending-Vortests von MDO mit SDPO (a) und FAME (b). Obwohl bei Mischungen mit MDO keine Phasentrennung beobachtet wurde, treten bei MDO-Anteilen über 30 % Sedimente auf, was auf Mischungsinstabilitäten hinweist. Im Gegensatz dazu zeigen alle getesteten SDPO-FAME-Mischungen vollständige Mischbarkeit.

3.2.2 Blending von hydriertem Pyrolyseöl (HPO) mit konventionellen und biogenen Kraftstoffen

Im Rahmen der Untersuchungen zum Potenzial von hydrierten Pyrolyseölen (HPOs) als nachhaltige Schiffskraftstoffe wurden Blendingtests mit Marinediesel (MDO), HVO (hydriertes Pflanzenöl), FAME (Fettsäuremethylester) und Methanol durchgeführt, um ihre Mischbarkeit mit verschiedenen konventionellen bzw. aufstrebenden Kraftstoffen zu bewerten. Die Mischungsverhältnisse wurden in kleinem Maßstab in den Massenverhältnissen 25:75, 50:50 und 75:25 getestet.

Die Ergebnisse der Blendingtests zeigten, dass HPO gut mit MDO, HVO und FAME mischbar ist. Eine Ausnahme bildete die Mischbarkeit von HPO mit Methanol, da diese beiden Kraftstoffe in den getesteten Verhältnissen nicht vollständig mischbar waren. Dennoch war eine geringe Mischbarkeit erkennbar. Insbesondere zeigte sich, dass HPO in allen getesteten Verhältnissen gut mit FAME kompatibel ist, was darauf hinweist, dass FAME als mögliche Blending-Komponente in Kombination mit HPO in Betracht gezogen werden kann.

Auf Grundlage der positiven Ergebnisse der ersten Blending-Tests wurden weitere Mischungen vorbereitet, bei denen die Kraftstoffparameter analysiert wurden. Zwei ausgewählte Mischungen wurden näher untersucht: HPO Blend 1 (30 % HPO + 70 % MDO) und HPO Blend 2 (30 % HPO + 70 % MDO mit 7 % FAME). Die Ergebnisse dieser Tests sind in Tab. 3 zusammengefasst.

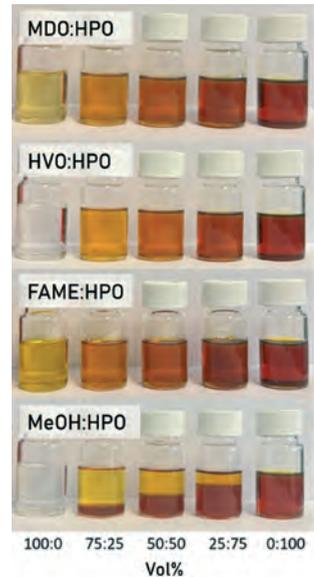


Abb. 2: Ergebnis der Blending-Tests am Beispiel eines HPOs, das mit MDO, HVO, FAME und Methanol in verschiedenen Mischungsverhältnissen getestet wurde.

Die analysierten Blends zeigten, dass die HPO-Mischungen mit MDO und FAME eine hohe Übereinstimmung mit den DIN ISO 8217-Spezifikationen aufwiesen. Insbesondere die Dichte, Viskosität und der Flammpunkt lagen innerhalb der für Marinekraftstoffe vorgegebenen Grenzwerte. Die bisherigen Ergebnisse zeigen, dass HPO in Kombination mit MDO und FAME ein vielversprechender Kandidat für den Einsatz als nachhaltiger Schiffskraftstoff ist. Weitere Tests sollen die praktische Eignung und die Langzeitstabilität dieser Blends weiter bestätigen.

Tab. 3: Kraftstoffparameter von zwei HPO-MDO-Blends

Parameter	HPO Blend 1	HPO Blend 2
Dichte bei 15 °C [kg/m ³]	865,1	866,9
Viskosität bei 50 °C [mm ² /s]	2,99	3,02
TAN [mg KOH/g]	0,09	0,09
Wassergehalt [ppm]	41	45
Flammpunkt [°C]	75	75
Trübungspunkt [°C]	-13,1	-14,1
Gefrierpunkt [°C]	-12	-12
Schwefelgehalt [%]	< 0,1	< 0,1

3.3 Analyse der chemischen Zusammensetzung mittels hochauflösender Massenspektrometrie (FT-ICR-MS)

Die chemische Charakterisierung von Bioölen ist eine analytische Herausforderung, da diese komplexen Mischungen aus verschiedenen organischen Verbindungen mit einer breiten molekularen Diversität bestehen. Die Kombination von hochauflösender Fourier-Transform-Ionenzyklotron-Resonanz-Massenspektrometrie (FT-ICR MS) und negativer Elektrospray-Ionisation (ESI) stellt eine leistungsstarke Methode zur detaillierten Analyse von Bioölen dar [5]. FT-ICR MS bietet eine außergewöhnlich hohe Massengenauigkeit und -auflösung, die es ermöglicht, selbst kleinste Massendifferenzen präzise zu identifizieren. Die negative ESI ist besonders geeignet, um polare, sauerstoffhaltige Verbindungen wie Carbonsäuren, Phenole und andere funktionalisierte Moleküle zu ionisieren, die in Bioölen häufig vorkommen. Die FT-ICR MS in Kombination mit negativer ESI ermöglicht es, die Summenformeln der identifizierten Moleküle direkt anhand ihrer gemessenen Masse zu berechnen. Somit liefert diese Technik detaillierte Informationen über die molekulare Zusammensetzung der Bioöle und unterstützt die Entwicklung und Optimierung von Biokraftstoffen, indem sie ein besseres Verständnis der chemischen Vielfalt und der potenziellen Reaktivität der einzelnen Komponenten ermöglicht.

Mittels hochauflösender Massenspektrometrie (ESI-FT-ICR MS) wurden die stabilisierten, teil-deoxygenierten Pyrolyseöle (SDPOs) mit variierendem Restsauerstoffgehalt analysiert. Die SDPOs wurden aus zwei verschiedenen stark stabilisierten Pyrolyseölen (SPOs) gewonnen, wobei das „low-severity SPO“ bei geringeren Temperaturen stabilisiert wurde als das „high-severity SPO“. Ziel dieser Untersuchungen war es, die molekulare Zusammensetzung der Proben in Abhängigkeit vom Hydrierungsgrad zu charakterisieren und strukturelle Veränderungen auf molekularer Ebene zu identifizieren. Wie in Abb. 3a dargestellt, zeigt die Gesamtsignalintensität – definiert als Summe der Intensitäten aller zugewiesenen molekularen Formeln – keine klare Korrelation mit dem

Restsauerstoffgehalt der untersuchten Proben. Trotz signifikanter Unterschiede im Sauerstoffgehalt bleiben die Gesamtintensitäten vergleichbar. Dies lässt darauf schließen, dass sich zwar die qualitative Zusammensetzung der Molekülklassen verändert, die Gesamtkomplexität der Matrix jedoch weitgehend erhalten bleibt.

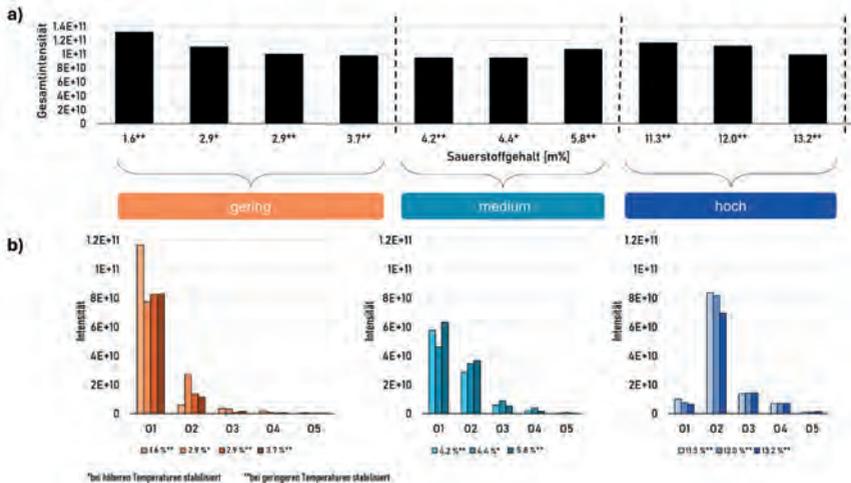


Abb. 3: Ergebnisse der ESI-FT-ICR-MS-Analyse von SDPOs mit unterschiedlichem Restsauerstoffgehalt. (a) Die Gesamtsignalintensität zeigt trotz variierender Sauerstoffgehalte keine signifikanten Unterschiede, was auf eine vergleichbare molekulare Komplexität der Proben hinweist. (b) Die Verteilung der Komponentenklassen (O₁, O₂ usw.) ermöglicht eine Einteilung der SDPOs in drei Gruppen mit niedrigem, mittlerem und hohem Restsauerstoffgehalt.

Wie in Abb. 3b dargestellt, lassen sich die untersuchten SDPO-Proben auf Basis ihrer molekularen Zusammensetzung in drei Gruppen unterteilen: SDPOs mit niedrigem, mittlerem und hohem Restsauerstoffgehalt. Die Klassifizierung der Moleküle erfolgte anhand der Anzahl der enthaltenen Sauerstoffatome pro Summenformel, wodurch eine Zuordnung zu sogenannten Komponentenklassen (z.B. O₁, O₂ usw.) ermöglicht wurde. SDPOs mit geringem Restsauerstoffgehalt zeigen vorwiegend Spezies der O₁-Klasse, also Moleküle mit nur einem Sauerstoffatom. Bei Proben mit mittlerem Sauerstoffgehalt ist ein ausgewogeneres Verhältnis zwischen O₁- und O₂-Klassen zu beobachten. Dagegen dominieren in Proben mit hohem Restsauerstoffgehalt Spezies der O₂-Klasse, die zwei Sauerstoffatome enthalten. Diese Verteilung unterstreicht den Einfluss des Gesamt-Sauerstoffgehalts auf die molekulare Zusammensetzung der SDPOs und liefert wichtige Hinweise auf die Wirksamkeit der durchgeführten Deoxygenierungsprozesse.

Zur detaillierten Untersuchung der molekularen Veränderungen in Abhängigkeit vom Restsauerstoffgehalt wurden drei ausgewählte SDPO-Proben mit 1,6 %, 2,9 % und 11,3 % Restsauerstoffgehalt untersucht.

5,8 % und 12,0 % Restsauerstoff analysiert (vgl. Abb. 4). Hierzu wurden die zugewiesenen Summenformeln in sogenannten DBE-vs.-#C-Diagrammen dargestellt, bei denen die Anzahl der Kohlenstoffatome (#C) gegen die Ring- und Doppelbindungsäquivalente (DBE) aufgetragen wird. Diese Darstellungsweise erlaubt Aussagen über die Aromatizität sowie über die Molekularmassenverteilung innerhalb einzelner Komponentenklassen.

In allen drei Proben dominieren Spezies mit hoher relativer Intensität, deren Strukturmerkmale auf monomere und dimere Ligninfragmente hindeuten. Diese Moleküle liegen typischerweise im Bereich von C10-C20 (Monomere) bzw. C20-C30 (Dimere) mit DBE-Werten zwischen 4 und 8. Mit abnehmendem Restsauerstoffgehalt zeigt sich eine Verschiebung hin zu Spezies mit geringerer O-Anzahl, insbesondere innerhalb der O₁-Klasse, bei gleichzeitiger Abnahme der O₂-Klasse. Auffällig ist dabei die Reduktion von Phenolen mit zwei OH-Gruppen zu einfach substituierten Phenolen, wobei vermutlich die sterisch hindernde OH-Gruppe erhalten bleibt. Die in Abb. 4 dargestellten Molekülstrukturen sind exemplarisch und sollen typische Vertreter der dominierenden Spezies illustrieren.

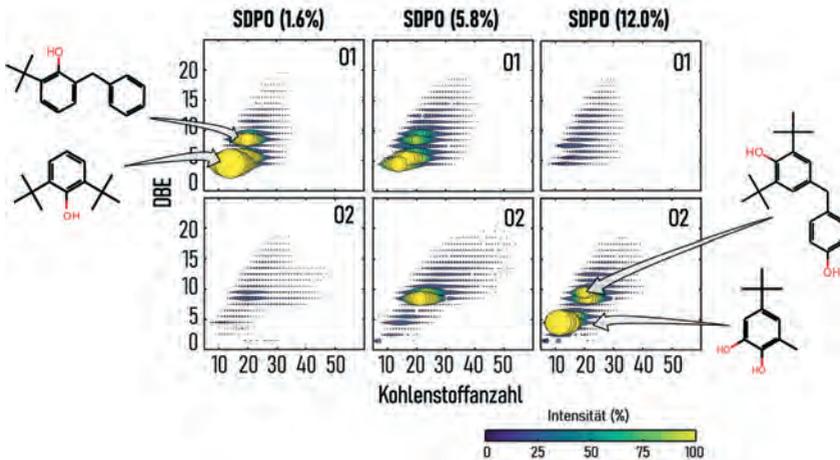


Abb. 4: DBE-vs.-#C-Diagramme ausgewählter Komponentenklassen (O₁ und O₂) für drei SDPO-Proben mit unterschiedlichem Restsauerstoffgehalt (1,6 %, 5,8 % und 12,0 %). Die dargestellten Molekülverteilungen ermöglichen Rückschlüsse auf Aromatizität, Molekularmassenverteilung und Grad der Deoxygenierung. Mit abnehmendem Sauerstoffgehalt verschiebt sich die Verteilung hin zu Spezies der O₁-Klasse, begleitet von einer Abnahme der O₂-Klasse. Die beispielhaften Strukturvorschläge illustrieren typische, aus Lignin ableitbare Molekültypen, wie mono- und dimerisierte Phenole.

4 Zusammenfassung und Ausblick

In dieser Arbeit wurde das Potenzial stabilerer, teil-deoxygenerter Pyrolyseöle (SDPOs) und hydrierter Pyrolyseöle (HPOs) als alternative Kraftstoffe für die Seeschifffahrt und Luftfahrt untersucht. Der Fokus lag auf der detaillierten Analyse der chemischen Zusammensetzung dieser Biokraftstoffe sowie der Untersuchung ihrer physikalisch-chemischen Eigenschaften und Mischbarkeit mit konventionellen Schiffskraftstoffen. Dabei wurde ein besonderer Schwerpunkt auf die Variationen des Rest-Sauerstoffgehalts gelegt, der durch Deoxygenierungs- und Hydrierungsprozesse beeinflusst wurde. Mittels hochauflösender Massenspektrometrie (ESI-FT-ICR MS) konnten die molekularen Veränderungen in den verschiedenen SDPOs präzise charakterisiert werden, was wichtige Erkenntnisse über die Struktur der Pyrolyseöle lieferte.

Blending-Tests zeigten, dass SDPOs mit gut mit FAME mischbar sind. Die Mischbarkeit mit MDO ist bis etwa 30 % MDO-Anteil gegeben, bei höheren Anteilen von MDO in SDPO bilden sich deutliche Sedimente. HPOs hingegen zeigten mit MDO, FAME und HVO hervorragende Blendeigenschaften. Zudem stimmen die physikalisch-chemischen Parameter der HPO-Mischungen mit den Anforderungen der DIN ISO 8217 überein, wobei laut den Anforderungen der IMO bis zu 30 % HPO als alternative Komponente in Marinedieselmischungen zulässig sind. Dies eröffnet die Möglichkeit, HPO als nachhaltigen Bestandteil in Schiffskraftstoffen zu verwenden.

Die molekulare Analyse der SDPOs zeigte eine klare Abhängigkeit der Strukturmerkmale von den Sauerstoffgehalten und liefert wertvolle Hinweise auf die Auswirkungen der Deoxygenierungsprozesse, wodurch Perspektiven zur gezielten Verbesserung der Kraftstoffeigenschaften aufgezeigt werden.

Im weiteren Verlauf des Projekts werden zusätzliche Tests durchgeführt, um die praktische Eignung und Langzeitstabilität von HPO und HPO-Blends zu bestätigen. Dies umfasst Tests mit dem Diesel-Thermooxidationstester, um die potenzielle Ablagerungsbildung zu bewerten, sowie Untersuchungen des Sprüh- und Verbrennungsverhaltens von HPO und HPO-Mischungen in einer Hochdruck-Hochtemperatur-Einspritzkammer. Langfristig sollen diese Tests in einem Forschungsmotor weitergeführt werden, um das Verhalten von HPO in realen Anwendungen zu testen. Zukünftige Arbeiten werden außerdem die Untersuchung des Verbrennungsverhaltens der Mischungen in Motorentests sowie die Analytik der Ablagerungsneigung und des Emissionsverhaltens in realen Antriebssystemen umfassen. Darüber hinaus könnten SDPOs als vielversprechende Alternative zu Schwerölen dienen. Weitere Blending- und Aufreinigungstests werden durchgeführt, um die optimalen Mischverhältnisse und die Langzeitstabilität der SDPO- und HPO-basierten Kraftstoffe zu bestimmen. Langfristig könnten die Ergebnisse dieser Forschung dazu beitragen, die Seeschifffahrt auf nachhaltige Biokraftstoffe umzustellen und somit einen wesentlichen Beitrag zur Reduktion von Treibhausgasemissionen zu leisten.

Literatur/Quellen

- [1] Tyrovola, T.; Dodos, G. S.; Kalligeros, S.; Zannikos, F. (2017): The Introduction of Biofuels in Marine Sector, Science Journal of Environmental Science and Engineering A 6: 415-421
- [2] Wojcieszuk, M.; Kroyan, Y.; Larmi, M.; Kaario, O.; Zenger, K., 2019. Effect of alternative fuels on marine engine performance, SAE Technical Paper 2019-01-2230
- [3] Kalghatgi, G.; Levinsky, H.; Colket, M., 2018. Future transportation fuels, Progress in Energy and Combustion Science, 69, 103-105
- [4] Han, J.; Somers, L.M.T.; van de Belt, B.; 2024. Experimental investigation performance and emission of hydrotreated pyrolysis oil in a heavy-duty engine with EGR, Fuel Processing Technology, 255,
- [5] Zambrano, N.; Lezcano, G.; Hita, I.; Gerritsen, G.; Venderbosch, R.; Castaño, P.; 2025. Molecularlevel analytical platform for quasi-quantitative characterization of bio-oils from a commercial biorefinery, Energy & Fuels, 39 (10), 4818–4833. <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.4c05619>

Kontakt

*Dr. Anika Neumann, Dr. Fanny Langschwager, Dr. Ulrike Schümann,
Prof. Dr.-Ing. Bert Buchholz*

Universität Rostock, Lehrstuhl für Kolbenmaschinen und Verbrennungsmotoren

✉ anika.neumann@uni-rostock.de

Mehr als nur Abfall: Biologisch abbaubare Folien auf Zellulosebasis aus Bioreststoffen im Rahmen eines Cradle-to-Cradle-Ansatzes

Zusammenfassung: *Neue Modelle der Kreislaufwirtschaft und Cradle-to-Cradle-Ansätze sind dringend erforderlich, um die Ziele für nachhaltige Entwicklung zu erreichen. Insbesondere die Zusammenarbeit mit Entwicklungsländern kann eine andere Sichtweise auf Abfallstoffe und die entsprechende Wiederverwendung ermöglichen. In diesem Beitrag stellen wir einen innovativen Ansatz zur Aufwertung von Abfällen vor, ohne deren chemische Struktur zu verändern. Unser ganzheitlicher Ansatz umfasst Aufbereitung, Nutzung und Abbau. Die Aufbereitung und Isolierung der Zellulose erfolgt in fast demselben umweltfreundlichen Verfahren wie die Herstellung des Produkts: eine kunststofffreie Folie, die als Membran oder als Kunststoff-alternative in der Verpackungsindustrie verwendet werden kann. Bezeichnend ist jedoch, dass sich das Produkt im Boden innerhalb von 4 Wochen extrem schnell vollständig zersetzt. Alle anderen vergleichbaren Verpackungen zeigen keine Anzeichen von Abbau.*

Abstract: *New Circular Economy model and Cradle-to-Cradle approaches are highly needed to approach the Sustainable Development Goals. Especially the cooperation with developing countries can enable a different view on waste materials and the corresponding re-use. In this contribution we provide an innovative approach to upgrade waste without changing the chemical structure. Our holistic approach includes processing, utilization and degradation. The processing and isolation of the cellulose is carried out using almost the same environmentally friendly process as the manufacture of the product: a plastic-free film that can be used as a membrane or as a plastic alternative in the packaging industry. However, it is significant that the product degrades completely in the soil extremely quickly within 4 weeks. All other comparative packaging shows no signs of degradation. Our approach therefore represents an cradle-to-cradle approach.*

1 Einleitung

Die weltweite Plastikproduktion hat in den letzten Jahrzehnten zu einer massiven Umweltbelastung geführt, da herkömmliche Kunststoffe nur langsam oder gar nicht biologisch abbaubar sind. Riesige Plaste Strudel verunreinigen die Meere insbesondere durch unzureichendes Recycling in den Entwicklungsländern. Gleichzeitig fällt in agrarisch geprägten Regionen wie Südostasien ein enormes Aufkommen an Bioreststoffen an: Allein in Vietnam werden jährlich rund 67 Mio. t Reispflanzen erzeugt. Diese wird nicht genutzt sondern verbrannt. Damit werden riesige Mengen CO₂ aber auch andere klimaschädliche Emissionen freigesetzt. Vor dem Hintergrund der Kreislaufwirtschaft gewinnt

der Cradle-to-Cradle-Ansatz zunehmend an Bedeutung, da er nicht nur eine reine Ressourcenoptimierung, sondern auch die vollständige Rückführung von Materialien in biologische oder technische Kreisläufe vorsieht. In diesem Kontext eröffnet die Umwandlung von Reisspelzen zu hochreiner Zellulose ein vielversprechendes Innovationspotenzial.

In diesem Vortrag wird ein neues innovatives Verfahren zur Nutzung der Reis-pflanze vorgestellt. Mittels eines mechanochemischen Vorbehandlungs- und chemischen-Aufschlussverfahrens lässt sich aus Agrarabfällen Rohzellulose isolieren, die sich ohne weitere chemische Modifikation zu regenerierten Folien verarbeiten lässt. Diese Folien zeichnen sich durch hohe Flexibilität, Transparenz und vor allem vollständige biologische Abbaubarkeit aus, wodurch sie eine nachhaltige Alternative zu fossilen Polymeren darstellen. Der Vortrag gibt damit einen ganzheitlichen Überblick über die Nutzung und Charakterisierung von Zellulose-basierten Folien aus Reisspelzen im Sinne eines ganzheitlichen Cradle-to-Cradle-Konzepts und diskutiert deren Potenzial für eine kreislauffähige Kunststoffwirtschaft.[1]



Abb. 1: Cradle-to-Cradle-Ansatz mit Reisstroh (Picture from Nguyen et al. [1])

2 Teilschritte im Prozess

2.1 Isolation und Separierung aus Reisstroh

Vorab erfolgte eine mechanochemische Vorbehandlung in einer Planetenkugelmühle (400 rpm, 180 min). Dies reduzierte die Partikelgröße der Reisspelzen auf etwa 0,5 cm und ermöglichte nach Trocknung auf unter 5 Gew.-% Wassergehalt eine effiziente Lösung in TBPH. Diese Vorbehandlung war essentiell für die Homogenität der folgenden Aufschluss- und Fällschritte. Der anschließende Aufschluss in 50 wt.% Tetrabutylphosphonium hydroxid (TBPH)-Lösung bei Raumtemperatur über 24 Stunden führte zur nahezu vollständigen Disaggregation der lignocellulose Matrix. Durch Filtration und selektives Ausfällen mit deionisiertem Wasser konnte Zellulose in einer Ausbeute von 25,9-30,7 wt.% isoliert werden. Wasser reagiert als Antilösungsmittel für die Zelluloselösung und führt zum selektiven Ausfällen der Cellulose. Mehrfaches Waschen des Zelluloseniederschlags mit Wasser und Ethanol entfernte alle TBPH-Rückstände und gewährleistete eine hohe Produktreinheit. Dies entspricht einer quantitativen Ausbeute. Die Reinheit wurde mit verschiedenen Methoden

2.2 Regeneration und Filmherstellung

Zur Regeneration der Zellulose-Folien wurde das MDCell [2] Protokoll genutzt: Das getrocknete Rohzellulosepulver wurde erneut in TBPH gelöst. Die nachfolgende Auftragung mit einem Raket ermöglichte die gleichmäßige Ausstreichung auf eine bestimmte Höhe. Die sofortige Koagulation in Propylencarbonat bildete homogene Folien aus, die nach Trocknung (40 °C, 12 h) eine Dicke von ca. 50 µm aufwiesen und lediglich einen leichten Gelbstich zeigten, ohne dass dies die mechanischen Eigenschaften beeinträchtigte. Die leichtgelbe Farbe rührt von Spuren von Lignin. Die Folien wurden umfangreich auf verschiedene Charakteristiken untersucht und zeigen keine Änderung zu reinen Cellulosefolien hergestellt aus Kraft Cellulose.

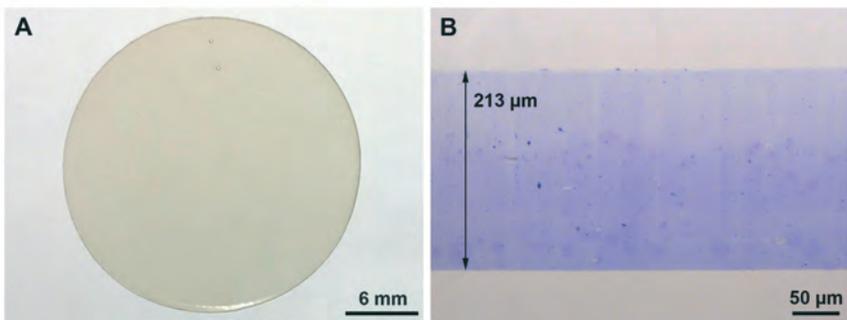


Abb. 2: Hergestellte Cellulosefilme und Lichtmikroskop der Membrane
(Picture from Nguyen et al. [1])

Die regenerierten Zellulose-Folien eröffnen ein breites Anwendungsspektrum: Ihre hohe Transparenz und Flexibilität prädestinieren sie für Kurzzeit-Lebensmittelverpackungen (z.B. Obst, Gemüse, Backwaren), während ihre atmungsaktive Barriereeigenschaft die Diffusion von Wasserdampf gewährleisten. Als vollständig biologisch abbaubare Einwegfolien eignen sie sich zudem für Tragetaschen, Hygieneblätter in Kliniken oder Mulchfolien in der Landwirtschaft, wo sie den Plastikmüll auf Feldern reduzieren und zugleich die Bodenfeuchte verbessern.

2.1 Biologische Abbaubarkeit

Die biologische Abbaubarkeit der regenerierten Zellulose-Folien wurde systematisch in standardisierten Bodentests im Boden untersucht (25 °C, 50 % relative Luftfeuchte) und über einen Zeitraum von vier Wochen verfolgt. Im Boden waren bereits nach sieben Tagen erste Aufweicherscheinungen zu beobachten. Am Ende der zweiten Woche wiesen die Proben einen Massenverlust von ca. 50 % auf. Dieser rasche Abbau ist auf die hohe Zugänglichkeit der Zelluloseketten für im Boden natürlich vorkommende Zellulasen und andere Hydrolyse-Enzyme zurückzuführen, die die β -1,4-glykosidischen Bindungen spalten und so die Makromoleküle in lösliche Oligosaccharide und Monosaccharide umwandeln. Im Verlauf der dritten Woche konnten die Proben mehr als 80 % ihres ursprünglichen Gewichts einbüßen, begleitet von einer sichtbaren Fragmentierung zu feinen Fasern. Nach Abschluss der vierwöchigen Testdauer war ein Massenverlust von über 95 % dokumentiert, und die verbliebenen Rückstände bestanden lediglich aus organischem Bodenmaterial, ohne Nachweis von Mikroplastikpartikeln oder toxischen Abbauzwischenprodukten. Parallel wurden Mikrostrukturaufnahmen (SEM) angefertigt, die zeigen, wie die Oberfläche der Folien sukzessive von mikrobiellen Biofilmen besiedelt wird und Zersetzungsfronten in die Tiefe vordringen.

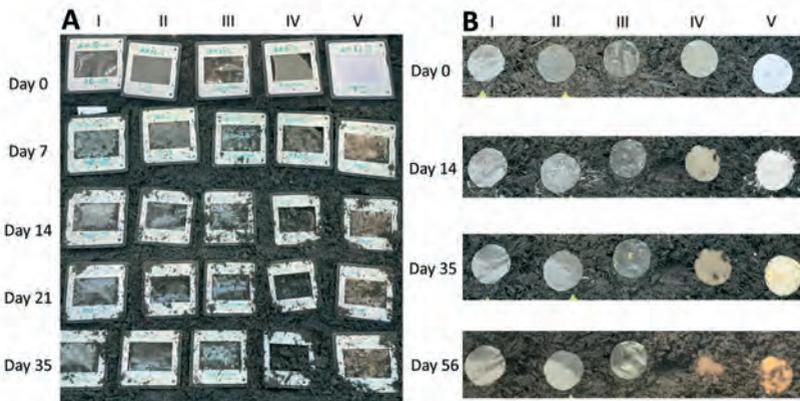


Abb. 2: Biologische Abbaubarkeitstests

Im direkten Vergleich zeigten unter identischen Testbedingungen sowohl LDPE- als auch PLA-Folie nach vier Wochen weniger als 5 % Massenverlust, was ihre nahezu vollständige Persistenz im Boden belegt. Dagegen erfüllt die Zellulosefolie nicht nur die Kriterien industrieller Kompostierbarkeit (EN 13432), sondern eignet sich dank ihrer schnellen Zersetzungsdynamik auch für Heimkompostierungsprozesse.

3 Zusammenfassung

Diese Ergebnisse unterstreichen, dass die in TBPH regenerierten Zellulosefolien ihre technische Funktion im Gebrauch sicher erfüllen und anschließend innerhalb eines einzigen Wachstumszyklus landwirtschaftlicher Kulturen vollständig in CO₂, Wasser und neue Biomasse umgewandelt werden können. Damit schließen sie den Materialkreislauf im Sinne eines echten Cradle-to-Cradle-Ansatzes und bieten eine umweltverträgliche Alternative zu fossilen Polymermaterialien.

Literatur/Quellen

- [1] M. N. Nguyen, M. T. L. Nguyen, M. Frank, D. Hollmann, RSC Sustainability 2024, 2, 4028-4035. <https://doi.org/10.1039/D4SU00613E>
- [2] M. N. Nguyen, U. Kragl, I. Barke, R. Lange, H. Lund, M. Frank, A. Springer, V. Aladin, B. Corzilius, D. Hollmann, Commun. Chem. 2020, 3, 116. <https://doi.org/10.1038/s42004-020-00360-7>

Kontakt

Dr. Dirk Hollmann, Themengruppenleiter Nachhaltige Chemie

 <https://www.hollmann.chemie.uni-rostock.de/>

Universität Rostock
Interdisziplinäre Fakultät Life, Light and Matter
Institut für Chemie

☎ +49 (0)381.498 8994 | ✉ dirk.hollmann@uni-rostock.de

Ungenutzte nachhaltige Biomasse kann enorme Mengen CO₂ einsparen:

Eine Synopse am Beispiel der Reststoffe aus der Palmölproduktion

Zusammenfassung: Bei der Produktion von Palmöl fallen bekanntermaßen viele Reststoffe an, die derzeit in verschiedene Anwendungen Verwendung finden. Beispielsweise werden die leeren Fruchtbündel auf die Plantage zurückgeführt und die alten Ölpalmstämme werden zerhackt und verrotten, wenn eine ausgediente Plantage neu bepflanzt wird. Bei diesen Anwendungen wird das Potenzial zur Reduzierung von Treibhausgasen allerdings bei Weitem nicht ausgeschöpft. Bei optimierter Nutzung der Reststoffe der Palmölproduktion zur Maximierung der Treibhausgas-einsparungen lassen sich in Summe selbst bei den technologisch einfachsten und damit kostengünstigsten Nutzungsmöglichkeiten weltweit jährlich über 50 Millionen t Treibhausgase einsparen bzw. ein Mehrfaches davon bei optimaler Nutzung. Dies alleine entspricht in etwa jährlich 1 Milliarde Euro an freiwilligen Kompensationszahlungen oder 3 Milliarden Euro an Carbon trading-Kosten.

Abstract: The production of palm oil is known to generate many residual products, which are currently used in various applications. For example, the empty fruit bunches are returned to the plantation and the old oil palm trunks are chopped up and left to rot when a plantation is replanted. However, these applications fall far short of exploiting the full potential for reducing greenhouse gases. Optimised use of the residual products of palm oil production to maximise greenhouse gas savings could save a total of over 50 million tonnes of greenhouse gases per year worldwide, even with the simplest and therefore most cost-effective applications, and several times that amount with optimal use. This alone corresponds to approximately 1 billion Euro in voluntary compensation payments or 3 billion Euro in carbon trading costs per year.

1 Hintergrund und Zielsetzung

Eine zunehmende Nutzung von Bioenergieträgern und Biomasse als nachwachsende Rohstoffe gilt allgemein hin als ein wichtiger Pfeiler, Klimagas einzusparen. Allerdings ist die Produktion von Biomasse mit teils erheblichen Klimagasemissionen verbunden, die erst durch die Nutzung der Biomasse kompensiert werden. In diesem Sinn empfiehlt sich aus Klimaschutzsicht eine möglichst effiziente Nutzung der Biomassen. Eine der wichtigsten Biomassefraktionen, die bisher unzureichend genutzt werden, sind Biomasse-Reststoffe, die sowohl in der Landwirt- und Forstwirtschaft wie auch bei der Verarbeitung der Biomassen (Lebensmittel sowie nachwachsende Rohstoffe einschließlich Bioenergieträger) anfallen.

In diesem Beitrag wird dieses Thema am Beispiel der Reststoffe der Palmölproduktion erörtert, da in diesem Bereich jährlich Millionen Tonnen an mehr oder weniger ungenutzter Biomasse anfallen. Weltweit werden jährlich etwa 80 Millionen Tonnen Palmöl und Palmkernöl für den Lebensmittelsektor und die chemische Industrie produziert [FAO 2025]. Diese machen jedoch nur einen kleinen Teil der insgesamt auf den Plantagen produzierten Ölpalm-Biomasse aus. Weitere Bestandteile der Pflanze wie die Ölpalmstämme am Ende der Plantagen-dauer, die Fruchtbündel oder die Schalen der Kerne werden zwar bereits verschiedenen Nutzungen zugeführt, jedoch schöpfen diese bislang nicht das volle Potential der hierdurch erreichbaren Einsparungen an Treibhausgasen aus.

In dieser Synopse werden diverse Nutzungskonzepte für alle relevanten Reststoffe der Palmölproduktion hinsichtlich ihres Potentials zur Einsparung von Treibhausgasen betrachtet. Dabei soll sowohl die Dimension der insgesamt möglichen Einsparungen wie auch die relative Bedeutung der verschiedenen Reststoffe aufgezeigt werden.

2 Methodik und Vorgehensweise

Zur Ermittlung der mit einer Nutzung von Reststoffen der Palmölproduktion verbundenen Einsparungen an Treibhausgasen, wurde der CO₂-Fußabdruck in Anlehnung an die internationalen ISO-Normen 14040 und 14044 zur Produkt-Ökobilanz [ISO 2021a; b] sowie unter Berücksichtigung der ISO 14067 zum Carbon Footprint von Produkten [ISO 2019] berechnet. Dabei werden sämtliche Treibhausgasemissionen berücksichtigt – darunter neben Kohlenstoffdioxid (CO₂) insbesondere auch Methan (CH₄) und Lachgas (N₂O) – und mittels Umrechnungsfaktoren auf CO₂-Äquivalente bezogen [IPCC 2021].

Bilanziert wurden die jeweiligen kompletten Lebenswege einschließlich der ersetzten bisherigen Nutzungspfade. Beispielsweise wurde eine Gutschrift für den entgangenen Düngernutzen vergeben, wenn eine Biomassefraktion nicht auf die Plantage zum Verrotten zurückgeführt sondern als Bioenergieträger genutzt wird. Ebenso wurde die gesamte Prozesskette des Nutzungskonzeptes betrachtet einschließlich der Bereitstellung bzw. Nutzung der substituierten Produkte. In allen Fällen wurde das Konzept der Systemraumerweiterung umgesetzt und Allokation vermieden. Details zu den Systemgrenzen der betrachteten Lebenswege finden sich in den jeweils angegebenen Literaturhinweisen.

Die Berechnungen für diese Synopse wurden auf der Basis der zitierten Publikationen vorgenommen, die entsprechenden Basisdaten angepasst und komplett auf den aktuellen verfügbaren Stand gebracht, was damit auch eine Gegenüberstellung der Ergebnisse bei der Interpretation ermöglichte [ifeu 2025].

3 Betrachtete Reststoffe der Palmölproduktion

Bei der Gewinnung von Öl aus den Palmfrüchten und Palmkernen fällt eine Reihe von Reststoffen an:

- **Leere Fruchtbündel:** Nach Abtrennen der ölhaltigen Früchte von den Fruchtbündeln werden die leeren Fruchtbündel üblicherweise zu einem kleinen Teil zur Energiegewinnung für den Betrieb der Palmölmühlen genutzt. Der größere Anteil wird wieder auf die Plantagen zurückgeführt, wo sie als Dünger fungieren, oder teilweise ohne Energienutzung vor Ort verbrannt. Dieser Anteil könnte zukünftig als Bioenergieträger genutzt werden, entweder vor Ort zur Biogasproduktion oder zu Briketts verpresst für Einsatzorte außerhalb der Plantagen. Je nach verwendeter Aufbereitungstechnologie, der Nutzung zur Strom-, Wärme- oder kombinierter Strom-/Wärme-Gewinnung und der dadurch ersetzten konventionellen fossilen Energieträger lassen sich jeweils unterschiedliche Mengen an Klimagasen einsparen. (Details siehe [Pastowski et al. 2007])
- **Palmkernschalen:** Bei der Gewinnung des Palmkernöls aus den Ölpalmkernen fallen holzartige feste Schalen an, die von den großen, zentralen Ölpalmölmühlen bereits heute effizient als Bioenergieträger auf den Markt gebracht werden. Es gibt allerdings weltweit noch viele Fälle, bei denen die Schalen weiterhin in herkömmlicher Verwendung wie im Wegebau zur Befestigung des Untergrunds eingesetzt werden. Diese Teilmenge ließe sich zukünftig erschließen und einer aus Klimasicht effizienteren Nutzung zuführen, wobei stattdessen Split oder andere Wegbaumaterialien mit geringem CO₂-Fußabdruck eingesetzt werden müssten. (Details siehe [Reinhardt et al. 2007])
- **Abwasser aus Palmölmühle:** Obwohl technisch gesehen kein Reststoff der Palmölproduktion, kann auch die Optimierung der Behandlung von Abwasser aus der Palmölmühle einen bedeutenden Beitrag zur Einsparung von Treibhausgasen liefern. Bei der Abkühlung des heißen Abwassers über mehrere Tage in Absetzbecken entstehen signifikante Mengen an Methan durch die biologische Vergärung der organischen Reststoffe. Da Methan etwa 30-mal so klimaschädlich ist wie CO₂, entstehen hierdurch gewaltige Klimagasemissionen. In Malaysia sind die Absetzbecken bereits zum größten Teil mit Abdeckplänen versehen und das gesammelte Methan wird vor Ort entweder mit oder ohne energetischer Nutzung verbrannt. In anderen Ländern ist dies bei Weitem noch nicht flächendeckend umgesetzt, so dass eine beschleunigte Methanrückhaltung geboten ist. Alleine beim technisch einfachsten und mit weitem Abstand kostengünstigsten Verfahren, dem direkten Verbrennen des Methans ohne Energiegewinnung, ließe sich auf diese Weise der hohe Klimagasbeitrag von Methan deutlich reduzieren. Mit höherem technischen Aufwand kann das Methan zur Bereitstellung von Strom oder Wärme bzw. mittels Kraft-Wärmekopplung verwendet werden und entsprechende fossile Energieträger ersetzen. (Details siehe [Reinhardt et al. 2007])

- Spezifische Wertstoffe: Neben den bereits aufgeführten Reststoffen können auch zusätzlich diverse Wertstoffe bei der Gewinnung bzw. Verarbeitung der Palmölfrüchte gewonnen werden. Dazu zählen Nahrungsergänzungsmittel oder Substanzen für die Kosmetikindustrie wie Tocopherole, Carotinoide usw. Bei diesen liegen jedoch die massenmäßig vorhandenen Potenziale wie auch die spezifischen CO₂-Einsparpotenziale so niedrig, dass sie hier im Einzelnen nicht aufgeführt werden (Details siehe [Rettenmaier et al. 2012])
- Ölpalmstämme: Nach etwa 20 bis 25 Jahren Standzeit der Palmölplantagen fallen die ausgedienten Ölpalmstämme an, wenn die Fläche neu bepflanzt wird. Die dabei anfallenden Stämme der alten Palmen werden in der Regel kleingehackt und auf den Plantagen belassen, verrotten und dienen als Dünger für die folgende Bepflanzung. Eine höhere Wertschöpfung entsteht jedoch durch die stoffliche Nutzung des Holzes z.B. im Möbelsektor oder als Bioenergieträger. Diese beiden Optionen werden hier betrachtet (Details siehe [Rettenmaier et al. 2014]).

4 Ergebnisse

Abb. 1 zeigt die Ergebnisse der spezifischen Einsparungen an Treibhausgasen pro Hektar und Jahr für die in Kap. 3 beschriebenen Reststoffe der Palmölproduktion (Differenzierte Einzeldarstellungen siehe [Reinhardt 2024]).

Entsprechend der dort aufgeführten Nutzungsoptionen, die von technisch einfach und relativ kostengünstig umzusetzenden Optionen bis hin zu technisch aufwendigeren und kostspieligeren Ansätzen reichen, ergibt sich für jeden Reststoff eine spezifische Bandbreite an möglichen CO₂-Einsparungen.

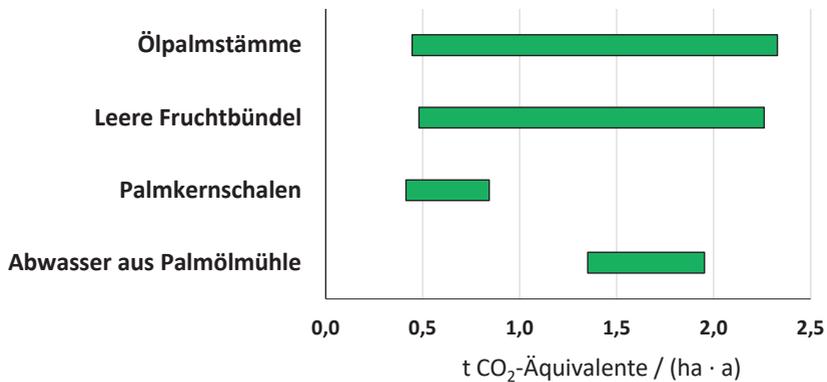


Abb. 1: Bandbreite der möglichen spezifischen Klimagaseinsparungen für jeden betrachteten Sektor pro ha und Jahr [ifeu 2025].

Um die global möglichen Einsparungen zu berechnen, müssen die in Abb. 1 dargestellten spezifischen CO₂-Einsparungen pro Hektar und Jahr mit den global verfügbaren Mengenpotenzialen verknüpft werden. Diese unterscheiden sich zum Teil deutlich zwischen den einzelnen Reststoffen, je nach bisher bereits genutzten Fraktionen, und auch dadurch, dass die aufgeführten Nutzungskonzepte länderabhängig unterschiedlich umgesetzt sind in den Fällen, in denen bereits entsprechende Maßnahmen ergriffen wurden. Auch können theoretisch mögliche Potentiale vor Ort nicht immer vollständig umgesetzt werden. Um die noch nicht ausgenutzten Potentiale zur Einsparung von Treibhausgasen realistisch aufzuzeigen, werden diese Faktoren entsprechend berücksichtigt.

Bei der Ableitung wurde nicht das theoretisch mögliche Potenzial zugrunde gelegt, sondern das erschließbare Potenzial. Beispielsweise können nicht alle gefällten Ölpalmstämme in alternativen Nutzungspfaden (Möbel, Bioenergie) verarbeitet werden, wenn diese zum Beispiel in schwer zugänglichen Zonen (Topografie, Wasserläufe etc.) anfallen.

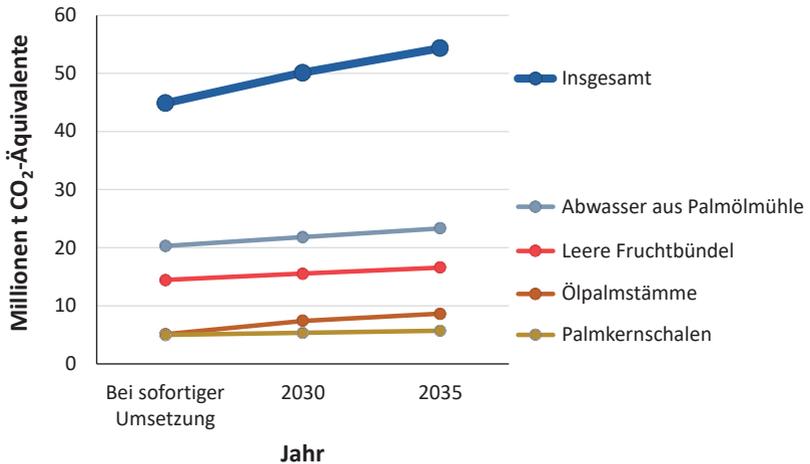


Abb. 2: Potentiell weltweit erzielbare Einsparungen an Treibhausgasen durch Nutzung von Reststoffen der Palmölproduktion, differenziert nach den betrachteten Reststoffen und für den Fall einer Umsetzung des jeweils technisch einfachsten Konzepts (geringer Aufwand) [ifeu 2025].

Weiterhin ist zu beachten, dass eine Nutzung der Reststoffe sich über die Zeit verändern kann. So ändern sie sich in Abhängigkeit der Anbaufläche und daraus resultierender Erträge: Während einige Reststoffe bei jeder Ernte der Palmölfrüchte anfallen und in direktem Zusammenhang mit der Menge an geernteten Fruchtbündeln stehen, können die Stämme nur alle 20-25 Jahre, d.h. am Ende der Standzeit und im Zuge einer Neubepflanzung der Plantagen, verwendet werden. Dementsprechend basieren in diesem Fall die Potentiale im Jahr 2030 auf den Anbauflächen des Jahres 2010. Da seit den 90er Jahren bis etwa zum Jahr

2020 ein deutlicher jährlicher Anstieg der Anbauflächen verzeichnet werden konnte, vergrößern sich die Potentiale in den nächsten zwei Jahrzehnten Jahr um Jahr.

Unter Berücksichtigung der vorstehenden Einzelpunkte sind in Abb. 2 die Ergebnisse der möglichen weltweit erzielbaren Einsparungen an Treibhausgasen aufgeführt – getrennt für jeden betrachteten Reststoff und für den Fall einer Umsetzung des jeweils technisch einfachsten Konzepts (vgl. Kap. 3).

Es zeigt sich, dass jährlich etwa 50 Millionen Tonnen an Treibhausgasen eingespart werden können, wenn die einfachsten Nutzungskonzepte kombiniert umgesetzt werden. Dies entspricht beispielsweise den gesamten jährlichen Treibhausgasemissionen der Schweiz.

Als zweites wichtiges Ergebnis ist dabei festzuhalten, dass die Nutzung der einzelnen betrachteten Reststoffe, also der Ölpalmstämme, leeren Fruchtbündel und Palmkernschalen sowie die Behandlung des Abwassers aus der Palmölmühle, in der jeweils gleichen Größenordnung zu den insgesamt möglichen Klimagas-Einsparungen beiträgt.

Werden technisch aufwendigere Nutzungskonzepte umgesetzt (vgl. Kap. 3), so können sich die aktuell noch nicht ausgeschöpften Einsparpotentiale auf jährlich bis zu 150 Millionen Tonnen CO₂-Äquivalente belaufen (s. Abb. 3).

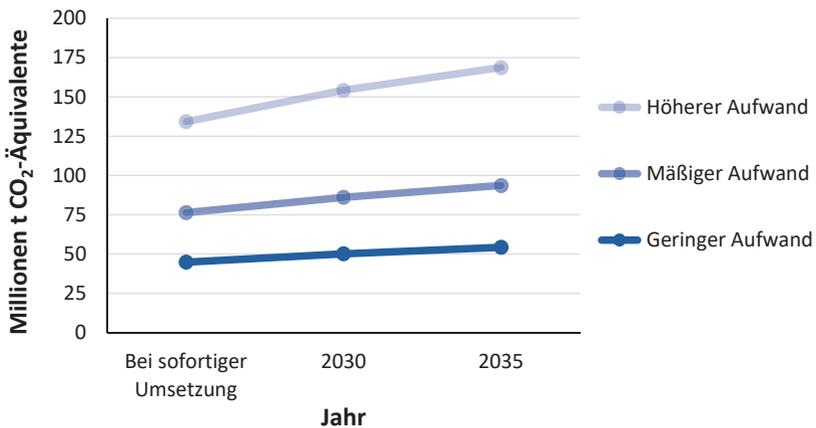


Abb. 3: Potentiell weltweit erzielbare Einsparungen an Treibhausgasen durch Nutzung von Reststoffen der Palmölproduktion bei Nutzungskonzepten mit geringem, mäßigem und höherem technischen Aufwand [ifeu 2025].

5 Zusammenführung und Empfehlungen

Folgende Schlussfolgerungen lassen sich ziehen:

- Selbst bei Umsetzung der technisch niederschwelligsten Konzepte kann die Nutzung von Reststoffen der Palmölproduktion zeitnah jährlich etwa 50 Millionen Tonnen an Treibhausgasen einsparen. Einfache Nutzungskonzepte umfassen dabei:
 - Ölpalmstämme: energetische Nutzung als Bioenergieträger.
 - Leere Fruchtbündel: Brikettierung und Nutzung als Bioenergieträger.
 - Abwasser der Palmölmühlen: Abfangen von Methan und direktes Abfackeln.
 - Palmkernschalen: Logistik zur Bereitstellung, Nutzung als Bioenergieträger.
- Dies lässt sich schon alleine dadurch steigern, wenn durch gezielten Einsatz der Bioenergieträger Kohle ersetzt werden kann.
- Falls aufwendigere Konzepte realisiert werden können, steigen die möglichen Einsparungen sogar auf jährlich bis zu 150 Millionen Tonnen CO₂-Äquivalente.
- Alle betrachteten Reststoffe tragen in ähnlicher Größenordnung zu den insgesamt möglichen Einsparungen bei. Die dargelegten Nutzungskonzepte sollten daher gleichrangig umgesetzt werden, anstatt einzelne Reststoffe zu priorisieren.
- Empfehlenswert ist, anfangs die technisch einfachen und kostengünstigen Verfahren schnellstmöglich anzugehen, damit die Reststoffe überhaupt erschlossen werden – zumal sich allein schon dadurch enorme Klimagasemissionen einsparen lassen. Über die Folgejahre hinweg sollte dann auf die technisch anspruchsvolleren, aufwendigeren, dafür aber deutlich klimaeffizienteren Verfahren angepasst werden.

Das in dieser Synopse gewählte Beispiel der Reststoffe der Palmölproduktion zeigt, dass durch die Optimierung der Nutzung von organischen Reststoffen, die bisher nicht oder nur unzureichend genutzt werden, signifikante Klimagasemissionen eingespart werden könnten – selbst mit vergleichbar niederschwelligem Aufwand. Analoges trifft auch für andere Reststofffraktionen zu, die mengenmäßig ebenfalls weltweit zur Verfügung stehen wie bei der Kokospalme. Durch Erschließung dieser Potenziale ließen sich enorme Menge an Klimagasen einsparen, ohne dass dafür Flächen belegt werden müssten oder dass andere Umwelt Nachteile wie Verlust an Biodiversität damit einhergehen.

6 Ausblick

Aus Klimaschutzsicht sind die Vorteile einer effizienteren Nutzung von Reststoffen der Palmölproduktion entsprechend der in Kapitel 4 dargelegten Ergebnisse dieser Synopse offenkundig. Die tatsächliche Umsetzung solcher Konzepte hängt jedoch in hohem Maße von den ökonomischen Randbedingungen ab, d.h. sie sind keine Selbstläufer. Sie könnten durch politische Maßnahmen oder finanzielle Anreize angeschoben werden. Aus der Vielzahl an möglichen finanziellen Instrumenten sind nachfolgend zwei Beispiele aufgeführt:

- **Freiwillige CO₂-Kompensation:** Unternehmen haben über private Anbieter, die z.B. mit lokalen Vertretern klimarelevanter Industrien (wie der Palmölindustrie) kooperieren, die Möglichkeit, ihre eigenen Treibhausgasemissionen zu einem festen Preis pro Tonne CO₂-Äquivalente freiwillig zu kompensieren. Von diesem Geld werden Klimaschutzprojekte finanziert, die – meist lokal – zur Einsparung von Treibhausgasen führen. Eine Anbindung an solche Kompensationsmodelle könnte einen Weg zu einer zügigen Etablierung der dargelegten Nutzungskonzepte für Reststoffe der Palmölproduktion darstellen. Hierbei ist unbedingt auf die Qualität der Projekte zu achten, für die der „Gold Standard“ eine wichtige Orientierung ist.
- **CO₂-Zertifikatehandel:** Über eine Einbindung der Nutzungskonzepte in den regulierten Handel mit CO₂-Zertifikaten könnten sich Palmölproduzenten in den Markt der verkaufsfähigen, zertifizierten Emissionsgutschriften einbringen, die zum Teil deutlich höhere Erlöse als im freiwilligen CO₂-Kompensationsmarkt ermöglichen.

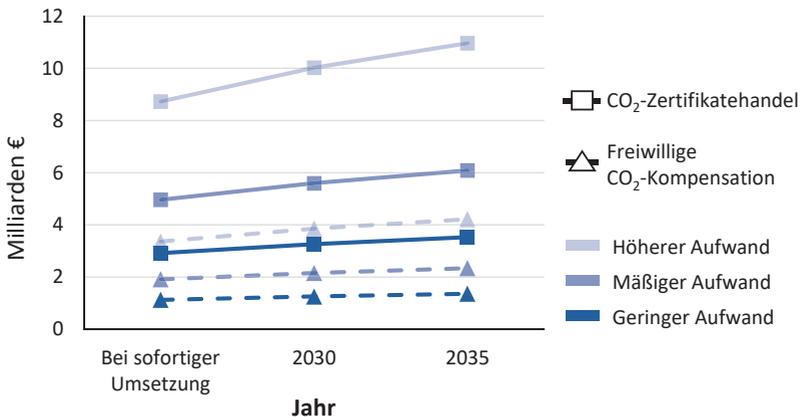


Abb. 4: Mögliche globale Erlöse aus CO₂-Zertifikatehandel sowie freiwilliger CO₂-Kompensation für den Fall einer Anbindung der Nutzungskonzepte für Reststoffe der Palmölproduktion an diese Monetarisierungsoptionen. Dargestellt sind die potentiellen Erlöse für Nutzungskonzepte mit geringem,mäßigem und höherem technischen Aufwand [ifeu 2025].

Abb. 4 zeigt die finanziellen Volumina, die weltweit durch eine Monetarisierung der CO₂-Äquivalenten-Einsparungen aus der Nutzung von Reststoffen der Palmöl-produktion entsprechend der beiden aufgeführten Optionen fließen würden. Je nach Monetarisierungsoption sowie Nutzungskonzept für die einzelnen Reststoffe aus der Palmölproduktion beläuft sich das finanzielle Volumen jährlich auf etwa 1 bis 10 Milliarden €.

Danksagung

Wir bedanken uns bei unserem ifeu-Biomasse-Team für die Pflege der ifeu-internen Datenbank und das Biomasse-Ökobilanztool sowie wegweisenden Arbeiten zu methodischen Weiterentwicklungen im Bereich der Ökobilanzierung von Biomassefragestellungen und insbesondere den beiden Kollegen Sven Gärtner und Nils Rettenmaier für das Mitwirken bei der Aktualisierung einzelner Bilanz-elemente und einzelner zugrundeliegender Berechnungen, viele anregende Diskussionen sowie die kritische Durchsicht des Manuskripts.

Literatur/Quellen

- FAO (2025): FAO Statistics Database (FAOSTAT). Statistics Division of the Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, Italy. <https://www.fao.org/faostat/en/#data/QCL> (last accessed: 05/13/2025).
- ifeu (2025): ifeu - Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg: Eigene Berechnungen.
- IPCC (2021): Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- ISO (2019): DIN EN ISO 14067:2019 Treibhausgase - Carbon Footprint von Produkten - Anforderungen an und Leitlinien für Quantifizierung.
- ISO (2021a): DIN EN ISO 14040:2021 Umweltmanagement - Ökobilanz - Grundsätze und Rahmenbedingungen.
- ISO (2021b): DIN EN ISO 14044:2021 Umweltmanagement - Ökobilanz - Anforderungen und Anleitungen.
- Pastowski, A., Fishedick, M., Arnold, K., Bienge, K., Geibler, J. von, Merten, F., Schüwer, D., Reinhardt, G. A., Gärtner, S. O., Münch, J., Rettenmaier, N., Kadelbach, S., Barthel, D. (2007): Sozialökologische Bewertung der stationären energetischen Nutzung von importierten Biokraftstoffen am Beispiel von Palmöl : Endbericht. Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie, Wuppertal. p. 221 <http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:bsz:wup4-opus-28332>.
- Reinhardt, G. (2024): Best practice for by-product use from palm oil production: the key to larger greenhouse gas savings. Conference proceedings: Valorising Oil Palm and Agri Waste Feedstocks, 1 - 3 Oct 2024, Jakarta, Indonesia.
- Reinhardt, G., Rettenmaier, N., Gärtner, S., Pastowski, A. (2007): Regenwald für Biodiesel? Ökologische Auswirkungen der energetischen Nutzung von Palmöl. Studie im Auftrag des WWF Deutschland Heidelberg.

Rettenmaier, N., Keller, H., Reinhardt, G. A. (2014): Life cycle greenhouse gas emissions of furniture and bioenergy production from oil palm trunks. *GCB Bioenergy*, Vol. 6, No.5, pp. 509–520.

Rettenmaier, N., Keller, H., Reinhardt, G., Münch, J. (2012): Greenhouse gas emission savings associated with selected optimization strategies along the palm oil chain. Case study CAROTECH: Innovative co-production of palm oil bio-diesel and phytonutrients. Heidelberg, 2012.

Kontakt

Dr. Guido Reinhardt, Dr. Maximilian Breyer

ifeu – Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg
Wilckensstrasse 3, 69120 Heidelberg

☎ +49 (0)6221.47670 | ✉ guido.reinhardt@ifeu.de | 🌐 <https://www.ifeu.de/>

FACHFORUM

BIOGAS

VisuFlex– flexibilisierte Biogasanlagen sichern die Energiewende ab

Zusammenfassung: Die erfolgreiche Umsetzung der Energiewende in Deutschland erfordert eine verlässliche und flexible Komponente der Stromerzeugung, die Schwankungen von Wind- und Solaranlagen ausgleichen kann. Biogas ist speicherbar und kann bedarfsgenau in Blockheizkraftwerken zu Strom und Wärme umgewandelt werden. Es springt immer dann ein, wenn die Sonne nicht scheint und der Wind nicht weht – in sogenannten Dunkelflauten. Aktuell gibt es in Deutschland knapp 9.000 Biogasanlagen, die diese Aufgabe, die entsprechende technische Ausstattung vorausgesetzt, übernehmen können. Auf der VisuFlex-Plattform unter <https://visuflex.fnr.de> wird die Biogas-Stromeinspeisung solcher zukunftsweisend flexibilisierter Biogasanlagen den Strompreisen und der Residuallast gegenübergestellt. Die Visualisierung zeigt, dass die Stromeinspeisung dieser auch als Speicherkraftwerke bezeichneten Anlagen zuverlässig den Strompreisen und der Residuallast folgt – ein Nachweis dafür, dass Biogasanlagen schon heute bedarfsangepasst Strom einspeisen. VisuFlex veranschaulicht Politik, Wissenschaft und Öffentlichkeit die Bedeutung von Biogas-Speicherkraftwerken für das künftige Energiesystem.

Abstract: The successful implementation of the energy revolution in Germany requires a reliable and flexible component for electricity generation that can compensate the fluctuations from wind and solar power plants. Biogas is storable and can be converted into electricity and heat in combined heat and power plants (CHP) on demand. It steps in whenever the sun isn't shining and the wind isn't blowing. Currently, there are nearly 9,000 biogas plants in Germany capable of taking on this role. On the VisuFlex platform at <https://visuflex.fnr.de>, the electricity feed-in from forward-looking, flexible biogas plants is contrasted with the electricity prices and the residual load. The visualization shows that the electricity feed-in from these plants reliably follows the electricity prices and the residual load. By this VisuFlex brings the verification that biogas plants are already feeding electricity into the grid in a demand-oriented manner. VisuFlex illustrates the importance of flexible biogas plants for the future energy system for policymakers, scientists and the general public.

1 Hintergrund

Das Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG) 2023 verankert das Ziel, den Stromverbrauch in Deutschland bis 2030 mindestens zu 80 % aus erneuerbaren Energien zu decken. Daher werden in den nächsten Jahren weiterhin vermehrt erneuerbare, vorwiegend witterungsabhängige und somit fluktuierende Stromerzeugungskapazitäten wie PV- und Windkraftanlagen zugebaut. Aus diesem Grund häufen sich künftig Zeiten, in denen mehr Strom produziert wird als benötigt und Phasen, in denen Sonne und Wind nicht verfügbar sind, sogenannte Dunkelflauten. Um diese Schwankungen auszugleichen, sind in naher Zukunft alternative Flexibilitätsoptionen für die Stromversorgung erforderlich.

Biogas hat gegenüber anderen erneuerbaren Energien einen wesentlichen Vorteil: Es kann nicht nur bedarfsgerecht erzeugt, sondern aufgrund seiner Speicherfähigkeit auch flexibel in Blockheizkraftwerken (BHKW) verstromt werden. So können Biogas- und Biomethan-BHKW bei hoher Netzbelastung heruntergefahren werden und das Netz frei für Wind- und Solarstrom machen. Bei hoher Stromnachfrage bzw. geringem Stromangebot eignen sie sich hingegen als Reservekapazität. Biogassubstrate und Biogasspeicher werden so zu „Batterien“ für die Stromversorgung in Engpasszeiten.

Aktuell gibt es in Deutschland ca. 9.000 Biogasanlagen, die diese Aufgabe übernehmen könnten. Aktuell leisten Sie mit knapp 11 % einen wesentlichen Beitrag zur erneuerbaren Stromerzeugung. Aufgrund der im EEG festgeschriebenen Grundvergütung für den eingespeisten Strom wurden sie bislang überwiegend in Grundlast betrieben. Für einen systemdienlichen Betrieb müssen sie jedoch auf eine flexible Fahrweise umgerüstet werden. Dies erfordert in der Regel Investitionen, z.B. in neue Wärme-, BHKW- oder Gasspeicherkapazitäten. Die Bundesregierung fördert die Anpassung von Biogasanlagen an das künftige Stromnetz mit der Direktvermarktung, der Flexibilitätsprämie und dem Flexibilitätszuschlag.

Die Bedeutung marktorientiert flexibilisierter Biogasanlagen, sogenannter Biogas-Speicherkraftwerke, für das Energiesystem wurde von Politik und Öffentlichkeit in der Vergangenheit nicht wahrgenommen bzw. falsch interpretiert, denn bekannte Stromeinspeise-Monitorings wie in Abb. 1 bilden die Biogas-Stromeinspeisung nicht detailliert genug ab. Sie differenzieren nicht zwischen der Stromeinspeisung aus Biomasseanlagen, die in Grundlast laufen und markt-dienlich flexibilisierten Speicherkraftwerken.

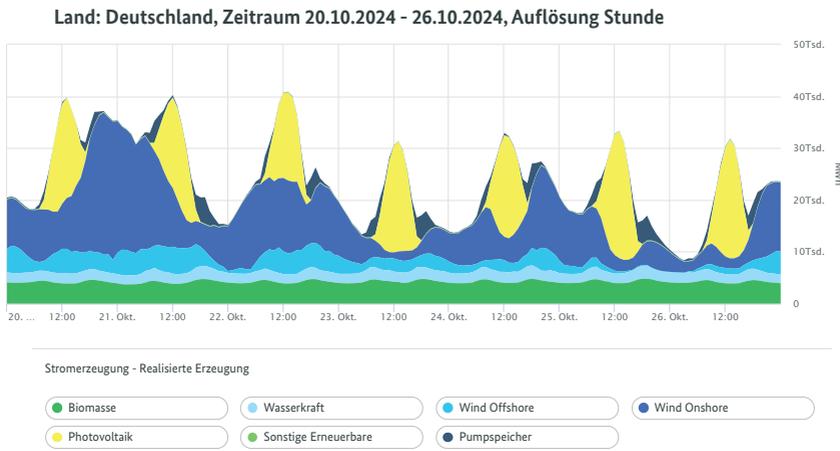
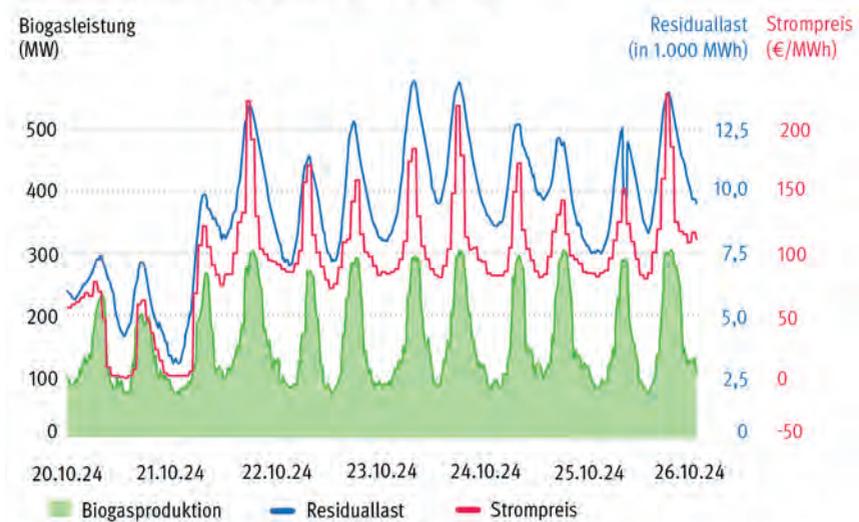


Abb. 1: Visualisierung der Einspeisung erneuerbarer Stromerzeuger (Quelle: BNetzA, 2025)

Im Vorhaben „VisuFlex – Visualisierung der Netz-/Systemdienstleistung flexibilisierter Biogasanlagen“ wird hingegen die Stromeinspeisung von Biogas-Speicherkraftwerken den Strompreisen und der Residuallast gegenübergestellt (siehe Abb. 2). Die Visualisierung verdeutlicht, dass die Biogas-Stromeinspeisung sehr genau den Preisen und dem Bedarf folgt. Damit erbringt VisuFlex den Nachweis, dass Speicherkraftwerke schon heute bedarfsgerecht Strom erzeugen.

Flexibilisierte Biogas-Stromproduktion



Quelle: visuflex.fnr.de nach Agrarservice Lass GmbH, SMARD; 2025
© Fachagentur Wachsende Rohstoffe, 2025



Abb 2: Visualisierung der Stromeinspeisung von Biogas-Speicherkraftwerken (Quelle: FNR, 2025)

2 Stand der Flexibilisierung in Deutschland

Entsprechend des Reports Nr. 50 des Deutschen Biomasseforschungszentrums gGmbH (DBFZ) erhalten zu Beginn des Jahres 2023 noch rund 8 % der Biogasanlagen, bezogen auf die installierte elektrische Leistung, die EEG-Festvergütung. Die restlichen 92 % vermarkten den erzeugten Strom direkt an der Börse (Direktvermarktung mit gleitender Marktprämie). Der Anteil der Anlagen, die die Festvergütung erhalten, nimmt jährlich ab.

Mit dem EEG 2012 wurde für bestehende Biogasanlagen die Flexibilitätsprämie eingeführt. Sie dient als Anreiz zur Flexibilisierung des Anlagenbetriebs. Neuanlagen haben seit dem EEG 2014 einen Anspruch auf den Flexibilitätszuschlag. Bei der Flexibilitätsprämie und dem Flexibilitätszuschlag wird für zusätzlich installierte BHKW-Leistung (in kW) ein jährlicher Festbetrag gezahlt. Die Höhe dieser Förderung ist vom jeweiligen EEG abhängig. Flexibilitätsprämie

und -zuschlag dienen als Anreiz, um zusätzliche installierte elektrische Leistung für eine bedarfsorientierte Stromerzeugung bereitzustellen. Durch die Finanzierung z.B. in weitere BHKW- und Gasspeicherkapazitäten kann auf Preissignale des Strommarkts reagiert werden, ohne zusätzliche Substrate in die Biogasanlage einzubringen.

Laut Auswertungen des DBFZ, die auf den Daten der Übertragungsnetzbetreiber beruhen, erhalten Ende 2021 rund 4.600 Biogasanlagen mit einer Gesamtleistung von 3,7 GW_{el} die Flexibilitätsprämie. Hinzu kommen ca. 256 Biomethan-BHKW mit einer Leistung von 0,3 GW_{el}. Insgesamt erhielten demnach mehr als 4.855 Biogas- und Biomethan-BHKW mit einer gesamten installierten Anlagenleistung von rund 4 GW_{el} die Flexibilitätsprämie von ihrem jeweiligen Netzbetreiber.

In welchem Umfang Biogasanlagen mit Flexibilitätsprämie oder Flexibilitätszuschlag tatsächlich flexibel betrieben werden, ist nur schwer abzuleiten. Auswertungen des DBFZ hinsichtlich durchschnittlicher Volllaststunden weisen für Biogasanlagen 4.282 h und für Biomethananlagen 3.974 h aus, wobei hier nicht nach Voll- und Teillastbetrieb der BHKW unterschieden wurde. VisuFlex hingegen identifiziert zukunftsorientiert flexibilisierte Biogasanlagen und stellt deren Stromeinspeisung viertelstundengenau dar.

2 Methoden

Die bekannten Stromeinspeise-Monitorings nutzen die Daten aus den Berichtspflichten der Übertragungsnetzbetreiber, die auf Schätzungen und Hochrechnungen beruhen. Für die VisuFlex-Plattform hingegen filtern verschiedene Direktvermarkter ihre Anlagenpools anhand konkreter Identifikationskriterien nach Biogas-Speicherkraftwerken und liefern deren Stromeinspeisung in aufsummierter Form viertelstundengenau. Durch die Zusammenfassung der Einspeiseprofile mehrerer Biogasanlagenbetreiber kann zum Schutz einzelner Betreiberdaten nicht nach Einzelanlagen differenziert werden. Die Daten der einzelnen Direktvermarkter werden ebenfalls aufsummiert, sodass aus der Visualisierung keine Rückschlüsse auf einzelne Direktvermarkter oder Biogasanlagenbetreiber möglich sind.

Die Auswahl geeigneter Biogasanlagen erfolgt anhand definierter Kriterien, mit denen sich objektiv und diskriminierungsfrei die flexibel und strommarktdienlich betriebenen Biogasanlagen identifizieren lassen. Für die Erarbeitung der Auswahlkriterien wurden Direktvermarkter, Betreiber, erfahrene Planer sowie Wissenschaftler des DBFZ und des Fraunhofer-Institut für Energiewirtschaft und Energiesystemtechnik (Fraunhofer IEE) eingebunden. Folgende Kriterien wurden für die Auswahl zukunftsorientiert flexibilisierter Biogasanlagen (nach gültigem EEG-Anlagenbegriff) definiert:

- Die Bemessungsleistung (P_{Bem}) muss kleiner als das 0,5-fache der installierten Leistung (P_{Inst}) (Doppelüberbauungsgebot EEG 2017) sein:

$$P_{\text{Inst}} > P_{\text{Bem}} \times 2$$

- Die Bemessungsleistung muss mindestens zur Hälfte flexibel erzeugt werden. Bei teilflexiblen Anlagen, die einen Teil ihres Stroms in Grundlast erzeugen, z.B. bei nicht ausreichendem Wärmespeicher, muss die flexible Erzeugung überwiegen. Die vom Grundlast-BHKW erzeugte Bemessungsleistung soll weniger als die Hälfte der gesamten Bemessungsleistung ausmachen:

$$\text{Grundlast} \times 8760 = P_{\text{Bem (unflexibel)}} < P_{\text{Bem (gesamt)}} \times 0,5$$

- Als flexibel gilt der Betrieb, bei dem die Anlage mindestens 4.380 Stunden im Jahr ruht oder umgekehrt, bei dem die Anlage maximal an 4.380 Betriebsstunden läuft.

Mit diesen Identifikationskriterien können die Direktvermarkter anhand des Lastprofils bzw. der Anlagen-Eckdaten zukunftsweisend flexibilisierte Biogasanlagen, die für die Darstellung im Vorhaben VisuFlex geeignet sind, identifizieren. Die Strom-Einspeisedaten der identifizierten Biogasanlagen werden aus den Daten gewonnen, die der Direktvermarkter vom Netzbetreiber erhält. Diese werden für jede Viertelstunde aufsummiert und vom Direktvermarkter dann an die VisuFlex-Datenbank übermittelt.

Für die VisuFlex-Datenplattform betreibt die FNR verschiedene Server: Einen Upload-Server, auf dem jeder Direktvermarkter einen eigenen Zugang hat, um seine Daten zu übermitteln und der es verhindert, dass die Direktvermarkter untereinander ihre Daten einsehen können. Der zweite Server ist ein sogenannter SPLUNK-Server, eine Reporting-Plattform, welche die Daten auswertet, verarbeitet und aufsummiert. Die Daten zur Residuallast und zu den Strompreisen werden von der Bundesnetzagentur bezogen und gemeinsam mit den Daten der Biogas-Stromeinspeisung an einen dritten Server, den FNR-Webserver übertragen. Hier werden die Daten visualisiert und unter <https://visuflex.fnr.de> dargestellt.

3 Direktvermarkter

Die erfolgreiche Umsetzung des Vorhabens „VisuFlex“ ist vor allem durch die engagierte Mitarbeit der Direktvermarkter möglich. Zu den Unterstützern gehören folgende Direktvermarkter:



Die Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR) weiß diesen Aufwand zu schätzen und möchte sich auf diesem Wege recht herzlich bedanken.

4 VisuFlex-Ergebnisse und aktueller Stand

VisuFlex zeigt rückwirkend bis zum 1.1.2019, dass ausgewählte, zukunftsweisend flexibilisierte Biogasanlagen schon heute flexibel an den Bedarf angepasst Strom produzieren.

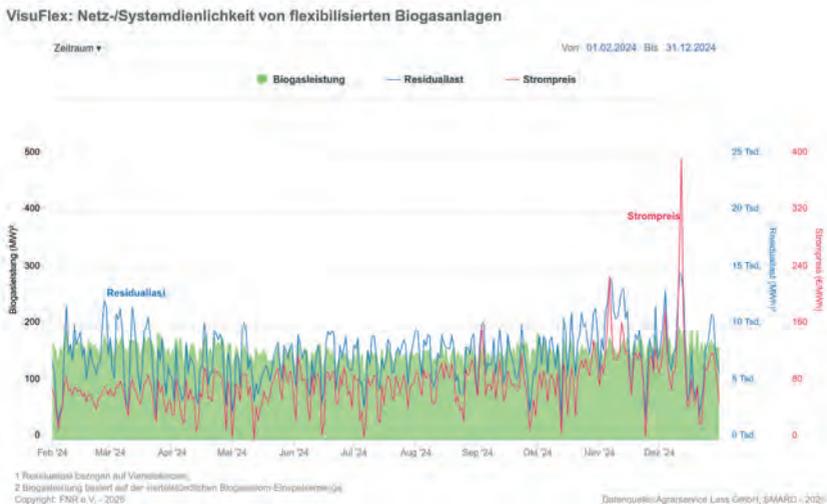


Abb. 3: Visualisierung der Stromeinspeisung von Biogas-Speicherkraftwerken im Jahresverlauf (Quelle: FNR, 2025)

In der Gegenüberstellung von Stromeinspeisung, Strompreisen und Residuallast in Abb. 2 wird deutlich, dass die ausgewählten Biogasanlagen sehr zuverlässig zu Zeiten von Last- und Preisspitzen einspeisen und somit markt- und damit auch systemdienlich betrieben werden.

Die VisuFlex-Darstellung in Abb. 3 zeigt die Entwicklung und den positiven Trend der marktdienlichen Stromerzeugung aus Biogas über den Zeitverlauf. Sie bildet zudem die saisonale Fahrweise der Speicherkraftwerke ab. Dabei wird in den Wintermonaten mehr Strom erzeugt als in den Sommermonaten, in denen der Wärmebedarf geringer und der Betrieb es BHKWs wesentlich unwirtschaftlicher ist. VisuFlex beweist damit, dass Speicherkraftwerke ressourceneffizient betrieben werden und nicht nur an den Strom-, sondern auch an den Wärmebedarf angepasst sind.

Die Anwendung erlaubt die Darstellung der Strom- und Preisdaten für ausgewählte Zeiträume, die kalendarisch oder über einen visuellen Regel-Schieber ausgewählt werden können. Die ausgewählte Darstellung kann als PNG-Bild oder PDF-Dokument heruntergeladen werden.

Die Direktvermarkter liefern täglich Stromeinspeisemengen für die letzten 30 Tage. In der Datenbank werden demnach täglich die Einspeisemengen der letzten 30 Tage aktualisiert. Aufgrund dessen kann es rückwirkend für die letzten 30 Tage noch zu Veränderungen in der Darstellung kommen. Die größten Veränderungen sind jeweils in den letzten 10 Tagen zu beobachten.

Da die Datenübermittlung der einzelnen Direktvermarkter zu unterschiedlichen Tageszeiten erfolgt, kommt es bei der Darstellung der letzten beiden Tage in der Visualisierung zu Datenlücken. Um eine fehlerhafte Darstellung zu vermeiden, sind die beiden letzten Tage jeweils ausgeblendet.

4 Potentiale von Biogas-Speicherkraftwerken für das Energiesystem

Um die schwankende Stromerzeugung aus Wind und Sonne auszugleichen, setzte die Politik lange Zeit vor allem auf neue fossile Gaskraftwerke und perspektivisch auf grünen Wasserstoff. Biogas kam als Lösung für die sogenannte Dunkelflaute kaum vor. Dabei könnte Biogas laut einer 2024 veröffentlichten Studie der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg (FAU-Studie) bis 2040 rund die Hälfte der fehlenden Stromkapazität für die Zeiten bereitstellen, in denen der Wind nicht weht und die Sonne nicht scheint. Und das wesentlich günstiger und klimafreundlicher als Reservekraftwerke, die bis zur Wasserstoff-Praxisreife fossiles Gas verbrennen (Elhaus et al., 2024).

Bei künftigen Versorgungsengpässen gehen Experten von einem potenziellen Defizit von 49 GW Leistung bis 2030 aus. Kann dann nicht ausreichend Strom

importiert oder der Bedarf über Laststeuerung angepasst werden, sind zusätzliche wasserstoff- und biogasbasierte Kraftwerke notwendig, um die Versorgung zu sichern. Die FAU-Studie kommt zu dem Ergebnis, dass durch die Umrüstung von Biogasanlagen hin zu Speicherkraftwerken, also durch den Zubau zusätzlicher Gasspeicher- und BHKW-Kapazitäten bis 2030 etwa 12 GW gesicherte Leistung und bis 2040 ca. 24 GW gesicherte Leistung zur Verfügung gestellt werden könnten – und das ohne zusätzliche Substrate aufzuwenden. Die notwendigen Investitionen in die Biogastechnologien wären um den Faktor 1,9 bis 3,7 niedriger als bei wasserstoffbasierten Reservekraftwerken, was sich auch auf die Stromgestehungskosten auswirkt. Für mit Wasserstoff betriebene Kraftwerke ergäben sich laut FAU-Studie für 2030 Stromgestehungskosten in Höhe von 49-133 ct/kWh. Bei Biogasanlagen wären es 25-44 ct/kWh.

5 Weiteres Vorgehen

Die Erhebung der VisuFlex-Daten ist einzigartig in Deutschland. Daher ist das Interesse an den Daten seitens Wissenschaft und Branche groß. VisuFlex hat sich mittlerweile zur Referenz entwickelt, mit der die Biogas-Stromeinspeisung ihre Bedeutung und die Potenziale für das Energiesystem unter Beweis stellt. Zahlreiche Verbändevertreter, Planer, Berater, Praktiker und Wissenschaftler nehmen Bezug auf VisuFlex.

Die VisuFlex-Plattform wurde durch die Agrarservice Lass GmbH erfolgreich etabliert. Der Projektkoordinator hat wichtige Direktvermarkter in das Projekt eingebunden. Dennoch konnte nur ein Teil der relevanten Direktvermarkter für das Vorhaben gewonnen werden. Daher betrachtet VisuFlex aktuell auch nur einen Teil der bereits flexibilisierten Biogas-Stromeinspeisung.

Mit dem Ziel, VisuFlex in eine langfristige Lösung zu überführen und relevante Direktvermarkter, die ihr Engagement v.a. an neutrale Institutionen knüpfen, für eine breitere VisuFlex-Datenbasis zu gewinnen, wurde die Plattform Anfang 2025 auf die Server der FNR übertragen. Dies erforderte Anpassungen im Datentransfer seitens der Direktvermarkter und führte zu einer Unterbrechung der kontinuierlichen Datenlieferung. Ab 18.1.2025 wurde die Visualisierung daher eingefroren.

Aktuell liefern noch nicht sämtliche derzeit in das Projekt eingebundene Direktvermarkter auf die neue VisuFlex-Plattform. Sobald die Daten wieder vollständig übertragen werden, erfolgt die Aktualisierung der Visualisierung erneut täglich. Darüber hinaus sollen weitere relevante Direktvermarkter in die kontinuierliche Datenlieferung eingebunden werden, um die flexible Biogas-Stromeinspeisung von Speicherkraftwerken möglichst praxisnah darzustellen.

In Abstimmung mit den Direktvermarktern sollen die aufsummierten Datensätze auch an interessierte wissenschaftliche Einrichtungen weitergegeben werden. Zudem ist es angedacht, die flexible Biogas-Stromeinspeisung von Speicher-

kraftwerken auch auf den Plattformen der bekannten Stromeinspeise-Monitorings sichtbar zu machen.

Ziel von VisuFlex ist es, auch Impulse zur Nachahmung innerhalb des Biogasanlagenbestandes zu generieren und die Umrüstung bestehender Biogasanlagen hin zu Speicherkraftwerken voranzutreiben. Aufgrund unzureichender Rahmenbedingungen war es vielen Biogasanlagenbetreibern in den letzten Jahren jedoch nicht möglich, die Förderung im EEG für die Flexibilisierung ihrer Anlage in Anspruch zu nehmen. Seit 2023 waren die zweijährlichen Biomasseausschreibungen der Bundesnetzagentur stets überzeichnet. Das Ausschreibungsvolumen war immer deutlich geringer bemessen als die Leistung der Anlagen, die aus dem EEG fallen. Auch bei der letzten Runde im Oktober 2024 gingen zwei Drittel der Bewerber leer aus. Damit entfielen nicht nur erneuerbare Wärmemengen, sondern auch wetterunabhängige Stromkapazitäten. Die Ergebnisse der letzten Biomasseausschreibung zum Gebotstermin 1. April 2025 liegen derzeit noch nicht vor.

Die Politik hat die Bedeutung und die Potenziale für das künftige Energiesystem erkannt. Das im Februar 2025 in Kraft getretene Biogaspaket sieht erhebliche Verbesserungen für Betreiber von Biogasanlagen vor, die ihre Anlagen zu Speicherkraftwerken umrüsten wollen.

Literatur/Quellen

- Rensberg, N.; Denysenko, V.; Daniel-Gromke, J. (2023): Biogaserzeugung und –nutzung in Deutschland – Report zum Anlagenbestand Biogas und Biomethan.
- Elhaus, N.; Treiber, P.; Karl, J. (2024): Biogas im künftigen Energiesystem – Potential und Wirtschaftlichkeit der Besicherung von Wind und Photovoltaik durch die Flexibilisierung von Biogasanlagen.

Kontakt

Jessica Hudde, Referentin Öffentlichkeitsarbeit

Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V.

☎ +49 (0)3843.6930-206 | ✉ j.hudde@fnr.de | 🌐 <https://biogas.fnr.de>

Jan Sprafke, Hans Korte, Jana-Nigeri Zielonka,
Abdullah Juma Al-Saadi, Michael Nelles

Erkenntnisse aus dem Projekt Biogas-Kohle

Zusammenfassung: Der Einsatz von Kohle im Biogasprozess wird sehr kontrovers in Wissenschaft und Praxis diskutiert. Insbesondere durch Änderungen in der Vergütung und dem steigenden Einsatz von Wirtschaftsdüngern im Substratmix sind viele Anlagen bestrebt, ihren Prozess unter ökonomischen und ökologischen Gesichtspunkten zu optimieren.

Der im Projekt Biogas-Kohle untersuchte Ansatz, dass die eingesetzte Pyrolysekohle aus Laub- und Nadelholz zur einer Prozessverbesserung führt, wurde unter Laborbedingungen geprüft und durch Mehrfachwiederholung validiert.

Im abgeschlossenen Projekt „Biogas-Kohle“ wurden unter anderem zentrale Wirkmechanismen ermittelt und die optimale Korngröße und Konzentration der Pyrolysekohle bestimmt. Der Effekt von Nadelholz- und Laubholzkohle auf Prozessparameter wie Viskosität, Stickstoff-, Kohlenstoff- und Schwefelverbindungen in Gas- und Flüssigphase wird insbesondere durch die entsprechenden Einsatzbedingungen und Wirtschaftsdüngeranteile bestimmt.

Abstract: The use of coal in the biogas process is the subject of much controversy in science and practice. Many plants are striving to optimise their process from an economic and ecological point of view, particularly due to changes in remuneration and the increasing use of manure in the substrate mix.

The approach investigated in the biogas charcoal project, whereby the use of pyrolysis charcoal made from hardwood and softwood leads to an improvement in the process, was tested under laboratory conditions and validated through multiple repetition.

In the completed project, central mechanisms of action were identified and the optimum particle size and concentration of the pyrolysis charcoal were determined. The effect of softwood and hardwood charcoal on process parameters such as viscosity, nitrogen, carbon and sulphur compounds in the gas and liquid phase is determined in particular by the corresponding application conditions and the proportion of manure.

1 Hintergrund

Im Verbundvorhaben „Einsatz von definierten Holzkohlen zur Prozessintensivierung im Biogasprozess“ (Akronym Biogas-Kohle) sollte geprüft werden, ob durch die gezielte Applikation von definierter Kohle der Wirtschaftsdüngeranteil bei Biogasanlagen mit einer elektrischen Leistung von über 1.000 kW auf mindestens 50 % anzuheben ist.

1.1 Status-quo der Wirtschaftsdüngervergärung

Die stoffliche und energetische Nutzung von Wirtschaftsdüngern bietet große Potenziale. Der Tierbestand innerhalb Deutschlands ist besonders geprägt von der Rinder-, Schweine- und Geflügelhaltung, welche immense Mengen an Wirtschaftsdüngern generieren, von denen 65 Mio. t für die Biogasproduktion eingesetzt werden (Rensberg et al. 2023). Der Einsatz von Wirtschaftsdüngern im Biogasprozess ist schon weit verbreitet, wobei sich die Energiedichte von Festmist und Gülle stark unterscheidet. Insbesondere sind Güllekleinanlagen die Rindergülle und -festmist einsetzen, im landwirtschaftlichen Sektor verbreitet (Rensberg et al. 2023).

1.2 Status-quo des Kohleeinsatzes im Biogasprozess

Der Einsatz und die Wirkung der Kohle auf den Biogasprozess wird kontrovers diskutiert und die Wirkung ist nur partiell wissenschaftlich belegt.

Zimmermann et al. (2021) stellten keine Ertragssteigerung nach Applikation von Pflanzenkohle fest. Gleichfalls wurden auch keine Indikatoren auf eine Prozessinhibierung gefunden. Anlagenbetreiber berichten aber von wahrnehmbaren positiven Effekten.

Im Rahmen der Thesis von Cecilia B. Frias Flores (2020) wurde in einer ausführlichen Literaturstudie verschiedene Wirkungspfade der Kohleapplikation ermittelt. Insbesondere wurden Effekte auf die Biomethanproduktion und Prozessstabilität von diversen Autoren festgestellt. Durch praktische Laborversuche wurde die Temperatur der Pyrolyse als Einflussgröße (Porosität, Oberfläche, Leitfähigkeit, Alkalinitätspotenzial) aufgeführt, dies wurde unter anderem von Masebinu et al. (2019) bestätigt. Die Temperatur des Pyrolyseprozesses hat direkten Einfluss auf die Porengröße und auch auf mögliche funktionelle Gruppen auf der Oberfläche der Kohle. Dies hat direkten Einfluss auf Parameter wie das DIET-Phänomen, die Chemisorption aber auch Biofilmwachstum.

Um den Einfluss des Pyrolyseprozesses zu verifizieren, wurden im Projekt definierte Kohlen mit bekannten Eigenschaften hergestellt (Korte et al. 2024). Diese Kohle wurde unter anderem verwendet, um die Auswirkungen der Applikation auf die rheologischen Eigenschaften zu untersuchen (Sprafke et al. 2024).

Da eine Vielzahl der Versuche unter diskontinuierlichen Bedingungen stattgefunden hat und dabei signifikante Ertragssteigerungen bei verschiedenen Kohlen und Gärmedien festgestellt wurden (Meyer-Kohlstock et al. 2016; Pan et al. 2019; Rödger et al. 2013), sollten im Vorhaben die Auswirkungen der Applikation bei kontinuierlicher Versuchsdurchführung eruiert werden.

1.3 Forschungsfragen

Die Wirkmechanismen der Kohleapplikation sind ein Konglomerat verschiedener Effekte. Das primäre Ziel des Projektes ist die Ermittlung und Optimierung dieser zentralen Wirkmechanismen gemäß der Vorgehensweise in Abb. 1. Folgende Forschungsfragen wurden dabei unter anderem betrachtet:

- Wie beeinflusst die Herkunft der Kohle den Prozess?
- Wie wird die Vergärung durch die Dimension der Kohlenstücke bei der Applikation beeinflusst?
- Gibt es neue Parameter, die Rückschlüsse auf die Prozessstabilität erlauben?

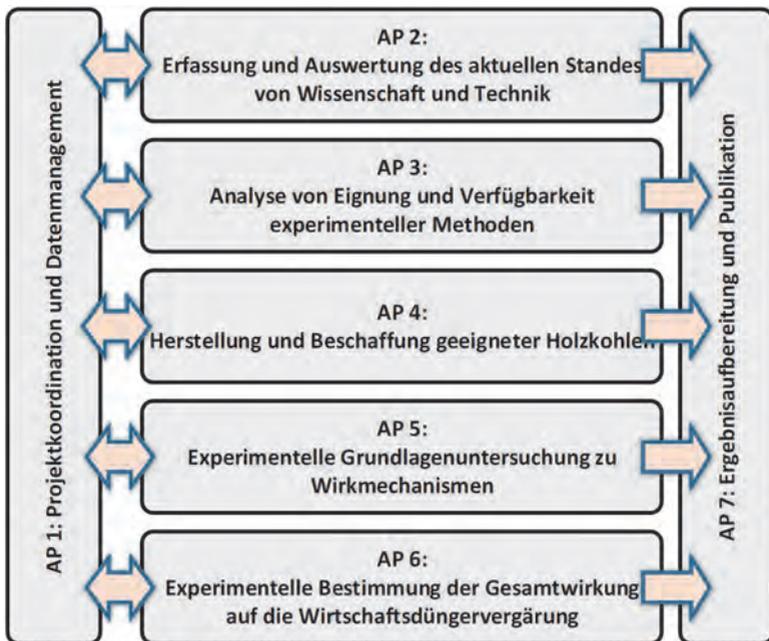


Abb. 1: Vorgehensweise

2 Material und Methoden

2.1 Versuchsaufbau

Für die kontinuierlichen Versuche wurden in bis zu drei Versuchsgruppen á vier Fermentern (Abb. 2) mit einem Arbeitsvolumen von 20 Litern 7 Versuchsreihen durchgeführt. Die Prozesstemperatur unter mesophilen Bedingungen wird generell durch Umwälzung von Frischluft aus einer Heizung geregelt, wobei alle Fermenter isoliert sind. Die flüssige Phase des Fermenters wird halbkontinuierlich gerührt und ist mit einem intermittierend arbeitenden Ankerrührer verbunden,

dessen Rotation variabel einstellbar ist. Abhängig von der täglichen Beschickung wurde die hydraulische Verweilzeit in allen Versuchsgruppen gleich eingestellt. Jede Einheit wurde mit einer definierten Substratmischung beschickt. Die Substratbeschickung der Fermenter erfolgte werktäglich von Hand über einen Füllstopfen. Für die Versuche mit den definierten Kohlewürfeln (Korte et al. 2024), wurde die Deckel bauseitig angepasst. Die Entnahme der Analyseproben und Gärreste erfolgte wöchentlich manuell über einen Kugelhahn am Fermenterboden.

Die Substratproben wurden chargenweise verpackt und nach Bedarf aufgetaut, um die täglichen Futterrationen für jeden Fermenter für ausgewählte Versuchsabschnitte vorzubereiten, anschließend wurden die Tagesportionen wieder eingefroren. Die tägliche Substratmischung wurde vorbereitet und in einer Kühlkammer bei -20 °C eingefroren. Diese Einzelportionen wurden zur jeweiligen Fütterungszeit bei 4 °C aufgetaut und in den entsprechenden Fermenter gegeben.

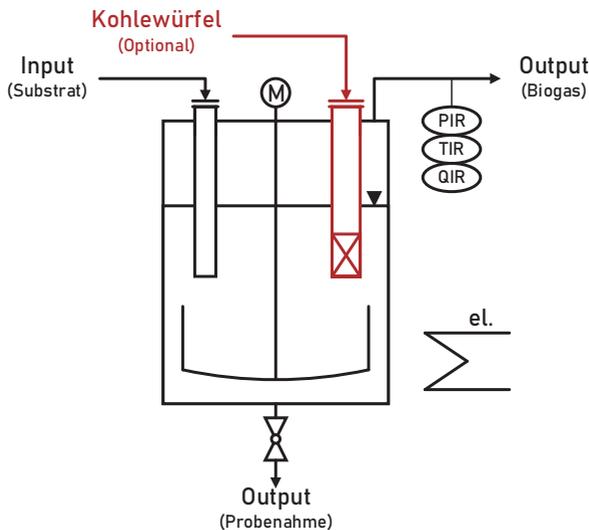


Abb. 2: Schematischer Aufbau des kontinuierlichen Fermenter mit optionaler Erweiterung für Kohlewürfel

In den insgesamt 7 verschiedenen Versuchsreihen wurde sowohl der quasi-kontinuierliche als auch der diskontinuierliche Einsatz von Buchen- und Kiefernholzkohle untersucht. Das eingesetzte Kohlepulver hat nach entsprechender Zerkleinerung in einer Schneidmühle einen maximalen Korndurchmesser von 2 mm. Die kubisch geformte Kohle wurde eingewogen und zum Versuchsbeginn dem Prozess zugeführt.

2.2 Substrate

Für die Versuche wurden Mischungen aus verschiedenen Wirtschaftsdüngern aus der Geflügelhaltung und Rinderzucht sowie Maissilage hergestellt. Innerhalb der Versuchsreihen wurde der Anteil an Wirtschaftsdüngern an der organischen Trockenmasse schrittweise auf bis zu 100 Prozent erhöht.

2.3 Analytik und Methoden

Der Biogasertrag und die Temperatur im Fermenter wurden kontinuierlich gemessen. Die Biogasqualität, Kohlenstoff und Stickstoffgehalt in Flüssigphase, die Leitfähigkeit, flüchtige organische Säure und Pufferkapazität, pH-Wert und photometrisch bestimmbare Parameter wurden wöchentlich bestimmt.

Jeder Fermenter besitzt für die Bestimmung der Gasquantität einen Trommelgaszähler (TG 0,5) mit entsprechender Messwertaufzeichnungssoftware des Typs RIGAMO (Dr.-Ing. RITTER Apparatebau GmbH & Co. KG). Mittels Gasanalysator (Visit 03 der Firma Messtechnik EHEIM GmbH) wurde im Kopfraum an drei Tagen in der Woche die Gaszusammensetzung (Methan, Kohlenstoffdioxid, Sauerstoff und Schwefelwasserstoff) gemessen. Der Gesamtkohlenstoffgehalt und Gesamtstickstoffgehalt in der Flüssigphase wurde durch Aufschluss mit Hilfe thermokatalytischer Hochtemperaturoxidation in Gegenwart von Spezialkatalysatoren mittels Analysator multi N/C 2100S des Unternehmens Analytik Jena AG bestimmt. Leitfähigkeit und pH-Wert werden mit dem Hach HQ 40d gemessen. Durch die Bestimmung der Leitfähigkeit ist es möglich, Schwankungen des Salzgehaltes im Fermenter zu ermitteln. Die flüchtigen organischen Säuren und die Pufferkapazität werden mit einem Hach Titra Lab AT1000 analysiert. Das Verhältnis der beiden Parameter als FOS/TAC hat mittlerweile eine breite Anwendung bei der Beurteilung der Prozessstabilität von Biogasanlagen gefunden. Photometrische Parameter wurden mit einem Photometer Typ NANOCOLOR UV/VIS von Macherey-Nagel ermittelt.

3 Ergebnisse

3.1 Einfluss der Kohleapplikation auf den Biogasprozess

Der Einfluss der Kohle äußert sich in vielfältiger Weise. Insbesondere sind bei der kontinuierlichen Applikation von Kohle aus Kiefern- und Buchenholz Effekte feststellbar. Beispielhaft soll die Wirkung auf Stickstoff hier dargestellt werden (siehe Abb. 3). Der Gehalt an organischem Stickstoff wird verringert, wobei die Wirkung von Laubholz- und Nadelholzkohle gleichfalls von der eingesetzten Wirtschaftsdüngerart beeinflusst wird.

Phosphat- und Kaliumverbindungen werden durch Kohlezugabe nur geringfügig beeinflusst.

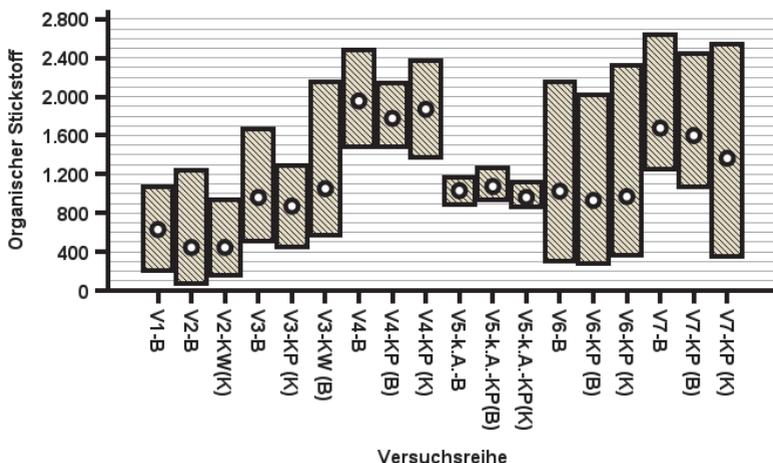


Abb. 3: Organischer Stickstoffgehalt in Flüssigphase (V=Versuchsreihe; B=Blank; (K)=Kiefer; (B) =Buche; KW=Kohlewürfel, KP=Kohlepulver; k.A.=keine Applikation von Kohle

Weiterhin wurde im kontinuierlichen Versuch bewiesen, dass neben den Stickstoffverbindungen auch Schwefelverbindungen in der Flüssig- und Gasphase beeinflusst werden. In Abb. 4 ist die Beeinflussung von Sulfid und Sulfat durch die Kohle dargestellt. Ein unterstützender Effekt bei der Entschwefelung wurde ebenfalls nachgewiesen und verifiziert.

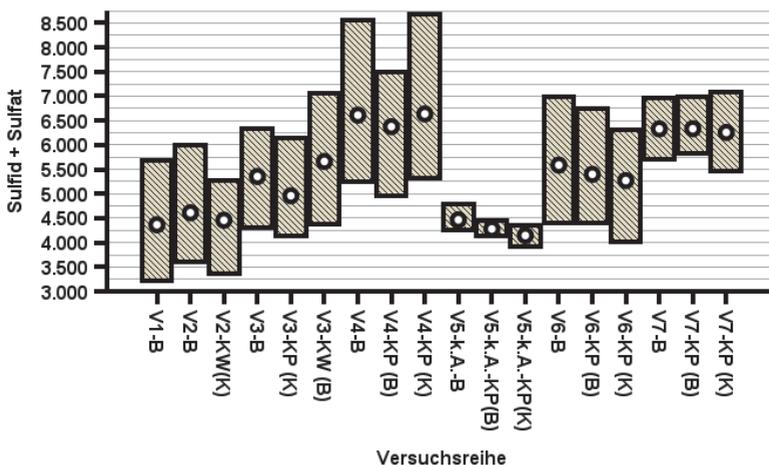


Abb. 4: Summenparameter aus Sulfid und Sulfat in der Flüssigphase (V=Versuchsreihe; B=Blank; (K)=Kiefer; (B) =Buche; KW=Kohlewürfel, KP=Kohlepulver; k.A.=keine Applikation von Kohle

3.2 Einfluss der Form der Kohle auf den Biogasprozess

Wie im vorherigen Kapitel aufgeführt wurde festgestellt, dass eine einmalige Applikation von Kohle in ein Gärmedium zu einer Ausgasung führt, welche auf einer Viskositätsänderung beruht. Aufbauend auf der im Projekt entwickelten Methode zur Bestimmung der Viskosität in faserigen Gärmedien (Sprafke et al. 2024), wurde im Rahmen der Masterarbeit von Frau Jana-Nigeri Zielonka die optimale Konzentration und Korngröße für die Applikation bestimmt. Diese liegt zwischen 0,063 und 0,125 mm bei einer Konzentration von 1,0 Gew.-%FM.

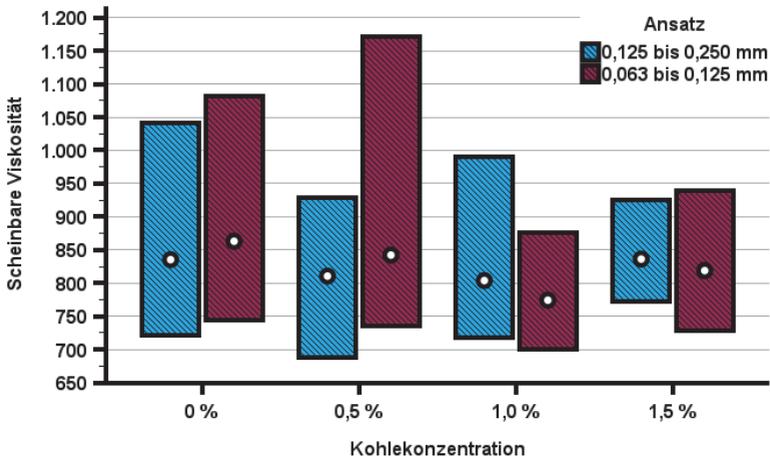


Abb. 5: Viskosität in Abhängigkeit der Kohlekonzentration

3.3 Prozessstabilitätsparameter

Aussagen und Rückschlüsse über die Stabilität eines anaeroben Prozesses durch einzelne Parameter sind nur bedingt möglich, da im Regelfall jede Biogasanlage anders betrieben, gefüttert und gewartet wird. In der Praxis haben sich aber Parameter wie beispielsweise FOS/TAC, Leitfähigkeit und pH-Wert zur Anlagenüberwachung etabliert.

Ergänzend ist festzuhalten, dass durch die Vielzahl an Versuchsreihen und Einzelmesswerten neue Überwachungswerte eruiert werden konnten. Beispielsweise kann das Verhältnis von organischem Kohlenstoff zu organischem Stickstoff (Org. C/N-Verhältnis) als potenzielle Ausgangsgröße zur Bestimmung des Anteils an organischem Stickstoff am Gesamtstickstoff genutzt werden (Abb. 6). Dadurch lassen sich ein Mangel an Kohlenstoff oder Überschuss an Stickstoff im Prozess bestimmen und entsprechende Eingriffe durch Substratmanagement einleiten.

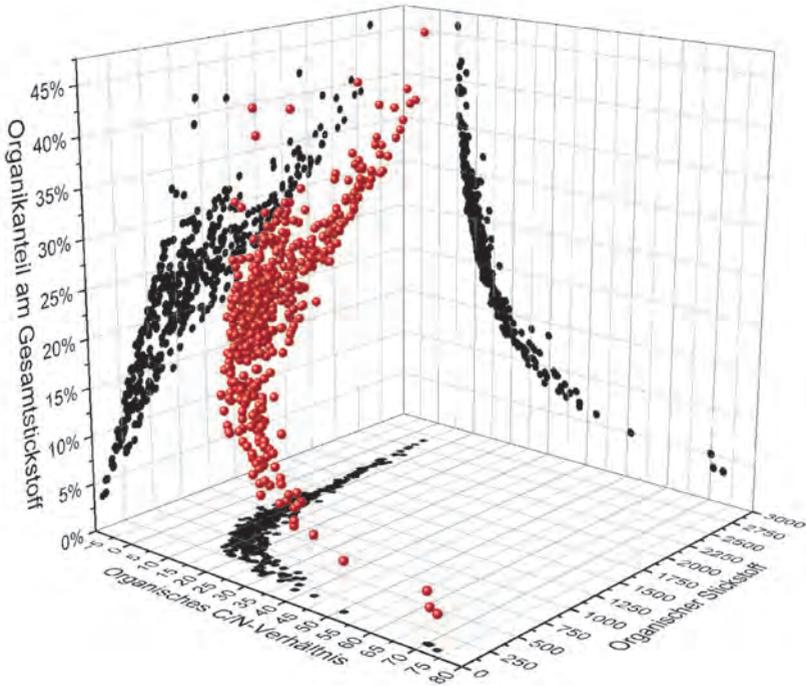


Abb. 6: Organischer Stickstoffanteil in Abhängigkeit der organischen C/N-Verhältnisses sowie der organischen Stickstoffgehaltes in der Flüssigphase

4 Zusammenfassung

Es konnte gezeigt werden, dass mittels der von der Professur Abfall- und Stoffstromwirtschaft entwickelten Methode die Wirkung von Nadel- und Laubholzkohle auf den anaeroben Prozess bewiesen und zentrale Wirkmechanismen bestimmt wurden.

Die Wirkung ist stark abhängig von der Korngröße und Konzentration der Kohle im Prozess. Eine kontinuierliche Applikation ist die Vorzugsvariante zur anhaltenden Reduzierung des Stickstoffgehaltes innerhalb der Biogasanlage. Der diskontinuierliche Einsatz zur Verringerung der gehemmten Entgasung kann bei Anlagen mit hohen Wirtschaftsdüngeranteilen auch ökonomische Vorteile besitzen.

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.

Literatur/Quellen

- Cecilia B. Frias Flores (2020): Application of biochar as an additive to enhance biogas potential in anaerobic digestion. Rochester Institute of Technology. Department of Sustainability, The Golisano Institute for Sustainability.
- Korte, Hans; Sprafke, Jan; Parmar, Pooja Girdharbhai; Steiner, Thomas; Freitag, Ruth; Haag, Volker (2024): Charcoal in Anaerobic Digestion: Part 1—Characterisation of Charcoal. In: *C* 10 (3), S. 77. DOI: 10.3390/c10030077.
- Masebinu, S. O.; Akinlabi, E. T.; Muzenda, E.; Aboyade, A. O. (2019): A review of biochar properties and their roles in mitigating challenges with anaerobic digestion. In: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 103, S. 291–307. DOI: 10.1016/j.rser.2018.12.048.
- Meyer-Kohlstock, Daniel; Haupt, Thomas; Heldt, Erik; Heldt, Nils; Kraft, Eckhard (2016): Biochar as Additive in Biogas-Production from Bio-Waste. In: *Energies* 9 (4), S. 247. DOI: 10.3390/en9040247.
- Pan, Junting; Ma, Junyi; Liu, Xiaoxia; Zhai, Limei; Ouyang, Xihui; Liu, Hongbin (2019): Effects of different types of biochar on the anaerobic digestion of chicken manure. In: *Bioresource technology* 275, S. 258–265. DOI: 10.1016/j.biortech.2018.12.068.
- Rensberg, Nadja; Denysenko, Velina; Daniel-Gromke, Jaqueline (2023): Biogaserzeugung und -nutzung in Deutschland. Report zum Anlagenbestand Biogas und Biomethan. Leipzig: Deutsches Biomasseforschungszentrum gemeinnützige GmbH (DBFZ Report, Nr. 50).
- Rödger, Jan-Markus; Ganagin, Waldemar; Krieg, Andreas; Roth, Christian; Loewen, Achim (2013): Steigerung des Biogasertrages durch die Zugabe von Pflanzenkohle. In: *Müll und Abfall* (9). DOI: 10.37307/j.1863-9763.2013.09.08.
- Sprafke, Jan; Deiß, Elisa Uta; Ender, Tommy; Korte, Hans; Nelles, Michael (2024): Viskositätsmessung in Biogasanlagen – Erkenntnisse aus dem Projekt Biogas-Kohle. Hg. v. Michael Nelles. Universität Rostock. Rostock (Schriftenreihe Umweltingenieurwesen, 124). Online verfügbar unter https://rosdok.uni-rostock.de/file/rosdok_document_0000025597/rosdok_derivate_0000222001/Nelles_18RostockerBio_masseforum_2024.pdf.
- Zimmermann, Benedikt; Wilke, Andreas; Turad, Stefan; Hagemann, Nikolas; Semke, Patricia (2021): Pflanzenkohle zur Steigerung des Methanertrags in Biogasanlagen. Abschlussbericht. Memmingen: Deutsche Bundesstiftung Umwelt.

Kontakt

Dr.-Ing Jan Sprafke, Oberingenieur

Universität Rostock, Fakultät für Agrar, Bau und Umwelt
Professur Abfall- und Stoffstromwirtschaft

☎ +49 (0)381.498 3404 | ✉ jan.sprafke@uni-rostock.de

Entwicklung einer praxisnahen Methode zur Prüfung der schnellen Wirksamkeit von Eisenprodukten

Einleitung

Der in der Biogasproduktion entstehende Schwefelwasserstoff ist in vielerlei Hinsicht problematisch. Als Zellgift hat er direkten Einfluss auf die Mikroorganismen und hemmt damit die Biogasproduktion. Zusätzlich wirkt Schwefelwasserstoff korrodierend auf metallische Anlagenteile und Korrosionsschäden sorgen für erhebliche wirtschaftliche Einbußen für die Betreiber [1]. Darum setzen viele Anlagenbetreiber auf Entschwefelungsprodukte, die den Schwefelwasserstoff im Fermenter binden, indem das Produkt zusätzlich zum Substrat in die Anlage eingebracht wird. Der Markt für diese Entschwefelungsprodukte ist breit gefächert mit einer Vielzahl unterschiedlichster Produkte und zugehöriger Werbeversprechen. Die ISF GmbH führt im Rahmen ihrer Biogasforschung Tests mit unterschiedlichen Eisenverbindungen durch, um bestehende Produkte zur Entschwefelung des Biogases im Portfolio der Unternehmensschwester Schaumann BioEnergy GmbH zu optimieren und weiterzuentwickeln.

Entschwefelung im Fermenter und der damit einhergehende Einsatz von entsprechenden Spezialprodukten sind gängige Praxis. Die Betreiber dosieren je nach Schwefelwasserstoffgehalt Eisenpräparate in die Anlage. Die dabei verwendeten Produkte sind oftmals, gerade bei festen Produkten, Mischungen aus verschiedenen Eisenverbindungen. Über die genaue Zusammensetzung ist meist wenig bekannt. Lediglich der Eisengehalt und gegebenenfalls Warnhinweise oder Gefahrenhinweise sind zum Produkt vermerkt. Allerdings unterscheiden sich die verschiedenen Eisenverbindungen in den Produkten im Hinblick auf die Wirksamkeit und Reaktionszeit und eine Prognose zur Wirkung des jeweiligen Produkts ist so nicht möglich. Bei akuten Problemen mit Schwefelwasserstoff und zu hohen Konzentrationen im Biogas schaffen einzelne Eisenpräparate es nicht den Schwefelwasserstoffgehalt wirksam zu reduzieren. Eisenprodukte mit identischen Eisengehalten zeigen in der Praxis häufig komplett unterschiedliche Schwefelbindungskapazitäten, so dass eine bis zu fünffach höhere Aufwandmenge notwendig ist. Untersuchungen, die die Wirkung des Eisenproduktes näher betrachten, finden in kontinuierlich betriebenen Laborfermentern in 10-30-l-Maßstäben statt. So lassen sich Erkenntnisse über die Wirkung des Eisenpräparates in langen Zeiträumen betrachten. Allerdings sind diese Laborversuche sehr aufwändig, weshalb sich hierbei nur begrenzt unterschiedliche Produkte miteinander direkt vergleichen lassen.

Hier soll nun geprüft werden, ob sich die kurzfristige Wirksamkeit (bis 7 Tage) des Eisens auch in Batch-Versuchen darstellen und mit den kontinuierlichen Versuchen vergleichen lässt.

Kontinuierliche Biogasversuche

Zur Entwicklung der Methode wurde zunächst in mehreren Versuchen mit jeweils 24 kontinuierlich betriebenen Laborfermentern im 18-l-Maßstab die Wirkung verschiedener Eisenverbindungen näher von der ISF betrachtet. Ziel der Untersuchungen war es zunächst langfristige Erkenntnisse über die Wirkung des Eisens im Biogasfermenter zu gewinnen.

Die Versuche wurden zunächst in 24 baugleichen Biogas-Kleinstanlagen mit einem aktiven Fermentervolumen von 18 l durchgeführt. Die Temperatur im Versuch liegt bei 40 °C. Als Impfschlamm wird Fermenterschlamm aus der 776 kW NawaRo-Biogasanlage auf Gut Hülsenberg verwendet. Das Substrat für diese Anlage besteht aus Mais und Gülle im Verhältnis 2:1. Im ersten Versuchsabschnitt wurden die Versuchsfermenter mit Maissilage bei einer Raumbelastung von $4 \text{ kg}_{\text{ots}}/\text{m}^3 \text{ d}$ gefüttert. Abb. 1 und Abb. 2 zeigen den Versuchsaufbau der kontinuierlichen Laborfermenter und stellen diesen schematisch dar.



Abb. 1: Kontinuierliche Biogasfermenter der ISF GmbH

Der Schwefelwasserstoffgehalt im Biogas wurde zunächst durch Zugabe von elementarem Schwefel in die Fermenter auf durchschnittlich 700 ppm in jedem Fermenter eingestellt. Abb. 3 zeigt den Verlauf der Schwefelwasserstoffkonzentration.

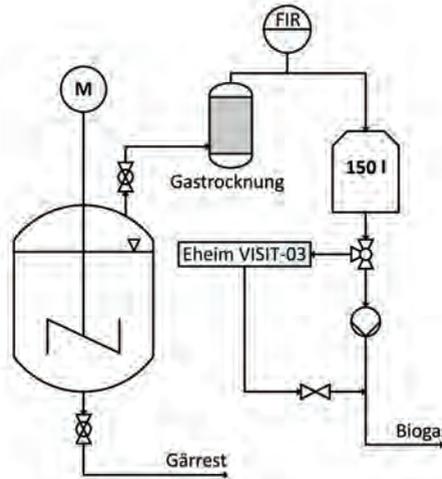


Abb. 2: Schematische Darstellung des Versuchsaufbaus

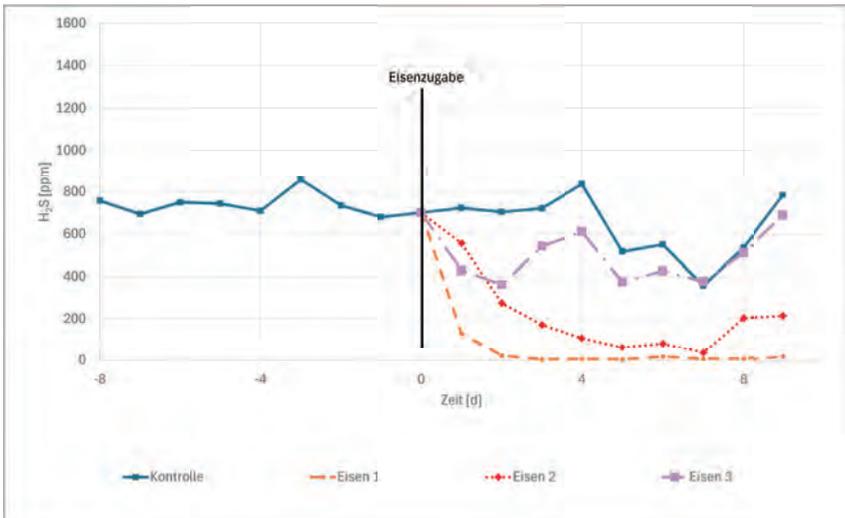


Abb. 3: H_2S -Gehalte im Biogas kontinuierlicher Biogasversuch

Eine Woche vor Versuchsbeginn lag der Schwefelwasserstoffgehalt über 8 Tage bei durchschnittlich 700 ppm. An Tag 0 wurden die Eisenpräparate zugegeben. Die eingebrachte Menge an elementarem Eisen blieb hierbei konstant. Die Eisenpräparate, die sehr schnell wirksam (Eisen 1) sind, konnten schon innerhalb von 24 Stunden den Schwefelwasserstoffgehalt im Biogas auf wenige ppm senken. Eisenpräparat 2 (Eisen 2) reagierte etwas langsamer und senkte die Schwefelwasserstoffkonzentration im Biogas auf unter 200 ppm über den Zeitraum bis Tag 4. Eisen 3 hingegen hatte zwar in den ersten Tagen einen Effekt

auf den Schwefelwasserstoff gezeigt, näherte sich aber in wenigen Tagen wieder der Kontrollvariante an und verläuft danach parallel zur Kontrolle. Die gleiche Zeitspanne von ca. 7 Tagen soll später auch in den Batch-Versuchen angewandt werden. Ein erwartbares Ergebnis in den Batch-Versuchen wäre zwar eine Reduzierung in allen Varianten, diese wäre aber je nach Eisenprodukt unterschiedlich ausgeprägt, sodass die Variante Eisen 1 auch in den geplanten Batch-Versuchen den niedrigsten Gehalt an Schwefelwasserstoff im Gas aufweisen würde.

Batch-Versuche

Um nun die schnelle Wirksamkeit des Eisens in unterschiedlichen Eisenverbindungen einfacher und mit weniger Aufwand miteinander vergleichen zu können, wurden wesentliche Merkmale aus den kontinuierlichen Versuchen auf Biogas-Batchversuche im 2l Maßstab übertragen. So wird durch Zugabe des Substrates, des elementaren Schwefels, des Eisenpräparats und des Fermenterschlamms in einem Ansatz mit 3-facher Wiederholung, ein System geschaffen, das den Schwefel schnell zu Schwefelwasserstoff umwandelt und gleichzeitig mithilfe des Eisens im Ansatz den Gehalt an Schwefelwasserstoff im Biogas reduziert. Die Versuchsdauer beträgt 7 Tage, sodass mehrere Ansätze und Wiederholungen innerhalb kurzer Zeit erfolgen können. Die gemessenen Schwefelwasserstoffwerte im Biogas nach Versuchsende lassen Rückschlüsse auf die Wirksamkeit des Eisenpräparats in einem kurzen Zeitraum zu und lassen sich untereinander direkt vergleichen. Bei Verwendung der gleichen Eisenmengen in allen Varianten lassen sich so auch Unterschiede in der Wirksamkeit der verwendeten Eisenverbindung in dem Eisenpräparat feststellen. Hierfür muss aber im Vorfeld der Eisengehalt in der Eisenprobe bestimmt werden. Abb. 4 gibt einen Überblick über die Versuchsanordnung.

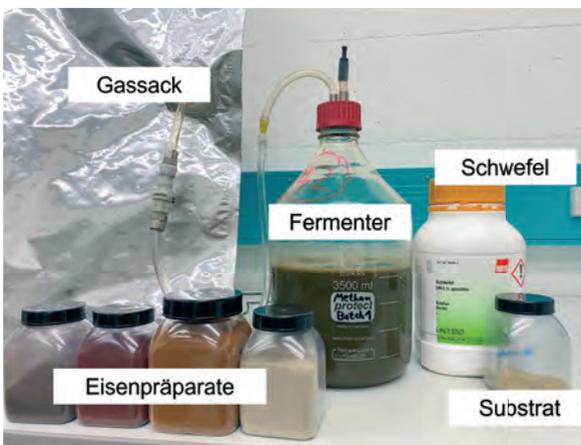


Abb. 4: Überblick Batch-Versuch

Der Batch-Versuch wird als einmaliger Ansatz in 2-l-Flaschen mit 1,5 l aktivem Fermentervolumen durchgeführt. In einigen Vorversuchen wurde zunächst das optimale Verhältnis von Substratmenge, Schwefelanteil im Substrat und die Menge an zugegebenem Eisen ermittelt. Getrocknete und gemahlene Maissilage dient als Substrat und zur Erhöhung des Schwefelwasserstoffs im Biogas wird elementarer Schwefel verwendet. Das System wurde so eingestellt, dass in 7 Tagen ca. 10 l Biogas mit bis 4.000 ppm Schwefelwasserstoff entsteht. Das Biogas wird in Gasspeicherbeuteln aufgefangen und im Anschluss an den Versuch wird mit einem Gasmessgerät der Firma Messtechnik EHEIM (Visit-03) die Schwefelwasserstoffkonzentration bestimmt. Die eingesetzte Eisenmenge, die in allen Versuchen gleich ist, wurde so bemessen, dass eine Reduzierung auf ein paar hundert ppm Schwefelwasserstoff erfolgt.

In den jeweiligen Behandlungen werden die einzelnen Eisenpräparate so eingesetzt, dass die Eisenmenge in den Versuchen immer gleich ist. Die Wirksamkeit der einzelnen Eisenprodukte wird stets mit einer Kontrollvariante (ohne Eisen) verglichen. Alle Behandlungen werden in mindestens dreifacher Wiederholung durchgeführt. Abb. 5 zeigt die Ergebnisse der Schwefelwasserstoffgehalte bei Versuchsende mit den Eisenprodukten, die auch schon im vorher gezeigten kontinuierlichen Biogasversuch verwendet wurden.

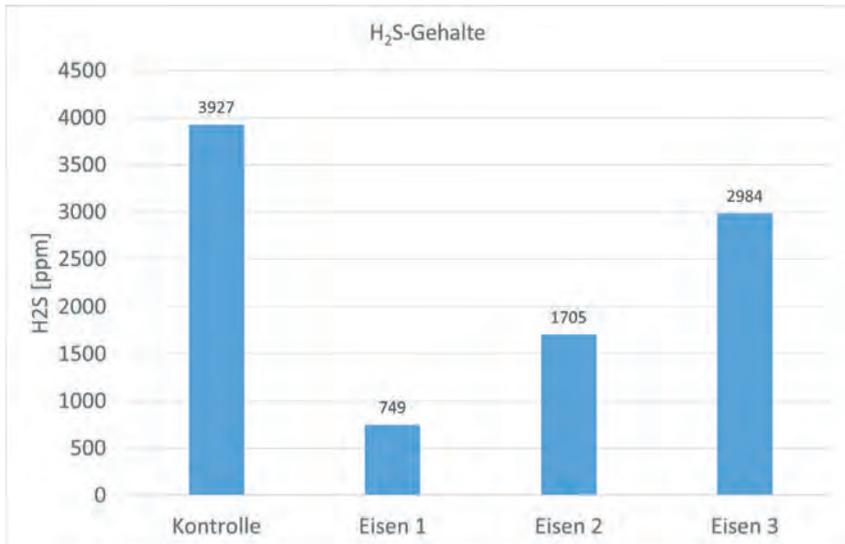


Abb. 5: H₂S-Gehalte im Biogas Batch-Versuch

Die Ergebnisse der Batchversuche zeigen, dass auch hier das Eisenpräparat 1 über den Zeitraum von einer Woche die größte Reduzierung des Schwefelwasserstoffgehalts gebracht hat. Eisen 3 hingegen hat über den Versuchszeitraum betrachtet die geringste Wirksamkeit.

Fazit

Die Ergebnisse aus den kontinuierlichen Biogasversuchen und den neu entwickelten Batchversuchen zeigen somit eine hohe Übereinstimmung, sodass sich die Erkenntnisse aus den Batchversuchen auch auf neue Eisenpräparate übertragen und sich die Wirksamkeiten über einen kurzen Zeitraum in der Praxis zukünftig abschätzen lassen.

Für die zukünftigen Versuche bietet der Biogasbatchversuch im Vergleich zum kontinuierlichen Versuch einige Vorteile:

- Die Wirksamkeiten verschiedener Eisenpräparate lassen sich schnell und innerhalb kurzer Zeit miteinander vergleichen
- Hohe Anzahl an Tests können nacheinander geführt werden und sorgen für eine hohe statistische Sicherheit
- Tests mit unterschiedlichen Dosierungen des Eisens lassen praxisnah Rückschlüsse auf optimale Dosierungen der jeweiligen Eisenverbindung zu. Dies vermeidet übermäßiges Dosieren und führt damit zu einer Kostenersparnis und einem nachhaltigeren Umgang mit Ressourcen
- Kürzere Produktentwicklungszeiten oder neue Produktrezepturen lassen sich schneller auf ihre Wirksamkeit überprüfen

Literatur/Quellen

- [1] Preißler, Daniel; Drochner, Ulrich; Lemmer, Andreas; Oechsner, Hans and Jungbluth, Thomas: Sulphur binding in biogas plants using ferric salts. Landtechnik 65 (2010), Nr. 3, S. 201-203

Kontakt

M. Sc. Markus Daldrup

ISF GmbH Schaumann Forschung

✉ Markus.Daldrup@is-forschung.de

Einfluss der Eigenschaften des Gärmaterials auf die Schaumbildung bei der Vergärung von Triticale

Zusammenfassung: Der Einsatz von Getreide eignet sich aufgrund seines hohen Stärkegehalts besonders gut für eine schnelle Biogasproduktion und gewinnt im Rahmen der Flexibilisierung durch flexible Fütterung zunehmend an Bedeutung. Allerdings steigt dabei das Risiko der Schaumbildung im Fermenter, was zu Störungen wie z.B. verstopften Gasleitungen führt.

Ziel dieser Studie war es, den Einfluss des Gärmaterials auf die Schaumbildung bei der Vergärung von Triticale zu untersuchen. Dafür wurde Gärmaterial aus 20 Biogasanlagen analysiert und die Schaumbildung bei der Vergärung von Triticale getestet. Eine Korrelationsanalyse zeigte Zusammenhänge zwischen Schaumbildung, Viskosität, Proteingehalt und hoher organischer Belastung. Basierend auf den Erkenntnissen wurden Maßnahmen zur Schaumreduktion getestet. Zunächst wurde durch Sieben des Gärmaterials die Viskosität verringert, was jedoch eine erhöhte Schaumbildung zur Folge hatte. Eine Vorbehandlung des Gärmaterials mit Protease reduzierte die Schaumbildung und bestätigte die beobachteten Zusammenhänge.

Die Ergebnisse zeigten, dass eine hohe Viskosität und ein hoher Proteingehalt das Schäumen fördern, während Enzymzugabe das Schaumverhalten verringert. Dies ist für Anlagenbetreiber wichtig, um das Schäumen in Verbindung mit Triticale zu minimieren.

Abstract: Due to its high starch content, the use of grain is suitable for short time biogas production and is becoming increasingly important in the context of flexibilization through flexible feeding. However, its use increases the risk of foam formation in the fermenter, which can lead to disturbances such as clogged gas pipes.

The aim of this study was to investigate the influence of digestate properties on foam formation during anaerobic digestion of triticale. For this purpose, digestates from 20 biogas plants were analyzed and the foam formation during the anaerobic digestion of triticale was tested. A correlation analysis showed relationships between foam formation, viscosity, protein content and high organic load. Based on the findings, foam countermeasures were tested. Initially, the viscosity was reduced by sieving the digestate, but this resulted in increased foaming. A protease pre-treatment of the digestate reduced the foam formation and confirmed the previous results.

The results showed that high viscosity and high protein content promote foaming, while protease addition reduces foaming intensity. This is important for plant operators to minimize foaming in combination with triticale.

1 Hintergrund

Im Jahr 2024 bestand der Strommix in Deutschland zu 47 % aus Wind- und Solarstrom (Fraunhofer ISE, 2025). Mit einem Anteil von 33 % ist die Windenergie bereits die wichtigste Stromquelle, zugleich gewinnt die Stromerzeugung aus Photovoltaik-Anlagen mit einem Wachstum von 18 % gegenüber 2023 weiter an Bedeutung. Damit nähert sich Deutschland dem Ziel der Klimaneutralität bis 2045 an.

Wind- und Solarenergie zeichnen sich durch geringe Treibhausgasemissionen und niedrige Stromgestehungskosten aus, unterliegen jedoch saisonalen und wetterbedingten Fluktuationen. Daher sind Speicher- und Flexibilitätsoptionen erforderlich, um Schwankungen auszugleichen und die Netzstabilität zu gewährleisten. Eine bereits vorhandene Flexibilitätsoption, die zudem ohne Rohstoffe aus autokratischen Systemen auskommt, ist die flexible Stromerzeugung aus Biogas. Zurzeit wird die Flexibilisierung von Biogasanlagen durch eine Erweiterung der Blockheizkraftwerke (BHKW) und Gasspeicherkapazitäten realisiert. Eine kosteneffizientere Möglichkeit ist die Flexibilisierung durch eine flexible Fütterung - der Vorteil: es würden laut Barchmann et al. (2016) bis zu 45 % weniger Gasspeicherkapazitäten benötigt. Um kurzfristig die Biogasproduktion zu erhöhen, bietet sich die Vergärung von Getreide an, da es aufgrund seines hohen Stärkeanteils eine schnelle Konversion zu Biogas ermöglicht.

1.1 Schaum im Biogasfermenter

Bei der Vergärung von Getreide kommt es jedoch vermehrt zur Schaumbildung. Laut einer Studie von Lindorfer und Demming (2016) berichten 18,7 % der befragten Betreiber von NawaRo-Biogasanlagen von starker Schaumbildung beim Einsatz von Getreide. Diese kann weitreichende Folgen haben, wie verstopfte Gasleitungen (Ganidi et al., 2009), Störungen in Umwälzpumpen (Moeller et al., 2010), bis hin zu Konstruktionsschäden am Fermenterdach (Moeller et al., 2012).

Die Schaumbildung bei der Vergärung von Getreide wird insbesondere durch den hohen Proteingehalt sowie den hohen Stärkeanteil verursacht. Proteine wirken als oberflächenaktive Substanzen, die die Stabilität der Gasblasen fördern (Kougias et al., 2015). Gleichzeitig kann die Stärke die Viskosität des Fermenterinhalt erhöhen (Moeller et al., 2012) und durch ihre schnelle mikrobielle Umsetzung zu Biogas zusätzlich die Schaumbildung begünstigen (Scherer et al., 2022).

Die Intensität der Schaumbildung hängt unter anderem von der Art des Getreides sowie der Partikelgröße ab. In einer Studie von Moeller et al. (2016) wurde die Schaumbildung bei der Vergärung mit verschiedenen Getreidesorten (Gerste, Hafer, Hirse, Roggen Triticale, und Weizen) verglichen. Dabei wurde bei der Vergärung von Weizen und Triticale die stärkste Schaumbildung beobachtet. Zudem zeigte sich, dass fein gemahlene Getreidekörner aufgrund ihrer größeren spezifischen Oberfläche eine beschleunigte Freisetzung von Proteinen und Kohlenhydraten in das Gärmaterial bewirkt, was Schaumbildung begünstigt (Moeller et al., 2016).

In dieser Studie wurde ausschließlich das Schaumverhalten bei der Vergärung von Triticale untersucht. Triticale ist eine Kreuzung aus Weizen und Roggen und kombiniert das hohe Ertragspotential des Weizens mit der Krankheitsresistenz und der Anpassungsfähigkeit an suboptimale Wachstumsbedingungen des Roggens. Dies macht Triticale zu einem interessanten Substrat für die Biogasproduktion, gleichzeitig zeigte es in früheren Untersuchungen eine starke Schaumbildung während der Vergärung.

Neben den Substrateigenschaften, ist die Intensität der Schaumbildung abhängig von der Gärmaterialeigenschaften im Fermenter. Verschiedene Studien deuten darauf hin, dass Gärmaterialeigenschaften wie eine hohe Viskosität (Stoyanova et al., 2014), ein hoher Proteingehalt (Kougias et al., 2015), und eine hohe organische Belastung (Li et al., 2015) die Schaumbildung positiv beeinflussen können.

1.2 Aufbau und Ziel der Studie

Obwohl bereits verschiedene Eigenschaften des Gärmaterials im Zusammenhang mit der Schaumbildung untersucht wurden, wurde die Schaumbildung häufig nur als sekundärer Effekt betrachtet und nicht systematisch analysiert. Daher mangelt es bislang an belastbarer Evidenz darüber, welche spezifischen Eigenschaften des Gärmaterials maßgeblich zur Schaumbildung beitragen. Ziel der vorliegenden Studie war es daher zu überprüfen, ob unterschiedliche Eigenschaften des Gärmaterials tatsächlich zu variierenden Schaumintensitäten bei Vergärung von schaumfördernden Substraten führen. Darüber hinaus sollte ermittelt werden, welche dieser Eigenschaften mit einer erhöhten Schaumbildung korrelieren, um darauf aufbauend gezielte Gegenmaßnahmen ableiten zu können.

Dafür wurden 20 Biogasanlagen im Raum Leipzig beprobt und die Proben analysiert. Folgende Eigenschaften des Gärmaterials aus dem Hauptfermenter wurden dabei bestimmt: Trockensubstanz (TS), organische Trockensubstanz (oTS), pH-Wert, FOS/TAC, Dichte, Oberflächenspannung, Viskosität, Konzentrationen der Kohlenhydrate, Proteine, des Kohlenstoffs (TC, Summe von organisch TOC und anorganisch IC), sowie Stickstoffs (TN), und Ammoniumstickstoffs (NH₄-N) und der flüchtigen organischen Säuren (Laktat, Acetat, Butyrat und Propionat). Zudem wurde die Intensität der Schaumbildung des jeweiligen Gärmaterials in Schaumtests getestet. Dafür wurden 500 g Gärmaterial mit 5 g Triticale, welches vorher zu Schrot mit der Partikelgröße < 0.56 mm gemahlen wurde, vermischt und in einem Wasserbad bei 39 °C für ca. 20 Stunden inkubiert. Im Laufe des Versuchs wurde ein Video der Schaumbildung aufgezeichnet. Das höchste erreichte Schaumvolumen wurde anschließend bestimmt und in entsprechendes Volumen umgerechnet. Durch den Einsatz des gleichen Triticaleschrots für alle Schaumversuche blieb dieser Faktor konstant, wodurch sich der Einfluss der verschiedenen Gärmaterialien auf die Schaumbildung gezielt untersuchen ließ.

Die Ergebnisse der Schaumtests wurden mit den Ergebnissen der Analysen des Gärmaterials in R korreliert. So konnten Zusammenhänge erschlossen werden, auf Basis derer zwei Methoden zur Reduktion der Schaumbildung entwickelt wurden. Dies beinhaltete zum einen das Sieben der Gärmaterialien mit verschiedenen Maschenweiten (2 mm, 5 mm und 8 mm), um die Viskosität zu reduzieren, sowie eine Vorbehandlung der Gärmaterialien mit Protease, um die Proteinkonzentration zu verringern. Dabei wurden 500 g Gärmaterial mit 50 mg Protease (Papain, Merck) vermengt und für 4 Stunden bei 39 °C in einem Wasserbad inkubiert. Anschließend wurde das Gemisch mit Triticale vermengt. Als Kontrolle dienten Ansätze, bei denen Gärmaterial nur im Wasserbad ohne Protease inkubiert wurde.

2 Einfluss der Eigenschaften des Gärmaterials auf die Intensität der Schaumbildung

2.1 Beschreibung der beprobten Biogasanlagen

Die 20 Biogasanlagen, deren Hauptfermenter für die Untersuchung des Einflusses der Gärmaterialeigenschaften auf die Schaumbildung beprobt wurden, unterschieden sich deutlich hinsichtlich ihrer Größe, ihres Aufbaus, der Betriebsweise und der eingesetzten Substrate. Zum Zeitpunkt der Beprobung gab es in keiner der Anlagen Schaumprobleme. Im Folgenden werden die Biogasanlagen näher beschrieben.

Die Größe der beprobten Hauptfermenter reichte von 190 m³ bis 4.000 m³. Auch die installierte elektrische Leistung der BHKWs variierte stark von 124 kW bis 1.200 kW. 60% der Anlagen verfügten über eine installierte Leistung von mindestens 500 kW oder mehr. In zwei Fällen wurde das erzeugte Biogas zu Biomethan aufbereitet. Vier Anlagen wurden durch den Ausbau der Gasspeicherkapazität und den Einsatz eines zweiten BHKW für einen flexiblen Betrieb umgerüstet. Vier weitere Anlagen verfügten über eine separate Hydrolysestufe, wobei bei zwei davon Pfropfenstromfermenter zum Einsatz kamen. Die Betriebstemperaturen der Fermenter lagen zwischen 39 °C und 51 °C. Zehn Anlagen arbeiteten im mesophilen Bereich (37 °C - 42 °C), vier im thermophilen Bereich (50 °C - 51 °C), während sechs Anlagen bei ca. 45 °C betrieben wurden. In den meisten Fermentern (17) war Mais das Hauptsubstrat. Bei einem Fermenter war dies zu gleichen Teilen Mais und Zuckerrübe, und bei einem weiteren zu gleichen Teilen Mais und Getreideschrot. Ein Fermenter wurde ausschließlich mit Rindergülle betrieben. Insgesamt wurde in der Hälfte der Fermenter (zusätzlich) Getreide, entweder in Form von Ganzpflanzensilage oder als Getreideschrot, als Substrat verwendet. Bei 15 Fermentern stammte die eingesetzte Gülle überwiegend von Rindern. In einer Anlage wurden Rinder- und Schweinegülle zu gleichen Teilen eingesetzt, drei Fermenter nutzten überwiegend Schweinegülle. In einer Anlage wurde Putenmist verwendet.

Durch die Unterschiede der untersuchten Anlagen konnte ein breites Spektrum an Gärmaterialeigenschaften abgedeckt werden. Dies bildete eine geeignete Grundlage, um den Einfluss der physikochemischen Eigenschaften des Gärmaterials auf die Intensität der Schaumbildung zu untersuchen.

2.2 Einfluss des Gärmaterials auf die Intensität der Schaumbildung bei Vergärung von Triticale

Der Einfluss des Gärmaterials auf die Intensität der Schaumbildung bei Vergärung von Getreide wurde am Beispiel von Triticale als Substrat mit Hilfe von Schaumtests untersucht. Das maximal erreichte Schaumvolumen ist in Abb. 1 dargestellt.

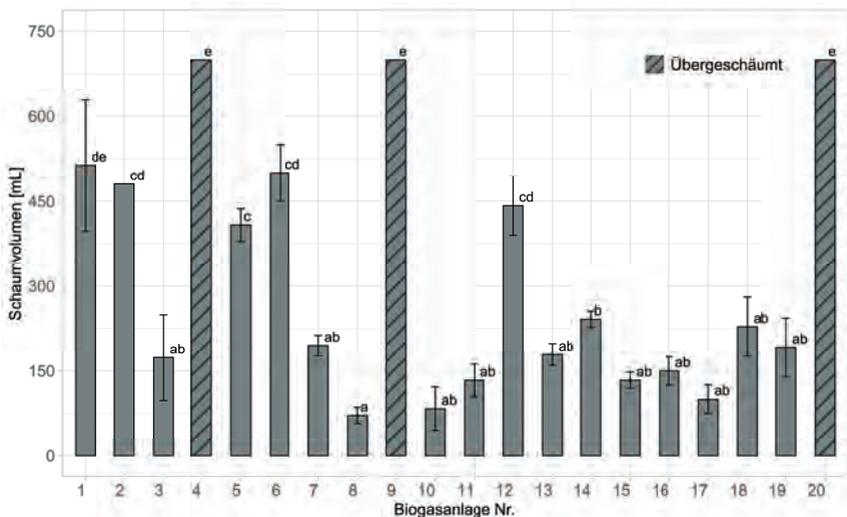


Abb. 1: Maximal erreichte Schaumvolumina bei Vergärung von Triticaleschrot im Gärmaterial aus 20 unterschiedlichen Biogasanlagen. Bedingungen des Schaumtests: 39 °C, 20 Stunden, 5 g Triticaleschrot (< 0,56 mm) vermengt in 500 g Gärmaterial, n = 3. Die Buchstaben über den Balken zeigen statistisch unterschiedliche Gruppen (p-Wert < 0,05), basierend auf einer ANOVA mit anschließendem Tukey-Post-hoc-Test zum Vergleich des Gärmaterials aus unterschiedlichen Quellen.

Insgesamt ist zu sehen, dass es starke Variation entlang der getesteten Proben gab. Die Schaumvolumina variierten von 71 mL bis hin zum Überschäumen der Behälter. Bei drei Schaumtests kam es zur massiven Schaumentwicklung, die zum Überlaufen der Versuchsbehälter führte. Damit ist das entstandene Schaumvolumen nicht genau auswertbar und wurde für die vergleichende Darstellung auf 700 mL festgesetzt. Eine einfaktorielles Varianzanalyse bestätigte die Hypothese, dass das Gärmaterial einen signifikanten Einfluss auf die Schaumbildung hat. Die Ablehnung der Nullhypothese, dass es keinen Unterschied zwischen den Schaumintensitäten abhängig vom Gärmaterial gibt, wurde durch

einen p-Wert < 0,001 gestützt. Die Buchstaben über den Balken in Abb. 1 zeigen statistisch unterschiedliche Gruppen (p-Wert < 0,05) des Tukey-post-hoc-Tests zum Vergleich der unterschiedlichen Proben.

2.3 Korrelationsanalyse zwischen den Schaumvolumina und den Eigenschaften des Gärmaterials

Zur Identifikation möglicher Ursachen für die beobachteten Unterschiede in der Schaumbildung erfolgte eine Korrelationsanalyse zwischen den Schaumvolumina und den Eigenschaften der analysierten Gärmaterialien.

Abb. 2 zeigt die Ergebnisse der Korrelationsanalyse zwischen den Schaumvolumina und den Eigenschaften der untersuchten Gärmaterialien.

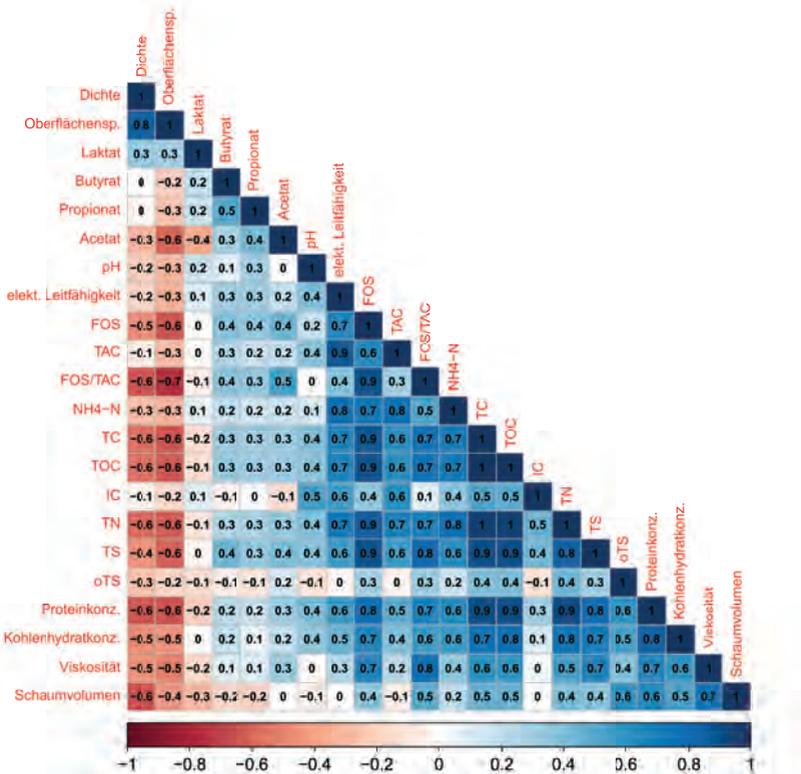


Abb. 2: Spearman Korrelationsanalyse zwischen den maximalen Schaumvolumina und den Eigenschaften des Gärmaterials aus 20 Biogasanlagen. (FOS = Flüchtige organische Säuren, IC = Konzentration des anorganischen Kohlenstoffs, NH₄-N = Ammoniumstickstoffkonzentration, Oberflächensp. = Oberflächenspannung, oTS = organischer Trockensubstanzgehalt, TC = Gesamtkohlenstoffkonzentration, TN = Stickstoffkonzentration, TOC = Konzentration des organischen Kohlenstoffs, TS = Trockensubstanzgehalt)

Dargestellt ist der Spearman-Korrelationskoeffizient, wobei ein Wert nahe +1 auf eine starke positive Korrelation, ein Wert nahe -1 auf eine starke negative Korrelation und ein Wert nahe 0 auf keinen Zusammenhang hinweist. Die Korrelationsanalyse zeigt neben den Zusammenhängen zwischen dem Schaumvolumen und den Gärmaterialeigenschaften auch Korrelationen zwischen den einzelnen Eigenschaften des Gärmaterials auf, wobei in diesem Fall die Parameter miteinander überwiegend positiv korrelieren. Dies lässt sich dadurch erklären, dass viele Prozesse in der Vergärung aufeinander aufbauen. Eigenschaften, die Rückschlüsse auf die organische Belastung des Materials zulassen, wie der TS-Gehalt, oTS-Gehalt und die Konzentrationen von Kohlenhydraten, TC und TOC, korrelieren positiv mit dem FOS, FOS/TAC und überwiegend mit den Konzentrationen von organischen Säuren, die im Zuge der Hydrolyse und Acidogenese des organischen Materials gebildet werden. Ähnlich zu bewerten sind positive Korrelationen zwischen den Konzentrationen von Proteinen, des Gesamtstickstoffs, sowie des Ammoniumstickstoffs. Ammoniumstickstoff ist ein Abbauprodukt der Proteine; während der Vergärung mit hoher Proteinkonzentration steigt deshalb auch die Menge des gebildeten Ammoniumstickstoffs an.

Ähnliche Rückschlüsse wurden von Otto et al. (2024) gezogen, die 80 Biogasanlagen mit dem Ziel eines ganzheitlicheren Vergleichs inklusive taxonomischer und prozessoperationeller Faktoren beprobt und dabei eine ähnliche Korrelationsanalyse zwischen den physikochemischen Parametern erstellt haben. Diese zeigte trotz der deutlich höheren Stichprobengröße keine starke Abweichung zu den Ergebnissen dieser Studie.

Der Fokus dieser Studie lag auf den Zusammenhängen der Gärmaterialeigenschaften mit der Intensität der Schaumbildung. Die stärkste positive Korrelation mit dem maximalen Schaumvolumen zeigte dabei die Viskosität, gefolgt von der Proteinkonzentration und dem oTS-Gehalt. Neben dem oTS-Gehalt zeigten auch weitere Parameter, die Rückschlüsse auf die organische Belastung zulassen (TS-Gehalt, Konzentrationen der Kohlenhydrate, TC und TOC), starke positive Korrelation mit der Schaumbildung. Eigenschaften, die starke negative Korrelation zur Schaumbildung aufwiesen, waren die Dichte, sowie die Oberflächenspannung. Diese Ergebnisse bestätigen vorherige Studien. Steigende Viskosität und ein erhöhtes Schaumrisiko wurden unterer anderem bereits von Ao et al. (2020) bei der Vergärung von Schlempe, bei Stoyanova et al. (2014) bei der Vergärung von Zuckerrübe und Kong et al. (2019) bei der Vergärung von Haushaltsabfällen beschrieben. In höherviskosem Gärmaterial entweicht das gebildete Gas langsamer, was schließlich zu einer größeren Menge Schaum führt. Die erhöhte Viskosität hängt zudem häufig von hoher organischer Belastung ab (Ao et al., 2020), wie es auch die Korrelationsanalyse der vorliegenden Studie bestätigt.

Die starke Korrelation zwischen Proteinkonzentration und Schaumbildung wurde bereits mehrfach beschrieben (Kougias et al., 2015; Moeller et al., 2010). Aufgrund ihrer amphiphilen Eigenschaften mit hydrophoben und hydrophilen

Bereichen können sich Proteine an Phasengrenzen anlagern und dort zur Stabilisierung von Schaum beitragen (Damodaran, 2006). Die dargestellte Korrelationsanalyse bestätigt diesen Zusammenhang: Eine negative Korrelation zwischen Proteinkonzentration und Oberflächenspannung weist darauf hin, dass eine steigende Proteinkonzentration zu einer Reduktion der Oberflächenspannung führt. Eine Verminderung der Oberflächenspannung erhöht die Schaumstabilität (Wang et al., 2019).

3 Maßnahmen gegen Schaumbildung bei Vergärung von Triticale

Basierend auf den Ergebnissen der Korrelationsanalyse wurden zwei Maßnahmen gegen übermäßige Schaumbildung bei Vergärung von Triticale abgeleitet und getestet. Als wesentliche Parameter für das maximale Schaumvolumen wurden die Viskosität und die Proteinkonzentration identifiziert. Als Gegenmaßnahmen zur Schaumbildung wurde die Reduktion der Viskosität durch vorheriges Sieben des Gärmaterials, sowie eine Vorbehandlung mit Protease zur Reduktion der Proteinkonzentration getestet.

3.1 Verringerung der Viskosität

In der Korrelationsanalyse zeigte die Viskosität die stärkste positive Korrelation mit dem maximalen Schaumvolumen. Durch das Sieben des Materials durch Siebe mit verschiedenen Maschengrößen (8 mm, 5 mm und 2 mm) wurden Viskositäten zwischen 456 cP (8 mm) und 248 cP (2 mm) erreicht. Da durch das Sieben ebenfalls größere Partikel von dem Gärmaterial getrennt wurden, wurde neben der Viskosität ebenfalls der TS- und oTS-Gehalt reduziert. Die Ergebnisse des Einflusses des Siebens auf das Gärmaterial und die Schaumbildung sind in Tab. 1 zu sehen. Der Einfluss der Viskosität auf die Schaumvolumina war entgegengesetzt der vorherigen Korrelationsanalyse: Die geringste Schaumbildung wurde mit der höchsten apparenten Viskosität erzielt.

Tab. 1: Ergebnisse des Effekts des Siebens auf die Trockensubstanz (TS), die organische Trockensubstanz (oTS), die Viskosität, und das Schaumvolumen. (FM = Frischmasse).

Parameter/Maschenweite [mm]	8	5	2
Viskosität [cP] bei 5 U/min	456	376	248
Schaumvolumen [mL]	225.0 ± 25.0	416.7 ± 28.9	441.7 ± 38.2
TS [% FM]	5.2 ± 0.0	5.0 ± 0.0	4.7 ± 0.0
oTS [% TS]	70.8 ± 0.2	69.1 ± 0.3	67.4 ± 0.2

n = 3, Viskosität *n* = 1

Ab einer Maschenweite von 5 mm wurde keine signifikante Änderung im Schaumvolumen erzielt. Eine mögliche Erklärung dafür, dass bei einer Maschenweite

von 8 mm weniger Schaum gebildet wurde, könnte das Vorhandensein größerer Partikel sein. Partikel, die größer als 5 mm sind und durch das Sieben entfernt wurden, könnten zur Instabilität des Schaums beigetragen haben.

Das Sieben des Gärmaterials hat sich nicht als geeignete Methode zur Schaumreduktion erwiesen. Obwohl die apparente Viskosität erfolgreich reduziert wurde, hatte dies keinen positiven Einfluss auf die Schaumreduktion. Gleichzeitig wurde der TS-, sowie der oTS-Gehalt im Gärmaterial reduziert, was in der Praxis zu einer geringeren Biogasausbeute führen würde.

3.2 Enzymatische Vorbehandlung des Gärmaterials

Ein weiterer Ansatz zur Reduktion der Intensität der Schaumbildung war die vierstündige Vorbehandlung des Gärmaterials mit Protease vor der Vermengung mit dem Triticaleschrot. Proteasen katalysieren den Abbau der Proteine, die eine hohe Korrelation zur Schaumbildung aufwiesen.

Tab. 2 zeigt die Ergebnisse der Vorbehandlung des Gärmaterials mit Protease. Nach einer Inkubationszeit von vier Stunden war die Proteinkonzentration im Vergleich zum Rohmaterial deutlich verringert, unabhängig davon, ob Protease hinzugefügt wurde. Nach der Zugabe von Triticaleschrot und einer weiteren Inkubationszeit von 20 Stunden wurde in den Ansätzen mit der Zugabe von Protease eine um etwa ein Drittel geringere Schaumbildung beobachtet.

Durch die Zugabe von Triticale wurden neue Substanzen, einschließlich Proteine, in die Gärmaterialien eingebracht. Der Schaum, der bei der Triticalevergärung entsteht, besteht zu einem hohen Anteil aus Proteinen (Moeller et al., 2016), die sich an der Gas-Flüssigkeits-Grenzfläche anreichern und zur Stabilisierung des Schaums beitragen. Die eingesetzte Protease könnte diese oberflächenaktiven Proteine gezielt hydrolysiert haben, wodurch deren schaumbildende Eigenschaften reduziert wurden. Der enzymatische Abbau der Proteinstrukturen führt zur Bildung kürzerer Peptidfragmente, die eine geringere Fähigkeit besitzen, stabile Schaumschichten auszubilden. Infolgedessen verringerte sich die Schaumstabilität, was zu einem insgesamt reduzierten Schaumvolumen geführt haben könnte.

Tab. 2: Der Effekt der Vorbehandlung des Gärmaterials mit Protease: die Proteinkonzentration, Proteaseaktivität und das gebildete Schaumvolumen.

Parameter/Vorhandlung	Rohmaterial	Mit Proteasevorbehandlung	Ohne Proteasevorbehandlung
Proteinkonzentration [mg/mL]	3.5 ± 0.6	2.8 ± 0.0	2.7 ± 0.2
Schaumvolumen [mL]	-	241.7 ± 57.7	358.3 ± 38.2

$n = 3$

Da sich die Eigenschaften des Gärmaterials vor der Zugabe von Triticale in Bezug auf die Proteinkonzentration zwischen den Ansätzen mit und ohne Protease nicht wesentlich unterschieden, kann davon ausgegangen werden, dass die beobachtete Reduktion der Schaumbildung auf eine Wirkung der Protease auf das Substrat und weniger auf Veränderungen im Gärmaterial zurückzuführen ist.

4 Zusammenfassung

Die Untersuchungen haben gezeigt, dass die Intensität der Schaumbildung signifikant von den Eigenschaften des Gärmaterials abhängt. Dabei spielen vor allem die Viskosität, die Proteinkonzentration und eine hohe organische Belastung des Gärmaterials eine wesentliche Rolle. Eine Reduzierung der Viskosität durch das Sieben des Gärmaterials führte nicht zu einer Schaumreduzierung, wobei durch die Zugabe von Proteasen erfolgreich die Schaumbildung minimiert werden konnte.

Die Ergebnisse stützen die vorherigen Vermutungen hinsichtlich der schaumfördernden Gärmaterialeigenschaften. Diese Erkenntnisse können als Grundlage für gezielte Maßnahmen zur Reduzierung des Risikos der Schaumbildung bei der Vergärung von Triticale dienen. Es wurde nicht nur weitere Evidenz geschaffen, sondern auch tieferes Verständnis für die Zusammenhänge der Gärmaterialeigenschaften mit der Schaumbildung entwickelt, was für die Praxis von Nutzen sein kann.

Literaturverzeichnis

- Ao, T., Ran, Y., Chen, Y., Li, R., Luo, Y., Liu, X., Li, D., 2020. Effect of viscosity on process stability and microbial community composition during anaerobic mesophilic digestion of Maotai-flavored distiller's grains. *Bioresour. Technol.* 297, 122460. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.122460>
- Damodaran, S., 2006. Protein stabilization of emulsions and foams. *Journal of Food Science* 70, R54–R66. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.2005.tb07150.x>
- Fraunhofer ISE, 2025. German Net Power Generation in 2024: Electricity Mix Cleaner than Ever (Press release #1).
- Ganidi, N., Tyrrel, S., Cartmell, E., 2009. Anaerobic digestion foaming causes – A review. *Bioresour. Technol.* 100, 5546–5554. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2009.06.024>
- Kong, X., Liu, J., Yue, X., Li, Y., Wang, H., 2019. Fe₀ inhibits bio-foam generating in anaerobic digestion reactor under conditions of organic shock loading and re-startup. *Waste Manag.* 92, 107–114. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2019.05.020>
- Kougias, P.G., Boe, K., Einarsdottir, E.S., Angelidaki, I., 2015. Counteracting foaming caused by lipids or proteins in biogas reactors using rapeseed oil or oleic acid as antifoaming agents. *Water Res.* 79, 119–27. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2015.04.034>

- Li, D., Liu, S., Mi, L., Li, Z., Yuan, Y., Yan, Z., Liu, X., 2015. Effects of feedstock ratio and organic loading rate on the anaerobic mesophilic co-digestion of rice straw and pig manure. *Bioresour. Technol.* 187, 120–127. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2015.03.040>
- Moeller, L., Görsch, K., Müller, R.A., Zehnsdorf, A., 2012. Formation and suppression of foam in biogas plants - practical experiences. *Landtechnik* 67, 110–113.
- Moeller, L., Herbes, C., Müller, R.A., Zehnsdorf, A., 2010. Formation and removal of foam in the process of anaerobic digestion. *Landtechnik* 65, 204–207.
- Moeller, L., Krieg, F., Zehnsdorf, A., 2013. Effect of coarse grain on foam formation in biogas plants. *Landtechnik* 68, 344–347.
- Moeller, L., Krieg, F., Zehnsdorf, A., Müller, R.A., 2016. How to avoid foam formation in biogas plants by coarse grain anaerobic digestion. *Chem. Eng. & Technol.* 39, 673–679. <https://doi.org/10.1002/ceat.201500300>
- Scherer, P., Schreiber, A., Arthur, R., Antonczyk, S., Vollmer, G.-R., 2022. Doubling the space-time yield of a pilot biogas reactor with swine manure and cereal residues by a closed loop feedback control based on an automated fuzzy logic control system. *Processes* 10, 2511. <https://doi.org/10.3390/pr10122511>
- Stoyanova, E., Forsthuber, B., Pohn, S., Schwarz, C., Fuchs, W., Bochmann, G., 2014. Reducing the risk of foaming and decreasing viscosity by two-stage anaerobic digestion of sugar beet pressed pulp. *Biodegradation* 25, 277–289. <https://doi.org/10.1007/s10532-013-9659-9>
- Wang, Y.-H., Lin, Y., Yang, X.-Q., 2019. Foaming properties and air–water interfacial behavior of corn protein hydrolyzate–tannic acid complexes. *J. Food Sci. Technol.* 56, 905–913. <https://doi.org/10.1007/s13197-018-03553-0>

Kontakt

Dipl.-Ing. Frederik Bade, Wissenschaftlicher Mitarbeiter/ Doktorand

Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung GmbH – UFZ,
Permoserstr. 15, 04318 Leipzig

☎ +49 (0)341.6025-1764 | ✉ frederik.bade@ufz.de

Marktdurchdringung von Biomethan in Europa: Herausforderungen, Chancen und strategische Ausrichtungen

Zusammenfassung: Biomethan wird zunehmend als Eckpfeiler für die Dekarbonisierung des europäischen Energiesystems betrachtet. Im Einklang mit den Klima- und Energiesicherheitszielen sieht der REPowerEU-Plan bis 2030 eine Biomethanproduktion von 35 Milliarden Kubikmetern (bcm) vor. Dieser Beitrag untersucht den Status quo, die Herausforderungen und die strategischen Handlungsansätze zur Marktdurchdringung von Biomethan in sieben EU-Länder anhand einer strukturierter SWOT-TOWS-Analyse. Die nationalen Bewertungen wurden im Rahmen des EU Projekts GreenMeUp erstellt und integrieren Beiträge von technischen, politischen und marktwirtschaftlichen Stakeholdern. Die Studie hebt zentrale Stärken wie verfügbare Substrate, vorhandene Biogasinfrasturktur und erste Pilotprojekte hervor, zeigt jedoch auch Schwächen wie fragmentierte Gesetzgebung, unzureichende Förderinstrumente und begrenzten Netzzugang auf. Die priorisierten strategischen Maßnahmen konzentrieren sich auf rechtliche Klarheit, finanzielle Unterstützung, technologische Umsetzung und öffentliche Akzeptanz. Die Ergebnisse unterstreichen die Notwendigkeit koordinierter Anstrengungen auf EU- und nationaler Ebene, um einen tragfähigen und gerechten Biomethanmarkt zu ermöglichen.

Abstract: Biomethane is increasingly seen as a cornerstone for decarbonizing the EU's energy system. In line with climate and energy security goals, the REPowerEU plan targets 35 billion cubic meters (bcm) of biomethane production by 2030. This article examines the status, challenges, and strategic pathways for biomethane uptake in seven EU regions using a structured SWOT-TOWS analysis. National assessments were developed under the GreenMeUp project, incorporating input from technical, policy, and market stakeholders. The study highlights common strengths such as available feedstock, biogas infrastructure, and pilot project experience, alongside barriers like fragmented legislation, weak support mechanisms, and limited grid access. Prioritized strategic actions address legal clarity, investment support, technological deployment, and public engagement. Findings point to the urgent need for coordinated EU and national efforts to scale a robust and equitable biomethane market.

1 Einleitung

Biomethan wird zunehmend als zentraler Bestandteil der Strategie der Europäischen Union (EU) zur Defossilisierung des Energiesystems anerkannt (European Biogas Association, 2024). Es unterstützt das Ziel der EU, die Treibhausgasemissionen bis 2030 um 55 % zu reduzieren (European Commission, 2021a) und bis 2050 klimaneutral zu werden (European Commission, 2021b). Im Jahr 2023 stieg die gesamte Produktion von Biogas – einschließlich Bio-

gas und Biomethan – in Europa auf 22,1 Milliarden Kubikmeter (bcm), was fast 7 % des Erdgasverbrauchs der EU entspricht. Dieses Wachstum ist auf verstärkte Investitionen und fördernde politische Rahmenbedingungen zurückzuführen, insbesondere in Ländern wie Frankreich und Italien, die über die Hälfte des Produktionszuwachses von 0,8 bcm ausmachten (European Biogas Association, 2024).

Als erneuerbares Gas bietet Biomethan eine vielseitige Lösung für unterschiedliche Anwendungsbereiche. Es kann fossiles Erdgas in bestehender Infrastruktur wie Pipelines, Heizsystemen und Industrieprozessen ohne größere Anpassungen ersetzen. Darüber hinaus wird Biomethan aus organischen Abfallstoffen hergestellt und trägt so zur Kreislaufwirtschaft und Abfallvermeidung bei. Seine Eigenschaft als flexibel einspeisbare Energiequelle ergänzt fluktuierende erneuerbare Energien wie Wind und Solar und stärkt die Netzstabilität.

Mit dem REPowerEU-Plan verfolgt die EU das ehrgeizige Ziel, bis 2030 jährlich 35 bcm Biomethan zu produzieren und damit auch die Energieversorgungssicherheit durch Diversifizierung der Bezugsquellen und Ausbau lokaler erneuerbarer Energieerzeugung zu erhöhen (European Commission, 2022). Die Erreichung dieses Ziels erfordert jedoch die Bewältigung systemischer Herausforderungen wie infrastruktureller Engpässe und regulatorischer Unsicherheiten. Dazu gehören einheitliche Zertifizierungsstandards, die Integration in bestehende Gasnetze sowie kohärente nationale Politiken zur Schaffung stabiler Marktbedingungen für Investitionen.

Dieser Artikel fasst eine strategische Analyse zur Beschleunigung der Marktdurchdringung von Biomethan zusammen, die im Rahmen des Horizon Europe Projekts GreenMeUp – Green Biomethane Market Uptake durchgeführt wurde. Im Fokus standen sieben Zielländer: Tschechien, Estland, Lettland, Griechenland, Spanien, Polen sowie die Donau-Region (Ungarn, Rumänien, Serbien). Mithilfe einer SWOT-TOWS-Analyse – einer Kombination aus der SWOT-Analyse (Strengths, Weaknesses, Opportunities, Threats) und der darauf aufbauenden TOWS-Matrix zur strategischen Ableitung von Maßnahmen – wurden länderspezifische Herausforderungen und Chancen identifiziert.

Die nachfolgenden Abschnitte stellen die angewandte Methodik vor und fassen die zentralen Ergebnisse zusammen. Detaillierte Einblicke finden sich im GreenMeUp Deliverable 2.2 (GreenMeUp Project, 2024b).

2 Methodik

Die in dieser Studie angewandte SWOT-TOWS-Analyse diente als strategischer Rahmen zur Bewertung von Stärken, Schwächen, Chancen und Risiken im Zusammenhang mit der Entwicklung des Biomethanmarkts in den sieben Zielstaaten. Die Analyse unterstützt ein integriertes Verständnis der jeweiligen Wettbewerbsvorteile und strukturellen Hemmnisse. Die anschließende TOWS-

Matrix (siehe Abb. 1) mit unterstützenden Leitfragen je Quadrant wurde genutzt, um passgenaue Strategien abzuleiten.

Die Methodik begann mit der Datenerhebung und der systematischen Ausarbeitung länderspezifischer SWOT-Matrizen. Grundlage hierfür waren zuvor entwickelte Projektergebnisse, darunter nationale Analysen zu Produktionspfaden und Anwendungsbereichen (GreenMeUp Project, 2024a), regulatorische Rahmenbedingungen (GreenMeUp Project, 2024d) sowie eine PESTEL-Analyse (politische, wirtschaftliche, soziale, technologische, ökologische und rechtliche Faktoren) die im Rahmen der Policy-, Markt- und Gesellschafts-Hubs des Projekts durchgeführt wurde (GreenMeUp Project, 2024c). Das DBFZ stellte eine standardisierte Vorlage bereit, um die SWOT-Bewertungen einheitlich zu strukturieren und die Vergleichbarkeit zwischen den Ländern zu gewährleisten. Die nationalen Partner nutzten eine TOWS-Matrix, um interne Stärken und Schwächen systematisch mit externen Chancen und Risiken zu verknüpfen. Auf dieser Grundlage wurden länderspezifische Strategien formuliert, die den vier klassischen TOWS-Quadranten (S-O, S-T, W-O, W-T) zugeordnet wurden (siehe Abb. 1).

TOWS Matrix		External factors	
		Opportunities	Threats
Internal factors	Strengths	SO How to exploit strengths to respond to the opportunities?	ST How to use strengths to mitigate threats?
	Weaknesses	WO How to prevent weaknesses to risk opportunities? How identified opportunities can remove weaknesses?	WT How to avoid weaknesses from enhancing the threats? How to minimize both weaknesses and threats?

Abb. 1: TOWS-Matrix und unterstützende Leitfragen zur Strategieentwicklung (GreenMeUp Project, 2024b).

Abschließend validierten und überarbeiteten die Länder ihre entwickelten Strategien im Rahmen nationaler Co-Creation-Workshops mit relevanten Stakeholdern im Juni und Juli 2024. Diese partizipativen Austauschformate dienten der Rückkopplung mit politischen Akteuren, Vertretern aus Wirtschaft und Gesellschaft und trugen zur Einschätzung der Umsetzbarkeit, der Zeithorizonte sowie möglicher Umsetzungspartner bei.

3 SWOT-TOWS-Analyse und priorisierte strategische Maßnahmen

Tschechische Republik

Die SWOT-Analyse identifizierte verschiedene Stärken, darunter die gut entwickelte Gasinfrastruktur der Tschechischen Republik, eine hohe Nachfrage nach Biomethan im Verkehrssektor – insbesondere für CNG-Fahrzeuge – sowie die Verfügbarkeit von Investitionszuschüssen und Betriebskostenförderung für erneuerbare Gasprojekte. Weitere Vorteile sind eine starke landwirtschaftliche Basis und über 600 bestehende Biogasanlagen, die eine solide Grundlage für die Umstellung auf Biomethan bieten. Als Schwächen wurden insbesondere die technologische Abhängigkeit vom Einsatz von Energiepflanzen, mangelnde Flexibilität bei Netzanschlussstandards, das Fehlen eines klaren Fördermechanismus für Biomethan sowie eine unzureichende Einbindung von Biomethan in strategische Energiepläne benannt. Zu den Chancen zählen die Modernisierung bestehender Anlagen, der Ausbau der Gasinfrastruktur in unterversorgten Regionen und sektorübergreifende Synergien mit Abfallwirtschaft und Mobilität. Als Bedrohungen wurden politische Unsicherheiten, wirtschaftliche Nachteile gegenüber fossilem Erdgas, langwierige Genehmigungsverfahren sowie unklare Regelungen zu Herkunftsnachweisen (GoO) und Netzeinspeisung erkannt.

Die fünf priorisierten strategischen Maßnahmen aus der SWOT-TOWS-Analyse für die Tschechische Republik sind:

- Aktualisierung des Nationalen Energie- und Klimaplan (NECP) mit verbindlichen Biomethanziele,
- Entwicklung und Umsetzung langfristiger Betriebs- und Investitionsförderprogramme,
- Förderung der Umrüstung bestehender Biogasanlagen auf Biomethanproduktion,
- Unterstützung des Aufbaus neuer Biomethananlagen in Verbrauchsnähe,
- Sicherstellung der Wettbewerbsfähigkeit von Biomethan durch wirtschaftliche Anreize wie Preisgarantien und Subventionen.

Diese Strategien bilden einen Fahrplan für kurz- bis langfristige Umsetzungszeiträume, um bestehende Kapazitäten zu sichern und weiteres Wachstum zu ermöglichen. Der NECP spielt hierbei eine zentrale Rolle, insbesondere bei der Förderung von Umrüstungen und der Schaffung von Infrastruktur für Endanwendungen wie Bio-CNG-Verkehrsknotenpunkte.

Ungarn (Donau-Region)

Die Analyse ergab Stärken in der bestehenden Infrastruktur sowie in der Verfügbarkeit von Biomassepotenzialen. Gleichzeitig wurden jedoch Herausforderungen identifiziert, darunter hohe Kosten für den Netzzugang, unzureichende Anreizmechanismen und eine schwache finanzielle Unterstützung. Als Chancen wurden die Bildung regionaler Biogaskluster, die Nutzung von EU-Agrarsubventionen und die Festlegung nationaler Biomethanziele hervorgehoben. Zu den Hauptrisiken zählen die mangelnde Wettbewerbsfähigkeit gegenüber fossilem Erdgas sowie das Fehlen von Anreizen zur Umrüstung von KWK-Anlagen (Kraft-Wärme-Kopplung) und zur Nutzung von grünem Gas.

Die fünf priorisierten strategischen Maßnahmen aus der SWOT-TOWS-Analyse für Ungarn sind:

- Ausarbeitung eines nationalen Aktionsplans für Biomethan,
- Einführung von Kostenbeteiligungsmodellen für Netzinfrastruktur,
- Umsetzung von Differenzverträgen (Contracts for Difference, CfD), um Biomethanpreise zu stabilisieren,
- Bereitstellung von Investitionshilfen (CAPEX) für zentrale Aufbereitungsanlagen,
- Festlegung nationaler Ziele für Biomethanproduktion und -verbrauch.

Diese Maßnahmen eignen sich für eine kurz- bis mittelfristige Umsetzung, sofern eine starke politische Unterstützung und regulatorische Anpassungen erfolgen. Der ungarische Ansatz stützt sich stark auf finanzielle Instrumente und institutionelle Verlässlichkeit, um einen tragfähigen Biomethanmarkt zu schaffen. Im Unterschied zu Rumänien und Serbien liegt in Ungarn der Fokus besonders auf ökonomischen Hebeln und der Finanzierung von Infrastruktur.

Rumänien (Donau-Region)

Die SWOT-Analyse hebt Rumäniens großes landwirtschaftliches Potenzial sowie die strategische Orientierung hin zur Kreislaufwirtschaft positiv hervor. Gleichzeitig wurden gravierende Herausforderungen identifiziert, insbesondere legislative Lücken, fehlende Investitionsanreize (CAPEX) und ein Mangel an politischer Aufmerksamkeit für das Thema Biomethan. Als Chancen wurden die Verfügbarkeit von nachhaltigen Substraten sowie Empfehlungen der EU zur Überarbeitung des Integrierten Nationalen Energie- und Klimaplan (NECP/PNIESC) genannt. Zu den Bedrohungen zählen der Widerstand lokaler Gemeinschaften sowie die faktische Ausklammerung von Biogas aus der nationalen Energiepolitik.

Die fünf priorisierten strategischen Maßnahmen aus der SWOT-TOWS-Analyse für Rumänien sind:

- Durchführung einer umfassenden Bewertung des nationalen Biomethanpotenzials,
- Integration von Biomethan in den überarbeiteten nationalen Energieplan und den PNIESC,
- Festlegung klarer und messbarer Ziele für Produktion und Verbrauch von Biomethan,
- Anpassung der Abfallwirtschaft an die Anforderungen der anaeroben Vergärung,
- Förderung der Nutzung von Gärresten und Rückgewinnung biogenen CO₂.

Diese strategischen Maßnahmen sind für eine kurz- bis mittelfristige Umsetzung vorgesehen und setzen eine enge Zusammenarbeit zwischen mehreren Ministerien sowie eine Abstimmung mit den EU-Politikempfehlungen voraus. Die Analyse betont, dass der Erfolg Rumäniens stark von einer kohärenten Politikgestaltung abhängt, die Biomethan in übergeordnete Strategien der Kreislaufwirtschaft und Abfallverwertung integriert.

Serbien (Donau-Region)

Die SWOT-TOWS-Analyse für Serbien basierte auf Konsultationen mit dem Serbischen Biogasverband sowie nationalen Stakeholdern im Rahmen von Interviews und Workshops. Zu den Stärken zählen ein qualifizierter Biogassektor und ein wachsendes Gasnetz. Demgegenüber stehen jedoch das Fehlen von Anreizsystemen, unklare gesetzliche Rahmenbedingungen und mangelnde Markttransparenz. Ein erheblicher Teil der verfügbaren Biomasse bleibt ungenutzt, insbesondere aufgrund hoher logistischer und technologischer Kosten. Als zentrale Barrieren wurden das Fehlen biomethanspezifischer Regulierungen und eine mangelnde interministerielle Koordination benannt.

Die fünf priorisierten strategischen Maßnahmen aus der SWOT-TOWS-Analyse für Serbien sind:

- Durchführung einer umfassenden Bewertung und Reform des bestehenden rechtlichen Rahmens,
- Einbindung von Biomethan in nationale Abfallwirtschafts- und Dekarbonisierungsstrategien,

- Ausarbeitung eines gezielten Anreizprogramms für die Nutzung biogener Abfälle zur Biomethanproduktion,
- Förderung der sektorübergreifenden Zusammenarbeit zwischen Energie-, Agrar- und Abfallwirtschaft,
- Öffentlichkeitsarbeit und Sensibilisierungskampagnen zur Stärkung der Akzeptanz von Biomethan.

Diese Strategien sind für eine kurz- bis mittelfristige Umsetzung vorgesehen, abhängig von der Entwicklung institutioneller Kapazitäten und einer besseren sektorübergreifenden Koordination. Der serbische Ansatz fokussiert auf den Aufbau eines unterstützenden Ökosystems durch politische Harmonisierung und sektorübergreifendes Engagement. Ziel ist es, Fragmentierungen zu überwinden und Biomethan als integralen Bestandteil der nationalen Nachhaltigkeitsagenda zu verankern.

Estland

Die SWOT-Analyse für Estland hebt mehrere zentrale Stärken hervor, darunter ein gut ausgebautes Netz an CNG-Tankstellen, bestehende Biomethananlagen sowie ein klar definierter Fahrplan für den Einsatz von Biomethan im Verkehrssektor. Zu den Schwächen zählen eine geringe Diversifizierung der Endanwendungen – mit starker Abhängigkeit vom Verkehrssektor –, fehlender internationaler Handel mit Herkunftsnachweisen für Biomethan sowie vergleichsweise hohe Betriebskosten für kleinere Anlagen. Als Chancen wurden die Ausweitung von Biomethananwendungen auf die Strom- und Wärmeerzeugung, die Nutzung überschüssiger Grünlandbiomasse sowie die stärkere Einbindung in lokale Kreislaufwirtschaftsmodelle erkannt. Bedrohungen ergeben sich insbesondere aus regulatorischer Unsicherheit, sinkender Wettbewerbsfähigkeit gegenüber fossilem Erdgas und dem Fehlen einer langfristigen politischen Perspektive für den Ausbau des Sektors.

Die fünf priorisierten strategischen Maßnahmen aus der SWOT-TOWS-Analyse für Estland sind:

- Schaffung eines regulatorischen Rahmens zur Förderung des grenzüberschreitenden Biomethanhandels und der Ausstellung von Herkunftsnachweisen (GoO),
- Ausweitung der Biomethannutzung über den Verkehrssektor hinaus auf Strom- und Wärmemärkte,
- Förderung des Biomethanverbrauchs in öffentlichen und privaten Fahrzeugflotten,

- Sensibilisierung der Öffentlichkeit für die Rolle von Biomethan in der Kreislaufwirtschaft,
- Unterstützung technologischer Innovationen wie der Verflüssigung von Biomethan (LBM) und der Verwertung von Gärresten.

Diese Maßnahmen sind für eine mittelfristige Umsetzung vorgesehen, sofern regulatorische Klarheit und passende Förderinstrumente geschaffen werden. Der estnische Ansatz betont vor allem die Diversifizierung der Einsatzbereiche sowie die breitere Integration von Biomethan in das nationale Energiesystem.

Griechenland

Zu den Stärken Griechenlands zählen insbesondere das hohe Potenzial an landwirtschaftlichen Reststoffen und tierischen Abfällen sowie die strategische Ausrichtung auf die Prioritäten der EU im Bereich erneuerbare Energien. Gleichzeitig offenbarten sich deutliche Schwächen, vor allem das vollständige Fehlen eines rechtlichen Rahmens für Biomethan, ein Mangel an technischer Expertise und Infrastruktur sowie eine fragmentierte Zusammenarbeit der relevanten Akteure. Als Chancen wurden die mögliche Rolle von Biomethan bei der Dekarbonisierung der Industrie und des Verkehrssektors, die Nutzung von EU-Fördermitteln für den Infrastrukturausbau sowie das Potenzial für eine dezentrale Energieversorgung identifiziert. Die wichtigsten Bedrohungen betreffen die geringe politische Priorisierung des Themas, den geringen Bekanntheitsgrad in der Bevölkerung sowie die starke Konkurrenz durch bereits etablierte erneuerbare Technologien.

Die fünf priorisierten strategischen Maßnahmen aus der SWOT-TOWS-Analyse für Griechenland sind:

- Einführung und Umsetzung eines nationalen rechtlichen Rahmens für Biomethan,
- Start von Pilotprojekten zur Demonstration und zum Kapazitätsaufbau,
- Integration von Biomethan in den Nationalen Energie- und Klimaplan (NECP),
- Informations- und Sensibilisierungsmaßnahmen für Behörden und Öffentlichkeit,
- Entwicklung finanzieller Förderinstrumente für Pionierprojekte und frühe Marktteilnehmer.

Diese Maßnahmen sind auf eine kurz- bis mittelfristige Umsetzung ausgelegt und hängen stark von der institutionellen Bereitschaft und der Verabschiedung

regulatorischer Grundlagen ab. Griechenland konzentriert sich in erster Linie auf den Aufbau grundlegender Strukturen, die eine schrittweise Marktöffnung für Biomethan ermöglichen sollen.

Lettland

Zu den Stärken Lettlands zählen ein relativ hohes technisches Potenzial durch die Verfügbarkeit von Gülle und landwirtschaftlichen Reststoffen sowie ein bestehendes Erdgasnetz und eine CNG-Infrastruktur. Als Schwächen wurden ein Mangel an wirtschaftlichen Anreizen, das Fehlen eines tragfähigen Fördersystems, unzureichende Logistikstrukturen für die Substratbereitstellung und eine geringe Zahl aktiver Marktakteure identifiziert. Chancen ergeben sich durch die Verknüpfung der Biomethanproduktion mit kommunalen und landwirtschaftlichen Abfallstrategien, die Stärkung der ländlichen Entwicklung sowie die Erschließung von Exportmöglichkeiten über das baltische Gasnetz. Zu den Risiken gehören inkonsistente politische Unterstützung, geringes öffentliches Vertrauen in Bioenergie und die Konkurrenz etablierterer erneuerbarer Energietechnologien.

Die fünf priorisierten strategischen Maßnahmen aus der SWOT-TOWS-Analyse für Lettland sind:

- Aufbau verlässlicher Fördermechanismen zur Förderung von Investitionen in die Biomethaninfrastruktur,
- Integration von Biomethanziele in nationale Strategien für erneuerbare Energien,
- Entwicklung regulatorischer Verfahren für den Netzzugang,
- Förderung von Partnerschaften zwischen Kommunen und Produzenten,
- Aufklärung der Öffentlichkeit über die ökologischen Vorteile von Biomethan.

Die vorgeschlagenen Maßnahmen sind kurzfristig umsetzbar, vorausgesetzt es erfolgt eine rechtliche und finanzielle Konsolidierung. Besonderes Augenmerk liegt auf der Dezentralisierung sowie auf der Zusammenarbeit zwischen kommunalen Akteuren und der Wirtschaft.

Polen

Die SWOT-Analyse zeigt zentrale Stärken wie langjährige Erfahrung im Biogassektor, starke technische und wissenschaftliche Kompetenz sowie laufende Pilotinitiativen mit EU-Kofinanzierung. Zu den Schwächen zählen das Fehlen einer spezifischen Gesetzgebung für Biomethan, fehlende strukturierte Anreize,

langwierige Genehmigungsverfahren und unzureichende Mechanismen für den Netzzugang. Chancen bestehen im großen Potenzial zur Biomethanerzeugung aus landwirtschaftlichen Reststoffen, in der Übereinstimmung mit den Zielen des Fit-for-55-Pakets und im Beitrag von Biomethan zur Dekarbonisierung des Verkehrssektors. Bedrohungen gehen von politischer Unsicherheit, häufigen regulatorischen Änderungen und der Preiskopplung an fossiles Erdgas aus.

Die fünf priorisierten strategischen Maßnahmen aus der SWOT-TOWS-Analyse für Polen sind:

- Finalisierung und Umsetzung eines gesetzlichen Rahmens zur Markteinführung von Biomethan,
- Entwicklung von Förderinstrumenten für Produktion und Verteilinfrastruktur,
- Förderung der Nutzung von CNG-/LNG-Fahrzeugen durch steuerliche Anreize,
- Positionierung von Biomethan als strategischer Energieträger in nationalen Planungen,
- Einrichtung zentraler Anlaufstellen für Projektgenehmigungen und -finanzierung.

Der polnische Ansatz setzt auf regulatorische Sicherheit und die Einbindung des Verkehrssektors, wobei eine mittelfristige Umsetzung mit EU-Finanzierung angestrebt wird.

Spanien

Zu den Stärken Spaniens zählen ein breites Spektrum an verfügbaren Substraten, bestehende Biomethanprojekte, ein aktives wissenschaftliches Netzwerk sowie neue gesetzliche Regelungen zur Biomethaneinspeisung und Zertifizierung. Als Schwächen wurden uneinheitliche politische Maßnahmen auf regionaler Ebene, langsame Genehmigungsverfahren, eine begrenzte Zahl an Einspeisepunkten sowie fragmentierte Verwaltungsstrukturen identifiziert. Chancen ergeben sich durch die Ausweitung der Biomethanverwendung in Verkehrs- und Industriesektoren, den Aufbau von Exportkapazitäten sowie die Integration von Biomethan in nationale Strategien zur Resilienzsteigerung. Bedrohungen bestehen durch hohe Verwaltungshürden, geringen Bekanntheitsgrad bei Stakeholdern und regulatorische Inkonsistenzen zwischen den autonomen Regionen.

Die fünf priorisierten strategischen Maßnahmen aus der SWOT-TOWS-Analyse für Spanien sind:

- Entwicklung eines national einheitlichen Rahmens für Netzzugang und Einspeisetarife,
- Förderung von Biomethan-Hubs zur Bündelung von Produktion und Nachfrage,
- Umsetzung koordinierter regionaler Programme zur Unterstützung des Markthochlaufs,
- Förderung von Investitionen durch öffentlich-private Partnerschaften,
- Standardisierung der Verfahren für Umweltgenehmigungen und Zertifizierung.

Die vorgeschlagenen Maßnahmen sind kurz- bis mittelfristig umsetzbar und zielen darauf ab, die Koordination zwischen nationaler und regionaler Ebene zu verbessern sowie Produktion und Nutzung von Biomethan zu skalieren.

4 Ausblick und zentrale Handlungsprioritäten

Die Ergebnisse der SWOT-TOWS-Analysen zeigen deutlich, dass sich die strategischen Herausforderungen und Chancen für Biomethan in Europa zwar national unterschiedlich ausprägen, jedoch strukturelle Gemeinsamkeiten bestehen. Zu den häufigsten Stärken zählen vorhandene Biogasinfrastrukturen, Substratverfügbarkeit und wachsendes technisches Know-how. Gleichzeitig sind Schwächen wie regulatorische Unsicherheiten, fehlende Anreize, begrenzter Netzzugang und geringe öffentliche Sichtbarkeit in nahezu allen Ländern vorhanden.

Auf Grundlage dieser Erkenntnisse lassen sich drei übergreifende Handlungsprioritäten für die EU und ihre Mitgliedstaaten ableiten:

(1) Regulatorische Klarheit und Kohärenz schaffen – Einheitliche und transparente gesetzliche Rahmenbedingungen sind Voraussetzung für Investitionssicherheit und Marktintegration. Dazu zählt auch die Harmonisierung von Herkunftsnachweisen und Einspeiseregelungen.

(2) Gezielte Förderinstrumente bereitstellen – Maßgeschneiderte finanzielle Anreize für die Umrüstung bestehender Biogasanlagen, den Neubau von Biomethanproduktionseinheiten und die Netzanbindung müssen langfristig verlässlich ausgestaltet werden.

(3) Akteursübergreifende Kooperation stärken – Die Umsetzung erfolgreicher Strategien erfordert koordinierte Maßnahmen zwischen Energie-, Agrar-,

Umwelt- und Verkehrssektor sowie ein hohes Maß an Stakeholder-Einbindung auf nationaler und regionaler Ebene.

Mit diesen prioritären Maßnahmen kann Biomethan zu einem tragenden Pfeiler der europäischen Energiewende und Versorgungssicherheit werden – insbesondere im Kontext des REPowerEU-Ziels von 35 Milliarden Kubikmetern bis 2030.

Literaturverzeichnis

- European Biogas Association (2024). EBA Statistical Report 2024. Verfügbar unter: <https://www.europeanbiogas.eu/eba-statistical-report-2024>
- European Commission (2019). The European Green Deal. COM(2019) 640 final. Brussels. Verfügbar unter: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A52019DC0640>
- European Commission (2021a). 'Fit for 55': delivering the EU's 2030 Climate Target on the way to climate neutrality. COM(2021) 550 final. Brussels. Verfügbar unter: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:52021DC0550>
- European Commission (2021b). European Climate Law. Regulation (EU) 2021/1119. Verfügbar unter: <https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2021/1119/oj>
- European Commission (2022). REPowerEU Plan. COM(2022) 230 final. Brussels. Verfügbar unter: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:52022DC0230>
- GreenMeUp Project (2024a). Deliverable D2.1 – Overview of production routes and end-uses of renewable gases and existing policy frameworks in the Target European countries (Czech Republic, Estonia, Greece, Latvia, Poland, Spain and a Danube Region of Backa and Banat). Horizon Europe GreenMeUp Project. Verfügbar unter: <https://www.greenmeup-project.eu/wp-content/uploads/2024/07/D2.1.pdf>
- GreenMeUp Project (2024b). Deliverable D2.2 – SWOT Analysis in Target Countries. Horizon Europe GreenMeUp Project. Verfügbar unter: <https://www.greenmeup-project.eu/results/#deliverables>
- GreenMeUp Project (2024c). Deliverable D3.2 – Report on co-creation actions in the 7 target countries. Horizon Europe GreenMeUp Project. Verfügbar unter: <https://www.greenmeup-project.eu/wp-content/uploads/2024/07/D3.2.pdf>
- GreenMeUp Project (2024d). Deliverable D4.1 – Policy Requirements for Biomethane Market Uptake. Horizon Europe GreenMeUp Project. Verfügbar unter: <https://www.greenmeup-project.eu/wp-content/uploads/2024/07/D4.1.pdf>

Kontakt

Laura García Laverde, Stv. AGL Biomasse im Energiesystem

DBFZ - Deutsches Biomasseforschungszentrum gGmbH

☎ +49 (0)341.2434-604 | ✉ laura.garcia@dbfz.de | 🌐 www.dbfz.de

Kombinierte Vergärung von vorbehandelten stickstoffhaltigen Wirtschaftsdüngern

Zusammenfassung: Die anaerobe Vergärung von Wirtschaftsdüngern wie Schweinegülle oder Festmist birgt ein hohes Potenzial zur Erzeugung erneuerbarer Energie und kann somit einen wertvollen Beitrag für einen nachhaltigen Umweltschutz leisten. Allerdings stellen die Substrateigenschaften wie hohe Stickstoffgehalte oder ein hoher Faseranteil die Verfahrenstechnik oftmals vor Herausforderungen, sodass sich ein flächendeckender Einsatz bisher insbesondere aus Gründen der Wirtschaftlichkeit nicht durchsetzen konnte. Vor diesem Hintergrund wird im Rahmen des Forschungsprojekts „KombiWirt“ eine Verfahrenskette zur Aufbereitung und kombinierten Vergärung von Wirtschaftsdüngern mit hohen Stickstoffkonzentrationen und Faseranteilen untersucht. Als wesentliche Behandlungsschritte stehen die fraktionierte Eindampfung in Kombination mit einer Ammoniakbeize im Fokus. Erste Ergebnisse aus Untersuchungen im Labor- sowie Technikumsmaßstab zeigen für Schweinegülle einen Methanmehrertrag von 58 % bei vorheriger Stickstoffentfrachtung durch fraktionierte Eindampfung. Für den Faseraufschluss durch Ammoniakbeize von Stroh konnte ein Mehrertrag von 42 % ermittelt werden. Weitere Untersuchungsziele des Projekts sind ein Vergleich der Wirtschaftlichkeit mit dem Stand der Technik sowie eine Quantifizierung potenzieller Einsparmöglichkeiten für CO₂-Emissionen.

Abstract: Anaerobic digestion of agricultural residues such as pig slurry or solid manure has a high potential for generating renewable energy and can therefore make a valuable contribution to a sustainable protection of the environment. However, substrate characteristics such as high nitrogen and fibre content often pose major challenges for process engineering, meaning that widespread use has not been possible yet, particularly for economic reasons. Against this background, the research project “KombiWirt” is investigating a process chain for the treatment and combined fermentation of farm manure with high nitrogen concentrations and fibre content. The main treatment steps are fractional evaporation in combination with aqueous ammonia soaking. Initial results from investigations on a laboratory and pilot plant scale show an additional methane yield of 58 % for pig slurry with prior nitrogen removal by fractional evaporation. For the decomposition of fibres due to aqueous ammonia soaking of straw, an additional methane yield of 42 % compared to untreated substrate was determined. Further aims of the project are to compare the economic efficiency with the state of the art and to quantify potential savings of CO₂ emissions.

1 Einleitung

1.1 Ausgangslage

Die Vergärung von Wirtschaftsdüngern bietet zwar potenziell eine Möglichkeit zur energetischen Verwertung des Methans (CH₄) in Form von Biogas und damit auch zur Reduktion von Treibhausgasemissionen, jedoch ergeben sich auf-

grund der Substrateigenschaften nur selten wirtschaftlich selbsttragende Konzepte. So ist z.B. bei roher Gülle der spezifische Methanertrag sehr niedrig, bei rohem Festmist stellen die Faserstoffe eine Herausforderung für die Verfahrenstechnik dar, bei Substraten wie Hühnertrockenkot ist der Stickstoffgehalt kritisch und geht mit Hemmungen der anaeroben Biozönose einher.

Neben den Vorteilen der energetischen Verwertung birgt die Vergärung von Wirtschaftsdüngern auch Potenziale zur Senkung von Treibhausgasemissionen. Im Zeitraum März 2019 bis Februar 2020 wurden in Deutschland etwa 209,2 Mio. t Wirtschaftsdünger auf Ackerland bzw. Dauergrünland ausgebracht (DESTATIS, 2021). Im nationalen Inventarbericht zum Deutschen Treibhausgasinventar wird u.a. das Wirtschaftsdünger-Management mit einem Ausstoß von etwa 9,3 Mio t CO₂-äq für den Landwirtschaftszweig als eine Hauptemissionskategorie genannt. Die Treibhausgasemissionen resultieren hierbei vornehmlich aus CH₄ (66 %) und Lachgas (N₂O, 34 %) (Umweltbundesamt, 2020).

CH₄-Emissionen entstehen größtenteils während der Lagerung von Wirtschaftsdünger infolge der mikrobiellen Umsetzung organischer Substanz bei anaerober Umgebung. N₂O-Emissionen resultieren einerseits direkt aus Nitrifikations- und Denitrifikationsprozessen während der Lagerung, andererseits auch indirekt infolge von Umsetzungsprozessen in Böden aus reaktivem Stickstoff sowie infolge von Stickstoffauswaschung oder Oberflächenabfluss.

Durch die anaerobe Vergärung lassen sich Minderungspotentiale von mehr als 70 % bezogen auf das aus CH₄-Emissionen resultierende Treibhausgasaufkommen erreichen (Jayasundara, 2011; Dämmgen et al., 2014). Im Jahr 2016 wurden jedoch nur lediglich 17 % der in Deutschland angefallenen Gülle vergoren.

Im Rahmen des Forschungsprojekts „KombiWirt“ (FKZ 2222WD005A) soll im Verbund mit dem Institut für Siedlungswasserwirtschaft und Abfalltechnik der Leibniz Universität Hannover (ISAH) das Potenzial einer neuen Vorbehandlungskette im Labor- und Technikumsmaßstab quantitativ untersucht werden. Das Ziel des neuen Ansatzes der Substrataufbereitung ist die Steigerung der Wirtschaftlichkeit der gesamten Verfahrenskette bei kombinierter Vergärung von Wirtschaftsdüngern und Reststoffen, sodass ein flächendeckender Einsatz für Betreiber attraktiver wird.

1.2 Technologischer Lösungsansatz

Zur Implementierung der großflächigen Vergärung von Wirtschaftsdüngern ist es notwendig, den spezifischen Methanertrag von schwierigen Einsatzstoffen (z.B. Gülle und Festmist) zu steigern und den Stickstoffgehalt im Input gezielt zu kontrollieren. Einen vielversprechenden Lösungsansatz bietet die Vorbehandlung mittels fraktionierter Eindampfung in Kombination mit der Ammoniak-Beize (aqueous ammonia soaking – AAS) (Lymperatou et. al., 2021).

Die fraktionierte Eindampfung zur Behandlung von Gärresten wurde 2014 am ISAH entwickelt, zwischen 2018 und 2020 durch die BIORESTEC GmbH zur Marktreife gebracht sowie in 2022, in Zusammenarbeit mit der agriKomp GmbH, großtechnisch umgesetzt (Stopp et al., 2014). Das Verfahren zeichnet sich durch eine gezielte Fraktionierung der Brüden aus der Eindampfung von stickstoffhaltigen Inputstoffen aus. Dadurch kann Ammoniak in einer separaten Fraktion mit einer Konzentration von 4-8 % – in Form von Ammoniakwasser aufgefangen werden.

Das erhaltene Ammoniakwasser kann externen Zwecken zugeführt werden (z.B. Rauchgasreinigung oder als Grundchemikalie), aber auch für eine Vorbehandlung von faserreichen Wirtschaftsdüngern mittels AAS genutzt werden. Ausgehend von Literaturwerten kann mit einem Mehrertrag von 38 % gerechnet werden. Geeignet für diese Vorbehandlung wäre z.B. Stroh, die bei der Gülleseparation anfallende Feststoffphase oder auch Festmist. Insbesondere mit dem Einsatz von Festmist könnte eine sehr kostengünstige Substratquelle erschlossen werden.

2 Halbtechnische Versuche zur Vorbehandlung von Wirtschaftsdüngern

Im Rahmen von halbtechnischen Versuchen wurde Schweinegülle nach dem Prinzip der fraktionierten Eindampfung behandelt und das resultierende Konzentrat anschließend durch das ISAH in Gärversuchen hinsichtlich des Methanmehrertrages untersucht.

Die Untersuchungen zur Ammoniakbeize erfolgten zunächst im Labor, um auf dieser Grundlage Versuchseinstellungen für den Technikumsmaßstab zu ermitteln. Vor der Durchführung von Gärversuchen des gebeizten Strohs war zunächst eine Stickstoffentfrachtung erforderlich, welche in der Halbtechnik in einem Schneckenrockner erfolgte. Hierbei wurde gleichzeitig das Rückgewinnungspotenzial für das eingesetzte Ammoniakwasser untersucht.

2.1 Fraktionierte Eindampfung

Die mobile Versuchsanlage zur fraktionierten Eindampfung ist in Abb. 1 dargestellt. Die Anlage besteht im Wesentlichen aus einem beheizten Rührwerksbehälter mit einem gekühlten Rohrbündelwärmetauscher, in welchem das Substrat unter atmosphärischem Druck zum Sieden gebracht wird. Der entstehende Dampf steigt über einen mit Füllkörpern besetzten Dephlegmatoraufsatz oberhalb des Behälters auf, hin zu einem wassergekühlten Rohrbündelwärmetauscher, wo er kondensiert und in einem Probenbehälter gesammelt wird. Die Eindampfung erfolgte mit einer Inputmenge von jeweils 40 kg bis zu einer Volumenreduzierung von 60 %. Mit dem resultierenden Konzentrat wurden im Anschluss Gärversuche im Labor durchgeführt. Weitere Analysen umfassten die

Leitfähigkeit, den (organischen) Trockenrückstand und die Konzentration des Ammoniumstickstoffs jeweils im unbehandelten Substrat sowie im Konzentrat.

2.2 Ammoniakbeize mit anschließender Stickstoffrückgewinnung

Die Ammoniakbeize des Substrates erfolgte in einer Ammoniaklösung, welche in einer Aufbereitungsanlage für Gärreste einer landwirtschaftlichen Biogasanlage erzeugt wurde. In den Laborversuchen wurde für eine gleichmäßige Benetzung der Feststoffe ein Schüttelverfahren nach DIN 19529 (Elution/Perkolation anorganischer und organischer Schadstoffe) verwendet. Die Probenbehälter waren dabei an einem drehbaren Rahmen befestigt und wurden durch einen Motor kontinuierlich bewegt, wodurch Ablagerungen verhindert und die Ammoniakaufnahme optimiert wurde. Die Stickstoffrückgewinnung vor den Gärversuchen erfolgte hierbei in einem Rotationsverdampfer.

Für die halbertechnischen Versuche wurden basierend auf den zuvor im Labor ermittelten Versuchseinstellungen 20 kg Weizenstroh für einen Zeitraum von zehn Tagen in 100 kg Ammoniakwasser mit einem Gehalt von 17,5 Gew.-% NH_3 gebeizt. Die Beize wurde in Fässern durchgeführt, wobei die Umwälzung manuell erfolgte. Die anschließende Stickstoffentfrachtung erfolgte durch Trocknung in einem Schneckenrockner (siehe Abb. 1). Die Beheizung erfolgte mit Thermalöl bei einer Trocknungstemperatur von 110 °C.



Abb. 1: Versuchsanlage zur fraktionierten Eindampfung (links) und zur Trocknung von Stroh mit Ammoniakrückgewinnung (rechts)

3 Ergebnisse

3.1 Fraktionierte Eindampfung

In Tab. 1 sind die Ammoniumkonzentrationen und pH-Werte der untersuchten Substrate sowie der resultierenden Konzentrate zusammengefasst. Der pH-Wert ist hierbei maßgeblich für den Ammoniakanteil im Substrat infolge des

Dissoziationsgleichgewichtes von NH_3 und NH_4^+ . Bei zunehmendem pH-Wert liegt ein höherer Anteil als gasförmiges NH_3 vor, was sich günstig auf die Überführung des Stickstoffs in das Kondensat auswirkt.

Tab. 1: $\text{NH}_4\text{-N}$ -Konzentrationen und pH-Werte der untersuchten Schweinegülle

	Schweinegülle 1	Schweinegülle 2	Schweinegülle 3
Rohsubstrat			
$\text{NH}_4\text{-N}$ [g/L]	2,63	1,38	4,58
pH-Wert	7,40	6,96	6,85
Konzentrat			
$\text{NH}_4\text{-N}$ [g/L]	0,25	0,21	3,20
pH-Wert	6,86	6,86	6,27
Entfrachtung [% $\text{NH}_4\text{-N}$]	96,0	94,0	72,0

Für Schweinegülle 1 und 2 konnte bei 60 %-iger Volumenreduzierung eine Entfrachtung des Ausgangsmaterials um 96 bzw. 94 % erzielt werden. Bei Gülle 3 betrug die Entfrachtung hingegen nur 72 %, was auf den vergleichsweise niedrigen pH-Wert zurückgeführt werden kann. Für eine großtechnische Anwendung ist in einem solchen Fall eine Anhebung des pH-Werts durch Zugabe von bspw. Natronlauge oder Kalkmilch denkbar. Die schlechtere Überführung des Stickstoffs bei abnehmenden pH-Werten kann ebenfalls den im Kondensat gemessenen Leitfähigkeitswerten in Abb. 2 entnommen werden. Die Leitfähigkeit steht dabei substratspezifisch in Korrelation mit der Ammoniumkonzentration und diente während den Versuchen als Ersatzparameter.

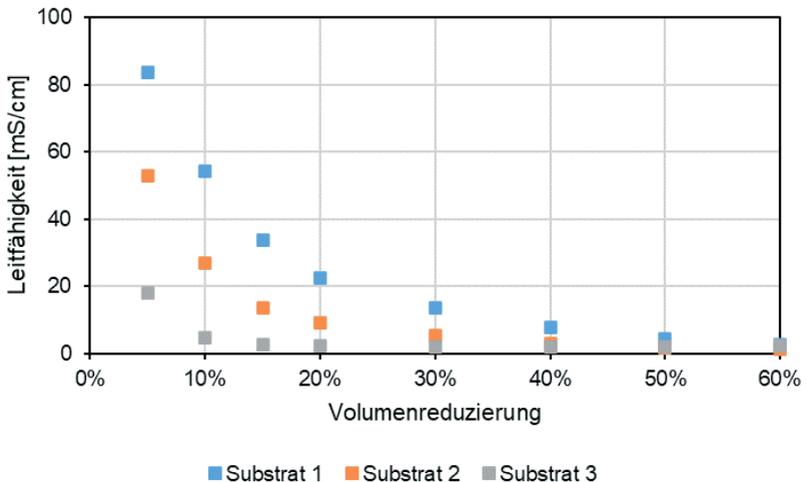


Abb. 2: Leitfähigkeitswerte in den Kondensaten nach Eindampfung von Schweinegülle

3.2 Ammoniakbeize mit anschließender Stickstoffrückgewinnung

In vorangegangenen Laborversuchen wurde ein Optimum bei einer Versuchseinstellung mit einer Ammoniakkonzentration von 17,5 Gew.-% und einer Behandlungsdauer von 10 Tagen ermittelt. Bei dem dabei gewählten Verhältnis von 1:5 (Feststoff zu Flüssigkeit) resultierte für den Batchversuch in der Halbtechnik eine Behandlungsmenge von 20 kg Stroh in 100 kg Ammoniakwasser.



Abb. 3: Austrag des Schneckenrockners mit getrocknetem, gebeiztem Stroh

Die anschließende Auswertung des Versuchs erfolgte über die Massen im Input und Output des Schneckenrockners sowie die jeweiligen TR-Gehalte. Bedingt durch die Limitierungen des halbtechnischen Versuchsaufbaus konnte nicht das gesamte im gebeizten Stroh enthaltene Ammoniakwasser aufgefangen werden. Ein Teil wurde mechanisch durch die Schnecke ausgepresst und ist über den Austrag ausgelaufen. Ein weiterer Teil ist sichtbar über den Austrag ausgedampft. Ein signifikanter Anteil konnte jedoch zurückgewonnen und analysiert werden. Die Trocknungsbilanz kann Tabelle 2 entnommen werden.

Die Ergebnisse zeigen, dass die Stickstoffrückgewinnung des gebeizten Strohs als Ammoniaklösung möglich ist. Die erzielte Konzentration von 25 % NH_3 entspricht dabei handelsüblichen technischen Ammoniaklösungen. Für die im Rahmen von KombiWirt zu konzipierende Verfahrenskette kann dieser Stoffstrom in den Prozess zurückgeführt und zur Beize weiterer Substrate wiederverwendet werden. Bei einer großtechnischen Umsetzung sind im Vergleich zu der halbtechnischen Versuchsanlage zudem gezielte Einstellungen mit hoher Varianz des Trocknungsprozesses möglich, z.B. eine längere Aufenthaltszeit oder emissionsdichte Verschlüsse am Ein- und Austrag. Bei einer großtechnischen Anlage ist davon auszugehen, dass kein signifikanter Ammoniakverlust entsteht.

Nach dem Trocknungsprozess war kein signifikanter Ammoniakgeruch am gebeizten Stroh mehr wahrnehmbar. In den anschließend durchgeführten Gasertragstests wurde bei den getrockneten Substraten keine Ammoniakhemmung festgestellt, so dass die Stickstoffrückgewinnung mittels Schneckenrockner als erfolgreich und praxistauglich bezeichnet werden kann.

Tab. 2: Trocknung von gebeiztem Stroh

TR Stroh, unbehandelt %	TR Stroh, gebeizt %	TR Stroh, getrocknet %	NH ₃ -N Kondensat g/L
93	16	45	250

3.3 Gärversuche

In Abb. 4 sind für die Substrate 1 und 2 die resultierenden Biogaserträge aus den Gärversuchen mit unbehandelter Gülle sowie den Konzentraten nach Eindampfung dargestellt. Für beide Substrate konnte ein Methanmehrertrag von etwa 58 % erzielt werden. Für das unbehandelte Substrat 1 ist zudem eine Hemmung zu Beginn des Gärversuchs zu beobachten, wobei der maximale Ertrag erst ab Tag 36 erreicht wird. Für das Konzentrat kann das Maximum infolge der Stickstoffentfrachtung bereits nach 18 Tagen erreicht werden.

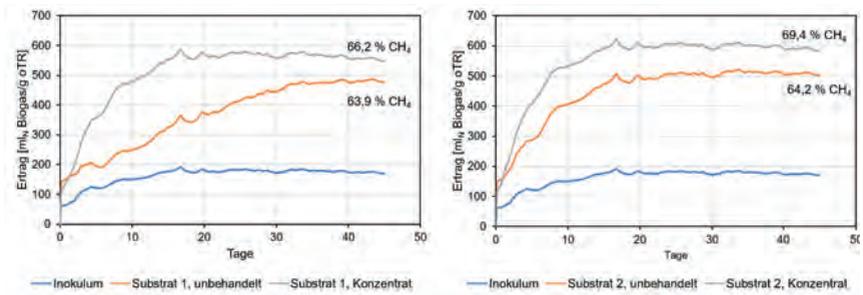


Abb. 4: Biogaserträge nach Eindampfung von Schweinegülle

Im Vergleich dazu weist Substrat 2 bereits im unbehandelten Zustand eine geringere Stickstoffkonzentration auf, sodass hier ein niedrigerer Einfluss der Hemmwirkung zu beobachten ist. Allgemein kann zwischen den Substraten und den daraus generierten Konzentraten sowohl eine deutliche Steigerung des Methanertrags, als auch eine verbesserte Kinetik der Methanbildung beobachtet werden.

Abb. 5 zeigt die kumulative Methanproduktion (mL CH₄/g oTR) über die Zeit für Weizenstroh, welches einer Ammoniakbeize unter verschiedenen Bedingungen unterzogen wurde. Unterschiedlich farbige Linien entsprechen den Proben, die mit verschiedenen Ammoniakkonzentrationen (5, 10, 17,5 und 25 Gew.-% NH₃)

und Einweichzeiten (4, 10 und 16 Tagen) behandelt wurden sowie der unbehandelten Kontrollprobe (Probe 13). Die Ergebnisse zeigen im Allgemeinen, dass die Methanproduktion infolge der Ammoniakbeize deutlich erhöht werden kann. Die Ausbeute steigt dabei mit zunehmender Konzentration und Behandlungsdauer. Auffällig ist zudem das deutlich schnellere Erreichen des Maximums aller Proben im Vergleich zur Kontrollprobe ohne Behandlung. Neben der Erhöhung des absoluten CH_4 -Ertrags ist somit potenziell auch eine Verringerung der Aufenthaltszeit im Fermenter möglich.

Für die halbertechnischen Versuche konnte anhand von Probe 7 abgeleitet werden, dass bei einer Konzentration von 17,5 Gew.-% NH_3 und einer Behandlungsdauer von 10 Tagen ein nahezu gleich hoher Ertrag erzielt werden kann wie bei Probe 12, welche der Einstellung mit dem höchsten NH_3 -Gehalt sowie der längsten Einwirkzeit entsprach. Nach Literaturangaben wird für unbehandeltes Stroh bei einer Vergärungsdauer zwischen 17 bis 21 Tagen etwa 65 % der maximalen Methanausbeute erreicht (Lymeratou et al., 2020). Bei einer Annahme von 17 Tagen als Referenzpunkt konnte bei Probe 7 im Vergleich zur Kontrollprobe ein Mehrertrag von 42,3 % erzielt werden.

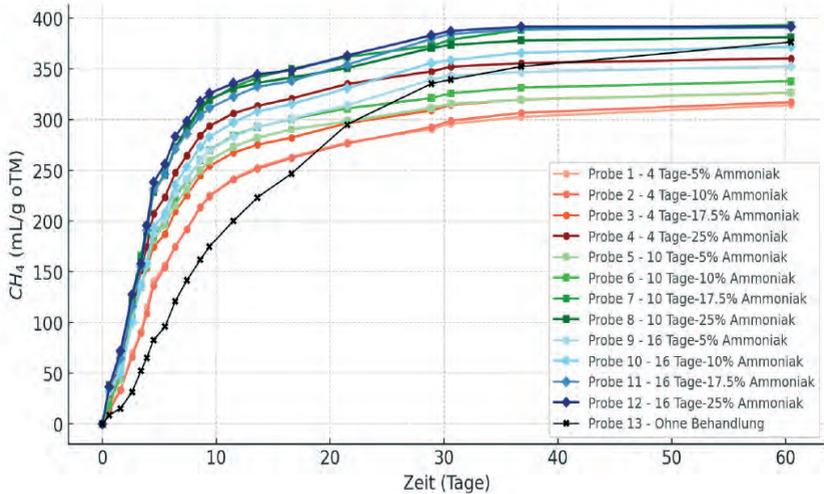


Abb. 5: Methanerträge von Weizenstroh nach AAS-Behandlung (Darstellung ISAH)

4 Fazit und Ausblick

Bei der Eindampfung von Schweingülle konnte eine Entfrachtung von bis zu 96 % der ursprünglichen Ammoniumfracht im Originalsubstrat erzielt werden. Allerdings ist bei Substraten mit niedrigem pH-Wert ggf. eine vorherige Anhebung durch Zugabe von z.B. Natronlauge oder Kalkmilch erforderlich, um das Disso-

ziationsgleichgewicht in Richtung NH_3 zu verschieben. Bei den anschließenden Gasertragstests konnte infolge der Stickstoffentfrachtung ein relevanter Mehrertrag von etwa 58 % ermittelt werden.

Die halbtechnischen Versuche zur Ammoniakbeize von Stroh und anschließenden Trocknung haben gezeigt, dass eine Rückgewinnung des Stickstoffs als hochkonzentrierte Ammoniaklösung während des Prozesses möglich ist. Der Schneckentrockner hat sich hinsichtlich der Förderfähigkeit für das Substrat ebenfalls als geeignet erwiesen. Der Output konnte weitgehend vom Ammonium-Stickstoff entfrachtet werden, so dass keine Hemmung bei der Vergärung auftritt. Zudem konnten analog zur Schweinegülle auch für das Weizenstroh relevante Methanmehrträge ermittelt werden.

Basierend auf den Ergebnissen erfolgt im weiteren Projektverlauf eine Stoff- und Energiebilanz für eine großtechnische Modellanlage. Hierbei werden unterschiedliche Szenarien mit verschiedenen Substraten und Kombinationen der betrachteten Vorbehandlungstechniken berücksichtigt. Neben der Wirtschaftlichkeit sollen außerdem Potenziale zur Einsparung von CO_2 -Emissionen aufgezeigt werden.

Literatur/Quellen

- Dämmgen, U.; Müller, J.; Müller, S. (2014): Szenarien der Emissionsminderung in der thüringischen Mastschweineproduktion, Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft
- DESTATIS (2021): Landwirtschaftliche Betriebe und Menge an Wirtschaftsdünger auf Ackerland oder Dauergrünland ausgebracht haben, nach Düngerarten, <https://www.destatis.de/DE/Themen/Branchen-Unternehmen/Landwirtschaft-Forstwirtschaft-Fischerei/Produktionsmethoden/Tabellen/landwirtschaftliche-betriebe-wirtschaftsduenger.html>, aufgerufen am 15.04.2025
- Jayasundara, S.; Vanderzaag, A. C. (2011): Potential for reducing methane emissions from manure management using anaerobic digestion in Ontario dairy cattle sector, Conference paper, 5th Annual Growing the Margins Conference
- Lymperatou, A.; Gavala, H. N.; Skiadas, I. (2020): Aqueous Ammonia Soaking of Wheat Straw at Ambient Temperature for Enhancing the Methane Yield: Process Optimization by Response Surface Methodology, *Waste and Biomass Valorization* (2020) 11:4821-4835
- Lymperatou, A.; Rasmussen, N. B.; Gavala, H. N.; Skiadas, I. (2021): Improving the Anaerobic Digestion of Swine Manure through an Optimized Ammonia Treatment: Process Performance, Digestate and Techno-Economic Aspects, *Energies* 2021, 14, 787
- Stopp, P.; Weichgrebe, D., Voss, E., Rosenwinkel, K.-H. (2014): Verfahren zur Abtrennung von stickstoffreichen und stickstoffarmen Kondensatfraktionen und Vorrichtung zum Erhalt hiervon, Patentanmeldung DE 10 2014 111 821
- Umweltbundesamt (2020): Nationaler Inventarbericht zum Deutschen Treibhausgasinventar 1990-2018

Kontakt

*Dr.-Ing. Paul Stopp, Geschäftsführer,
Dipl.-Ing. Jakub Krajewski, Projektingenieur*

BIORESTEC GmbH

☎ +49 (0)511.546 110 02 | ✉ info@biorestec.de | 🌐 www.biorestec.de

FACHFORUM

ORGANISCHE ABFÄLLE

Vorstellung eines neuen Verfahrens zur Hochtemperaturpyrolyse und -vergasung von organischen Rest- und Abfallstoffen

Zusammenfassung: Die Substitution fossiler Energieträger durch Nutzung regional anfallender biogener Rest- und Abfallstoffe zur Erzeugung von erneuerbaren Brenngasen für den Betrieb kleinerer dezentraler Industrieanlagen ist weiterhin von besonderem Interesse. Insbesondere Pyrolyse- und Vergasungsverfahren für Biomassen konnten bisher in nur sehr begrenztem Umfang in kommerziellen Anlagen umgesetzt werden. Im Vorhaben wurde ein neues Reaktorkonzept entwickelt und untersucht, in dem die bisherigen Probleme bestehender Verfahrensansätze vermieden werden sollen. Ziele des Forschungsvorhabens bestanden in der Planung, dem Aufbau und erfolgreichem Versuchsbetrieb einer Pilotanlage zur Hochtemperaturpyrolyse im Technikumsmaßstab. In umfangreichen Testläufen wurden Betriebsverhalten, Konversionsraten und Produktgasqualitäten unterschiedlicher Biomassen unter variierenden Prozessbedingungen untersucht und bewertet.

Abstract: Title: „New process for high-temperature pyrolysis and gasification of organic residues and waste materials.“ The substitution of fossil fuels by utilizing regionally available biogenic residues and waste materials to generate renewable fuel gases for the operation of smaller, decentralized industrial plants remains of particular interest. Pyrolysis and gasification processes for biomass, in particular, have so far only been implemented to a very limited extent in commercial plants. The project developed and investigated a new reactor concept that aims to avoid the problems associated with existing process approaches. The objectives of the research project were planning, construction, and successful test operation of a pilot plant for high-temperature pyrolysis on a technicum plant scale. In extensive test runs, the operating behavior, conversion rates, and product gas qualities of different biomasses were investigated and evaluated under varying process conditions.

1 Einleitung, Projektidee und Zielsetzung

Die thermochemischen Konversationsverfahren Pyrolyse und Vergasung zur Strom- und Wärmeerzeugung aus biogenen Rest- und Abfallstoffen werden bereits seit vielen Jahren untersucht und weiterentwickelt, kommerziell rentable Anwendungen hingegen konnten sich bisher aufgrund nach wie vor bestehender technologischer und logistischer Schwierigkeiten bei Prozessführung und Produktverwertung nur in geringem Umfang etablieren. Wesentliche Ursachen liegen auf technologischer Seite häufig in einer unzureichenden Produktgasqualität und auftretenden Anlagenstörungen aufgrund hoher Gehalte an hochmolekularen organischen Verbindungen (Teerproblematik), deren Vermeidung eine relativ komplexe Anlagentechnik erfordert, sowie auf logistischer Seite oftmals in der

fehlenden regionalen Verfügbarkeit von geeigneten Einsatzstoffen sowie fehlenden Abnehmern für Pyrolyseprodukte oder Prozesswärme begründet.

Die Fa. Wahrheit Anlagenbau GmbH aus Rhaderfehn ist spezialisiert auf die Entwicklung, Konstruktion und Fertigung von Gasreinigungsanlagen, schwerpunktmäßig von Thermischen Nachverbrennungsanlagen (TNV, RTO), Feuerungsanlagen und Wärmetauschern. Der Firmensitz liegt in einem der agrarischen Intensivgebiete Deutschlands mit hohem Bedarf an Verwertungsmöglichkeiten für organische Rest- und Abfallstoffe wie z.B. Gärresten, Geflügelmist etc. Von daher entstand die Projektidee zur Entwicklung eines Hochtemperaturpyrolyseverfahrens zur Bereitstellung regenerativer Energie mittels regional verfügbarer organischer Reststoffe für den integrierten Betrieb in Kombination mit RTO-Anlagen (Minderung von THG-Emissionen/Erdgasverbrauch) und BHKW's zur Strom- und Wärmeerzeugung für periphere Abnehmer. Der Fokus der Verfahrensentwicklung liegt in eher kleineren, dezentral einsetzbaren Anlagengrößen mit einfacher und robuster Anlagentechnik unter flexiblen Einsatzbedingungen.

2 Verfahrenskonzept und Aufbau der Versuchsanlage

Das von der Fa. Wahrheit entwickelte Grundkonzept einer in eine RTO-Anlage integrierten pyrolytischen Erzeugung von energetisch verwertbaren Brenngasen aus organischen Reststoffen zeigt die folgende Abbildung 1.

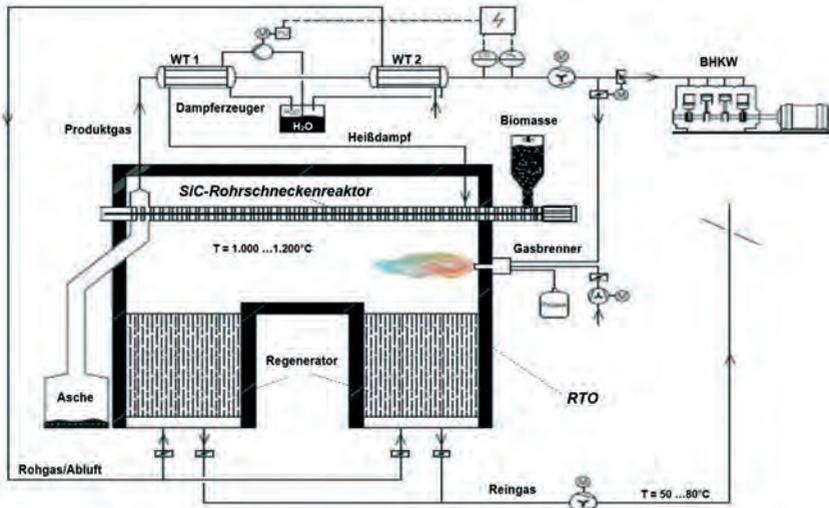


Abb. 1: Anlagenkonzept zum Pyrolyseverfahren der Fa. Wahrheit [1]

Innovativer Kern der Entwicklung besteht in dem in die Brennkammer integrierten Rohr-Schneckenreaktor aus hochtemperaturfester und gut wärmeleitfähiger Siliziumcarbid-Keramik (SiC), die thermo-chemische Reaktionen bei Arbeitstemperaturen auch oberhalb von 1.000 °C noch betriebs- und verschleißsicher

gewährleisten soll. Durch das hohe Temperaturniveau kann im Vergleich zu vielen anderen bekannten Pyrolyseverfahren (häufig $< 800^{\circ}\text{C}$) – infolge der Temperaturabhängigkeit der thermochemischen Gleichgewichtsreaktionen – eine ungewollte Teer-, Öl- und Koksbildung weitgehend vermieden und dadurch eine bessere Ausnutzung der zu vergasenden Rohstoffe erreicht werden.

Die organischen Einsatzstoffe werden über einen Bunker auf die Eintrags Schnecke gegeben und von dieser durch den Rohrreaktor transportiert. Die für die Vergasungsreaktionen im Reaktor notwendigen Temperaturen werden durch die Wärmeabstrahlung der Keramikrohrinnenwand und dem Eintrag von Heißdampf erreicht. Der zusätzliche Wasserdampfeintrag bewirkt zudem eine weitgehende Reduzierung des Restkoksgehaltes der Reststoffe und eine Erhöhung der verwertbaren Brenngasmenge. Die Wärmeenergie des Produktgases wird nachfolgend in Wärmetauschern zur Aufheizung des Wasserdampfes und zur Luftvorwärmung zurückgewonnen. Neben dem für die Beheizung der Brennkammer notwendigen Anteil kann der überschüssige Teil des Produktgases nach ggf. noch erforderlicher Gasreinigung in einem BHKW zur Erzeugung von Strom und Wärme genutzt werden.

Grundsätzlich ist der Betrieb dieses Schneckenrohrreaktors jedoch nicht zwingend an die Kombination mit einer RTO/TNV gebunden, sondern soll alternativ auch separat in einer rekuperativen Brennkammer eingesetzt werden können. Schwerpunkt der Untersuchungen im Rahmen des AiF-Kooperationsprojektes mit dem CUTEC-Forschungszentrum lag daher auf dem Funktions- und Betriebsverhalten des eigentlichen SiC-Pyrolyserohrreaktors unter den anvisierten Prozessbedingungen. Zur einfacheren Handhabung und Einstellung definierter Versuchsbedingungen in einer Technikums-Versuchsanlage wurde das Pyrolyserohr in einem elektrisch beheizten Ofen anstelle eines mit Gas befeuerten Brennraumes betrieben (Abb. 2).



Abb. 2: Aufbau der Technikumsversuchsanlage und SiC-Reaktorschneckenwelle

Der Pyrolyserohrreaktor bestand aus einem SiC-Keramikaußenrohr (ID = 10 cm; L = 2 m) und innenliegender SiC-Schneckenwelle mit 72 einzelnen ineinander verzahnten Schneckensegmenten. Der Einsatzmaterialdurchsatz während der durchgeführten Versuche lag zwischen 1 bis 3 kg/h bei Versuchsdauern von jeweils 5 bis 8 Stunden im kontinuierlichen Betrieb. Die Versuchsanlage ist mit einer umfangreichen Mess-, Regel- und Analysetechnik ausgestattet (IR-Gas-Onlineanalytoren, FID, FTIR, MFC-Massenflussmesser, div. Temp.- und Drucksensoren, u.a.), die eine relativ präzise Einstellung und Dokumentation der Prozessbedingungen über ein Prozessleitsystem sowie die weitgehende Quantifizierung von Einzelkomponenten und Bilanzierung sämtlicher In- und Output-Massenströme während der Versuche ermöglichte.

3 Versuchsergebnisse

Für die Versuche wurden organische Reststoffe in pelletierter bzw. granulierter Form im Partikelgrößenbereich von ca. 5 bis 10 mm eingesetzt. Um ein gewisses Reststoffspektrum mit unterschiedlicher Zusammensetzung abzudecken, wurden als Einsatzstoffe Holzpellets, Gärrestpellets, Hühnertrockenkotpellets sowie Klärschlamm- und Aktivkohlegranulate ausgewählt (Abb. 3).



Abb. 3: Einsatzstoffe und Brennstoffanalysen

Begonnen wurden die Versuche aufgrund ihres hohen Ascheschmelzpunktes zunächst mit Holzpellets, nachfolgend dann mit den anderen Einsatzstoffen. Insgesamt erwies sich die Konstruktion der Pilotanlage und insbesondere das thermisch stark beanspruchte SiC-Keramik-Reaktionsrohr mit den Keramikschneckensegmenten als sehr robust und ermöglichte über eine Vielzahl von mehrstündigen Versuchen im Temperaturbereich von 900-1.200 °C einen problemlosen Betrieb mit den meisten eingesetzten Biomassen. Auch die Eindüsung von überhitztem Wasserdampf in die Reaktionsschnecke zur Vergasung nicht umgesetzter Restkohlenstoffanteile (Koks) konnte nach entsprechenden konstruktiven Anpassungsarbeiten problemlos durchgeführt werden. Die durch-

schnittliche Produktgaszusammensetzung lag mit gewissen Variationen zwischen den Einsatzstoffen und zugeführtem Wasserdampfanteil im Bereich von 48-55 Vol-% für H_2 , 24-42 Vol-% für CO , 7-16 Vol-% für CO_2 und 0,1-5 Vol-% für CH_4 (Abb. 4).

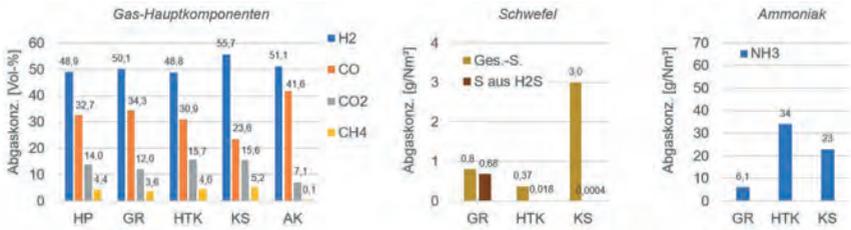


Abb. 4: Durchschnittliche Produktgaszusammensetzung der Einsatzstoffe bei ca. 1.000 °C Reaktortemperatur

Anhand von kontinuierlichen FTIR-Messungen sowie diskontinuierlichen Gasprobenahmen zur GC-Analyse konnte nachgewiesen werden, dass unter diesen Prozessbedingungen nur noch sehr geringe Anteile höherer Kohlenwasserstoffe im Produktgas vorhanden waren ($C_2H_x < 0,2$ Vol-%, $C_3H_x < 0,01$ Vol-%). Die Bildung oder Ablagerung von Teeren oder Ölen wurde bei keinem der Versuche ab Temperaturen > 950 °C festgestellt. Eine weitere Temperaturerhöhung bewirkt neben der deutlichen Abnahme der Kohlenwasserstoffe eine weitere Steigerung des CO/CO_2 -Verhältnisses im Produktgas (Temperaturabhängigkeit der homogenen Wassergasreaktion).

„Das“ Spektrum der untersuchten Einsatzstoffe wurde um Aktivkohlegranulat ergänzt, um speziell den Effekt der Restkoksvergasung mittels Wasserdampfs (heterogene Wassergasreaktion) genauer zu untersuchen, da Aktivkohle im Gegensatz zu Biomassen keinen bzw. nur einen sehr geringen Anteil an flüchtigen Kohlenstoffverbindungen enthält. Somit konnte im Gegensatz zu den Versuchen mit Biomasse eine Entkopplung der Restkoksvergasung ohne die im Reaktor simultan ablaufende und eher unerwünschte Gasphasenreaktionen des Wasserdampfes mit den flüchtigen Kohlenstoffverbindungen erreicht werden. Insgesamt hat sich gezeigt, dass für die Erzielung eines geringen Restkohlenstoffgehaltes in den festen Rückständen (Restkoks bzw. Asche) der Eintrag von etwa 30-40 % des für eine vollständige Oxidation der eingesetzten Biomassen theoretisch notwendigen Sauerstoffbedarfs über die Wasserdampfzufuhr ausreichend ist. Dies entspricht für die meisten der untersuchten Biomassen die Zugabe von etwa 0,15-0,25 kg H_2O / kg Einsatzstoff (tr.).

Zur besseren Bilanzierbarkeit des Prozesses (Flugstaub, Rußabscheidung), als auch hinsichtlich einer je nach Gasqualitätsanforderungen ggf. erforderlichen Gasreinigungsstufe wurde die Technikumsanlage um einen Heißgasfilter erweitert, der im Abgasstrom bei Temperaturen bis zu 600 °C betrieben wurde und eine betriebsstabile Staub- und Rußabscheidung gewährleistete (Abb. 5).



Abb. 5: Heißgasfilter mit Schlauchfilterelementen

Für die Versuchsphasen jeweils aufgestellte Kohlenstoffbilanzen ergaben, dass in den meisten Fällen 85 bis 95 % des in den Einsatzstoffen enthalten Kohlenstoffs in die Gasphase (im wesentlichen in CO , CO_2 , CH_4) überführt werden konnte und nur relativ geringe C-Anteile als Restkoks in den Aschen sowie im Flugstaub (Ruß) vorlagen.

Ein weiteres Interesse beim Test der Versuchsanlage galt dem Verhalten des Schneckenreaktors bei Überschreiten der Ascheerweichungstemperatur der eingesetzten organischen Reststoffe. Die Ascheschmelzeigenschaften der Einsatzstoffe wurden daher zuvor in einem Erhitzungsmikroskop untersucht, da bei vielen Biomassen je nach Zusammensetzung der Aschebildner im Bereich von 950 bis 1.100 °C bereits eine relativ starke Neigung zur Verflüssigung besteht. Interessant hierbei ist, dass je nachdem ob reduzierende oder oxidierende Bedingungen im Reaktionsraum vorliegen, sich das Ascheschmelzverhalten unterschiedlich verhalten kann. Während des Versuchsbetriebs wurde insbesondere bei dem Klärschlammgranulat ein solches Verhalten beobachtet, welches in einem Fall während der Abkühlphase beim Abfahren der Anlage aufgrund wieder erstarrender Ascheschmelze zu starken Anbackungen und an einigen Stellen sogar zum Bruch einzelner Schneckensegmente führte (Abb. 6).

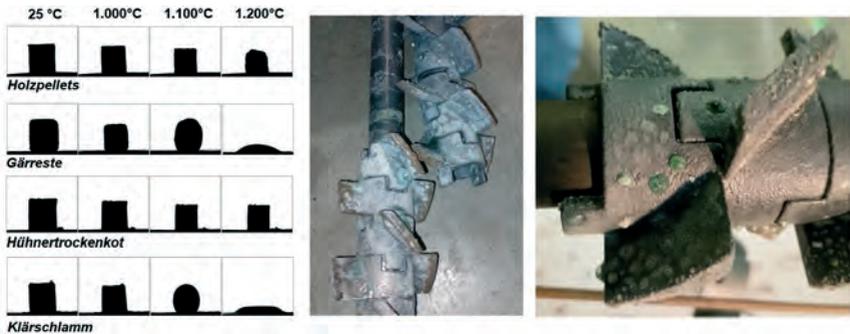


Abb. 6: Ascheschmelzeigenschaften der Einsatzstoffe und aufgetretene Versinterungen an der Schneckenwelle

Die Versuche haben gezeigt, dass für eine betriebssichere und effiziente Einsatzstoffausnutzung ein relativ enges Temperaturfenster eingehalten werden sollte, um einerseits ausreichend hohe Temperaturen zur Teerfreiheit und hohen H_2 -, CO - und CH_4 -Konzentrationen der Produktgase sicherzustellen, aber andererseits die Erweichung bzw. das Schmelzen der Asche bei zu hohen Temperaturen möglichst weitgehend zu vermeiden.

4 Fazit und Ausblick

Insgesamt konnte im Vorhaben nachgewiesen werden, dass für ein relativ breites Biomassespektrum mit dem neuen Reaktorkonzept unter Pyrolyse- und Vergasungsbedingungen ein hoher Umsatzgrad zu energetisch verwertbaren Brenngasen bei geringen Restkoksgehalten der Reststoffe und Vermeidung unerwünschter Teerbildung erreicht werden kann. Begleitend zu den Technikumsversuchen wurde mit der Software ChemCAD ein Simulationsmodell erstellt, mit dem Reaktionsmechanismen sowie Stoff- und Energieströme aller wesentlichen Prozessschritte und Apparate des Gesamtverfahrens dargestellt werden können. Durch Validierung dieses theoretischen Modells mit den aus dem Versuchsbetrieb gewonnenen Daten können weitere hilfreiche Erkenntnisse zur Ausgestaltung der zukünftigen technischen Umsetzung gewonnen sowie belastbare Prognoserechnungen zum Prozessverhalten unter veränderten Prozessbedingungen und energetischen Effizienzsteigerungen durchgeführt werden. Die Erfahrungen und Ergebnisse aus dem Forschungsprojekt werden derzeit zur Ableitung von ökonomischen Kennzahlen und technischen Optimierungspotentialen weiter aufbereitet, um die kommerzielle Umsetzung des Verfahrensansatzes unter verschiedenen Rahmenbedingungen besser einschätzen und bewerten zu können.

Literatur/Quellen

- [1] Wahrheit, L.; Engelbart, W.; Ilgen, B.; Münster, S. (2020). Pyrolyseverfahren und Pyrolysereaktor (Deutsche Offenlegungsschrift Nr. DE 10 2020 124290 A1). Deutsches Patent- und Markenamt. https://patents.google.com/patent/DE10_2020_124290A1

Danksagung

Die Entwicklung des in diesem Beitrag beschriebenen Verfahrens wurde in einem durch das BMWi über den Projektträger AiF Projekt GmbH im Rahmen des Programms „Zentrales Innovationsprogramm (ZIM)“ geförderten FuE-Kooperationsprojektes durch die Kooperationspartner Fa. Wahrheit Anlagenbau GmbH und dem CUTEC-Forschungszentrum der TU Clausthal durchgeführt.

Kontakt

Dipl.-Ing. Hinnerk Bormann, Dr.-Ing. Stefan Vodegel

CUTEC Forschungszentrum der Technischen Universität Clausthal
Abt. Thermische Prozesstechnik

Leibnizstraße 23, 38678 Clausthal-Zellerfeld

☎ +49 (0)5323.72-6223 | ✉ hinnerk.bormann@cutec.de

🌐 www.cutec.de

Dipl.-Ing. Ludger Wahrheit

Wahrheit Anlagenbau GmbH

Schuhmacherstraße 25, 26817 Rhaderfehn

☎ +49 (0)4952.80 245 0 | ✉ info@wahrheit-anlagenbau.de

🌐 www.wahrheit-anlagenbau.de

Einfluss der Siliermittelapplikation auf den Carbon Footprint von Maissilage

Zusammenfassung: Die Erzeugung erneuerbarer Energie ist von hoher Priorität für Europa, und Biomasse entwickelt sich zu einer Alternative zu fossilen Brennstoffen. Unter den Biomasse-Rohstoffen wird Maissilage in bedeutendem Umfang für die Biogaserzeugung verwendet. Um die Ressourceneffizienz zu erhöhen und einen Beitrag zur Kreislaufwirtschaft zu leisten, bietet der Einsatz von Siliermitteln jedoch erhebliche Vorteile zur Verbesserung der Methanausbeute. In diesem Beitrag wird der Einfluss eines speziellen Siliermittels auf die Qualität von Maissilage untersucht, indem behandelte und unbehandelte Silagen verglichen werden. Bewertet werden Schlüsselmerkmale wie Trockenmasse, pH-Wert, Milchsäure, Essigsäure und Biogasausbeute. Darüber hinaus gibt eine Ökobilanz, die auf Daten eines norddeutschen landwirtschaftlichen Betriebs sowie auf Fachliteratur basiert, Aufschluss über die Auswirkungen von einer mit Siliermittel behandelten Maissilage in einer Biogasanlage auf die CO₂-Emissionen. Der Gewichtsverlust der behandelten Silage ist im Vergleich zur unbehandelten Silage um 62 % geringer. Außerdem wies das behandelte Material eine verlängerte aerobe Stabilität (ASTA) von 223 Stunden (Kontrolle: 72 Stunden) und eine signifikant verminderte Anzahl von Hefen und Schimmelpilzen auf. In Bezug auf die Umweltauswirkungen zeigte sich, dass das Treibhauspotenzial (GWP100) der behandelten Silage im Vergleich zur unbehandelten Probe um 6 % reduziert wurde. Berücksichtigt man jedoch die biogenen Kohlenstoffemissionen, so ergibt sich eine Verringerung der Gesamtemissionen um 18 %. Diese Ergebnisse unterstreichen das Potenzial des spezialisierten Siliermittels zur Verbesserung der Silagekonservierung und zur Steigerung der Biogasproduktion und zur Verringerung der Treibhausgasemissionen.

Abstract: The production of renewable energy is a high priority for Europe and biomass is becoming an alternative to fossil fuels. Among the biomass feedstocks, maize silage is used to a significant extent for biogas production. However, in order to increase resource efficiency and contribute to the circular economy, the use of silage additives offers significant advantages to improve methane yield. In this article, the influence of a special silage additive on the quality of maize silage is investigated by comparing treated and untreated silages. Key characteristics such as dry matter, pH value, lactic acid, acetic acid and biogas yield are evaluated. In addition, a life cycle assessment based on data from a farm in northern Germany and specialist literature provides information on the effects of silage additives in a biogas plant on CO₂ emissions. The weight loss of the treated silage is 62 % lower compared to the untreated silage. In addition, the treated material showed an extended aerobic stability (ASTA) of 223 hours and a significantly reduced number of yeasts and molds. In terms of environmental impact, the global warming potential (GWP100) of the treated silage was reduced by 6 % compared to the untreated sample. However, if the biogenic carbon emissions are taken into account, the total emissions are reduced by 18 %. These results underline the potential of the specialized silage additive to improve silage preservation and to increase biogas production and reduce greenhouse gas emissions.

1 Einleitung

Die Umstellung auf erneuerbare Energien in Europa hat seit langem eine Priorität, die durch die Notwendigkeit, die EU-Klimaziele zu erreichen, vorangetrieben wird. Im Einklang damit will die deutsche Regierung im Rahmen des neuen Klimaaktionsplans die Treibhausgasemissionen bis 2030 um 65 % im Vergleich zu 1990 reduzieren (Federal Ministry for Economic Affairs and Climate Action, 2024; Kerckow & Thrän, 2024). In Deutschland spielen Biogasanlagen eine Rolle bei der Nutzung erneuerbarer Energien, wobei die meisten Anlagen auf landwirtschaftlichen Betrieben errichtet werden. 48,9 % der Masse der eingesetzten Rohstoffe sind Pflanzen, gefolgt von Wirtschaftsdüngern aus der Tierhaltung mit 44,5 % (FNR, 2020).

Einer der Hauptgründe für die Verwendung von Energiepflanzen in der Biogas-erzeugung ist ihr deutlich höherer Biogasertrag (im Bezug zur eingesetzten Frischmasse) im Vergleich zu Gülle. Maissilage zum Beispiel liefert bis zu 200 Nm³/tFM, Grassilage erreicht 180 Nm³/ tFM, während Rindergülle nur 25 Nm³/ tFM erzeugt, was bedeutet, dass Maissilage fast achtmal effizienter ist als Biogas von Wirtschaftsdüngern (FNR, 2016).

Die Novellierungen des Erneuerbare-Energien-Gesetzes (EEG) in den Jahren 2012 und 2014 zielten darauf ab, den Anbau traditioneller Biogassubstrate wie Maissilage aufgrund der Kraftstoff-gegen-Lebensmittel-Debatte einzuschränken und den Fokus auf andere Materialien wie beispielsweise native Reststoffe legen. Ein Ansatz könnte die effiziente Nutzung von Maissilage in der Co-Vergärung von nachwachsenden Rohstoffen sein, um bessere Biogaserträge zu erzielen.

Es gibt bereits vielfältige Artikel über den Nutzen und Einsatz von Siliermitteln, insbesondere von chemischen oder biologischen Zusatzstoffen. Studien über den Einfluss von Maissilage, die für die Biogasproduktion verwendet wird, auf den CO₂-Fußabdruck wurden in Deutschland noch nicht veröffentlicht. In dieser Studie werden die Auswirkungen eines Siliermittels untersucht, das auf homo- und heterofermentativen Milchsäurebakterien (LAB) basiert. Das Siliermittel, das die Konservierung verbessern und den Verderb während der Lagerung verringern soll, wurde auf seine Auswirkungen auf die Silagequalität, die aerobe Stabilität und die Methanausbeute untersucht. Darüber hinaus wurde in dieser Studie der Einfluss von Maissilage auf den Kohlenstoff-Fußabdruck bei der Verwendung als Ausgangsmaterial in einer Biogasanlage untersucht. Der Kohlenstoff-Fußabdruck quantifizierte die mit behandelter und unbehandelter Silage verbundenen Treibhausgasemissionen unter Verwendung einer Lebenszyklusanalyse (LCA) und bewertete den Einfluss auf die Wirkungskategorie Treibhausgasemission (GWP 100 und GWP 100 nicht-fossile CO₂-Aufnahme und -Emission).

2 Material und Methoden

2.1 Material

Der in dieser Studie verwendete Mais wurde im September 2023 auf einem Milchviehbetrieb im Nordwesten Deutschlands geerntet. Die verwendete Mais-sortenart war „ES Traveler“, Lidea Seeds, 250 FAO. Das frische Material wurde gewogen und in zwei Silos gelagert: unbehandelte Silage und behandelte Silage. Auf die behandelte Silage wurde ein Siliermittel aufgebracht. Bei dem Zusatzstoff handelt es sich um eine Mischung aus homo- und heterofermentativen LAB (*L. diolivorans*, *L. buchneri* und *L. rhamnosus*: Anwendungsrate von 250.000 CFU/ g FM). Das Produkt schützt vor Nacherwärmung, gewährleistet eine intensive Gärung und verbessert die aerobe Stabilität (Schaumann, 2025a, 2025b).

2.2 Laboranalysen

Die Silos wurden verschlossen, um anaerobe Bedingungen zu schaffen, und nach 16 Wochen geöffnet. Die Frischmasseverluste während des anaeroben Silierprozesses und der aeroben Phase während der Fütterung wurden als Gewichts-differenz zwischen geernteter und gefütterter Menge berechnet. Beide Gruppen wurden überwacht, um die Verderblichkeitsrate und die Trockenmasseverluste zu überprüfen.

Die Maissilagevarianten wurden Trockensubstanz, organische Trockensubstanz, pH, Milchsäure, Essigsäure, Ethanol, Hefen und Schimmelpilze untersucht. Zusätzlich wurden alle 14 Tage nach dem Öffnen des Silos aerobe Stabilitätstests nach Honig (1990) durchgeführt.

Die statistischen Analysen wurden mit der Software OriginPro durchgeführt und die Ergebnisse werden als Mittelwerte \pm Standardabweichungen (SD) angegeben. Die Vergleiche zwischen den beiden Versuchssilage wurden für alle Parameter mit Hilfe einer einseitigen ANOVA mit einem Signifikanzwert von $p < 0,05$ durchgeführt.

2.3 Anaerobe Batch-Tests

Biogas-Batch-Tests (Ankom-System) wurden mit Biogasfermentern von 1,135 Litern in einem Dreifach-Batch durchgeführt und wurden gemäß an VDI-4630 durchgeführt. Die Messungen wurden über neun aufeinanderfolgende Wochen durchgeführt, einschließlich des Methanertrags und der Zusammensetzung des Biogases.

2.4 Lebenszyklusanalyse (LCA)

Die LCA folgt der in ISO 14040:2006 und ISO 14044:2006 festgelegten Methodik. Die Studie war in vier Hauptphasen gegliedert:

- 1) Definition des Ziels und des Umfangs der Studie
- 2) Bestandsanalyse
- 3) Folgenabschätzung
- 4) Interpretation

Die LCA wurde mit der Software Open LCA 2.4 entwickelt, wobei Daten aus der Datenbank Ecoinvent 3.10 und dem Bioenergiedat integriert wurden.

3 Ziel und Umfang

Das Hauptziel dieser Studie ist die Quantifizierung und der Vergleich des Kohlenstoff-Fußabdrucks, der mit der Produktion von Maissilage und der anschließenden Biogaserzeugung aus zwei Silos verbunden ist: ein mit einem Siliermittel behandeltes und ein unbehandeltes Silo. Der Umfang der Studie umfasst den gesamten Lebenszyklus des Prozesses, einschließlich Maisanbau, Silierung und Biogaserzeugung, wie in Abb. 2 dargestellt.

4 Bestandsaufnahme

Die Inventardaten, einschließlich der relevanten Inputs und Outputs im Zusammenhang mit dem Silier- und Biogasprozess, wurden durch Laboranalysen, Biogas-Batch-Tests und Erhebungen in den landwirtschaftlichen Betrieben gesammelt, die Daten über die Ausbringung von Düngemitteln, den Energieverbrauch und den Betrieb der Biogasanlage enthalten. Die Informationen zu den Emissionen wurden auf der Grundlage von Emissionsfaktoren und -modellen berechnet, die den IPCC-Richtlinien (2019), Bioenergiedat und der Fachliteratur entnommen wurden.

5 Analyse der Auswirkungen

Für die Folgenabschätzung wurde die IPCC-Methode 2021 verwendet, wobei als Folgekategorie das Treibhauspotenzial GWP 100 gewählt wurde, das alle Treibhausgase über einen Zeitraum von 100 Jahren berücksichtigt. Zusätzlich wurden die GWP 100 (nicht-fossile CO₂-Aufnahme und -Emissionen) berücksichtigt, um den biogenen Emissionen Rechnung zu tragen und die potenzielle Verringerung der Materialverluste bei der Verwendung des Silierzusatzes zu berücksichtigen.

Die für diese Studie gewählten funktionellen Einheiten sind wie folgt: Die Ergebnisse basieren auf 1 kg Silomais (ganze Pflanze) Frischmasse mit einem Trockensubstanzgehalt (TS) von 36,2 für den Silierprozess. Für die Biogaserzeugung

gung werden die Ergebnisse pro Kilowattstunde (kWh) ausgedrückt, wobei der gesamte Prozess vom Maisanbau über den Silierprozess bis hin zur Vergärung und Kraft-Wärme-Kopplung in einem Blockheizkraftwerk berücksichtigt wird.

6 Auswertung

Die Auswertung konzentriert sich auf den Vergleich zwischen den Emissionen für die behandelte und die unbehandelte Silage. Die Analyse umfasst eine Interpretation der entsprechenden Emissionen, die mit jedem Prozess der Biogasproduktion verbunden sind, sowie die Auswirkungen des Einsatzes von Zusatzstoffen auf die Verringerung der Treibhausgasemissionen (THG).

7 Ergebnisse

7.1 Qualität der Silage

Der Gewichtsverlust wurde anhand der Gewichtsdivergenz zwischen dem geernteten und dem silierten Zustand berechnet. Die Verluste wurden, wie in Tabelle 1 dargestellt, berechnet. Durch den Einsatz des Siliermittels wurde die Qualität der Silage deutlich verbessert, was sich in einem um 62 % geringeren Gewichtsverlust bei der behandelten Silage im Vergleich zur unbehandelten Silage zeigte. Die Verluste bei der unbehandelten Silage erreichten einen Wert von 19,75 %. Dieses Ergebnis ist höher als die in anderen Studien gefundenen Werte, wie z. B. bei Wilkinson (2015), der einen Verlust an TM(%) von 12 % für die Silierung und 20 % für die gesamte Maissilageproduktion angibt.

Tab. 1: Unterschied im Gewicht und im Trockensubstanzgehalt der behandelten und unbehandelten Silage vor und nach dem Siliervorgang

Detail	Einheit	Unbehandelte Silage	Behandelte Silage
Eingelagerte Menge	kg _{FM}	319.922,00	327.745,00
TM initial	% TM	36,20	36,20
Ausgelagerte Menge	kg _{FM}	256.735,54	302.884,22
TM final	% TM	32,24	34,80
Gewichtsverlust	%	19,75	7,59

TM= Trockenmasse, FM = Frischmasse

Die Ergebnisse der Analyse sind in Tab. 2 dargestellt. Es wurden signifikante Unterschiede zwischen der behandelten und der unbehandelten Silage in Bezug auf pH-Wert, Milchsäure, Essigsäure, Ethanol, Hefen und ASTA festgestellt. Obwohl die Schimmelpilze laut ANOVA keinen signifikanten Unterschied aufweisen, hält die behandelte Silage einen konstanten Wert von 100 KBE/g_{FM}, was eine Verbesserung im Vergleich zur unbehandelten Silage darstellt.

Tab. 2: Analytische Parameter für die behandelte und unbehandelte Silage

Parameter	Einheit	Unbehandelte Silage	Behandelte Silage	p-value
TM	g / kg _{FM}	331,77 ± 26,9	348,01 ± 22,09	0,1047
oTM	g / kg _{TM}	980,74 ± 43,9	981,58 ± 37,0	0,5989
pH	-	3,66 ± 0,11	3,83 ± 0,08	<0,0001
Milchsäure	% TM	5,79 ± 1,97	4,31 ± 1,01	0,0236
Essigsäure	% TM	1,40 ± 0,33	3,58 ± 0,48	<0,0001
Ethanol	% TM	0,59 ± 0,37	0,82 ± 0,23	0,0607
Hefen*	KBE / g _{FM}	27.200 ± 18.074	180 ± 130,38	0,0102
Schimmelpilze*	KBE / g _{FM}	192.060 ± 305.436	100 ± 0	0,1975
ASTA*	h	72,40 ± 16,99	223,20 ± 16,35	<0,0001

ASTA = Bewertung der aeroben Stabilitätszeit, KBE = koloniebildende Einheit *n= 5 Proben

7.2 Biogasertrag

Abb. 1 zeigt die Ergebnisse der Biogas- und Methanausbeute der beiden Silagen. Darüber hinaus ergaben Biogas-Batch-Tests einen 6,8 % höheren Methanertrag für LAB-behandelte Silage ($130,38 \pm 9,16$ NI/kgFM) im Vergleich zu unbehauelter Silage ($122,12 \pm 12,45$ NI/kgFM). Die Gesamtbioogasproduktion stieg ebenfalls um 5,9 % ($241,67 \pm 17,08$ NI/kgFM gegenüber $228,26 \pm 22,91$ NI/kgFM). Berechnet auf der Grundlage von 1 kg TM des silierten Mais und unter Berücksichtigung der beobachteten Verluste produzierte die Behandlung insgesamt 22,5 % mehr Biogas.

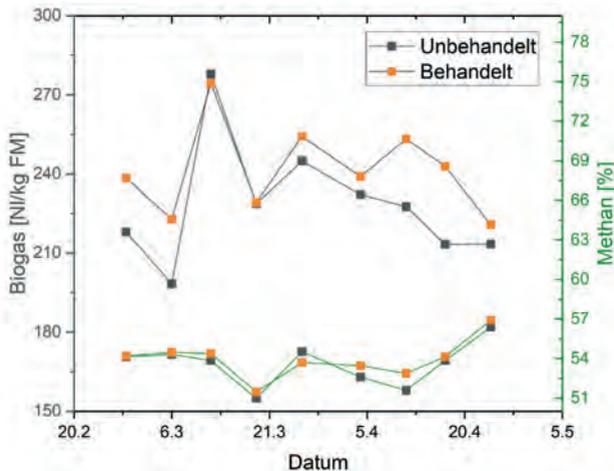


Abb. 1: Biogasertrag und Methankonzentration für behandelte und unbehandelte Silage nach dem anaeroben Silier Prozess.

7.3 Lebenszyklus-Inventarisierung

Die Sachbilanz für die Biogaserzeugung umfasst den Anbau, die Ernte, die Silierung und die Biogaserzeugung, wie in den Grenzen des Flussdiagramms in Abb. 2 dargestellt.

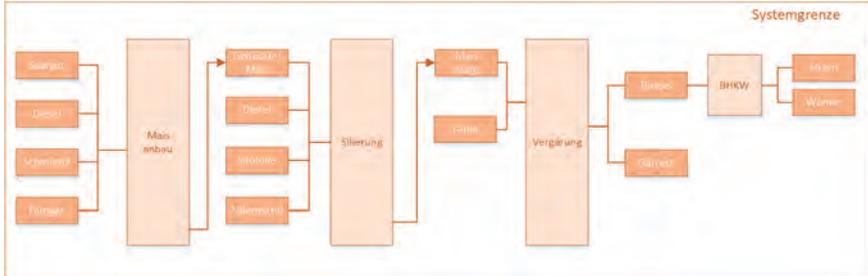


Abb. 2: Fließschema mit Bilanzgrenzen

7.4 Lebenszyklus-Inventarisierung Bewertung

Der Silierprozess umfasst alle Schritte vom Maisanbau bis zur Anlieferung in der Biogasanlage, während der Prozess der Biogaserzeugung den Maisanbau, die Silierung und die Erzeugung von Wärme und Strom aus dem Biogas umfasst. In Bezug auf die Umweltauswirkungen zeigte sich, dass das Erderwärmungspotenzial (GWP100) der behandelten Silage im Vergleich zur unbehandelten Probe um 5 % verringert wurde.

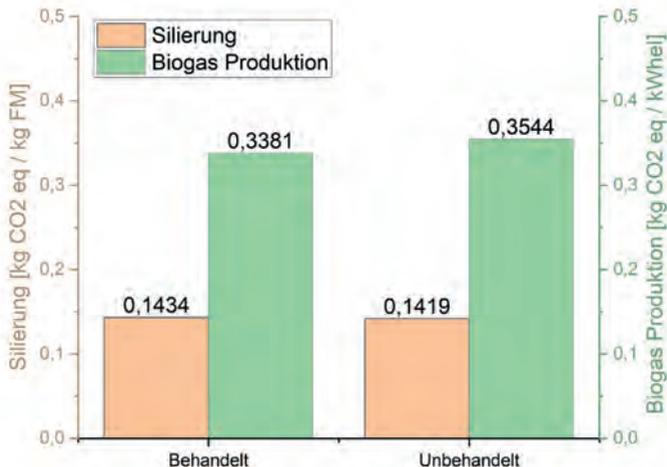


Abb. 3: GWP 100 auf CO₂-Äquivalentbasis für die Silierung von Maissilage (behandelt vs. unbehandelt) und die Biogasproduktion mit Maissilage (behandelt vs. unbehandelt).

Abb. 4 zeigt, dass die Emissionen der mit LAB behandelten Silage während des Siliervorgangs um etwa 14,5 % niedriger sind als die der unbehandelten Silage, was in erster Linie auf die geringeren Emissionen im Zusammenhang mit den Gewichtsverlusten zurückzuführen ist. Bei der Biogasproduktion war der Kohlenstoff-Fußabdruck von LAB-behandelter Silage im Vergleich zu unbehandelter Silage um 18,2 % geringer, wenn man die Gewichtsverluste während des Silierens berücksichtigt. Diese Ergebnisse verdeutlichen den signifikanten Einfluss der Silierversuche auf den gesamten ökologischen Fußabdruck und unterstreichen das Potenzial von LAB-behandelter Silage, die Emissionen in Biogaserzeugungssystemen zu reduzieren.

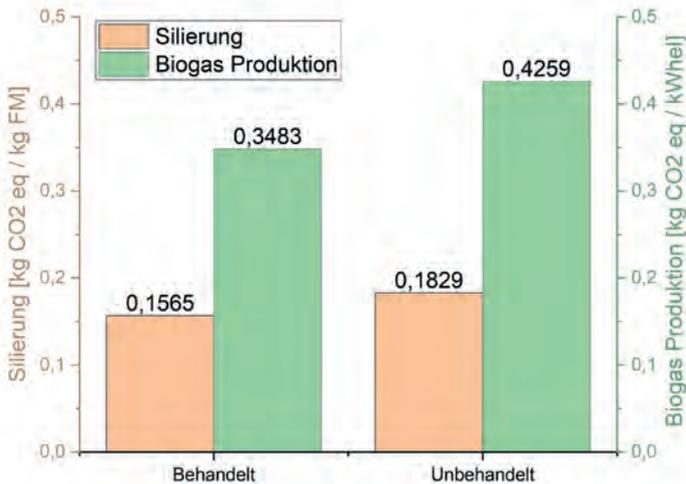


Abb. 4: GWP 100 (nicht-fossile CO₂-Aufnahme und -Emission) auf CO₂-Äquivalentbasis für die Silierung von Maissilage (behandelt vs. unbehandelt) und die Biogasproduktion mit Maissilage (behandelt vs. unbehandelt).

8 Fazit

Die Ergebnisse dieser Studie zeigen, dass der biologische Zusatzstoff zur Qualität der Silage beiträgt, indem er Materialverluste verringert und den Gehalt an Hefen und Schimmelpilzen hemmt. Darüber hinaus verbessert die gesteigerte Silage Qualität die Methanausbeute, was zu einer Effizienteren Biogaserzeugung und damit zu einem geringeren Fußabdruck pro erzeugter Energieeinheit beiträgt.

Literatur/Quellen

- Federal Ministry for Economic Affairs and Climate Action. (2024, August). Update of the Integrated National Energy and Climate Plan. Plan of the Federal Republic of Germany - August 2024. Verfügbar unter: https://commission.europa.eu/document/download/cd8ba2d6-1af6-4f37-aa07-059989bb1264_en?filename=GERMANY%20%80%93FINAL_UPDATED_NECP_2021-2030_%28ENGLISH%29.pdf
- FNR. (2016). Leitfaden Biogas. Von der Gewinnung zur Nutzung (7. Auflage). Gülzow-Prüzen: Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V.
- FNR. (2020). Bioenergy in Germany. Facts and figures 2020. Gülzow-Prüzen, Germany: Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. Retrieved from https://www.fnr.de/fileadmin/allgemein/pdf/broschueren/broschuere_basisdaten_bioenergie_2020_engl_web.pdf
- Honig, H. (1990). Evaluation of aerobic stability. Grass and Forage Reports, (Special issue 3), 76–82.
- Kerckow, B. & Thrän, D. (2024). Implementation of bioenergy in Germany - 2024 update. Country Reports: IEA Bioenergy: 12 2024. Verfügbar unter: https://www.ieabioenergy.com/wp-content/uploads/2024/12/CountryReport2024_Germany_final.pdf
- Milimonka A, Thaysen J & Richter C. (Hrsg.). (2019). Nachhaltigkeit - können Siliermittel einen Beitrag leisten? (Original erschienen 2019).
- Schaumann. (2025, 17. Februar). BONSILAGE SPEED M. Frisch besiegelt – Siliert messbar schneller! Verfügbar unter: <https://siliermittel.dlg.org/display/produktdateiblatt%7C%7C1128%7C%7CBONSILAGE%20SPEED%20M>
- Schaumann. (2025, 17. Februar). Products in field tests. Ensiling and forage production. Verfügbar unter: <https://www.schaumann.info/en/products-in-field-tests-164/c/corn-silage-measurably-faster-ensiling-with-bonsilage-speed-m-1588>
- Wilkinson, J. M. (2015). Managing silage making to reduce losses. Livestock, 20(5), 280–286. <https://doi.org/10.12968/live.2015.20.5.280>

Kontakt

Cinthy Lara, Wissenschaftliche Mitarbeiterin und Doktorandin

Professur für Abfall- und Stoffstromwirtschaft
Universität Rostock

✉ cinthya.lara@uni-rostock.de

Projekt IRRMA – Interkommunales Reststoffmanagement – Potenziale und Herausforderungen für Grasmahd und Grünschnitt

Zusammenfassung: Das vom BMBF geförderte Projekt „IRRMA“ zielte auf die Entwicklung eines interkommunalen Reststoffmanagementsystems zur Förderung der regionalen Kreislaufwirtschaft in der Bioenergieregion Jena-Saale-Holzland. Im Fokus stand die Verwertung organischer Reststoffe, insbesondere Grasmahd. Durch eine gemeinsame Erfassung und Nutzung sollten ökologische, wirtschaftliche und soziale Vorteile sowie neue Technologien und Arbeitsplätze geschaffen werden. Analysen zeigten große Unterschiede in der Reststoffeffassung zwischen Jena und dem Saale-Holzland-Kreis. Maßnahmen wie zusätzliche Sammelstellen und optimierte Nutzungspotenziale (Biogas, Nährstoffe, Fasernutzung) wurden erprobt. Herausforderungen bestanden in rechtlichen, technischen und organisatorischen Aspekten. Die interkommunale Kooperation wurde durch Schulungen, Workshops und eine digitale Plattform zur Reststoffvermarktung gestärkt. Das Projekt zeigt praxisnahe Ansätze zur Schließung regionaler Stoffkreisläufe.

Abstract: The "IRRMA" project, funded by the BMBF, aimed to develop an inter-municipal waste disposal system to promote the regional circular economy in the Jena-Saale-Holzland bioenergy region. The focus was on the recycling of organic residues, especially grass mowing. The aim was to create environmental, economic and social benefits as well as new technologies and jobs through joint collection and use. Analyses showed major differences in the collection of residues between Jena and the Saale-Holzland district. Measures such as additional collection points and optimised utilisation potentials (e.g. biogas, nutrients, fibre use) were tested. Challenges existed in legal, technical and organizational aspects. Inter-municipal cooperation was strengthened through training courses, workshops and a digital platform for the marketing of residual materials. The project shows practical approaches to closing regional material cycles.

1 Projekt IRRMA – Überblick

Das Projekt „IRRMA“ wurde im Rahmen der Fördermaßnahme „REGION.innovativ – Interkommunale Zusammenarbeit zur Stärkung einer regionalen Kreislaufwirtschaft in strukturschwachen Regionen“ vom BMBF gefördert. Ziel war die Entwicklung und Anwendung eines interkommunalen Reststoff- und Recyclingmanagementsystems, das die regionale Kreislaufwirtschaft unterstützt und innovative Lösungen für die Verwertung organischer Reststoffe in der Bioenergieregion Jena-Saale-Holzland vorantreibt. Das Projekt wurde zum 31.12.24 abgeschlossen.

Hintergrund war u.a. die regional sehr unterschiedliche und zum Teil unzureichende Erfassung von organischen Reststoffen. Mit der gemeinsamen und strukturierten Erfassung und Nutzung von organischen Reststoffen sollten folgende Vorteile erreicht werden:

- **Wirtschaftlich:** Steigerung der regionalen Wertschöpfung durch die Entwicklung lokaler Verwertungs- und Recyclingstrukturen, die Kosten für Abfallentsorgung senken und neue Einnahmequellen schaffen.
- **Umwelt:** Verbesserung der Umweltbilanz durch die Reduzierung von Abfallmengen (auch illegale Ablagerungen), effizientere Ressourcennutzung und Förderung der Kreislaufwirtschaft.
- **Technologischer Fortschritt:** Zugang zu innovativen Technologien und Verfahren für die Verwertung organischer Reststoffe, die als Vorbild für andere Regionen dienen können.
- **Soziale Akzeptanz:** Stärkung des Bewusstseins und der Akzeptanz in der Bevölkerung für nachhaltige Abfallwirtschaft durch umfassende Informations- und Bildungsangebote.
- **Interkommunale Zusammenarbeit:** Verbesserung der Zusammenarbeit zwischen Kommunen, was zu einer effizienteren Verwaltung von Stoffströmen und Ressourcen führt.
- **Schaffung von Arbeitsplätzen:** Entwicklung neuer Geschäftsfelder und Schaffung von Arbeitsplätzen im Bereich Recycling und Abfallwirtschaft.

Im Projekt arbeiteten 10 Partner zusammen (Tab. 1). Die Koordination lag bei Regionale Aktionsgruppe Saale-Holzland e.V.

Tab. 1: Projektpartner im Projekt IRRMa

Wissenschaft	Industrie	Kommunale Akteure
Materialforschungs- und -prüfanstalt an der Bauhaus-Universität Weimar	GEMES Abfallentsorgung und Recycling GmbH	Stadt Jena mit Kommunalser-vice Jena
Fraunhofer-Institut für Keramische Technologien und Systeme	LAV Technische Dienste GmbH & Co. KG	Saale-Holzland-Kreis mit Eigenbetrieb
Robert-Boyle-Institut e.V.	S&F Datentechnik GmbH & Co. KG	Regionale Aktionsgruppe Saale-Holzland e.V.
	pontes pabuli GmbH	

Das Fraunhofer IKTS war vor allem für die Analyse der verschiedenen Reststoffe sowie für die Entwicklung von Verfahrensansätzen zur maximalen Ausnutzung der organischen Reststoffe und deren Bewertung verantwortlich. Im Folgenden werden ausgewählte Untersuchungen und Ergebnisse für verschiedene Reststoffe (insbesondere Grasmahd) dargestellt.

2 Mengenpotenziale

Die in Jena und im Saale-Holzlandkreis (SHK) erfassten Mengen an organischen Reststoffen unterscheiden sich. Die Stadt Jena nutzt unter anderem die braune Tonne für die Sammlung der privaten Bioabfälle. Dabei werden über 80 kg Bioabfall pro Einwohner und Jahr erfasst. Zusätzlich fallen noch 50 kg Grünabfall von kommunalen und privaten Flächen an. Diese Erfassungsquote stellt einen sehr guten Wert dar (Bundesdurchschnitt 60 kg Bioabfall und 60 kg Grünabfall). Im Saale-Holzlandkreis werden keine braunen Tonnen gestellt, weshalb nur Kleinstmengen an privatem Bioabfall an wenigen Sammelstellen erfasst werden. Lediglich 2.380 t an Grünabfall wurden an den fünf bestehenden Sammelstellen vor Beginn des Projektes abgegeben bzw. von Kommunen von öffentlichen Flächen angeliefert. Dies entspricht etwa 28 kg pro Einwohner und Jahr im SHK und liegt damit deutlich unterhalb des bundesdeutschen Durchschnittes. Offiziell wird ein hoher Anteil der privaten Bioabfälle und Reststoffe in der privaten Eigenkompostierung verwertet. Die Recherchen des IRRMA-Verbundes konnten jedoch auch zahlreiche wilde Ablagerungsflächen identifizieren. Außerdem ist nur unzureichend bekannt, wieviel Biomasse über Restmülltonnen entsorgt wird.

Durch die Einrichtung zusätzlicher Sammelstellen für die kostenlose Abgabe organischer Reststoffe konnten innerhalb des Projektes mehrere hundert Tonnen sofort mobilisiert werden. Auswertungen mit Hilfe von GIS-Daten zeigten, dass aus Haushalten und Kommunen bis zu 8.670 Tonnen Grüngut erfasst werden könnten, ein Plus von 260 % zum Ausgangszustand im Landkreis. Außerdem wären noch verschiedene gewerbliche Reststoffe mobilisierbar, wenn dafür ausreichend Wertschöpfungspotenzial angeboten werden kann. Darunter sind beispielsweise 20.000 Tonnen Biertreber. Voraussetzung für die praktische Erhöhung der erfassten Mengen wäre die Einführung von mindestens 11 zusätzlichen Abgabestellen im SHK sowie eine Verwertungsstrategie zur Finanzierung der Sammelkosten.

3 Wertschöpfungspotenziale

Eine wichtige Voraussetzung für eine Umsetzung der Ergebnisse in die Praxis ist die Wirtschaftlichkeit. Aus diesem Grund wurde seitens IKTS die potenzielle Erlösseite für die Nutzung von Reststoffen betrachtet. Für die Bereiche Nährstoff- und Energiegewinnung wurde für verschiedene Substrate das Wertschöpfungspotenzial pro Tonne ermittelt. Speziell für Grasmahd wurde auch für den Bereich der Fasernutzung das Erlöspotenzial berechnet.

3.1 Nährstoffe

Im Bereich Nährstoffe sollte davon ausgegangen werden, dass die im Reststoff gebundenen Nährstoffe (N, P, K) für die Düngung von Pflanzen eingesetzt werden können und dabei herkömmliche Düngeprodukte ersetzen. Für eine grobe Abschätzung wurden die Börsenpreise für die Einzelnährstoffe angesetzt. In

Abb. 1 ist beispielhaft der Preis für Harnstoff über die letzten 30 Jahre aufgetragen. Neben starken Schwankungen ist auch zukünftig mit einem Anstieg dieser Kosten zu rechnen, wodurch alternative Düngeprodukte an Attraktivität gewinnen sollten.



Abb. 1: DAP (Diamoniumphosphat) – Spot Preis 1995 bis 2025
 (<https://www.indexmundi.com/de/rohstoffpreise>)

Der praktisch in verschiedenen organischen Reststoffen ermittelte Gesamtgehalt an gelösten und gebundenen Nährstoffen ist in Abb. 2 dargestellt. Dabei zeigen sich insbesondere in der Grasmahd erhöhte Gehalte an Stickstoff, aber auch Kalium und Phosphor.

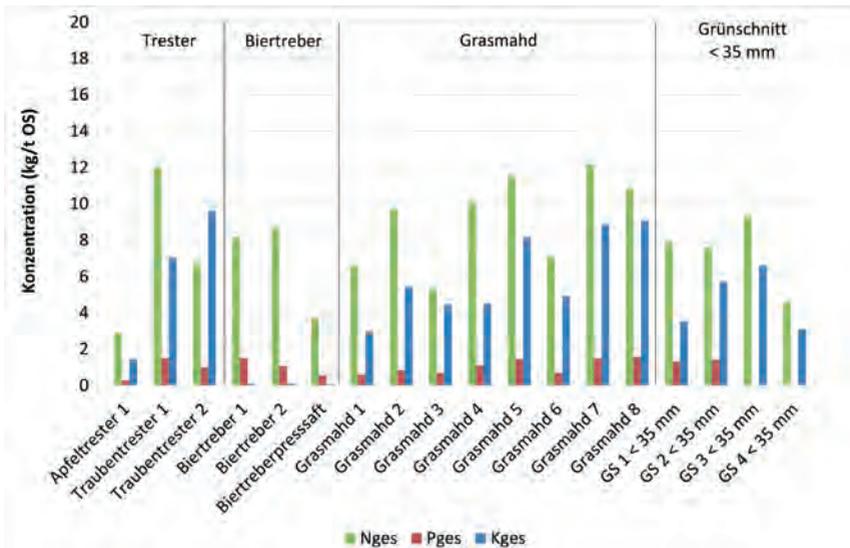


Abb. 2: Gehalt an Gesamtnährstoffen in kg pro Tonne Originalsubstrat (OS) in verschiedenen Reststoffen

Werden diese Gesamtgehalte mit den Börsenpreisen der Jahre 2022 oder 2023 multipliziert, erhält man ein grobes Bild davon, welche maximale Wertschöpfung über Nährstoffe pro Tonne Substrat erreicht werden kann (Abb. 3).

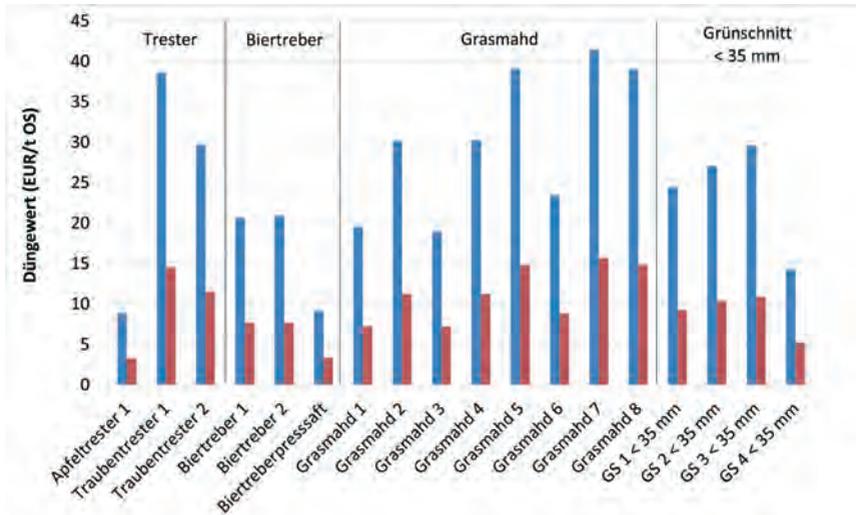


Abb. 3: Maximalerlöse für Nährstoffe (N+P+K) in verschiedenen Reststoffen.

Jedoch liegen die Anteile, welche bereits direkt verfügbar und gelöst sind deutlich niedriger (für Grasmahd: ca. 5 bis 15 % von N_{ges} , 15 bis 30 % P_{ges} , 65 % K_{ges}). Mit Hilfe verschiedener Methoden wurde versucht, die Fracht an gelösten Nährstoffen zu erhöhen (Mechanische Zerkleinerung, Aerobe Vorrotte, Jauchensatz, Silierung). Dabei konnten, je nach Ausgangslage Steigerungsraten von Faktor 3 (Stickstoff) bis 5 (Phosphat) erreicht werden. Aus den Gesamtgehalten werden über diese Wege maximal 20 % (N), 60 % (P) und 100 % (K) in Lösung überführt. Bezogen auf diese begrenzten Freisetzungsraten wäre mit deutlich weniger Erlösen beim Verkauf als Düngemittel zu rechnen.

Alternativ könnte das komplette Material in Biogasanlagen umgesetzt werden. Der dabei entstehende Gärrest enthält je nach Abbaugrad höhere Anteile an gelösten Nährstoffen und könnte komplett zur Nährstoffversorgung von Pflanzen dienen. Diese Kombination stellt außerdem einen Doppelnutzen dar, da Energie (siehe folgender Abschnitt) gewonnen wird ohne Nährstoffe zu verlieren.

3.2 Energie

Im Bereich Energieerzeugung stellt die Biogasgewinnung und der Verkauf von Strom und Wärme (oder alternativ Biomethan z.B. als Kraftstoff) das Verfahren der Wahl dar. Aus der Erlösspanne von Strompreisen an der Börse (in der Regel relativ niedrig, aber zeitlich flexibel auch höher) und Eigenstromnutzung (hohe Erlöse durch Ersatz von hohen Einkaufspreisen) sowie den Möglichkeiten des

EEG wurde für eine erste Abschätzung ein Erlös von 18 ct/kWh_{el} angesetzt. Für den Verkauf von Wärme wurden 7 ct/kWh_{th} angesetzt. Damit ergeben sich auf Basis der ermittelten Gasertragspotenziale die in Abb.4 dargestellten Erlöse pro Tonne Reststoff. Ähnliche Erlöse wären auch durch den Verkauf von Methan als Kraftstoff möglich.

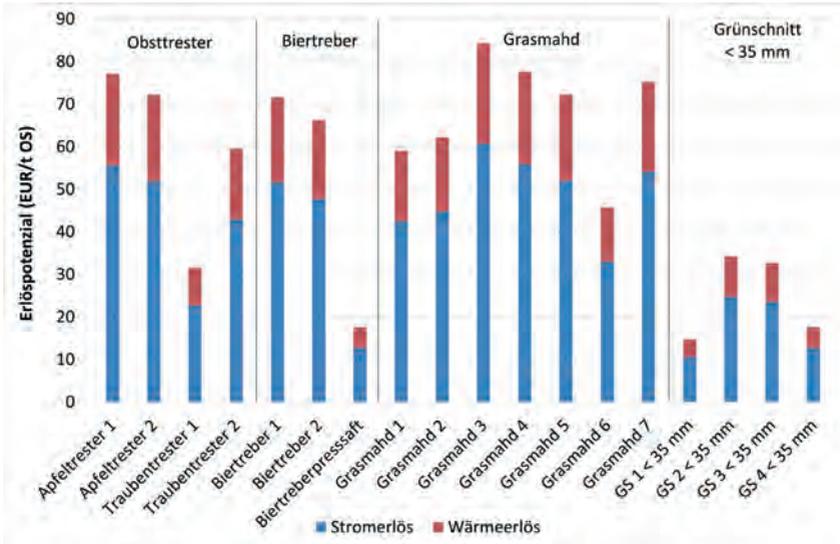


Abb. 4: Summierte Erlöspotenziale für Strom und Wärme aus der Vergärung

3.3 Faserstoffe



Eine Tonne Grasmahd enthält je nach Wassergehalt zwischen 200 und 400 kg trockene Fasern. Im Gartenbau und Hobbygarten werden bereits heute Mulchpapier oder Mulchscheiben verwendet, um Unkraut zu unterdrücken (Abb. 5). Der Trend geht dabei weg von Kunststoffen hin zu Naturfasern (z.B. Kokosfilz, Holzfasern). Diese Mulchscheiben werden z.B. für 1,50 EUR pro Stück verkauft und enthalten z.B. 200 g Fasermasse.

Abb. 5: Mulchscheibe Kokosfilz

(<https://toom.de/p/kokos-mulchscheibe-beige-25-x-25-cm/4051055>)

Das bedeutet, dass pro Tonne Grasmahd für mindestens 1000 Mulchscheiben Fasermaterial bereitgestellt werden kann. Wenn pro Mulchscheibe beispielsweise 10 ct für das Fasermaterial angesetzt werden, liegt der Erlös pro Tonne Grasmahd bereits bei 100 EUR. Für höhere Materialpreise können entsprechend höhere Einnahmen generiert werden.

Im Projekt wurden verschiedene Grasmahd-Faserreste (frisch, nach Silierung, nach Jauche oder nach Vergärung) genutzt. Diese Faserstoffe wurden roh oder gewaschen oder zerkleinert eingesetzt, um unter definierten Bedingungen die Blattbildung zu bewerten. Für die Untersuchungen wurde eine Blattbildungsanlage von FRANK-PTI eingesetzt.

Die Blattbildung der einzelnen Fraktionen war mit üblichen Einsatzmengen an Fasern im Vergleich zur klassischen Papierherstellung aus Zellulosefasern nicht möglich. 80 g/m² bildeten kein geschlossenes Geflecht und lösten sich nicht vom Abscheidesieb. Die Erhöhung des Materialeinsatzes auf 320 g/m² führte nur zu geringfügigen Verbesserungen. So lösten sich die Fasergeflechte teilweise vom Sieb. Jedoch klebten die Fasern beim Trocknen am Trägerblatt an (Abb. 6).



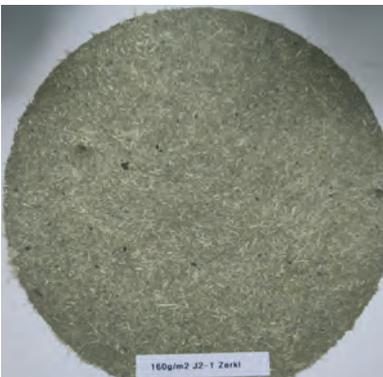
Abb. 6: Blattbildung mit 80 g/m² (links) und 320 g/m² Grasmahd

Bei der Verwendung von unbehandelter Grasmahd (ohne Silierung) war der Klebeeffect geringer als bei den silierten Produkten. Dies führt zum einen für das „Blatt“ mit 320 g/m² zu einer besseren Ablösung vom Deckblatt, aber zum anderen zu sehr geringen Bindungskräften zwischen den Fasern. Die erhaltenen Produkte waren sehr instabil, spröde und bröselig.

Deutlich vorteilhafter wirkte sich eine starke mechanische Zerkleinerung der Fasern auf die Blattbildung aus. Fasern aus einem Jaucheansatz wurden nach Entwässerung und Waschung nochmals mit Wasser versetzt und in einer Schneidmühle mit schnell drehenden Messern nass zerkleinert. Die optische Veränderung der Fasern durch diese Behandlung ist in Abb. 7 dargestellt.



Abb. 7: Grasmahdfasern aus Jaucheansatz vor und nach Zerkleinerung



Die Blattbildung mit 100 % dieser zerkleinerten Fasern funktionierte selbst für kleinere Substratmengen von 160 g/m² sehr gut. Abb. 8 zeigt das gut abgelöste Blatt mit vergleichsweise hoher Stabilität. Die Weiterentwicklung dieses Anwendungsfeldes birgt eine Reihe von Chancen und Freiheitsgraden, wenn gleich bereits mehrere Firmen mit Gras basierten Papieren am Markt tätig sind.

Abb. 8: Blattbildung mit 160 g/m² aus zerkleinerten Fasern

4 Herausforderungen

4.1 Rechtliche Voraussetzungen beim Einsatz in Biogasanlagen

Im Rahmen des Projektes wurde ein Rechtsgutachten erstellt, welches auf Anfrage erhältlich ist. Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass Grünschnitt gemäß der Biomasseverordnung grundsätzlich als Biomasse einsetzbar ist. Der Förderanspruch nach dem Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG) hängt jedoch stark von der Herkunft des Grünschnitts sowie dem Inbetriebnahmedatum der Biogasanlage ab. Für Anlagen, die bis 2011 in Betrieb genommen wurden, gilt das EEG 2009. Hierbei ist ein NawaRo-Bonus möglich, wenn der Grünschnitt als nachwachsender Rohstoff klassifiziert wird. Zudem kann ein Landschaftspflegebonus gewährt werden, sofern der Grünschnitt mehr als 50 % der eingesetzten Masse ausmacht. Ab dem EEG 2014 wurde diese Regelung jedoch strenger gefasst.

Für Biogasanlagen, die zwischen 2012 und 2014 in Betrieb genommen wurden, ist das EEG 2012 relevant. In diesem Fall erfolgt die Vergütung über die Einsatzstoffvergütungsklassen (EVK I/II), wobei bestimmte Grünschnittarten, wie solche aus Gärten, Parks oder Straßenbegleitgrün, von der Vergütung ausgeschlossen sind. Eine falsche Klassifikation kann zum dauerhaften Verlust von Förderansprüchen führen, weshalb eine vorherige Abstimmung mit dem Netzbetreiber dringend empfohlen wird. Dabei sollte auch ein Umweltgutachter einbezogen werden.

Zusätzlich sind weitere rechtliche Anforderungen zu beachten, insbesondere im Hinblick auf die Bioabfallverordnung, die Pflichten wie die Hygienisierung mit sich bringt, wenn Grünschnitt als Bioabfall eingesetzt wird. Bei Änderungen der Substratumstellung können Genehmigungspflichten bestehen, wobei Ausnahmen für Mindermengen unter 10 % möglich sind. Des Weiteren sind Nachhaltigkeitsnachweise für große Anlagen ab einer Feuerungswärmeleistung von 2 MW erforderlich.

4.2 Technische Voraussetzungen beim Einsatz in Biogasanlagen

Bei der Verwendung von Grasmahd (insbesondere für eine energetische Nutzung) ist der Einfluss der Lagerung auf den Energiegehalt zu berücksichtigen. Im Labor des IKTS wurden Lagerungsversuche für beprobte Grasschnitte in offenen Behältern mit Erfassung des Temperaturverlaufes durchgeführt. Trotz der zum Teil geringen Probenmenge zeigte sich eine ausgeprägte Eigenerwärmung der Proben auf bis zu 45 °C. Dabei zeigten sich signifikante Verluste bei Gesamtmasse (15 bis 20 %) und Organikfracht (ca. 35 %). Dieser Rückgang des energetischen Potenzials spiegelt sich auch im Gasertrag negativ wider (Abb. 9). Bezogen auf die ursprüngliche Frischmasse an Grasmahd gehen bei einer Lagerung von 9 d im Labor durch Masseverlust und Verlust an spezifischer Gasausbeute zwischen 40 % und 60 % an Biogasausbeute und damit an Energieausbeute oder potenziellem Erlös verloren.

Aus praktischen Erfahrungen bei Umgang mit Grasmahd kann abgeschätzt werden, dass in größeren Haufwerken im Freien der Abbau der Organik deutlich schneller beginnen und ablaufen kann. Deshalb ist für die energetische Nutzung von Grasschnitt dafür Sorge zu tragen, dass das Material auf schnellstem Wege in die Biogasanlage gelangt. Alternativ kann das Material auch in Ballen oder Schläuche gepresst oder in einem Silo stark verdichtet als Silage gelagert werden. Eigene Versuche haben gezeigt, dass beispielsweise eine Lagerung von Grasschnitt eingepresst in Fässern sehr gut über 6 Monate realisiert werden kann.

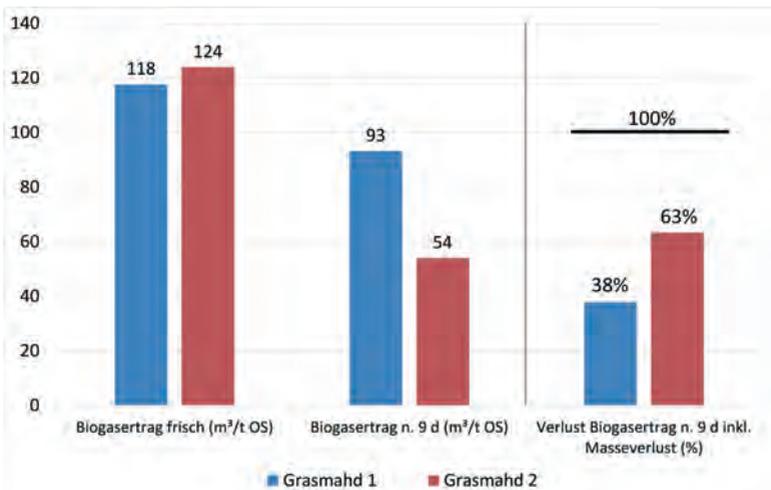


Abb. 9: Biogaserträge und Verluste durch 9 d Lagerung von Grasmahd

Eine weitere wichtige Voraussetzung für den Einsatz von Grasmahd in Biogasanlagen wäre die Sicherstellung, dass keine Störstoffe (Steine, Äste, ...) vorhanden sind und die Faserlängen insofern minimiert werden, dass keine Verzopfungen im Fermenter oder beim Umpumpen auftreten. Hierfür eignen sich verschiedene Vorbehandlungsstufen, wie z.B. die Zerkleinerung mittels Prallreaktor. Die Zerkleinerung von Grasmahd im Prallreaktor im großtechnischen Maßstab wurde am Standort einer Biogasanlage in Bayern getestet. Dazu wurde Grasmahd zum Teil mit Steinen (bis 10 cm Kantenlänge) und Ästen aufgestockt, um die Robustheit des Verfahrens zu testen. Die Zerkleinerung der Steine gelang sehr gut auf Größen kleiner 2 cm. Die hinzugefügten Äste wurden ebenfalls erheblich zerkleinert, blieben aber mit maximalen Längen von bis zu 20 cm noch als relevante Störstoffe übrig (Abb. 10). Dennoch kann der Prallzerkleinerer als Vorbehandlungseinheit für die Verwendung von Grasmahd empfohlen werden.



Abb. 10: Zerkleinerung von Steinen und Holz (jeweils vor und nach Prallreaktor)

4.3 Interkommunale Kooperation

Abseits der technischen und rechtlichen Herausforderungen liegt ein weiterer Schlüssel für eine verbesserte Erfassung und Nutzung von organischen Reststoffen im Verständnis der Entscheidungsprozesse im Spannungsfeld zwischen Bürger*innen, kommunalen Einrichtungen, Behörden und Politik. Die daraus mögliche Stärkung des Bewusstseins über die Chancen der Wertschöpfung sowie der Vermeidung von Kosten und eventuellen Umweltauswirkungen sind ein Anfang. Die Vernetzung von Akteuren in den unterschiedlichen Kommunen könnte zu einem kooperativen Gesamtkonzept führen, bei welchem Ressourcen für Sammlung und Transport synergetisch genutzt werden und Zuständigkeiten für private, kommunale und gewerbliche Reststoffe gebündelt werden.

Im Projekt IRRMA wurden dafür Schulungsformate entwickelt, Vernetzungworkshops organisiert, welche auch nach dem Ende des Projektes zu einer gezielten Entwicklung dieses Bereiches beitragen sollen. Darüber hinaus wurde eine Software für einen virtuellen Marktplatz entwickelt, welche Angebot und Nachfrage von und nach organischen Reststoffen miteinander verknüpfen soll. Ein stabiles und relevantes Substratangebot auf der einen und eine gute Wertschöpfung auf der anderen Seite sind Voraussetzung für nachhaltiges Wirtschaften. Da beide Seiten voneinander abhängen, sollte sowohl die Sammlung als auch die Ansiedlung von Verwertern in den Regionen unterstützt werden.

Kontakt

Dipl.-Ing. Björn Schwarz, Projektleiter IKTS

Fraunhofer Institut für Keramische Technologien und Systeme (IKTS)

✉ bjoern.schwarz@ikts.fraunhofer.de | 🌐 www.ikts.fraunhofer.de

Bewertung von Vergasungsverfahren zur stofflichen Nutzung von Klärschlamm

Zusammenfassung: Im Zuge der angestrebten Defossilisierung industrieller Prozesse gewinnt die Nutzung biogener Reststoffe zunehmend an Bedeutung. Biomasse stellt nicht nur eine klimaneutrale Energiequelle dar, sondern eröffnet auch neue Möglichkeiten zur Rückgewinnung kritischer Ressourcen und Wertstoffe. Besonders thermochemische Verfahren wie die Vergasung bieten die Chance, aus heterogenen organischen Einsatzstoffen ein vielseitig nutzbares Synthesegas zu erzeugen, das sowohl energetisch aber insbesondere auch stofflich weiterverwendet werden kann. Durch gezielte Prozessführung können wertvolle Ressourcen wie Phosphor zurückgewonnen und Schadstoffe wie Schwermetalle abgetrennt werden. Die Ergebnisse der durchgeführten Technologiebewertung zeigen, dass zwar einige Vergasungstechnologien prinzipiell für die Klärschlammvergasung geeignet sind, jedoch weiterhin erheblicher Entwicklungsbedarf hinsichtlich ihrer gezielten Anpassung an die Anforderungen einer thermochemischen Phosphorrückgewinnung besteht. In diesem Kontext erscheint insbesondere die Elektrifizierung des Prozesses – beispielsweise durch den Einsatz von Plasmatechnologien – als ein vielversprechender Ansatz.

Abstract: In accordance with the desired defossilization of industrial processes, the use of biogenic residues is becoming increasingly important. Biomass is not only a climate-neutral source of energy, but also provides new opportunities for recovering critical resources and valuable materials. In particular, thermochemical processes such as gasification offer the opportunity to produce a versatile synthesis gas from heterogeneous organic feedstocks, which can be used for both energy and, in particular, material purposes. Through targeted process control and gas purification, valuable resources such as phosphorus can be recovered and pollutants such as heavy metals can be separated. The results of the conducted technology assessment show that although some gasification technologies are generally suitable for sewage sludge gasification, there is still significant need for further development to tailor these processes specifically to the requirements of thermochemical phosphorus recovery. In this context, electrification of the process – particularly using plasma technology – appears to be a promising approach.

1 Einleitung und Problemstellung

Kohlenstoff wird für die Herstellung von einer Vielzahl von Produkten (Kunststoffe, Pharmazeutika, usw.) benötigt. Aktuell nutzt die chemische Industrie überwiegend fossile Kohlenstoffquellen wie Erdgas, Erdöl oder Kohle. Die Begrenztheit der fossilen Rohstoffe und die Herausforderungen des Klimawandels zwingen zu einer Umstellung von der derzeit etablierten linearen Wirtschaft zu einer klimaneutralen Kreislaufwirtschaft. Eine wesentliche Rolle spielt dabei der biogene Kohlenstoff aus Biomasse. Vor diesem Hintergrund besteht ein gro-

ßer Bedarf an Technologien, die Biomasse als Rohstoffquelle für die chemische Industrie nutzbar machen. Eine energetisch effiziente und kostengünstige Technologieoption könnte die Produktion von Synthesegas aus Biomasse darstellen. Die Hauptbestandteile des Synthesegases – Wasserstoff (H_2) und Kohlenmonoxid (CO) – werden für die Herstellung verschiedenster Zwischen- und Endprodukte der chemischen Industrie benötigt. Derzeit wird Synthesegas weltweit fast ausschließlich aus fossilen Kohlenstoffquellen erzeugt [1]. Es liegt ein breites Spektrum an technisch ausgereiften Verfahren der Synthesegasproduktion vor, die seit Jahrzehnten im großtechnischen Maßstab betrieben werden. Diese Verfahren können auch für die Erzeugung von Synthesegas aus biogenen Kohlenstoffquellen eingesetzt werden. Seit den 1990er Jahren wurden einige Technologien, die ursprünglich für die Synthesegaserzeugung aus Kohle entwickelt wurden, an den Einsatz von festen kohlenstoffhaltigen Abfällen und biogenen Reststoffen angepasst [2]. Allerdings ist diese Umstellung der Rohstoffbasis oft mit erheblichen technischen und wirtschaftlichen Herausforderungen verbunden. Die Herausforderungen, speziell im Falle der biogenen Reststoffe, ergeben sich im Wesentlichen aus den ungünstigen rohstoffspezifischen Einsatzstoffcharakteristiken sowie der beschränkten regionalen und saisonalen Verfügbarkeit der Biomasse. Ungünstig sind der typischerweise niedrige spezifische Heizwert (aufgrund des hohen Wasser- und Sauerstoffgehalts), die niedrige Dichte, der hohe Gehalt an potenziellen Schadstoffen (insbesondere Alkalimetalle und Chlor), die spezifischen, in der Biomasse enthaltenen mineralischen Bestandteile, die ein problematisches Ascheschmelzverhalten bewirken können, sowie die biomassetypischen Schwankungen der Einsatzstoffqualität, die einen stabilen Reaktorbetrieb beeinträchtigen. Bei vielen Verfahren der Synthesegasproduktion führt das dazu, dass nur ausgewählte Biomassefraktionen verarbeitet werden können, welche die Spezifikationsanforderungen des Produktionsverfahrens erfüllen. Für einen biogenen Einsatzstoff muss daher zunächst geprüft werden, welche Verfahren unter Berücksichtigung der technischen, ökonomischen und ökologischen Aspekte für eine Erzeugung von biostämmigem Synthesegas geeignet sind.

Ein weiteres Element, das sowohl in vielen biologischen Prozessen als auch als wertvoller Rohstoff für die chemische Industrie benötigt wird, ist Phosphor. Derzeit wird Phosphor vorwiegend aus dem phosphathaltigen Mineral Apatit ($Ca_5(PO_4)_3X$ mit $X = Cl, OH$ oder F) gewonnen. Die Rohphosphatvorkommen sind weltweit allerdings sehr ungleichmäßig verteilt. Europa ist bei der Versorgung mit phosphorhaltigen Rohstoffen von Importen aus einigen wenigen Ländern (insbesondere Marokko, Russland) abhängig [3], weshalb die EU Phosphatgestein als kritischen Rohstoff eingestuft hat [4]. Um den Abbau von primären, begrenzt verfügbaren Phosphorquellen einzuschränken und den Übergang zu einer nachhaltigen Phosphor-Kreislaufwirtschaft einzuleiten sowie die Importabhängigkeit zu reduzieren, wird derzeit dringend nach neuen Möglichkeiten für die Umstellung der Rohstoffbasis für die Herstellung von phosphorhaltigen Produkten von Primär- auf Sekundärrohstoffe gesucht.

Eine aussichtsreiche, deutschland- und europaweit verfügbare Phosphorquelle stellt Klärschlamm aus der kommunalen und industriellen Abwasserreinigung dar. Laut statistischem Bundesamt [5] fallen deutschlandweit ca. 1.6 Millionen Tonnen (Trockenmasse) Klärschlamm pro Jahr an (Stand 2023). Bei einem durchschnittlichen Phosphorgehalt von 3 % könnten daraus ca. 50 000 t Phosphor zurückgewonnen werden. Diese Menge reicht aus, um mehr als 40 % des deutschen Phosphorimports zu substituieren [6].

Bei Klärschlamm handelt es sich um einen Einsatzstoff, welcher neben dem Wertstoff Phosphor auch eine hohe Schadstoffbelastung durch beispielsweise Schwermetalle, Medikamentenrückstände und andere Pathogene aufweist. Aus diesem Grund wird ein Großteil des Klärschlammes (81 % im Jahr 2023 [5]) verbrannt und zur Stromerzeugung genutzt (teilweise durch Co-Verbrennung in den noch betriebenen Kohlekraftwerken). Die Klärschlammverbrennung ist mit knapp 2 Mio. t CO₂ pro Jahr für mehr als 0.3 % der gesamten CO₂-Emissionen in Deutschland verantwortlich [7]. Der im Klärschlamm enthaltene Phosphor verbleibt nach der Verbrennung in der anfallenden Asche und kann zurückgewonnen werden. Für die Phosphorrückgewinnung aus Klärschlamm-Asche wurden nasschemische (Extraktion der Phosphate), biochemische sowie thermochemische Verfahren entwickelt [8]. Allerdings ist der Energieaufwand für diese Prozesse relativ hoch, da der Phosphor während der Verbrennung in sauerstoffreicher Atmosphäre stabil in die Aschematrix eingebunden wird. Zusätzlich reichern sich die Schwermetalle in der Aschephase an, so dass eine selektive Abtrennung des Phosphors aus der Asche prozesstechnisch erschwert wird.

Um Klärschlamm als inländischen Rohstoff effizienter zu nutzen, wäre es von Vorteil, neben dem Phosphor auch den im Klärschlamm enthaltenen biogenen Kohlenstoff als nachhaltige Rohstoffquelle für die chemische Industrie verfügbar zu machen. Eine geeignete Option könnte die Produktion von Synthesegas aus Klärschlamm darstellen. Dabei können auch Synergien in Bezug auf die Rückgewinnung von Phosphor genutzt werden, falls die Freisetzung von gasförmigen phosphorhaltigen Spezies ermöglicht wird. Der Phosphor kann in dieser Form direkt als wertvolles Rohprodukt für die chemische Industrie genutzt werden. Zuletzt durchgeführte Grundlagenuntersuchungen an der TU Bergakademie Freiberg haben gezeigt, dass der im Klärschlamm gebundene Phosphor unter stark reduzierenden Bedingungen nicht in der Aschephase verbleibt, sondern in die Gasphase überführt wird [9].

Basierend auf den Erkenntnissen dieser Untersuchungen wurde ein Technologiescreening der kommerziell umgesetzten sowie sich in der Entwicklung befindlichen Technologien der Synthesegaserzeugung aus Biomasse durchgeführt. Dabei standen folgende Fragen im Fokus der Technologiebewertungen:

- Welche Verfahren wären grundlegend für die Synthesegaserzeugung aus Klärschlamm geeignet?

- Welche Verfahren würden zudem auch eine gleichzeitige thermochemische Rückgewinnung von Phosphor zulassen?

Im Folgenden werden die wesentlichen Prinzipien der Vergasung als zentrale Technologie der Synthesegaserzeugung erläutert. Die Schlussfolgerungen aus der durchgeführten Technologiebetrachtung werden anschließend dargestellt.

2 Grundlagen der Vergasung

Bei der Vergasung werden kohlenstoffhaltige Rohstoffe durch die Reaktion mit Wasserdampf, CO_2 und/oder Sauerstoff (s.g. Vergasungsmittel) bei hohen Temperaturen in ein H_2/CO -haltiges Produktgas umgewandelt. Die benötigte Reaktionswärme kann durch die partielle Oxidation des Einsatzstoffs mit Sauerstoff bereitgestellt werden. Im Unterschied zur Verbrennung wird aber nur eine geringe Menge an Sauerstoff zugeführt, so dass lediglich ein Teil des Einsatzstoffs unter Bildung von CO_2 verbrennt. Der überwiegende Teil des eingebrachten Kohlenstoffs (üblicherweise im Bereich 85-95 %, abhängig von den Einsatzstoffeigenschaften und Prozessbedingungen) wird zu CO umgewandelt. Daraus ergibt sich eine Reduzierung der CO_2 -Emissionen von mindestens 85 % gegenüber der Verbrennung. Das erzeugte H_2/CO -haltige Synthesegas wird in der chemischen Industrie eingesetzt. Damit wird der Kohlenstoff nicht als klimaschädliches CO freigesetzt, sondern als wertvoller Rohstoff für die Herstellung ganz unterschiedlicher Produkte genutzt. Diese Produkte können am Ende des Lebenszyklus wiederum zur Synthesegasproduktion mittels Abfallvergasung eingesetzt werden, so dass der Kohlenstoff in einem Kreislauf geführt wird und keinen negativen Einfluss auf das Klima hat. Bei einer geeigneten Wahl der Prozessbedingungen der Vergasungsverfahren können auch weitere, im Einsatzstoff enthaltene Elemente, beispielsweise Phosphor, in die Gasphase überführt und als Wertstoff genutzt werden, so dass sich positive Synergieeffekte ergeben.

Vergasungsverfahren lassen sich anhand ihres Vergasungsprinzips bzw. der Art der Kontaktierung zwischen Vergasungsmittel und Einsatzstoff in Festbett-, Wirbelschicht- und Flugstromvergasung unterscheiden [10].

Bei der Festbettvergasung wird eine Einsatzstoffschüttung mit dem Vergasungsmittel um- bzw. durchströmt. Dafür ist ein grobkörniger Einsatzstoff notwendig, um eine gute Durchströmung und gleichmäßige Gasverteilung gewährleisten zu können. Der Sauerstoffbedarf ist vergleichsweise gering. Abhängig von Temperatur und Aschezusammensetzung kann es zur Verschlackung kommen, wobei die Asche aufgeschmolzen wird. Beim Erstarren der Schlacke verglast (vitrifiziert) diese, wobei die Schwermetalle stabil eingebunden werden.

Bei der Wirbelschichtvergasung wird der Einsatzstoff durch das Vergasungsmittel fluidisiert und in Schwebelage gehalten. Dafür ist eine genau definierte, enge Korngrößenverteilung des Einsatzstoffs notwendig, typischerweise im Bereich von 1-6 mm. Der Sauerstoffbedarf ist höher als bei den Festbettverfahren. Es ist wich-

tig, eine Ascheerweichung zu vermeiden, da dies zur Agglomeration der Partikel führen und damit den Zusammenbruch der Wirbelschicht verursachen kann.

Bei der Flugstromvergasung wird der staubförmige Einsatzstoff vom Vergasungsmittel mitgerissen und innerhalb weniger Sekunden umgesetzt. Der Sauerstoffbedarf ist hierbei von allen drei Vergasungsverfahren am höchsten, was eine intensive Reaktion zur Folge hat. Dadurch werden Temperaturen von über 1300 °C erreicht und ein nahezu vollständiger Kohlenstoffumsatz realisiert. Infolge der hohen Temperaturen kommt es typischerweise zur Verschlackung, wodurch Schwermetalle immobilisiert werden können.

3 Eigenschaften von Klärschlamm und Anforderungen an die Vergasungstechnologie

Klärschlamm ist eine sehr heterogener Einsatzstoff. Analysen in vorherigen Projekten (PhosCOOR, FKZ: 03EE5086) an der TU Bergakademie Freiberg haben typische Zusammensetzungen von Klärschlamm identifiziert. Die Analyseergebnisse sind in Tab. 1 zusammengefasst.

Tab. 1: Übersicht zur typischen Klärschlammzusammensetzung 11 untersuchter Klärschlämme.

	Einheit	Mittelwert ± Standardabweichung
Feuchte	Ma.-%	8.8 ± 4.4
Asche 815 °C	Ma.-% (wf)	36.8 ± 5.5
Flüchtige	Ma.-% (wf)	56.0 ± 4.9
C _{fix} 815 °C	Ma.-% (wf)	7.2 ± 2.6
Heizwert	MJ/kg (wf)	13.8 ± 1.2
Brennwert	MJ/kg (wf)	14.8 ± 1.3
C	Ma.-% (wf)	33.9 ± 2.9
H _{org}	Ma.-% (wf)	4.3 ± 0.5
N	Ma.-% (wf)	5.1 ± 0.7
O	Ma.-% (wf)	19.4 ± 2.4
S	Ma.-% (wf)	1.0 ± 0.5
Al	Ma.-% (wf)	4.4 ± 2.3
Ca	Ma.-% (wf)	4.8 ± 2.3
Fe	Ma.-% (wf)	3.3 ± 1.4
P	Ma.-% (wf)	3.2 ± 0.8
Si	Ma.-% (wf)	3.4 ± 2.2

Klärschlamm weist einen hohen Aschegehalt und einen hohen Anteil an flüchtigen Bestandteilen bei einem niedrigen Anteil an fixem Kohlenstoff sowie vergleichsweise niedrigen Brenn- und Heizwert auf.

Ein geeignetes Vergasungsverfahren muss demnach mit relativ hohen Aschegehalten umgehen können. Der hohe Anteil an flüchtigen Bestandteilen kann zu Problemen mit teerartigen Ablagerungen im Prozess führen, was einen zusätzlichen Aufbereitungsschritt notwendig macht. Der niedrige C_{fix} -Gehalt weist darauf hin, dass ein Großteil der Energie des Einsatzstoffs auf die flüchtigen Bestandteile entfällt. Insgesamt sind der Brenn- und Heizwert im Vergleich zu typischen fossilen Kohlenstoffquellen eher gering. Beides bedingt eine Anpassung des Reaktordesigns, da aufgrund des niedrigen C_{fix} der erwartete Energiegehalt des erzeugten Gases niedrig ist. Um dennoch ein qualitativ hochwertiges Produktgas zu erhalten, müssen die flüchtigen Bestandteile effizient umgesetzt werden. Hierbei sind Wirbelschicht- und Flugstromverfahren in der Regel besser geeignet als Festbettverfahren.

Weiterhin sind im Klärschlamm saisonabhängig erhöhte Gehalte an Alkalimetallen (z.B. Na und K) im unteren Prozentbereich zu erwarten, die zur Ansatzbildung im Reaktor beitragen können. Zudem muss der Vergasungsrückstand aufgrund eines erhöhten Schwermetallgehalts weiter aufbereitet werden. Idealerweise erfolgt während der Vergasung eine Schlackebildung, sodass die Schwermetalle in der glasartigen (vitrifizierten) Schlacke eingebunden werden. Das Ascheschmelzverhalten variiert dabei ebenfalls stark und ist von der chemischen Zusammensetzung der Asche abhängig. Typische Fließtemperaturen liegen zwischen 1175 und 1550 °C. Getrockneter Klärschlamm liegt üblicherweise als feines Pulver (< 1mm) vor, sodass Festbettvergasungsverfahren eine mechanische Vorbehandlung (z.B. Pelletierung oder Brikettierung) erfordern.

Für die weitere stoffliche Verwertung des entstehenden Synthesegases ist eine hohe Synthesegasausbeute ($\text{CO} + \text{H}_2 > 75 \text{ vol.-%}$) sowie ein hohes H_2/CO -Verhältnis von idealerweise > 2 (beispielsweise für die MeOH-Herstellung) sowie ein geringer CO_2 - und CH_4 -Gehalt erstrebenswert. Zusätzlich ist es vorteilhaft, wenn die Vergasung bereits unter erhöhtem Betriebsdruck erfolgt, um eine nachträgliche Gasverdichtung zu vermeiden. Das Verfahren sollte zudem bereits in einem fortgeschrittenen Entwicklungszustand sein ($\text{TRL} \geq 6$) sowie eine geringe Komplexität aufweisen.

Die thermochemische Phosphorfreesetzung aus Klärschlamm benötigt Temperaturen über 1050 °C, sowie stark reduzierende Bedingungen [9]. Phosphor wird dabei in elementarer Form in die Gasphase überführt, indem die im Klärschlamm vorhandenen Phosphate reduziert werden. Die Reduktion benötigt Kohlenstoff aus dem Klärschlamm als Reduktionsmittel. Eine zu hohe Sauerstoffkonzentration in der Vergasungsatmosphäre fördert die Oxidation des Kohlenstoffs und konkurriert dadurch mit der gewünschten Reduktion des Phosphors. Dies beeinträchtigt die Effizienz der Phosphorfreesetzung erheblich. Für

eine effiziente Phosphorfreisetzung muss der Sauerstoffpartialdruck möglichst geringgehalten werden. Idealerweise erfolgt die Energiezufuhr allotherm, um eine zusätzliche Sauerstoffzufuhr zu vermeiden.

4 Eignung ausgewählter Vergasungsverfahren für die thermo-chemische Phosphorrückgewinnung aus Klärschlamm

In Tab. 2 sind ausgewählte, biomassefähige Vergasungsverfahren aus einem Technologiescreening gegenübergestellt und hinsichtlich ihrer Eignung für die Klärschlammvergasung sowie die thermochemische Phosphorrückgewinnung bewertet. Die Bewertung erfolgte dabei durch einen Vergleich der voran beschriebenen Eigenschaften des Klärschlammes mit den Anforderungen der einzelnen Vergasungstechnologien an die Einsatzstoffbeschaffenheit sowie den Voraussetzungen für eine thermochemische Phosphorrückgewinnung. Weichen die Anforderungen wesentlich von den Klärschlammeeigenschaften ab, stellt dies ein Ausschlusskriterium für die betrachtete Technologie dar. Ausschlusskriterien sind in Tab. 2 rot markiert.

Die Auswertung verschiedener Technologien zur thermochemischen Konversion zeigt eine klare Dominanz von Wirbelschichtverfahren im Bereich der Biomassevergasung. Von den insgesamt 13 betrachteten Anbietern nutzen 8 das Wirbelschichtverfahren, was auf dessen technologische Reife, Skalierbarkeit und Betriebssicherheit hinweist. Die Technologiereifegrade dieser Verfahren liegen zumeist zwischen 7 und 8, was bedeutet, dass sie sich bereits in der Demonstrations- oder Markteinführungsphase befinden. Von Gidara und Sülzle Kopf wurde die Eignung der Wirbelschichtverfahren für die Behandlung von Klärschlamm bereits in der Praxis bestätigt.

Ein Nachteil der Wirbelschichtverfahren besteht in der nicht-verschlackenden Betriebsweise. Die entstandene Asche enthält weiterhin die im Klärschlamm vorhandenen Schwermetalle, die ohne Stabilisierung oder weitere Behandlung nicht deponiert oder verwertet werden kann. Die Ascheentsorgung stellt daher eine Herausforderung bei der Vergasung von Klärschlamm dar.

Ein weiterer zentraler Befund der Analyse ist, dass die meisten betrachteten Verfahren autotherm betrieben werden. Das bedeutet, dass die zum Betrieb erforderliche Wärme durch partielle Oxidation des Einsatzstoffes mit Luft oder Sauerstoff erzeugt wird. Der notwendige Sauerstoffeintrag führt zu einer Kohlenstoffoxidation, welche zwar der Wärmebereitstellung dient, jedoch in Konkurrenz zur Phosphorrückgewinnung steht. Weiterhin reichen die in Wirbelschichtverfahren typischen Temperaturen (zumeist unter 1100 °C) nicht aus, um den Phosphor effizient in die Gasphase zu überführen. Für höhere Temperaturen müsste mehr Sauerstoff verwendet werden, welcher die Phosphorrückgewinnung weiter beeinträchtigt und abhängig vom Einsatzstoff zur Ascheerweichung führt. Zum

aktuellen Zeitpunkt ist keine der betrachteten Technologien für die thermochemische Phosphorrückgewinnung geeignet.

5 Fazit und Ausblick

Aktuell sind bereits einige Verfahren zur Klärschlammvergasung verfügbar, wovon allerdings keines im derzeitigen Zustand gesichert für die thermochemische Phosphorrückgewinnung geeignet ist. Aus technologischer Sicht ist daher ein Übergang zu allothermen Verfahren erstrebenswert, um eine thermochemische Phosphorrückgewinnung aus Klärschlamm zu ermöglichen. Dabei wird die benötigte Reaktionswärme extern zugeführt, zum Beispiel durch Elektrifizierung mittels Plasmaeinsatz. Der wesentliche Vorteil dieses Ansatzes liegt in der Möglichkeit, unter reduzierenden Bedingungen bei gleichzeitig hohen Temperaturen zu arbeiten, da die Temperatur unabhängig vom Sauerstoffgehalt eingestellt werden kann. Darüber hinaus ergibt sich durch den Verzicht auf Sauerstoffeintrag zur Wärmebereitstellung eine geringere CO_2 -Emission, da kein zusätzlicher Kohlenstoff zu CO_2 oxidiert wird.

Um die genannten Vorteile zu realisieren, bedarf es einer Anpassung bestehender Anlagenkonzepte. Am Institut für Energieverfahrenstechnik und Chemieingenieurwesen (IEC) laufen hierzu bereits Grundlagenarbeiten, um sowohl die prozesstechnische Machbarkeit als auch die stoffliche und energetische Effizienz im Technikumsmaßstab zu validieren. Diese Arbeiten bilden die Grundlage für eine zukünftige, ressourcenschonende und klimaneutrale Vergasungstechnologie, die sowohl die energetische Nutzung als auch die gezielte Rückgewinnung von Wertstoffen wie Phosphor aus Abfallstoffen ermöglicht.

Tab. 2: Übersicht über ausgewählte Biomassevergasungsverfahren sowie deren Eignung für die Klärschlammvergasung und thermochemische Phosphorrückgewinnung.

Die Synthesegasqualitäten H₂/CO sowie H₂+CO beziehen sich auf die Biomassevergasung unterschiedlicher Einsatzstoffe, also nicht ausschließlich auf Klärschlamm

Anbieter	Prinzip	TRL	Temperatur	Druck	HW in MJ/kg	Asche	Feuchte	Wärmebereit.	H ₂ /CO	H ₂ +CO	η_{th}	C-Konv.	Komplex.	Schlacke?	geeignet für KS	geeignet für tPR
Gidara (HTW)	WS		7 < 1100 °C	< 30 bar	für Klärschlamm	geeignet	auto	0,8-1,1	65-73%	80%	70-97%	niedrig	nein	+	-	
	WS		8 < 1000 °C	2-3 bar	> 18	< 20%	auto	1,4	45-60%	50-60%	78-92%	mittel	nein	-	-	
Repotec (BEST)	WS		8 800 - 850 °C	atm	-	-	allo	1,5-2	55-65%	70%	55-60%	mittel	nein	+	-	
TK Uhde (Prenflo)	FS		7 < 1600 °C	> 40 bar	-	< 20%	auto	0,38-0,43	81-85%	77-80%	98-99%	hoch	ja	eher +	-	
	FS		6 1100 °C	atm	-	< 40%	allo	2-3	70-90%	70%	95%	hoch	nein	+	vielleicht	
Andritz Carbona	WS		8 700 - 900 °C	< 3 bar	12-30	< 41%	auto	ca. 1	ca. 42%	n. a.	n. a.	niedrig	nein	+	-	
Valmet	WS		8 700 - 900 °C	atm	13-20	< 10%	auto	n. a.	n. a.	n. a.	n. a.	niedrig	nein	-	-	
	WS		7 830 - 940 °C	2-3 bar	-	-	auto	1,2	58% 70-80%	70-80%	90%	niedrig	nein	+	-	
RegaWatt	FB		8 < 1000 °C	atm	-	-	auto	0,67	76% 85%	85%	90%	mittel	nein	eher -	-	
Sun Gas	WS		6 840 - 1100 °C	< 30 bar	> 13	< 41%	auto	0,75-1	65-75%	80%	95-98%	niedrig	nein	+	-	
	FB		5 < 2200 °C	atm	> 15	< 15%	auto	0,27-0,67	66-79%	66-79%	> 95%	hoch	ja	eher +	-	
InEnTec	FB		7 < 1400 °C	atm	für Klärschlamm	geeignet	auto + Plasma	0,78	83,3% 80%	n. a.	n. a.	hoch	ja	+	vielleicht	
Südzie Kopf	WS		7 850 - 880 °C	atm	für Klärschlamm	geeignet	auto	n. a.	n. a.	n. a.	n. a.	niedrig	nein	+	-	

(WS: Wirbelschicht, FS: Flugstrom, FB: Festbett, TRL: Technologiereifegrad, atm: atmosphärisch, HW: Heizwert, auto: autotherm, allo: allotherm, η_{th} : Kaltgaswirkungsgrad, C-Konv.: Kohlenstoffumsatz, Komplex.: Komplexität des Verfahrens, KS: Klärschlamm, tPR: thermochemische Phosphorrückgewinnung, n. a.: nicht angegeben / keine Daten verfügbar.

Danksagung

Besonderer Dank gilt dem Freistaat Sachsen und der Europäischen Union für die Unterstützung des Vorhabens „Herstellung und Speicherung von Wasserstoff aus biogenen Rest- und Abfallstoffen“ (Kurztitel: InnoTeam Bio2H₂) sowie dem Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) für die Unterstützung des Vorhabens „Herstellung von synthetischem Methan und Phosphor aus Klärschlamm, Gärresten und weiteren anderweitig nicht nutzbaren biogenen Rest- und Abfallstoffen“ (KS-Meth) mit dem Förderkennzeichen 03DPS1065A/B.



Diese Maßnahme wird mitfinanziert durch Steuermittel auf der Grundlage des vom Sächsischen Landtag beschlossenen Haushaltes.



Literatur/Quellen

- [1] BLAUMEISTER, Dominik: Wasserstoff in der chemischen Industrie. URL https://www.wasserstoffkompass.de/fileadmin/user_upload/img/news-und-media/dokumente/Chemische_Industrie.pdf
- [2] MOLINO, Antonio ; CHIANESE, Simeone ; MUSMARRA, Dino: Biomass gasification technology: The state of the art overview. In: Journal of Energy Chemistry 25 (2016), Nr. 1, S. 10-25
- [3] U.S. GEOLOGICAL SURVEY; JASINSKI, Stephen M. (Mitarb.): Mineral Commodity Summaries: Phosphate Rock. 2023
- [4] VERORDNUNG DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTS UND DES RATES: zur Schaffung eines Rahmens zur Gewährleistung einer sicheren und nachhaltigen Versorgung mit kritischen Rohstoffen und zur Änderung der Verordnungen (EU) Nr. 168/2013, (EU) 2018/858, (EU) 2018/1724 und (EU) 2019/1020 (in Kraft getr. am 11. 4. 2024) (2024-04-11). URL <http://data.europa.eu/eli/reg/2024/1252/2024-05-03>
- [5] STATISTISCHES BUNDESAMT: Pressemitteilung Nr. 472. Wiesbaden, 12.12.2024
- [6] 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
- [7] UMWELTBUNDESAMT: Höhe der CO₂-Emissionen in Deutschland in den Jahren 1990 bis 2024. URL <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/2275/umfrage/hoehe-der-co2-emissionen-in-deutschland-seit-1990/> – Überprüfungsdatum 2025-05-09
- [8] DEUTSCHE PHOSPHOR PLATTFORM E.V.: P-Recyclingtechnologien Tabelle. URL <https://www.deutsche-phosphor-plattform.de/document/tabelle-zu-p-recycling-technologien/>. – Aktualisierungsdatum: 2024-06-27 – Überprüfungsdatum 2025-05-09

- [9] FRANKE, Eric ; SHALNEV, Sergei ; JAHN, Jakob ; PIETSCHNER, Teres ; GRÄBNER, Martin: Experimental investigations of thermochemical phosphorus release behavior from sewage sludge under inert and reducing conditions. In: Journal of Cleaner Production 493 (2025), S. 144687
- [10] GRÄBNER, Martin: Industrial coal gasification technologies covering baseline and high-ash coal. Weinheim : Wiley-VCH-Verl., 2015

Kontakt

Dipl.-Chem. Eric Franke

TU Bergakademie Freiberg
Institut für Energieverfahrenstechnik und Chemieingenieurwesen
Professur Energieverfahrenstechnik

☎ +49 (0)373.39-4809 | ✉ Eric.Franke@iec.tu-freiberg.de

🌐 www.tu-freiberg.de/fakult4/iec

KURZBEITRÄGE

Robuste One-Site-Gasmesstechnik für Biogasprozesse

Charakterisierung der Prozesskinetik mittels dynamischer Sensorsignalfunktionen

Die Qualität der Biogasprozesstechnik wird von Einflussgrößen wie der Substratzusammensetzung, der Durchmischung, dem pH-Wert, der Temperaturverteilung und letztendlich von der Verweildauer der Stoffgemische im Reaktor bestimmt [1-3]. Zur Effizienzsteigerung können verbesserte Prozessmodelle auf Grundlage von KI [4, 5] und gezielte Maßnahmen zur bedarfsorientierten Gasproduktion [6] eingesetzt werden. Zusätzlich zur laufenden Bestimmung der Gaszusammensetzung ist die Charakterisierung des anaeroben Biogasprozesses mittels der Bestimmung volatiler Fettsäuren (VFA) in der Flüssigphase anerkannt [7, 8], wobei beispielsweise die Titration besondere Anforderungen an die Probenahme aus der Flüssigphase stellt [9]. Daher ist die kontinuierliche Messung der VFA-Gehalte im Biogas von besonderem Interesse.

Die Probenahme aus dem Gasstrom ist technisch einfach, zumal nur ein geringer Messgasstrom über eine zwecks Verhinderung der Wasser- und Säurekondensation beheizte Leitung erforderlich ist. Zur VFA-Messung eignen sich teils-elektive Halbleiter-Gassensoren (HGS) [10], die in einer Ex-geschützten Fluidik und Elektronik verschaltet werden [11]. Diese werden elektronisch so angesteuert, dass im Temperaturbereich $\approx 100 \dots 300 \text{ }^\circ\text{C}$ Physisorption und ab $\approx 200 \dots 500 \text{ }^\circ\text{C}$ Chemisorption der kurzketigen VFA-Moleküle erfolgen. Verschiedene Dotierungen ermöglichen spezifische Reaktionen der Adsorbate bzw. Chemisorbate, die sich nach den Anionen mit unterschiedlichen Ionisierungsgraden, z.B. O^- , O_2^- usw. unterscheiden. Detektiert werden die Anhydride bzw. Radikale von Fettsäuren, Alkoholen, Wasser und Ammoniak, womit eine Selektivität aufgrund der Kalibrierung im Labor ermöglicht wird. Die Beladung mit Messgas führt zu einer Widerstandsänderung. Bei Reoxidation mit gefilterter Frischluft erfolgt die Widerstandsänderung in entgegengesetzter Richtung, und die Sensoren kehren elektrisch in ihren Ausgangszustand zurück. Auf diese Weise kann die Biogas-Prozesskinetik mittels dynamischer Sensorsignalfunktionen (DSSF) quantitativ verfolgt werden. Abb. 1 zeigt beispielhafte Kennlinien für die Beladung der HGS mit einem Gemisch aus vorgereinigter Luft und 100 ppm Essigsäure. Anschließend erfolgt jeweils die Reoxidation im gefilterten Reinluftstrom.

Die nichtlinearen Zeitfunktionen zeigen durchweg Übergänge zu Asymptoten mit konstanter Steigung bzw. zu weiteren Funktionen größerer Zeitkonstanten. Daraus ergeben sich Spektren der Geschwindigkeitsparameter [12]. Die verwendeten HGS weisen eine ausreichende Selektivität zum Nachweis der Radikale $-\text{H}$, $=\text{H}_2$, $-\text{CH}_3$, $=\text{CO}$, $-\text{OH}$ der niederketigen aliphatischen Fettsäuren auf

mit der Möglichkeit der rechentechnischen Auftrennung nach den Übergangsfunktionen in den verschiedenen Sensoren. Aufgrund der Messung aus dem Gasstrom des Fermenters besitzen die HGS den Vorteil, nicht mit der Flüssigphase zu kontaminieren. Dies minimiert die Einflüsse möglicher Störstoffe und trägt somit zur Zuverlässigkeit und Standzeit der Sensoren bei. Die Zeitkonstanten der Beladung mit Messgas und der Reoxidation liegen im Bereich einiger Sekunden, weswegen die Wechsel zwischen zu messender Gasmischung und gefilterter Frischluft im 10-Sekundentakt erfolgen können. Infolge ihrer Selektivität und der auf die kurzketigen Radikale bezogenen Querempfindlichkeit eignen sich die HGS für die kontinuierliche, sowohl qualitative wie auch quantitative Signalabgabe.

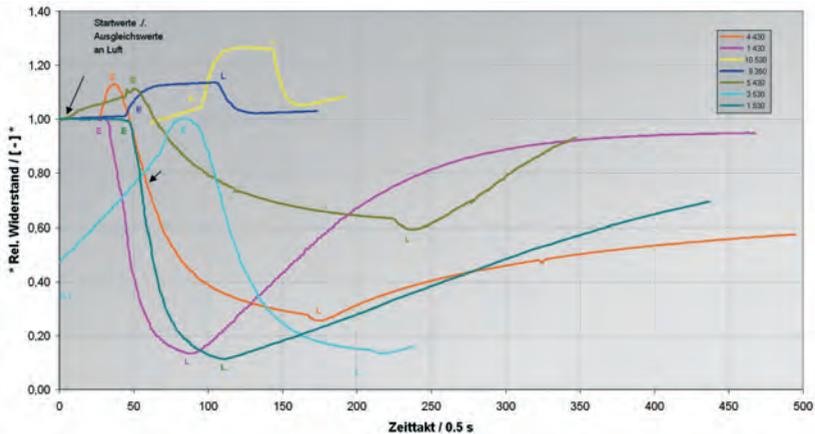


Abb. 1: Funktion unterschiedlich dotierter HGS mit Essigsäurebeladung; bei 5 Sensoren erfolgt zunächst eine Erhöhung der Ladungsträgerkonzentration, bei 2 Sensoren eine Reduktion; anschließende Reoxidation mit gefilterter Luft verschiebt die Ladungsträgerkonzentration jeweils in die Gegenrichtung

Steuerung, Kalibrierung und Vorauswertung

Nach praktischer Erfahrung im Labor und am Fermenter reichen 3 bis 5 unterschiedlich dotierte und thermisch eingestellte Sensoren zu einer Kalibrierung der Dynamischen Sensorsignalfunktionen (DSSF) mit verschiedenen VFA-Konzentrationen bis in den 10 ppm-Konzentrationsbereich aus. Die kontinuierliche Messung ermöglicht die direkt angeschlossene Auswertung weitgehend unabhängig vom Gashintergrund.

Dazu werden aus den Übergangskurven der DSSF die Amplituden, die Geschwindigkeitskoeffizienten und die Spektren der Zeitkonstanten berechnet. In einer multivariaten Datenanalyse, vgl. z.B. [13], wird die Funktion des Konzentrationsvektors im nicht Null-zentrierten, nichtlinearen und querempfindlichen Mischsignal aus VFA plus Gashintergrund gesucht. Unter der Annahme normal-

verteilter Funktionen erfolgt eine gewichtete Autoskalierung für jeden Sensor in den Schritten: Prüfung der Eigenvektoren; mehrfache lineare Regression zur Regressionsmatrix; Bestimmung der Komponenten X_{ij} als Observable, für welche die Autokorrelationsfunktion maximiert wird mit $X = K \cdot P^T + E$ mit $P \cdot P^T = I$, $K = \text{Kernmatrix}$, $P = \text{Rotationsmatrix}$, $E = \text{Residuenmatrix}$, $I = \text{Einheitsmatrix}$. Die abhängige Variable $Y = K \cdot C^T + F$ mit $C \cdot C^T = I$ wird iteriert, so dass die Matrizen Y bzw. X maximale Kovarianz aufweisen. Mit dieser Methode können die Signale aus den VFA vom unbekanntem Gashintergrund getrennt werden.

Die Berechnung wird durch Labormessungen an Gasproben mit definierten VFA-Zugaben überprüft. Im Biogas vorhandene H_2S -Anteile können bestimmte HGS irreversibel reduzieren. Deshalb müssen im Dauerbetrieb die reversiblen DSSF von der irreversiblen Sensordrift abgetrennt werden. Die Messgeschwindigkeit mit beispielsweise 5 Reoxidations- und 4 Beladungsschritten ermöglichen in ≈ 2 Minuten ein stabiles Messsignal mit einer Genauigkeit, die zur Verfolgung der zeitlichen Veränderungen im Biogas ausreicht, Abb. 2. Günstig ist der Bedarf an Messgas in der Größenordnung von $\approx \text{mLs}^{-1}$ bei regelmäßiger Reoxidation und korrekter elektrischer Einstellung der Betriebsbedingungen, weshalb die untersuchten Sensoren unter Vollast über mehrere 1000 h funktionieren.

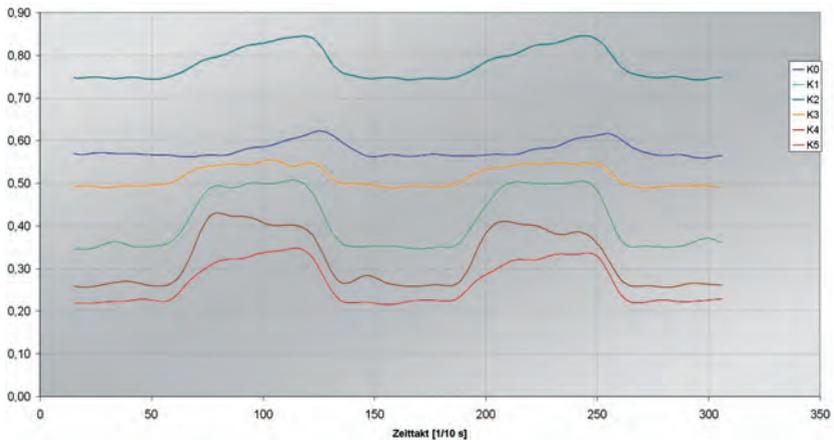


Abb. 2: Dynamische Sensorsignalfunktionen mit Zeitintervallen der Reoxidation bzw. Gasbeladung

Prozessstabilität

Infolge der Betriebsbedingungen, vor allem mit wechselnden Stoffumsätzen, schwanken die VFA-Komponenten im Biogas. Aus Laborbefunden an Gasproben aus dem Fermenter ergibt sich die Arbeitshypothese, dass die VFA-Komponenten in Intervallen regelmäßig in festen Wertebereichen pendeln. Somit kann möglicherweise eine Analyse der sich wiederholenden Persistenzintervalle über längere Zeitabschnitte [14] zur Charakterisierung des Prozesses herangezogen

gen werden. Mit der ausreichenden Genauigkeit des Mess- und Rechensystems (die Relativfehler liegen im niedrigen %-Bereich) können die Amplituden und die Persistenzintervalle der DSSF in Häufigkeitsverteilungen umgerechnet werden. Aus deren Dichtefunktion ergeben sich dann Erwartungswerte für kritische Prozesszustände mit Prognose der 1st passage time. Möglicherweise lässt sich auf diese Weise die negative Auswirkung prozesstechnischer Maßnahmen wie Überfütterung des Fermenters prognostizieren.

Praktische Ergebnisse am industriellen Fermenter

Aus der praktischen Anwendung am industriellen Fermenter ergeben sich beispielhafte Messreihen zu verschiedenen Prozessverläufen, wobei die Software zur automatisierten Dauermessung und zur intermittierenden Auswertung die Verlaufs- und Ergebnisdarstellung direkt vor Ort ermöglicht. Die Empfindlichkeit der HGS im Konzentrationsbereich ab $\approx 10^{-7}$ bis $\approx 10^{-3}$ VFA reicht für die kontinuierliche Prozessüberwachung aus. Eine programmierte Rekalibrierung durch eine Beprobung mit Essigsäure verlängert die wartungsfreie Nutzungsdauer.

Im praktischen Beispiel werden die beobachteten Fluktuationen im Messbetrieb beispielsweise über Zeitabschnitte von 2 Tagen dargestellt, Abb. 3 und 4. Zeitfunktionen variierender Gaszusammensetzungen zeigen homogene wie auch inhomogene dynamische Änderungen im Zehnminutenbereich. Daraus lassen sich mittels der zeitnahen Kontrolle Maßnahmen zur Prozesssteuerung abbilden, beispielsweise zum Einfluss der Fütterung.

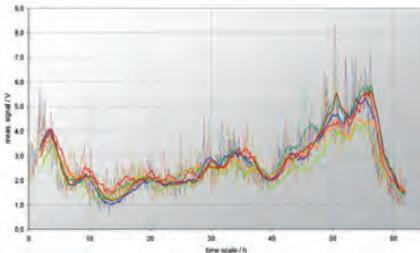


Abb. 3: Auswertung verschiedener Driftfunktionen über ≈ 2 Tage; homogener Signalverlauf der HGS bei Fütterungswechseln

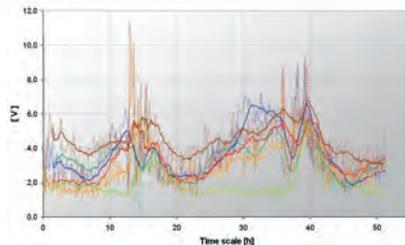


Abb. 4: Inhomogener Signalverlauf der HGS bei Fütterungswechseln

Die softwaretechnisch implementierten Kontrollen und Programmaktionen ermöglichen den unmittelbaren Rückschluss auf die Prozessstabilität in der Biogaserzeugung. Dadurch kann letztendlich eine Instabilität des Biogasprozesses rechtzeitig verhindert werden. Bei Abweichungen wie Fehlern im Gasstrom, in der Ansteuerung oder im Sensorverhalten werden Warnmeldungen abgesetzt, die Hinweise für unmittelbar zu treffende Maßnahmen liefern.

Zu Zeiten erhöhter Prozessaktivität ist eine kurzgetaktete Intensivmessung einprogrammiert, wodurch sich die Genauigkeit der Bestimmung von Persistenzintervallen bzw. der Extrapolation zum Erreichen eines kritischen Grenzwertes, der 1st passage time erhöht. Die Auswirkung unterschiedlicher Stoffgemische ist eindeutig erkennbar. Zu beachten ist allerdings die Azeotropie mit Verschiebung der Gleichgewichtskonzentrationen der VFA in der Gasphase sowie der Einfluss organischer Stoffe in der Flüssigphase [15]. Im Ergebnis ermöglicht die chemische Selektivität der Sensorik für aliphatische Fettsäuren die kontinuierliche Online-Bewertung der Prozessqualität [16].

Anmerkung

Die Vorentwicklung wurde im Verbundvorhaben FKZ 03KB115 anteilig vom BMWi gefördert.

Literaturangaben

- [1] Bhajani S S, S L Pal, Review: Factors affecting biogas production, Int. J. Res. Appl. Sci. & Engg Technol. 10(2022), no. 11, www.ijraset.com.
- [2] Kabeyi M J B, O A Olanrewaju, J Akpan, Biogas production and process control improvements, DOI: 10.5772/intechopen.113061(2024).
- [3] Indran S, D Divya, S M Rangappa, S Siengchin, P M Christy, L Gopinath, Perspectives of anaerobic decomposition of biomass for sustainable biogas production: A review, E3S Web of Conf. 302(2021), no. 01015.
- [4] Cinar S, S O Cinar, N Wiekzorek, I Soho, K Kuchta, Integration of artificial intelligence into biogas plant operation, Processes 9(2021), no.85.
- [5] Shah P, M Z Sheriff, M S F Bangi, C Kravaris, J S-I Kwon, C Botre, J Hirota, Deep neural network-based hybrid modeling and experimental validation for an industry-scale fermentation process: identification of time-varying dependencies among parameters, Chem. Engineering J. (2022), DOI 10.1016/J.cej.2022.135643.
- [6] Mauky E, A model-based control concept for a demand-driven biogas production, Diss. U Rostock(2018).
- [7] Drosig B, Process monitoring in biogas plants, IEA Bioenergy EI.Publ.(2013).
- [8] Liebetrau J, ed., Collection of methods for Biogas, □ Biogas_Methoden, in: Biomass Energy Use, Leipzig(2016).
- [9] Wilches C, M Vaske, K Hartmann, M Nelles, Representative sampling implementation in online VFA/TIC monitoring for anaerobic digestion, Energies 12(2019), 1179, p.1-p.18.
- [10] Bulemo P M, D-H Kim, H Shin, H-J Cho, W-T Koo, S-J Choi, C Park, J Ahn, A T Güntner, R M Penner, I-D Kim, Selectivity in gas sensors: Strategies and challenges, Chem. Rev. (2025), acs.chemrev4c00592.ris.
- [11] Hieber H, Selectivity and long term stability of metal-oxide sensors for volatile fatty acids in biogas, III.Conf. Monitoring & Process Control of Anaerobic Digestion Plants (Leipzig, 2017), p.61/62.
- [12] Luo J, M Grayson, Generalized fit for asymptotic predictions of heavy-tail experimental transients, Spec.pub.arXiv:1706.00902v1(2018).

- [13] Petersson H, Multivariate exploration and processing of sensor data - applications with multidimensional sensor systems, Diss. U Linköping(2006), no.1162.
- [14] Nyberg M, L Lizana, Persistence of non-Markovian Gaussian stationary processes in discrete time, Cond.Mat.Stat.Mech(2018), arXiv:1804.00876v2.
- [15] Wijekoon K C, C Visvanathan, A Abeynayaka, Effect of organic loading rate on VFA production, organic matter removal and microbial activity of two-stage thermophilic anaerobic membrane bioreactor, Bioresour. Technol. 102(2011), 5353-5360.
- [16] Hieber H, H Gropius, G Mehl, Robust VFA measurement in biogas, IV.Conf. Monitoring & Process Control of Anaerobic Digestion Plants (Leipzig, 2019), p.60/61.

Kontakt

Hartmann Hieber, Bernd Stollberg

ICR, Am Kanlaweg 23, D-17207 Südmüritz, OT Ludorf

Entwicklung und Erprobung ganzheitlicher Nachhaltigkeitschecks für Geschäftsmodelle und Wertschöpfungssysteme in Bioökonomie-Regionen (NaGeWe-Bio)

Zusammenfassung: Das Projekt „NaGeWe-Bio“ entwickelt und erprobt ein Instrumentarium zur Nachhaltigkeitsbewertung von Geschäftsmodellen und Wertschöpfungssystemen in der Bioökonomie Nordostdeutschlands. Aufbauend auf einer umfassenden Analyse bestehender Bewertungsansätze und Experteninterviews zu den Chancen und Risiken der regionalen Bioökonomie für eine nachhaltige Entwicklung sowie Empfehlungen der Expert:innen für den Aufbau von Nachhaltigkeitschecks entstand ein praxisnaher Kriterienkatalog, der ökologische, ökonomische und soziale Dimensionen integriert. Die Bioökonomie birgt ökologische Chancen wie CO₂-Senkung und Biodiversitätserhalt, jedoch auch Risiken durch klimatische Veränderungen und landwirtschaftliche Herausforderungen. Ökonomisch wird die regionale Nutzung biogener Ressourcen als vielversprechend angesehen, während Rentabilität und Marktunsicherheit zentrale Risiken darstellen. Sozial bietet die Bioökonomie Potenzial für regionale Wertschöpfung und Lebensqualität, steht jedoch Herausforderungen wie Akzeptanzproblemen und Fachkräftemangel gegenüber. Empfehlungen fokussieren auf praxisnahe, modulare und evidenzbasierte Nachhaltigkeitschecks, unter Berücksichtigung regionaler Besonderheiten. Der Ansatz befindet sich derzeit in einer Erprobungsphase. Das Projekt läuft bis Dezember 2025 unter der Leitung des Lehrstuhls für Wirtschafts- und Sozialgeographie der Universität Greifswald.

Abstract: The "NaGeWe-Bio" project develops and tests a set of tools for the sustainability assessment of business models and value creation systems in the bioeconomy of north-east Germany. Based on a comprehensive analysis of existing assessment approaches and expert interviews on the opportunities and risks of the regional bioeconomy as well as recommendations from the experts for the development of sustainability checks, a practical catalogue of criteria was developed that integrates ecological, economic and social dimensions. The bioeconomy brings ecological opportunities such as CO₂ reduction and biodiversity conservation but also risks due to climate change and agricultural challenges. Economically, the regional use of biogenic resources is seen as promising, while profitability and market uncertainty are key risks. Socially, the bioeconomy offers potential for regional value creation and quality of life but faces challenges such as acceptance problems and a shortage of skilled labour. Recommendations focus on practical, modular and evidence-based sustainability checks, considering regional characteristics. The approach is currently being tested in a trial phase. The project will run until December 2025 under the direction of the Chair of Economic and Social Geography at the University of Greifswald.

1 Hintergrund und Methoden des Projektes

Das Vorhaben „NaGeWe-Bio“ – Entwicklung und Erprobung ganzheitlicher Nachhaltigkeitschecks für Geschäftsmodelle und Wertschöpfungssysteme in Bioökonomieregionen, wird durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) im Rahmen des WIR!-Bündnisses Plant³ – Strategien für die hochwertige Veredlung von pflanzenbasierten Rohstoffen in Nordostdeutschland (biooekonomie.uni-greifswald.de) gefördert. In Anlehnung an die Innovationsanalyse und als Weiterentwicklung der Plant³ Innovationsstrategie (RIIS, 2020-2022) wurden vier Fokusfelder (Baumaterialien, Lebens-, Nahrungsergänzung- & Futtermittel, Biokunststoffe & Verpackungen, Feinchemikalien & Phytopharmaka) mit besonderem Potenzial für den innovationsbasierten Strukturwandel identifiziert. Eine Bewertung dieser Fokusfelder hinsichtlich ihrer Nachhaltigkeit und ihres Beitrags zum regionalen Strukturwandel gibt es jedoch bislang weder für die damit verbundenen Wertschöpfungssysteme noch für die zugrundeliegenden Geschäftsmodelle. Vor diesem Hintergrund ist es das Ziel des Vorhabens, ein Instrumentarium für die Nachhaltigkeitsbewertung von Geschäftsmodellen (GM) und Wertschöpfungssystemen (WS) der Bioökonomie in ökonomischer, ökologischer und sozialer Dimension am Beispiel von bestehenden und geplanten Vorhaben im nordöstlichen Mecklenburg-Vorpommern (MV), der ausgewiesenen Plant³-Projektregion, zu entwickeln und zu erproben. Hierzu wird ein mehrstufiger methodischer Ansatz angewendet, um einen anwendungsorientierten Nachhaltigkeitscheck für den regionalen Strukturwandel durch die Bioökonomie zu entwickeln. Dieser soll in einer übertragbaren Form aufbereitet werden, sodass er auch in anderen Regionen in der Praxis angewendet werden kann.

Zu Beginn stand die Identifizierung und Aufbereitung bestehender Ansätze der Nachhaltigkeitsbewertung im Fokus. Hierzu wurde eine umfassende Recherche zu etablierten Methoden, Standards, Zertifizierungen sowie relevanten Kriterien und Indikatoren durchgeführt. Auf dieser Basis wurde ein Kriterienkatalog entwickelt und systematisch befüllt. Anschließend wurde die Übertragbarkeit der bestehenden Nachhaltigkeitsansätze auf die spezifischen Anforderungen der Bioökonomie und des regionalen Strukturwandels geprüft. Der Kriterienkatalog wurde dabei differenziert auf Geschäftsmodelle und Wertschöpfungssysteme angewendet. In einer Stärken-Schwächen-Analyse wurden die unterschiedlichen Methoden hinsichtlich ihrer Eignung für den Einsatz im Kontext der Bioökonomie bewertet. Parallel dazu erfolgte eine systematische Erfassung regionaler Anforderungen an Nachhaltigkeitschecks. Ergänzend wurden im Herbst 2023 insgesamt 20 Interviews mit Expert:innen im Bereich existierender Bewertungssysteme für Nachhaltigkeit durchgeführt, um praxisnahe Einblicke und Erfahrungswerte zu gewinnen. Diese Erkenntnisse mündeten in die Ableitung praxisorientierter Empfehlungen sowie in die Entwicklung regional spezifischer Nachhaltigkeitsindikatoren und eines eigenen Nachhaltigkeitschecks („Kriterienkatalogs“) unter Berücksichtigung von Aspekten wie Datenverfügbarkeit, Messbarkeit und Gewichtung der Indikatoren.

Die vorliegenden Ergebnisse (siehe Kapitel 2) dienen als Impuls für das Projekt, um Empfehlungen für die Entwicklung des Nachhaltigkeitschecks abzuleiten (siehe Kapitel 3). Hierbei handelt es sich nicht um eine repräsentative Umfrage. Die durchgeführten Interviews mit Expert:innen zum Thema der Nachhaltigkeitsbewertung umfassen jedoch eine breite Palette von Fachleuten aus verschiedenen Bereichen, die unterschiedliche Perspektiven auf die Bioökonomie und deren nachhaltige Entwicklung in der Plant3-Projektregion bieten. Diese Perspektiven werden in Tab. 1 aufgezeigt.

Tab. 1: Befragte Akteursgruppen und deren Perspektiven auf die Bioökonomie

Gruppe (Anzahl)	Fokus
Unternehmensvertreter (4)	Umsetzung von nachhaltigen Geschäftsmodellen, Integration von Nachhaltigkeit in Unternehmensprozesse
Wirtschaftsberatung und -förderung (3)	Beratung und Unterstützung für Unternehmen, Zugang zu Fördermitteln, Innovationen in der Bioökonomie
Bündnisse, Vereine/Verbände (7)	Förderung des Dialogs, Entwicklung der Bioökonomie
Wissenschaft und Forschung (3)	Wissenschaftliche Perspektiven, Forschungsergebnisse zur nachhaltigen Nutzung von Ressourcen, Bewertung von Bioökonomie-Initiativen
Politik und Verwaltung (3)	Regulierung, Förderpolitik, Unterstützung von Bioökonomie-Projekten

Die Interviews spiegeln somit eine interdisziplinäre Herangehensweise wider, bei der Experten:innen aus Wirtschaft, Wissenschaft, Politik und der Zivilgesellschaft zusammenarbeiten, um die Chancen und Risiken der Bioökonomie zu bewerten und nachhaltige Lösungen zu fördern. Nachfolgend sind die zentralen Ergebnisse zusammengefasst.

2 Chancen und Risiken der Nachhaltigkeitsbewertung im nordöstlichen MV

Die ökologische Nachhaltigkeit der Bioökonomie bietet zahlreiche Chancen, die vor allem auf der Nutzung der natürlichen Ressourcen in der Region beruhen. Dazu gehört die Wiedervernässung trockengelegter Moorflächen, die nicht nur zur CO₂-Speicherung beiträgt, sondern auch die Ökosysteme optimiert. Auch die vorhandene Landwirtschaftsstruktur mit geringer Tierhaltung wird als Chance gesehen, um eine nachhaltigere Produktion zu fördern, die mit den Klimaschutzziele kompatibel ist. Durch eine erhöhte ökologische Vielfalt und den Verzicht auf große Monokulturen könnte die Landwirtschaft ressourcenschonender gestaltet werden. Eine intakte Umwelt könnte in ländlichen Räumen als Standortvorteil gegenüber industriell geprägten Städten genutzt werden. Durch eine regi-

onalisierte bioökonomische Wertschöpfung könnte die Belastung von Biotopen außerhalb der Region vermindert werden. Eine Kombination von Bioökonomie mit Biosphärenreservaten könnte den Erhalt der natürlichen Ressourcen unterstützen. Durch nachhaltigere landwirtschaftliche Produktions- und Verarbeitungsprozesse, wie zum Beispiel Kreislaufwirtschaft, wird die ökologische Effizienz weiter gesteigert. Zusätzlich wird der Anbau von Pflanzen zur Schadstoffverwertung und die Reduktion von Treibhausgasen als wichtige Maßnahmen hervorgehoben. Insgesamt trägt die Bioökonomie laut den befragten Expert:innen dazu bei, innerhalb der planetaren Grenzen zu wirtschaften und gleichzeitig durch spezialisierte Produktionen, die keine großen Monokulturen umfassen, die Umwelt zu schonen.

Die ökologischen Risiken der Bioökonomie sehen die befragten Expert:innen vor allem bei der Umsetzung nachhaltiger landwirtschaftlicher Praktiken. Ein zentrales Problem ist die Notwendigkeit, landwirtschaftliche Kreisläufe in einer Struktur mit geringer Tierhaltung zu schließen, was sich als schwierig erweisen kann. Auch die Anpassung der Landwirtschaft an die veränderten Witterungsbedingungen aufgrund des Klimawandels stellt ein weiteres Risiko dar, ebenso wie die weiterhin notwendige Nutzung von Totalherbiziden, die trotz technologischen Fortschritts erforderlich sind, um wettbewerbsfähig zu bleiben. Als weiteres Risiko wurde die Limitierung der Moorwiedervernässung und der Paludikultur durch Wassermangel genannt; es gibt die Befürchtung, dass der Grundwasserspiegel durch Aktivitäten wie die Wasserstoffproduktion weiter abgesenkt wird. Zudem werden die Potenziale der Bioökonomie für die Ökologie nicht immer vollständig genutzt, was zu einer Vernachlässigung wichtiger ökologischer Bilanzfragen führt. Ein weiteres Risiko besteht in der möglichen Umweltbelastung durch die Skalierung der bioökonomischen Produktion oder die Intensivierung der Landwirtschaft.

Die ökonomische Nachhaltigkeit der Bioökonomie bietet zahlreiche Chancen, die vor allem auf der Nutzung regionaler Ressourcen und einer stärkeren Vernetzung der Akteure beruhen. Die Flächenverfügbarkeit und die vorhandenen Voraussetzungen für die Produktion von Biomasse, Wind- und Solaranlagen bieten gute Ausgangsbedingungen für die Entwicklung nachhaltiger Wirtschaftsstrukturen in der Region. Besonders die Nähe zur Küste ermöglicht die Nutzung von Algen oder Seegras, während auch die Verwertung vermeintlicher Abfälle und die Nutzung von biogenem CO₂ aus Biogas als neue Rohstoffe Potenziale eröffnen. Hofläden haben sich als erfolgreiches Modell in der Region etabliert, und die Ansiedlung von Industrien, die auf der regionalen Forschung und den natürlichen Gegebenheiten basieren, fördert das wirtschaftliche Wachstum. Das nordöstliche MV könnte als Vorreiterregion der Bioökonomie in Deutschland und Nordeuropa angesehen werden mit einer stärkeren Vernetzung der Akteure und einer diversifizierten regionalen Wirtschaft. Der Fokus liegt auf der Vermarktung neuer Produkte aus Reststoffen und der dezentralen Produktion und Verwertung landwirtschaftlicher Produkte direkt im ländlichen Raum. Besonders hervorzuheben ist die Paludikultur, die durch die wirtschaftliche Nutzung nasser Moore neue Einkommensquellen schaffen könnte. Netzwerke wie Plant³ fördern die Zusammenarbeit zwischen Produzenten und Ideengebern und können so die

Abhängigkeit von globalen Playern verringern. Insgesamt zielt die Bioökonomie auf regionale Erzeugung, Vermarktung und Wertschöpfungsketten ab, was zu einem nachhaltigen Wirtschaftswachstum aus der Region herausführen kann.

Die ökonomischen Risiken der Bioökonomie liegen vor allem in der Unsicherheit bezüglich der Rentabilität und Wirtschaftlichkeit nachhaltiger Modelle. Kleinere Anlagen zur Nutzung von biogenem CO₂ aus Biogas können oft nicht mit den niedrigen Preisen fossiler Energien konkurrieren, was ihre Wettbewerbsfähigkeit einschränkt. Produkte und Geschäftsmodelle der Bioökonomie bleiben häufig in Nischenmärkten oder scheitern ganz. Zudem kommen die Impulse für eine bioökonomische Transformation häufig nicht aus der Region, sondern aus den wirtschaftlichen Zentren. Ein weiteres Risiko stellt laut den Expert:innen die Ausweitung der roten Gebiete durch die neue Düngelandesverordnung dar, was zu Ertragseinbußen führen kann. Auch die Rentabilität und Wirtschaftlichkeit von nachhaltigen Lösungen bleibt fraglich, da es an großen, finanzkräftigen Unternehmen in der Region mangelt. Regionale Synergien werden häufig nicht genutzt, da es an Zusammenarbeit und Kommunikation mangelt. Ein weiteres Problem ist die fehlende Planungssicherheit und mangelnde Verlässlichkeit durch die Politik, die in vielen Fällen zu einer geringen Investitionsbereitschaft führt. Zudem erhöhen Unsicherheiten auf den Absatzmärkten das Risiko für die regionalen Unternehmen.

Die soziale Nachhaltigkeit der Bioökonomie bietet zahlreiche Chancen, die sowohl die Arbeitsmarktstruktur als auch die gesellschaftliche Entwicklung betreffen. Durch die Schaffung neuer Arbeitsplätze in der Region kann die lokale Wirtschaft gestärkt, und die Identifikation der Bevölkerung mit dem Wandel gefördert werden. Die Bioökonomie und der verstärkte Einsatz von Mehrwegprodukten fungieren als verbindendes und kommunikatives Element, das den Austausch zwischen verschiedenen Akteuren und der Zivilgesellschaft erleichtert. Dies trägt zu einer stärkeren sozialen Vernetzung bei. Eine schönere und vielfältigere Landschaft könnte als Lebens- und Erholungsraum genutzt werden, was die Lebensqualität in ländlichen Gebieten verbessert. Der Wissenstransfer in Unternehmen kann durch diverse Teams gefördert werden, was wiederum die Innovationskraft stärkt. Zudem kann die Steigerung der regionalen Wertschöpfung und die Verankerung der Mittel vor Ort zu positiven gesellschaftlichen Effekten führen. Die Bioökonomie eröffnet neue Arbeitsmodelle, insbesondere in ökologisch wertvollen Landschaften, in denen Handarbeit wieder wichtiger werden könnte. Auch der Fachkräftemangel könnte in Zukunft durch Migration gemildert werden.

Die sozialen Risiken der Bioökonomie beinhalten verschiedene Herausforderungen, die vor allem die gesellschaftliche Akzeptanz und die soziale Integration betreffen. Wiedervernässte Moorflächen könnten den menschlichen Lebensraum beeinträchtigen, was zu Konflikten führen kann. Ein weiteres Risiko besteht in der Skepsis der Bevölkerung gegenüber neuen Ideen und einer geringen Veränderungsbereitschaft. Oftmals fehlt eine ausreichende Einbindung der

Menschen in den Wandel, was Widerstände begünstigt. Die hohen Preise für regionale und biozertifizierte Produkte könnten finanziell schwächere Bevölkerungsgruppen dazu zwingen, weiterhin auf konventionelle, günstigere Produkte zurückzugreifen. Landwirte könnten sich gegen Veränderungen sträuben, was den Fortschritt verzögern könnte. Auch der Fachkräftemangel stellt eine Entwicklungsbremse dar und könnte das Wachstum der Bioökonomie hemmen. Weitere soziale Risiken wurden in der potenziellen Einführung von Arbeitszeitverkürzung oder einer Vier-Tage-Woche gesehen, die zu neuen Herausforderungen in der Arbeitsmarktstruktur führen könnten. Zudem könnte es Menschen geben, die ihre Arbeit aufgrund der Transformation verlieren und ohne klare berufliche Perspektiven dastehen. Diskriminierung könnte neue Fachkräfte abschrecken, und zu sozialen Spannungen führen. Schließlich wurde als weiteres Risiko die Gefahr des intellektuellen Ausblutens der Region genannt, wenn hochqualifizierte Arbeitskräfte abwandern und die Region langfristig an Innovationskraft verliert.

3 Fazit und Ableitung von Empfehlungen für den Nachhaltigkeits-Check

Die Bioökonomie birgt sowohl erhebliche Chancen als auch Risiken, die in einem umfassenden Kontext betrachtet werden müssen. Besonders hervorzuheben ist das Potenzial erneuerbarer Energien, die als eine der wichtigsten Aussichten der Bioökonomie gelten. Der dringende Handlungsbedarf, um diese Potenziale schneller zu nutzen, stellt eine klare Herausforderung dar, die entscheidend für den Erfolg der Bioökonomie ist. Ökologisch betrachtet überwiegen die Chancen, etwa durch die Nutzung regionaler Ressourcen, die Förderung der Biodiversität und die Schaffung von CO₂-Senken. Die Wiedervernässung von Mooren und die Nutzung von biogenem CO₂ als Rohstoff bieten nachhaltige Lösungen, die das ökologische Gleichgewicht fördern. Dennoch zeigen sich im sozialen Bereich erhebliche Risiken. Die Gefahr von zunehmenden sozialen Spannungen ist eine ernste Herausforderung, insbesondere wenn die Bevölkerung nicht ausreichend in den Wandel eingebunden oder aufgeklärt wird. Die Umsetzung neuer Produktionsmethoden könnte auf Widerstand stoßen, und die hohen Kosten nachhaltiger Produkte könnten einkommensschwächere Bevölkerungsgruppen ausschließen. Hinzu kommt, dass die Verarbeitungs- und Veredelungsproduktion in die Region eingebunden werden muss, damit die Menschen direkt von den Vorteilen der Bioökonomie profitieren. Andernfalls besteht die Gefahr, dass die Wertschöpfung in den Städten bleibt und die ländlichen Regionen nicht ausreichend partizipieren. Ein weiteres Risiko liegt in einer einseitigen und akademisch ausgerichteten Fokussierung auf Projekte, ohne sich der realen Probleme und Herausforderungen bewusst zu sein. Es besteht die Gefahr, dass Lösungen entwickelt werden, die in der Praxis wenig zielführend sind oder nicht die notwendigen gesellschaftlichen und ökologischen Bedingungen berücksichtigen. Insofern ist es entscheidend, dass die Bioökonomie nicht nur als theoretisches Konzept, sondern als praxisorientierter und integrativer Prozess verstanden

wird. Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die Bioökonomie viele Chancen für ökologische und wirtschaftliche Nachhaltigkeit bietet, jedoch nur dann erfolgreich sein kann, wenn sie auch die sozialen Herausforderungen berücksichtigt und eine breite gesellschaftliche Einbindung erfolgt. Nur durch die Bewusstseinsbildung über Chancen und Risiken sowie durch die Schaffung von lokal verankerten Wertschöpfungsketten kann die Bioökonomie zu einer nachhaltigen und gerechten Zukunft führen. Entsprechend bemüht sich „NaGeWe-Bio“ um ein praxisnahes Forschungsdesign unter Berücksichtigung der in den Interviews gesammelten Empfehlungen für die Entwicklung des Nachhaltigkeits-Checks, welche in Tab. 2 als Auszug zusammengefasst sind.

Tab. 2: Empfehlungen zum Nachhaltigkeits-Check gegliedert nach Themenfeldern

Themenfeld	Ableitung von Empfehlungen
Wertschöpfungs-systemperspektive	Umfasst die gesamte Wertschöpfungskette eines Produkts, inkl. Transport, Lagerung, Energieeinsatz, Wasserverbrauch und Recyclingprozesse
Komplexität der Nachhaltigkeitsbewertung	Ein komplexes System könnte qualitativ hochwertige Ergebnisse liefern, jedoch zeitintensiv und schwer nachvollziehbar sein. Ein verständlicher und kompakter Ansatz wird bevorzugt
Durchführung der Nachhaltigkeitsbewertung	Externe Bewertung durch unabhängige Institutionen wie TÜV wird als unbestechlich und vertrauenswürdig angesehen. Mischlösung aus Eigen- und Fremdbewertung wird in Erwägung gezogen
Gewichtung der Nachhaltigkeitsdimensionen	CO ₂ -Senkung als Hauptbewertungskriterium. Ein ausgewogenes Drei-Säulen-Modell der Nachhaltigkeit (ökologisch, ökonomisch, sozial) wird als ideal angesehen
Anreize und Subventionen	Verbindung von Anreizen oder Subventionen, um Unternehmen zur nachhaltigen Entwicklung zu bewegen. Regulierungsdruck allein wird nicht als ausreichend erachtet

4 Anpassung und Ausblick

Ein Erst-Entwurf des „Kriterienkatalogs“ für den Nachhaltigkeitscheck wurde im Oktober 2024 in Form einer „Exploration mit Regionalentwicklern und Cluster-Managern“ mit ca. 15 Vertreter:innen von Unternehmen und regionalen Organisationen (Beratungsunternehmen, Wirtschaftsförderungen) getestet, und diente zur frühzeitigen Reflexion (und Diskussion) der Relevanz und Praxistauglichkeit. Neben ersten Überlegungen zur Visualisierung der Ergebnisse sowie zur Kategorisierung der Indikatoren, wurden wertvolle Erkenntnisse aus dem Workshop sowie einer begleitenden Umfrage unter den Teilnehmenden ausgewertet und dienten als Grundlage für die Weiterentwicklung des Checks.

Weitere Empfehlungen fokussieren sich auf wiederkehrende Schlüsselthemen, die für eine erfolgreiche Umsetzung nachhaltiger Regional- und Unternehmens-

strategien entscheidend sind. Dazu zählen insbesondere Modularität und Motivation: Flexibel anpassbare Module bieten Unternehmen und Regionen die Möglichkeit, eigene Schwerpunkte zu setzen und Entwicklungsprozesse individuell und motivierend zu gestalten. Dabei zeigt sich, dass interne Initiativen oftmals wirksamer und nachhaltiger sind als ausschließlich externe Impulse. Ein weiterer Schwerpunkt liegt auf gezielten Steuerungsimpulsen, die eine langfristige tragfähige Regional- und Unternehmensentwicklung fördern. Besonderes Augenmerk wird dabei auf die Erweiterung herkömmlicher Nachhaltigkeitsmessungen gelegt: Der „Handabdruck“ der Bioökonomie – als Symbol für positiven Impact – könnte dabei den bislang dominierenden CO₂-Fußabdruck sinnvoll ergänzen. Damit wird nicht nur der Schadensausgleich, sondern auch der aktiv geschaffene Nutzen sichtbar gemacht. Nachweisbarkeit und Evidenzbasiierung sind grundlegende Prinzipien, um die Glaubwürdigkeit nachhaltiger Entwicklungen zu sichern. Zur Orientierung werden Referenzwertebereiche für einzelne Indikatoren bereitgestellt, ergänzt durch praktische Selbsttests, die eine erste Einordnung ermöglichen und wesentliche Problemfelder schnell erkennen lassen. Eine besondere Rolle spielt die Region als Systemgrenze: Nachhaltige Entwicklung soll nicht abstrakt, sondern ausgehend von regionalen Werten und Identitäten gedacht und gestaltet werden. Regionalität wird damit nicht nur als wirtschaftlicher Faktor, sondern als kulturelle und soziale Grundlage verstanden. Im Allgemeinen wurde empfohlen, in der Kommunikation verstärkt auf eine verständliche Sprache zu achten. Begriffe wie „Wertschöpfungs-system“ oder „Bioökonomie“ müssen klar erläutert und gegebenenfalls über ein begleitendes Glossar zugänglich gemacht werden. Abschließend wurde auf die notwendige Differenzierung bei der Bewertung von Nachhaltigkeit hingewiesen: Gerade in Transformationsprozessen – etwa bei der Nutzung von Übergangstechnologien oder -gütern – ist nach Auffassung der Teilnehmenden eine undifferenzierte Gegenüberstellung von „nachhaltig“ und „nicht nachhaltig“ nicht immer zielführend. Vielmehr bedarf es hier einer sensiblen und kontextbezogenen Betrachtung, die die Dynamik von Veränderungsprozessen berücksichtigt.

Aktuell erfolgt eine Erprobung des Nachhaltigkeitschecks, in enger Zusammenarbeit mit lokalen Akteuren, wie Bioökonomie-Unternehmen, Behörden und Institutionen, um relevante Daten zu erheben und die Ergebnisse zu validieren. Zur Durchführung werden verschiedene Instrumente wie Fragebögen und Interviews eingesetzt, um sowohl quantitative als auch qualitative Indikatoren für die einzelnen Dimensionen und Bereiche zu definieren. Die Ergebnisse werden in einem Nachhaltigkeitsbericht zusammengefasst, und allgemeine Handlungsempfehlungen präsentiert.

Das Vorhaben ist unter der Leitung von Prof. Dr. Daniel Schiller und Susanne Henne am Lehrstuhl für Wirtschafts- und Sozialgeographie der Universität Greifswald mit einer Laufzeit von Mai 2023 bis Dezember 2025 angesiedelt und wird gemeinsam mit dem Beratungskontor Rolf Kammann unter Mitarbeit von Katja Gallinowski bearbeitet.



Wissen
Innovation
Wandel



wir! Wandel durch
Innovation
in der Region

Kontakt

Prof. Dr. Daniel Schiller

Universität Greifswald
Institut für Geographie und Geologie
Lehrstuhl für Wirtschafts- und Sozialgeographie

📄 <https://geo.uni-greifswald.de/wisogeo>

Susanne Henne (MBA)

Wissenschaftliche Mitarbeiterin, NaGeWe-Bio
„Entwicklung und Erprobung ganzheitlicher
Nachhaltigkeitschecks für Geschäftsmodelle und
Wertschöpfungssysteme in Bioökonomieregionen“

(WIRI-Bündnis Plant³, BMBF 2023-2025)

✉ susanne.henne@uni-greifswald.de

Digitale Erschließung geeigneter Nutzungspfade für Biomasse

1 Einleitung

Aufgrund des Klimawandels und des immer zeitiger werdenden Erdüberlastungstags wird es zunehmend wichtiger nachwachsende Rohstoffe zu nutzen und eine funktionierende Kreislaufwirtschaft zu etablieren [1,2], statt auf fossile Rohstoffe und Neuproduktion zurückzugreifen. Daher verfolgt die Bundesregierung mit der Nationalen Kreislaufwirtschaftsstrategie [1] das Ziel eine zirkuläre Bioökonomie aufzubauen, welche die Nutzung von Biomasse möglichst effizient und nachhaltig gestaltet, wie im Ziel 12 für nachhaltige Entwicklung beschrieben.

Nichtsdestotrotz dominieren in der Wirtschaft weiterhin lineare Produktionsverfahren, weil diese für Unternehmen häufig betriebswirtschaftlich attraktiver sind als zirkuläre Alternativen. Die erste Herausforderung im Übergang zu einer zirkulären Bioökonomie liegt in der Verfügbarkeit und Beschaffung biogener Sekundärrohstoffe oder hochwertiger Rezyklate mangels eines ausreichend funktionierenden Marktes für diese. Obendrein scheuen Unternehmen den mit dem Einsatz biogener Abfälle und Reststoffe verbundenen bürokratischen Mehraufwand hinsichtlich gesetzlich vorgeschriebener Dokumentationspflichten. [3,4]

Gleichzeitig erfahren Unternehmen heutzutage die vierte industrielle Revolution (umfassende Digitalisierung der Produktion), teils bereits die fünfte (Einsatz künstlicher Intelligenz). Allerdings gibt es derzeit kein System oder Informationsportal, das kompakt Informationen zur Verfügung stellt und aufzeigt, welche biogenen Abfälle und Reststoffe für welche Prozesse technisch geeignet sind und ob sie gesetzeskonform verwendet werden dürfen. Jedoch lässt sich dieses Hemmnis für eine funktionierende Kreislaufwirtschaft mit einem digitalen Werkzeug überwinden.

2 Unsere digitale Lösung

Wir erarbeiten eine Ontologie, in der Informationen über die Charakteristika verschiedener biogener Abfälle und Reststoffe und damit verbundene rechtliche Regularien abgebildet werden können. Mit dieser Ontologie sollen (i) Biomassen systematisch und eindeutig identifiziert werden und (ii) deren Nutzung im bioökonomischen und industriellen Kontext im Sinne der Kreislaufwirtschaft ersichtlich werden. Hierfür wird ein kontrolliertes Vokabular verwendet, welches Nutzenden später eine unmissverständliche Kommunikation entlang der gesamten Wertschöpfungskette ermöglicht. Durch diese Vereinheitlichung und Standardisierung der Begrifflichkeiten für Biomassen und deren Nutzung wird eine gemeinsame und zudem maschinenlesbare und -interpretierbare Sprache

geschaffen. Dies schafft das Fundament für digitale Marktplätze und Innovationen, die Synergien aufzeigen, Zusammenarbeit fördern und neue Nutzungspfade erschließen. [5]

Die Ontologie soll im ersten Schritt der Hierarchie der Abfallverzeichnis-Verordnung (AVV) des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit [6] (nationale Umsetzung der Europäischen Abfallverordnung) folgen, da hier ein bereits in der Industrie etabliertes System genutzt und darauf aufgebaut werden kann. Die DIN EN ISO 17225-1:2021-10 für Feste Biobrennstoffe [7] inspiriert zu einer tiefergehenden Systematisierung von Reststoffen, welche für die industrielle Nutzung der biogenen Rezyklate auch notwendig ist, damit schlussendlich alle produktionsrelevanten Aspekte abgebildet werden können. Aktuell benennt die AVV 991 Klassen, die entsprechend eines bis zu vierteiligen Schlüssels hierarchisch unterteilt sind. Zu dieser Hierarchie kommen weitere für (i) Materialeigenschaften, wie Proteingehalt, Faserlänge, Bruchstückgröße, Wassergehalt, Heizwert, etc. und (ii) Rahmenbedingungen zur Nutzung, die sich aus Gesetzen und Richtlinien ergeben. Ein konkreter Abfall wird dabei durch mehrere Klassen beschrieben.

Die Abb. 1 illustriert einen Ausschnitt unserer Ontologie für Abfällen aus der Bioökonomie. Zum Beispiel zeigt das gleiche Symbol neben den AVV Schlüsselnummern 020304 und 020601 an, dass entsprechende Abfälle auch zu der rechtlichen Klasse „nicht für den Verzehr geeignet“ gehören. Diese Zuordnungen ermöglichen eine eindeutige Identifizierung biogener Abfälle und Reststoffe sowie deren technische und rechtliche Passfähigkeit für denkbare Nutzungspfade.

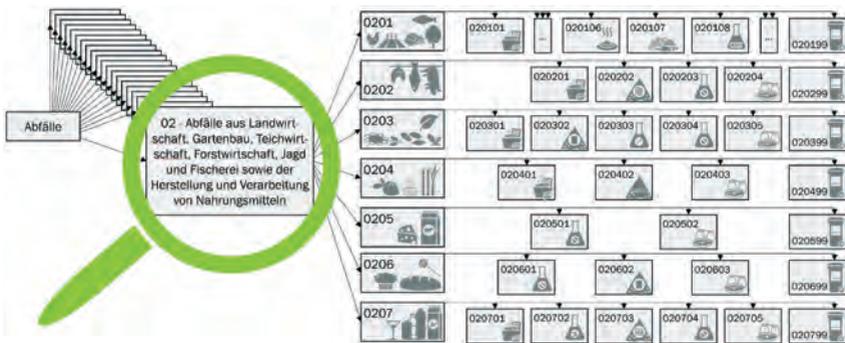


Abb. 1: Überblick über die Hierarchie unserer Ontologie zur Identifizierung von Abfällen aus der Bioökonomie. Die Nummern repräsentieren die Abfallschlüssel aus der Abfallverzeichnis-Verordnung (AVV) [6]. Zur besseren Übersichtlichkeit sind nur die Abfallschlüssel abgebildet, nicht deren Bezeichnungen. Die Symbole sind mit rechtlichen Rahmenbedingungen verknüpft, wobei gleiche Symbole an verschiedenen Abfallschlüsseln dieselbe Bedeutung haben.

Im nächsten Schritt pflegen wir als sogenannte Instanzen die 77 biogenen Abfälle und Reststoffe ein, die sich derzeit in der Ressourcen Datenbank des

DBFZ befinden (<https://datalab.dbfz.de/resdb>) [8,9,10]. Diese enthält unter anderem Informationen zu deren Charakteristika, Potenzialen, möglichen Nutzungspfaden (beispielsweise Apfeltrester aus der Saftproduktion für Apfellederherstellung) sowie deren Bedeutung in Zielmärkten. Ergänzt werden später weitere Materialeigenschaften aus Laboranalysen. Die spezifischen Eigenschaften eines Stoffs sind in der Instanz hinterlegt und können sowohl kategorisch als auch numerisch sein. Über die Einordnung in die Hierarchie und die Verknüpfungen mit anderen Klassen lassen sich dann weitere Eigenschaften und rechtliche Zusammenhänge ableiten.

Die wichtigsten rechtlichen Vorschriften, die in der Ontologie berücksichtigt werden müssen, sind zunächst die Erneuerbare-Energien-Richtlinie RED II, RED III und das Kreislaufwirtschaftsgesetz [11,12,13]. Da Vorschriften im Laufe der Zeit abgeändert oder ergänzt werden, ist eine (weitestmöglich automatisierte) Aktualisierung des rechtlichen Teils der Ontologie angestrebt. Nur dadurch wird gewährleistet, dass die Ontologie auch in einigen Jahren noch nützliche Informationen liefert. Zudem soll auch der Digitale Produktpass (DPP), der Anfang 2026 für Textilien, Automobile und Elektrogeräte in die Umsetzung gehen wird [14], in der Ontologie berücksichtigt werden. Wenn unsere Ontologie als Sprache zur eindeutigen Identifizierung biogener Abfälle und Reststoffe sowie deren Nutzungskontext betrachtet wird, dann wäre der DPP das Medium mit dem diese Produktinformationen unter den Akteuren ausgetauscht werden. Entsprechend ist eine Integration der Ontologie in Zertifizierungsverfahren oder Nachhaltigkeitsberichte denkbar.

3 Ausblick

Die Ontologie wird gemeinsam mit Expertinnen und Experten der Bioökonomiebranche entwickelt, um deren vielseitige Bedürfnisse und Anwendungsfelder berücksichtigen zu können. Dazu gehören Produzierende von Reststoffen, Betreibende von Bioraffinerien, aber auch Fachkundige aus der Kreislaufwirtschaft und Forschende. Genau diesem Personenkreis und weiteren Interessierten soll die Ontologie später frei, im Sinne der FAIR-Prinzipien (Findable, Accessible, Interoperable, Reusable) zur Verfügung gestellt werden, um deren Kommunikation zu vereinfachen und den Übergang hin zu einer Kreislaufwirtschaft zu beflügeln. So dynamisch wie dieser Übergang muss auch unsere Ontologie als lebende Wissensbasis betrachtet werden. Sie wächst mit ihren Nutzenden und deren Kompetenzfragen, um langfristig ein vielseitiges, digitales Werkzeug für Landwirtschaft, Industrie, Forschung, Politik sowie Abfall- und Kreislaufwirtschaft zu sein.

Danksagung

KI Experten von KIDA waren in der Erstellung dieses Artikels involviert. KIDA wird unterstützt durch Mittel des Bundesministeriums für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL) basierend auf einer Entscheidung des Parlaments der Bundesrepublik Deutschland durch die Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung (BLE).

5 Referenzen

- [1] Die Bundesregierung, Nationale Kreislaufwirtschaftsstrategie, Stand Dezember 2024, URL: https://www.bmuv.de/fileadmin/Daten_BMU/Download_PDF/Abfallwirtschaft/nationale_kreislaufwirtschaftsstrategie_bf.pdf
- [2] Die Bundesregierung, Kreislaufwirtschaft - Herausforderungen und Wege der Transformation, Stand 25.09.2023, URL: <https://www.bundesregierung.de/resource/blob/975274/2267582/41d556399a506f2b1bf06fdeb80428d2/2024-03-27-transformationsbericht-kreislaufwirtschaft-data.pdf>
- [3] Statusbericht der deutschen Kreislaufwirtschaft, 2024, URL: https://statusbericht-kreislaufwirtschaft.de/wp-content/uploads/2024/01/Statusbericht_2024_25012024_opt.pdf
- [4] Sekundärrohstoffe in Deutschland, IFEU, April 2021, URL: https://www.nabu.de/imperia/md/content/nabude/konsumressourcenmuell/2104-22-ifeu-studie-sekundaerrohstoffe_in_deutschland.pdf
- [5] Fraunhofer ISI, Transformationspfade zur Bioökonomie - Zukunftsszenarien und politische Gestaltung, Januar 2020, URL: https://www.isi.fraunhofer.de/content/dam/isi/dokumente/cct/2020/transformation_bio_web.pdf
- [6] Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit, Verordnung über das Europäische Abfallverzeichnis - AVV, 2017
- [7] Technischen Komitee ISO/TC 238, Technischen Komitee CEN/TC 335, DIN EN ISO 17225-1:2021-10 (Biogene Festbrennstoffe - Brennstoffspezifikationen und -klassen - Teil 1: Allgemeine Anforderungen), 2021
- [8] F. Naegeli de Torres, R. Brödner, K.-F. Cyffka, A. Fais, J. Kalcher, S. Kazmin, R. Meyer, K. S. Radtke, F. Richter, M. Selig, B. Wilske, D. Thrän, DBFZ Resource Database: DE-Biomass Monitor. Biomass Potentials and Utilization of Biogenic Wastes and Residues in Germany 2010-2020, 2024. DOI: 10.5281/zenodo.10370137
- [9] T. Krause, U. Mantau, B. Mahro, A. Noke, F. Richter, T. Raussen, R. Bischof, T. Hering, D. Thrän, A. Brosowski, Nationales Monitoring biogener Reststoffe, Nebenprodukte und Abfälle in Deutschland Teil 1: Basisdaten zu Biomassepotenzialen, 2020. URL: https://www.openagrar.de/receive/openagrar_mods_00065538. doi: 10.48480/6mz1-zs78
- [10] T. Krause, M. Pohl, M. Klemm, B. Wirth, A. Gröngroft, F. Müller-Langer, I. Hartmann, K. S. Radtke, D. Thrän, A. Brosowski, Nationales Monitoring biogener Reststoffe, Nebenprodukte und Abfälle in Deutschland Teil 2: Rohstoffeigenschaften und Konversionsfaktoren, 2021. URL: https://www.openagrar.de/receive/openagrar_mods_00065551. doi: 10.48480/EGCS-T204

- [11] European Parliament, Council of the European Union, Directive (EU) 2018/2001 of the European Parliament and of the Council of 11 December 2018 on the promotion of the use of energy from renewable sources (recast), 2018
- [12] European Parliament, Council of the European Union, Directive (EU) 2023/2413 of the European Parliament and of the Council of 18 October 2023 amending Directive (EU) 2018/2001, Regulation (EU) 2018/1999 and Directive 98/70/EC as regards the promotion of energy from renewable sources, and repealing Council Directive (EU) 2015/652, 2023
- [13] Bundesamt für Justiz, Gesetz zur Förderung der Kreislaufwirtschaft und Sicherung der umweltverträglichen Bewirtschaftung von Abfällen (Kreislaufwirtschaftsgesetz - KrWG), Stand: 2.3.2023, URL: <https://www.gesetze-im-internet.de/krwg/>
- [14] Fraunhofer IAO, Der Digitale Produktpass, Mai 2024, URL: <https://public-rest.fraunhofer.de/server/api/core/bitstreams/771a840f-dea6-4457-8c51-f52005c881bf/content>

Kontakt

Marco Selig, Kim Schmidt (she/her)

DBFZ Deutsches Biomasseforschungszentrum gGmbH

und

KI- & Daten-Akzelerator des Bundesministeriums für Ernährung und Landwirtschaft

✉ datalab@dbfz.de

19. ROSTOCKER BIOMASSEFORUM

UNSERE FÖRDERER

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Ernährung
und Landwirtschaft



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages



VRD STIFTUNG
FÜR ERNEUERBARE
ENERGIEN



SCHAUMANN
BioENERGY



VRD STIFTUNG
FÜR ERNEUERBARE
ENERGIEN

Mit der kleinen Renmmaus lernen



Die „Renmmaus-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 Renmmaus und die Zauberbäume“ lernt Renmmaus Lena, wie wichtig Bäume für Umwelt und Landwirtschaft sind. Die Geschichte knüpft an das mit dem Kinder-Medienpreis ausgezeichnete Werk „Die kleine Renmmaus 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: 9,90 €

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: 9,90 €

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/>

19. 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



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
- ☞ Holzrasche
- ☞ Holzwärme
- ☞ Energieholzsanbau
- ☞ Roh- und Brennstoffe
- ☞ Öffentlichkeitsarbeit
- ☞ Nachhaltigkeit
- ☞ 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.
 - **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.
 - **Setzen Sie aktiv Themen und Schwerpunkte der Verbandsarbeit** und bringen Sie Ihre Erfahrungen und Herausforderungen in die Arbeit des BBE ein.
 - **Profilieren Sie von Beratung und Austausch mit den Experten des BBE zu politischen, gesellschaftlichen sowie wirtschaftlichen Trends.**
- 2**
 - **Netzwerken Sie mit Gleichgesinnten aus der Bioenergiebranche**
 - **Gemeien Sie alle Netzwerkeveranstaltungen und -möglichkeiten des BBE**, mit 90 Mitgliedern und über 1000 Experten aus Wirtschaft, Wissenschaft und Politik auf unseren jährlichen Branchentag.
 - **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.
 - **Profilieren Sie von Rabatten** für alle Veranstaltungen des BBE.

3 Erhalten Sie exklusive Informationen und Hintergründe

- Erhalten Sie Zugang zu aktuellen politischen Informationen durch unsere regelmäßigen Hauptstadtbriefe, Tagesaktuelle Newsletter, AIC-Informationen, Diskussionsforen, weiteren Veröffentlichungen sowie Termin- und Veranstaltungswisens.
- **Profilieren 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 Mitglied

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 | **Gerolf Bücheler**
 +49(0)281/8102-59 | +49(0)39/7758179-21
 geisen@bioenergie.de | buecheler@bioenergie.de
www.bioenergie.de



**DG
AW**

**RESSOURCEN
NEU
DENKEN.**



**Deutsche Gesellschaft für
Abfallwirtschaft e.V.**



Plattform für Produktverantwortung und Ressourcenschonung

DGAW – Ihr Kompetenz-Netzwerk

- Experten der Kreislauf- und Ressourcenwirtschaft
- Arbeitskreise zu aktuellen Schwerpunktthemen
- Austausch zwischen den Akteuren
- Positionspapiere, Stellungnahmen, Pressemitteilungen
- Partner der Weltleitmesse IFAT
- Fachveranstaltungen und Expertengespräche
- Wissenschaftskongress „Abfall- und Ressourcenwirtschaft“
- Kooperation mit allen wichtigen Verbänden und Initiativen

www.dgaw.de

Über uns

In der Branche gilt die **DGAW** seit langem als unabhängiger Ansprechpartner für Industrie und Politik. Unsere Stärke liegt in der sachlichen konsensualen Meinungsbildung. Wir streiten nicht für Einzelinteressen, sondern wirken verantwortungsbewusst für die Zukunft unserer Branche.

Die **DGAW** bietet Ihnen eine Plattform für eine interdisziplinäre Zusammenarbeit mit offenem Erfahrungsaustausch an.

Unsere über 450 Mitglieder sind Entscheidungsträger aus allen Bereichen der Abfall- und Ressourcenwirtschaft, aus Industrie und Gewerbe, Anlagen- und Maschinenbau, Ingenieurwesen, Wissenschaft, öffentlicher Verwaltung, Politik und Anwaltschaft.

Wir bieten branchenverbandsunabhängige, sachorientierte Informationen, Diskussionen und Stellungnahmen, die oft weit über die Beschäftigung mit reinen Abfall- und Recyclingfragen hinausgehen.

Unsere Mission ...

Wir verstehen uns als größte Experten-NGO der Kreislaufwirtschaft.

Wir schaffen Verbindungen und sind unabhängiger und kompetenter Partner für Produzenten, Entsorger, Politik, Wissenschaft und Gesellschaft.

Wir sind Vordenker und Impulsgeber für die zukünftige Circular Economy.

Wir werden als „Stimme der Vernunft“ wahrgenommen.

Markt, Produktverantwortung, aktuelle Gesetzgebung und Recycling sind unsere zentralen Themen.

Wir sehen die Produkte von heute als Ressourcen für morgen.

Wir regen zum Meinungsaustausch unterschiedlicher Sachthemen an, um eigene Positionen zu reflektieren.

Wir unterstützen den nationalen und internationalen Wissenstransfer.

T 030.84 59 14 77
info@dgaw.de

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

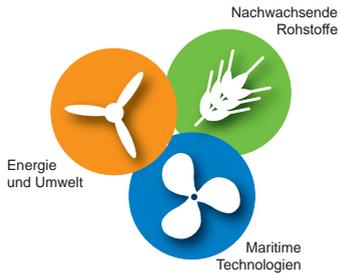
Fon +493814033895
Fax +493814033797
www.envero.eu
info@envero.eu

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: Nachwachsende Rohstoffe und Energie
- Informations- und Weiterbildungsangebote
- Partnerschaft mit IBZ-Mitgliedsfirmen auf den genannten Kompetenzfeldern



Innovations- und Bildungszentrum
Hohen Luckow e.V.



www.ibz-hl.de

Kurzvorstellung IBZ Hohen Luckow e.V.

Das Innovations- und Bildungszentrum Hohen Luckow e.V. wurde 1992 gegründet. Das Ziel ist die Förderung von Wissenschaft, Innovation und Information auf dem **Gebiet Energie – Umwelt**. Die Arbeit konzentriert sich auf die Hauptgeschäftsfelder: Maritime Technologien, 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 Fallingbostel

☎ +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
- Netzbildung (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 Aufgabenfelder:

✓ 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

19. 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.



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

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.

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 einer 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: Prof. 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 Helftwes

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 Metzger
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

Band 124

18. Rostocker Biomasseforum

Tagungsband, erschienen im Juni 2024, ISBN 978-3-86009-559-1

https://doi.org/10.18453/rosdok_id00004587

Band 125

Vicky Shettigondahalli Ekanthalu

Hydrothermal Carbonization of Sewage Sludge and the Influence of pH Phosphorus Transformation and Hydrochar Properties

Dissertation, ISBN 978-3-86009-562-1

https://doi.org/10.18453/rosdok_id00004601

Band 126

Nguyen Van Than

Development of an anaerobic pre-treatment of high strength organic wastewater from the cleaning of tanks of food and fodder road transports

Dissertation, ISBN 978-3-86009-560-7

https://doi.org/10.18453/rosdok_id00004600

Band 127

Christian Ochsmann

Untersuchung der Adsorption von CO₂ an Ionenaustauschern anhand eines Modellbiogases

Dissertation, ISBN 978-3-86009-561-4

Band 128

Jan Olschewski

Ein Beitrag zur Bestimmung der Erosionsstabilität von Deichbinnenböschungen

Dissertation, ISBN 978-3-86009-563-8

https://doi.org/10.18453/rosdok_id00004629

Band 129

Christian Kaehler

Ein Beitrag zur Bemessung von Küstenschutzbauwerken auf Basis der bivariaten Wahrscheinlichkeitsanalyse mit Copula-Modellen

Dissertation, ISBN 978-3-86009-566-9

https://doi.org/10.18453/rosdok_id00004689

Band 130

Felix Heumer

Risikoanalyse von Trinkwasserversorgungssystemen in kleinen bis mittleren Wasserversorgungsunternehmen und Ableitung von Maßnahmen der Risikominimierung

Dissertation, ISBN 978-3-86009-567-6

https://doi.org/10.18453/rosdok_id00004734