



E

N

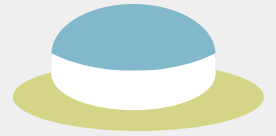
▶ **Reader**

B

I

O

E



Energetische Biomassenutzung

R

G

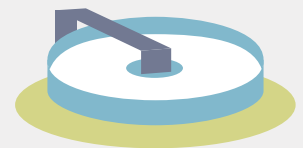
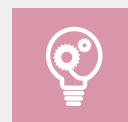
20. bis 22.09.2023

**STATUSKONFERENZ**

BIOENERGIE

I

E



▶ B

I



E

N



▶ R



G



E

**Reader**

Energetische Biomassenutzung

20. bis 22.09.2023  
**LEIPZIG**



**BIOENERGIE**

FORSCHUNGSNETZWERKE  
ENERGIE

[www.forschungsnetzwerke-energie.de](http://www.forschungsnetzwerke-energie.de)



**Energetische  
Biomassenutzung**

[www.energetische-biomassenutzung.de](http://www.energetische-biomassenutzung.de)

Gefördert durch



aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

Projektträger



Begleitforschung



20. bis 22.09.2023  
**STATUSKONFERENZ**  
**BIOENERGIE**

**Editorial**

Daniela Thrän

**Liebe Teilnehmende,**

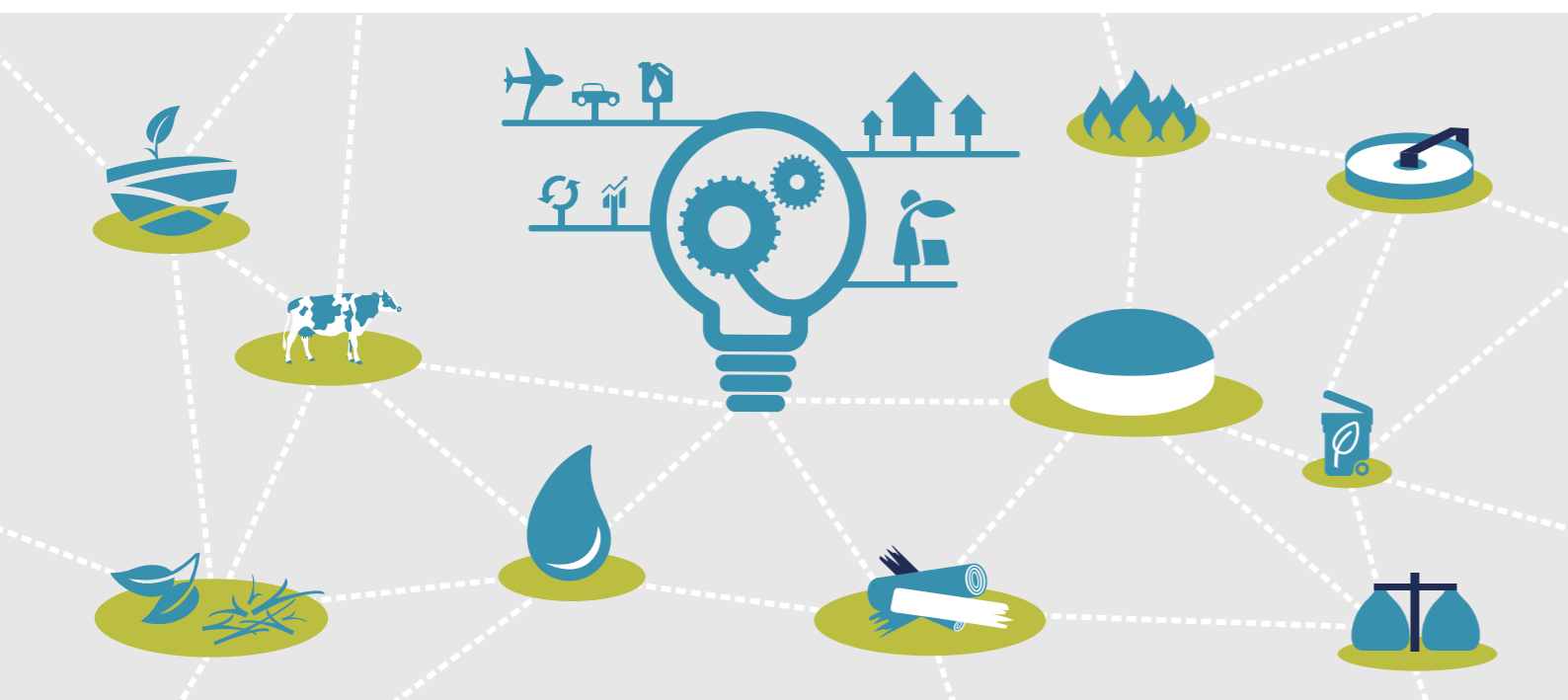
Energie aus biogenen Ressourcen ist ein wichtiger Baustein für die immer drängendere Energiewende. Als Ergänzung zur wetterabhängigen Solar- oder Windenergie birgt Bioenergie besonderes Potenzial: Sie kann gut gespeichert, flexibel eingesetzt und aus den erstaunlichsten Quellen gewonnen werden. Klärschlamm, Laub oder Abfälle aus der Lebensmittelproduktion – solche ohnehin anfallenden Rest- und Abfallstoffe können als wertvolle Ressource für Bioenergie genutzt werden. Durch innovative Technologien ist es inzwischen sogar möglich, zusätzlich zur energetischen Nutzung auch Nebenprodukte wie Biokohle, CO<sub>2</sub> und Nährstoffe weiterzuverwenden. Bioenergie ergänzt damit nicht nur den Mix erneuerbarer Energien, sondern bringt uns auf weiter auf dem Weg hin zu einer nachhaltigen Bioökonomie, in der keine Ressource ungenutzt bleibt.

Die Statuskonferenz Bioenergie 2023 legt ihren Fokus darauf, dieses Potenzial ganz auszuschöpfen: Forschende und Unternehmen beschäftigen sich mit aktuellen Fragen rund um eine optimale, klimafreundliche und flexible Nutzung biogener Reststoffe. Das gemeinsame Ziel ist klar: Wir wollen Forschungsergebnisse evaluieren und vielversprechenden Ansätzen den Weg in den Markt ebnen.

Sie alle sind eingeladen, auf der Statuskonferenz Bioenergie 2023 ganz unterschiedliche Perspektiven zusammenzubringen, Ideen zu entwickeln und die Zukunft der Bioenergie gemeinsam zu gestalten. Basis dafür bietet wertvolles Wissen, das in den letzten Jahrzehnten im Förderbereich »Energetische Nutzung biogener Rest- und Abfallstoffe« des Bundesministeriums für Wirtschaft und Klimaschutz entstanden ist und im Forschungsnetzwerk Bioenergie diskutiert wird.

Der vorliegende Konferenzreader gibt einen Ausblick auf die Inhalte der Konferenz. Wir wünschen Ihnen viel Freude, neue Erkenntnisse und gute Gespräche.

Ihre Begleitforschung



2023  
**STATUSKONFERENZ  
BIOENERGIE**

Biobasierter Wasserstoff	<b>B</b>	
Innovative Biokraftstoffe	<b>I</b>	
Optimieren und Emissionsminderung von Biomassefeuerungen	<b>O</b>	
Erzeugung von Biomethan	<b>E</b>	
Nachhaltige Kreisläufe	<b>N</b>	
Erschließen von Rest- und Abfallstoffen	<b>E</b>	
Rechtliche Rahmenbedingungen & Hemmnisse beim Markttransfer	<b>R</b>	
Geschäftsmodelle und Integration in den Markt	<b>G</b>	
Innovative Technologien	<b>I</b>	
Effiziente Klärschlammverwertung	<b>E</b>	

# Programm der Statuskonferenz | 20.-22. September 2023

## Übersicht

# 2023 STATUSKONFERENZ BIOENERGIE

Uhrzeiten **MITTWOCH** Uhrzeiten **DONNERSTAG** Uhrzeiten **FREITAG**

**ab 9:00** Ankunft / Registrierung

**ab 10:30** Saal 1  
Begrüßung & Keynotes

**ab 12:00** Mittagessen

**ab 13:00** Saal 1  
Impulsvorträge & Plenumsdiskussion

**ab 15:00** Kaffeepause

**ab 15:45** Saal 1  
Geschäftsmodelle & Integration in den Markt

**ab 17:30** Foyer  
Get Together & Wettbewerb »Out of the Box«

**ab 9:00** Ankunft

**ab 9:30** Saal 1 | CD: Optimieren von Biomassefeuerungen; Saal 1 | A: Effiziente Klärschlammverwertung; Saal 1 | B: Biobasierter Wasserstoff

**ab 11:00** Kaffeepause

**ab 11:30** Saal 1 | A: Emissionsminderung von Biomassefeuerungen; Saal 1 | B: Innovative Biokraftstoffe

**ab 12:30** Mittagessen; Poster Ausstellung

**ab 14:00** Saal 1 | A: Innovative Technologien; Saal 1 | B: Erschließen von Rest- und Abfallstoffen

**ab 15:30** Kaffeepause

**ab 16:15** Saal 1 | A: Nachhaltige Kreisläufe; Saal 1 | B: Erzeugung von Biomethan

**ab 19:30** Conference Dinner im Ratskeller, Leipzig

**ab 8:45** Ankunft

**ab 9:15** Workshop Saal 1 CD: Markttransfer; Workshop Saal 1 AB: THG-Emission; Workshop Saal 2: Wärmewende

**ab 10:45** Kaffeepause

**ab 11:30** Workshop Saal 1 AB: Open Data; Workshop Saal 2: Negative Emissionen

**ab 13:00** Saal 1 AB Resümee und Verabschiedung

**ab 13:30** Mittagessen mit Abschlusskaffee

- Optimieren & Emissionsminderung von Biomassefeuerungen
- Innovative Biokraftstoffe
- Innovative Technologien
- Nachhaltige Kreisläufe
- Erzeugung von Biomethan
- Biobasierter Wasserstoff
- Effiziente Klärschlammverwertung
- Geschäftsmodelle & Integration in den Markt
- Erschließen von Rest- und Abfallstoffen

# Programm der Statuskonferenz | 20.-22. September 2023 (detailliert)

## MITTWOCH, 20.09.2023

Ankunft / Registrierung, ab 9 Uhr

10:30 – 12:00 Uhr, Saal: 1  
Keynotes

Timo Haase | Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz  
**Einführung zur aktuellen Energieforschungspolitik**  
Lena Panning | Projektträger Jülich **Schlaglichter der Forschungsförderung**  
Sabine Dzuck | Forschungszentrum Jülich **Horizon Europe in a nutshell:**  
**Wie die EU Energieforschung fördert**  
Dr. Felix Christian Matthes | Öko-Institut **Die Energiewende zur Klimaneutralität am**  
**Beginn einer neuen Phase: Herausforderungen auch für die Energieforschung**

Mittagspause, 12:00 – 13:00 Uhr

13:00 – 15:00 Uhr, Saal: 1  
Impulsvorträge &  
Plenumsdiskussion

Dr. Patrick Matschoss | IZES **Die Rolle der Bioenergie in der Energiewende:**  
**Stand und Ausblick**  
Dr. Kathleen Meisel | DBFZ & Dr. Matthias Jordan | UFZ **Szenarien einer**  
**optimalen Biomassenutzung im deutschen Energiesystem bis 2050**  
Prof. Dr. Daniela Thrän | DBFZ **Forschung für Wärme und Kälte aus Biomasse**

Kaffeepause, 15:00 – 15:45 Uhr

15:45 – 17:15 Uhr, Saal: 1  
Vorträge  
mit anschließender Fragerunde

14 Michael Porzig, Joachim Pertagnol  
**Rechtliche und technische Herausforderungen beim Biogasanlagenbau in**  
**Wasserschutzgebieten**  
16 Leon Müller-Noell, Bernd Schleupen, Andy Gradel  
**Wasserstoff aus Biogas – Projektfortschritt und Erkenntnisse**  
Roman Adam, Lisa Röver, Philipp Schneider, Thomas Zeng, Hans Werner, Volker Lenz  
18 **Einsatz von Parklaub als »sonstiger nachwachsender Rohstoff«**  
**gemäß § 3 (1) Nr. 13 der 1. BImSchV**  
Dirk Block, Christoph Hansel  
20 **Entwicklung einer Pilotanlage zur Vollverwertung von Weizenpülpe und**  
**Systemintegration in die industrielle Stärkeproduktion**

 **Geschäftsmodelle &**  
**Integration in den Markt**

17:30 – 19:30 Uhr, Foyer

**Get Together & Wettbewerb »Out of the Box«**

## DONNERSTAG, 21.09.2023

Ankunft ab 9 Uhr

9:30 – 11:00 Uhr, Saal: 1 CD  
Vorträge  
mit anschließender Fragerunde  
Chair: Prof. Dr. Bernhard Gattertnig

22 Andreas Fuchs, Marc Oliver Schmid, Ulrich Vogt, Günter Scheffknecht  
**Die simultane Reduktion von Stickstoffoxid und Feinstaub über das**  
**DeNOx-DePM-Projekt**  
Thomas Wöhr, Mario König, Thomas Ritter, André Sauter, Hessam Eisazadeh,  
Gunter Hagen, Ralf Moos  
24 **Konzepte zur Optimierung der Selektiven Katalytischen Reduktion (SCR)**  
**von Stickoxiden bei der Verbrennung biogener Rest- und Abfallstoffe**  
Tina Hermann, Dominik Glöckner, Marco Bauer, Christian Schweigler  
26 **Brennwertnutzung an Biomassekesseln mittels angekoppelter**  
**Sorptionswärmepumpe – Komponentenentwicklung und Erprobung**  
Ingo Hartmann, Max Kummrow  
28 **Emissionsminderung an Holzfeuerungen durch Kombination von schulischen**  
**und technischen Maßnahmen**

 **Optimieren von**  
**Biomassefeuerungen**

9:30 – 11:00 Uhr, Saal: 1 A

Vorträge  
mit anschließender Fragerunde  
Chair: Prof. Dr. Christian Schaum

 **Effiziente**  
**Klärschlammverwertung**

9:30 – 11:00 Uhr, Saal: 1 B

Vorträge  
mit anschließender Fragerunde  
Chair: Dr. Franziska Müller-Langer

 **Biobasierter**  
**Wasserstoff**

11:30 – 12:30 Uhr, Saal: 1 A

Vorträge  
mit anschließender Fragerunde  
Chair: Prof. Dr. Ingo Hartmann

 **Emissionsminderung von**  
**Biomassefeuerungen**

11:30 – 12:30 Uhr, Saal: 1 B

Vorträge  
mit anschließender Fragerunde  
Chair: Dr. Volker Heil

 **Innovative**  
**Biokraftstoffe**

Seitenzahl  
30 Eike Janesch, Jens Zosel, Rodrigo Renato Retamal Marín, Anja Lemoine, Pierre Haider,  
Peter Neubauer, Michael Mertig, Stefan Junne  
**Flexibilisierung der Substratnutzung und Biogasproduktion durch Phasenseparation**  
**mit Gelöst-Wasserstoffmessung**  
Andreas Ewald, Philipp Zugliani, Sebastian Fendt, Hartmut Spliethoff  
32 **Techno-ökonomischer Vergleich von Verfahren zur thermischen Verwertung von**  
**Klärschlamm**  
Christian Hubert, Bettina Steiniger, Christian Schaum, Jörg Kretzschmar, Stefan Einsiedel,  
Konstantinos Athanasiadis, Jens Henker, Markus Heinrich  
34 **Flexible und vollenergetische Nutzung biogener Rest- und Abfallstoffe: Faulungen**  
**und Biogasanlagen als Energieverbraucher, -speicher und -erzeuger**  
Kirsten Stark, Matthias Schnell, Johannes Lukas  
36 **Lachgasemissionen bei der thermischen Klärschlammbehandlung –**  
**Entstehungsmechanismen und primäre Minderungsmaßnahmen**

38 Niels Dögnitz, Sebastian Dietrich, Stephanie Hauschild, Jörg Kretzschmar  
**Wasserstoff aus Biomasse – Stand der Technik und Entwicklungsperspektiven**  
Caroline Autenrieth, Robin Ghosh  
40 **»Wasserstoff aus der Saftfabrik« – Nutzung von Frucht- und Gemüsetrester zur**  
**großskaligen Biowasserstoffproduktion mit Purpurbakterien**  
Juliana Rolf, Sören Kamphus, Eike Meemann, Elmar Brüggling  
42 **Biologische Wasserstofferzeugung für eine nachhaltige Energiewirtschaft Entwicklung**  
**und Anwendung der dunklen Fermentation zur Wasserstofferzeugung**  
Andreas Molle, Andy Gradel  
44 **Wasserstoff aus pelletierter Industrierestholzverwertung – Prognosen zum Prozess**  
**und Stand der Umsetzung**

Kaffeepause, 11:00 – 11:30 Uhr

46 Bernhard Gattertnig, Paul Gehrig, Tobias Müller, Thomas Plankenbühler, Dominik Müller  
**Optimiertes Brennstoffmanagement und intelligenter Betrieb moderner**  
**Biomasseheizkraftwerke**  
Mohammad Aleya, Marc-René Simon  
48 **Intelligentes Verbrennungs- und Energiemanagementsystem (VEMS)**  
Onno Cramer, Ingo Hartmann  
50 **Einfluss vom Naturzugbetrieb auf das Emissionsverhalten von Stückholzfeuerstätten**

52 Andreas Gollwitzer, Andreas Apfelbacher, Robert Daschner  
**Thermochemische Umwandlung von Papierreststoff zu erneuerbaren Kraftstoff**  
Andy Gradel, Tobias Plessing

54 **Wasserstoff aus biogenen Reststoffen: Stand der Forschung und Reifegrade**  
**unterschiedlicher Technologien**  
Volker Heil, Martin Peters, Tim Schulzke, Kimberley Matschuk, Philipp Rittershaus, Ulrike Schümann,  
Fanny Langschwager, Nils Rettenmaier

56 **Veresterte Schnellpyrolyseöle aus biogenen Reststoffe als maritime Kraftstoffe**

Mittagspause, 12:30 – 14:00 Uhr | POSTERSESSION | Präsentation der Firmen

**14:00 – 15:30 Uhr, Saal: 1**

Vorträge  
mit anschließender Fragerunde  
Chair: Dr. Konrad Siegfried



**Innovative Technologien**

**14:00 – 15:30 Uhr, Saal: 2**

Vorträge  
mit anschließender Fragerunde  
Chair: Prof. Dr. David Laner



**Erschließen von Rest- und Abfallstoffen**

**16:15 – 17:15 Uhr, Saal: 1**

Vorträge  
mit anschließender Fragerunde  
Chair: Prof. Dr. Michael Nelles



**Nachhaltige Kreisläufe**

**16:15 – 17:15 Uhr, Saal: 2**

Vorträge  
mit anschließender Fragerunde  
Chair: Dr. Peter Kornatz



**Erzeugung von Biomethan**

**19:30 – 22:30 Uhr**

Seitenzahl

58	Bettina Stolze, Ingo Hartmann, René Bindig <b>Umweltfreundliche Katalysatorherstellung auf Basis von biogenem Silica</b> Falko Marx, Paul Dieringer, Jochen Ströhle, Bernd Epple
60	<b>Autotherme Chemical-Looping-Vergasung biogener Reststoffe</b> Christian Kutter, Tarek Philippi, Dr. Dragan Stevanović, Florian Völkl
62	<b>Bioökonomische Potentiale der Wasserstoffherzeugung aus Biomasse durch Allotherme Dampfreformierung</b> Maximilian Heinrich, Tobias Plessing, André Herrmann, Marco Klemm, Georg Kuffer
64	<b>Brennstoffspezifische Simulation thermochemischer Biomassevergasung</b>
66	Andreas Huft, Esther Stahl, Lasse Harloff <b>Laub – eine Biomasse im Fokus der Kreislaufwirtschaft</b> Jörg Kretzschmar, Florian Geyer, Christian Krebs
68	<b>Monovergärung von Weizenpülpe im Labor- und Pilot-Maßstab</b> Marcus Schmidt
70	<b>Untersuchungen zum Potential von Weizenpülpe als Ballaststoffquelle für die Humanernährung</b> Marion Schomaker, Sören Kamphus, Elmar Brüggling
72	<b>Vorbehandelte Reststoffe als Substrat in Biogasanlagen</b> Viktoria Scheff, Gregor Dürl, David Laner, Korbinian Kätzl, Hafiz Ali Raza
74	<b>Thermische Verwertung von Siebüberlauf aus der Bioabfallbehandlung vor dem Hintergrund einer energieeffizienten Ressourcennutzung</b>

**Mittagspause, 15:30 – 16:15 Uhr**

76	Lars Gronen, Kevin Stephan, Hans-Peter König, Uwe Siemann, Luigi Cattini, Peter Drissen, Wolfgang Krumm <b>Erkenntnisse und Ergebnisse des Projektes Sludge2P: Erfolgreiche Nutzung von Klärschlammasche zur Gewinnung von P-Düngemitteln und Synthesegasen mittels IPV-System</b> Julian Matlach
78	<b>Emissionsreduzierung bei der Bioabfallbehandlung, insbesondere bei der Gärproduktnachbehandlung/-kompostierung</b> Johanna Wiechen, Walter Stinner, Michael F. Goldstein, Jurek Häner, Kim Ove Knutzen, Elmar Brüggling, Carolin Brathe, Sascha Hermus
80	<b>Innovationen für ein regionales Nährstoffmanagement (Technisch, pflanzenbaulich und managementseitig in Kombination)</b>

82	Simon Markthaler, Alexander Feldner, Peter Treiber, Jürgen Karl <b>Katalytische und Biologische Direktmethanisierung von Biogas im Rahmen der Forschungsprojekte Power-to-Biogas, FlexBiomethane und IntenseMethane</b> Steffen Lauterbach, Markus Goldbrunner
84	<b>Direkte Nutzung des Prozesswassers aus der Druckwasserwäsche als CO<sub>2</sub>-Quelle für die biologische Methanisierung – erste Einblicke in die Ergebnisse des Projektes Hy2BioMethane</b> Tim Schulzke, Mazloum Sheikh Ayoub, Matthias Prawitz, Joachim Pasel, Remzi Can Samsun, Ralf Peters, Robert Böhm, Ann-Christin Fleer, Arnd Schmücker
86	<b>Umwandlung biogener Reststoffe in Produktgas durch Pyrolyse, Shift und mikrobielle Methanisierung – Prozesskonzept und Versuchsergebnisse</b>

**CONFERENCE DINNER IM RATSKELLER, LEIPZIG**

**FREITAG, 21.09.2023**

Ankunft ab 8:45 Uhr

**9:15 – 10:45 Uhr**

Saal: 1 CD

**WORKSHOPS**

**Rahmenbedingungen und Hemmnisse beim Markttransfer** Dr. Harry Schindler & Konrad Siegfried

Wie setzen sich innovative Bioenergietechnologien auf ihren Zielmärkten durch? Welche Unterstützung braucht es dafür? Der Workshop zeigt konzeptionelle Antworten und empirische Ergebnisse, und ermöglicht auf dieser Basis einen zielgerichteten Erfahrungsaustausch zwischen den Teilnehmenden.

Saal: 1 AB

**Berechnung von THG-Emissionen entlang der Prozesskette** Katja Oehmichen, Stefan Majer

In diesem Workshop beschäftigen wir uns mit dem Status Quo der Treibhausgas-Bilanzierung im Förderprogramm. Dabei steht erneuerbarer Wasserstoff im Vordergrund. Die Teilnehmer:innen erwarten Expertenvorträge aus Wissenschaft, Wirtschaft und Zertifizierungspraxis sowie Raum für angeregte Diskussionen.

Saal: 2, 2. OG

**Heiße Themen, coole Lösungen? Stand und Perspektiven der Wärmewende in Deutschland.** Dr. Volker Lenz, Eva Siebenhühner, Daniela Pomsel, Christopher Siol

Unser Workshop »Heiße Themen, coole Lösungen« lädt Sie ein, aktuelle Themen zu Deutschlands Wärmewende zu erkunden. In der gemeinsamen Diskussion hinterfragen wir: Wo stehen wir momentan und welche Faktoren können die Wärmewende in Deutschland stärker vorantreiben?

**10:45 – 11:30 Uhr**

**Kaffeepause**

**11:30 – 13:00 Uhr**

Saal: 1 AB

**WORKSHOPS**

**Open Data und Forschungsdatenmanagement** Dr. Marco Selig, Christian Hofmann

Der Workshop vermittelt ein Grundverständnis für offene Daten und das damit verbundene Potential für die eigene Forschung. Die Teilnehmer:innen können ihr bisher praktiziertes Forschungsdatenmanagement einordnen und im Austausch mit Fachkollegen und Daten-Experten erfolgreiche Praktiken zur Verbesserung diskutieren.

Saal: 2, 2. OG

**Negative Emissionen – Motivation, Konzepte und Treiber** Dr. Nora Szarka, Dr. Marco Klemm

In diesem Workshop möchten wir den Status Quo und künftige Entwicklungsmöglichkeiten von bio-basierten negativen Emissionen in Deutschland diskutieren. Folgende Fragen werden betrachtet: Was sind negative Emissionen? Welche Konzepte gibt es? Wie kann CO<sub>2</sub> als Rohstoffquelle verwendet werden? Was treibt die künftigen negativen Emissionstechnologien? Inkludiert sind Vorträge von Ronja Wollnik zu »Negative Emissionen« und Nora Szarka »Was treibt die Negativen Emissionen?« sowie ein »Interaktiver Workshop der Treiber«.

**13:00 – 13:30 Uhr**

Saal: 1 AB

**RESÜMEE UND VERABSCHIEDUNG**

**13:30 – 14:30 Uhr**

**Mittagessen mit Abschlusskaffee**

## POSTERAUSSTELLUNG

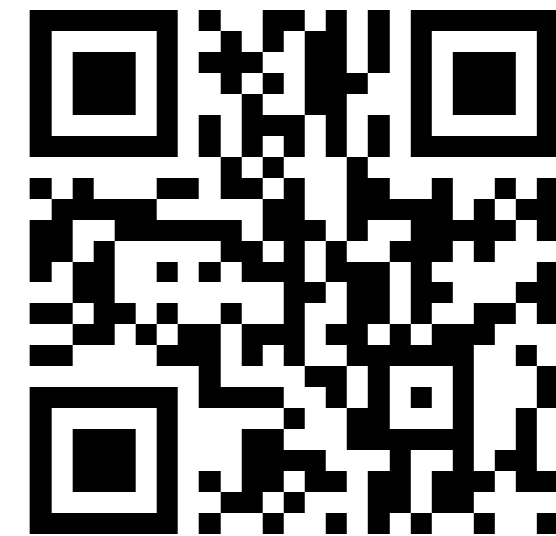
Donnerstag 22.09.2023,  
Mittagspause, 12:30 – 14:00 Uhr

- Felipe Torres-Rivera, Patrick Beuel, Christian Rohloff, Wolfgang Flach, Thomas Mockenhaupt*
- 90 Thermische Verwertung von biogenen Reststoffen aus dem Weinbau zur energetischen Versorgung von Winzereien**  
*Peter Stange*
- 91 flixOpt - Einsatzplanung und Dimensionierung von Erzeugerparks**  
*Steffi Formann, Thomas Schliermann, Ingo Hartmann, René Bindig, Frank Hoferecht*
- 92 Anwendung von porösem biogenem Siliziumdioxid (SiO<sub>2</sub>) in Feinstaubfilter-Prozessen**  
*Robert Manig, Hannes Kotte*
- 94 Energetische und stoffliche Verwertung von chrombelasteten festen Gerbereirückständen in Biogasanlagen**  
*Laura García Laverde, Alberto Bezama, Christina Zinke*
- 96 Regionale Modelle für die Bioökonomieentwicklung - Ansichten aus 5 EU-Regionen**  
*Niklas Gebhard, Martin Meiller, Markus Heese, Andreas Hamberger, Julian Nix, Johannes Lukas*
- 98 Entwicklung einer Feuerung mit Brennstoffstufung – Stickoxidminderung und Flexibilisierung von Biomassefeuerungsanlagen**  
*Nora Lange, Christiane Hennig, Daniela Thrän*
- 100 Aktivitäten der IEA Bioenergy Task 44: Flexible Bioenergie und Systemintegration**  
*Robert Manig, Corina Protze, Jenö Schipek, Catharina Joswig, Alexandra Müller*
- 102 Synthese von Biomethanol auf Basis biogenen Wasserstoffs für den Einsatz im Mobilitätssektor**  
*Michael Meiler, Martin Meiller*
- 104 Integration von Biomasse in industrielle Hochtemperatur-Prozesswärme**  
*Viktoria Scheff, Gregor Dürl, David Laner, Korbinian Kätzl, Hafiz Ali Raza*
- 106 Sieüberlauf aus der Bioabfallbehandlung als biogener Festbrennstoff: Effekt verschiedener Methoden der Brennstoffaufbereitung auf das Ascheschmelzverhalten**  
*Dorothea Stein, Jürgen Reichelt, Markus Ricker, Elisabeth Eiche, Jochen Kolb*
- 108 Optimierung der verbrennungstechnischen Eigenschaften von biogenen Rest- und Abfallstoffen auf Basis eines Biobrennstoffkataloges**  
*Nikolaus Manolikakes, Daniel Dzofou Ngoumelah, Thomas Zeng, Sven Nefgmann, Gerrit Peters, Nils Jansen, Jörg Kretzschmar*
- 110 Entwicklung und Validierung eines innovativen Eisen-Kohlenstoff Präparates zur Gasreinigung und Effizienzsteigerung des Biogasprozesses**  
*Ronja Wollnik et al.*
- 112 Dynamics of bio-based carbon dioxide removal**  
*Maria Fulde*
- 113 HyRegio® – CO<sub>2</sub> aus der Luft entfernt, Wasserstoff erzeugt. Am richtigen Ort. Zur richtigen Zeit.**



Die Statuskonferenz 2023  
lädt zu Umfragen,  
Austausch und Fragerunden ein.

Hier ist Ihr Zugang  
zum interaktiven Tool  
der Konferenz:



**FeBio**

Michael Porzig, Joachim Pertagnol

## Rechtliche und technische Herausforderungen beim Biogasanlagenbau in Wasserschutzgebieten

**FKZ-Nr. 03EI5413:**

Entwicklung und Bau einer neuartigen, kostengünstigen, inputflexiblen und effizienten FEStoffBIOgasanlage bis 75 kW<sub>el</sub>

**Problemstellung und Zielsetzung**

Die Nutzung von Reststoffen spielt in der öffentlichen Diskussion im Bezug zur Defossilisierung des Energiebereiches eine sehr große Rolle. Dabei stellen feste Reststoffe wie Pferde- und Rindermist aber auch Landschaftspflegegrün aktuell nur einen geringen Anteil an der gesamten Produktion von Biogas dar. Ursache sind die hohen Transportkosten, da zum einem die Stoffe dezentral verteilt sind und in lokal geringen Mengen anfallen und zum andern ist die Dichte der Stoffe gering, so dass teils nur geringe Massen transportiert werden. Im EEG wird dieses Problem ansatzweise durch eine höhere Vergütung für Kleinbiogasanlagen bis 99 kW<sub>el</sub> Bemessungsleistung berücksichtigt. Neben der Stromproduktion und -nutzung soll auch die anfallende Wärmeproduktion direkt vor Ort genutzt werden. Auf Grund von hohen Investitionskosten und der zusätzlichen Degression bei der Stromvergütung ist ein signifikanter Ausbau dieser Anlagen bis jetzt nicht zu verzeichnen bzw. nimmt der Zubau im Bezug zu den vergangenen Jahren weiter ab. Mit dem Projekt FeBio soll durch innovative Technologie – der Trockenfermentation für kleine Anlagengrößen – eine wirtschaftliche Lösungsmöglichkeit erarbeitet werden, um die genannten Substrate in kleinen Anlagen energetisch nutzbar zu machen.

Ziel des Projektes ist die Errichtung einer wirtschaftlichen, inputvariablen und effizienten Pilot- und Demonstrationsanlage zur Verwertung von Reststoffen in einfacher Bauweise, die von Betreibern als Bauherrenmodell nachgebaut werden kann und auf Grund des geringen Technikeinsatzes einen störungsfreien Ablauf gewährt. Der technische Teil der Anlage wie BHKW oder Wärmezentrale werden in einem Container geliefert und aufgestellt.

**Aktivitäten und Maßnahmen**

Das Projekt ist in sieben Arbeitspakete gegliedert. Dabei gilt es die „neuartige“ Biogasanlage von der anfänglichen Konzeptplanung über Bau und Inbetriebnahme in einen kontinuierlichen Betrieb zu überführen und hierbei die Anlagen hinsichtlich technischer, wirtschaftlicher und organisatorischer Optimierung wissenschaftlich zu begleiten. Grundlage hierfür ist die Erstellung eines Konzepts, die Planung und der Bau der Biogasanlage. Bereits in der Konzeptphase wurden Erfahrungen aus vorausgegangenen Prototypen übernommen. Z.B. ist der Einfahrtswinkel sowie die Länge der Fermenter angepasst worden, um das Substratmanagement zu optimieren (siehe Abbildung 1).

Zeitgleich wird die Inbetriebnahme der Biogasanlage gestartet, um an dieser über Monitoring der Energie- und Stoffflüsse sowie der Verfahrensabläufe den Status-Quo zu ermitteln und entsprechende Optimierungsansätze bei Organisation und Betriebsparametern abzuleiten. Gleiches gilt auch für den Bereich der technischen Anlagenbestandteile. Ziel hierbei ist eine hohe Effizienz und Auslastung, um eine größtmögliche Wirtschaftlichkeit zu erreichen. Die gesammelten Ergebnissen und Erfahrungen werden Empfehlungen für Politik, Landwirte, Anlagenhersteller und Behörden werden in spezifische Handlungsempfehlungen sowie wissenschaftliche Veröffentlichungen und Fachvorträge überführt.

**Keywords**

Trockenfermentation, Pferdemit, Kleinbiogasanlage, Genehmigung, Wasserschutzgebiet

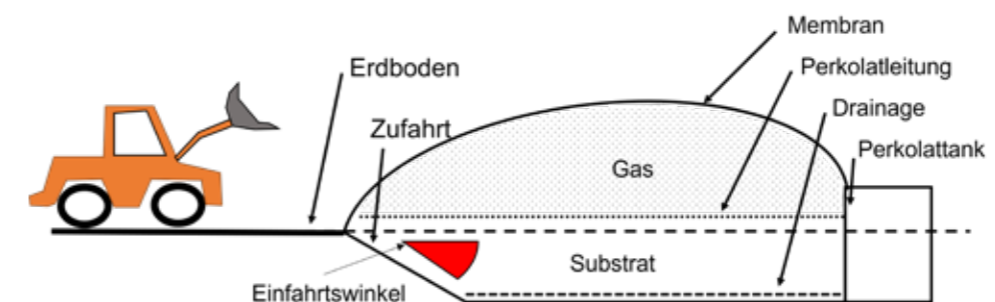
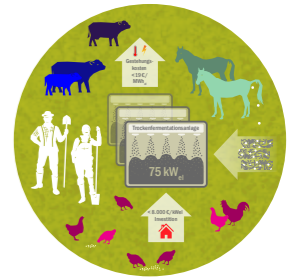
## Geschäftsmodelle und Integration in den Markt

**Ergebnisse**

Im Laufe des Projektes hat sich gezeigt, dass besondere Herausforderungen bei den Genehmigungsverfahren nach Bau- und Umweltrecht vorliegen. Dies betrifft in der Praxis alle Anlagenbauer und stellt im Rahmen des FeBio Projekt eine besondere Herausforderung dar, da die Anlage in einem Wasserschutzgebiet errichtet wird. Hierdurch wurden gesonderte Auflagen an die Basisabdichtung und das Montieren wirksam, die technisch gelöst wurden, aber durch die höheren Kosten Auswirkungen auf die Gesamtwirtschaftlichkeit haben. Hier waren und sind die ökonomischen und logistischen Herausforderungen in der Beschaffung von Baumaterialien und der technischen Bestandteile im Kontext der Corona-Situation und des Krieges in der Ukraine im Projekt zu berücksichtigen, die direkten Einfluss auf die Baukosten und Finanzierung haben. Die Realisierbarkeit der Projektziele ist somit besonderen Umständen ausgesetzt und stetige Anpassungen der Verfahrensabläufe erfordert. Diese Erfahrungen und „lessons learned“ wurden und werden im Rahmen der wissenschaftlichen Begleitung erfasst, ausgewertet und in entsprechende Handlungsempfehlungen überführt. Wie diesen Herausforderungen im Rahmen des Projektes begegnet wurde und welche Lösungen sich hieraus für die Praxis ableiten lassen, wird im Rahmen des Vortrages aufgezeigt.

**Weitere Informationen**

<https://www.izes.de/de/projekte/febio>



**Abbildung 1:** Querschnitt der Anlage inkl. Markierung des Gefälles der Einfahrt.

Michael Porzig, Dr. Joachim Pertagnol  
porzig@izes.de  
pertagnol@izes.de

IZES gGmbH  
Altenkesseler Str. 17 A1, 66115 Saarbrücken



**BioH2Ref**

Leon Müller-Noell, Bernd Schleupen, Andy Gradel

## Wasserstoff aus Biogas – Projektfortschritt und Erkenntnisse

**FKZ-Nr. 03EI5440:**  
Dezentrale Wasserstoff-  
aufbereitung von Biogas durch  
Dampfreformierung

Im Projektvorhaben wird eine Pilotanlage zur Wasserstoffherstellung aus Biogas an einer realen Biogasanlage aufgebaut und betrieben. Das Ziel dieses Vorhabens ist diesen Prozess zur Technologiereife zu führen. Der Prozess besteht aus einer minimalen Rohbiogasaufbereitung mit anschließender direkter Dampfreformierung und abschließender Wasserstoffabscheidung durch Druckwechseladsorption. Das Vorhaben untersucht den Einfluss der Rohbiogasqualität auf den Prozess und die Wasserstoffqualität, die real zu erreichenden Wirkungsgrade des Prozesses, die Abwärmeintegration der Wasserstoffaufbereitung in die Gesamtanlage, sowie die konstruktiven und verfahrenstechnischen Optimierungen der Rohbiogasaufbereitung und Reformerdimensionierung. Außerdem wird eine ganzheitliche Betrachtung der THG-Emissionen und eine Wirtschaftlichkeitsbetrachtung des Gesamtkonzeptes durchgeführt.

Die Versuchsanlage des Projekts wurde letztes Jahr zum ersten Mal an einem Zwischensandort erprobt und die H<sub>2</sub>-Reinheit nach DIN EN 17124 nachgewiesen. Die Anlage wurde zu Beginn des Jahres auf den Lefkeshof in Krefeld reinstalled und befindet sich seit März wieder im Versuchsbetrieb.

Zum Stand der Beitragseinreichung wurde in jüngsten Versuchen bereits ein Wirkungsgrad von über 60% (Biogas zu Wasserstoff-Konversion) nachgewiesen. Im Laufe des Sommers werden Daten zu weiteren Lastzuständen, incl. Energie- und Massenbilanzen aufgenommen. Abbildung 1 zeigt ein Foto der Anlage am Standort.

**Keywords**

Dampfreformierung,  
Wasserstoff,  
Biogas, Bio-to-X,  
green hydrogen

Der vorgeschlagene Beitrag soll den aktuellen Fortschritt des Projekts sowie erste Erkenntnisse präsentieren. Hierzu werden Ergebnisse zur Bilanzierung der Edukt- und Produktgasströme, sowie zum Betriebsverhalten und Wirkungsgrad des Reformers im Teillastbetrieb (ca. 50%, d.h. Erzeugung von ca. 2,5 kg H<sub>2</sub>/h) und dazugehörige Modell-ergebnisse von numerischen Simulationen der BtX energy vorgestellt, die zur weiteren Optimierung der Betriebsweisen dienen.

**Weitere Informationen**

Projektwebsite: <https://www.energetische-biomassennutzung.de/projektpartner/details/project/show/Project/BioH2Ref-706>

Firmenwebsite: <https://btx-energy.de/projekte/bioh2ref/>

Leon Müller-Noell<sup>1</sup> (Hauptautor:in),  
Bernd Schleupen<sup>2</sup>, Dr.-Ing. Andy Gradel<sup>1</sup>

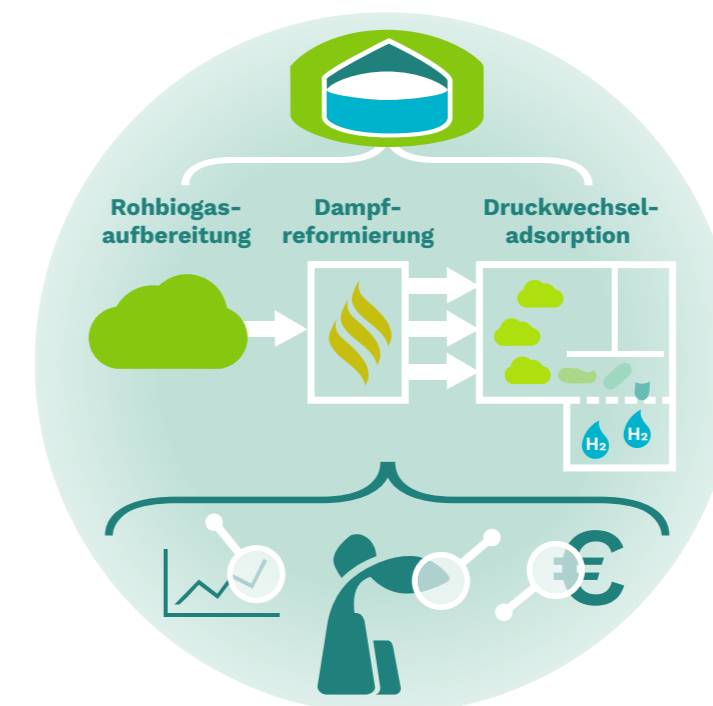
leon.mueller-noell@btx-energy.de  
b.schleupen@gmx.de  
andy.gradel@btx-energy.de

<sup>1</sup> BtX energy GmbH,  
Albert-Einstein-Straße 1, 95028 Hof

<sup>2</sup> Werner Schleupen GbR  
Am Lefkeshof 22, 47839 Krefeld

**Geschäftsmodelle und Integration in den Markt**

Abbildung 1:  
Die Anlage am Projektstandort



**MoBiFuels**

Roman Adam, Lisa Röver, Philipp Schneider, Thomas Zeng, Hans Werner, Volker Lenz

**Einsatz von Parklaub als »sonstiger nachwachsender Rohstoff« gemäß § 3 (1) Nr. 13 der 1. BImSchV**

**FKZ-Nr. 03KB136:**  
Analyse und Beseitigung von  
Markthemmnissen von technisch  
modifizierten Bioenergieträgern

**Keywords**

Brennstoffherstellung,  
Modifizierte Festbrennstoffe,  
Laubholzpellets,  
Industriemaßstab, 1. BImSchV,  
einjähriges Messprogramm

Zum Erreichen der Klimaschutzziele bis 2045 muss der Energiesektor sowohl hinsichtlich der Bereitstellung von Strom, als auch in Bezug auf die Wärmeversorgung einem Wandel von fossilen hin zu regenerativen Energieträgern durchlaufen. Während im deutschen Stromsektor 2022 durch erneuerbare Energie ein Anteil von etwa 46,2% [1] bereitgestellt wurde, fällt der Anteil an erneuerbarer Wärme mit 17,4% [1] noch verhältnismäßig gering aus. Beim Ausbau der erneuerbaren Wärmeenergie fehlen unter anderem alternative Brennstoffe, die es ermöglichen fossile Energieträger kostengünstig zu ersetzen. Zeitgleich führt die Weiterentwicklung der Bioökonomie zu einem steigenden Bedarf an qualitativ hochwertiger und homogener Biomasse, wodurch sich die Nachfrage Schritt für Schritt auf verschiedenste biogene Rohstoffe ausweitet. Die verstärkte Nutzung von Holz als Konstruktionswerkstoff nicht nur in Stammholzqualität, sondern zunehmend auch in Brett-schichtholz und anderen neuen Werkstoffen (z.B. WPC) fällt ebenfalls darunter, wodurch dessen Verfügbarkeit als Festbrennstoff in Zukunft zwangsläufig abnehmen muss. Um die entstehende Lücke zu schließen, muss bei der Herstellung von Brennstoffen verstärkt auf Rest- oder Abfallstoffe, wie beispielsweise Parklaub, Grünzeug oder Grasschnitt zurückgegriffen werden.

Mit Hilfe der florafuel-Brennstoffaufbereitung in Verbindung mit einer gezielten Homogenisierung konnte aus dem ehemaligen Abfallstoff Parklaub im Rahmen des Projektes MoBiFuels (FKZ-Nr. 03KB136) ein homogener Prüfbrennstoff (ca. 50t) industriell hergestellt werden [2]. Durch die Brennstoffaufbereitung konnte die Abfalleigenschaft [3] beendet werden und ein normkonformer Prüfbrennstoff (d.h. Einhaltung aller Grenzwerte der ISO 17 225-6 [4]) bereitgestellt werden. Im Februar 2023 konnte mit diesem Prüfbrennstoff das gemäß § 3 (1) Nr. 13 der 1. BImSchV erforderliche und vom LAI vorgegebene einjährige Messprogramm erstmalig abgeschlossen werden. Dabei wurden alle Anforderungen an den Brennstoff sowie das Emissionsverhalten (CO, Gesamtstaub, PCDD/F, B(a)P) bei dessen Verbrennung eingehalten. Die behördliche Zulassung wird voraussichtlich im Juni 2023 genehmigungsrechtlich abgeschlossen. Nach Erhalt dieser Zulassung im Rahmen der 1. BImSchV kann der Brennstoff in Verbrennungsanlagen des untersuchten Kesseltyps (Ökotherm-Biomasse-Compactanlage C11-80 der A.P.Bioenergietechnik GmbH mit 86,5 kW<sub>NWL</sub> mit einem Gewebefilter, welcher bereits für Brennstoffe gemäß § 3 (1) Nr. 8 der 1. BImSchV [5] zugelassen ist, ohne Genehmigung als Regelbrennstoff deutschlandweit eingesetzt werden. Im Rahmen des Beitrages sollen die Ergebnisse des jährlichen Messprogrammes vorgestellt sowie die wesentlichen Erfahrungen aus dem Genehmigungsprozess an die Stakeholder weitergegeben werden.

[1] Umweltbundesamt, Erneuerbaren Energien in Deutschland, Daten zur Entwicklung im Jahr 2022, 2023

[2] Adam et al. Systematic homogenization of heterogenous biomass batches – Industrial-scale production of solid biofuels in two case studies. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2023.106808>

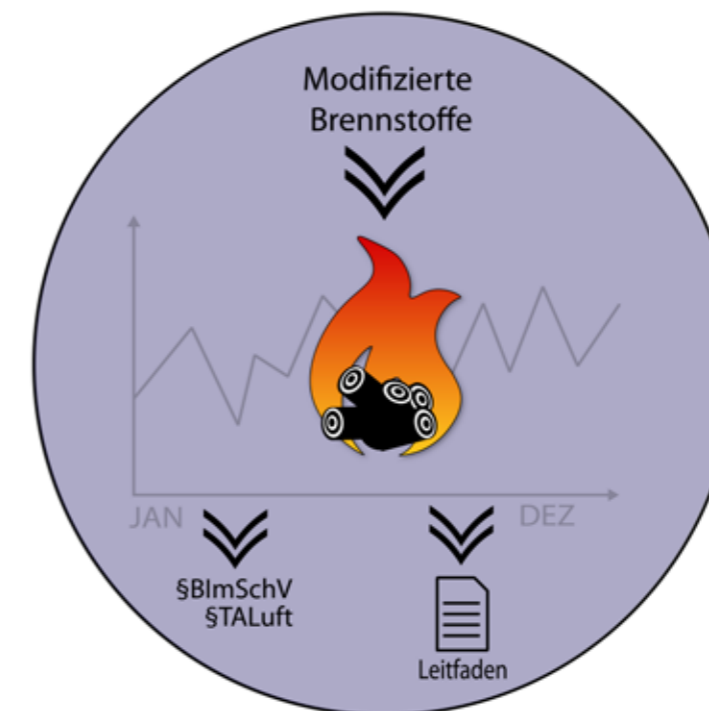
[3] Bescheid vom 19.12.2019: Fachbereich 4.4.1 – Immissionsschutz, staatliches Abfallrecht und Altlasten, Frankenthaler Str. 5 – 9, 81539 München

[4] DIN. Solid biofuels – Fuel specifications and classes – Part 6: Graded non-woody pellets; 27.190; 75.160.10(17225-6). Berlin: Beuth; 2014.

[5] Adam et al. Erfolgreiche Demonstration des Prüfbrennstoffkonzeptes zum Einsatz nicht-holzartiger Festbrennstoffe im Geltungsbereich der 1. BImSchV. Müll und Abfall 2020(7). <https://doi.org/10.37307/j.1863-9763.2020.07.06>

**Geschäftsmodelle und Integration in den Markt****Adresse des Projektes:**

<https://www.energetische-biomassenutzung.de/projekte-partner/details/project/show/Project/mobifuels-587/>



Roman Adam<sup>1</sup> (Hauptautor:in),  
Lisa Röver<sup>1</sup>, Philipp Schneider<sup>2</sup>,  
Thomas Zeng<sup>1</sup>, Hans Werner<sup>3</sup>, Volker Lenz<sup>1</sup>

roman.adam@dbfz.de  
+49-341 2434-550

<sup>1</sup> DBFZ Deutsches Biomasse  
Forschungszentrum gGmbH,  
Torgauer Straße 116, D-04347 Leipzig

<sup>2</sup> A.P. Bioenergietechnik GmbH,  
Träglhof 6, 92242 Hirschau,  
Tel.: +49 (0) 9608 / 9230128,  
p.schneider@oeko-therm.net

<sup>3</sup> Florafuel AG  
Stahlgruberring 7a, 81829 München,  
Tel.: +49 (0)89/ 45 10 88 – 15  
hans.werner@florafuel.de

**Pülpegas**

Dirk Block, Christoph Hansel

## Entwicklung einer Pilotanlage zur Vollverwertung von Weizenpülpe und Systemintegration in die industrielle Stärkeproduktion

**FKZ-Nr. 03EI5442:**  
Entwicklung einer Pilotanlage zur Vollverwertung von Weizenpülpe und Systemintegration in die industrielle Stärkeproduktion

Mit Weizenpülpe wurde ein Nebenprodukt der Stärkeproduktion identifiziert, für das eine energetische und stoffliche Verwertung vor Ort möglich sein könnte. Die Studie, die dieses Erkenntnis ermöglicht, beschäftigte sich mit der Vorwärtsintegration von Komponenten (Primärprodukte oder Nebenströme), die bei im Chemie- und Industriepark Zeitz ansässigen Unternehmen anfallen. Weizenpülpe ist hier Nebenprodukt und wird derzeit in der Massentierhaltung als Futtermittel eingesetzt.

Ausgehend von Literaturdaten zur stofflichen Verwertung nieder- und höhermolekularer Kohlehydrate sowie nach der Bestimmung des Biogas-Potenzials nach VDI 4630 wurde zuerst eine kurze wirtschaftliche Machbarkeitsstudie für ein zu erwartendes Investitionsvolumen durchgeführt. Danach wurde ein Forschungs- und Entwicklungsprojekt definiert. Die Ziele des Projekts beinhalten eine vollintegrierte, kontinuierliche energetische Verwertung der Weizenpülpe mit anschließender Methanisierung des bei der Vergärung ebenfalls erzeugten Kohlendioxid. Außerdem soll, falls betriebswirtschaftlich interessant, eine vorgeschaltete Aufbereitung der Pülpe zur Gewinnung von Verbindungen zur Humanernährung in den Blick genommen werden.

Versuche am DBFZ und dem MRI haben inzwischen die Erreichbarkeit dieser Ziele bestätigt. Es wurde deutlich, dass das betreffende Substrat (Weizenpülpe) aus mehreren Fraktionen besteht, die sehr hohe aber unterschiedliche Umsetzungsgeschwindigkeiten und Methanausbeuten aufweisen. Gleichzeitig hat der großtechnische Versuch an der FBGA des DBFZ in Leipzig die Unterschiede zwischen einer klassischen Biogas-Anlage - überwiegend Batchbetrieb mit klassischen landwirtschaftlichen Substraten - und der Erweiterung eines bestehenden Reaktorzuges einer kontinuierlichen Stärkeproduktionsanlage aufgezeigt. Für eine detaillierte Auslegung der Anlage sind daher sowohl für die Gewinnung der Komponenten für die Humanernährung als auch für die energetische Verwertung weitere Versuche in einer den Anforderungen entsprechenden Pilotanlage erforderlich. Die Komplexität der Prozesssteuerung ist deutlich höher als bei einer klassischen Biogas-Anlage und erfordert weitere Untersuchungen.

Der Abschlussbericht der Versuche am DBFZ wird im 4Q 2023 vorliegen. Die Vorteile für die Integration einer energetischen oder stofflichen Verwertung sind offensichtlich: Durch die integrierte Verwertung entfallen sämtliche Logistikaktivitäten bei der Interstarch GmbH. Das gilt sowohl für die anfallende Weizenpülpe als auch für die Transportemissionen (Lärm und CO<sub>2</sub>). Zusätzlich wird der Wasserkreislauf für die Stärkeproduktion geschlossen. Derzeit wird davon ausgegangen, dass der aufbereitete Gärrest über die vorhandene Abwasseranlage entsorgt und das Wasser z.B. für den Betrieb der Kühltürme im Chemie- und Industriepark wiederverwendet werden kann.

**Keywords**

Weizenpülpe,  
Pentosane,  
Methanisierung,  
Ballaststoffe

**Geschäftsmodelle und Integration in den Markt**

Das Transferpotenzial ist bei erfolgreicher Realisierung hoch, da weltweit ähnliche Konstellationen für Pülpe oder vergleichbare Substrate vorliegen. Für jeden potenziellen Standort wird davon ausgegangen, dass der nutzbare Energieinhalt dieser Substrate weit über den Energiebedarf des entsprechenden Produktionsbetriebs hinausgeht. Der Überschuss kann dann als erneuerbare Energieträger zur Verfügung stehen. Für Zeitz wird für ca. 15.000t Trockensubstrat ein Gesamt-Energiepotenzial von 120 GWh angenommen. Die untersuchten Substrate sind definitionsgemäß Reststoffe. Die daraus erzeugten Energieträger könnten auch für andere Industriezweige über deren Aufnahme in den Annex IX der Verordnung zu erneuerbaren Energien interessant werden.

**Weitere Informationen:**

[www.industriepark-zeitz.de](http://www.industriepark-zeitz.de)

Projektsteckbrief des BMWK Förderbereich »Energetische Biomasse«:

<https://www.energetische-biomassennutzung.de/projekte-partner/details/project/show/Project/P%C3%BClpegas-710>

Daldrup, M.; Kurzbuch, M.; Ramhold, D.; Lindorfer, H. (2020): Monovergärung von Weizenpülpe. Tagungsband zum 14. Rostocker Bioenergieforum/19. DIALOG Abfallwirtschaft MV, Band 95, Universität Rostock. p. 425-437.

Online: [https://rosdok.uni-rostock.de/file/rosdok\\_document\\_0000016074/rosdok\\_derivate\\_0000088834/Nelles\\_BioenergieforumAbfallwirtschaft\\_2020.pdf](https://rosdok.uni-rostock.de/file/rosdok_document_0000016074/rosdok_derivate_0000088834/Nelles_BioenergieforumAbfallwirtschaft_2020.pdf) (letzter Zugriff 28.08.2023)

**Literatur**

Dr. Dirk Block<sup>1</sup>, Christoph Hansel<sup>2</sup>

<sup>1</sup>revela-consulting GmbH

Lortzingstrasse 21, 41470 Neuss

<sup>2</sup> Infra-Zeitz Servicegesellschaft mbH

Hauptstraße 30 D, 06729 Elsteraue

[dirk.block@revela.consulting](mailto:dirk.block@revela.consulting)

## DeNox-DePM

Andreas Fuchs, Marc Oliver Schmid, Ulrich Vogt, Günter Scheffknecht

## Die simultane Reduktion von Stickstoffoxid und Feinstaub über das DeNOx-DePM-Projekt

**FKZ-Nr. 03EI5455:**  
Entwicklung eines innovativen Verfahrens zur kombinierten Stickstoffoxid- und Staubabscheidung mithilfe von katalytisch wirksamen Additiven an einem Holzheizkraftwerk

Unter den erneuerbaren Energieträgern, die zur Wärmeerzeugung genutzt werden, stellt die Biomasse mit 84 % die wichtigste Wärmequelle dar [1]. Um die klimafreundliche Nutzung von biogenen Rest- und Abfallstoffen langfristig zu gewährleisten und den Anforderungen der Luftreinhaltung gerecht zu werden, müssen daher neue Technologien erforscht werden, die eine deutliche Reduzierung der in den Rauchgasen enthaltenen Schadstoffe erreichen.

Bei der Verbrennung von Biomasse werden verschiedene Schadstoffe freigesetzt. NOx stellt dabei einen dieser Schadstoffe, welcher negative Folgen für Mensch und Umwelt hat, dar [2,4-6]. Die Folgen einer unkontrollierten NOx-Emission sind unter anderem photochemischer Smog, saurer Regen und Ozonabbau [3]. Der bei der Verbrennung von Biomasse freigesetzte Feinstaub hat ebenfalls negative gesundheitliche Folgen für den Menschen [4-6]. Aus diesem Grund ist die Reduzierung der Emissionen das wichtigste Ziel, um für die Biomasseverbrennung als erneuerbare Energiequelle weiterhin die gesellschaftliche und politische Unterstützung zu erhalten.

Dieses Projekt zielt auf eine kombinierte Reduzierung sowohl der NOx- als auch der Feinstaub-Emissionen ab. Zu diesem Zweck sollen dem Rauchgas katalytisch aktive Additive zugesetzt werden, die zusammen mit dem Feinstaub an einem Gewebefilter abgeschieden werden. Im Gegensatz zu herkömmlichen Verfahren, bei denen die Katalysatoren zur NOx-Minderung in einer »High-Dust«, »Low-Dust« oder »Tail End« Anordnung positioniert sind [7], entsteht bei diesem Verfahren ein katalytisch aktiver Filterkuchen durch das Einbringen des pulverförmigen katalytisch aktiven Additivs. Somit liegt quasi kontinuierlich ein Filterkuchen am Gewebefilter an und muss nach der Abreinigung des Filters nicht erst wieder aufgebaut werden. Dadurch kommt es zu einer besseren Partikelabscheidung und die Kontaktzeit mit dem Katalysator wird durch die abnehmende Gasgeschwindigkeit erhöht, so dass eine gleichzeitige Reduktion von PM und NOx realisiert wird.

Für die Realisierung dieses Projekts wird zunächst ein Niedertemperatur-NH<sub>3</sub>-SCR-Katalysator entwickelt, der in einem Temperaturbereich von 120 - 300 °C einen hohen Wirkungsgrad aufweist und möglichst ökologisch und ökonomisch hergestellt werden kann. Die niedrige Betriebstemperatur dieses Verfahrens wird auch diese Aspekte im Vergleich zu den etablierten Techniken verbessern. Zur Herstellung des Katalysators wird ein Imprägnierungs- und Kalzinierungsverfahren mit Hilfe eines Mikrowellensystems verwendet, welches bereits in Voruntersuchungen erfolgreich eingesetzt wurde. Aufgrund der Verwendung eines Mikrowellen Systems kann es hierbei zu anderen Katalysatoreigenschaften kommen, als bei der Verwendung traditioneller Verfahren [8]. Außerdem zählt die Verwendung dieser Systeme zu dem Gebiet der »Green Chemistry«, weshalb dies ebenfalls dem ökologischen und ökonomischen Aspekts des Vorhabens zugutekommt [9-11]. Die Katalysatoren werden zunächst im Labor mit synthetischem Rauchgas auf Effizienz und Resistenz gegen Katalysatorgifte getestet, bevor sie in einer kleinen Biomasse-Feuerungsanlage beim Einsatz von biogenen Rest- und Abfallstoffen mit dem Ziel der Hochskalierung auf ein Holzheizkraftwerk untersucht und optimiert werden. Der zu verwendende Gewebefilter wurde bereits in früheren Arbeiten für die Verbrennung von Biomasse getestet und sollen weiter optimiert werden [12].



## Optimieren von Biomassefeuerungen

### Literatur

- [1] Umweltbundesamt, Erneuerbare Energien in Deutschland. Daten zur Entwicklung im Jahr 2022, 2023, <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/erneuerbare-energien-in-deutschland-2022> (Stand 09.05.2023).
- [2] I. Oberberger, T. Brunner, G. Barnthaler, Chemical properties of solid biofuels—significance and impact, *Biomass Bioenergy* 30 (11) (2006) 973–982. <http://dx.doi.org/10.1016/j.biombioe.2006.06.011>.
- [3] G. Xu, X. Guo, X. Cheng, J. Yu, B. Fang, A review of Mn-based catalysts for low-temperature NH<sub>3</sub>-SCR: NO<sub>x</sub> removal and H<sub>2</sub>O/SO<sub>2</sub> resistance, *Nanoscale* 13 (15) (2021) 7052–7080. <http://dx.doi.org/10.1039/d1nr00248a>.
- [4] B. Ritz, B. Hoffmann, A. Peters, The Effects of Fine Dust, Ozone, and Nitrogen Dioxide on Health, *Dtsch. Arztebl. Int.* 116 (51-52) (2019) 881–886. <http://dx.doi.org/10.3238/arztebl.2019.0881>.
- [5] I. Manisalidis, E. Stavropoulou, A. Stavropoulos, E. Bezirtzoglou, Environmental and Health Impacts of Air Pollution: A Review, *Front. Public Health* 8 (2020) 14. <http://dx.doi.org/10.3389/fpubh.2020.00014>.
- [6] W. de Vries, Impacts of nitrogen emissions on ecosystems and human health: A mini review, *Curr. Opin. Environ. Sci. Health* 21 (2021) 100249. <http://dx.doi.org/10.1016/j.coesh.2021.100249>.
- [7] J.J. Schreifels, S. Wang, J. Hao, Design and operational considerations for selective catalytic reduction technologies at coal-fired boilers, *Front. Energy* 6 (1) (2012) 98–105. <http://dx.doi.org/10.1007/s11708-012-0171-4>.
- [8] K.-H. Chuang, C.-Y. Lu, M.-Y. Wey, Y.-N. Huang, NO removal by activated carbon-supported copper catalysts prepared by impregnation, polyol, and microwave heated polyol processes, *Appl. Catal. A Gen.* 397 (1-2) (2011) 234–240. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apcata.2011.03.003>.
- [9] D. Gangrade, S. Lad, A. Mehta, Overview on microwave synthesis-Important tool for green Chemistry, *Int. J. Res. Pharm. Sci* 5 (2) (2015) 37–42.
- [10] A.R. Yadav, S.K. Mohite, C.S. Magdum, Microwave assisted synthesis of some Traditional reactions: Green chemistry approach, *Asia. Jour. Res. Chem.* 13 (4) (2020) 275. <http://dx.doi.org/10.5958/0974-4150.2020.00053.X>.
- [11] S. Głowniak, B. Szcześniak, J. Choma, M. Jaroniec, Advances in Microwave Synthesis of Nanoporous Materials, *Adv. Mater.* 33 (48) (2021) e2103477. <http://dx.doi.org/10.1002/adma.202103477>.
- [12] F. Schott, G. Baumbach, D. Straub, H. Thorwarth, U. Vogt, Novel metal mesh filter equipped with pulse-jet regeneration for small-scale biomass boilers, *Biomass Bioenergy* 163 (2022) 106520. <http://dx.doi.org/10.1016/j.biombioe.2022.106520>.

### Keywords

Biomasse, Katalyse, Schadstoffreduktion

M. Sc. Andreas Fuchs (Hauptautor:in),  
M. Sc. Marc Oliver Schmid, Dr. Ulrich Vogt,  
Prof. Dr. Günter Scheffknecht  
[andreas.fuchs@ifk.uni-stuttgart.de](mailto:andreas.fuchs@ifk.uni-stuttgart.de)

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

## BioFeuSe

Thomas Wöhr, Mario König, Thomas Ritter, André Sauter, Hessam Eisazadeh, Gunter Hagen, Ralf Moos

## Konzepte zur Optimierung der Selektiven Katalytischen Reduktion (SCR) von Stickoxiden bei der Verbrennung biogener Rest- und Abfallstoffe

FKZ-Nr. 03EI5434:  
Neue Sensorik für die Prozessoptimierung von SCR-Verfahren und Partikelabscheidung an Biomasseverbrennungsanlagen

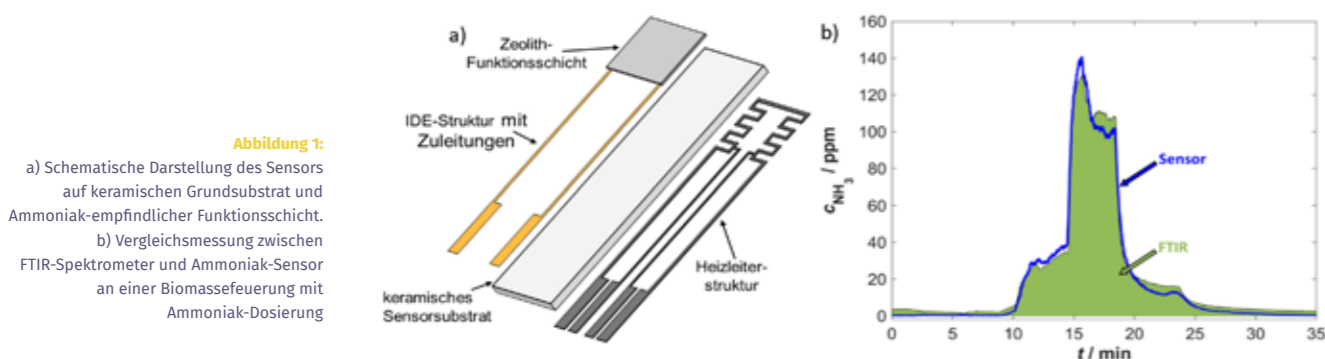
Die Verwendung biogener Rest- und Abfallstoffe, wie z.B. Stroh und anderer Halmgüter aus der Landwirtschaft und Landschaftspflege, als erneuerbare Energieträger bietet im Hinblick auf die Emission von Treibhausgasen einen Vorteil gegenüber fossilen Brennstoffen. Durch die thermische Verwertung von Biomasse konnten in Deutschland im Jahr 2020 bereits 76,3 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äquivalente eingespart werden, was ungefähr 10% der Gesamt-Treibhausgasemission entspricht. [1]

Allerdings steht die Biomasse-Verbrennung seit geraumer Zeit aufgrund erhöhter Schadstoffemissionen in der Kritik. Besonders bei der Verbrennung biogener Rest- und Abfallstoffe treten neben erhöhten Partikelemissionen auch erhöhte Stickoxidkonzentrationen im Abgas auf. Daher ist der Einsatz von Systemen zur Selektiven Katalytischen Reduktion (SCR) zur Minderung der Stickoxide zumindest bei Anlagen mit einer Leistung >100 kW erforderlich, um die gesetzlichen Emissionsvorschriften einhalten zu können. [2]

Auch die Emission von Ammoniak, der als Reduktionsmittel für die Stickoxide verwendet wird, sollte aufgrund der gesundheitsgefährdenden Wirkung verhindert werden. Aus diesem Grund befasst sich das Projekt mit der Entwicklung von zwei Konzepten, mit deren Hilfe eine verbesserte Betriebsstrategie zur Ammoniak- bzw. AdBlue-Dosierung erreicht werden kann.

### Sensorkonzept

Als erste Variante wird ein selektiver Ammoniak-Sensor auf keramischer Basis untersucht. Die Ammoniak-Detektion geschieht hier über eine Zeolith-Funktionsschicht, deren elektrische Eigenschaften mit Hilfe einer Interdigital-Elektroden-Struktur (IDE) vermessen wird. Durch den Betrieb bei einer Temperatur im Bereich um 400 °C, die durch eine Heizleiterstruktur auf der Rückseite des Sensors bereitgestellt wird (siehe Abbildung 1a), stellt sich ein Gleichgewicht aus Ad- und Desorption der Ammoniak-Moleküle am Zeolithen ein. [3]



### Keywords

Abgasnachbehandlung, SCR-Systeme, Ammoniak, Sensorkonzept, Hochfrequenz-Diagnose

Dadurch ergibt sich ein konzentrationsabhängiges Signal, mit dem ein auftretender Ammoniak-Schlupf detektiert werden kann. Erste Messungen an einer Biomassefeuerung mit einer Ammoniak-Dosierung zeigen eine gute Empfindlichkeit gegenüber Ammoniak (siehe Abbildung 1b)) und keine Querempfindlichkeiten gegenüber CO und Kohlenwasserstoffen. Der Sensor kann somit auch zum Monitoring des Ammoniak-Schlupfes eingesetzt werden.

### Hochfrequenz-Diagnose

Neben der Verwendung des Sensors soll als zweite Alternative die Aktivität von SCR-Katalysatoren mittels einer Hochfrequenz-Diagnose untersucht werden. Dabei wird durch zwei Antennen (Koppelemente) eine stehende elektromagnetische Welle innerhalb des Katalysatorgehäuses erzeugt, deren Resonanzfrequenz und -güte von den dielektrischen Eigenschaften des Katalysatormaterials abhängig ist. [4]

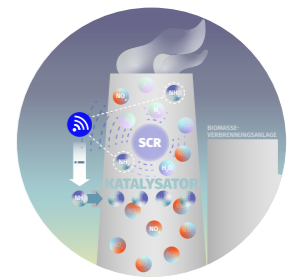
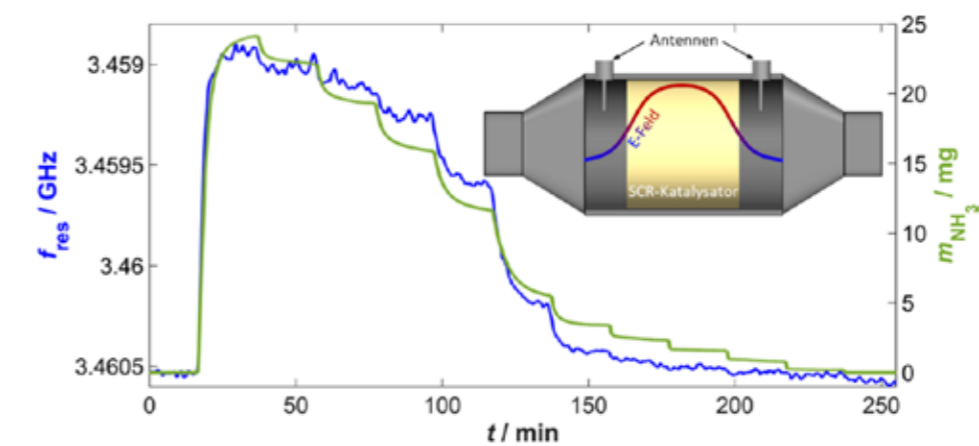


Abbildung 2: Korrelation zwischen eingespeicherter Ammoniak-Menge am SCR-Katalysator und Resonanzfrequenz im Katalysatorgehäuse bei 350 °C

Durch die Beladung des SCR-Katalysators mit Ammoniak für die ablaufende SCR-Reaktion ändert sich u.a. die Permittivität des Materials und somit die Resonanzfrequenz des Systems (siehe Abbildung 2). Damit kann der Beladungszustand des Katalysators bestimmt und auf ihn geregelt werden, um einen Ammoniak-Schlupf zu vermeiden und trotzdem einen hohen NO<sub>x</sub>-Umsatz sicherstellen zu können.

### Zusammenfassung und Ausblick

Nach den erfolgreichen Funktionsnachweisen im Labor und ersten Messreihen im Realabgas von Biomasse-Verbrennungsanlagen zur Evaluation der beiden Konzepte folgen im weiteren Verlauf des Projekts ausgiebige Testläufe an den Feuerungsanlagen.

- [1] Lauf, T.; Memmler, M.; Schneider, S. (2021): Emissionsbilanz erneuerbarer Energieträger, Bestimmung der vermiedenen Emissionen im Jahr 2020. Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau.  
[2] König, M.; Eisinger, K.; Hartmann, I.; Müller, M. (2019): Combined removal of particulate matter and nitrogen oxides from the exhaust gas of small-scale biomass combustion. In: Biomass Conversion and Biorefinery. 9, pp. 201-212.  
[3] Franke, M.E.; Simon, U. (2004): Solvate-Supported Proton Transport in Zeolites. In: ChemPhysChem. 5 (4), pp. 465-472  
[4] Rauch, D.; Albrecht, G.; Kubinski, D.; Moos, R. (2015): A microwave-based method to monitor the ammonia loading of a vanadia-based SCR catalyst. In: Applied Catalysis B: Environmental. 165, pp. 36-42

### Literatur

Thomas Wöhr<sup>1</sup> (Hauptautor:in),  
Mario König<sup>2</sup>, Dr. Thomas Ritter<sup>3</sup>,  
André Sauter<sup>4</sup>, Hessam Eisazadeh<sup>4</sup>,  
Dr. Gunter Hagen<sup>1</sup>, Prof. Ralf Moos<sup>1</sup>

funktionsmaterialien@uni-bayreuth.de  
<sup>1</sup> Universität Bayreuth, Lehrstuhl für  
Funktionsmaterialien

Universitätsstr. 30, 95447 Bayreuth  
<sup>2</sup> Deutsches Biomasseforschungszentrum,  
Torgauer Str. 116, 04347 Leipzig  
<sup>3</sup> H+H Engineering & Service GmbH,  
Birkenleite 2, 96242 Sonnefeld  
<sup>4</sup> CPK Automotive GmbH & Co. KG  
Gildenstr. 4c, 48157 Münster

**BreBiSorp**

Tina Hermann, Dominik Glöckner, Marco Bauer, Christian Schweigler

## Brennwertnutzung an Biomassekesseln mittels angekoppelter Sorptionswärmepumpe – Komponentenentwicklung und Erprobung

FKZ-Nr. 03KB133:

Brennwertnutzung an Biomassekesseln mittels angekoppelter Sorptionswärmepumpe

**Hintergrund oder Ziel**

Für eine optimierte Brennstoffausnutzung in Biomasse-Heizsystemen können Rauchgaswärmübertrager eingesetzt werden, um die Wärme aus dem Rauchgas an den Rücklauf des Heizsystems abzugeben. Der Wärmegewinn aus dem Rauchgas ist allerdings oftmals begrenzt durch hohe Rücklaufemperaturen, die bei Nahwärmenetzen etwa 50 °C betragen. Durch Einbindung einer Absorptionswärmepumpe in das Biomasse-Heizsystem wird durch Wärmeübertrag aus dem Rauchgas auf den Verdampfer der Absorptionswärmepumpe eine weitaus tiefere Auskühlungstemperatur und somit auch eine bessere Ausnutzung des Brennwerteffekts mit signifikanter Wirkungsgradsteigerung ermöglicht. Die vom Kessel erzeugte Wärme dient als thermischer Antrieb der Sorptionswärmepumpe. Der Bedarf an elektrischer Hilfsenergie ist minimal.

**Forschungsschwerpunkte**

An der Hochschule München werden experimentelle Untersuchungen zur Wärme- und Stoffübertragung der einzelnen Komponenten der Absorptionswärmepumpe im Hinblick auf eine Kopplung der Wärmepumpe mit dem Biomasseheizkessel durchgeführt. Unter den Gesichtspunkten eines minimalen Einsatzes an elektrischer Hilfsenergie und eines weitestgehend selbstregelnden Betriebs wurde ein neuartiges Konzept für den Wärmepumpenkreislauf entwickelt. So wird beim Generator die Sorptionslösung nach dem Prinzip einer Blasenpumpe im Umlauf gefördert. Der Verdampfer ist als Rieselfilmverdampfer mit vertikalen, strukturierten Wärmeübertragerrohren konzipiert, der mit einer minimalen Kältemittel-Aufgabemenge betrieben werden kann. Die apparatetechnische Auslegung und Konstruktion der Absorptionswärmepumpe wird zusammen mit dem Projektpartner »SCHERDEL Energietechnik GmbH« durchgeführt.

**Aktivitäten und Maßnahmen**

Auf Konzeptentwicklung und thermodynamische Modellierung folgten experimentelle Untersuchungen zur Wärme- und Stoffübertragung an drei nacheinander entstandenen Versuchsanlagen mit unterschiedlichen Untersuchungs-Schwerpunkten. Im Labor der Hochschule München wurde an der Versuchsanlage zur Rieselfilmverdampfung der filmseitige Wärmeübergang und das Benetzungsverhalten an strukturierten Rohren untersucht (Abbildung 1). Es folgte ein Aufbau der vollständigen Absorptionswärmepumpe mit Blasenpumpe für den Naturumlauf der Sorptionslösung, wobei die Wärmegewinnung aus dem feuchten Biomasse-Rauchgas durch ein Wasserdampf/Luft-Gemisch simuliert wurde (Abbildung 2). Zuletzt wird beim Projektpartner SCHERDEL eine praxisnahe Versuchsanlage installiert, in der der Betrieb des Rauchgas-beheizten Verdampfers in Verbindung mit einem Holzhackschnitzel-befeuerten Heizkessel erprobt wird. Der mögliche Wärmegewinn aus der Rauchgaskondensation und die Einbindung des Verdampfers in das Heizsystem können dadurch unter realen Bedingungen getestet werden.

**Ergebnisse:**

Bei der Rieselfilmverdampfung mit geringen Aufgabemengen und Berieselungsdichten von 26 kg/(m·h) konnte eine vollständige Benetzung der strukturierten Rohroberfläche beobachtet und Wärmedurchgangskoeffizienten bis 4,1 kW/m<sup>2</sup>K ermittelt werden.

**Keywords**

Absorption Wasser/LiBr, Wärmepumpe, Biomassekessel, Rauchgaskondensation, Energieeffizienz

## Optimieren von Biomassefeuerungen

Bei günstigen Betriebsbedingungen konnte auch die vollständige Verdampfung des Kältemittels erreicht werden, die einen Betrieb ohne mechanische Pumpe für die Umwälzung des Kältemittels ermöglicht. Die Absorptionswärmepumpe konnte im Naturumlauf unter Vorgabe einer Rücklauftemperatur von 50 °C und Kessel-Heißwassertemperaturen von maximal 95 °C erfolgreich betrieben werden. Die Förderleistung des Naturumlauf-Austreibers ließ sich erwartungsgemäß durch eine Absenkung der Kühlwassertemperatur nochmals verstärken. Im Verdampfer der Absorptionswärmepumpe konnte die Auskühlung des Wasserdampf/Luft-Gemischs mit Kondensation der Rauchgasfeuchte nachgewiesen werden. Bei einem ersten Betrieb des Verdampfers, gekoppelt an den Biomasseheizkessel, wurde eine Auskühlung des Rauchgases auf 30 °C mit entsprechender Kondensation des enthaltenen Wasserdampfes erzielt. Die vielversprechenden Ergebnisse sollen durch weitere Messungen verifiziert werden.

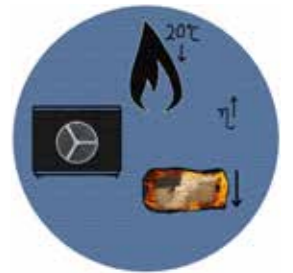


Abbildung 1:  
Versuchsanlage zur Rieselfilmverdampfung

Abbildung 2:  
Versuchsanlage der vollständigen Absorptionswärmepumpe

Tina Hermann<sup>1</sup> (Hauptautor:in),  
Dominik Glöckner<sup>2</sup>, Marco Bauer<sup>2</sup>,  
Christian Schweigler<sup>1</sup>

tina.hermann@hm.edu

<sup>1</sup> CENERGIE – Forschungsinstitut für  
Energieeffiziente Gebäude und Quartiere  
Lothstr. 34, 80335 München

<sup>2</sup> SCHERDEL Energietechnik GmbH  
Scherdelstraße 2, 95615 Marktredwitz

## Ofenführerschein

Ingo Hartmann, Max Kummrow

## Emissionsminderung an Holzfeuerungen durch Kombination von schulischen und technischen Maßnahmen

## Keywords

Holzfeuerung,  
Ofenführerschein, Katalysator,  
Abscheider, Luftregelung

## Hintergrund oder Ziel

Die Ofenbranche, die Politik und Nutzende müssen zeitnah die Frage beantworten, wie die Emissionen aus häuslichen Holzfeuerungen deutlich gemindert werden können, um eine Zukunft der Holzfeuerungen zu ermöglichen. Es muss konsequent an der Technik aber auch an der Minderung des Nutzendeneinflusses gearbeitet werden, um das Ziel von Emissionen unter  $2,5 \text{ mg/m}^3$  Gesamtstaub zu erreichen und die Partikelanzahlkonzentration deutlich zu senken. Zusätzlich zur notwendigen Technik wie Katalysatoren und Abscheidern ist die Schulung der Ofenbetreibenden erforderlich. Es müssen also beide Emissionsminderungsmaßnahmen kombiniert werden.

Nach heutigem Stand der Technik werden die niedrigsten Schadstoffemissionen erreicht, wenn Holzfeuerungen mit einer Luftregelung, einer Betriebsdatenerfassung und Abgasreinigung ausgerüstet sind und die Bürgerinnen und Bürger das richtige Heizen mit Holz erlernt haben. Damit ist eine umweltgerechtere Holznutzung in Kleinfeuerungsanlagen auch heute schon möglich. Zudem gilt es, den Verbrauch an Brennholz durch höhere Effizienz und Kopplung mit anderen Erneuerbaren Energien zu senken.

## Aktivitäten und Maßnahmen

Für einen aktuell am Markt verfügbaren durchschnittlichen Stückholz-Kaminofen wurden unter Praxisbedingungen (nachfolgend sogenannte Rohrealemissionen) Gesamtstaubwerte von  $100 \text{ mg/m}^3$  (i.N.) bei 13 Vol.-%  $\text{O}_2$ , OGC-Emissionen von  $200 \text{ mg/m}^3$  (i.N.) bei 13 Vol.-%  $\text{O}_2$  und  $\text{CO}$ -Emissionen von  $2000 \text{ mg/m}^3$  (i.N.) bei 13 Vol.-%  $\text{O}_2$  angesetzt. Diese Rohrealemissionen ( $C_{\text{RRE}}$ ) werden im Mittel emittiert, wenn ungeschulte Nutzende einen Kaminofen ohne Emissionsminderungstechnik betreiben.

Durch eine Schulung der Nutzenden lassen sich die Emissionen erheblich senken, was durch Messungen des DBI Freiberg im Rahmen des Projektes »Ofenführerschein« (UBA-Auftrag) nachgewiesen werden konnte. Für die weitere Betrachtung (vgl. hierzu FNR: Mediathek -  $\text{CO}_2$ -Emissionsfaktoren der Wärmebereitstellung 2020, <https://mediathek.fnr.de/grafiken/daten-und-fakten/bioenergie/fest-biobrennstoffe/co2-emissionsfaktoren-der-waermebereitstellung.html>, Zugriff 12.05.2023) wurde angenommen, dass bei nachhaltiger Holznutzung (»es wird deutlich weniger Holz genutzt als nachwächst« und »es werden 100% fossile Energieträger bei der Holzverbrennung substituiert«) ausschließlich die  $\text{CO}_2$ -Emissionen aus der Vorkette eines Holzofens ( $\text{EFCO}_2$  Vorkette Holzofen) mit  $23,7 \text{ g/kWh}$  anzusetzen sind. Wird dagegen kein fossiler Energieträger substituiert und die Holznutzung ist nicht nachhaltig, muss zumindest anteilig (z.B. mit einem Faktor von 0,5) die  $\text{CO}_2$ -Emission aus der Holzverbrennung mit  $380 \text{ g/kWh}$  eingerechnet werden. Vor allem Nutzende, die nicht geschult sind, machen häufig emissionsverstärkende Fehler, verbrauchen zu viel Brennstoff und verwenden inkorrekte Brennstoffe, so dass der Wert von  $98 \text{ g/kWh}$  dann zu gering angesetzt ist.

## Ergebnisse

Der  $\text{CO}_2$ -Emissionsfaktor für einen Holzofen mit Ofenführerschein ergibt sich im Modell zu  $60,2 \text{ g/kWh}$  und liegt damit um 39% niedriger als ohne Ofenführerschein. Daraus wird ersichtlich, dass insbesondere für alle Bestandsanlagen ohne zusätzliche Technik bereits

[1] Hartmann, Ingo; Kummrow, Max (2023), "Modelling GHG Reduction through Emission Reduction at Log Wood Stoves", Mendeley Data, V1, doi: 10.17632/ygt84rzkbj.1, <https://data.mendeley.com/datasets/ygt84rzkbj/1> (letzter Zugriff 17.07.2023)

## Literatur

durch die richtige Betriebsweise eines Holzofens Treibhausgaseinsparungen um ca. 40% realistisch erscheinen, wenn alle Ofenbesitzenden dazu verpflichtet werden würden, einen Ofenführerschein zu machen.

Diese Minderungsgrade sind jedoch keinesfalls ausreichend, so dass zusätzliche Technik in Form von Verbrennungsluftregelung, Katalysator und Staubabscheider in Bestandsanlagen nachzurüsten und in Neuanlagen zu integrieren sind.

Beispielsweise ließen sich durch die Verwendung eines Staubabscheiders in Kombination mit dem Ofenführerschein die  $\text{BC}$ -Emissionen erheblich um 95% mindern.

Damit läge der  $\text{CO}_2$ -Emissionsfaktor für einen Holzofen mit Ofenführerschein und Abscheider bei  $34,3 \text{ g/kWh}$  und liegt damit um 65% niedriger als ohne Ofenführerschein und Abscheider heutiger Anlagen. Die Kombination aus Ofenführerschein und Abscheider ist wieder vor allem für alle Bestandsanlagen von großem Interesse, da zugelassene Abscheider an Bestandsanlagen nachgerüstet werden können.

Gerade für Neuanlagen aber auch teilweise für Bestandsanlagen durch Nachrüstung mit entsprechender nachträglicher Typzulassung ist es sinnvoll, zusätzlich brennraumintegrierte Katalysatoren einzusetzen, um die Abgaskomponenten für  $\text{CO}$  und  $\text{CH}_4$  sowie andere Kohlenwasserstoffe erheblich weiter zu mindern. Da Methan im Vergleich zu anderen Kohlenwasserstoffen an den aktuell marktüblichen Katalysatoren nur schwer oxidierbar ist, steigt der angenommene  $\text{CH}_4$ -Anteil bei Öfen mit brennraumintegrierten Katalysatoren auf 75%. Der Katalysator kann dagegen die  $\text{CO}$ -Minderung auf 80% steigern und zusätzlich die Staubbminderung auf 98% erhöhen.

Damit läge der  $\text{CO}_2$ -Emissionsfaktor für einen Holzofen mit Ofenführerschein, Abscheider und integriertem Katalysator bei  $29,6 \text{ g/kWh}$  und liegt damit um 70% niedriger als ohne Ofenführerschein, Abscheider und Katalysator der heutigen Anlagen ohne jegliche Emissionsminderung. Die Kombination aus Ofenführerschein, Abscheider und Katalysator sowie Verbrennungsluftregelung an Stückholzöfen ist 2030 als gesetzlich verpflichtend zu empfehlen. Das ist nicht nur durch die zwingend zu erreichende Emissionsminderung an diesen Anlagen zu begründen, sondern zeigt sich auch durch den Vergleich mit einer Luft-Wärmepumpe, die in 2030 vermutlich hauptsächlich mit erneuerbarem Strom betrieben wird und damit weniger als 80% der heutigen  $\text{CO}_2$ -Emissionen einer Luft-Wärmepumpe aufweist ( $\text{EFCO}_2\text{LuftWP 2030} = 31 \text{ g/kWh}$ ). Die  $\text{THG}$ -Emissionen aus dem Holzofen in 2030 wären dann vergleichbar zur Wärmepumpe, lägen also in einem akzeptablen Bereich, um die Holzfeuerung im Bedarfsfall (z.B. kein ausreichend verfügbarer erneuerbarer Strom für den Wärmepumpenbetrieb) betreiben zu können. Die kompletten Daten wurden unter Referenz 1 publiziert.

Prof. Dr. Ingo Hartmann<sup>1</sup> (Hauptautor:in),  
Max Kummrow<sup>2</sup>

Ingo.Hartmann@dbfz.de  
max@ofenakademie.de

<sup>1</sup> DBFZ Deutsches Biomasseforschungs-  
zentrum gemeinnützige GmbH  
Torgauer Straße 116, 04347 Leipzig

<sup>2</sup> Smart Forward Minds GmbH  
Kättkenstraße 10, 33790 Halle Westfalen

**ProPhaSep**

Eike Janesch, Jens Zosel, Rodrigo Renato Retamal Marín, Anja Lemoine, Pierre Haider, Peter Neubauer, Michael Mertig, Stefan Junne

## Flexibilisierung der Substratnutzung und Biogasproduktion durch Phasenseparation mit Gelöst-Wasserstoffmessung

**FKZ-Nr. 03EI5409:**  
Flexibilisierung der Biogasproduktion durch Prozessphasenseparation und Dünnschlammrezirkulation

Um das volle Potenzial des Biogasprozesses bezüglich einer flexibleren Betriebsweise sowohl hinsichtlich des Substrateinsatzes als auch der Energiebereitstellung nutzen zu können, werden Alternativen in der Prozessführung und -überwachung untersucht. Dazu wurde eine zweistufige Prozessführung angewendet: eine hydrolytische/acidogene sowie eine methanogene Phase [1]. Um die hydrogenotrophe Methanogenese nutzen zu können, muss der in der ersten Phase produzierte Wasserstoff in der zweiten, methanogenen Phase in die Zellsuspension eingetragen werden. Zusätzlich kann dieser zweiten Phase extern erzeugter Wasserstoff zugeführt werden. Hierbei gilt es jeweils, Wasserstoffmangel zu verhindern und den notwendigen Leistungseintrag zur Einbringung so gering wie möglich zu halten. Bisher fehlte es allerdings an technischen Möglichkeiten zur Messung des Gelöst-Wasserstoffs, um die methanogene Phase entsprechend den mikrobiellen Anforderungen zu überwachen.

### Aktivitäten und Maßnahmen

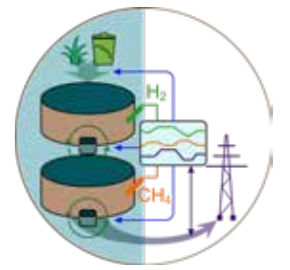
Im Projekt »ProPhaSep« wurde daher ein zweistufiges Reaktorsystem im Labormaßstab konfiguriert, um die Phasen der Hydrolyse und Acidogenese von der methanogenen Phase zu trennen. Dies ermöglicht eine in einem gewissen Bereich regelbare Methanproduktion. Um die Robustheit des Systems gegenüber schwankenden Einsatzstoffen, z.B. biogenen Reststoffen, zu erhöhen, wurde in jedem Fermenter eine Dünnschlammrezirkulation zur Stabilisierung der mikrobiellen Konsortien eingesetzt. In der ersten Stufe wurden die Bedingungen zugunsten der säureproduzierenden Bakterien und im zweiten Fermenter zugunsten der methanogenen Archaeen eingestellt. Es wurde zudem ein neuartiger Sensor zur Quantifizierung von gelöstem Wasserstoff in der Flüssigphase in beiden Prozessstufen eingesetzt. Dieser besteht aus einer membranlosen Extraktionskammer und einem Metalloxidsensor.

### Ergebnisse

Die säurebildenden Mikroorganismen produzierten in der ersten Phase bis zu 10 g/L kurzkettige Carboxylsäuren bei Einsatz von Maissilage und Stallstroh als Substrat (50/50 m/m-%). Die Carboxylsäuren wurden anschließend in der zweiten Stufe vollständig in Biogas (300 mL/gCOD) mit einem Methananteil von bis zu 65% umgewandelt. Die maximale Fluktuation (min./max. Werte) des produzierten Methans betrug dabei ausgehend vom Mittelwert  $\pm 20\%$ , d.h. die Methanproduktion konnte so innerhalb eines Tages um bis zu 40% gesteigert oder gedrosselt werden.

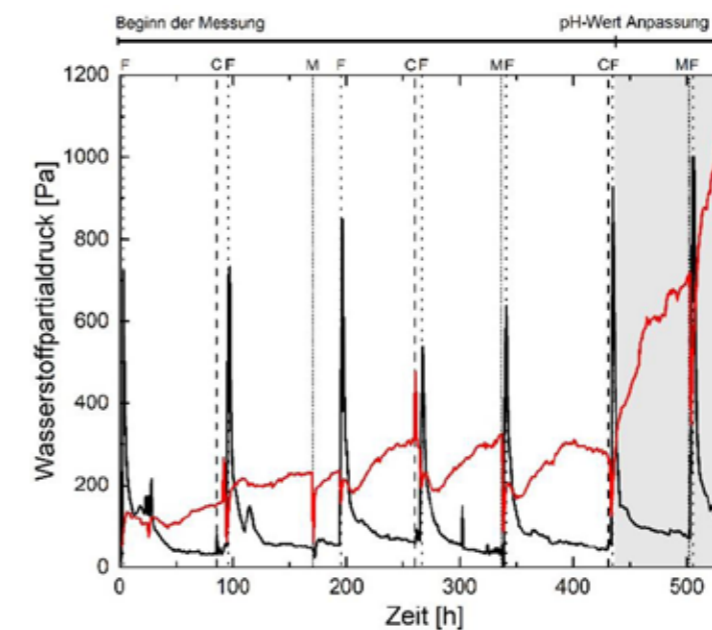
Das neue Messsystem zur Quantifizierung von gelöstem Wasserstoff wurde parallel in der hydrolytischen/acidogenen als auch in der methanogenen Phase eingesetzt. Dabei konnte der Anstieg der Gelöst-Wasserstoffkonzentration jeweils innerhalb einer Zeit von ca. 1h nach Zugabe detektiert werden, während die Zugabedynamik in der Gasphase erst detektierbar wurde, als die Mikroorganismen den einmal zugegebenen Wasserstoff bereits verbraucht hatten. Die Sättigungskonzentration (hier: Partialdruck) zur Erzielung der halbmaximalen Aufnahmegeschwindigkeit von gelöstem Wasserstoff liegt bei hydrogenotrophen Archaeen zwischen 0,005 und 19 Pa. Es kann davon ausgegangen werden, dass ausreichende volumetrische Umsatzraten bei Kulturen mit einem Sättigungspartialdruck

am oberen Ende dieser Spanne erreicht werden. Tatsächlich zeigte sich in der methanogenen Phase, dass bereits in der Nähe des angenommenen Sättigungspartialdruckes eine weitere Verstoffwechslung kaum noch stattfindet (Abb. 1). Gleichzeitig wurde jeweils (mit zeitlichen Verzug) ein Anstieg des Wasserstoffpartialdrucks im Kopfraum gemessen, wenn zuvor ein Anstieg auf über 200 Pa in der Zellsuspension der methanogenen Stufe zu beobachten war. In der hydrolytischen/acidogenen Stufe konnten zudem Bedingungen identifiziert werden, die zu einem guten Austrag des Wasserstoffs aus der Gasphase sowie zu einer Anreicherung von Wasserstoff-emittierenden Mikroorganismen führte (Abb. 1 – Phase der pH-Wert Anpassung). Die gute Langzeitstabilität des Sensors ist auch in der regelmäßigen in situ Kalibrierung der Sensoren mit Kalibriergas und einer automatischen Spülung der Extraktionskammer zur Vermeidung eines Biofilms begründet. Insgesamt konnte so ein System entwickelt werden, dass trotz dynamischer Fahrweise eine für anaerobe Gärprozesse übliche Prozessstabilität und Kontrollierbarkeit aufweist.



### Weitere Informationen

<https://www.energetische-biomassennutzung.de/projekte-partner/details/project/show/Project/ProPhaSep-639>



**Abbildung 1:** Veränderung der Wärmebilanz bei konstantem Temperaturprofil im Faulbehälter sowie bei einem Betrieb zwischen 35 °C und 45 °C [2].

[1] Janesch, E.; Pereira, J.; Neubauer, P.; Junne, S. (2021): Phase Separation in Anaerobic Digestion: A Potential for Easier Process Combination?. In: Front. Chem. Eng. (3). URL: <https://doi.org/10.3389/fceng.2021.711971>

### Literatur

Eike Janesch<sup>1</sup> (Hauptautor:in), Dr. Jens Zosel<sup>2</sup> (Hauptautor:in), Rodrigo Renato Retamal Marín<sup>2</sup>, Dr.-Ing. Anja Lemoine<sup>3</sup>, Pierre Haider<sup>3</sup>, Prof. Dr. Peter Neubauer<sup>1</sup>, Prof. Dr. Michael Mertig<sup>2,4</sup>, Prof. Dr.-Ing. Stefan Junne<sup>1,5</sup>  
<sup>1</sup> TU Berlin, FG Bioverfahrenstechnik, Institut für Biotechnologie, Ackerstraße 76 ACK24, 13355 Berlin  
<sup>2</sup> Kurt-Schwabe-Institut Meinsberg e.V., Kurt-Schwabe Straße 4, D-04736 Waldheim  
<sup>3</sup> FWE GmbH, Wölsauer Straße 20, 95615 Marktredwitz  
<sup>4</sup> Technische Universität Dresden, Professur für Physikalische Chemie, Mess- und Sensortechnik, 01062 Dresden  
<sup>5</sup> Aalborg University Esbjerg, Dept. of Chemistry and Bioscience, Niels Bohrs Vej 8, DK-6700 Esbjerg

### Keywords

Biogas, Zweistufige anaerobe Gärung, Gelöst-Wasserstoffmessung, Methanogenese, Flexibilisierung



**PyroGasII**

Andreas Ewald, Philipp Zugliani, Sebastian Fendt, Hartmut Spliethoff

**Techno-ökonomischer Vergleich von Verfahren zur thermischen Verwertung von Klärschlamm**

**FKZ-Nr. 03E15457:**  
**Dezentrale Verwertung von Klärschlamm mittels Pyrolyse und anschließender Flugstromvergasung zur gasmotorischen Nutzung**

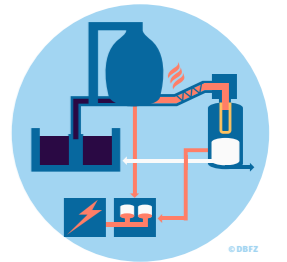
Die Verwertungswege von Klärschlamm unterliegen in Deutschland einem Wandel. Mit der Novelle der Klärschlammverordnung im Jahr 2017 (AbfKlärV) gibt der rechtliche Rahmen besondere Anreize für eine thermische Monoverwertung, da die landwirtschaftliche Verwertung zunehmen erschwert und gleichzeitig die Rückgewinnung von Phosphor vorgesehen wird. Bei der großtechnischen, thermischen Monoverwertung stellt die stationäre Wirbelschichttechnologie den dominierenden Anteil an umgesetzten Anlagen. Alternative Konversionstechnologien haben bisher keine breite Anwendung gefunden. [1]

Im Verbundvorhaben PyroGasII wird ein Konzept zur dezentralen, thermischen Verwertung von Klärschlamm untersucht. Die Prozesskette soll die Strom- und Wärmeerzeugung aus Klärschlamm am Standort der Abwasserbehandlungsanlage ermöglichen. Hierzu wird die atmosphärische Flugstromvergasung mit einem Blockheizkraftwerk (BHKW) kombiniert. Damit kann der Klärschlamm zunächst in ein brennbares Gas umgesetzt werden und anschließend in dem Gasmotor des BHKWs verbrannt werden. Im Gegensatz zum verbreiteten Verwertungspfad mit stationärer Wirbelschichttechnologie entfällt der Transport des Klärschlammes und die damit einhergehenden Kosten. Gleichzeitig sprechen Skalierungseffekte gegen eine dezentrale Umsetzung von thermischen Verwertungsanlagen.

Ein techno-ökonomischer Vergleich stellt die Verwertungskosten der stationären Wirbelschichttechnologie und der dezentralen Flugstromtechnologie gegenüber. Zunächst wird mittels der Prozesssimulationssoftware AspenPlus ein Modell erstellt, welches die grundlegenden Eingangsgrößen für die Betrachtung liefert. Die Bewertung der Wirtschaftlichkeit erfolgt angelehnt an die VDI-Richtlinie 2067 - Grundlagen der Wirtschaftlichkeit und Kostenberechnung. Für jeden Fall werden die gleichen Grundannahmen getroffen, sodass eine möglichst aussagekräftige Vergleichbarkeit erreicht wird.

Ergänzend: Mit dem Verbundvorhaben VerKlär<sup>2</sup> (FKZ-Nr. 03E15428) wird im selben Förderprogramm ein weiteres Verwertungskonzept für eine energieautarke und ressourcenschonende Abwasserbehandlungsanlage untersucht. Auch hier ist eine dezentrale, integrierte Klärschlamm- und Klärgasverwertung Teil des Konzeptes. Im Gegensatz zu PyroGasII wird die thermische Verwertung des Klärschlammes mittels dezentraler Wirbelfeuerung ohne Bettmaterial umgesetzt. Hieraus ergibt sich besonderes Potential für eine Wärmeintegration im Verwertungsprozess. VerKlär<sup>2</sup> wird nach den oben genannten Methoden als weiterer Ansatz in die Betrachtung miteinbezogen. Die bisherigen Untersuchungen zu VerKlär<sup>2</sup> basieren auf öffentlich zugänglichen Informationen. Die Betreuenden des Vorhabens sind allerdings informiert, sodass optional eine Vertiefung der Arbeiten bis zur Statuskonferenz erfolgen kann.

Im Ergebnis der Betrachtung wird die zentrale, stationäre Wirbelschichtfeuerung aus ökonomischer und ökologischer Sicht als am wenigsten sinnvoll eingestuft. Laut Berechnung fallen die höchsten spezifischen Verwertungskosten an. Auch im Sinne einer energetischen Integration stellt sie die schlechteste Option dar. Die dezentrale, integrierte Klärschlamm- und Klärgasverwertung nach dem Vorhaben VerKlär<sup>2</sup> ist aus ökonomischer und

**Effiziente Klärschlammverwertung**

ökologischer Sicht sinnvoll. Laut Berechnung liegen die spezifischen Verwertungskosten bei 66,9% des gängigen Ansatzes. VerKlär<sup>2</sup> ist bezüglich der energetischen Integration gut zu bewerten und zudem prozesstechnisch vergleichsweise wenig komplex. Die dezentrale Verwertung von Klärschlamm mittels Flugstromvergasung nach dem Vorhaben PyroGasII ist aus ökonomischer und ökologischer Sicht ebenfalls sinnvoll. Laut Berechnung liegen die spezifischen Verwertungskosten bei 72,4% des gängigen Ansatzes. Bei PyroGasII ist bezüglich der energetischen Integration eine gesteigerte Stromerzeugung herauszustellen. Das Konzept ist prozesstechnisch komplex, sodass kapitalgebundene Kosten besonders ins Gewicht fallen.

Der zu entwickelnde Konferenzbeitrag liefert die konkrete Herangehensweise zur Bewertung der Konzepte und geht im Detail auf die resultierenden Beträge ein.

**Weitere Informationen**

<https://www.epe.ed.tum.de/es>

[1] Brandt, S.; Bannick, C.-G.; Bernicke, M.; Dienemann, C.; Gast, M.; Hofmeier, M.; Kabbe, C.; Schwirn, K.; Vogel, I.; Völker, D.; Wiechmann, B. (2018): Klärschlamm Entsorgung in der Bundesrepublik Deutschland. Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau. Online: [https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/376/publikationen/2018\\_10\\_08\\_uba\\_fb\\_klaerschlamm\\_bf\\_low.pdf](https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/376/publikationen/2018_10_08_uba_fb_klaerschlamm_bf_low.pdf) (letzter Zugriff 12.07.2023)

**Literatur****Keywords**

Biogene Reststoffe, thermochemische Umwandlung, Hydrierung zu Kraftstoffen

Andreas Ewald (Hauptautor:in),  
 Philipp Zugliani, Dr.-Ing. Sebastian Fendt,  
 Prof. Dr.-Ing. Hartmut Spliethoff

[andreas.ewald@tum.de](mailto:andreas.ewald@tum.de)

Technische Universität München,  
 Lehrstuhl für Energiesysteme  
 Boltzmannstr. 15, 85748 Garching,  
 92237 Sulzbach-Rosenberg

**FLXsynErgy**

Christian Hubert, Bettina Steiniger, Christian Schaum, Jörg Kretzschmar, Stefan Einsiedel, Konstantinos Athanasiadis, Jens Henker, Markus Heinrich

## Flexible und vollenergetische Nutzung biogener Rest- und Abfallstoffe: Faulungen und Biogasanlagen als Energieverbraucher, -speicher und -erzeuger

**FKZ-Nr. 03EI5420:**  
Flexible und vollenergetische Nutzung biogener Rest- und Abfallstoffe: Faulungen und Biogasanlagen als Energieverbraucher, -speicher und -erzeuger

Im Fokus des Projekts FLXsynErgy steht die vollenergetische Nutzung (Strom und Wärme) von Klärschlämmen sowie biogenen Rest- und Abfallstoffen. Des Weiteren wird die Nutzung der Faulung als Wärmespeicher näher betrachtet. Somit kann die Kläranlage als Energiespeicher und flexibler Energieverbraucher sowie -erzeuger einen wichtigen Beitrag zur Energiewende leisten. Wenngleich, verfahrenstechnisch betrachtet, landwirtschaftliche/abfallwirtschaftliche Biogasanlagen und Faulungen auf Kläranlagen sehr ähnlich sind, fehlt bislang fast vollständig ein Wissenstransfer zwischen den Fachgebieten. Dieser interdisziplinäre Austausch wird ebenfalls im Projekt initiiert. Zudem verfolgt FLXsynErgy den Ansatz spätere rechtliche sowie umwelt- und sozioethische Konfliktpotentiale bereits während der technischen Entwicklungsphase zu identifizieren, um durch diesen ganzheitlichen Ansatz die Akzeptanz zu erhöhen und die Implementierung zu erleichtern.

### Aktivitäten und Maßnahmen

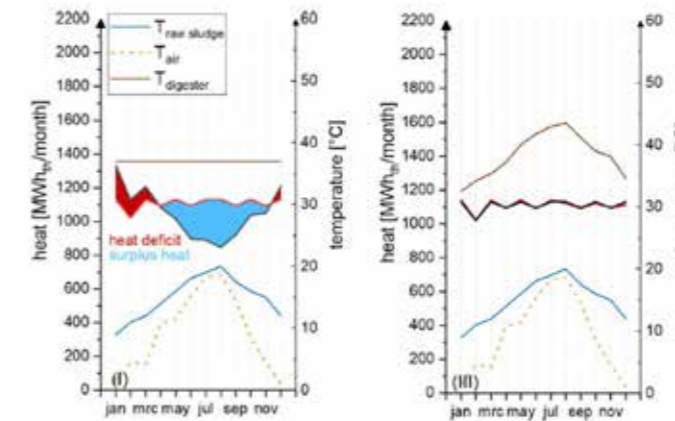
Im Rahmen von FLXsynErgy wurden verschiedene Versuchsreihen im halbtechnischen Versuchsmaßstab durchgeführt. Hierfür kamen Faulbehälter mit einem Volumen zwischen 20 L und 30 L zum Einsatz. Mit den Faulbehältern wurden u. a. unterschiedliche Temperaturprofile untersucht, sowie eine diskontinuierliche, auf eine bedarfsgerechte Faulgaserzeugung ausgerichtete, Substratzugabe. Bei den Untersuchungen wurde das Augenmerk auf Betriebsstabilität, Gasertrag sowie Einfluss auf die Entwässerbarkeit des ausgefaulten Schlammes gelegt. Ergänzt wurden die halbtechnischen Versuche durch Auswertung von Daten aus der Großtechnik, auf deren Grundlage Auswirkungen bestimmter Betriebsweisen auf den Gasspeicher modelliert wurden. Anhand einer Modellkläranlage wurden zudem Wärmebilanzen erstellt. Biogasanlagen und Faulungsanlagen auf Kläranlagen weisen gewisse Unterschiede auf [1]. Um den Wissenstransfer zwischen Biogasanlagen und Kläranlagen zu bewerkstelligen, wurden verschiedene Workshops durchgeführt. Zudem wurden Workshops zur Identifikation von Hindernissen bei der Umsetzung eines flexiblen Betriebes der Kläranlage durchgeführt.

### Ergebnisse

Die Versuchsreihen zeigten hinsichtlich der Wärmespeicherung in Faulgasanlagen, dass vor allem die Rate der Temperaturveränderung pro Tag eine wichtige Rolle im Betrieb der Faulungen im flexiblen Betrieb darstellen. Bei einer täglichen Rate von < 1 K in einem Temperaturbereich zwischen 33 und 55 °C konnte keine wesentliche Verschlechterung der Prozesse im Faulraum festgestellt werden. Diese Rate wird nach Auswertung großtechnischer Anlagen nicht erreicht. Anhand von Wärmebilanzen, welche auf Grundlage der Versuchsreihen erstellt wurden, wird anhand einer Modellanlage der Mehrwert der Einbindung der Faulung als saisonaler Wärmespeicher aufgezeigt (vgl. Abbildung 1). An der Modellanlage konnte für die Faulung im Temperaturbereich von 33 bis 44 °C eine theoretische Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emissionen um 55,5% berechnet werden. Ein Betrieb zwischen 37 und 42 °C zeigte ebenfalls bereits Einsparpotentiale von CO<sub>2</sub>-Emissionen [2]. Hinsichtlich der diskontinuierlichen Zugabe von Substrat wurden im Rahmen einer Versuchsreihe verschiedene Beschickungsintervalle bei moderater Raumbelastung

**Keywords**

Flexibilität, Energie, Faulungsanlagen



**Abbildung 1:**  
Veränderung der Wärmebilanz bei konstantem Temperaturprofil im Faulbehälter sowie bei einem Betrieb zwischen 35 °C und 45 °C [2].

untersucht. Es wurden nur leichte Unterschiede der Methangaserträge beobachtet. Alle Betriebsweisen wiesen, bezogen auf die organischen Säuren, stabile Werte auf. Allerdings war mit steigender Diskontinuität der Substratzugabe bei moderater Raumbelastung sowohl bei der Untersuchung mittels Filterpresse (Reduktion des TR um 2%) als auch bei der Erfassung der kapillaren Fließzeit (Reduktion um bis zu 25%) eine Verschlechterung der Entwässerungseigenschaften zu erkennen. Dieser Verschlechterung muss in der späteren Bewertung der flexibilisierten Faulgaserzeugung Rechnung getragen werden [3]. Die Auswertung großtechnischer Daten zeigte, dass eine flexibilisierte Faulgaserzeugung möglich ist. Hohe Stoßbeschickungen werden bei Co-Substraten mit hoher chemischer Energiedichte bereits in der Praxis realisiert. Lediglich die Organisation der Zugabe erfolgt nicht zielorientiert, sondern vielmehr in Abhängigkeit des Substratanfalls. Dies kann im Hinblick auf eine Beteiligung am Day-Ahead-Markt optimiert werden. Der Einfluss einer Beteiligung am Regenergiemarkt auf den Gasspeicher ist weniger ausgeprägt, sodass die bedarfsorientierte Zugabe von Substrat somit von geringerer Bedeutung ist. Die Umsetzung neuer Ideen ist häufig mit Problemen verbunden, deren Ursache nicht auf technische Mittel zurückzuführen ist. Bei der Einführung neuer Technologien und Managementsystemen stoßen oftmals verschiedene Interessen betroffener Akteure aufeinander. Dies wird im Rahmen von FLXsynErgy Rechnung getragen. In mehreren Workshops wurden Hindernisse und Schwierigkeiten mit zahlreichen Akteuren adressiert. Zusätzlich hat die HfPh eine Diskussionsplattform eingerichtet auf der Interessierte und Akteure sich an den Diskussionen beteiligen können.

- [1] Bettina Steiniger, Johannes Blattenberger, Christian Hubert (Neubiberg), Jörg Kretzschmar (Leipzig), Stefan Einsiedel (München), Markus Heinrich (Hamm), Konstantinos Athanasiadis (Weyarn) und Christian Schaum (Neubiberg). (2022), Digesters as Heat Storage – Energetic Assessment of Flexible Flexibilisierung von Faulungs- und Biogasanlagen – Identifikation von Gemeinsamkeiten und Unterschieden. (Korrespondenz Abwasser, Abfall). doi: 10.3242/kae2022.10.005
- [2] Steiniger, B., Hubert, C. and Schaum, C. (2022), Digesters as Heat Storage – Energetic Assessment of Flexible Variation of Digester Temperature. Chem. Eng. Technol., 45: 144-151. <https://doi.org/10.1002/ceat.202100240>.
- [3] Hubert, Christian; Steiniger, Bettina; Schaum, Christian. Demand-driven gas production using co-substrates from the dairy industry. Residuals and Biosolids 2023: Full Conference Proceedings of the Water Environment Federation. 2023.

**Literatur**

Christian Hubert<sup>1</sup>, Bettina Steiniger<sup>1</sup>, Christian Schaum<sup>1</sup>, Jörg Kretzschmar<sup>2</sup>, Stefan Einsiedel<sup>3</sup>, Konstantinos Athanasiadis<sup>4</sup>, Jens Henker<sup>4</sup>, Markus Heinrich<sup>5</sup>  
christian.schaum@unibw.de

<sup>2</sup> DBFZ Deutsches Biomassenforschungszentrum gemeinnützige GmbH  
<sup>3</sup> Hochschule für Philosophie München  
<sup>4</sup> Dr.-Ing. Steinte Ingenieurgesellschaft für Abwassertechnik mbH  
<sup>5</sup> Wolter Hoppenberg Rechtsanwälte Partnerschaft mbB

**ProKlär-mission**

Kirsten Stark, Matthias Schnell, Johannes Lukas

## Lachgasemissionen bei der thermischen Klärschlammbehandlung – Entstehungsmechanismen und primäre Minderungsmaßnahmen

**FKZ-Nr. 03EI5460:**  
Prozessoptimierung an Klärschlammfeuerungen zur Rohstoffrückgewinnung und Emissionsreduktion

Lachgas ( $N_2O$ ) ist ein hochpotentes Klimagas, dessen Treibhausgaspotenzial um den Faktor 298 höher ist als das von Kohlenstoffdioxid ( $CO_2$ ) [1]. Ca. 6% des globalen Treibhaus-effekts sind auf  $N_2O$ -Emissionen zurückzuführen [2]. Im Zuge der kommenden Novellierung der 17. BImSchV (siehe EU-Durchführungsbeschluss C (2019) 7987) wird daher ein verpflichtendes Monitoring für  $N_2O$  in Abfallverbrennungsanlagen mit Wirbelschichtofen sowie bei Verwendung von Systemen zur Stickoxidreduktion ohne Katalysator (Selektive nichtkatalytische Reduktion, SNCR) mit Harnstoff vorgeschrieben [3]. Die Einführung eines  $N_2O$ -Grenzwertes wird zukünftig erwartet.

Die Bildung von  $N_2O$  in Verbrennungsprozessen ist maßgeblich von Stickstoffgehalt und -bindungsform des Einsatzstoffes, der Sauerstoffkonzentration im Rauchgas und der Verbrennungstemperatur abhängig. Eine Erhöhung der Verbrennungstemperatur im Ofenkopf von 842 auf 895 °C führte in einer Klärschlammverbrennungsanlage mit stationärer Wirbelschichttechnik zu einer Absenkung der  $N_2O$  Emissionen von 350 auf 30  $mg/m^3_{i.N.}$  [4]. Gleichzeitig geht eine höhere Verbrennungstemperatur mit der vermehrten Entstehung von Stickoxiden ( $NO_x$ ) einher. Daher muss für die Minderung von  $N_2O$ -Emissionen ein optimaler Temperaturbereich unter besonderer Berücksichtigung weiterer Schadstoffe ( $NO_x$  und Kohlenstoffmonoxid (CO)) identifiziert werden. Aufgrund der niedrigen Erweichungstemperaturen von Klärschlammverbrennungsaschen werden Klärschlammfeuerungen am unteren Ende des möglichen Temperaturbereichs von (750) 850-950 °C betrieben, um Verschlackungen und Agglomerationen zu vermeiden. Mit einem Stickstoffgehalt von ca. 4-9%, bezogen auf den wasser- und aschefreien Zustand, ist Klärschlamm zudem ein besonders stickstoffreicher Brennstoff (zum Vergleich Steinkohle: 1-2%) [5].

Durch die Novelle der Klärschlammverordnung wird die thermische Klärschlammbehandlung in Deutschland zukünftig signifikant an Bedeutung gewinnen. Die Phosphorrückgewinnungspflicht und der damit einhergehende Wegfall von Mitverbrennungskapazitäten führt zu einem erhöhten Bedarf an Klärschlamm-Monoverbrennungskapazitäten. Derzeit befinden sich ca. 40 Projekte für Neuanlagen in Planung, Vorbereitung oder bereits im Bau. Der überwiegende Teil der Anlagen wird als stationäre Wirbelschicht ausgeführt [6]. Aus der Verlagerung von der Mit- zur Monoverbrennung resultiert ein Anstieg der zu erwartenden  $N_2O$ -Emissionen. Daher ist die Klärschlammverbrennung eine besonders relevante Quelle für  $N_2O$ -Emissionen, die es aufgrund der steigenden Kapazitäten zu mindern gilt.

**Lösungsansatz**

Im Projekt ProKlär-mission untersuchen das Lehr- und Forschungsgebiet Technologie der Energierohstoffe der RWTH Aachen, der Lehrstuhl für Energieverfahrenstechnik der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg sowie die Hatch Küttner GmbH mögliche Minderungsmaßnahmen für  $N_2O$ -Emissionen bei der thermischen Klärschlammbehandlung. Assoziierte Partner sind der Eigenbetrieb Stadtentwässerung Stuttgart, die Thermische Verwertung Mainz GmbH und das Gemeinschaftsklärwerk Bitterfeld-Wolfen GmbH. Innerhalb des Projekts erfolgt die Entwicklung und Erprobung eines Agglomerationswächters für Wirbelschichtfeuerungen zur thermischen Klärschlammbehandlung. Mit Hilfe des Agglomerationswächters werden kontinuierlich hochfrequente Messungen des

Drucks im Wirbelbett durchgeführt, in ein Leistungsdichtespektrum überführt und die charakteristische Frequenz bestimmt. Die charakteristische Frequenz reagiert sensitiv auf eine Veränderung des Fluidisierungszustandes im Wirbelbett und ermöglicht so eine Agglomerationsfrüherkennung. Dadurch soll mittels kontinuierlicher Überwachung des Agglomerationszustandes eine Erhöhung des sicher einstellbaren Temperaturbereichs in der Klärschlammverbrennung ermöglicht werden, um Lachgasemissionen absenken zu können.

Zusätzlich soll mithilfe des Einsatzes von Additiven bei der Klärschlammverbrennung eine Erhöhung der Ascheschmelztemperaturen erreicht werden. Durch die Additivzugabe kann zudem eine gezielte Verbesserung der Aschequalität erfolgen (Abscheidung von Schwermetallen aus der Verbrennungsasche, Erhöhung der Pflanzenverfügbarkeit des enthaltenen Phosphors). Ziel des Projekts ist die Ermittlung eines Temperaturoptimums zur Verminderung klimaschädlicher  $N_2O$ -Emissionen und vollständigen Zerstörung organischer Schadstoffe (POP) unter Berücksichtigung der Zielgrößen  $NO_x$  und CO bei gleichzeitiger Verbesserung der Aschequalität, mit dem Ziel der Phosphorrückgewinnung.

**Ergebnisse**

In ersten Voruntersuchungen konnte ein Einfluss der Additivzugabe auf die Ascheschmelztemperatur im Labormaßstab gezeigt werden. Dabei zeigte sich ein Einfluss der Klärschlammzusammensetzung auf die Wirksamkeit der unterschiedlichen Additive, sodass bei Einsatz des gleichen Additivs mit unterschiedlichen Klärschlämmen abweichende Effekte auftreten können. Ziel der weiteren Laboruntersuchungen ist ein möglichst weitreichender Einblick in die Wirksamkeit von Additiven bei der Klärschlammverbrennung bei unterschiedlicher Klärschlammzusammensetzung.

- [1] IPCC, 2013: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535 pp.
- [2] Svoboda, K., Baxter, D., Martinec, J.: Nitrous oxide emissions from waste incineration. Chemical Papers 2006;60(1).
- [3] Durchführungsbeschluss (EU) 2019/2010 der Kommission vom 12. November 2019 über Schlussfolgerungen zu den besten verfügbaren Techniken (BVT) gemäß der Richtlinie 2010/75/ EU des Europäischen Parlaments und des Rates in Bezug auf die Abfallverbrennung.
- [4] Stöcklein, F., Tebert, C., Töfge, K.: Evaluation und Minderung klimarelevanter Gase aus Abfallverbrennungsanlagen; 2018.
- [5] Fernandez Gutierrez, M. J., Baxter, D., Hunter, C., Svoboda, K.: Nitrous oxide ( $N_2O$ ) emissions from waste and biomass to energy plants. Waste management & research the journal of the International Solid Wastes and Public Cleansing Association, ISWA 2005;23(2):133-47
- [6] Stark, K., Allwicher, I., Schnell, M., Peters, E., Montag, D., Quicker, P.: Status Quo der thermischen Klärschlammbehandlung und Phosphorrückgewinnung in Deutschland. In: Holm, O. et al. (Hrsg.): Verwertung von Klärschlamm, Band 5. Nietwerder: Thomé-Kozmiensky Verlag GmbH; 2022, S. 8-24.

**Literatur****Keywords**Klärschlamm,  
Klärschlammverbrennung,  
Emissionsminderung, Lachgas,  
Phosphor-RecyclingKirsten Stark<sup>1</sup> (Hauptautor:in),  
Matthias Schnell<sup>1</sup>, Johannes Lukas<sup>2</sup>

stark@teer.rwth-aachen.de

<sup>1</sup> RWTH Aachen University, Lehr- und  
Forschungsgebiet Technologie der  
Energierohstoffe (TEER),  
Wüllnerstr. 2, 52062 Aachen<sup>2</sup> Friedrich-Alexander-Universität  
Erlangen Nürnberg, Lehrstuhl für  
Energieverfahrenstechnik  
Fürther Straße 244f, 90429 Nürnberg

Niels Dögnitz, Sebastian Dietrich, Stephanie Hauschild, Jörg Kretzschmar

## Wasserstoff aus Biomasse - Stand der Technik und Entwicklungsperspektiven



### Keywords

Biowasserstoff, thermochemisch, biotechnologisch, biobasiert, Bereitstellungskonzepte

### Hintergrund oder Ziel

Die Möglichkeiten zur Erzeugung von Wasserstoff aus Biomasse sind vielfältig. Derzeit werden in Deutschland ca. 57TWh Wasserstoff produziert, der fast ausschließlich in der chemischen Industrie oder in Raffinerien eingesetzt wird. Ziel der Nationalen Wasserstoffstrategie (NWS) ist es, bis zum Jahr 2030 einen Gesamtwasserstoffbedarf von 90 bis 110TWh zu decken, wovon ca. 14TWh in Deutschland erzeugt werden sollen. Im Konzert der Optionen für Wasserstoff aus erneuerbaren Energien setzt die NWS einen klaren Schwerpunkt auf grünen Wasserstoff aus Elektrolyse. Der Bezug zur Biomasse wird am Rande über die Einbindung von Wasserstoff für fortschrittliche Biokraftstoffe bzw. über biobasierte Prozesse adressiert. Die Europäische Wasserstoffstrategie hingegen bezieht auch Biomasse als Ressource für erneuerbaren Wasserstoff mit ein. Die zugrundeliegende Kurzstudie [1] diente der Bestandsaufnahme von Wasserstoff aus Biomasse im deutschen Kontext, wobei explizit auf den Teil der Studie eingegangen werden soll, der die ausgewählten technischen Aspekte vergleichend gegenüberstellt.

### Aktivitäten und Maßnahmen

Als Ergebnis der Literaturrecherche zur Bereitstellung von Wasserstoff aus Biomasse wurden für die thermochemischen und biotechnologischen Verfahren ausführliche Technologiesteckbriefe erstellt.

Im Rahmen dieser Steckbriefe wurde jeweils anhand recherchierter Daten (und Ereignisse) der technologische Entwicklungsstand bewertet und anhand der Skala des Technology Readiness Level (TRL) eingeordnet.

In den Technologiesteckbriefen wird ein besonderes Augenmerk auf die Möglichkeiten der Nach- oder Umrüstung (engl.: Retrofitting) von technischen Anlagen gelegt, da diese Optionen darstellen bestehende Verfahrenstechnik und Infrastruktur für einen neuen (Teil-) Prozess oder zur Herstellung eines neuen (Neben-)Produkts anzupassen und zu nutzen.

### Ergebnisse

Die in den Technologiesteckbriefen ([1], Kap. 2) ausführlich behandelten thermochemischen und biotechnologischen Verfahren sind in Abbildung 1 gegenübergestellt.

Im Vergleich haben die thermochemischen Verfahren derzeit noch einen deutlichen Entwicklungsvorsprung gegenüber den biotechnologischen Verfahren. Dies ist insbesondere auf die Erfahrungen bei der Verarbeitung fossiler Rohstoffe und auf die in der Regel höheren Wasserstoffbildungsraten zurückzuführen. Eine Kommerzialisierung der thermochemischen Verfahren steht jedoch noch aus. Auf Basis des technischen Entwicklungsstandes könnte eine biobasierte Wasserstoffbereitstellung kurz- bis mittelfristig insbesondere über die Reformierung methanreicher Gase realisiert werden. Aber auch der Methanplasmalyse werden zum Teil vielversprechende Entwicklungsperspektiven prognostiziert. Verfahrensunabhängig werden Ansätze zur Bereitstellung von biobasiertem Wasserstoff vor allem im dezentralen Kontext diskutiert und demonstriert - hier finden sich Projekte zur kommunalen Wasserstoffnutzung und modulare Systeme zur lokalen Erzeugung von Biowasserstoff. Aber auch die regionalen Anwendungsfelder für Wasserstoff sind vielfältig und erfordern eine genaue Analyse der lokalen Gegebenheiten und Bedarfe – eine

technologieoffene Bewertung ist hier entscheidend. Mit Blick auf die Nutzung von reinem Biowasserstoff sind auch in der Prognose bis 2030 vor allem regionale Bereitstellungs- und Nutzungskonzepte als Technologietreiber zu erwarten.

Technologie	TRL	Anwendung	Akteure
Methan- Biogas-	8	Mittraffination in Erdgasreformierung denkbar	HydroGIn, WS Reformer GmbH
(Dampf)- Reformierung	6-8	Dezentrale Nachrüstung an BG-Anlagen denkbar, nach Gasreinigung als Reinwasserstoff einsetzbar	BIX energy GmbH, BioROBURplus, WS Reformer GmbH
Methanplasmalyse	6-8	Dezentrale Nachrüstung an BG-Anlagen denkbar, keine prozessbedingten CO <sub>2</sub> -Emissionen, nach Gasreinigung als Reinwasserstoff einsetzbar	Gratorce GmbH, HIROC Ltd., TUM, Monolith Materials
Methanpyrolyse	3-4		Konsortien um KIT, BASF und NTNU, Hazer Group Ltd., C-Zero
Thermochemische	5-7	Flexibel in der Wahl der Einsatzstoffe, nach Gasreinigung als Reinwasserstoff einsetzbar	KIT, Concord Blue Energy GmbH, Japan Blue Energy/Ways2Hy, Holzner Druckbehälter GmbH, BIX energy GmbH
Hydrothermale	4-5	Verwendung feuchter bis nasser Biomasse, dezentrale Lösungen anzustreben, hoher Produktgasdruck verringert Gasaufbereitungsaufwand	KIT, SCW Systems, TreaTech SARI/PSI
Dunkelfermentation	4-5	Dezentrale Nachrüstung an BG-Anlagen denkbar, wenig Störstoffe im Produktgas, nach Gasreinigung als Reinwasserstoff einsetzbar	Fraunhofer IFF
Biophotolyse	3-4	Kopplung mit Dunkelfermentation denkbar, Anwendungsbereiche noch nicht absehbar	UFZ
Mikrobielle Elektrolyse	3-4	Nutzung von org. Substanzen aus Abwasserströmen denkbar, geringerer Energiebedarf als herkömmliche Elektrolyse	Universität Bremen
Dunkel-Photosynthese	2-3	Potential für Spezialanwendungen ohne produktionsseitige Beluchtungsnotwendigkeit	Universität Stuttgart

Forschung

Demonstration

Kommerzialisierung

1234567891011

Abbildung 1: Vergleichende Gegenüberstellung von Verfahren zur Biowasserstoffproduktion (TRL nach IEA bis 11 entnommen [1], Abb. 4)

### Weitere Informationen

Die vollständige Kurzstudie zu Wasserstoff aus Biomasse mit den zitierten Technologiesteckbriefen, einem Screening der Ressourcen, Bewertung der Nachhaltigkeitsindikatoren, regulatorischen Randbedingungen, Marktbedingungen und Nutzungsperspektiven sowie einer vergleichenden Einordnung zu grünem Wasserstoff und ausgewählten Bioenergieanwendungen ist hier verfügbar: <https://www.dbfz.de/pressemediathek/publikationsreihen-des-dbfz/dbfz-reports/dbfz-report-nr-46>

### Literatur

[1] Dögnitz, N.; Hauschild, S.; Cyffka, K.F.; Meisel, K.; Dietrich, S.; Müller-Langer, F.; Majer, S.; Kretzschmar, J.; Schmidt, C.; Reinholz, T.; Gramann, J. (2022): Wasserstoff aus Biomasse (DBFZ-Report 46). Leipzig: DBFZ. 148 S. ISBN: 978-3-946629-88-7. DOI: 10.48480/b4wn-c154

Niels Dögnitz (Hauptautor:in),  
Sebastian Dietrich, Stephanie Hauschild,  
Jörg Kretzschmar  
niels.doegnitz@dbfz.de

DBFZ Deutsches Biomasseforschungs-  
zentrum gemeinnützige GmbH  
Torgauer Str. 116, 04347 Leipzig

## RhoTech

Caroline Autenrieth, Robin Ghosh

## »Wasserstoff aus der Saftfabrik« - Nutzung von Frucht- und Gemüsetrester zur großskaligen Biowasserstoffproduktion mit Purpurbakterien

FKZ-Nr. 03E15407:  
Neue Strategie zur Wasserstoff-Produktion aus Frucht- und Molkerei-Abfällen mit Hilfe von Purpurbakterien

Im Zuge der Energiewende wird eine große Hoffnung auf Grünen Wasserstoff gesetzt, der einen wichtigen Beitrag zur Sektorkopplung leisten kann. Allerdings wird Grüner Wasserstoff bislang hauptsächlich mittels Elektrolyse mit Strom aus erneuerbaren Energiequellen (z.B. Wind, Sonne, Wasser, Biogas..) hergestellt, was den Strommarkt (neben dem Bedarf für Elektromobilität und Wärmepumpen) noch zusätzlich belastet. Auch die Idee, Wasserstoff im großen Maßstab aus (meist im Süden gelegenen) Ländern, die viel grünen Strom zur Verfügung haben, zu importieren, birgt Probleme in sich. Somit ist die Nutzung heimischer Ressourcen zur Biowasserstoffherzeugung ein wichtiger Schritt zur Stabilisierung unserer Energiesicherheit. Mit Hilfe mikrobieller Prozesse kann aus biogenen Rest- und Abfallstoffen vergleichsweise energiesparend Biowasserstoff erzeugt werden. Hervorzuheben sind dabei photosynthetische Mikroorganismen, die, aufgrund ihrer Fähigkeit, ein ausgedehntes System innerer Membranen auszubilden, in dem üblicherweise die photosynthetischen Redoxreaktionen stattfinden, perfekte Kandidaten für die Produktion von Wasserstoff sind: die für die Übertragung von Elektronen auf Protonen benötigten Enzyme und Redoxcarrier werden im photosynthetischen Wachstumsmodus überproduziert und finden in den (ebenfalls überproduzierten) Membranen genügend Platz. Allerdings ist dieser große Vorteil der photosynthetischen Mikroorganismen auch ihr größter Nachteil: die Notwendigkeit von Licht erschwert ein Upscaling in den industriellen Maßstab, da eine effiziente Beleuchtung großer Kulturen kaum erreichbar ist (Licht dringt nur ca. 5cm tief in hochgewachsene Kulturen ein). Somit konnten Ansätze zur photosynthetischen Biowasserstoffherzeugung bislang, unseres Wissens nach, nie den Sprung von der Labor-Skala in die Groß-Skala vollziehen.

## Keywords

Biowasserstoff,  
Purpurbakterien,  
*Rhodospirillum rubrum*,  
»Dunkelphotosynthese«,  
Frucht- u. Gemüsetrester

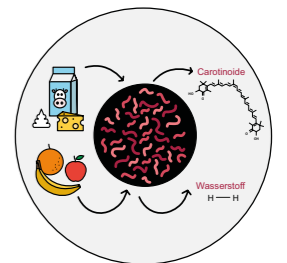
Für diese Problematik haben wir in unserem RhoTech-Projekt einen Ausweg gefunden: das photosynthetische Purpurbakterium *Rhodospirillum rubrum* kann, mit Hilfe eines speziellen Nährmediums (M2SF, [1]), das als Haupt-C- und Redox-Quelle Fruktose enthält, »ausgetrickst« werden, so dass es - auch im Dunkeln - den photosynthetischen Stoffwechselmodus, einschließlich der Enzyme für die Wasserstoffproduktion einschaltet – ein Prozess, den wir, etwas Augenzwinkernd, »Dunkel-Photosynthese« nennen. Die eingesetzte Energie ist die chemische Energie aus der Fruktose, und das »Licht-Signal« ist der durch die Verstoffwechslung der Fruktose erzeugte über-reduzierte Redoxzustand in den Membranen (der üblicherweise nur mit hoher Lichteinstrahlung erreicht wird). Da der Prozess in herkömmlichen Bioreaktoren stattfinden kann, ist einem Upscaling somit keine Grenzen gesetzt.

## Literatur

- [1] Ghosh, R.; Hardmeyer, A.; Thoenen, I.; Bachofen, R. (1994): Optimization of Sistro medium for the semi-aerobic growth of *Rhodospirillum rubrum* with the maximal yield of photosynthetic membranes. In: Appl. Environ. Microbiol., 60, pp. 1698-1700.  
[2] Autenrieth, C.; Shaw, S.; Ghosh, R. (2021): New approach for the construction and calibration of gas-tight setups for biohydrogen production at the small laboratory scale. In: Metabolites, 11, p. 667.

## Biobasierter Wasserstoff

Die Fruktose als Hauptsubstrat des »Dunkel-Photosynthese«-Nährmediums kann in großen Mengen aus biogenen Rest- und Abfallstoffen gewonnen werden. Hierbei sind vor allem Frucht-Abfälle aus der Saft- und Wein-Produktion ein hervorragender Rohstoff. Aber auch Lactat-haltige Abfälle aus der Milchverarbeitung können Verwendung für den »Dunkel-Photosynthese«-Wasserstoffproduktionsprozess finden.



## Aktivitäten und Maßnahmen

Im Projekt wird im Rahmen eines interdisziplinären Konsortiums sowohl an der Optimierung der Wasserstoffproduktion mittels »Dunkel-Photosynthese« durch *R. rubrum* als auch an der Etablierung am Markt gearbeitet. Die Arbeitsgruppe an der Universität Stuttgart (Prof. Dr. R. Ghosh, Dr. C. Autenrieth) untersucht die Physiologie von *R. rubrum* während der »Dunkel-Photosynthese« [2], arbeitet an Stammoptimierung mittels molekularbiologischer Methoden, untersucht das Substratspektrum und koordiniert das Konsortium. An der Hochschule Biberach (Prof. Dr. H. Grammel) wird der Prozess verfahrenstechnisch optimiert und Prozessparameter ermittelt. Das Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung IPA (Prof. Dr. A. Sauer, MSc. J. Full) schätzt das verwertbare Biomasseaufkommen und das damit einhergehende Bioenergiepotenzial für Biowasserstoff aus Frucht- und Molkerei-Abfällen ab und ermittelt potenzielle Produktionstopologien und verschiedene Nutzungsszenarien. Unser KMU-Partner KE-Technologie GmbH (Stuttgart) untersucht die Möglichkeit, die Wasserstoffproduktion mittels niedrigenergie-LED-Beleuchtung (die nicht zur Photosynthese sondern nur als zusätzlicher »Signalgeber« verwendet wird) zu erhöhen und unterstützt uns beim Bau eines für den Prozess optimierten Bioreaktors.

## Ergebnisse

Im Rahmen des RhoTech Projekts haben wir die wesentlichen Schritte zu einem tieferen Verständnis des »Dunkel-Photosynthese«-Prozesses und zur Überführung des Prozesses in den industriellen Maßstab vollzogen. In den letzten Monaten haben wir uns besonders dem übergeordneten Ziel - der Verwendung biogener Rest- und Abfallstoffe - verschrieben und Wachstums-Versuche mit Extrakten aus Karotten-, Rote Beete und Äpfel-Trester aus einem lokalen Saftbetrieb (der pro Jahr ca. 700 Tonnen (!) Trester teuer entsorgen muss) durchgeführt. Dabei haben wir einige unerwartete (positive) Überraschungen erlebt, insbesondere, dass die Zellausbeute deutlich über dem aus der Fruktose-Konzentration erwarteten Wert lag. Auf der Statuskonferenz werden diese Ergebnisse präsentiert werden.

Dr. Caroline Autenrieth (Hauptautor:in),  
Prof. Dr. Robin Ghosh

caroline.autenrieth@bio.uni-stuttgart.de

Universität Stuttgart, Institut für  
Biomaterialien und biomolekulare Systeme,  
Abteilung Bioenergetik  
Pfaffenwaldring 57, 70569 Stuttgart

## HyTech

Juliana Rolf, Sören Kamphus, Eike Meemann, Elmar Brüggling

## Biologische Wasserstoffherzeugung für eine nachhaltige Energiewirtschaft Entwicklung und Anwendung der dunklen Fermentation zur Wasserstoffherzeugung

**FKZ-Nr. 03EI5419:**  
**Biologische Wasserstoffherzeugung für eine nachhaltige Energiewirtschaft: Entwicklung und Anwendung der dunklen Fermentation zur Wasserstoffherzeugung**

Im Forschungsprojekt HyTech wurde die dunkle Fermentation (DF) mit Hilfe innovativer Reaktordesigns untersucht, um die Gesamteffizienz der biologischen Wasserstoffproduktion durch Rückhaltung von Mikroorganismen zu erhöhen. Hierfür werden biogene Rest- und Abwasserströme genutzt. Dadurch kann das Verfahren die zukünftige Versorgungssicherheit im Bereich des Wasserstoffs unterstützen und ist dabei unabhängig von schwankenden erneuerbaren Energien. Darüber hinaus können bisher ungenutzte Biomassepotenziale, wie z.B. stark belastete Abwässer und Reststoffströme vor allem aus der Lebensmittelindustrie, für die Energiegewinnung genutzt werden.

Das Verfahren ist als 2-stufiges Konzept ausgelegt. Die räumliche Trennung des Biogasprozesses in zwei Stufen ermöglicht die biologische Produktion von Wasserstoff in der ersten Stufe (Wasserstoffreaktor) und in der nachgeschalteten zweiten Stufe (Methanreaktor) die anschließende Produktion von Methan. Bei der DF werden hauptsächlich Wasserstoff ( $H_2$ ), Kohlendioxid ( $CO_2$ ) und organische Säuren durch anaerobe Fermentation erzeugt. Im Rahmen des Projekts wurden zwei verschiedene Reaktorkonzepte für die erste Stufe des Prozesses getestet, darunter ein Festbettreaktor (FBR) und ein kontinuierlicher Rührkesselreaktor (CSTR). Beide Reaktoren wurden mit Mikroorganismenrückhaltung betrieben. Dadurch wurden die Mikroorganismen in den Reaktoren aufkonzentriert. Dies führt zu einem effizienteren Betrieb und höheren Substratdurchsätzen. Ziel ist es, die Wasserstoffausbeute und die Substratabbauraten zu erhöhen. Das zweistufige Verfahren eignet sich für die Behandlung industrieller Abwasserströme und sorgt für eine Reduzierung der organischen Belastung des Abwassers um bis zu 90 % und erzeugt gleichzeitig Biowasserstoff und Biogas am Entstehungsort des Abwassers.

Zunächst wurden verschiedene Abwasserproben in einem 1 Liter-Batchversuch auf ihr Biowasserstoffpotential untersucht. Das Batch-Verfahren der einstufigen DF ist eine Methode, mit der Abwässer und organische Abfälle bewertet werden können, angelehnt an die VDI 4630. In Abbildung 1 wird der Aufbau der Batchversuche dargestellt. Im Batch-Test wurde eine Abwasserprobe aus einer Brauerei als geeignet identifiziert. In der Versuchsreihe erreichte die Probe eine Wasserstoffausbeute von  $123 l_N/kg_{FM}$  bei einer Wasserstoffkonzentration von 43 %.

Nach der Bestimmung des Wasserstoffpotentials wurden vielversprechende Proben in einer zweistufigen Versuchsanlage bei unterschiedlichen hydraulischen Verweilzeiten (HRT) (36-9 h) für die erste Stufe ( $V=10 l$ ) eingesetzt. Die zweite Stufe hat ein Volumen von 30 l. In den kontinuierlichen Versuchsreihen wurde reales sowie künstliches Abwasser getestet. Die Teilergebnisse und der Aufbau einer Anlage werden in der nachfolgenden Abbildung 2 dargestellt.

Das Projektkonsortium, bestehend aus der FH Münster und den Firmen EMCEL GmbH und BlueMethano GmbH, verfolgt im Forschungsprojekt HyTech folgende Ziele: (I) Verbesserung der Prozessstabilität und Prozesseffizienz durch innovative Reaktordesigns; (II) Erweiterung des nutzbaren Spektrums an Reststoffen für die dunkle Fermentation; (III) Darstellung der Verwendungsmöglichkeiten des erzeugten Biowasserstoffs; (IV) Bewertung

## Keywords

Biowasserstoff, energetische Verwertung, Abwasser- und Reststoffströme, dunkle Fermentation, Abwasseraufbereitung

## Biobasierter Wasserstoff

der Wirtschaftlichkeit des Verfahrens; (V) Entwicklung neuer Gasesstechnik für Biowasserstoff. Im Projekt konnte so die biologische Wasserstoffherzeugung erfolgreich im halbertechnischen und kontinuierlichen Maßstab dargestellt werden.

## Weitere Informationen

[https://www.fh-muenster.de/egu/downloads/personen/wetter/Digitale\\_Broschue\\_2023.pdf](https://www.fh-muenster.de/egu/downloads/personen/wetter/Digitale_Broschue_2023.pdf)

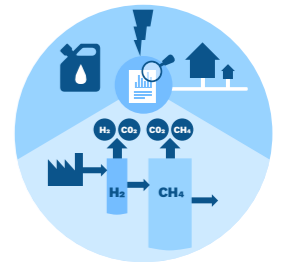


Abbildung 1:  
Batchversuche

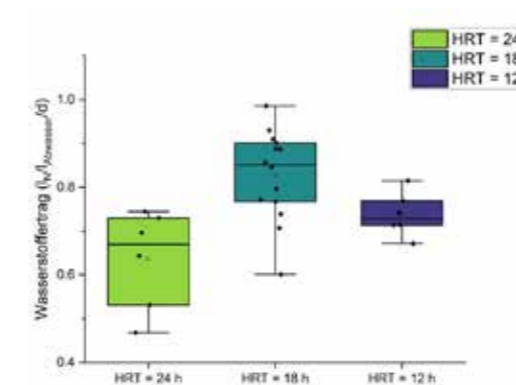


Abbildung 2:  
Ergebnisse und konti-Anlage

Juliana Rolf (Hauptautor:in),  
 Sören Kamphus, Eike Meemann,  
 Prof. Dr.-Ing. Elmar Brüggling  
 juliana.rolf@fh-muenster.de

FH Münster, Fachbereich Energie  
 Gebäude Umwelt  
 Stegerwaldstraße 39, 48565 Steinfurt

## BiDroGen

Andreas Molle, Andy Gradel

## Wasserstoff aus pelletierter Industriestholz- verwertung – Prognosen zum Prozess und Stand der Umsetzung

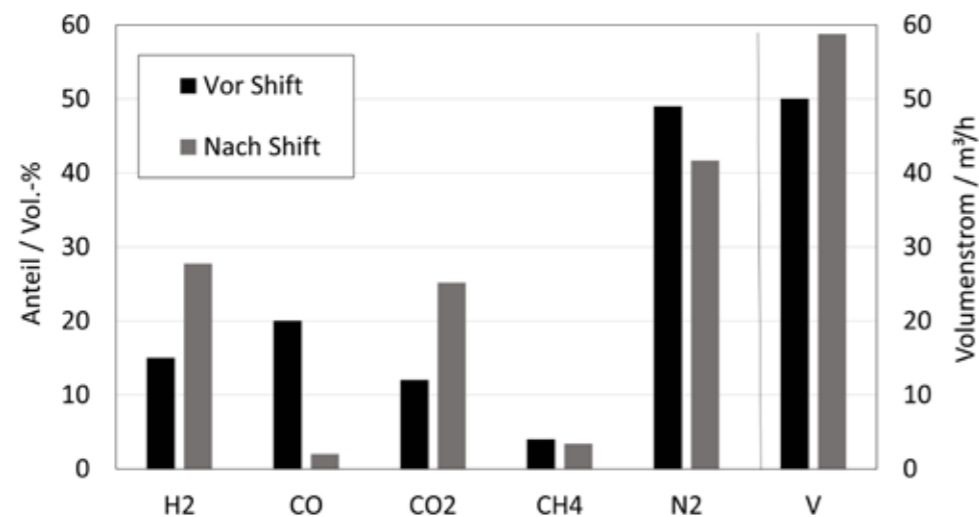
**FKZ-Nr. 03EI5438:**  
Wirtschaftliche, dezentrale und mobile Herstellung von Grünem Wasserstoff aus dem Unterkorn (< 20 mm) von der pelletierten Industriestholzverwertung in einer Containerlösung

Die Grundlage des Projektes ist zum einen die bestehende Vergasertechnologie der BtX, die nachgewiesenermaßen ein sehr sauberes Produktgas produziert sowie die Technologie der Ferro-Hy-Tunnel (FHT) –Wasserstoff-Separation zur Abscheidung von reinem Wasserstoff aus Mischgasen, die bereits im Labor erprobt aber noch nicht auf einen technischen Maßstab skaliert wurde.

Der vorgeschlagene Beitrag behandelt den aktuellen Fortschritt der Forschung und Entwicklung am Teilziel der BtX energy GmbH. Dieses ist, den Wasserstoffgehalt in üblichem Holzgas zu maximieren, die nötige Gasreinheit für die folgenden Prozesse zu garantieren und die Abspaltung aus dem Produktgasstrom zu ermöglichen, um wirtschaftlich hochreinen Wasserstoff aus pelletiertem Restholz gewinnen zu können. Je nach Gasqualität kann dann aus 12 – 15 kg Holz ein Kilogramm reiner Wasserstoff gewonnen werden. Ein Wassergas-Shift-Reaktor zur Aufrüstung von Holzgasanlagen, der den speziellen Anforderungen dieser Anwendung entspricht ist heute noch nicht auf dem Markt verfügbar und wurde daher im ersten Projektjahr entwickelt.

Hierfür wurden zunächst Modelle auf Basis des chemischen Gleichgewichts sowie kinetische Modelle der Wassergas-Shift-Reaktion in Holzgas erstellt und anschließend für die Entwicklung eines modularen Reaktors eingesetzt. Abbildung 1 zeigt die Gaszusammensetzung vor und nach WGS, die aus üblichen Holzgasen damit generiert werden kann.

Abbildung 1:  
Mögliche Gaskonversion in einem Wassergas-Shift Reaktor für übliche Holzgase



### Keywords

Wasserstoff,  
Biomassevergasung, Holzgas,  
Wassergas-Shift-Reaktion,  
Bio-to-X

Ein Prototypenreaktor wurde zu Beginn des Jahres in Betrieb genommen und seitdem im laufenden Versuchsbetrieb stetig optimiert. Abbildung 2 zeigt den Reaktor im eingebauten Zustand. Zum Stand der Beitragseinreichung hat der Reaktor unter Volllast einen Wirkungsgrad von über 40 % von Restholz zu Wasserstoff erreicht, weitere Optimierungsmaßnahmen versprechen eine weitere Steigerung.

## Biobasierter Wasserstoff



Abbildung 2:  
Prototypenreaktor am Holzvergaser der BtX energy GmbH

Präsentiert werden im vorgeschlagenen Beitrag die Herausforderungen der speziellen Anwendung, der bisherige Stand der Forschung und Entwicklung und die bis zur Statuskonferenz erreichten Ziele. Zusammengefasst umfasst der vorgeschlagene Beitrag:

- Teilziel (BtX energy): Entwicklung einer wasserstoffreichen Gasproduktion aus Restholz
- Maßnahme: Erprobung der chemischen Nachnutzung des Holzgases aus bestehender Anlagentechnologie zur Biomassevergasung in einer Wassergas-Shift-Stufe
- Maßnahme: Maximierung des Wirkungsgrades der Wasserstoffproduktion bzw. der Wasserstoffausbeute aus der bestehenden Anlagentechnologie zur Biomassevergasung
- Ergebnisse: Zusammensetzung und energetische Bilanzen von Edukt- und Produktströmen sowie bisher erreichter Wirkungsgrad, Ausblick für das Gesamtprojekt



### Weitere Informationen

[www.btx-energy.de](http://www.btx-energy.de)

M. eng. Andreas Molle<sup>1</sup> (Hauptautor:in),  
Dr.-Ing. Andy Gradel<sup>1,2</sup>

[andreas.molle@btx-energy.de](mailto:andreas.molle@btx-energy.de)

<sup>1</sup> BtX energy GmbH  
Albert-Einstein-Straße 1, 95028 Hof

<sup>2</sup> Hochschule Hof, Institut für  
Wasserstoff- und Energietechnik  
Alfons-Goppel-Platz 1, 95028 Hof

**iNIROB**

Bernhard Gatternig, Paul Gehrig, Tobias Müller, Thomas Plankenbühler, Dominik Müller

## Optimiertes Brennstoffmanagement und intelligenter Betrieb moderner Biomasseheizkraftwerke

**FKZ-Nr. 03EI5443:**  
**Optimiertes Brennstoffmanagement und intelligenter Betrieb moderner Biomasseheizkraftwerke**

Ziel dieses Projekts ist es, zeitgemäße, effiziente und alltagstaugliche Strategien für das Brennstoffmanagement und die flexible Betriebsführung von Biomasseheizkraftwerken zu entwickeln und demonstrieren. Der innovative technologische Ansatz, um dieses Ziel zu erreichen, ist die Entwicklung verbesserter und intelligenter Sensorik in enger Kopplung mit einer adaptiven Prozessführung, um zusammen die ganze Prozesskette am Standort abzudecken. Dadurch können das eingesetzte Brennstoffband erweitert, Emissionen gesenkt und die allgemeine Anlageneffizienz gesteigert werden.

Ziel ist die Entwicklung und Erprobung von Maßnahmen, die eine autonome Bestimmung der aktuellen und zukünftig erwarteten Brennstoffqualität ermöglichen, insbesondere in Bezug auf den Wassergehalt, der den volumetrischen Heizwert maßgeblich bestimmt. Diese Messungen sollen nicht nur punktuell, sondern im Sinne eines ganzheitlichen Ansatzes sowohl in Bezug auf die Lagerhaltung und -organisation, als auch mit Rücksicht auf die Brennstoffaufgabe zur Feuerung und den Umsatz in einer Brennkammer durchführen.

Das dritte Ziel ist die Ableitung von flexiblen Betriebs- und Regelungsstrategien, die an den Brennstoff, dessen Qualität und den aktuell bzw. kurzfristig erwarteten Lastbedarf angepasst sind.

**Keywords**

Biomassefeuerung,  
KWK Mess-/Steuerungs-/  
Regelungstechnik  
Minderung THG

**Maßnahmen:****Hochschule Weihenstephan-Triesdorf:**

- Optische Messung der Brennstofffeuchte von Biomasse
- Entwicklung eines sensorbasierten Systems für optimiertes Brennstoffmanagements
- Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen und Skalierung

**Stadtwerk Tauberfranken:**

- Begleitung aller technischen Maßnahmen an der eigenen Biomasseanlage
- Bewertung der erzielbaren Optimierungsansätze

**prosio engineering GmbH:**

- Optimierung der Regelung eines Biomasseheizkraftwerks
- Entwicklung modellgestützte Anlagenregelung auf Basis von Informationen über genutzten Brennstoff
- Technische Bewertung der Optimierungsmaßnahmen

Prof. Dr.-Ing. Bernhard Gatternig<sup>1</sup>  
(hauptautor:in), Paul Gehrig<sup>2</sup>, Tobias Müller<sup>2</sup>,  
Dr.-Ing. Thomas Plankenbühler<sup>3</sup>,  
Dr.-Ing. Dominik Müller<sup>3</sup>

bernhard.gatternig@hswt.de

<sup>1</sup> Hochschule Weihenstephan-Triesdorf  
Am Hofgarten 4, 85354 Freising  
<sup>2</sup> Stadtwerk Tauberfranken  
Max-Planck-Straße 5, 97980 Bad Mergentheim  
<sup>3</sup> prosio engineering GmbH  
Bergstraße 6, 91207 Lauf an der Pegnitz



## Emissionsminderung bei Biomassefeuerungen

**Schwerpunkte:****Hochschule Weihenstephan-Triesdorf:**

- Projektkoordination
- Entwicklung von Analysemethoden
- Optimierung von Brennstofflogistik und Brennstoffhandling

**Stadtwerk Tauberfranken:**

- Brennstoffanalysen
- Durchführung von Optimierungsmaßnahmen
- Praktische Bewertung der Optimierungsmaßnahmen

**prosio engineering GmbH:**

- Modellierung und Simulation
- Anlagenintegration der Optimierungsmaßnahmen





## VEMS

Mohammad Aleya, Marc-René Simon

## Intelligentes Verbrennungs- und Energiemanagementsystem (VEMS)

In Deutschland ist der Energiesektor mit etwa 50% aller klimarelevanten Treibhausgasen der mit Abstand größte Emissionsfaktor im Land. Private Haushalte verursachen dabei etwa 27 % dieser Emissionen, wodurch dieser Bereich genauso wichtig ist wie Industrie und Verkehr. Im Gebiet der Wärmeproduktion gilt die Biomasse als der wichtigste Energieträger der erneuerbaren Energien. Bei der Bereitstellung von Warmwasser für Raumwärme und Trinkwasser besteht dabei mit Abstand der häufigste Einsatz. Durch die steigende Anzahl an Solarthermieanlagen, die Kombination eines Biomasseheizkessels mit sekundären Wärmeversorgern ist in den letzten Jahren immer zahlreicher geworden. Um die Konkurrenzfähigkeit von Biomasse zu gewährleisten, müssen neue und bestehende Technologien stetig weiterentwickelt werden.

Im Rahmen des Forschungsprojekts wurde am Fraunhofer-Institut für Bauphysik (IBP) in den vergangenen zwei Jahren eine neue Regelungstechnologie für Biomasseheizkessel entwickelt und erprobt. Das Verbrennungs- und Energiemanagementsystem (VEMS) kombiniert die Regelung des Verbrennungsprozesses und der Energieproduktion zusammen mit der Energiebereitstellung in einem einzelnen Managementsystem, um eine zeitlich, örtlich, zielgerichtete und effiziente Nutzung der Energie zu gewährleisten, die Zwischenspeicherung von Wärme zu verringern und damit einhergehende Verluste zu minimieren. Die Software der VEMS-Technologie wurden adaptiv und grundlegend auf Basis einer speicherprogrammierbaren Steuerung (SPS) entwickelt, sodass ein möglichst breites Spektrum unterschiedlicher Gebäude und Heizkessel zum Einsatz kommen kann. Zudem wurde die zusätzliche Wärmebereitstellung einer Solarthermieanlage im System berücksichtigt und integriert, sodass im System eine kombinierte Wärmebereitstellung aus zwei unterschiedlichen Wärmeversorgern ebenfalls berücksichtigt werden kann. Nach dem Aufbau und der Inbetriebnahme der versuchstechnischen Einrichtung, wurde während des Projekts die Entwicklung eines Modularwärmeregulators als Schnittstelle zwischen Energiemanagementsystem und Biomasseheizkessel abgeschlossen. Dabei wurden unterschiedliche technische Konzepte umgesetzt, um bereits bestehende Pufferspeicher effizienter zu gestalten. Nach der Optimierung der gesamten technischen Einrichtung wurden eine Vielzahl von Entwicklungsuntersuchungen sowie Emissionsmessungen und energietechnische Betrachtungen durchgeführt, um das entwickelte softwarebasierte System zu optimieren und eine maximale Effizienzsteigerung zu erzielen. Als Vergleichsbasis dienen zwei unterschiedliche Regelungen gemäß dem aktuellen Stand der Technik von Biomasseheizkesseln, wobei der Unterschied dieser Kesselinstallationen anhand des genutzten Energiemanagementsystems besteht. Für die Untersuchungen wurde eine Testumgebung mit gleichbleibenden Bedingungen simuliert, um eine Vergleichbarkeit zwischen allen

### Keywords

Energiemanagement  
Emissionen  
Wärme  
Technologie  
Heizen

### Literatur

ALEYSA, M., SIMON, M. (2023): Bedarfsgerechte Wärmeproduktion mit Biomasseheizkesseln: Teil 1: Funktionsweise und Versuchsgundlagen des VEMS. In: Verein Deutscher Ingenieure (VDI) (73) HLH 03, pp. 18-23.  
ALEYSA, M., SIMON, M. (2023): Bedarfsgerechte Wärmeproduktion mit Biomasseheizkesseln: Teil 2: Darstellung der simulierten Messergebnisse des VEMS. In: Verein Deutscher Ingenieure (VDI) (73) HLH 05, pp. 14-18.  
UMWELTBUNDESAMT (2023): Energieverbrauch nach Energieträgern und Sektoren.  
URL: [www.umweltbundesamt.de/daten/energie/energieverbrauch-nach-energetraegern-sektoren#entwicklung-des-endenergieverbrauchs-nach-sektoren-und-energetragern](http://www.umweltbundesamt.de/daten/energie/energieverbrauch-nach-energetraegern-sektoren#entwicklung-des-endenergieverbrauchs-nach-sektoren-und-energetragern) (Stand 29.05.2023).



## Emissionsminderung bei Biomassefeuerungen

Systemen zu gewährleisten. Hierzu wurden fünf repräsentative Heiztage anhand von Wetterdaten des Deutschen Wetterdienstes aus dem Jahr 2020 ausgewählt und mithilfe des Versuchsstandes simuliert, sodass alle drei Kesselinstallationen anhand der gleichbleibenden Parameter der Heiztage verglichen werden konnten.

Die Ergebnisse der abschließenden Entwicklungsuntersuchungen konnten zeigen, dass VEMS im Vergleich zu Kesselinstallationen vom Stand der Technik, welche bereits über ein entsprechendes Energiemanagementsystem verfügen, konkurrenzfähig ist und deutlich bessere Ergebnisse, hinsichtlich Brennstoffverbrauch und Emissionsbelastung, erzielt. So können nicht nur die bei der Verbrennung entstehenden Emissionen, sondern auch eine Vielzahl von brennbaren Abgasbestandteilen durch die verbesserte Taktung des Heizkessels deutlich reduziert werden. Die maßgebliche Einsparung von CO<sub>2</sub> resultiert dabei vor allem durch den deutlich gesenkten Brennstoffverbrauch während des Betriebs des Heizkessels. Durch die Entwicklung des VEMS konnte ein System entwickelt werden, welches sowohl prospektiv agieren kann als auch für den Einsatz von kombinierten Wärmeenergieerzeugern geeignet ist.

Die Umrüstung eines einzelnen Heizkessels könnte, basierend auf dem im Projekt genutzten Heizkessel mit einer Nennleistung von 45 kW und einer durchschnittlichen Heizperiode von 220 Tagen im Jahr, bereits Einsparungen von ca. 1,03 Tonnen Brennstoff und rund 1,9 Tonnen CO<sub>2</sub> erzielen. Weitet man diese Betrachtungsweise auf die in Deutschland verbauten Pelletkessel (insgesamt 283.924 Heizkessel mit einer durchschnittlichen Nennleistung von ca. 30 kW) aus, so könnten deutschlandweit im Vergleich zum Stand der Technik ca. 200.000 Tausend Tonnen an Holzpellets und ca. 0,37 Millionen Tonnen CO<sub>2</sub> gespart werden.

### Weitere Informationen:

<https://www.ibp.fraunhofer.de/de/kompetenzen/umwelt-hygiene-sensorik/verbrennungs-und-umweltschutztechnik.html>



Dr. Mohammad Aleya,  
Marc-René Simon B.Sc.

mohammadshayesh.aleyasa@ibp.fraunhofer.de  
marc-rene.simon@ibp.fraunhofer.de

Fraunhofer-Institut für Bauphysik IBP  
Nobelstr. 12, 70569 Stuttgart

Onno Cramer, Ingo Hartmann

## Einfluss vom Naturzugbetrieb auf das Emissionsverhalten von Stückholzfeuerstätten



### Keywords

Stückholzfeuerung,  
Normprüfung, Naturzug,  
Emissionsfaktor,  
Realemission

### Ziel

Bisherige Untersuchungen zum Emissionsverhalten von Stückholzfeuerungen fanden fast ausschließlich bei konstantem Förderdruck statt. Der Normförderdruck von i.d.R. 12 Pa wurde im Rahmen diverser Untersuchungen auch bei abweichenden Leistungen verwendet, welche im Betrieb am realen Schornstein jedoch zu einem der Leistung angepassten Förderdruck führen sollten.

Der Förderdruck variiert bei steigender Masse und höherem Wärmedurchgang des Schornsteins weniger stark. Der abnehmende Wärmeleistungsbedarf der Gebäude bei gleichzeitig steigenden Wirkungsgradanforderungen erfordern dagegen immer besser gedämmte und leichtere Abgassysteme, welche mit geringer werdender Phasenverschiebung und Amplitudendämpfung auf die jeweilige Feuerungsleistung reagieren müssen.

### Aktivitäten und Maßnahmen

Insbesondere in Hinblick auf die Emissionsfaktoren, mit deren Hilfe der Anteil am Emissionsinventar durch mit vornehmlich im Naturzug betriebenen Stückholzfeuerungen bestimmt wird, sind die Abgaszusammensetzungen im Naturzugbetrieb zu untersuchen. Das Ziel der durchgeführten Versuchsreihen war daher die Ermittlung der realitätsnahen Emissionen einer Stückholzfeuerung im Naturzugbetrieb bei unterschiedlichen Leistungen (Teillast und Nennwärmeleistung) und aktiven Höhen des Schornsteins im Vergleich zu den Emissionen unter Typprüfbedingungen bei Nennwärmeleistung und Teillast. Zudem wurden die unter der Prüfprozedur des Projektes »beReal« gewonnene Daten berücksichtigt, welche bisher zur Ermittlung der Realemission herangezogen werden.

### Ergebnisse: Welche Ergebnisse werden Sie auf der Statuskonferenz präsentieren?

#### (Was ist Ihre Erfolgsgeschichte? Was haben Sie gelernt?)

Grundsätzlich wurde die Frage untersucht, ob bzw. unter welchen Randbedingungen ein leistungsunabhängig konstanter Förderdruck tatsächlich als optimale Prüfbedingung angesehen werden kann. Zudem wurden die Emissionen, mit denen Stückholzfeuerungen in das Emissionsinventar eingehen, welche mit natürlichem Förderdruck ermittelt wurden, ins Verhältnis zu den Emissionen gesetzt, welche mit natürlichem Förderdruck ermittelt wurden.

Die Messungen bei natürlichem Förderdruck zeigen deutliche Abweichungen gegenüber den Emissionen, welche im Rahmen der Zulassungsprüfung bei konstantem Förderdruck ermittelt wurden. Dies gilt insbesondere für Ergebnisse bei Anwendung der »beReal«-Prüfmethode, welche zur Ermittlung von realitätsnäheren Emissionsfaktoren verwendet werden sollte.

Die im Naturzugbetrieb festgestellten CO-Emissionen sind im Rahmen der Normprüfung ohne Förderdruckanpassung im Teillastbetrieb ausschließlich im Betriebspunkt Nennwärmeleistung annähernd vergleichbar. Die im Vergleich zum konstanten Förderdruck wesentlich verringerten VOC-Emissionen können über die gültige Normprüfung allerdings nicht abgebildet werden.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass unabhängig von aktiver Höhe und geprüfter Leistung jede Einzelmessung im Naturzugbetrieb den Wert der Emission bei konstantem Förderdruck gemäß Typprüfung deutlich unterschritten hat. Die geringeren Emissionen im Vergleich zur Normprüfung können ausschließlich dem Betrieb im Naturzug zugeschrieben werden und lassen sich bei Betrieb mit konstantem Druck nicht ermitteln.

### Durchgeführte Vergleichsmessungen / Ergebnisvergleich:

Versuch	Emissionsfaktoren Norm / Real							
	[1]	[2]	[3]	[4]	[5]	[6]	[7]	[8]
Labor	LEDA	DBFZ	DBFZ	UBA	DBFZ	DBFZ	DBFZ	LIV
Prüfablauf	Norm	beReal	beReal	-	Norm	beReal	beReal	beReal
Förderdruck	12 Pa	12 Pa	12 Pa	-	12/8 Pa	Naturzug	Naturzug	Naturzug
Nachlegen	4% CO <sub>2</sub>	25% CO <sub>2</sub> max	3% CO <sub>2</sub>	-	4% CO <sub>2</sub>	Flamme aus	Flamme aus	Flamme aus
Schornstein	Norm	Norm	Norm	-	Norm	4/6 m	4/6 m	4/11 m
Luftventil	SLV	SLV	SLV	-	SLV	SLV	NLV	NLV
CO (NWL)	1,00	2,70	2,66	4,22	0,93	0,87	0,86	0,78
CO (TL)	1,51	2,97	13,43	-	0,89	0,54	0,66	0,59
VOC (NWL)	1,00	3,25	4,99	2,64	0,47	0,43	0,36	0,59
VOC (TL)	1,86	3,99	34,26	-	0,43	0,40	0,18	-

### Weitere Informationen

Adresse Ihrer Webseite: [www.leda.de](http://www.leda.de) / [www.dbfz.de](http://www.dbfz.de)

Bachmaier, H.; Mack, R.; Oehler, H.; Hartmann, H.; Reichert, G.; Stressler, H.; Sturmlechner, R.; Schmidl, C. (Be2020); Carlsson, S.; Rönnbäck, M.; Persson, H.; Jespersen, M. G.; Hinnerskov Jensen, J.; Wöhler, M.; Pelz, S. (2016): beReal: Advanced Testing Methods for Better Real Life Performance of Biomass Room Heating Appliances. TFZ, Straubing. Online: <https://cordis.europa.eu/docs/results/606/606605/final1-bereal-final-publishable-report.pdf> (Stand 02.06.2023).  
Kotzulla, M. (2023): German Informative Inventory Report 2023 (Section V 1.6 - Emission Situation). UBA, Dessau-Roßlitz. Online: <https://iir.umweltbundesamt.de/2023/> [German Informative Inventory Report] (Stand 02.06.2023).

### Literatur

Dipl.-Ing. (FH) Onno Cramer<sup>1</sup> (Hauptautor:in),  
Prof. Dr. rer. nat. Ingo Hartmann<sup>2</sup>.

[ocramer@www.leda.de](mailto:ocramer@www.leda.de)  
[ingo.hartmann@dbfz.de](mailto:ingo.hartmann@dbfz.de)

<sup>1</sup> LEDA Werk GmbH & Co. KG  
Groninger Straße 10, 26789 Leer  
<sup>2</sup> DBFZ Deutsches Biomasseforschungs-  
zentrum gemeinnützige GmbH  
Torgauer Str. 116, 04347 Leipzig

## Reststoff2Kraftstoff

Andreas Gollwitzer, Andreas Apfelbacher, Robert Daschner

## Thermochemische Umwandlung von Papierreststoff zu erneuerbaren Kraftstoff

**FKZ-Nr. 03EI5429:**  
**Energieeffiziente Reststoffverwertung zur Erzeugung neuartiger erneuerbarer Kraftstoffe**

Das Projekt „Reststoff2Kraftstoff“ untersucht die Herstellung von Kraftstoffen aus biogenen Abfallstoffen. Hier im vorliegenden Projekt dient Papierschlamm als Einsatzstoff. Das Konsortium von acht Partner aus Industrie und Wissenschaft wird den Einsatzmaterial aus der Papier- und Zellstoffindustrie zu CO<sub>2</sub>-neutralem Rohöl und weiter zu normgerechtem Benzin und Diesel verarbeiten. Diese werden dann an Motoren getestet.

Jährlich fallen in Deutschland circa vier Millionen Tonnen Faserreststoffe aus der Papier- und Zellstoffindustrie an. Die Entsorgung verursacht in der Branche Kosten von insgesamt 160 Millionen Euro pro Jahr. Mit der thermischen Verwertung dieser Abfälle werden außerdem 500 Kilogramm fossiles CO<sub>2</sub> pro Tonne freigesetzt, insgesamt ca. 1,5 Mio. Tonnen im Jahr.

Ziel des Forschungsprojekts Reststoff2Kraftstoff ist es, diesen Reststoff mit Hilfe eines neuartigen thermo-chemischen Konversionsverfahrens (TCR-Verfahren) zunächst in ein Roh-Öl-Äquivalent umzuwandeln und anschließend in einer Raffinerie zu nachhaltigen Norm-Kraftstoffen aufzubereiten. Synthetische Kraftstoffe aus Reststoffen und Abfallprodukten könnten eine wichtige Rolle im Mobilitätsmix der Zukunft spielen, vor allem für schwer zu elektrifizierende Bereiche wie den Güter- und Flugverkehr. Insgesamt ließen sich allein durch Kraftstoffe basierend auf den Rückständen der Zellstoff- und Papierindustrie jährlich bis zu einer Millionen Tonnen CO<sub>2</sub>-Emissionen einsparen. Zusätzliche 1,5 Millionen Tonnen würden wegfallen, weil die Reststoffe nicht mehr verbrannt werden müssten.

Im Projekt Reststoff2Kraftstoff werden Faserreststoffe vom Papierhersteller LEIPA zunächst vorbehandelt, also getrocknet und pelletiert. Das Einsatzmaterial wird anschließend im Technikum von Fraunhofer UMSICHT Sulzbach-Rosenberg mit der patentierten thermo-katalytischen Reforming (TCR)-Technologie zu einem Rohöl umgewandelt. Dabei werden die Faserreststoffe zunächst in einem Schneckenreaktor pyrolysiert (intermediäre Pyrolyse). In der zweiten Stufe, dem katalytischen Reforming, werden die entstehende Kohle und die Dämpfe gezielt in Verbindung gebracht, was die Gasausbeute und Qualität verbessert. Durch Kondensation werden Prozesswasser und Öl von der Gasphase getrennt, das Gas wird gereinigt und energetisch genutzt.

Das Rohöl wird anschließend von dem bayerischen Raffineriebetreiber Gunvor, in Ingolstadt evaluiert. Anhand von Laboruntersuchungen und Simulationen wird ermittelt, wie das regenerative TCR-Öl als »Drop-In-Fuel« ein fossiles Rohöl in einer konventionellen Raffinerie 1:1 substituieren kann. Die Produktqualität des Öls, insbesondere seine thermische Stabilität, ist hierfür ausschlaggebend. Nach der Qualifizierung des Öls, wird eine

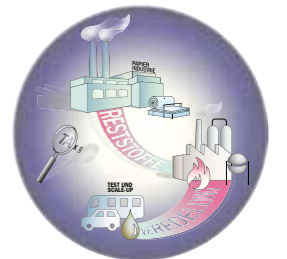
### Keywords

Biogene Reststoffe, thermochemische Umwandlung, Hydrierung zu Kraftstoffen

### Literatur

- J. Neumann, S. Binder, A. Apfelbacher, J.R. Gasson, P. Ramírez García, A. Hornung – Production And Characterization Of A New Quality Pyrolysis Oil, Char And Syngas From Digestate E Introducing The Thermo-Catalytic Reforming Process, J. Anal. Appl. Pyrolysis 113 (2015)
- J. Neumann, J. Meyer, M. Ouadi, A. Apfelbacher, S. Binder, A. Hornung – The Conversion Of Anaerobic Digestion Waste Into Biofuels Via A Novel Thermo Cata-Lytic Reforming Process, Waste Manag. 47 (2016)
- J. Neumann, N. Jäger, A. Apfelbacher, R. Daschner, S. Binder, A. Hornung – Upgraded Biofuel From Resi-Due Biomass By Thermo-Catalytic Reforming And Hydrodeoxygenation, Biomass And Bioenergy 89 (2016).
- R. Conti, N. Jäger, J. Neumann, A. Apfelbacher, R. Daschner, A. Hornung – Thermo-Catalytic Reforming (Tcr®) Of Biomass Waste Streams, A. Energ. Technol. (2016).
- N. Jäger, R. Conti, J. Neumann, A. Apfelbacher, R. Daschner, S. Binder, A. Hornung – Thermo-Catalytic Reforming Of Woody Biomass, Energy & Fuels (2016)
- A. Hornung, A. Apfelbacher, J. Neumann, N. Jäger, N. Schmitt, R. Daschner: Combined Heat And Power Generation From Solid Biomass Derived Bioliquids And Syngas By Tcr® – Upgrade Of Tcr-Liquids By Hydrodeoxygenation, Eubce (2016)

## Innovative Biokraftstoffe



Raffination im Technikumsmaßstab bei Fraunhofer UMSICHT durchgeführt, in der das Rohöl zu erneuerbaren Kraftstoffen hydriert wird. Die Beimischung mit Ethanol erfolgt im Anschluss. Hierfür stellt Clariant den Projektpartnern Bio-Ethanol aus der sunliquid® Demonstrationsanlage in Straubing zur Verfügung. Die fertigen Kraftstoffe werden anschließend an Versuchsmotoren auf Rollenprüfständen an der OTH Amberg-Weiden erprobt. Mit den Messergebnissen können die Parameter der Rohölherstellung und Raffination weiter optimiert werden.

Neben der technischen Machbarkeit und Bewertung der Gesamteffizienz der Verwertungskette werden im Projekt auch die gesetzlichen Rahmenbedingungen für einen Kraftstoff aus Papierrückständen beleuchtet. Die Projektpartner von der Friedrich-Alexander-Universität Nürnberg analysieren hierfür insbesondere die geltenden Entlastungsmöglichkeiten nach dem Energiesteuergesetz sowie die steuerliche Förderung von Biokraftstoffen und anderen erneuerbaren Energieträgern. Die technischen, ökonomischen und juristischen Ergebnisse aus dem Projekt dienen als Ausgangspunkt für die Konzeption einer großtechnischen Anlage zur Verwertung von Faserreststoffen und Herstellung von regenerativem Rohöl.

Synthetisch hergestellte Kraftstoffe aus Rest- und Abfallstoffen weisen ein signifikant geringeres Äquivalent an CO<sub>2</sub>-Emissionen auf als fossile Treibstoffe. Ihre Produktion steht nicht in Konkurrenz mit der Nutzung landwirtschaftlicher Nutzfläche und damit der Erzeugung von Lebensmitteln. Die erschließbaren Potenziale von Biomasse aus Rest- und Abfallstoffen sind zwar grundsätzlich begrenzt, allein in Deutschland gibt es allerdings ein technisches Potenzial von über 20 Millionen Tonnen ungenutzter biogener Rest- und Abfallstoffe, die sich prinzipiell für die Herstellung von synthetischen Kraftstoffen nutzen ließen. Mit der Möglichkeit, den beim TCR-Verfahren anfallenden Kohlenstoff zu sequestrieren, werden bilanziell sogar negative CO<sub>2</sub>-Emissionen möglich, d.h. das in den biogenen Einsatzstoffen gebundene CO<sub>2</sub> wird nicht vollständig wieder freigesetzt, sondern gespeichert.

### Das Forschungsprojekt Reststoff2Kraftstoff ist ein Gesamtprojekt zwischen acht Partnern:

- Gunvor Raffinerie Ingolstadt GmbH
- Fraunhofer-Institut für Umwelt-, Sicherheits- und Energietechnik UMSICHT, Institutsteil Sulzbach-Rosenberg
- Bayerische Motoren Werke Aktiengesellschaft
- Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Lehrstuhl für Volkswirtschaftslehre, insbesondere Wirtschaftstheorie sowie Lehrstuhl für Steuerrecht und Öffentliches Recht
- LEIPA Georg Leinfelder GmbH
- Ostbayerische Technische Hochschule Amberg-Weiden
- MAN Truck & Bus SE
- Clariant Produkte (Deutschland) GmbH
- Institut für Wärme und Mobilität e. V. (assoziiertes Partner)

Dr. Andreas Gollwitzer (Hauptautor:in),  
 Dr. Andreas Apfelbacher, Dr. Robert Daschner

andreas.gollwitzer@umsicht.fraunhofer.de

Fraunhofer UMSICHT, Fraunhofer-Institut für  
 Umwelt-, Sicherheits- und Energietechnik  
 An der Maxhütte 1

92237 Sulzbach-Rosenberg

Andy Gradel, Tobias Plessing

## Wasserstoff aus biogenen Reststoffen: Stand der Forschung und Reifegrade unterschiedlicher Technologien

### Keywords

Dampfreformierung,  
Dunkelfermentation, Pyrolyse/  
Plasmalyse, Vergasung,  
Biophotolyse

Neben der Elektrolyse aus Wind- und Solarenergie existiert ein erhebliches Potenzial zur Erzeugung von Wasserstoff aus biogenen Reststoffen vielfältiger Natur. Diese Pfade können häufig kostengünstig und schnell in geschlossenen Stoffkreisläufen nachhaltig erzeugten Wasserstoff bereitstellen und bieten ein hohes CO<sub>2</sub>-Senkenpotenzial durch den Einsatz von Reststoffen wie Gülle und Mist und/oder nachgeschalteten CCS-/CCU-Prozessen [1]. Die Technologiereifegrade dieser Produktionspfade reichen von TRL 3 bis ca. 8, derzeit sind im Wesentlichen folgende Technologien im F&E-Stadium [2]:

- Dunkelfermentation (TRL 4 – 5)
- Dunkelphotosynthese (TRL 3 – 4)
- Biophotolyse (TRL 3 – 4)
- Thermochemische Vergasung (TRL 6 – 7)
- Pyrolyse (thermisch / katalytisch / plasmalytisch, TRL 5 – 8)
- Dampfreformierung (TRL 7 – 8)
- Methanisierung (katalytisch / biologisch, TRL 6 – 7)

Durch die rapide Entwicklung dieser Anwendungen ist in den letzten Jahren auch das politische Interesse gewachsen und erste Gesetzesänderungen zur Öffnung des Marktes wurden etabliert.

Der vorgeschlagene Beitrag soll eine Übersicht der in der Forschung und Entwicklung befindlichen Technologien und deren technologischen Reifegraden sowie eine Auswahl laufender Forschungsvorhaben zur Erzeugung von Wasserstoff aus biogenen Reststoffen geben. Außerdem soll der aktuelle Stand in der politischen Diskussion und die aktuelle Gesetzeslage auf EU- und Bundesebene beleuchtet sowie der noch ausstehende Handlungsbedarf der Wissenschaft als Ratgeber der Gesetzgebung diskutiert werden.

### Weitere Informationen

[iwe.hof-university.de](http://iwe.hof-university.de)

### Literatur

- [1] BMWK FORSCHUNGSNETZWERK WASSERSTOFF (2021): Expertenempfehlung. HRSG: Projektträger Jülich  
[2] BMWK FORSCHUNGSNETZWERK BIOENERGIE (2021): Biomasse und Bioenergie als Teil der Wasserstoffwirtschaft

Dr.-Ing. Andy Gradel (Hauptautor:in),  
Prof. Dr.-Ing. Tobias Plessing

[andy.gradel@hof-university.de](mailto:andy.gradel@hof-university.de)

Institut für Wasserstoff- und  
Energietechnik Hochschule Hof  
Alfons-Goppel-Platz 1, 95028 Hof



### Willkommen im Forschungsnetzwerk Bioenergie

Im Folgenden finden Sie einen Überblick über die wichtigsten Informationen und Links zum Forschungsnetzwerk Bioenergie:

Webseite Förderbereich »Energetische Biomassenutzung«:  
[www.energetische-biomassenutzung.de](http://www.energetische-biomassenutzung.de)

Registrieren Sie sich im Forschungsnetzwerk Bioenergie und erhalten Sie immer die aktuellsten News:  
[www.forschungsnetzwerke-energie.de/bioenergie](http://www.forschungsnetzwerke-energie.de/bioenergie)

Publikationen und Stellungnahmen:  
[www.energetische-biomassenutzung.de/publikationen](http://www.energetische-biomassenutzung.de/publikationen)

Nächste Veranstaltung:  
Bioenergie Talk mit dem Projekt BioReSt  
26.10.2023 | online

Die Innovation des Projektes besteht in der Kombination und Weiterentwicklung von Aufschlussverfahren zur Vorbehandlung von lignocellulosehaltigen Substraten. Für den Substrataufschluss werden die Substrate mechanisch zerkleinert und anschließend chemisch und enzymatisch behandelt. Durch die Untersuchung verschiedener Reststoffe wird ein Konzept entwickelt, das die Nutzung dieser Reststoffe in einer Biogasanlage ermöglicht. Dabei wird auch berücksichtigt, dass je nach Zusammensetzung und Herkunft dieser Reststoffe ggf. sich substrat-spezifisch unterschiedliche Verfahrenskombinationen eignen.

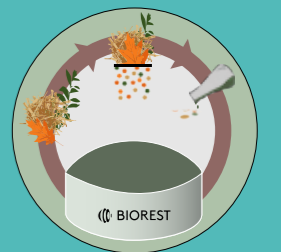


**BIOENERGIE**  
FORSCHUNGSNETZWERKE  
ENERGIE

Neuste Publikationen:  
◊ **Fokusheft Bioenergie**  
**im Strom- und Wärmemarkt III**

◊ **Addendum**  
**zum Methodenhandbuch:**  
**Beispielrechnungen der**  
**Bilanzierung von Treibhausgas-**  
**emissionen im Förderprogramm**

**Stellungnahme**  
**»Kälte & Wärme«**



Projektideen einreichen  
bis zum 01.03.2024, 14 Uhr



**PyroMar**

Volker Heil, Martin Peters, Tim Schulzke, Kimberley Matschuk, Philipp Rittershaus, Ulrike Schümann, Fanny Langschwager, Nils Rettenmaier

## Veresterte Schnellpyrolyseöle aus biogenen Reststoffe als maritime Kraftstoffe

FKZ-Nr. 03EI5412:

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



### Hochseeschifffahrt: Schwefel und Kohlenstoffdioxid als Herausforderungen

Hochseeschiffe lassen sich aufgrund ihrer zu lagernden Energiemengen nicht elektrisch antreiben. Biokraftstoffe als Rein- und Blendkomponenten können hier perspektivisch einen Beitrag zur Defossilierung leisten.

### Lösungsansatz: über Schnellpyrolyse und Veresterung zum maritimen Kraftstoff

Biogene Reststoffe wie Stroh, Laub, Landschaftspflegeheu und Strauchschnitt lassen sich durch ablative Schnellpyrolyse mit gestufter Kondensation in einphasige Pyrolyseöle (»Bio-Öle«) überführen, wobei typischerweise ca. 25 Gew.-% Ausbeute erreichbar sind. Zur Absenkung der Säurezahl und zur Verbesserung der Mischbarkeit mit fossilen Basiskraftstoffen wird das Bio-Öl mit längererkettigen Alkoholen zu »PyroMar-Intermediat« verestert. Die Alkohole werden katalytisch aus Ethanol erzeugt, welches wiederum aus Agrarreststoffen gewonnen wird. Abbildung 1 zeigt die Prozesskette.

### Ergebnisse: ein herausforderndes Stoffgemisch

Alle genannten Biomassen (Laub nur in Verbindung mit Stroh) ließen sich nach dem beschriebenen Verfahren in PyroMar-Intermediat überführen. Dieses ließ sich unter Additiveinsatz mit bis zu 7 Gew.-% Gemischanteil zu Schweröl nach DIN ISO 8217 zu einem lagerstabilen Gemisch blenden. Dies war jedoch nicht für alle normkonformen Schweröle reproduzierbar. Um den in der Norm geforderten Flammpunkt von  $\geq 60^\circ\text{C}$  zu erreichen, muss in dem Verfahren die Alkoholkondensation bis zum Hexanol fortgeführt und eine Abtrennung der leichteren Komponenten angeschlossen werden. 66 L strohbasiertes PyroMar-Intermediat wurden mit einem für die Veresterung ca. stöchiometrischen Bio-Öl-/Alkohol-Massenverhältnis hergestellt und in einem mittelschnell laufenden Einzylinder-Forschungsmotor eingesetzt. Zudem wurde ein Motortest mit Intermediat aus einem alkoholreicheren Ansatz durchgeführt. Der Mischkraftstoff bildete am Kraftstofffilter eine lackartige Schicht, die spontan zum Verblocken führte. Als Reinstoff bildete das PyroMar-Intermediat in beiden Qualitäten Ablagerungen am Injektor aus, die ebenfalls zum Abbruch führten. Die Düsen des Injektors blieben dabei jedoch frei. Als Ausblick wäre der Einsatz als Reinkraftstoff in Turbinen mit gekühlten Injektoren oder offenerer Injektorgeometrie zu untersuchen – allerdings läge hier eine mögliche Anwendung eher in der stationären Verstromung als im maritimen Einsatz. Von den untersuchten Bioreststoffen hat einzig Stroh ein relevantes Rohstoffpotenzial. Ausgehend von Stroh lässt sich PyroMar-Intermediat ab einer Ausbeute von 26 Gew.-% herstellen; der Verkaufspreis wird zu 2.300 €/t geschätzt. Sofern keine Alternativnutzung des Strohs angesetzt wird, ist die Treibhausgasbilanz dabei positiv. Das Vorhaben wird mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Klimaschutz unter dem Förderkennzeichen 03EI5412 gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt der Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

## Innovative Biokraftstoffe

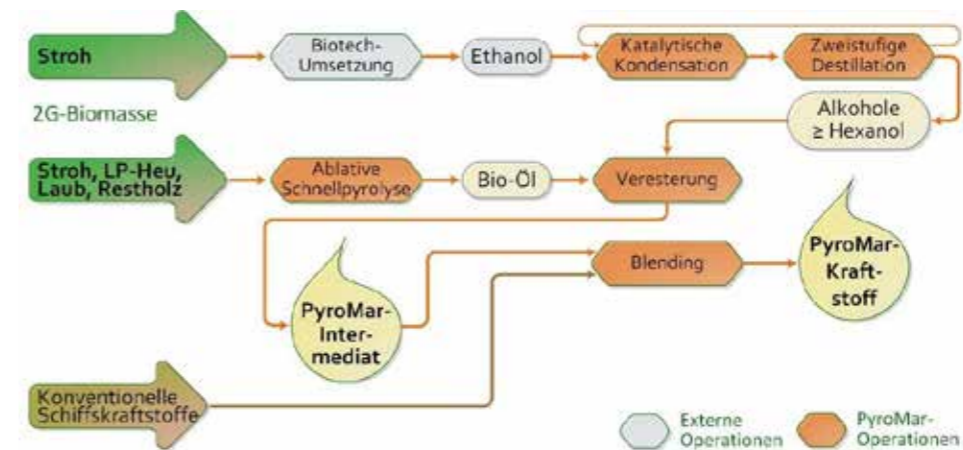


Abbildung 1:  
Prozesskette des Projektes  
PyroMar

Volker Heil<sup>1</sup> (Hauptautor:in), Martin Peters<sup>1</sup>, Tim Schulzke<sup>1</sup>, Kimberley Matschuk<sup>1</sup>, Philipp Rittershaus<sup>1</sup>, Ulrike Schümann<sup>2</sup>, Fanny Langschwager<sup>2</sup>, Nils Rettenmaier<sup>3</sup>

volker.heil@umsicht.fraunhofer.de

<sup>1</sup> Fraunhofer UMSICHT, Oberhausen

<sup>2</sup> Universität Rostock, Lehrstuhl für Kolbenmaschinen und Verbrennungsmotoren (LKV), Rostock

<sup>3</sup> ifeu – Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg gGmbH, Heidelberg

## MeKat

Bettina Stolze, Ingo Hartmann, René Bindig

## Umweltfreundliche Katalysatorherstellung auf Basis von biogenem Silica

**FKZ-Nr. 03EI5456:**  
Entwicklung eines Methanoxidationskatalysators auf Basis von biogenem Silica für die Entfernung von Methan im Abgas von Biogas-BHKW

Mit Einführung der 44. BImSchV wurden erstmals Grenzwerte für organische Kohlenstoffemissionen (Gesamt-C) festgelegt, wodurch das Thema Methanschlupf als Hauptkomponente dieser Emissionen stärker in den Fokus der Forschung trat. Methanschlupf bezeichnet das Entweichen nicht unerheblicher Mengen des unverbrannten Brenngases Methan in die Atmosphäre. Biogas besitzt von Grund auf einen geringeren Methananteil (50-60%) als beispielsweise Erdgas (>95%). Das Gemisch ist damit weniger zündwillig und es kann in manchen Fällen zu Zündaussetzern kommen, genauso wie zu sogenannten »cold spots« bei der Verbrennung. Beides führt zum Methanschlupf, also dazu, dass unverbrannter Kraftstoff in den Abgasstrang geleitet wird. Neben den resultierenden Auswirkungen auf den Klimawandel trägt der Methanschlupf zu Wirkungsgradeinbußen bei, da der Methanschlupf ohne Katalysator weder elektrisch noch thermisch gewandelt werden kann und damit als Verlust einzurechnen ist. Die katalytische Nachverbrennung stellt eine vielversprechende Möglichkeit dar, diese Emissionen zu mindern und somit einen erheblichen Beitrag zum Klimaschutz und der Ressourceneffizienz beizutragen. Da bis heute entwickelte Methanoxidationskatalysatoren für die praktische Anwendung noch keine ausreichende Aktivität und Stabilität besitzen, besteht hier noch erheblicher Forschungsbedarf.

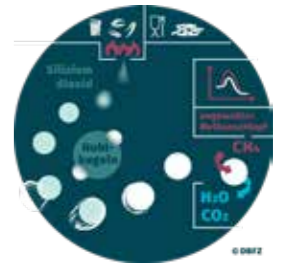
Das Vorhaben »Entwicklung eines Methanoxidationskatalysators auf Basis von biogenem Silica für die Entfernung von Methan im Abgas von Biogas-BHKW (MeKat)« hat die Entwicklung und Untersuchung eines hinreichend aktiven sowie langzeitstabilen Katalysators zur Oxidation von Methan im Abgas von Biogas-BHKW zum Ziel. Die Basis dafür bildet pulverförmiges biogenes Silica, welches aus der energetischen Verwertung von biogenen Rest- und Abfallstoffen gewonnen wird. Der Fokus liegt hierbei auf der Nutzung von Reisspelzen. Um das biogene Silica als Trägermaterial für Katalysatoren nutzen zu können, sollte dies eine hohe spezifische Oberfläche sowie mittleres Porenvolumen aufweisen, um ausreichend Aktivkomponente aufbringen zu können. Dies ist eine wichtige Teilkomponente, die die Aktivität des Katalysators beeinflusst. In vergangenen und laufenden Projekten am DBFZ hat sich gezeigt, dass Reisspelzen in dieser Hinsicht am geeignetsten sind. Zudem weisen sie den höchsten Siliziumanteil in der Asche auf, wodurch weniger Fremdelemente Einfluss auf die Katalysatoraktivität haben und die Matrixeffekte damit reduziert werden. Ein weiterer Aspekt ist das Entsorgungsproblem von Reisspelzen in den Erzeugerländern. So werden diese oft unkontrolliert auf den Feldern verbrannt, wodurch die Umwelt und Gesundheit durch die erhöhten Emissionen geschädigt wird. Zusammen mit den aktiven Komponenten soll das biogene Silica einerseits als Washcoat auf  $\alpha$ -Aluminiumoxid Hohlkugeln aufgebracht werden. Andererseits sollen Hohlkugeln aus dem pulverförmigen Katalysator gefertigt werden. Die Katalysatorstruktur basiert auf dem Konzept der Entkopplung von Metall und Metalloxid auf biogenem Silica. Durch die Verwendung von biogenen Reststoffen als Grundlage für den Katalysatorträger kann der nicht unerhebliche Energieaufwand, der aufgebracht werden muss, um die bisherigen Ausgangsstoffe für gängige Trägerkatalysatoren herzustellen, eingespart werden. Es ist sogar davon auszugehen, dass bei der Herstellung dieser Ausgangsstoffe thermische Energie nutzbar gemacht werden kann (Heizwärme). Dadurch ist es eventuell auch möglich, das

### Keywords

Reststoffnutzung,  
katalytische  
Emissionsminderung,  
Methanoxidation

### Innovative Technologien

Trägermaterial sehr viel kostengünstiger herzustellen, womit auch ein regelmäßiger Austausch des Oxidationskatalysators wirtschaftlich darstellbar erscheint. Die granulare Struktur des Materials bietet neben dem Aspekt der Gewichtsreduzierung und Materialeinsparung im Vergleich zu einer Vollkugel auch eine gute Modellierbarkeit der Schüttung auf Grund der einstellbaren und gering schwankenden Durchmesser- und Porenverteilung der Hohlkugeln. Des Weiteren kann durch die einstellbare Porosität und Porengrößenverteilung eine maßgeschneiderte Anpassung der Träger an die nötigen Bedingungen erreicht werden.



Dr. Bettina Stolze (Hauptautor:in),  
Prof. Dr. Ingo Hartmann und René Bindig  
bettina.stolze@dbfz.de

DBFZ - Deutsches Biomasseforschungs-  
zentrum gGmbH  
Torgauer Straße 116, 04347 Leipzig

Falko Marx, Paul Dieringer, Jochen Ströhle, Bernd Epple

## Autotherme Chemical-Looping-Vergasung biogener Reststoffe



### Keywords

Vergasung,  
chemical looping,  
Wirbelschicht,  
Synthesegas, Reststoffe

Angefacht durch den fortschreitenden Klimawandel und der damit einhergehenden Energiewende ist ein deutlicher Bedarf an neuen, nachhaltigen und kostengünstigen Prozessen für den Energie- und Transportsektor aber auch die Industrie entstanden. Eine Option ist die Umwandlung von biogenen Reststoffen in hochkalorisches Synthesegas und die nachfolgende Verwendung als Biokraftstoff oder Basischemikalie.

Ein neuer Vergasungsprozess für die effiziente thermochemische Umwandlung biogener Reststoffe ist die Chemical-Looping-Vergasung (CLG), dargestellt in Abbildung 1. Der wesentliche Vorteil des CLG-Prozesses ist die Bereitstellung von Sauerstoff für den Prozess durch die zyklische Oxidation und Reduktion eines Metalloxids, dem Sauerstoffträgermaterial. Daher kann auf eine teure und energieintensive Luftzerlegungsanlage verzichtet werden, welche normalerweise für Sauerstoff-Dampf-Vergasungsverfahren benötigt wird. Zusätzlich ermöglicht der CLG Prozess die effiziente Abtrennung von  $\text{CO}_2$  aus dem  $\text{N}_2$ -freien Produktgas in einer nachgeschalteten Gasaufbereitungsanlage. Der hohe Anteil an flüchtigen Bestandteilen in biogenen Reststoffen macht diese für den CLG-Prozess besonders interessant, da hiermit eine nahezu vollständige Umsetzung des Einsatzstoffes im Vergaser und damit einhergehend eine hohe Effizienz möglich wird. CLG ist daher eines der thermochemischen Verfahren mit hohem Potenzial für künftige biomassebasierte Wertschöpfungsketten

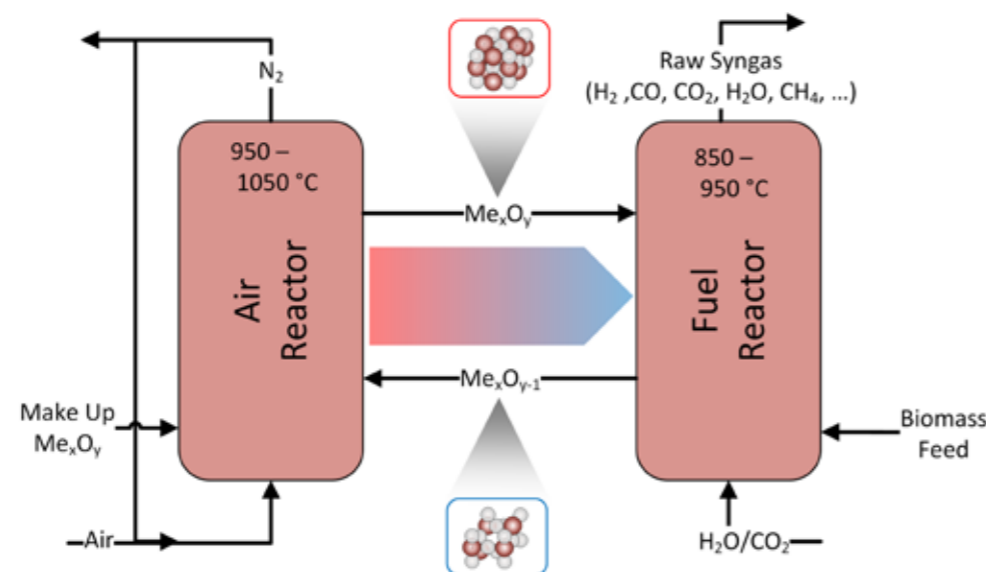
Die wichtigsten Erkenntnisse der Versuche mit Industrieholzpelletes, Kiefern-Forstrückständen und Weizenstroh sollen während der Statuskonferenz Bioenergie 2023 vorgestellt werden. Dies beinhaltet Ergebnisse zur Synthesegasqualität, dem Sauerstoffträgermaterial, dem Einfluss wesentlicher Randbedingungen (z.B. Temperatur) und Unterschiede zwischen den Einsatzstoffen. Es wird ein Überblick über das CLG-Verfahren und die wesentlichen, zugrundeliegenden Phänomene gegeben um die Bedeutung der Ergebnisse zur Weiterentwicklung der Technologie zu zeigen.

### Weitere Informationen

<https://clara-h2020.eu/>

[https://www.est.tu-darmstadt.de/est\\_est/index.de.jsp](https://www.est.tu-darmstadt.de/est_est/index.de.jsp)

Abbildung 1:  
Illustration des  
CLG-Prozess



Um die Anwendbarkeit des CLG-Prozesses als Ausgang kohlenstoffbasierter Wertschöpfungsketten aufzuzeigen und den Prozess in semi-industriellem Maßstab weiter zu untersuchen, wurde die modulare 1 MWth Pilotanlage des Fachgebiet Energiesysteme und Energietechnik der Technischen Universität Darmstadt modifiziert und in drei mehrtägigen (24/7) Versuchskampagnen mit Verschiedenen biogenen Reststoffen betrieben.

Falko Marx (Hauptautor:in),  
Paul Dieringer, Dr.-Ing. Jochen Ströhle,  
Prof. Dr.-Ing Bernd Epple  
falko.marx@est.tu-darmstadt.de

Technische Universität Darmstadt,  
Fachgebiet Energiesysteme und  
Energietechnik  
Otto-Bernd-Str. 2, 64287 Darmstadt

Christian Kutter, Tarek Philippi, Dr. Dragan Stevanović, Florian Völkl

## Bioökonomische Potentiale der Wasserstoffherzeugung aus Biomasse durch Allotherme Dampfreformierung

### Keywords

Biomasse, Wasserstoff,  
Allotherme  
Dampfreformierung,  
Pebble-Heater,  
Gegenstromreaktor

Deutschland strebt an, bis zum Jahr 2050, CO<sub>2</sub>-Neutral zu werden. Das bedeutet, dass die verbleibenden Emissionen möglichst geringgehalten und durch Maßnahmen wie CO<sub>2</sub>-Kompensation ausgeglichen werden müssen. Heutzutage liegt die Erzeugung von Wasserstoff aus fossilen Brennstoffen bei über 95%, was zu hohen CO<sub>2</sub>-Emissionen führt [1]. Eines der Verfahren von HiTES besteht darin, Wasserstoff auf nachhaltige Weise, aus Biomasse herzustellen, ohne zusätzliches CO<sub>2</sub> in die Atmosphäre abzugeben. Biomasse hat ein enormes Potential [2] und sollte daher als eine sehr wichtige Quelle für Wasserstoff betrachtet werden.

Die Entsorgung oder Verwertung von Reststoffen wie Grünschnitt, Klärschlamm oder Altholz, stellt sowohl für Kommunen als auch für landwirtschaftliche bzw. Entsorgungsbetriebe eine aufwendige und kostspielige Herausforderung dar.

Das Verfahren von HiTES erzeugt 100 kg Wasserstoff aus 1 t biogenen Reststoffen (Kaskadenprinzip; RED II) mittels einer allothermen Hochtemperaturdampfreformierung. Die verwendbaren Reststoffe erstrecken sich hauptsächlich auf holzartige / halmartige Biomasse. Dazu zählen vor allem Grünschnitt, Agrarreststoffe, Reste aus der Forstwirtschaft, sowie Altholz aller Kategorien. Im passenden Mischungsverhältnis können auch geringe Mengen an Gärresten und Klärschlamm zugegeben werden. Das im Verfahren entstandene CO<sub>2</sub> stammt aus der eingesetzten Biomasse und macht den Prozess somit klimaneutral. Durch Abfangen des CO<sub>2</sub> am Ende des Prozesses (BECCUS) wird das Verfahren CO<sub>2</sub>-negativ. Es wird stark überhitzter Wasserdampf (1200 °C) in einen Gegenstromreaktor eingetragen, welcher ein breites Spektrum an Einsatzstoffen zulässt [3]. Aufgrund der thermochemischen Konversion der Reststoffe entsteht ein stark wasserstoffhaltiges (> 60 Vol. %) Synthesegas, grüner Benzol sowie mineralstoffreiche Asche, die mittels Aufbereitung zu einem wertvollen Düngemittel verarbeitet wird.

Der verfahrensbedingte Teergehalt im Synthesegas wird in mehreren Reinigungsstufen eliminiert. Gasförmige Teerbestandteile werden in einem Hochtemperaturreaktor in niedere Kohlenwasserstoffe aufgespalten. Schwersiedende Teere werden in einem Zyklon abgeschieden und mithilfe von Heißdampf in den Reaktor zurückgeführt. Im späteren Prozess werden restliche und leichtsiedende Teere in einem Cryo-Kühler entfernt [4,5]. Zuletzt wird mit einer PSA der hochreine Wasserstoff (R5.0) abgetrennt. Das verbleibende Gas wird im Pebble-Heater für die interne Energierückgewinnung genutzt. Der Pebble-Heater zeichnet sich durch eine hohe Wärmerückgewinnungseffizienz (>95%) aus, indem Schichten aus Pebbles verwendet werden, die Temperaturen von über 1600 °C standhalten können. Diese Art von Regenerator wird verwendet, um gasförmige Teere zu spalten, das Synthesegas abzukühlen und den Dampf zu überhitzen [6,7].

Die Erzeugung von Wasserstoff aus Biomasse durch allotherme Dampfreformierung bietet einen intelligenten und nachhaltigen Beitrag zur Kreislaufwirtschaft. Dieser besteht darin, im Sinne der Bioökonomie, nur biogene Reststoffe, die keinem weiteren Nutzen mehr haben, zu verwenden (Kaskadenprinzip). Diese Abfallstoffe werden im Verfahren

zu neuen Stoffen/Gütern umgewandelt bzw. aufgewertet. Die resultierenden Stoffe, vor allem Wasserstoff, aber auch Asche und grüner Benzol, können wieder in den Kreislauf eingebracht werden und somit andere Gewinnungsarten, die auf geförderten Ressourcen basieren, substituieren.

Größter CO<sub>2</sub>-Verursacher im Sektor Industrie, ist die Stahlbranche. Für eine klimaneutrale Stahlindustrie ist Wasserstoff unverzichtbar. Die Rohstahlproduktion wandelt sich in Deutschland, bis zum Jahr 2030 stark zu wasserstoffbasierter Direktreduktion ab. Im Jahr 2030 sollen die Kosten für Wasserstoff im Bereich von 2,56 €/kg – 8,40 €/kg liegen [8]. Die Technologie von HiTES, ermöglicht es mit Produktionskosten von 3 €/kg für grünen Wasserstoff, heute schon diese Zielkosten zu erreichen. Bei einem aktuellen Marktpreis von 6 €/kg, kombiniert mit dem Handel von THG-Quoten, ist der Betrieb der Technologie wirtschaftlich und konkurrenzfähig.

Auch fördert die Zielsetzung der RED II, den Anstieg der Holzenergieproduktion in Deutschland. Dies führt dazu, dass die Umwelt signifikant entlastet wird, da weniger Ressourcen, wie Erdgas oder Kohle, gefördert werden. Weiterhin werden dadurch weniger fossile Energieträger aufgrund von Wasserstoffeinsatz verwendet, was die Zielsetzung Deutschlands unterstützt.

### Weitere Informationen

[www.hites-energystorage.de](http://www.hites-energystorage.de)

[1] Die Nationale Wasserstoffstrategie, Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, München 2020

[2] KATHLEEN, M., SoBio - Szenarien einer optimalen Biomassenutzung im deutschen Energiesystem Eine Langfristperspektive, Deutsches Biomassenforschungszentrum, Leipzig 2023

[3] STEVANOVIĆ, D., Verfahren und Vorrichtung zur Vergasung von kohlenstoffhaltigen Rohstoffen. DPMA – German Patent and Trade Mark Office, DE 10 2007 050 566, Munich 2007

[4] STEVANOVIĆ, D., Verfahren und Vorrichtung zum Cracken von Gasen, DPMA – German Patent and Trade Mark Office, DE 10 2012 111 894, Munich 2012

[5] STEVANOVIĆ, D., OEHMICHEN, TH., Verfahren und Vorrichtung zum Cracken von Gasen, DPMA – German Patent and Trade Mark Office, DE 10 2012 111 900, Munich 2012

[6] FASSBINDER, H.-G., Regenerator, European Patent office, EP 0 620 909, 1993

[7] EMMEL, A., STEVANOVIĆ, D., FASSBINDER H.-G., Process for the Operation of a Generator and Generator, United State Patent, US 6 334 265, 2000

[8] WIETSCHEL, M., Preiselastische Wasserstoffnachfrage in Deutschland – Methodik und Ergebnisse, Karlsruhe 2023



Innovative Technologien

### Literatur

Christian Kutter (Hauptautor:in),  
Tarek Philippi, Dr. Dragan Stevanović,  
Florian Völkl  
[ch.kutter@hites-energystorage.de](mailto:ch.kutter@hites-energystorage.de)

HiTES Holding GmbH  
An der Maxhütte 1,  
92237 Sulzbach-Rosenberg



**OpToKNuS**

Maximilian Heinrich, Tobias Plessing, André Herrmann, Marco Klemm, Georg Kuffer

**Brennstoffspezifische Simulation thermochemischer Biomassevergasung**

**FKZ-Nr. 03KB163:**  
Optimierungs-Toolbox mit  
Kinetischer Numerischer  
Simulation

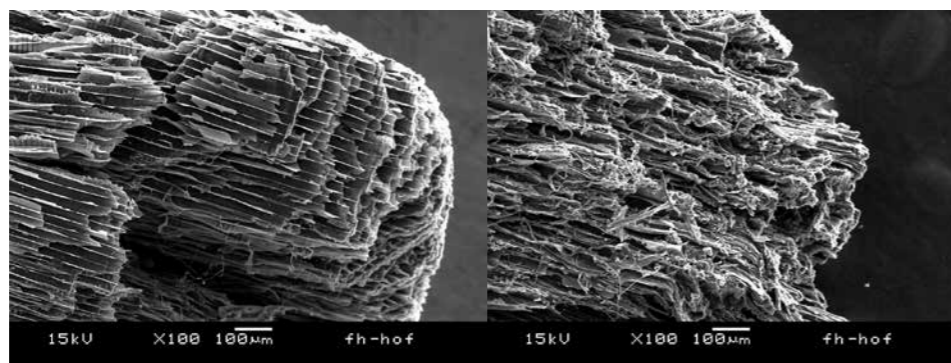
Holzgas gilt als vielversprechende Technologie zur Bereitstellung erneuerbarer Energie aus Biomasse. Während der Prozess bei gleichbleibendem Brennstoff i.d.R. gut beherrscht wird, stellt die Nutzung alternativer Brennstoffe sowie die Skalierbarkeit eine große Herausforderung dar. Computersimulationen helfen bereits in vielen Industriebereichen, Versuchsaufwand zu reduzieren und somit die Entwicklung zu optimieren. Die hohe Brennstoffinhomogenität und die Vielfältigkeit biogener Brennstoffe ist jedoch eine Hürde bei der Modellierung von thermochemischer Biomassevergasung. [1,2] Der Vortrag gibt hierzu einen Einblick in die aktuelle Forschung dieses Bereichs. Die Präsentation befasst sich daher mit der Simulationsentwicklung, die ein voranschreitendes besseres Verständnis in diesem Feld schafft. Es werden die Vorteile und Einsatzmöglichkeiten von Simulationen gezeigt und wie dadurch Technologien, Einsatzbereiche sowie die Nutzung alternativer Brennstoffe effizient erweitert werden können. Inhalte und Ergebnisse des bis dahin abgeschlossenen BMWK-Projektes »OpToKNuS« aus dem 6. EFP, welches die Simulation eines Gleichstrom-Festbettreformers behandelte, runden den Vortrag durch praktische Einblicke in die Entwicklung ab.

Das Projekt »OpToKNuS« (Optimierungs-Toolbox mit Kinetischer Numerische Simulation) befasst sich mit der Berücksichtigung brennstoffspezifischer Einflüsse auf eine Reformer-simulation. Dazu wurden die Versuchsbrennstoffe mit erweiterten Laboranalysen charakterisiert. Strukturelle und intrinsische Parameter der Brennstoffe bzw. des Pyrolysekokes werden erfasst, um den thermischen Umwandlungsprozess besser beschreiben und verstehen zu können. [3] Damit soll auch die Grundlage für eine Datenbank mit brennstoffspezifischen Kennwerten zur Modellierung von thermochemischer Biomassevergasung geschaffen werden. Abbildung 1 zeigt beispielsweise die Strukturunterschiede von Pyrolysekohle aus Fichten- und Buchenholz, die berücksichtigt werden sollen. Jedoch auch die intrinsische Reaktivität unterscheidet sich aufgrund von chemischer Zusammensetzung. So können Spurenelemente katalytische Effekte bei der Reaktivität der pyrolysekohle begünstigen. [4]

**Keywords**

Thermochemische  
Biomassevergasung,  
Simulation

**Abbildung 1:**  
Bruchkante von Fichten- (links)  
und Buchenpartikel (rechts) unter  
dem REM (Rasterelektronenmi-  
kroskop) zur Verdeutlichung der  
Strukturunterschiede.



**Innovative Technologien**


Kombinierte Untersuchungen im Technikums-Maßstab am Deutschen Biomasseforschungszentrum gGmbH sowie die gezielte und umfangreiche Vermessung einer Holzgasanlage bei Spanner Re<sup>2</sup> GmbH wurden genutzt, um die Berechnungen zu validieren. Zum Vergleich dienten Bilanzierungen sowie Messungen von Produktgaszusammensetzung, Teerbelastung, Temperaturprofil und Brennstoffumsatz.

**Weitere Informationen**

<https://iwe.hof-university.de>

- [1] Morin, M.; Pécate, S.; Masi, E.; Hémati, M. (2017): Kinetic study and modelling of char combustion in TGA in isothermal conditions. Fuel, Volume 203, p. 522–536. URL: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2017.04.134>
- [2] Neves, D.; Thunman, H.; Matos, A.; Tarelho, L.; Gómez-Barea, A. (2011): Characterization and prediction of biomass pyrolysis products. In: Prog. Energy Combust. Sci., Volume 37, p. 611–630. URL: <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2011.01.001>
- [3] Heinrich, M.R.; Herrmann, A.; Gradel, A.; Klemm, M.; Plessing, T. (2023): Extensive Experimental Characterization with Kinetic Data for the Gasification Simulation of Solid Biofuels. In: Energies 2023, 16, 2888. URL: <https://doi.org/10.3390/en16062888>
- [4] Song, Q.; Wang, X.; Gu, C.; Wang, N.; Li, H.; Su, H.; Huo, J.; Qiao, Y. (2020): A comprehensive model of biomass char-CO<sub>2</sub> gasification reactivity with inorganic element catalysis in the kinetic control zone based on TGA analysis. In: Chemical Engineering Journal, Volume 398, Article 125624. URL: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2020.125624>

**Literatur**

Maximilian Heinrich\* (M. Eng.)<sup>1</sup>  
(Hauptautor:in), Prof. Dr.-Ing. Tobias Plessing<sup>1</sup>,  
Dipl.-Ing. André Herrmann<sup>2</sup>, Dr.-Ing. Marco  
Klemm<sup>2</sup>, Dipl.-Ing. Georg Kuffer<sup>3</sup>

[maximilian.heinrich.2@hof-university.de](mailto:maximilian.heinrich.2@hof-university.de)

<sup>1</sup> Institut für Wasserstoff- und  
Energietechnik,  
Alfons-Goppel-Platz 1, 95028 Hof

<sup>2</sup> Deutsches Biomasseforschungs-  
zentrum gGmbH

Torgauer Straße 116, 04347 Leipzig

<sup>3</sup> Spanner Re<sup>2</sup> GmbH, Niederfeldstraße 38,  
84088 Neufahrn in Niederbayern

## LaubCycle

Andreas Huft, Esther Stahl, Lasse Harloff

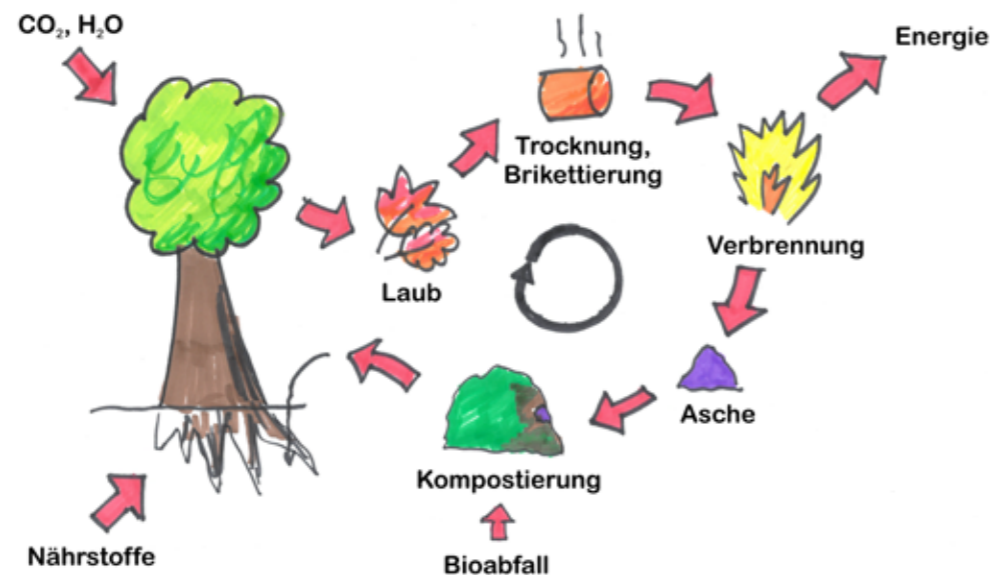
## Laub – eine Biomasse im Fokus der Kreislaufwirtschaft

**FKZ-Nr. 03E15418:**  
Etablierung eines nachhaltigen Stoff- und Energiekreislaufs für den biogenen Reststoff Laub auf kommunaler Ebene

Laub fällt in großen Mengen saisonal im Herbst an und wird üblicherweise kompostiert. Gleichzeitig weist Laub schlechte Kompostierungseigenschaften auf und ist daher in Kompostierungsanlagen eher unerwünscht. Dieser Umstand trifft vor allem Kommunen und Städte, die im Zuge der Verkehrswegesicherung zeitnah Laub aus dem Gemeinde- und Stadtgebiet entfernen müssen. Im Gegenzug weist Laub nach entsprechender Vorbehandlung gute Verbrennungseigenschaften auf und eignet sich daher prinzipiell als Brennstoff, insbesondere auch in dezentralen Feuerungsanlagen im Bereich 400 kW bis ca. 10 MW, die zur lokalen und weitgehend CO<sub>2</sub>-neutralen Wärmeversorgung eingesetzt werden. Problematisch bei der Verbrennung von Laub ist die inhomogene Zusammensetzung mit einem teilweise erheblichen Ascheanteil (Erdanhaftungen, Steine, Sand) von bis zu 50 %, je nach Witterung und Erfassungsmethode unterschiedliche Feuchtegehalte sowie das stark saisonale Aufkommen im Herbst.

Ziel des Forschungsprojekts »LaubCycle« ist die Etablierung einer geschlossenen Kreislaufführung (siehe Abbildung 1) innerhalb einer Kommune mit dem Stoffstrom Laub unter bedarfsgerechter Gewinnung von klimaneutraler Energie (Wärme, ggf. Strom) und Rückführung der im Laub enthaltenen Nährstoffe.

**Abbildung 1:**  
potenzieller Stoffkreislauf zur Nutzung von Laub und Rückführung der Aschen



### Keywords

Laub, Verbrennung, Circular Economy, Aschen, Kalkdünger

Weiteres Ziel ist die Entwicklung und Optimierung eines Aufbereitungsprozesses unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten bei einem gewerblichen Grüngutverwerter. Dies befähigt perspektivisch Kommunen und Entsorgungs- bzw. Aufbereitungsbetriebe zur Erweiterung des Brennstoffspektrums und Produktportfolios durch die kosteneffiziente Gewinnung eines „neuen“ Brennstoffs für Energiebereitstellungsanlagen und Nutzung der in den Aschen enthaltenen Nährstoffen in Komposten, die anschließend wieder auf kommunalen, landwirtschaftlichen und privaten Flächen aufgebracht werden.



### Erschließen von Rest- und Abfallstoffen

#### Aktivitäten und Maßnahmen

Durch eine systematische Bestandsaufnahme der Lauberfassungsmethoden in Deutschland und eine Beprobungskampagne werden geeignete Methoden zur Sammlung von Laub für die kreislauforientierte Laubverwertung identifiziert. Im Anschluss werden Vorbehandlungsmethoden (Siebung, Trocknung) zur Erzeugung eines Brennstoffs untersucht und hinsichtlich ihrer Eignung bewertet. Die aufbereiteten Laubfraktionen werden nachfolgend in Verbrennungsversuchen verbrannt und nach technischen, regulatorischen und betriebsabhängigen Gesichtspunkten eingeordnet.

Abschließend erfolgen eine stoffliche und energetische Analyse des kreislauforientierten Verfahrens unter Berücksichtigung der potenziellen stofflichen Nutzung der Verbrennungssasche und eine Einordnung in die rechtlichen Rahmenbedingungen.

#### Ergebnisse

Es wurden Laubfraktionen aus verschiedenen Sammelorten charakterisiert und in zwei Siebkampagnen untersucht. Im Hinblick auf die Ausgangsfraktionen wurde ein Einfluss des Sammelorts auf die elementare Zusammensetzung der einzelnen Fraktionen festgestellt. Hierbei wird zwischen Laub aus Straßennähe und Laub aus Parkanlagen unterschieden. Die Siebkampagnen bestanden aus der Untersuchung von drei verschiedenen Siebssystemen (Trommelsieb, Sternsieb, Spannwellensieb) mit unterschiedlichen Siebmaschenweiten. Die entstehenden Fraktionen wurden bilanziert und charakterisiert. Hier stellte sich heraus, dass eine Aufbereitung über ein Trommelsieb mit einer Siebmaschenweite von 10 mm das größte Potential aufwies. Es konnte eine generelle Reduzierung des Ascheanteils sowie eine Abreinigung von Schwermetallen (im Einzelfall) erreicht werden. Unsere Versuche zeigten insgesamt, dass für eine erfolgreiche Aufbereitung die Beschaffenheit des Laubs entscheidend ist (u.a. Trockengehalt, Sammelort, Lagerort) und es sich hierbei um ein komplexes Zusammenspiel verschiedener Einflussfaktoren handelt, weshalb der Vorbehandlung eine erhöhte Aufmerksamkeit zukommen muss.

Für die anschließenden Verbrennungskampagnen (400 kW) wurden aus ausgewählte Laubfraktionen erfolgreich Rundbriketts mit 100 % Laubanteil sowie Mischbriketts aus dem Regelbrennstoff Holzhackschnitzel und Laub bis zu einem Anteil von 75 % hergestellt. Dabei wurde zum einen die Machbarkeit und zum anderen das Nutzungspotential der dabei entstehenden Pflanzenaschen untersucht. Die Zusammensetzung der Mischbrikettaschen wurde entsprechend der DümV analysiert und ein Potential als Zusatzstoff für Kalkdünger identifiziert.

#### Weitere Informationen

<https://www.energetische-biomassennutzung.de/projekte-partner/details/project/show/Project/LaubCycle-688>

Andreas Huft (Hauptautor:in),  
Dr.-Ing. Esther Stahl, Lasse Harloff

Fraunhofer-Institut für Umwelt-,  
Sicherheits- und Energietechnik UMSICHT

[andreas.huft@umsicht.fraunhofer.de](mailto:andreas.huft@umsicht.fraunhofer.de)



## Pülpegas

Jörg Kretzschmar, Florian Geyer, Christian Krebs

# Monovergärung von Weizenpülpe im Labor- und Pilot-Maßstab



## Erschließen von Rest- und Abfallstoffen

### FKZ-Nr. 03EI5442:

Entwicklung einer Pilotanlage zur Vollverwertung von Weizenpülpe und Systemintegration in die industrielle Stärkeproduktion

### Einleitung

Weizenpülpe ist ein in unterschiedlichen Konzentrationen (10-15 % TS) anfallendes, wasserhaltiges Nebenprodukt der Stärkeherstellung und wurde bisher hauptsächlich als Futtermittel z. B. in der Schweinemast verwertet. Im von der Infra-Zeit Servicegesellschaft mbH und dem Deutschen Biomasseforschungszentrum (DBFZ) unter Mitarbeit des Max Rubner-Institut (MRI) bearbeiteten Verbundvorhaben »Pülpegas« soll eine Referenz-Biogasanlage zur vollständigen stofflichen und energetischen Verwertung des Reststoffes Weizenpülpe geschaffen werden. Um notwendige Prozessparameter für die spätere Auslegung der Biogasanlage zu ermitteln, wurden am DBFZ semi-kontinuierliche Versuche im Labor und an der Forschungsbiogasanlage (FBGA) durchgeführt.

### Material und Methoden:

Zur Bestimmung des spezifischen Gasertrages, der Gaszusammensetzung, sowie der notwendigen minimalen Harnstoffdosierung bei der anaeroben Mono-Vergärung von Weizenpülpe wurden zunächst semi-kontinuierliche Laborversuche in Reaktoren mit  $V = 10 \text{ L}$  ( $V_{\text{effektiv}} = 8 \text{ L}$ ) durchgeführt. Die Reaktoren wurden einmal täglich mit Weizenpülpe ( $\approx 70 \text{ g oTS d}^{-1}$ ), 50%iger Harnstofflösung sowie einer Spurenelementlösung beschickt. Nach einer Anfahrphase von 60 Tagen wurde die Zielraumbelastung von  $B_R = 7 \text{ g oTS L}^{-1} \text{ d}^{-1}$  im Reaktor eingestellt und für insgesamt 3 Verweilzeiten (60 d) gehalten. Schwankungen in der Trockensubstanz (TS) und der organischen Trockensubstanz (oTS) unterschiedlicher Pülpe-Chargen wurden durch die Anpassung der täglichen Fütterungsmenge ausgeglichen. Die Auswertung der Prozessdaten erfolgte für die letzte Verweilzeit in einem Beobachtungszeitraum von 19 Tagen.

Mit den Versuchen an der FBGA sollte die Übertragbarkeit in den Praxismaßstab demonstriert und etwaige Probleme beim Upscaling des Prozesses identifiziert werden. Die dafür verwendete Pülpe wurde in einem, mit Rührwerken ausgestatteten Tankwagen mit  $V = 60 \text{ m}^3$  gelagert und mit Wasser auf einen TS – Gehalt von 13–15 % eingestellt.

Die Versuche wurden in einem Rührkesselfermenter mit  $V = 80 \text{ m}^3$  ( $V_{\text{effektiv}} = 60,5 \text{ m}^3$ ) durchgeführt. Nach einer Anfahrphase von 50 Tagen wurde die Zielraumbelastung von  $B_R = 7 \text{ g oTS L}^{-1} \text{ d}^{-1}$  eingestellt und für ca. 3,9 Verweilzeiten (74 Tage) gehalten. Während der Versuchsphase bei  $B_R = 7 \text{ g oTS L}^{-1} \text{ d}^{-1}$  wurde die tägliche Fütterungsmenge ( $\approx 423 \text{ kg oTS d}^{-1}$ ) auf stündliche Fütterungsintervalle verteilt. Die Zugabe von Harnstoff erfolgte einmal täglich,  $\text{FeCl}_3$ -Lösung wurde nach Bedarf ( $> 500 \text{ ppm H}_2\text{S}$  im Biogas) dosiert. Die Auswertung der Prozessdaten erfolgte für die letzte Verweilzeit für einen Beobachtungszeitraum von 21 Tagen.

### Ergebnisse

Im Rahmen der Laborversuche konnte ein spezifischer Biogasertrag der Weizenpülpe von  $667 \text{ mL g oTS}^{-1}$  bei einem  $\text{CH}_4$ -Gehalt von 55 % ermittelt werden, dies entspricht einem spezifischen  $\text{CH}_4$ -Ertrag von  $366 \text{ mL g oTS}^{-1}$ . Die Schwefelwasserstoffkonzentration lag im Mittel bei  $\approx 200 \text{ ppm}$ . Mittels Dosierung von Harnstoff wurde im Beobachtungszeitraum ein mittlerer  $\text{NH}_4$ -N Gehalt von  $\approx 1,4 \text{ g L}^{-1}$  eingestellt. Trotz des sehr niedrigen pH-Wertes

der Pülpe von  $\approx 3,5$  lag der pH-Wert in beiden Fermentern im Beobachtungszeitraum bei  $7,54 \pm 0,09$ . Während bzw. direkt nach der täglichen Substratzugabe sank der pH-Wert allerdings kurzfristig auf pH-Werte  $< 7$  ab, stabilisierte sich im Tagesverlauf aber wieder. Zur Vermeidung von Sinkschichten im Fermenter, ausgelöst durch nicht lösliche Bestandteile der Weizenpülpe, musste mit einer vergleichsweise hohen Rührerdrehzahl von 120 rpm gearbeitet werden.

Bei den Versuchen an der FBGA wurde ein, im Vergleich zu den Laborversuchen, 27 % höherer spezifischer Biogasertrag von  $850 \text{ L kg oTS}^{-1}$  bei einem  $\text{CH}_4$ -Gehalt von 53 % ermittelt. Dies entspricht einem spezifischen  $\text{CH}_4$ -Ertrag von  $460 \text{ L kg oTS}^{-1}$ . Die Schwefelwasserstoffkonzentration stieg teilweise auf Werte über 900 ppm an, woraufhin  $\text{FeCl}_3$ -Lösung zur Reduktion des  $\text{H}_2\text{S}$  Gehaltes eingesetzt wurde. Durch diese Maßnahme konnte die  $\text{H}_2\text{S}$  Konzentration im Beobachtungszeitraum auf  $\approx 380 \text{ ppm}$  gesenkt werden. Mittels Dosierung von Harnstoff wurde ein  $\text{NH}_4$ -N Gehalt von  $\approx 1,9 \text{ g L}^{-1}$  im Fermenter eingestellt. Durch stündliche Beschickung des Fermenters konnten größere pH-Wert Schwankungen, wie sie in den Laborversuchen beobachtet wurden, vermieden werden. Der pH-Wert lag im Beobachtungszeitraum bei 7,66.

Als Ursache für den, im Vergleich zu den Laborversuchen, erhöhten spezifischen Biogas- und Methanertrag sowie den erhöhten  $\text{H}_2\text{S}$ -Gehalt im Rohbiogas, wird die Sedimentation von unlöslichen Bestandteilen der Weizenpülpe und damit die Anreicherung von oTS im Bodenbereich des Fermenters vermutet. Diese Vermutung wird u.a. durch die in den Laborversuchen gemachte Beobachtung zur Sedimentation von Pülpe-Bestandteilen gestützt.

### Zusammenfassung

Bei der Mono-Vergärung von Weizenpülpe im Praxismaßstab ( $V_{\text{effektiv}} = 60,5 \text{ m}^3$ ) wurde ein ca. 27 % höherer spezifischer Biogas- sowie Methanertrag im Vergleich zum Labormaßstab trotz identischer Raumbelastung von  $B_R = 7 \text{ g oTS L}^{-1} \text{ d}^{-1}$  ermittelt. Des Weiteren wurde im Praxismaßstab eine stark erhöhte Schwefelwasserstoffkonzentration von teilweise  $> 900 \text{ ppm}$  ermittelt, welche mittels  $\text{FeCl}_3$ -Lösung auf Werte  $< 500 \text{ ppm}$  eingestellt wurde. Als Ursache für die beobachteten Abweichungen wird die Sedimentation von schwer löslichen Bestandteilen der Weizenpülpe bzw. ausgefallenen Proteinen im Praxismaßstab vermutet.

## Keywords

Weizenpülpe, Biogas, Hochlastvergärung

Dr. Jörg Kretzschmar (Hauptautor:in),  
Florian Geyer, Christian Krebs  
jörg.kretzschmar@dbfz.de  
florian.geyer@dbfz.de

DBFZ Deutsches Biomasseforschungszentrum gemeinnützige GmbH,  
Bereich Biochemische Konversion  
Torgauer Straße 116, 04347 Leipzig

## Pülpegas

Marcus Schmidt

## Untersuchungen zum Potential von Weizenpülpe als Ballaststoffquelle für die Humanernährung

**FKZ-Nr. 03EI5442:**  
Entwicklung einer Pilotanlage zur  
Vollverwertung von Weizenpülpe  
und automatisierte System-  
integration in die industrielle  
Stärkeproduktion - Weizenpülpe  
als Ballaststoffquelle für die  
Humanernährung

Weizenpülpe ist ein Nebenstrom, der bei der Gewinnung von Weizenstärke in großen Mengen anfällt. Im Jahr 2020 wurden in Deutschland 582.168 t Weizenstärke produziert, was mit einer Menge von mindestens 1 Mt Weizenpülpe verbunden war [1]. Die Verwertung der Pülpe erfolgt zurzeit hauptsächlich als Tierfutter. Es ist allerdings anzunehmen, dass die Trockenmasse der Pülpe viele wertgebende Inhaltsstoffe des Weizens enthält, die in der Humanernährung eingesetzt werden können. Insbesondere sind dabei Ballaststoffe und Arabinoxylane zu nennen, die zur Schließung der »Ballaststofflücke« in der Ernährung beitragen können. Der Grund für diese »Ballaststofflücke« liegt in der Herausforderung, die von der europäischen Lebensmittelsicherheitsbehörde (EFSA) empfohlenen mindestens 25 g, besser sogar 30 g, Ballaststoffe pro Tag zu verzehren [2]. Einen Lösungsansatz stellen Lebensmittel dar, die mit Ballaststoffen angereichert wurden. Die Gewinnung dieser Ballaststoffe aus Weizenpülpe stellt dafür einen nachhaltigen Ansatz dar. Besonders hervorzuheben sind dabei die Arabinoxylane des Weizens, die aufgrund ihrer gesundheitsfördernden Wirkung mit einem gesonderten »Health Claim« beworben werden können [3]. Aufgrund des bisher geringen Forschungsinteresses an Weizenpülpe existieren aber kaum Informationen zur Zusammensetzung der Pülpe und den dafür relevanten Einflussfaktoren während und nach der Gewinnung von Weizenstärke. Aus diesem Grund ist es das Ziel dieses Projektes das Potential von Weizenpülpe für die Humanernährung zu untersuchen und einzuschätzen. Dabei spielen neben dem Gehalt an Ballaststoffen und Arabinoxylanen auch molekulare Eigenschaften wie beispielsweise die molare Masse der Arabinoxylane eine wichtige Rolle.

Dazu wurden von zwei Stärkeproduzenten in regelmäßigen zeitlichen Abständen Pülpen als Probenmaterial bereitgestellt. Von Hersteller A wurde Frischepülpe zur Verfügung gestellt, während die Pülpe von Hersteller B thermisch behandelt wurde, um den Wasseranteil zu verringern. Die Pülpen wurden zunächst hinsichtlich ihrer Zusammensetzung untersucht. Aufgrund der geringen Löslichkeit von Ballaststoffen und der potentiellen Nutzung wasserlöslicher Bestandteile als Fermentationssubstrat in der Biogasherstellung wurden die sedimentierbaren Feststoffe mittels Zentrifugation abgetrennt. Die erhaltenen Sediment-Proben wurden bezüglich der Gehalte an Ballaststoffen, Stärke, Protein und löslichen Mono- und Disacchariden, sowie Polyolen untersucht. Aufgrund des besonderen ernährungsphysiologischen Wertes von Arabinoxylanen wurden diese zusätzlich, getrennt nach wasserlöslich und wasserunlöslich mittels Hochleistungsanionenaustauschchromatographie mit gepulster amperometrischer Detektion (HPAEC-PAD) bestimmt. Um die enthaltenen Arabinoxylane weiter zu charakterisieren wurden das Arabinose/Xylose-Verhältnis und mittels Gelpermeationschromatographie (GPC) die molare Masse bestimmt. Der Trockenmassegehalt der untersuchten Pülpen von Hersteller A und B lag bei durchschnittlich 9 bzw. 18%. Dabei zeigte sich auch eine deutlich höhere Variabilität der Trockenmassen von Hersteller B. Die Zusammensetzung der Trockenmasse war für beide Hersteller vergleichbar mit ca. 70% Stärke, 16% Protein, 10% Ballaststoffen und 3% löslichen Mono- und Disacchariden, sowie Polyolen. Nach Zentrifugation zeigte die Massenbilanz, dass 66% der ursprünglich eingesetzten Trockensubstanz im Sediment enthalten waren, während die verbleibenden 34% als gelöste Stoffe im Überstand vorlagen. Die Analyse der im Überstand enthaltenen Inhaltsstoffe zeigte insbesondere hohe Gehalte an Glucose und Fructose, sowie wasserlöslichen Ballaststoffen und Proteinen, wodurch dieser ein interessantes Substrat für die Biogasproduktion darstellt.

### Keywords

Weizenpülpe,  
Ballaststoffe,  
Arabinoxylane,  
Humanernährung



### Erschließen von Rest- und Abfallstoffen

Die Untersuchungen zur Zusammensetzung der Sedimente ergaben durchschnittlich für Stärke, Protein, lösliche und unlösliche Ballaststoffe Gehalte von 70%, 10%, 2,5% und 15% für Hersteller A, bzw. 78%, 9%, 2,5% und 6% für Hersteller B. Die gesamt-Ballaststoffgehalte im Sediment von Hersteller A (15 – 20%) waren dabei signifikant höher als von Hersteller B (7,5 – 9,0%), was einen wertgebenden Aspekt für die Verwendung in der Humanernährung darstellt. Im Zuge einer Massenbilanz konnte darüber hinaus festgestellt werden, dass 97% und 23% der ursprünglich vorhandenen unlöslichen und löslichen Ballaststoffe im Sediment enthalten waren. Die Arabinoxylangehalte in der Trockenmasse der Sedimente lagen zwischen 2,0 und 7,5%, wobei wiederum signifikant höhere Gehalte in den Proben von Hersteller A zu finden waren, was hauptsächlich auf den höheren Gehalt wasserunlöslicher Arabinoxylane zurück zu führen ist. Die Arabinose/Xylose Verhältnisse lagen zwischen 0,5 und 0,7, was dem typischen Bereich von Weizen-Arabinoxylanen entspricht. Unterschiede zwischen den Herstellern zeigten sich wiederum beim Molekulargewicht der Arabinoxylane, das eine Kenngröße für die ernährungsphysiologische Wertigkeit darstellt. Obwohl die Molekulargewichte starken Schwankungen unterlagen wiesen die Proben von Hersteller B mit  $1 \cdot 10^6$  Da insgesamt geringere Molekülgrößen verglichen mit Hersteller A ( $2,5 \cdot 10^6$  Da) auf.

Zusammenfassend haben die Arbeiten gezeigt, dass Weizenpülpe ein Nebenstrom mit bisher unzureichender Nutzung wertvoller Inhaltsstoffe darstellt, insbesondere da er in großen Mengen anfällt. Bereits durch Abtrennung des flüssigen Überstandes kann ein Substrat mit, für die Humanernährung, wertvollen Inhaltsstoffen gewonnen werden. Neben Stärke und Protein ist insbesondere der hohe Ballaststoffgehalt hervorzuheben, der einen nachhaltigen Beitrag zur Schließung der »Ballaststofflücke« leisten kann. Auch für Arabinoxylane stellt Weizenpülpe eine geeignete Quelle zur Gewinnung dar, die in Zukunft stärker genutzt werden sollte. Bevor die Nutzung von Weizenpülpe für die Humanernährung umgesetzt werden kann müssen allerdings weitere Informationen bezüglich der Einflussfaktoren auf die Zusammensetzung der Pülpe generiert werden. So ist aktuell der Einfluss des eingesetzten Weizens, des Verfahrens der Stärkegewinnung, der Lagerdauer der Pülpe und einer eventuellen Temperaturbehandlung der Pülpe noch unzureichend untersucht. Darüber hinaus sollte in weiteren Arbeiten auch die Gewinnung der wertgebenden Inhaltsstoffe aus dem Sediment untersucht werden.

[1] Statistisches Bundesamt (2021): Produktionsmenge von Weizenstärke in Deutschland von 2009 bis 2020 (in Tonnen) [Graph]. In: Statista (03.09.2021).

[2] EFSA (2010): Scientific Opinion on Dietary Reference Values for carbohydrates and dietary fibre. In: EFSA Journal, 8(3).

[3] Kellow, N.J.; Walker, K.Z. (2018): Authorised EU health claim for arabinoxylan. In Foods, Nutrients and Food Ingredients with Authorised EU Health Claims, 2018, pp. 201-218.

### Literatur

Dr. Marcus Schmidt  
marcus.schmidt@mri.bund.de

Institut für Sicherheit und Qualität bei Getreide,  
Max Rubner-Institut, Bundesforschungsinstitut für  
Ernährung und Lebensmittel  
Schützenberg 12, 32756 Detmold

**BioReSt**

Marion Schomaker, Sören Kamphus, Elmar Brüggig

## Vorbehandelte Reststoffe als Substrat in Biogasanlagen

**FKZ-Nr. 03EI5406:**  
Regionale Vorbehandlungskonzepte zur nachhaltigen Reststoffnutzung in Biogasanlagen

Angesichts der begrenzten Förderung durch das Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG) stehen viele Betreiber von Biogasanlagen vor der Herausforderung, ihre Anlagen zukunftsfähig aufzustellen und ihre Wirtschaftlichkeit zu steigern. Dabei spielt die Erweiterung des Substratmixes und die Einhaltung von Grenzwerten eine entscheidende Rolle. Gemäß dem EEG 2021 gilt für neu geförderte Biogasanlagen eine jährliche Begrenzung von maximal 40 Massenprozent für den Einsatz von Getreidekorn und Mais als Substrat. Um diese Vorgaben einzuhalten und gleichzeitig die Anlagenleistung zu erhöhen, bietet der vermehrte Einsatz von Reststoffen eine Lösung. Landwirtschaftlichen Nebenprodukte sind oft kostengünstige Substrate, allerdings weisen sie oft ohne Vorbehandlung eine relativ geringe Vergärbarkeit auf. Daher sind geeignete Vorbehandlungsmethoden erforderlich, die die Effizienz der Vergärung verbessern und gleichzeitig ökonomisch und ökologisch valide sind.

### Das Projekt BioReSt

#### Zielsetzung

Das Projekt BioReSt konzentrierte sich auf die nachhaltige Nutzung von Reststoffen in Biogasanlagen. Das Ziel des Projektes war es, geeignete Vorbehandlungsmethoden für landwirtschaftliche Nebenprodukte zu entwickeln, um ihre Vergärbarkeit zu verbessern. Diese Reststoffe sind oft kostengünstige Substrate, die ohne Vorbehandlung nur schwer vergärbar sind. Durch eine effektive Vorbehandlung wurden die Reststoffe besser nutzbar gemacht, um die Biogasproduktion und damit die Leistung der Anlagen zu steigern.

#### Vorgehensweise

Zu Beginn des Projektes wurden dazu exemplarisch für verschiedene Reststoffkategorien eine Auswahl von sechs Reststoffen getroffen: strohhaltiger Pferde- und Rindermist, Gersten- und Rapsstroh, Kartoffelkraut und Grasschnitt. In einer ersten Versuchsreihe wurde systematisch der Effekt verschiedener Kombinationen aus mechanischer, basischer und enzymatischer Vorbehandlung auf die Vergärung bzw. den Methanertrag der sechs Reststoffe untersucht. Dazu wurden alle Substrate zunächst mechanisch mit einem Prallreaktor zerkleinert. Anschließend erfolgte die basische Behandlung mit Ammoniak und die biologische Behandlung mit einer Enzymmischung. Die besten Ergebnisse der Versuchsreihen im Batch-Maßstab wurden in den technischen Maßstab übertragen. Dabei wurden neben dem Methanertrag und der Möglichkeiten der Ertragssteigerung auch die Kosten und die Umsetzung in die Praxis berücksichtigt.

### Keywords

Vorbehandlung,  
Prozessoptimierung,  
landwirtschaftliche  
Nebenprodukte,  
Bioenergie

Marion Schomaker (Hauptautor:in),  
Sören Kamphus,  
Dr.-Ing. Elmar Brüggig  
marion.schomaker@fh-muenster.de

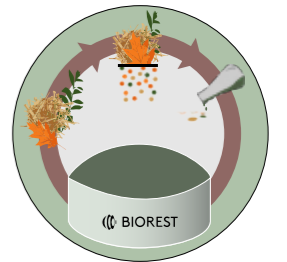
FH Münster, Fachbereich Energie Gebäude Umwelt  
sowie Institut für Energie, Ressourcen und  
Infrastruktur,  
Stegerwaldstr. 39, 48565 Steinfurt

### Ergebnisse

In der letzten Projektphase wurden kontinuierliche Versuche in unterschiedlichen Maßstäben durchgeführt und die Vorbehandlungskombinationen aus den Batch Versuchen erprobt.

Untersuchung im technischen Maßstab von vorbehandeltem Rindermist, Gras und Rapsstroh in Rührkessel-Reaktoren (12 L Gärrest). Der Vergleich in diesem Maßstab zeigte, dass die Vorbehandlung ohne die basische Komponente auskommt.

- **Finale Vorbehandlungskombination für diese Substrate:**
  - **Rapsstroh:** Vorbehandlung mit Gülle, im Projekt 24 h, Massenverhältnis der Substrate 1:1 (Trockenrückstand der Mischung: 40 Gew.-%), Methanmehrertrag: 10 %
  - **Rindermist:** Vorbehandlung mit Gülle und Enzymen, im Projekt 24 h, Massenverhältnis der Substrate 1:1 (Trockenrückstand der Mischung: 15 Gew.-%), Enzymdosierung: 100 ppm (19 g/tFM (Rindermist)), Methanmehrertrag: 11 %
  - **Gras:** Vorbehandlung mit Gülle und Enzymen, im Projekt 24 h, Massenverhältnis der Substrate 1:1 (Trockenrückstand der Mischung: 10 Gew.-%), Enzymdosierung: 200 ppm (22 g/tFM (Gras)), Methanmehrertrag: 11 %
- **Verwendung von Rapsstroh an einer Praxisanlage:**  
Der Betreiber hat erstmalig auf seinen Rapsflächen auch das Rapsstroh geborgen. Die Lagerung erfolgt zunächst als Schüttung im Fahrsilo der Anlage. Es wurden täglich 300 kg Rapsstroh eingesetzt, solange eine ausreichende Menge vorhanden war (etwa 4 Wochen). Das Ergebnis: bei der Lagerung keine Erwärmung der Schüttung, die Durchmischung mit Wirtschaftsdünger im Futtermischwagen als Vorbehandlung erwies sich als problemlos, während und nach den Versuchen lief der Anlagenbetrieb ohne besondere Vorkommnisse, Anlagenbetreiber war zufrieden.
- **Expertenumfrage zum Einsatz von Reststoffen:**  
Die befragten Betreiber planen mit einem vermehrten Einsatz von Reststoffen zur Biogasproduktion: 25 % möchten zukünftig über 50 % Reststoffe als Substrat einsetzen, somit steigern 6 % der Befragten den Reststoffanteil in ihren Anlagen. Gleichzeitig werden Herausforderungen benannt, die ein Drittel der Betreiber im Bereich Rührtechnik sehen. Weitere Punkte sind begrenztes Behältervolumen (18 %), Pumpentechnik (16 %) sowie Beschaffung und Verfügbarkeit von Reststoffen (16 %). Bereits geplante Änderungen der Anlagenbetreiber verteilen sich über alle Anlagenbereiche, z.B. mehr Einsatz von Mist, Einbau neuer Rührwerke oder Erhöhen des Gasspeichers. Forschungsbedarf wurde von den Befragten zu Themen verschiedener Bereiche des Anlagenbetriebes benannt, unter anderem zu Abfall/Reststoffen in Biogasanlagen, Rührwerks-, Eintrags- und Ausbringungstechnik, Power-to-Gas-Steigerung des Methananteils durch Wasserstoffzufuhr sowie das Thema Gärrestaufbereitung.



### Ausblick

Im Laufe des Projekts zeigte sich ein erhebliches Interesse an der Verwendung von Reststoffen. Biogasanlagenbetreiber waren bereit diese einzusetzen. Dennoch bestehen genehmigungsrechtliche Bedenken hinsichtlich des umfangreichen Einsatzes von Reststoffen in den Anlagen. Im Rahmen des Projekts wurden verschiedene Fragestellungen und Ideen aufgeworfen, die vom Projektteam weiterentwickelt werden, zudem wird das Potenzial für Folgeprojekte geprüft.

### Weitere Informationen

<https://www.energetische-biomassennutzung.de/projekte-partner/details/project/show/Project/BioReSt-625>

**BioRestBrennstoff**

Viktoria Scheff, Gregor Dürl, David Laner, Korbinian Kätzl, Hafiz Ali Raza

## Thermische Verwertung von Siebüberlauf aus der Bioabfallbehandlung vor dem Hintergrund einer energieeffizienten Ressourcennutzung

**FKZ-Nr. 03EI5427:  
Energieeffiziente Nutzung  
sekundärer biogener Rest-  
und Abfallstoffe in Biomasse-  
feuerungen durch stufenweise  
Aufbereitung und Brennstoff-  
konfektionierung**

Energie aus Biomasse nimmt aufgrund ihrer vielfältigen Nutzungsmöglichkeiten in allen Sektoren (Wärme, Strom, Verkehr) mit einem Anteil von 52 % an den erneuerbaren Energien (im Jahr 2022) eine wichtige Stellung im Energiesystem ein [1]. Aufgrund diverser limitierender Faktoren wie zum Beispiel begrenzte Ressourcen- und Flächenverfügbarkeit und Nutzungskonkurrenzen rücken Stoffströme biogener Rest- und Abfallstoffe im Sinne einer abfall- und reststoffbasierten Bioökonomie zunehmend in den Fokus der Energiebereitstellung [2]. Vor dem Hintergrund einer kreislaforientierten Ressourcennutzung, gilt es daher, die am Ende einer Nutzungskaskade stehenden Stoffströme zu identifizieren (hier sekundäre biogene Rest- und Abfallstoffe) und durch eine entsprechende Nutzbarmachung effizient zu verwerten. Im Projekt BioRestBrennstoff werden für zwei beispielhafte Stoffströme, Siebüberlauf aus der Bioabfallbehandlung und spezifische Reststoffströme aus der Grünlandbewirtschaftung, unter technischen, ökologischen und ökonomischen Aspekten geeignete Aufbereitungsstrategien mit dem Ziel der thermischen Verwertung in Biomasseheizkraftwerken (BMHKWs) entwickelt. In diesem Beitrag werden die Ergebnisse der betrachteten Aufbereitungsstrategien für den Siebüberlauf aus der Bioabfallbehandlung vorgestellt. Dabei handelt es sich um einen sekundären biogenen Abfall, der aus dem letzten Siebschritt mit einer Lochgröße im Bereich von 8 bis 20 mm des Rohkompostes entsteht. Im europäischen Abfallkatalog wird er dem Abfallschlüssel 19 05 01 »nicht kompostierte Fraktion von Siedlungs- und ähnlichen Abfällen« zugeordnet. Aufgrund des hohen Holzanteils im Bereich von 30 bis 50 Ma.-% ist eine Zuordnung zum Abfallschlüssel 19 12 07 »Holz mit Ausnahme desjenigen, das unter 19 12 06 fällt«, also Holz aus der mechanischen Behandlung von Abfällen, das keine gefährlichen Stoffe enthält, ebenfalls einschlägig [3]. Als sekundärer Abfallstrom verlässt der Siebüberlauf die Bioabfallbehandlungsanlage und wird in der Regel in Müllverbrennungsanlagen oder Altholzwerkstätten thermisch verwertet [4]. Ziel dieser Forschungsarbeit ist es, durch geeignete Aufbereitungsmethoden den Holzanteil in einem Biorestbrennstoff-Output aufzukonzentrieren und so zu konditionieren, dass unter Berücksichtigung genehmigungsrechtlicher Anforderungen in Hinblick auf die Verbrennungseigenschaften der Einsatz in Biomasseheizkraftwerken ermöglicht wird.

### Aktivitäten und Maßnahmen

Im Rahmen von insgesamt drei Aufbereitungskampagnen am Standort einer Bioabfallbehandlungsanlage in der Region Kassel wurden verschiedene Aufbereitungsstrategien für den Siebüberlauf umgesetzt und untersucht. In den ersten beiden Aufbereitungskampagnen wurden verschiedene Aggregate für eine mechanisch-technische Aufbereitung eingesetzt. Dabei kamen verschiedene Siebe, Fe-Abscheider und Windsichter der Firma dopstadt zum Einsatz. Durch Materialflussanalysen, manuelle Sortierung und Klassierung der In- und Outputströme wurde der Sortiererfolg bewertet. Mittels Brennstoffanalysen und Verbrennungsversuchen bei 40 kW (Multifire der Firma KWB) mit aufbereiteten Siebüberlauf-Brennstoff-Chargen und -mischungen, wurden die Verbrennungseigenschaften und die Verschlackungsneigung untersucht. Dabei wurde bei den Rostaschen eine erhöhte Agglomerationsneigung festgestellt, was mit den erhöhten gemessenen Elementgehalten an Kalium, Natrium und Chlor in den holzigen Fraktionen in

Verbindung gebracht werden kann. Da es bereits vielversprechende Untersuchungen zur Reduktion dieser in Bezug auf die Verschlackungsneigung und Korrosion kritischen Elemente mit Säure-Waschverfahren gibt [5,6], wurden in einer dritten Aufbereitungskampagne Waschversuche mit dem Siebüberlauf-Holz durchgeführt. Dafür wurden Anlagenteile der IFBB-Testanlage (Integrierte Festbrennstoff- und Biogasproduktion aus Biomasse) [5] an der Universität Kassel eingesetzt, um die Auswaschung kritischer Elementgehalte an den holzigen Bestandteilen zu erproben. Das IFBB-Verfahren wird im Rahmen des Projekts außerdem zur Aufbereitung von Reststoffen aus der Grünlandbewirtschaftung zu Biorestbrennstoff angewendet. Aktuell wird der Einsatz des aufbereiteten Brennstoffes aus dem Siebüberlauf der Bioabfallbehandlung vor dem Hintergrund der ökonomischen Konkurrenzfähigkeit zu regulären Holzbrennstoffen und ökobilanziell im Vergleich zu alternativen Verwertungspfaden betrachtet.

### Ergebnisse

Insgesamt konnte durch rein mechanische Aufbereitungsverfahren die Holzfraktion von anfangs 30-50 Ma.-% auf 70-90 Ma.-% im Biorestbrennstoff aufkonzentriert werden. Eine erneute Absiebung der feinen Kompostfraktion bei 10 mm hat sich dabei als besonders effektiv herausgestellt, da dadurch noch ein Drittel der Gesamtmasse als Kompost abgetrennt werden kann. Weitere Aufbereitungsstufen konnten den Fremdstoffgehalt auf etwa 10 Ma.-% reduzieren. Darüber hinaus werden noch weitere Aufbereitungsschritte, wie eine Schwergutabscheidung und eine sensorbasierte Sortierung zur weiteren Reduktion des Fremdstoffgehaltes empfohlen. Bei den Waschversuchen wurde bei der reinen Holzfraktion der größte Effekt bei vorzerkleinertem Material mit abgesiebter Feinfraktion < 2 mm festgestellt. Der Aschegehalt konnte dadurch um knapp 70 % auf 2,9 Ma.-% reduziert werden. Auch die Reduktion der kritischen Elemente Kalium (von 3,5 auf 0,9 Ma.-%) und Chlor (von 0,93 auf 0,19 Ma.-%) sowie die hohe Ascherweichungstemperatur von 1.150 °C stellen bezüglich geringerer Verschlackungsneigung vielversprechende Ergebnisse dar. Die Ergebnisse der ökologischen und ökonomischen Bewertung stehen noch aus und können voraussichtlich in Form von Zwischenergebnissen im Rahmen des Beitrags zur Diskussion gestellt werden.

[1] Umweltbundesamt: Erneuerbare Energien in Zahlen. <https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/erneuerbare-energien/erneuerbare-energien-in-zahlen#uberblick>, (Stand 30.05.2023).

[2] Thrän, D. (ed) (2015): Smart Bioenergy: Technologies and concepts for a more flexible bioenergy provision in future energy systems, Springer International Publishing, Switzerland.

[3] Gallery S., Hüttner A., Turk T. et al (2021), Optimierte Verwertung von Siebresten aus Biogutvergärungs- und -kompostierungsanlagen (Sieb-OPTI), Schlussbericht.

[4] Schrägle, R. (2018): Siebüberläufe aus der biologischen Behandlung – Anforderungen, Markt und Perspektiven, Humustag der BGK Bundesgütegemeinschaft Kompost e.V.

[5] Bühle, L.; Hensgen, F.; Urban, A.; Wachendorf, M.; Dürl, G. (2014): Effects of hydrothermal conditioning and mechanical dewatering on ash melting behavior of solid fuel produced from European semi-natural grassland. Fuel, 118 123/129. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2013.10.063>

[6] Mlonka-Medrała, A., Magdziarz, A., Gajek, M., Nowinska, K.; Nowak, W. (2020): Alkali metals association in biomass and their impact on ash melting behaviour. Fuel, 261. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2019.116421>



### Literatur

### Keywords

sekundäre biogene Rest- und Abfallstoffe, Brennstoffaufbereitung, Verbrennungseigenschaften, Verschlackung, thermische Verwertung, Ressourcennutzung

Viktoria Scheff<sup>1</sup> (Hauptautor:in),  
Gregor Dürl<sup>1</sup>, Prof. Dr. David Laner<sup>1</sup>  
(Hauptautor:in), Korbinian Kätzl<sup>2</sup>,  
Hafiz Ali Raza<sup>2</sup>  
scheff@uni-kassel.de  
david.laner@uni-kassel.de

<sup>1</sup> Universität Kassel, Fachgebiet  
Ressourcenmanagement und Abfalltechnik  
Mönchebergstraße 7, 34125 Kassel  
<sup>2</sup> Universität Kassel, Fachgebiet  
Grünlandwissenschaft und Nachhaltende  
Rohstoffe

**Sludge2P**

Lars Gronen, Kevin Stephan, Hans-Peter König, Uwe Siemann, Luigi Cattini, Peter Drissen, Wolfgang Krumm

## Erkenntnisse und Ergebnisse des Projektes Sludge2P: Erfolgreiche Nutzung von Klärschlammasche zur Gewinnung von P-Düngemitteln und Synthesegasen mittels IPV-System

**FKZ-Nr. 03EI5411:**  
Energieautarke Rückgewinnung  
von Phosphaten durch  
ganzheitliche Klärschlamm-  
verwertung mit integrierter  
Wasserstoffgewinnung

Im Projekt Sludge2P soll ein Prozessweg zur möglichst ganzheitlichen Nutzung von Klärschlamm entwickelt und erprobt werden. Dies geschieht in einer Kombination verschiedener Prozessschritte, deren benötigte Energiemenge gänzlich durch den eingesetzten Klärschlamm gedeckt werden soll und im Idealfall auch noch einen Energieüberschuss für anderweitige Nutzung erzielt. Neben der gewonnenen Energie soll weiterhin das in der erzeugten Asche angereicherte Phosphat thermo-chemisch so aufbereitet werden, um als Phosphatdüngemittel nutzbar zu sein.

Im ersten Schritt wird über die Nutzung einer integrierten Pyrolyse- und Verbrennungsanlage (IPV) aus dem getrockneten Klärschlamm im Pyrolyseschritt ein Synthesegas und Pyrolysekoks gewonnen. Im Laborversuch konnte vorab gezeigt werden, dass die Wasserstoffausbeute durch die Nutzung von weiteren Reststoffen wie Fette und Rechengut, welche ebenfalls in Kläranlagen anfallen, deutlich gesteigert werden konnte. Durch das Separieren des Synthesegases in Kohlenstoffmonoxid und Wasserstoff kann einerseits die nötige Prozessenergie bereitgestellt werden und andererseits der Wasserstoff für anderweitige Prozesse Verwendung finden. Anhand von Laboruntersuchungen und numerischen Prozessmodellen konnte die potenzielle Zusammensetzung der Synthesegase und die Energieautarkie des Gesamtprozesses bereits nachgewiesen werden (Stephan et al. (in prep.)). Während des Pilotbetriebes der IPV-Anlage werden die Wärmeflüsse und Stoffströme detailliert überwacht und aufgezeichnet, um eine Gesamtbilanzierung der erzeugten Energiemengen (Synthesegas + erzeugter Wärme) zu erstellen. Die in der IPV-Anlage erzeugten Stoffströme wie z.B. Teer, Pyrolysekoks und die Klärschlammasche, werden im Einzelnen weitergehend untersucht.

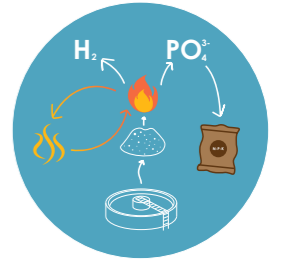
Im zweiten Schritt wird die erzeugte Klärschlammasche thermo-chemisch mit alternativen Ca-Si-Trägern behandelt, um das in der Asche vorhandene Phosphat in spezifischen Mineralphasen zu binden, von denen in vorherigen Versuchen hohe Phosphatverfügbarkeiten nachgewiesen werden konnten. Diese Versuche wurden im Labor- und Technikums Maßstab anhand von exemplarischen Klärschlammaschen aus einer konventionellen Verbrennungsanlage durchgeführt (Gronen et al., 2022). Dabei zeigt sich, dass vor allem mit einer Mischung aus Ca-reichen Schlacken aus der Sekundärmetallurgie und reinem Branntkalk die besten Ergebnisse in Bezug auf die Phosphatverfügbarkeit erzielt werden. Dies wurde nicht nur in Extraktionsversuchen, sondern auch in breit angelegten Raps- und Mais-Gefäßversuchen stichhaltig nachgewiesen.

**Keywords**

Energieautark,  
Klärschlammaschen,  
P-Recycling, Wasserstoff-  
und Energiegewinnung


**Nachhaltige Kreisläufe**

In dieser Arbeit werden die Gesamtergebnisse der individuellen Prozessschritte dargestellt und im Kontext der derzeit erhobenen Daten aus der IPV-Anlage diskutiert. Dazu werden die Zusammensetzungen der erzeugten Synthesegase sowie die erzeugte Wärmemenge dargestellt, um die Energieautarkie des Gesamtsystem quantitativ bewerten zu können. Weiterhin werden die chemischen und mineralogischen Zusammensetzungen der im Pilotbetrieb erzeugten Aschen diskutiert und die Ergebnisse der Phosphatverfügbarkeit der thermo-chemischen behandelten Produkte anhand von chemischen Extraktionsverfahren bewertet.



K. Stephan, L. Gronen, H.-P. König, U. Siemann W. Krumm (2023): Modelling of gasification of sewage sludge for hydrogen generation and phosphorus recovery, ChemIngTech, Wiley, in prep.

L.H. Gronen, H.-P. König, D. Algermissen, M. Gebser, K. Stephan, U. Siemann, P. Drissen & W. Krumm (2022): Modification of the sewage sludge ash P-mineralogy by thermo-chemical treatment with LF-slugs, in: Vorträge-Konferenzband zur 16. Recy & DepoTech-Konferenz, Hrsg.: R. Pomberger et al., p. 665-672, Leoben, Österreich

**Literatur**

Dr. rer. nat. Lars Gronen (Hauptautor:in)<sup>1</sup>,  
Kevin Stephan<sup>2</sup>, Dr. sc. agr. Hans-Peter König<sup>1</sup>,  
Uwe Siemann<sup>3</sup>, Luigi Cattini<sup>4</sup>,  
Dr.-Ing. Peter Drissen<sup>1</sup>,  
Univ. Prof. Dr.-Ing Wolfgang Krumm<sup>2</sup>  
  
l.gronen@fehs.de

<sup>1</sup> FEHS-Institut für Baustoff-Forschung e.V.  
Bliersheimerstraße 62, 47229 Duisburg  
<sup>2</sup> Universität Siegen, Lehrstuhl für Energie-  
und Umweltverfahrenstechnik  
Paul-Bonatz-Str. 9 – 11, 57076 Siegen  
<sup>3</sup> ESi Entsorgungsbetrieb der Stadt Siegen  
Goldammerweg 30, 57080 Siegen  
<sup>4</sup> Montanuniversität Leoben, Lehrstuhl für  
Nichteisenmetallurgie  
Franz-Josef-Straße 18, A-8700 Leoben

## Emissionsreduzierung bei der Bioabfallbehandlung, insbesondere bei der Gärproduktnachbehandlung/-kompostierung

**FKZ-Nr. 281B303316:**  
Klimaschutzorientierte  
Bioabfallverwertung für  
die Landwirtschaft

Zur Erreichung der Klimaschutzziele, müssen in allen Sektoren die Potentiale zur Vermeidung von klimawirksamen Gasen ausgeschöpft werden.

In dem Vorhaben »KlimaBioHum« wurden verschiedene Verfahren zwölf bundesweiter Bioabfallbehandlungsanlagen emissionstechnisch untersucht und Emissionsminderungsstrategien für die Behandlung von Bioabfällen bzw. deren Verarbeitung zu Kompostprodukten erarbeitet. Zu den Anlagen gehören unter anderem Kompostierungsanlagen und Vergärungsanlagen mit nachgeschalteter Kompostierung.

Ziel des Vorhabens war es, eine Pilotversion für eine klimaschutzorientierte Gütesicherung für Bioabfallbehandlungsanlagen zu erarbeiten. Dies ist eine wichtige Grundlage zur Vermarktung von Bioabfallkomposten in Anwendungen mit hohen Nachhaltigkeitsansprüchen und zum Aufbau zugehöriger Geschäftsmodelle (incl. Messung, Evaluierung, Zertifizierung). Eine weitere Zielstellung war, die Entstehung von Methan, Lachgas und Ammoniak (indirektes wirkendes THG) während der Kompostierung und die Interaktion mit diversen Betriebsparametern noch genauer zu verstehen, um Strategien zur Vermeidung der klimawirksamen Gase ableiten zu können.

Für die Bestimmung der THG-Emissionen während des Kompostierungsprozesses kamen mehrere emissionstechnische Feldmessmethoden zum Einsatz. Die relevanteste Methode zur Quantifizierung der Gase Methan, Lachgas und Ammoniak als massenspezifische Tagesemissionswerte waren Windtunnelmessungen (Haubenmessungen). Das grundlegende Messprinzip mobiler Hauben oder Windtunnel beruht auf dem Aufsetzen der Haube auf ein Teilstück der emissionsaktiven Oberfläche. Die Haube schließt somit eine definierte, emissionsaktive Fläche bzw. Volumen ein. Durch die Bestimmung eines oberflächen- bzw. volumenspezifischen Emissionsfaktors lässt sich die Emissionsrate der gesamten Miete extrapolieren. In Abhängigkeit des eingeschlossenen Volumens bzw. der eingeschlossenen Fläche müssen mehrere Einzelmessungen auf verschiedenen Teilstücken der Oberfläche durchgeführt werden um die Messunsicherheit bei der Extrapolation der Emissionsrate auf ein Minimum zu reduzieren. Um die Anzahl von Einzelmessungen bei einer Messung je Miete zu halten, wurde daher ein Windtunnel mit sehr großer Grundfläche auf die Mieten aufgesetzt. Die Bestimmung des Gesamt-C bzw. Methans erfolgte entsprechend der VDI 3481 Blatt 4 und wird durch eine kontinuierliche Probenahme über einen Flammenionisationsdetektor (FID) bestimmt. Des Weiteren werden diskontinuierlich Proben gezogen und in evakuierte Vials überführt. Die Proben in den Vials werden im Labor mit Hilfe eines Gaschromatographen mit Autosampler und (FID) für Methan (DIN EN ISO 25139:2011-08) und Elektroneneinfangdetektor (ECD) für Lachgas (VDI 2469 Blatt 1) analysiert. Ammoniak wird über zwei in Reihe geschaltete Gaswaschflaschen mit 0,05 molarer  $H_2SO_4$ -Lösung in dem Windtunnel beprobt und im Labor photometrisch (VDI 3496 Blatt 1) bestimmt.

Neben den Windtunnelmessungen wurden noch weitere Feldmessmethoden herangezogen. Es wurden tiefendifferenzierte Porengas- und Temperaturmessungen durchgeführt und die Schüttdichte der jeweiligen Substrate bestimmt. Mit Hilfe dieser einfachen Feldmessmethoden können Erkenntnisse hinsichtlich der Entstehung von THG-Emissionen bei der Kompostierung ermittelt werden.

Ergebnisse der emissionstechnischen Untersuchungen zeigen managementabhängig teilweise hohe Emissionen bei der Kompostierung. Bei ungünstiger Kombination relevanter Betriebsparameter in der Kompostierungsstufe kann die zweistufige Behandlung in Form von Vergärung mit anschließender Kompostierung (Nachrotte) höhere THG-Emissionen zur Folge haben als die einstufige Kompostierung von biologischen Reststoffen. Somit kann der positive Substitutionseffekt des gewonnen Biogases kommt nur dann zum Tragen, wenn die Nachbehandlung der Gärprodukte zur Weiterverarbeitung von Fertigkomposten weitestgehend klimaneutral abläuft. Besonders Gärprodukte weisen nach dem Vergärungsprozess, ohne weitere Aufbereitung, anaerobe Milieubedingungen im zu kompostierenden Material auf. Daher empfiehlt es sich eine Anpassung der Betriebsparameter beim Ansetzen der Rottemieten vorzunehmen oder eine zusätzlicher Aufbereitungsschritt in Form einer Aerobisierung. Eine unzureichende Sauerstoffversorgung des Rottematerials trägt maßgeblich zur erhöhten Methanbildung bei. Die Sauerstoffzufuhr kann sowohl durch eine zielgerichtete Zugabe von Strukturmaterial in das Rottegut, von einem angepassten Oberflächen-Volumen-Verhältnis mittels Mietengeometrie und Mietenhöhe als auch durch eine aktive Belüftung des Rottegutes verbessert werden.

Zudem konnte festgestellt werden, dass die Lachgasemissionen unter Berücksichtigung der Klimawirksamkeit (umgerechnet auf  $CO_2$ -Äquivalente) je nach Verfahren und zu behandelndem Substrat bis zu 80 % der gesamten Emissionen ausmachen können. Daher sollten zukünftig nicht nur Methan als klimawirksames Gas und Ammoniak als bevorzugt geruchsintensives Gas im Fokus stehen, sondern immer gleichzeitig alle drei Gase berücksichtigt werden.

Aus den Erkenntnissen der Windtunnelmessungen und den Ergebnissen der simultan durchgeführten einfachen Feldmessmethoden (tiefendifferenzierte Porengas-, Temperaturmessungen und Bestimmung der Schüttdichte des Substrates) konnten mittels multiplen Regressionsanalysen Optimierungspotentiale zur Minderung der THG-Emissionen abgeleitet werden, die bisher an zwei Anlagen im Projekt angewendet wurden.

Weiterer F&E-Bedarf ergibt sich besonders in Hinblick auf die Entstehung von Lachgasemissionen im Kompostierungsprozess. Es sind derweil einige Einflussfaktoren aus vorherigen Projekten bekannt. Diese konnten jedoch in diesem Projekt nicht gänzlich bestätigt werden.

Matlach, J.; Cuhls, C.; Daniel-Gromke, J.; Knoll, L.; Reinhold, J. (2022): Ergebnisse der Porengasmessung und Herleitung der Korrelation zwischen der Windtunnelmessung vs. Porengasmessung. Vortrag auf der Abschlussveranstaltung »KlimaBioHum« in Leipzig am DBFZ am 14.12.2022.

### Keywords

Kompostierung,  
Gärprodukte, Bioabfall,  
THG-Emissionen,  
Emissionsmessungen

### Literatur

M. Sc. Julian Matlach

julian.matlach@dbfz.de

Deutsches Biomasseforschungs-  
zentrum gGmbH

Torgauer Str. 116, 04347 Leipzig



Johanna Wiechen, Walter Stinner, Michael F. Goldstein, Jurek Häner, Kim Ove Knutzen,  
Elmar Brüggling, Carolin Brathe, Sascha Hermus

## Innovationen für ein regionales Nährstoffmanagement (Technisch, pflanzen- baulich und managementseitig in Kombination)

### Keywords

Nährstoffkreisläufe,  
Gärproduktaufbereitung,  
Praxis-Vergleich,  
Anbauversuche

Biogasanlagen bündeln und konditionieren nährstoffreiche Stoffströme und können bei richtiger Kombination von Technik und Management gleichzeitig mit den Wirtschaftsdüngern verbundene Hygiene- und Emissionsprobleme minimieren. Aktuell stehen sie aber unter hohem wirtschaftlichem Druck sowohl bezüglich der kostengünstigen Verwertung der Gärreste, als auch in Bezug auf hohe Kosten der NawaRo-Substrate. So sind technisch-managementseitig kosteneffiziente Gesamtlösungen in der Kombination von Aufbereitungstechnologien und angepasstem pflanzenbaulichem Management ein zentraler Baustein, um die Wertschöpfung aus bzw. Wirtschaftlichkeit von Biogasanlagen in den entsprechenden Agrarregionen zu erhalten. Es müssen kostengünstig ausreichende Mengen an N und P aus den Gärprodukten in transportwürdige, marktfähige Formen überführt und dabei emissionsarme Prozessketten vom Anfall des Gärproduktes bis hin zur Aufnahme der Nährstoffe realisiert werden.

Ziel des Vorhabens ist es, praxiserprobte integrierte Lösungen für die Gärrestaufbereitung zu entwickeln und zu bewerten. Da sowohl die Kosten als auch die technischen Risiken mit zunehmendem Aufreinigungsgrad bis hin zur Totalaufbereitung meist überproportional steigen, sollen die innovativen Lösungen der Gärrestaufbereitungsverfahren hinsichtlich der Gesamtkosten optimiert werden. Aufgrund des hohen Problemdrucks ist die Datenlage in Bezug auf Nährstoffflüsse aus der Viehhaltung und aus Biogasanlagen in Niedersachsen besonders gut, was die beispielhafte Bearbeitung dort und Möglichkeit zur bundesweiten Nutzung der Ergebnisse erleichtert.

### Aktivitäten und Maßnahmen

- Vergleichende Erprobung praxisverfügbarer Technik unter verschiedenen Einsatzbedingungen (versch. Substrate, versch. Aufbereitungsgrade, Maschineneinstellungen) – Bereitstellung neutraler Ergebnisse für Anwender und Hersteller (zur Optimierung)
- Weiterentwicklung vielversprechender technischer Ansätze und Herausarbeitung weiteren Forschungsbedarfes, um auch künftig weitere Emissions- und Kostensenkungspotenziale sowie Nährstoffmanagementoptimierungen generieren zu können
- Weiterentwicklung und Erprobung einer vor Ort einsetzbaren Analytik (NIRS), mit dem sowohl die pflanzenbaulich bedarfsgerechte Einsatzkalkulation als auch Verwaltung und Management (Lieferscheine, Stoffstrombilanz, Erkennung von Schwachstellen) massiv vereinfacht werden
- Verbindung praxistauglich optimierter Einsatz unterschiedlicher Gärprodukte mit pflanzenbaulicher Anwendung, um insgesamt effiziente, umweltfreundliche und kostengünstige Lösungen realisieren zu können.

### Ergebnisse

#### Praxis-Vergleich verschiedener Aufbereitungstechniken

Ziel ist die Erfassung von technischen, nährstoffseitigen und ökonomischen Kenndaten verschiedener Biogasanlagen (BGA) auf denen unterschiedliche Aufbereitungstechnologien für Gärprodukte zum Einsatz kommen. Ergänzend zu den vorhandenen werden insbesondere marktgängige Aufbereitungstechnologien verschiedener Hersteller unter variierenden praktischen Rahmenbedingungen getestet und bewertet. Der Vergleich erfolgt in

zwei Schritten: 1) Erfassung des »Ist-Status« von acht landwirtschaftlichen Biogasanlagen. 2) Evaluierung von verschiedenen technischen Lösungen zur Gärrest-Aufbereitung an vier ausgewählten Biogasanlagen im Praxis-Vergleich. Parallel dazu wird die Online-Messung der Nährstoffgehalte von Gärprodukten (mobile NIRS-Analytik) weiterentwickelt.

#### Optimierung der Prozesskette durch innovative Techniken

Zusätzlich werden Verfahren zur Optimierung der Prozesskette von Gärprodukten getestet, die noch nicht am Markt erhältlich sind (Stand 2023). Dazu gehören: die Struvitfällung, Silierversuche mit Einsatz von Gärprodukten, weitere Verfahren zur Phasentrennung sowie der Einsatz von Algen zur Aufbereitung nährstoffarmer Flüssigkeiten. Dies können Flüssigkeiten mit niedrigen Rest-Nährstoffgehalten aus der Gärproduktaufbereitung sein oder auch Oberflächenwasser aus den Fahr-, Abfüll-, Substratlager- und Silierflächen der Anlagen, die bisher knappes Gärrestlager belegen.

#### Nutzung der Gärprodukte: Anbauversuche

Ziel ist es, Fragestellungen zu optimierter Ausbringung, Düngewirkung und Werthaltigkeit unterschiedlicher, insbesondere unterschiedlich transportwürdiger Gärprodukte für die Anwendung in Biogaskulturen sowie ausgewählten Marktfrüchten auch für typische Nährstoffimportregionen/ Marktfruchtregionen zu betrachten. Dabei spielen überregionales Nährstoffmanagement, Nährstoffeffizienz und die Emissionsvermeidung eine besondere Rolle. Dadurch soll ein zielgerichteter Einsatz der Produkte unterstützt werden. Die pflanzenbaulichen Versuche wurden 2021/2022 in Parzellen-Exakt-Versuchen und auf landwirtschaftlichen Praxisflächen angelegt.

#### Weitere Informationen

<https://naehrwert.org/>



Abbildung 1:  
Öffentliche Präsentation  
unterschiedlicher  
Separationstechniken,  
(c) Sascha Hermus

Johanna Wiechen<sup>1</sup> (Hauptautor:in),  
Prof. Dr. Walter Stinner<sup>1</sup>, Michael F. Goldstein<sup>1</sup>,  
Jurek Häner<sup>2</sup>, Kim Ove Knutzen<sup>2</sup>, Dr.-Ing. Elmar  
Brüggling<sup>2</sup>, Carolin Brathe<sup>3</sup>, Sascha Hermus<sup>3</sup>

<sup>1</sup> FH Münster Fachbereich,  
Energie Gebäude Umwelt  
Stegerwaldstr. 39, 48565 Steinfurt  
<sup>2</sup> Niedersachsen Netzwerk Nachwachsende  
Rohstoffe und Bioökonomie e.V. (3N)  
Kompaniestraße 1, 49757 Werlte

<sup>1</sup> DBFZ Deutsches Biomasseforschungs-  
zentrum gemeinnützige GmbH  
Torgauer Straße 116, 04347 Leipzig

**Power-to-Biogas**

Simon Markthaler, Alexander Feldner, Peter Treiber, Jürgen Karl

**FlexBiomethane****IntenseMethane****Katalytische und Biologische Direktmethanisierung von Biogas im Rahmen der Forschungsprojekte Power-to-Biogas, FlexBiomethane und IntenseMethane**

**FKZ-Nr. 03KB165:**  
Erfahrungsbasierte Einsatzplanung für die katalytische Methanisierung von Biogas zur Anlagenflexibilisierung

Biogasanlagen spielen eine tragende Rolle im deutschen Energiesystem. Durch ihre Fähigkeit kontinuierlich erneuerbare Energien zu produzieren, ermöglichen Sie eine bessere Planbarkeit und Stabilität im deutschen Stromnetz. Bei einer nachträglichen Anreicherung des Methangehalts im Biogas können Biogasanlagen neben der Bereitstellung von Strom und Wärme durch eine Einspeisung in das Erdgasnetz zudem zur deutschen Gasversorgung beitragen.

**FKZ-Nr. FNR 22035318:**  
Direktmethanisierung zur Flexibilisierung kleiner und mittlerer Biogasanlagen

Durch den stetigen Ausbau der Erzeugungsleistung von Photovoltaik und Windkraft besteht in Zukunft jedoch die Gefahr, dass bisherige Geschäftsmodelle von Biogasanlagen, wie die kontinuierliche Strom und Wärmeerzeugung über BHKWs unrentabel werden. Aus diesem Grund gewinnt die Flexibilisierung von Biogasanlagen zunehmend an Bedeutung, welche in den Forschungsprojekten Power-to-Biogas, FlexBiomethane und IntenseMethane thematisiert wird.

**FKZ-Nr. 03EI5405:**  
Prozessintensivierung und –flexibilisierung einer mit Bioabfall betriebenen Trockenfermentationsanlage durch die biologische Methanisierung von wasserstoffreichen Synthesegasen

Bei der Methanisierung von Rohbiogas wird das im Biogas enthaltene Kohlenstoffdioxid mithilfe von Wasserstoff zu Methan umgewandelt. Über die Kopplung an einen Elektrolyseur kann die überschüssige elektrische Leistung erneuerbarer Energien zur Methan-anreicherung im Biogas verwendet werden.

Diese Veredelung des Biogases erleichtert die Einspeisung ins Erdgasnetz und damit einhergehend die Sektorenkopplung mit erneuerbaren Energien. Darüber hinaus werden die spezifischen CO<sub>2</sub>-Emissionen und der Substratbedarf von Biogasanlagen deutlich reduziert.

Das Projekt »Power-to-Biogas« greift diese Thematik auf und erweitert den Prozess der Methanisierung von Biogas um eine intelligente und digital vernetzte Anlagensteuerung. Hierfür wird eine umfassende Datenbasis mit den Daten der Biogasanlage, der Methanisierung und des aktuellen Strompreises angelegt, um darauf aufbauend mit Hilfe von »machine learning«-Algorithmen den Gesamtprozess wirtschaftlich zu optimieren. Die Anwendung von »machine learning«-Algorithmen erlaubt es hierbei, den Betrieb des Methanisierungssystems auf die individuelle Umgebung einer jeden Biogasanlage und die Anforderungen des Strommarkts einzustellen und lastflexibel zu gestalten.

**Projektergebnisse**

- Laboruntersuchungen zur Direktmethanisierung von Biogas mit unterschiedlichen Biogaskonzentration an einer zweistufigen 5 kW Laboranlage
- Laboruntersuchungen zur Katalysatordeaktivierungen (Analyse von Kohlenstoffbildung, Ammoniak, Siloxan)
- Demonstration der Direktmethanisierung von Biogas mit intelligenter Regelung an einer industriellen Biomethananlage

**Keywords**

Methanisierung, Biogas, Flexibilisierung, Prozessintensivierung, Biogasanlagen

Im Gegensatz dazu thematisiert das Projekt »FlexBiomethane« die Flexibilisierung von kleineren und mittleren Biogasanlagen, bei denen aufgrund ihrer Größe und ihres Standorts eine Einspeisung in das Gasnetz nicht in Frage kommt. In dem Konzept wird dem Fermenter kontinuierlich Biogas entnommen. Der CO<sub>2</sub>-Anteil wird dabei über Tag zusammen

mit H<sub>2</sub> katalytisch in Methan gewandelt und zurück in den Fermenter gespeist. Dadurch wird der Anteil des Methans im Gasspeichervolumen des Fermenters kontinuierlich erhöht, wodurch über Nacht eine größere Energiemenge zur Ausspeicherung vorhanden ist. Durch die Rückführung des heißen Produktgases in den Fermenter wird zusätzlich eine Beheizung des Fermenters sowie ein verringerter Energieaufwand bei der Durchmischung erreicht. Da auf die Gasnetzeinspeisung verzichtet wird, reduzieren sich der Aufwand und die Kosten gegenüber etablierten Konzepten substantiell.

**Projektergebnisse**

- Laboruntersuchungen zur Methanisierung von Biogas in einem einstufigen additiv gefertigten Reaktorkonzept mit integrierter Direktverdampfung
- Direktbeheizung eines 300 Liter-Labor-Fermenters mit Dampf und heißem Produktgas aus dem Methanisierungsreaktor
- Untersuchung der Einflüsse der zyklischen Gaseinleitung auf die Biologie im Fermenter

Ein Kernproblem der biochemischen Konversion in Biogasanlagen liegt darin, dass Lignocellulosen nur unzureichend umgesetzt werden und bei ligninhaltigen Substraten, insbesondere bei Bioabfällen, hohe Anteile des Heizwertes ungenutzt bleiben und mit den Gärresten verloren gehen.

Dieses Problem wird im Projekt »IntenseMethane« durch eine Kombination einer bestehenden, mit biologischen Abfällen betriebenen, Trockenfermentationsanlage mit einer handelsüblichen Holzvergaseranlage angegangen. Neben holzartiger Biomasse sollen die in der Biogasanlage anfallenden Gärreste im Holzvergaser zu Holzgas umgewandelt werden und in den Fermenter gespeist werden. Der im Holzgas enthaltene Wasserstoff wird von den Mikroorganismen im Fermenter dann zu Methan umgewandelt.

Durch die Kombination der thermochemischen Vergasung und der biochemischen Konversion von Biomasse in Biogasanlagen können wesentliche Nachteile beider Technologien kompensiert werden. So erschweren die im Holzgas enthaltenen höheren Kohlenwasserstoffen (Teere) abhängig von ihrer Zusammensetzung und Menge eine wirtschaftliche Nutzung des Holzgases in nachfolgenden Prozessen (Gasmotor, Brennstoffzelle, Syntheseprozesse). Im Fermenter können diese jedoch durch die Mikroorganismen potentiell umgewandelt werden und so zu einer größeren Biogasanlagen-Effizienz beitragen.

**Projektergebnisse**

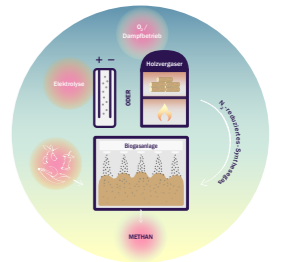
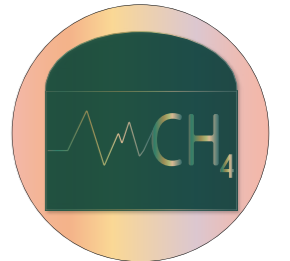
- Kopplung eines LiPRO-Vergasers an eine bestehende Trockenfermentationsanlage
- Einfluss und Nachweis der Prozessintensivierung durch biogenen Wasserstoff im Fermenter
- Reduktion der N<sub>2</sub>-Fracht im Holzgas des LiPRO-Vergasers

**Weitere Informationen**

<https://www.evt.tf.fau.de/>

Simon Markthaler, Alexander Feldner,  
(Hauptautor:in), Dr.-Ing. Peter Treiber,  
Prof. Jürgen Karl

<sup>1</sup> Friedrich-Alexander-Universität  
Erlangen-Nürnberg,  
Lehrstuhl für Energieverfahrenstechnik  
Fürther Str. 244f, 90429 Nürnberg



## Hy2BioMethane

Steffen Lauterbach, Markus Goldbrunner

## Direkte Nutzung des Prozesswassers aus der Druckwasserwäsche als CO<sub>2</sub>-Quelle für die biologische Methanisierung – erste Einblicke in die Ergebnisse des Projektes Hy2BioMethane

**FKZ-Nr. 03EI5431:**  
**Prozesstechnische Einbindung eines Rieselbettreaktors für die biologische Methanisierung von Wasserstoff in die Druckwasserwäsche-basierte Biomethanherzeugung**

Biomethan ist chemisch gesehen beinahe identisch mit fossilem Erdgas und eignet sich daher hervorragend als Erdgasersatz, sei es für die Einspeisung ins Erdgasnetz, die Nutzung als Kraftstoff oder für die direkte, lokale Strom- und Wärmeproduktion durch Verbrennung in einem BHKW. Hergestellt werden kann Biomethan durch die Aufbereitung von Rohbiogas aus einer Biogasanlage, indem das energetisch nicht nutzbare Kohlendioxid aus dem Rohbiogasstrom abgetrennt und so der Methananteil im Gasstrom auf Erdgasniveau erhöht wird. Die Methanisierung von Wasserstoff und Kohlendioxid ist eine weitere Möglichkeit Biomethan zu erzeugen, sofern regenerativ erzeugtes H<sub>2</sub> und CO<sub>2</sub> verwendet werden. Das bei der Biogasaufbereitung abgetrennte CO<sub>2</sub> bietet sich als regenerative CO<sub>2</sub>-Quelle für den Methanisierungsprozess an. Für die Biogasaufbereitung als auch den Methanisierungsprozess gibt es verschiedene Verfahren. Im Kontext der biologischen Methanisierung ist der schlechte Phasenübergang der beiden gasförmigen Edukte, insbesondere von H<sub>2</sub>, in die flüssige Phase verantwortlich für die relativ geringe Methanproduktionsrate [1]. Bei der Druckwasserwäsche, einem Verfahren zur Biogasaufbereitung, wird das CO<sub>2</sub> aus dem Rohbiogasstrom mithilfe eines flüssigen Lösungsmittels absorbiert. Wird das beladene Prozesswasser aus der Absorptionskolonne direkt in den Rieselbettreaktor geleitet, so liegt CO<sub>2</sub> bereits in gelöster Form vor. Dies führt zu einem höheren Wasserstoffpartialdruck, wodurch der Phasenübergang von H<sub>2</sub> erhöht wird. Aus diesem Grund wird im Forschungsprojekt »Hy2BioMethane« die prozesstechnische Kombination der Druckwasserwäsche zur Biogasaufbereitung und eines Rieselbettreaktors zur biologischen Methanisierung untersucht. Das Konzept ist in Abbildung 1 graphisch dargestellt. Weiterhin wird der Betriebsdruck im RBR an den Betriebsdruck der Absorptionskolonne angepasst. Dies führt zu einer weiteren Verbesserung des Phasenübergangs von H<sub>2</sub> in die flüssige Phase (Henry-Gesetz). Durch eine intelligente Verschaltung der verschiedenen Wärmequellen (Methanisierung, Elektrolyse) und -senken (Biogasfermenter, Desorptionskolonne der Druckwasserwäsche) innerhalb des Gesamtsystems kann die Gesamteffizienz weiter gesteigert werden. Bei der Nachrüstung einer Bestands-Biomethananlage mit einem Rieselbettreaktor zur biologischen Methanisierung können so Mehrerlöse aus dem Verkauf des zusätzlich erzeugten Biomethans (Erdgasnetz, Kraftstoff) oder durch die Erhöhung der strommarktbasieren Flexibilität des Gesamtsystems erzielt werden.

### Aktivitäten und Maßnahmen

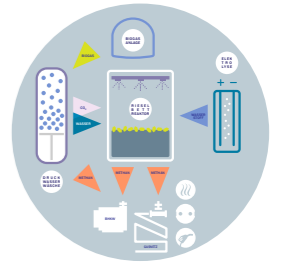
Im Rahmen des Projektes wird die prozesstechnische Kombination der Druckwasserwäsche zur Biogasaufbereitung und einem Rieselbettreaktor zur biologischen Methanisierung im Labormaßstab aufgebaut und experimentell untersucht.

Des Weiteren wird ein dynamisches Simulationsmodell des Gesamtsystems (siehe Abbildung 1) in MATLAB/Simulink entwickelt und anhand der Messergebnisse aus den Laborversuchen validiert. Das Simulationsmodell kann anschließend zur Dimensionierung zukünftiger Anlagen, insbesondere im Hinblick auf die Speicherdimensionierung, sowie

### Keywords

Biomethan,  
 Biogasaufbereitung,  
 Druckwasserwäsche,  
 biologische Methanisierung,  
 Flexibilisierung

## Erzeugung von Biomethan



der Entwicklung einer geeigneten Regelungsstrategie des Gesamtsystems eingesetzt werden. Hierbei liegt ein Fokus auf der flexiblen Betriebsweise des Gesamtsystems zur Entlastung des lokalen Stromnetzes.

### Ergebnisse

Im Rahmen der Statuskonferenz können erste Ergebnisse aus den Laborversuchen mit den beiden Anlagen-Komponenten, Druckwasserwäsche zur Biogasaufbereitung und Rieselbettreaktor zur biologischen Methanisierung, sowie erste Erkenntnisse aus dem Simulationsmodell.

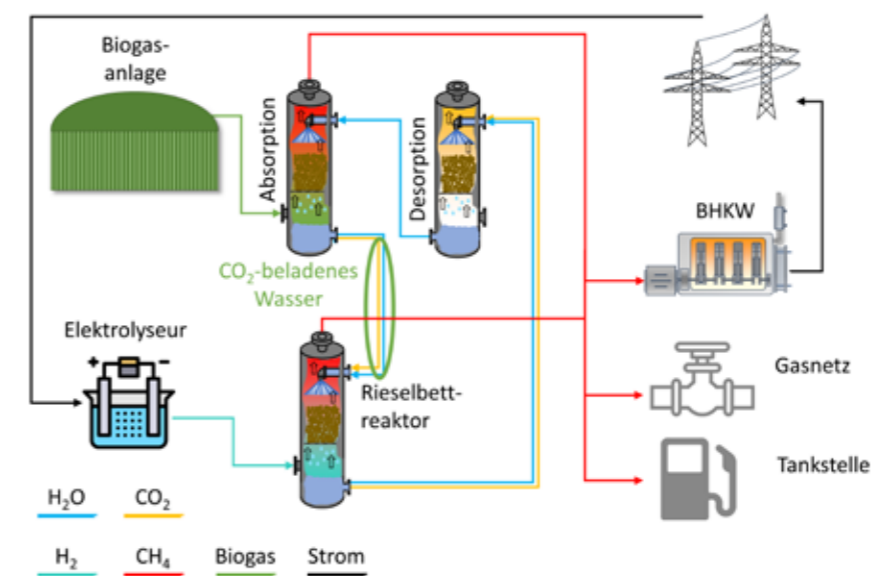


Abbildung 1:  
 Schematische Darstellung des Gesamtsystems des Projekts »Hy2BioMethane«

[1] Baer, K.; Moers, F.; Goetz, M.; Graf, F. (2015): Vergleich der biologischen und katalytischen Methanisierung für den Einsatz bei PtG-Konzepten. In: gwf-Gas, Erdgas (7)

### Literatur

Steffen Lauterbach (Hauptautor:in),  
 Prof. Dr.-Ing. Markus Goldbrunner  
 steffen.lauterbach@thi.de

Technische Hochschule Ingolstadt,  
 Institut für neue Energie-Systeme  
 Esplanade 10, 85049 Ingolstadt  
 www.thi.de/go/energie

## BiRG

Tim Schulzke, Mazloum Sheikh Ayoub, Matthias Prawitz, Joachim Pasel, Remzi Can Samsun, Ralf Peters, Robert Böhm, Ann-Christin Fleeer, Arnd Schmücker

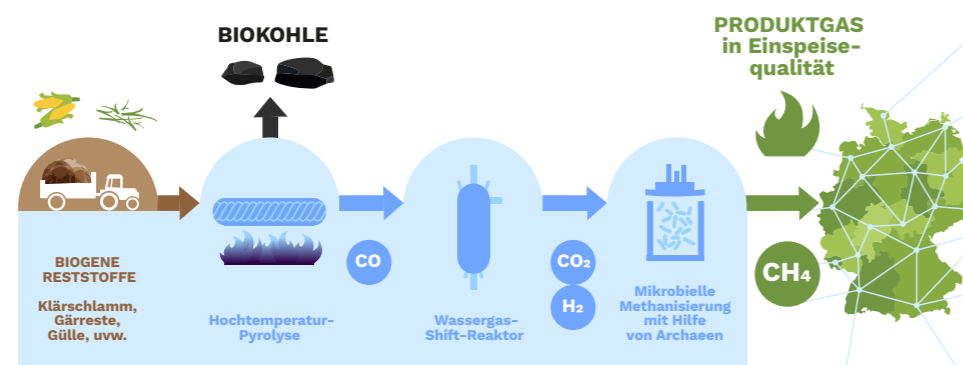
## Umwandlung biogener Reststoffe in Produktgas durch Pyrolyse, Shift und mikrobielle Methanisierung – Prozesskonzept und Versuchsergebnisse

**FKZ-Nr. 03EI5415:**  
Umwandlung biogener Reststoffe in Produktgas durch Pyrolyse, Shift und mikrobielle Methanisierung

In Deutschland fallen jährlich große Mengen an biogenen Reststoffen aus der Landwirtschaft, den Kommunen und der Industrie an. Dazu gehören zum Beispiel Klärschlamm, Gärreste aus Biogasanlagen, Gülle oder auch Hühnerkot, Stroh, Nussschalen, Pferde- und Putenmist. Die Nutzung und Ausbringung der drei erstgenannten Reststoffe auf landwirtschaftliche Flächen tragen zur Nitratbelastung des Grundwassers bei und sind nicht mehr uneingeschränkt in jeder Region möglich. Die Entsorgung stellt für die ansässigen landwirtschaftlichen und industriellen Betriebe sowie die Kommunen eine kostenintensive Aufgabe dar.

Es braucht eine Vor-Ort-Lösung für die lokale Verwertung als Alternative zu dem kostspieligen Transport in Regionen, deren Böden einen Mangel an Stickstoff und weiteren Nährstoffen aufweisen. Hier setzt die energetische Nutzung der biogenen Reststoffe zur Gewinnung von erneuerbaren Energien im Rahmen des Projekts BiRG an. Die biogenen Reststoffe werden durch eine Pyrolyse, eine Reinigungsstufe für das entstehende Synthesegas, einen Wassergas-Shift-Reaktor und eine biologische Methanisierung in Biomethan überführt. Im ersten Schritt erfolgt die Umwandlung der biogenen Reststoffe durch Pyrolyse bei sehr hohen Temperaturen in Rohgas und Biokohle. Ein Teil des Rohgases wird zum Reaktor rückgeführt und zur Befeuerung der Pyrolyse genutzt. In einer Reinigungsstufe werden Staub, höhere Kohlenwasserstoffe und Schwefelverbindungen abgeschieden und anschließend wird in einem Wassergas-Shift-Reaktor das im Rohgas enthaltene Kohlenstoffmonoxid mit Hilfe von Wasserdampf zu Kohlenstoffdioxid und Wasserstoff umgesetzt. Einzellige Mikroorganismen, sogenannte Archaeen, verstoffwechseln dann in der mikrobiellen Methanisierung Wasserstoff und Kohlenstoffdioxid zu Methan. Für diesen biologischen Umsetzungsprozess kommt das BiON®-Verfahren von der Hitachi Zosen Inova Schmack GmbH zum Einsatz. Am Ende der gesamten Prozesskette entsteht ein Produktgas, welches grundsätzlich den Bedingungen der DVGW-Arbeitsblätter G 260/262 entspricht und damit ins öffentliche Gasnetz einspeisefähig ist. Abbildung 1 stellt dieses Prozesskonzept schematisch dar.

Im Verlauf des Projekts wurde die vorhandene Pyrolyseanlage der NPP dahingehend optimiert, dass sie durch Vermeidung von Fremdlufteintrag ein weitgehend stickstofffreies Rohgas erzeugt. Das Forschungszentrum Jülich hat mit Laborversuchen und unter



**Abbildung 1:**  
Prinzipskizze des BiRG-Prozesskonzepts  
(© Joshua Röbisch, DBFZ)

## Erzeugung von Biomethan



Zuhilfenahme von Simulationen ein Konzept entwickelt zur 4-stufigen Umwandlung des Kohlenstoffmonoxids in  $\text{CO}_2$  und dann die entsprechenden Reaktoren gebaut und geliefert. Hitachi Zosen Inova Schmack hat im Unterauftrag von NPP eine Demonstrationsanlage zur Fermentation des konfektionierten Reingases gebaut und geliefert. Die Gasqualität, insbesondere die Konzentration von Katalysatorgiften wie Schwefelverbindungen, wurde durch offline-Proben im Labor der OGE überprüft. Dabei stellte sich heraus, dass der Gesamt-Schwefelgehalt im Rohgas nach der ursprünglich installierten Gasreinigung viel zu hoch war, um den Wassergas-Shift-Reaktor länger betreiben zu können. Daher wurde einerseits eine Entschwefelung des Rohgases entwickelt, von NPP beschafft und installiert und parallel dazu die Wassergas-Shift-Einheit zusammen mit der biologischen Methanisierung mit Hilfe von Gasen aus Flaschenbündeln in Betrieb genommen und erste Optimierungen durchgeführt. Da das Verhältnis von Wasserstoff zu Kohlenstoffdioxid im Austritt der Wassergas-Shift-Stufe bei weitem nicht den Anforderungen der Methanisierung entspricht, muss Wasserstoff vor der biologischen Methanisierung hinzugefügt werden. Dieser zusätzliche Wasserstoff wird von NPP bereitgestellt, der über eine Wasserelektrolyse aus Photovoltaik-Strom hergestellt wird. Die PV-Anlage befindet sich auf dem Dach der Versuchshalle und die Elektrolyse in einem Container daneben.

Nachdem die Rohgasentschwefelung installiert und in Betrieb genommen wurde, konnte nachgewiesen werden, dass der Schwefelgehalt ausreichend gesenkt werden kann. Damit war zum Ende des Projekts eine Versuchsfahrt mit der gesamten Prozesskette, angefangen vom Eintrag getrockneter Gärreste aus einer landwirtschaftlichen Biogasanlage in die Pyrolyse bis hin zum Gasaustritt aus dem Methanisierungsreaktor, möglich.

Gegenstand des Beitrags sind die Prozessentwicklung, die Inbetriebnahmeversuche von Wassergas-Shift und biologischer Methanisierung mit synthetischen Gasgemischen, die Gasentschwefelung, der Versuchsbetrieb mit der gesamten Prozesskette sowie erste orientierende Ergebnisse zur energetischen Bilanzierung des Gesamtprozesses.

Tim Schulzke<sup>1</sup> (Hauptautor:in), Mazloum Sheikh Ayoub<sup>2</sup>, Matthias Prawitz<sup>3</sup>, Dr. Joachim Pasel<sup>3</sup>, Dr. Remzi Can Samsun<sup>3</sup>, Prof. Dr. Ralf Peters<sup>3</sup>, Robert Böhm<sup>4</sup>, Dr. Ann-Christin Fleeer<sup>5</sup>, Dr. Arnd Schmücker<sup>5</sup>  
tim.schulzke@umsicht.fraunhofer.de

<sup>2</sup> New Power Pack GmbH  
Kopernikusstraße 23, 49377 Vechta  
<sup>3</sup> Forschungszentrum Jülich GmbH, Institut für Energie- und Klimaforschung – Elektrochemische Verfahrenstechnik (IEK-14)  
Wilhelm-Johnen-Straße, 52428 Jülich  
<sup>4</sup> Hitachi Zosen Inova Schmack GmbH  
Bayernwerk 8, 92421 Schwandorf  
<sup>5</sup> Open Grid Europe GmbH  
Gladbecker Straße 404, 45326 Essen

<sup>1</sup> Fraunhofer-Institut für Umwelt-, Sicherheits- und Energietechnik UMSICHT  
Osterfelder Straße 3, 46047 Oberhausen

## Posterausstellung

-   **90 Thermische Verwertung von biogenen Reststoffen aus dem Weinbau zur energetischen Versorgung von Winzereien**  
*Felipe Torres-Rivera, Patrick Beuel, Christian Rohloff, Wolfgang Flach, Thomas Mockenhaupt*
-  **91 flixOpt - Einsatzplanung und Dimensionierung von Erzeugerparks**  
*Peter Stange*
-   **92 Anwendung von porösem biogenem Siliziumdioxid (SiO<sub>2</sub>) in Feinstaubfilter-Prozessen**  
*Steffi Formann, Thomas Schliermann, Ingo Hartmann, René Bindig, Frank Hoferecht*
-     **94 Energetische und stoffliche Verwertung von chrombelasteten festen Gerberückständen in Biogasanlagen**  
*Robert Manig, Hannes Kotte*
-    **96 Regionale Modelle für die Bioökonomieentwicklung - Ansichten aus 5 EU-Regionen**  
*Laura García Laverde, Alberto Bezama, Christina Zinke*
-    **98 Entwicklung einer Feuerung mit Brennstoffstufung – Stickoxidminderung und Flexibilisierung von Biomassefeuerungsanlagen**  
*Niklas Gebhard, Martin Meiller, Markus Heese, Andreas Hamberger, Julian Nix, Johannes Lukas*
-    **100 Aktivitäten der IEA Bioenergy Task 44: Flexible Bioenergie und Systemintegration**  
*Nora Lange, Christiane Hennig, Daniela Thrän*
-      **102 Synthese von Biomethanol auf Basis biogenen Wasserstoffs für den Einsatz im Mobilitätssektor**  
*Robert Manig, Corina Protze, Jenő Schipek, Catharina Joswig, Alexandra Müller*
-    **104 Integration von Biomasse in industrielle Hochtemperatur-Prozesswärme**  
*Michael Meiler, Martin Meiller*

-   **106 Siebüberlauf aus der Bioabfallbehandlung als biogener Festbrennstoff: Effekt verschiedener Methoden der Brennstoffaufbereitung auf das Ascheschmelzverhalten**  
*Viktoria Scheff, Gregor Dürl, David Laner, Korbinian Kätzl, Hafiz Ali Raza*
-   **108 Optimierung der verbrennungstechnischen Eigenschaften von biogenen Rest- und Abfallstoffen auf Basis eines Biobrennstoffkataloges**  
*Dorothea Stein, Jürgen Reichelt, Markus Ricker, Elisabeth Eiche, Jochen Kolb*
-   **110 Entwicklung und Validierung eines innovativen Eisen-Kohlenstoff Präparates zur Gasreinigung und Effizienzsteigerung des Biogasprozesses**  
*Nikolaus Manolikakes, Daniel Dzofou Ngoumelah, Thomas Zeng, Sven Nefigmann, Gerrit Peters, Nils Jansen, Jörg Kretzschmar*
-   **112 Dynamics of bio-based carbon dioxide removal**  
*Ronja Wollnik et al.*
-    **113 HyRegio® – CO<sub>2</sub> aus der Luft entfernt, Wasserstoff erzeugt. Am richtigen Ort. Zur richtigen Zeit.**  
*Maria Fulde*

- 
-  Innovative Technologien
-  Biobasierter Wasserstoff
-  Nachhaltige Kreisläufe
-  Erschließen von Rest- und Abfallstoffen
-  Innovative Biokraftstoffe
-  Geschäftsmodelle & Integration in den Markt

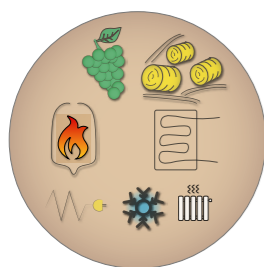
EWB

Felipe Torres-Rivera, Patrick Beuel, Christian Rohloff, Wolfgang Flach, Thomas Mockenhaupt



## Thermische Verwertung von biogenen Reststoffen aus dem Weinbau zur energetischen Versorgung von Winzereien

**FKZ-Nr. 03KB153:**  
Entwicklung eines regenerativen HybridEnergiesystems (Wärme, Kälte, Strom) zur Schaffung energieautarker Winzereien



Ziel des Vorhabens ist die Entwicklung eines regenerativen und modular erweiterbaren HybridEnergiesystems (Wärme, Kälte, Strom) zur Schaffung von höchstmöglichen, energieautarken Winzereien auf Basis ganzheitlich genutzter innerbetrieblicher Restbiomassen wie Rebrückschnitte, Weintrester und regional anfallendem Stroh. Hierfür soll ein innovativer systemkombinierbarer Biomasseanzballenvergaser entwickelt werden und mit einer dezentralen, Abwärme nutzenden Absorptionskälteanlage, sowie - in einer perspektivischen Ausbaustufe - einer stromerzeugenden Heißgasturbine kombiniert werden. Im Vorhaben wurde eine Stoffstromstudie über das vorhandene theoretische und technische Biomassepotenzial innerhalb der deutschen Weinbauwirtschaft erarbeitet. Mittels Befragung von Winzereibetrieben wurden potenzielle Hemmnisse identifiziert, welcher einer Einführung eines Anlagenkonzepts zur energetischen Nutzung von Weinbaubiomasse entgegenstehen. Anschließend wurden zwei unterschiedlich große Winzereien in Bezug auf die jährlich anfallenden Biomasse mengen sowie die vorhandene energetische Infrastruktur sowie dem Energieverbrauch analysiert. Basierend auf den erarbeiteten Erkenntnissen, wurden zwei Anlagenkonzepte zur Umwandlung der Biomassen in Wärme, Kälte und Strom erarbeitet und technisch ausgelegt. Die Wärmeerzeugung basiert auf einem Anlagenkonzept zur Vergasung ganzer Rebholzballen. Ein Teil der anfallenden Wärme wird über eine Absorptionskälteanlage in Nutzkälte umgewandelt. Des Weiteren wird ein Teil der erzeugten Nutzwärme in Strom umgewandelt. Die zwei erarbeiteten Anlagenkonzepte sind wirtschaftlich bewertet wurden. Aktuell laufen wissenschaftliche Testreihen mit einem weiterentwickelten Kleinballenvergaser. Im Rahmen der Testreihen wird Rebholz vergast. Neben der Untersuchung des betriebssicheren Anlagenbetriebs liegt ein Hauptaugenmerk auf den entstehenden Abgasemissionen und der Ableitung notwendiger Abgasnachbehandlungsmaßnahmen.

Zentrale Präsentation sinhalte wären die entwickelten Anlagenkonzepte zur energetischen Nutzung der anfallenden Weinbaubiomassen. Hierbei stellen wir die Herausforderungen der verschiedenen Weinbaubiomassen vor. Abschließend würden wir darauf eingehen, wie die erarbeiteten Anlagenkonzepte in die vorhandene Infrastruktur von Winzereien integriert werden können und welche Vorteile sich daraus ergeben. Im Rahmen der Statuskonferenzen können wir über die erzielten Ergebnisse der Stoffstromstudie zum technischen Biomassepotenzial innerhalb des deutschen Weinbaus berichten.

### Keywords

Biomassevergasung,  
Absorptionskälteanlagen,  
Biogene Reststoffe Weinbau

### Weitere Informationen

- Projektkoordinator: W. Baelz & Sohn GmbH & Co, [www.baelz.de](http://www.baelz.de)
- Projektpartner: Future Technologies Factory GmbH, [www.zeroemissionenergy.de](http://www.zeroemissionenergy.de)
- Projektpartner: TH Köln – Cologne Institute for Renewable Energy, [www.th-koeln.de](http://www.th-koeln.de)

Felipe Torres-Rivera<sup>1</sup>, Patrick Beuel<sup>1</sup>,  
Christian Rohloff<sup>2</sup>, Wolfgang Flach<sup>3</sup>,  
Thomas Mockenhaupt<sup>1</sup>

[felipe\\_antonio.torres\\_rivera@th-koeln.de](mailto:felipe_antonio.torres_rivera@th-koeln.de)  
[patrick.beuel@th-koeln.de](mailto:patrick.beuel@th-koeln.de)

<sup>1</sup> TH Köln  
Betzdorfer Straße 2, 50679 Köln

<sup>2</sup> W. Baelz & Sohn GmbH & Co  
Koepffstraße 5, 74076 Heilbronn

<sup>3</sup> FTF GmbH  
Talstraße 23, 79263 Simonswald

Peter Stange

## flixOpt - Einsatzplanung und Dimensionierung von Erzeugerparks

Im Rahmen des Projektes SmartBioGrid wurde das Tool »flixOpt« zur Entscheidungshilfe für die optimale Dimensionierung von Energieerzeugern und -speichern zur Versorgung von Energiesystemen entwickelt. Der Kern des Tools beruht auf klassischen Modellsätzen der gemischt ganzzahligen linearen Optimierung, mit deren Hilfe die optimale Betriebsführung eines gegebenen Energiesystems berechnet wird.

In flixOpt wurde eine weitgehend generische Umsetzung fokussiert. Neben der Betrachtung von Sektorenkopplung, Energiespeichern, konventionellen und regenerativen Erzeugern wird dem Nutzer eine Anpassung auf den individuell vorliegenden Anwendungsfall ermöglicht. Die Optimierung kann für Zeiträume beliebiger Länge und zeitlicher Auflösung erfolgen. Hierzu wird auf Basis der relevanten, zeitabhängigen Daten ein im Rahmen der Modellgenauigkeit theoretisch optimales Ergebnis berechnet. Dieses umfasst die entsprechend zu den Nutzervorgaben zeitlich zugehörige, bestmögliche Betriebsführung wie auch die optimale Dimensionierung der Anlagen.

Die Dimensionierung des Erzeugerparks geschieht auf Basis der Minimierung von annualisierten Investitionskosten und jährlichen Betriebskosten. Im Allgemeinen spielt hierbei die Berechnung einer exakten, zeitschrittgenauen Betriebsführung eine untergeordnete Rolle. Dies ermöglicht die Verwendung einer optionalen, automatischen Zeitreihenaggregation zur Reduktion der Optimierungsproblemgröße. Hierdurch lassen sich die typischerweise rechenzeitkritisch zu bestimmenden jährlichen Betriebskosten in sehr guter Näherung performant berechnen.

Das Optimierungsziel ist nicht auf die weitverbreitete Minimierung von Betriebskosten beschränkt. Auch eine kombinierte Betrachtung mehrerer Zielgrößen ist durch die optionale Internalisierung in das primäre Ziel umsetzbar.

### Weitere Informationen

Webseite: <https://tu-dresden.de/ing/maschinenwesen/iet/gewv/forschung/forschungsprojekte/flixopt>

Dr. Peter Stange

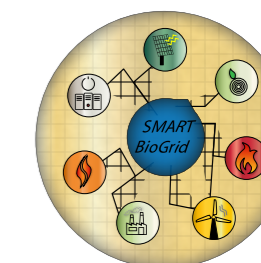
[peter.stange@tu-dresden.de](mailto:peter.stange@tu-dresden.de)

TU Dresden, Fakultät Maschinenwesen,  
Institut für Energietechnik  
Professur für Gebäudeenergietechnik  
und Wärmeversorgung  
Helmholtzstr. 14, 01069 Dresden

SmartBioGrid



**FKZ-Nr. 03KB159:**  
Optionen zum Einsatz von fester Biomasse in dekarbonisierten Wärmenetzen



### Keywords

Optimierung,  
Erzeugereinsatzplanung,  
Entscheidungshilfesystem,  
Dimensionierung,  
Transformation

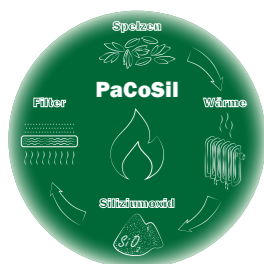
## PaCoSil

Steffi Formann, Thomas Schliermann, Ingo Hartmann, René Bindig, Frank Hoferecht



## Anwendung von porösem biogenem Siliziumdioxid (SiO<sub>2</sub>) in Feinstaubfilter-Prozessen

FKZ-Nr. 03EI5436:  
Verbrennung regional verfügbarer  
Reststoffe zur energetischen  
Nutzung von Biomasse und  
zur gekoppelten Erzeugung  
von biogenem Silika für  
Feinstaubfilter-Prozesse



Im Projekt PaCoSil werden regional verfügbare siliziumreiche biogene Reststoffe zur Erzeugung regenerativer Wärme in Kombination mit siliziumdioxidangereicherten porösen und röntgenamorphen Feststoffen untersucht, um diese für die stoffliche Nutzung in Umweltprozessen zur Feinstaubabscheidung zu nutzen. Bei der mit der wärmegeführten Produktion gekoppelten stofflichen Verwertung fallen als Produkt siliziumreiche biogene Reststoffe an. Als siliziumreiche und regional verfügbare biogene Reststoffe werden Hafer- und Dinkelspelzen eingesetzt. In einem angepassten Herstellungsverfahren wird poröses biogenes Siliziumdioxid (SiO<sub>2</sub>) aus den genannten siliziumreichen Biomasserückständen durch einen thermischen Prozess und ein vorgeschaltetes chemisch-physikalisches Verfahren gewonnen. Das gewonnene SiO<sub>2</sub> wird als Filtrationsmedium für die Feinstaubabscheidung in speziell entwickelten Feinstaubfiltersystemen eingesetzt. Partikelfiltersysteme sind hilfreiche Optionen, um Feinstaubbelastung und Umweltemissionen zu reduzieren, insbesondere auch im Kontext industrieller Prozesse. Zur Reduktion von Feinstaub eignet sich als Filterträgermaterial biogenes und amorphes SiO<sub>2</sub>, welches aus siliziumreichen biogenen Reststoffen gewonnen werden kann. Durch den Adsorptionsprozess an den Siliziumdioxid-Filterträgeroberflächen können bestimmte partikuläre Bestandteile aus Luftströmen effektiv entfernt werden. Dabei kann das gewonnene poröse und röntgenamorphe anorganische und feste biogene SiO<sub>2</sub> in verschiedenen Feinstaubabscheidesystemen Anwendung finden:

- Rauchgasreinigung an Biomassefeuerungen und
- Umgebungsluftreinigung für Hallen- und Prozessluft in Produktionsprozessen.

Eine besondere Wirtschaftlichkeit des Verfahrens ist durch die Kombination der wärmegeführten Produktion mit der stofflichen Verwertung der Verbrennungsrückstände gegeben sowie eines anschließenden Recyclings der mit Feinstaub beladenen amorphen SiO<sub>2</sub> - Partikel. Die bisherigen Ergebnisse zeigen, dass biogenes und amorphes SiO<sub>2</sub> eine hohe Staubpartikelabscheidung ermöglicht und somit zur Minderung der Staublast in bestimmten Anwendungen einsetzbar ist. Die Entwicklung und Testung der Filteranwendungen werden weiter fortgeführt. Diese Untersuchungsergebnisse stellen ein anwendbares Beispiel für die Kombination einer nachhaltigen Verwertung von landwirtschaftlichen Reststoffen in Verbindung mit der Rückgewinnung von Wertstoffen für weitere Wertschöpfungsprozesse und Anwendungen dar.

### Weitere Informationen:

Projekthomepage: <https://www.energetische-biomassenutzung.de/projekte-partner/details/project/show/Project/PaCoSil-700>

### Literatur

Formann, S.; Schliermann, T.; Hartmann, I.; Hoferecht, F. (2022): Application of biogenic silica for particulate matter precipitation processes. In: DECHEMA, GDCh, VDI GVC (Hrsg.) Special Issue: (Bio)Process Engineering - a Key to Sustainable Development: ProcessNet and DECHEMA-BioTechNet Jahrestagungen 2022 TOGETHER with 13th ESBES Symposium. Chemie Ingenieur Technik. H. 9. S. 1372. DOI: 10.1002/cite.202255352.

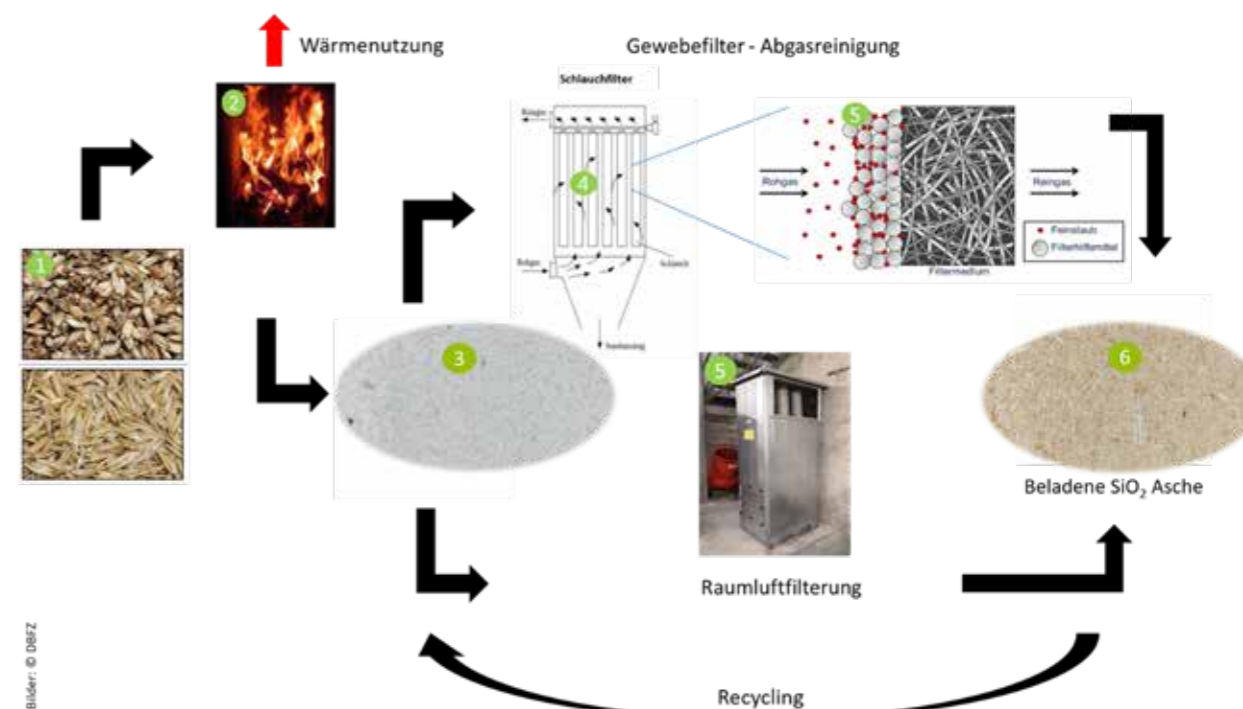


Abbildung 1:

Prozessführung zur Erzeugung von amorphem biogenem SiO<sub>2</sub>,  
(1) Biomassereststoffe Dinkel- und Haferspelzen  
(2) gekoppelter stofflich-energetischer Prozess zur  
(3) Erzeugung von amorphen und siliziumreichen biogenen Ascheanteilen  
(4) Nutzung des biogenen SiO<sub>2</sub> als Trägermaterial in Partikelfiltern  
(5) Abscheidung von Feinstäuben aus Gasen  
(6) Recycling des beladenen SiO<sub>2</sub>

Dr. Steffi Formann<sup>1</sup> (Hauptautor:in),  
Thomas Schliermann<sup>1</sup>,  
Prof. Dr. Ingo Hartmann<sup>1,3</sup>,  
René Bindig<sup>1</sup>, Frank Hoferecht<sup>2</sup>

steffi.formann@dbfz.de

<sup>1</sup> DBFZ Deutsches Biomasseforschungszentrum gemeinnützige GmbH  
Torgauer Straße 116, 04347 Leipzig

<sup>2</sup> ETE EmTechEngineering GmbH  
Torgauer Straße 116, 04347 Leipzig

<sup>3</sup> Honorarprofessor für Luftreinhaltungstechnik, Fakultät Ingenieurwissenschaften, Institut für Energie-, Gebäude- und Umwelttechnik (EGU), Hochschule für Technik, Wirtschaft und Kultur Leipzig,  
Postanschrift: PF 301166, D-04251 Leipzig

**BioChrome**

Robert Manig, Hannes Kotte



## Energetische und stoffliche Verwertung von chrombelasteten festen Gerbereirückständen in Biogasanlagen

**FKZ-Nr. BMWK IGF 22208 BR:**  
Energetische und stoffliche  
Verwertung von chrombelasteten  
festen Gerbereirückständen  
in Biogasanlagen

Zwischen 2012 und 2014 wurden weltweit ca. 558.400t Leder pro Jahr aus Rinderhäuten hergestellt und zur Fertigung von Bekleidung bzw. in der Möbel- und Automobilindustrie verarbeitet<sup>[1]</sup>. Die Chromgerbung ist dabei mit einem Anteil von über 90% das führende Gerbverfahren<sup>[2]</sup>. Der weltweite Verbrauch an Chromgerbstoffen (als 25% Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) liegt bei 500.000t pro Jahr<sup>[3]</sup>. Bei der Weiterverarbeitung der Haut zu Leder fällt eine Vielzahl von Nebenprodukt- und Abwasserströmen an, die sehr unterschiedlich belastet sind<sup>[4]</sup>. Bei den Reinigungsprozessen fallen chromhaltige Schlämme an, die meist voluminös und stark wasserhaltig sind. Wenn diese Schlämme einer biologischen Abwasserbehandlung entstammen, enthalten sie darüber hinaus erhebliche Mengen Organik. In einem seit wenigen Jahren an einem Standort in Deutschland etablierten Verfahren werden chromhaltige Abwässer und Schlämme aus der aeroben Abwasserbehandlung außerdem anaerob behandelt und beträchtliche Mengen Biogas gewonnen<sup>[5,6]</sup>. Bemerkenswert ist, dass die enthaltenen Chromsalze die Biogaserzeugung offenbar nicht stören. Die Gärreste, die trotz Vergärung noch deutliche Mengen organischer Anteile enthalten, müssen bisher nach der Ausfäulung getrocknet, verbrannt und deponiert werden. Das Chrom ist damit einem Recycling entzogen und der Prozess ist teuer und energetisch aufwendig. Ein weiterer Prozessstrom, dessen Behandlung weltweit bisher nicht befriedigend erfolgt, ist die Verwertung von chromhaltigen Falzspänen (CFS) aus der Dickenbearbeitung von Lederhalbfabrikaten. Dieses faserige, watteähnliche Material besteht im Wesentlichen aus Hautprotein, Gerbstoff und wenigen weiteren Hilfsmitteln, z. B. Fetten und Biozid<sup>[7,8]</sup>. Die CFS enthalten etwa 3 – 5% Chrom<sup>[8,9]</sup> und machen 20% vom Halbfabrikat aus<sup>[10]</sup>. Ziel des Projektes »BioChrome« (IGF-Vorhaben, Nr.: 22208 N) ist die Entwicklung eines kosteneffizienten und ökologischen Verfahrens zur energetischen Verwertung von CFS in Biogasanlagen für die Gewinnung von Biogas und die Erzeugung von Energie für Gerbereien, sowie die Rückgewinnung des zur Gerbung eingesetzten Chromes. Der Projektverbund besteht aus dem Forschungsinstitut für Leder und Kunststoffbahnen Freiberg (FILK), dem Institut für Technische Chemie (ITC) der TU Bergakademie Freiberg sowie der DBI – Gastechnologisches Institut gGmbH Freiberg (DBI). Forschungsschwerpunkt von DBI ist die Entwicklung einer geeigneten Vergärungsstrategie hinsichtlich eines möglichst vollständigen Biomasseabbaus der CFS.

### Aktivitäten und Maßnahmen

Für die Durchführung der Fermentationsversuche wird der Batchversuchsstand aus Abbildung 1 genutzt. Der Versuchsstand ist so ausgeführt, dass 10 Gäransätze parallel betrieben werden können.

Aktueller Arbeitsgegenstand ist die Untersuchung des Einflusses der zugeführten Menge an CFS und der Reaktortemperatur auf das Gärverhalten. Hierfür werden systematisch die Reaktortemperatur und die zugeführte Substratmenge variiert. Neben der Ermittlung der Biogasausbeute und der Biogasqualität wurde die Prozessstabilität analysiert (pH-Wert, FOS/TAC, Säurespektrum, Nährstoffe). Weiterer Forschungsgegenstand ist das Phänomen der Diauxie.

### Keywords

Kreislaufwirtschaft,  
Biogas, Recycling,  
Chromfalzspäne, Leder



**Abbildung 1:**  
Batchversuchsstand zur  
Vergärung chromhaltiger Falzspäne

In den Batchversuchen wurde die Prozesstemperatur systematisch in einem Bereich zwischen 30 und 70 °C variiert. Dabei zeigte sich, dass die höchsten Biogaserträge (296 l/kg) bei einer Temperatur von 50 °C erzielt wurden. Versuche im thermophilen Temperaturbereich (60–70 °C) konnten keine vergleichbaren Biogaserträge erzielen. Es ergibt sich eine Temperaturabhängigkeit bezüglich der gebildeten Biogasmenge und -ausbeute. Die höchsten Methangehalte wurden bei Versuchen mit niedrigerem Temperaturniveau (30 °C) erzielt (>80 Vol.-%).

### Präsentation der Ergebnisse

Es werden die Ergebnisse der oben beschriebenen Batchversuche mit den CFS präsentiert. Dabei liegt der Fokus auf den Zusammenhängen zwischen Reaktortemperatur und eingesetzter Substratmenge gegenüber Biogasausbeute und -qualität. Anhand der parallel durchgeführten Analysen der Flüssigphase werden Prozesszusammenhänge dargestellt und das weitere Vorgehen abgeleitet.

- [1] FAO, 2016. World statistical compendium for raw hides and skins, leather, and leather footwear 1999-2015. FAO, Rome.  
[2] Covington, A. D., (2009): Tanning Chemistry: The science of leather. The Royal Society of Chemistry, Cambridge.  
[3] Reich, G. (1996): Theorie und Praxis der organischen Gerbstoffe. Das Leder, 47(4), S. 74-83.  
[4] Stand der Abwassertechnik in verschiedenen Branchen. Kapitel 13: Abwässer aus Gerbereien. Umweltbundesamt 1995. p. 72, 95.  
[5] Erster Schritt in neue Energie-Ära. Rehauer Tageblatt, 06/2013.  
[6] In energieautarke Zukunft gestartet. Südleider weicht Bioenergieanlage ein. Pro Leder, 04/2013.  
[7] Pati, A.; Chaudhary, R.; Subramani, S. (2014): A review on management of chrometanned leather shavings: a holistic paradigm to combat the environmental issues. Environmental Science and Pollution Research, 21, 11266-11282.  
[8] Jiangan, Y.; Zhihua, S.; Yiwei, Z.; Liwei, C. (2019): Stabilization and cyclic utilization of chrome leather shavings. Environmental Science and Pollution Research, 26, 4680-4689.  
[9] Cuicui, D.; Min, Z., Libo, D.; Yingying, Q.; Ronghui, S.; Junhui, Y. (2017): Fabrication and characterization of regenerated leather using chrome shavings as raw materials. Journal American Leather Chemists Association, 112(5), 145-152.  
[10] Aslan, A.; Gulumser, G.; Ocak, B. (2006): Increased chromium tanning efficiency with collagen hydrolysates. Journal of the Society of Leather Technologists and Chemists, 90, 201-204.

**Weitere Informationen**  
[www.dbi-gti.de](http://www.dbi-gti.de)

### Literatur

Robert Manig, Hannes Kotte  
robert.manig@dbi-gruppe.de  
hannes.kotte@dbi-gruppe.de

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



Laura García Laverde, Alberto Bezama, Christina Zinke



## Regionale Modelle für die Bioökonomie-entwicklung - Ansichten aus 5 EU-Regionen

Der Aufbau biobasierter Wertschöpfungsketten, die eine nachhaltigere und zirkuläre regionale Entwicklung unterstützen, ist nicht nur an greifbare Komponenten wie die Verfügbarkeit von Rohstoffen und verfügbaren Technologien gebunden. Sie ist auch in hohem Maße abhängig von immateriellen regionalen Kapazitäten, vorhandenem und verbreiteten Wissen und bestehenden Innovationsstrukturen. Das im Januar 2021 gestartete EU-Horizont-2020-Projekt BRANCHES zielt in erster Linie darauf ab, die Schaffung nationaler Netzwerke für den Wissensaustausch zwischen Praktikern, Forschern und Akademikern sowie die Analyse tragfähiger regionaler Bioökonomie-Modelle entsprechend den regionalen Bedingungen zu unterstützen. Fünf Länder sind an dem Projekt beteiligt, und für jedes Land wurden bestimmte Regionen ausgewählt, um die Analyse zu erleichtern, nämlich Nordfinnland (Finnland), Mitteldeutschland (Deutschland), das Ebro-Tal (Spanien), Ermland und Masurien (Polen) und Mittelitalien (Italien).

### Aktivitäten und Maßnahmen

Einerseits war die Identifizierung innovativer Praktiken in den einzelnen Ländern, die Weitergabe dieser Praktiken über Wissensnetzwerke und die Förderung des Austauschs zwischen verschiedenen Gruppen von Interessenvertretern eine wichtige Aktivität in jedem der BRANCHES-Länder, um den inter- und transdisziplinären Austausch zu fördern. Andererseits hat die Analyse der spezifischen Bedingungen in den einzelnen Regionen und der Faktoren, die bei der Umsetzung ausgewählter Innovationen in den regionalen Wertschöpfungsketten eine Rolle spielen, zusammen mit Experten zu einem besseren Verständnis der Umsetzung verschiedener Innovationsmodelle bei der Entwicklung biobasierter Wirtschaftssysteme geführt [1]. Die Analyse in jeder Region wurde unter Anwendung der Methodik der kombinierten SWOT- und TOWS-Analyse durchgeführt, um eine strukturierte Analyse der regionalen Wertschöpfungsketten und die Festlegung von Strategien zur Förderung ihrer weiteren Entwicklung zu ermöglichen. Ebenso wurde eine politische Analyse durchgeführt, um die größten Hindernisse und Chancen für die Förderung von Bioökonomie-Aktivitäten zu ermitteln [2].

### Ergebnisse

In diesem Poster werden wir die Zusammenfassung dieser SWOT- und TOWS-Analysen der 5 BRANCHES-Regionen sowie die Erkenntnisse aus ihren regionalen Bioökonomie-Entwicklungsmodellen vorstellen. Die Regionen Ermland und Masurien in Polen sowie Mittelitalien haben ihre Bioökonomie-Aktivitäten auf der Grundlage verschiedener Bioenergiekonzepte stark entwickelt. Nordfinnland verfolgt einen gemischten Ansatz, der fast ausschließlich auf forstwirtschaftlichen Ressourcen basiert, und zwar sowohl auf Bioenergiekonzepten, um die Verwendung von Torf als Energiequelle zu unterbinden, als auch auf der starken Förderung des Zellstoff- und Papiersektors (einschließlich Nebenprodukten). Das Ebro-Tal verfolgt ebenfalls einen gemischten Ansatz zwischen der energetischen und der stofflichen Nutzung von Ressourcen, insbesondere auf der Grundlage von Weinanbaugebieten. Die Holzressourcen der Weinberge und andere Pflanzenteile werden

als Energieträger genutzt, und auch verschiedene Pflanzenteile können für die Herstellung von Nahrungsergänzungsmitteln, biobasierten Chemikalien und pharmazeutischen Produkten verwendet werden. In der Region Mitteldeutschland haben wir uns in diesem Projekt trotz der breiten Entwicklungsfelder der Bioökonomie auf die Entwicklung von Biochemikalien auf der Basis von Lignozellulose-Rohstoffen konzentriert.

Wir werden auch die Erfahrungen zusammenfassen, die wir aus dem Austausch mit Partnern und Experten aus jedem der fünf BRANCHES-Länder in Bezug auf die Politik zur Unterstützung der regionalen Bioökonomie in der EU gewonnen haben.

### Weitere Informationen

- National Thematic Network in Deutschland (Netzwerk Bioökonomie in der Praxis): <https://www.dbfz.de/netzwerk-biooekonomie>
- BRANCHES Projekt: <https://www.branchesproject.eu/>
- Sammlung von innovativer Praktiker BRANCHES: <https://www.branchesproject.eu/materials/practice-abstracts-and-factsheets>

- [1] García, L. L.; Szarka, N. (2022): Description of the selected bioeconomy value chains per country and the main challenges for their development at regional level. Deliverable 4.1 Branches. URL: <http://imagecdn.spazioweb.it/42/ab/42ab106c-639a-4358-9beb-b0f7d6f3cc5d.pdf>
- [2] Zinke, C.; Reshef, N.; Bezama, A. (2022): Good practices in policy for bioeconomy value chains in European regions. Deliverable 4.2 Branches URL: <http://imagecdn.spazioweb.it/2d/b6/2db67184-79e8-4daa-af4b-86dc80069e84.pdf>

### Literatur

### Keywords

innovativer Praktiken,  
SWOT & TOWS Analyse,  
Bioökonomie-  
Entwicklungsmodellen,  
biobasierte  
Wertschöpfungsketten.

MSC. Laura García Laverde<sup>1</sup>  
(Hauptautor:in), Prof. Dr. Alberto Bezama<sup>2</sup>,  
Christina Zinke<sup>2</sup>  
Laura.garcia@dbfz.de  
alberto.bezama@ufz.de

<sup>1</sup> DBFZ Deutsches Biomasseforschungszentrum,  
Torgauer Straße 116, 04347 Leipzig  
<sup>2</sup> UFZ – Helmholtz Zentrum für Umweltforschung  
Permoserstraße 15, 04318 Leipzig

## FlexNox

Niklas Gebhard, Martin Meiller, Markus Heese, Andreas Hamberger, Julian Nix, Johannes Lukas



## Entwicklung einer Feuerung mit Brennstoffstufung – Stickoxidminderung und Flexibilisierung von Biomassefeuerungsanlagen

FKZ-Nr. 03EI5426:

Entwicklung einer Feuerung mit Brennstoffstufung – Stickoxidminderung und Flexibilisierung von Biomassefeuerungsanlagen

**Ziel**

Das Ziel des Projektes ist die Entwicklung und Erprobung einer neuen Feuerung, mit der die NO<sub>x</sub>-Emissionen aus der Verbrennung von biogenen Festbrennstoffen gegenüber dem Stand der Technik um mindestens 50% reduziert werden. Die Reduzierung der Emissionen erfolgt dabei durch Brennstoffstufung. Die neu entwickelte Feuerung verfügt über eine zusätzliche Reduktionszone, bei welcher durch Zugabe eines Sekundärbrennstoffes die Stickoxide abgebaut werden (siehe Abbildung 1). Als Sekundärbrennstoff wird zu Beginn des Projektes Erdgas verwendet, später soll aber auch die Nutzung weiterer Sekundärbrennstoffe wie beispielsweise Holzstaub erprobt werden. Der fokussierter Leistungsbereich liegt zwischen 100 kW und 2 MW. Die verwendete Anlage weist eine Leistung von 250 kW auf.

**Hintergrund**

Bislang gibt es noch keine adäquate technische, marktverfügbare Lösung für die Stickoxidminderung in dezentralen Feuerungsanlagen. Mittelfristig ist zudem zu erwarten, dass in der 1. BImSchV, die bislang keinen Grenzwert für Stickoxide aufführt, ein Grenzwert eingeführt wird. Die Machbarkeit des Prinzips wurde bereits 2012 bei Fraunhofer UMSICHT gezeigt [1] und soll nun in eine marktfähige Anlage überführt werden.

**Aktivitäten / Stand des Projektes / Ergebnisse**

Zu Beginn des Projektes wurden Messreihen durchgeführt, bei welcher die NO<sub>x</sub>-Emissionen im Ist-Zustand ermittelt wurden. Als Brennstoff wurden dabei Briketts aus Spanplattenresten verwendet, mit einem hohen Stickstoffanteil (4,75%). Bei 90% Last wurden im Mittel 755 mg/Nm<sup>3</sup> NO<sub>x</sub> gemessen. Der Höchstwert lag bei ca. 923 mg/Nm<sup>3</sup>.

Des Weiteren wurden Entwicklung, Konstruktion und Fertigung des Prototyps durchgeführt. Der Prototyp wurde so entwickelt, dass später die Nachrüstbarkeit von Bestandsanlagen möglich ist. Die Bestandsanlagen bestehen dabei aus zwei Modulen (Gewölbe & Kessel) zwischen welchen die Reduktionszone als Zwischenmodul eingefügt werden kann. Für die strömungstechnische Gestaltung, sowie die Position und Geometrie der Eindüsung, wurden CFD-Simulationen durchgeführt.

Die Anlage ist gefertigt und wurde bereits in Betrieb genommen. Es wurden erste Versuche durchgeführt, allerdings zum jetzigen Zeitpunkt noch ohne Nachverbrennung. Die ersten Versuche mit Reburning sind in der letzten Septemberwoche geplant.

**Keywords**

Reburning,  
Nachverbrennung,  
NO<sub>x</sub>-Emissionen,  
Emissionsminderung

**Weitere Informationen**

[www.umsicht-suro.fraunhofer.de/](http://www.umsicht-suro.fraunhofer.de/)

Pressemitteilung FlexNOx: <https://www.umsicht-suro.fraunhofer.de/de/presse/pressemitteilungen/2021/NOx-Emissionen.html>

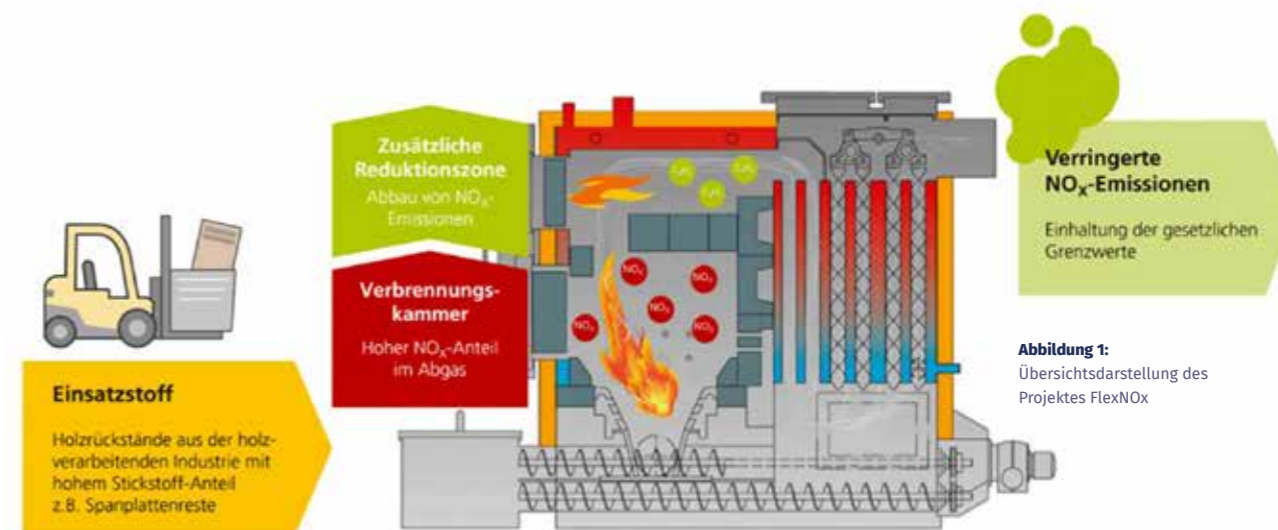


Abbildung 1:  
Übersichtsdarstellung des  
Projektes FlexNOx

[1] Meiller Et Al: Boiler Design With Solid-Gaseous Fuel Staging To Reduce Nox Emissions And Optimize Load Flexibility; Chemical Engineering Technology, Accepted 9/2016; Doi: 10.1002/Ceet.201600199

**Literatur**

Niklas Gebhard<sup>1</sup> (Hauptautor:in),  
Martin Meiller<sup>1</sup>, Markus Heese<sup>2</sup>, Andreas  
Hamberger<sup>2</sup>, Julian Nix<sup>3</sup>, Johannes Lukas<sup>3</sup>

niklas.gebhard@umsicht.fraunhofer.de  
martin.meiller@umsicht.fraunhofer.de

<sup>2</sup> Endress Holzfeuerungsanlagen GmbH  
Industriestr. 18, 91593 Burgbernheim

<sup>3</sup> Friedrich-Alexander-Universität  
Erlangen-Nürnberg, Lehrstuhl für  
Energieverfahrenstechnik  
Fürther Str. 244f, 90429 Nürnberg

<sup>1</sup> Fraunhofer Institut UMSICHT,  
Standort Sulzbach-Rosenberg  
An der Maxhütte 1, 92237 Sulzbach-Rosenberg



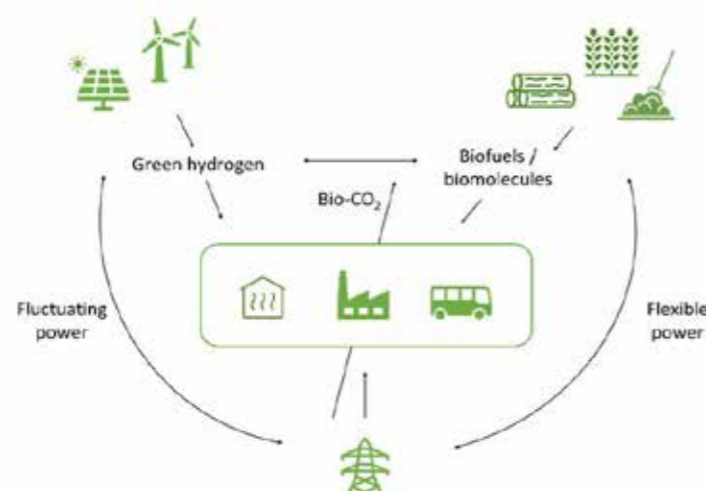
Nora Lange, Christiane Hennig, Daniela Thrän

## Aktivitäten der IEA Bioenergy Task 44: Flexible Bioenergie und Systemintegration

Die Task 44 Flexible Bioenergy and System Integration ist eine von 11 Arbeitsgruppen des IEA Bioenergy Technology Collaboration Programme und wurde 2019 neu gegründet. Im aktuellen Triennium 2022-2024 engagieren sich sieben Länder und die Europäische Kommission zu gemeinsamen Fragestellungen. Mit ihrer Arbeit zielt die Task darauf ab, das Verständnis für flexible Bioenergie und ihre künftige Rolle im Energiesystem zu verbessern sowie Hindernisse und Entwicklungserfordernisse im gesamten Energiesystem zu identifizieren. Dazu gehören sowohl technische Fragen im Zusammenhang mit flexibler Bioenergie als auch politische Maßnahmen und Rahmenbedingungen, die die Umsetzung beeinflussen.

### Keywords

Flexibilisierung,  
Bioenergie,  
Best Practice,  
Systemdienstleistungen



**Abbildung 1:** Erwartungen an die Rolle der nachhaltigen Bioenergie im Energiesystem. Quelle: Mäki et al. (2023) »Defining the value of bioenergy system services for accelerating the integration of bioenergy into a low-carbon economy presentation«, Präsentation auf der 31. EUBCE 2023 [1]

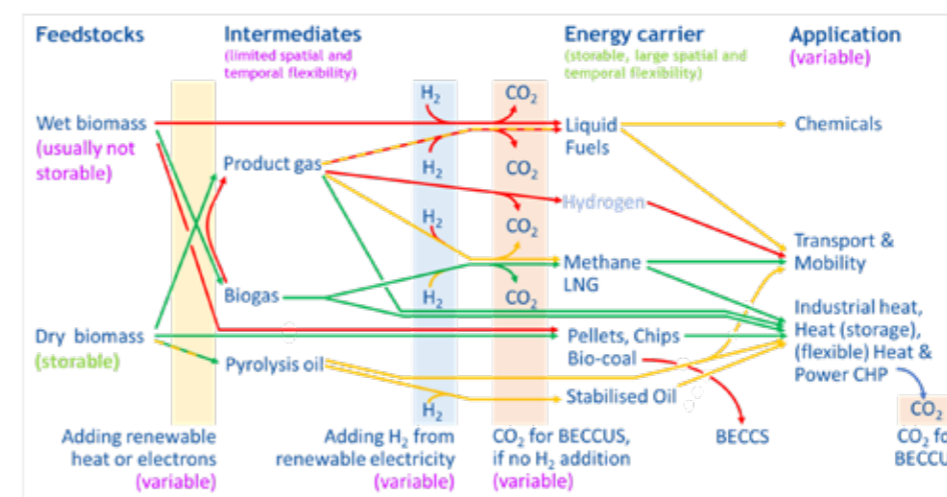
Flexible Bioenergie bietet einen zusätzlichen Nutzen für verschiedene Energiesektoren und kann den Übergang zu erneuerbaren Energiesystemen beschleunigen. In der Publikation »Five cornerstones to unlock the potential of flexible bioenergy« [2] werden fünf Eckpfeiler benannt, welche für die erfolgreiche Umsetzung flexibler Bioenergiesysteme notwendig sind. In einer aktuellen Umfrage beschäftigt sich die Task 44 detailliert mit Barrieren, Hemmnissen, ökonomischen Fragen und politischen Zielen in 15 ausgewählten Ländern. Die Auswertung der Ergebnisse wird zeitnah in einem Bericht veröffentlicht.

**Abbildung 2:** Best Practice Beispiele der Task 44. Quelle: Mäki et al. (2023) »Defining the value of bioenergy system services for accelerating the integration of bioenergy into a low-carbon economy presentation«, Präsentation auf der 31. EUBCE 2023 [1]



Eine weitere Aktivität im aktuellen Arbeitsprogramm sind die Best Practice Beispiele (Abb. 2), welche auf der Task 44 Webseite zu finden sind. Anhand einer fortlaufenden Sammlung internationaler Beispiele sollen vielfältige Vorteile und Dienstleistungen aufgezeigt werden, die flexible Bioenergie bieten kann.

Der 2021 publizierte Bericht »Technologies for Flexible Bioenergy« (3) gibt einen Überblick über verschiedene Technologien und Möglichkeiten der Erzeugung und Verwendung von Bioenergie. Ein erweitertes Schema zu diesem Ansatz zeigt die nachfolgende Grafik. Sie ist eine Vorschau auf eine weitere Aktivität der Task 44, welche sich mit der Erstellung eines aktualisierten Berichts beschäftigt.



**Abbildung 3:** Das Netz der flexiblen Bioenergie-technologien für die Energieumwandlung von Biomasse. Quelle: Mäki et al. (2023) »Defining the value of bioenergy system services for accelerating the integration of bioenergy into a low-carbon economy presentation«, Präsentation auf der 31. EUBCE 2023 (1); aktualisiert aus [3]

Weiterhin leitet die Task 44 das Inter-task-Projekt Synergies of Green Hydrogen and Bio-Based Value Chains Deployment. Das Ziel der Projektgruppe unter Mitarbeit von 9 weiteren Tasks der IEA Bioenergy ist es, Synergien beim Einsatz von grünem Wasserstoff und biobasierten Wertschöpfungsketten zu identifizieren und zu bewerten, welche die Nutzung beider Energieträger im Energiesystem unter verschiedenen Bedingungen verbessern können (Quelle: Webseite Task 44). In einem weiteren Projekt Management of Biogenic CO<sub>2</sub>: BECCUS Intertask Phase 2, an dem die Task 44 beteiligt ist, wird die Integration von BECCU/S in das (Bio-)Energiesystem untersucht.

- [1] Mäki, E.; Hennig, C.; Thrän, D.; Lange, N.; Schildhauer, T.; Schipfer, F. (2023): Defining the value of bioenergy system services for accelerating the integration of bioenergy into low carbon economy. Präsentation der Task 44 auf der 31. EUBCE 2023 und demnächst veröffentlicht in Papers of the 31th European Biomass Conference in Bologna 5.-9.6.2023
- [2] Thrän, D.; Anderson, K.; Schildhauer, T.; Tilman, S.; Schipfer, F. (2021): Five cornerstones to unlock the potential of flexible bioenergy. IEA Bioenergy Task 44
- [3] Schildhauer, T.; Kroon, P.; Höftberger, E.; Moiola, E.; Reichert, G.; Kupelwieser, F. (2021): Technologies for Flexible Bioenergy. IEA Bioenergy Task 44

### Literatur

Nora Lange<sup>1</sup> (Hauptautor:in),  
Christiane Hennig<sup>1</sup>, Prof. Dr. Daniela Thrän<sup>1,2</sup>  
nora.lange@dbfz.de

<sup>1</sup> Deutsches Biomasseforschungszentrum  
Torgauer Straße 116, 04347 Leipzig  
<sup>2</sup> Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung  
Permoser Straße 15, 04318 Leipzig

## BioMeth

Robert Manig, Corina Protze, Jenö Schipek, Catharina Joswig, Alexandra Müller



## Synthese von Biomethanol auf Basis biogenen Wasserstoffs für den Einsatz im Mobilitätssektor

FKZ-Nr. 03EI5423:  
Synthese von Biomethanol auf Basis biogenen Wasserstoffs für den Einsatz im Mobilitätssektor

Das Forschungsvorhaben »BioMeth« zielt auf die Entwicklung eines Verfahrens zur Synthese von Biomethanol auf der Basis biogenen Wasserstoffs ab, um im Mobilitätssektor als Kraftstoff bzw. Kraftstoffzusatz zu dienen oder in technischen Prozessen wie der Biodieselherstellung konventionelles Methanol zu substituieren. Mittels des zweistufigen Biogasprozesses können kontinuierlich zwei biogene Gase – ein wasserstoffhaltiges und ein methanhaltiges Biogas – erzeugt werden.[1] Das wasserstoffhaltige Biogas, ein Gemisch aus Wasserstoff und Kohlenstoffdioxid, dient als Edukt für die Methanolsynthese 5,6 in einem speziellen Methanolreaktor. Zusätzlich kann Kohlenstoffdioxid aus dem methanhaltigen Biogas und/ oder dem Abgas eines konventionellen BHKWs für die Methanolsynthese genutzt werden. Durch die Einbindung von regenerativem Elektrolysewasserstoff wird der stöchiometrische Bedarf an Wasserstoff ausgeglichen. Dabei bietet die zweistufige Biogaserzeugung den Vorteil, dass die Methanolsynthese kontinuierlich mit dem wasserstoffhaltigen Gasstrom betrieben werden kann. Das System ist somit dauerhaft im Teillastbetrieb betreibbar und kann flexibel zusätzliches Kohlenstoffdioxid und Elektrolysewasserstoff aufnehmen. Dadurch kann ein Beitrag zur Stabilisierung der Stromnetze (Last-Leistungs-Ausgleich) und zur Kopplung der Sektoren Strom und Mobilität geleistet werden. Durch die Verwendung von industriellen Rest- und Abfallstoffen sowie Klärschlamm als Substrat für die Biogaserzeugung wird zudem die Nachhaltigkeit gewährleistet und die Konkurrenz zur Nahrungsmittelproduktion vermieden. Abbildung 1 verdeutlicht schematisch die beschriebenen Zusammenhänge. Im Resultat steht eine Technologie zur Verfügung, welche neben den positiven ökologischen Aspekten der wirtschaftlichen Optimierung von bestehenden Biogasanlagen dient und eine effiziente Nutzung von biogenen Rest- und Abfallstoffen im Mobilitätssektor ermöglicht.

### Keywords

Prozesswärmeerzeugung,  
Defossilisierung,  
Thermochemische  
Umwandlung (Vergasung),  
Reststoffnutzung

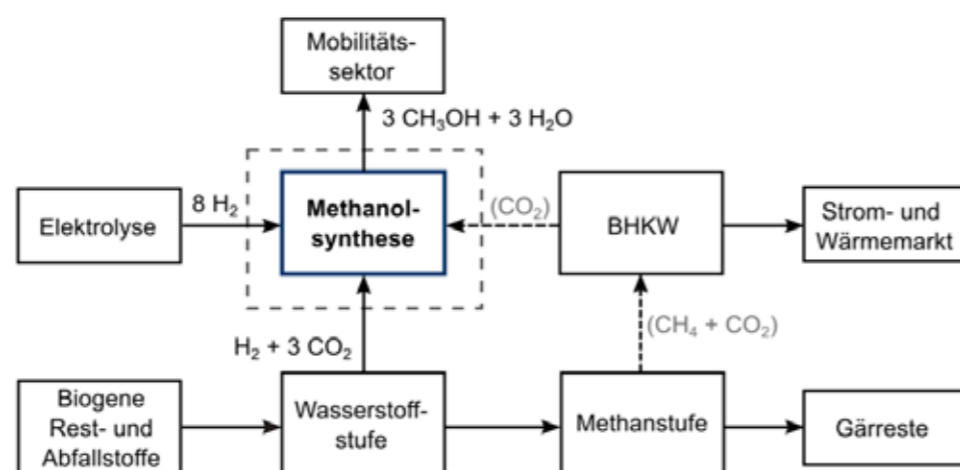


Abbildung 1:  
Gesamtkonzept der  
Methanolsynthese

### Aktivitäten und Maßnahmen

Zur Erreichung dieser Ziele steht entsprechendes Knowhow im prozessbiologischen und gasverfahrenstechnischen Bereich am DBI zur Verfügung.[1,2,3,4] Biowerk als Akteur im Biokraftstoffbereich verfügt über die Expertise zur Konzeption und technisch-wirtschaft-

lichen Bewertung des Gesamtverfahrens und ist zudem ein potenzieller Verwender von Biomethanol. Einer der zwei Schwerpunkte des Projektes liegt in der Anpassung des zweistufigen Biogasprozesses an die Substrate Seifenwasser und Rohglycerin, die als Nebenprodukte bei der Biodieselproduktion anfallen. Mittels systematischer Experimente im Labor- und kleintechnischem Maßstab (vgl. Abbildung 2) werden die Wasserstoff- und Methanausbeute optimiert. Der zweite Schwerpunkt des Projektes liegt in der Entwicklung eines Reaktors zur Methanolsynthese. Nach Erstellung eines verfahrenstechnischen Konzeptes und Prüfung verschiedener Katalysatoren wird der Reaktor mittels synthetischen und realen Gasproben erprobt und unter Prozessbedingungen Erfahrungen im Betrieb gesammelt.

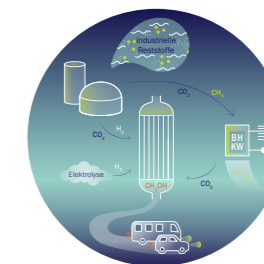


Abbildung 2:  
Zweistufige Biogasanlage im  
2m³-Maßstab am DBI (links)  
und Schema des Reaktors zur  
Methanolsynthese (rechts)



- [1] Manig, R.; Raabe, T.; Erlen, R.; Krause, H.: (2015): Establishment and Analysis of a two-stage Process for simultaneous Production of Biohydrogen and Biomethane. Regatec, Spain
- [2] Manig, R.; Hiller, S.; Ackermann, J.-U.; Krause, H.: (2018): Production of hydrogen and methane by a fermentation process – Identification of fermentative pathways. Regatec, Toulouse
- [3] Manig, R.; Hiller, S.; Erlen, R.; Krause, H.: (2017): Hydrogen as climate-friendly energy source produced by fermentative microorganisms. IGRC Rio, Rio de Janeiro
- [4] Manig, R.; Münch, D.; Tenbrink, R.; Ackermann, J.-U.; Krause, H.: (2019): Konversion von Biomasse zu Wasserstoff und Methan mittels eines zweistufigen Biogasprozesses. Biogasjournal, 03 19
- [5] Schipek, J.; Nitzsche, J. (2018): Green hydrogen for CO2 conversion to valuable chemicals (Development of a combined process for CO2 scrubbing and hydrogenation to methanol), Advanced alkaline electrolysis and applications – 2nd workshop of Elyntegration, Dresden 09/2018
- [6] Schipek, J.; Tauchnitz, H.; Mertens, F.: (2021): Methanolherstellung aus Biogas mittels Dreiphasenreaktor (COOMet), GWF-Gas/ Erdgas, Jahrgang 2021, Ausgabe 8/2021, 42-49

### Literatur

Robert Manig<sup>1</sup> (Hauptautor:in),  
Corina Protze<sup>2</sup>, Jenö Schipek<sup>1</sup>,  
Catharina Joswig<sup>1</sup>, Alexandra Müller<sup>1</sup>

robert.manig@dbi-gruppe.de

<sup>1</sup> DBI-Gastechnologisches Institut  
gGmbH Freiberg  
Halsbrücker Straße 34, 09599 Freiberg

<sup>2</sup> Biowerk Sohland GmbH  
Am Gewerbering 6, 02689 Sohland an der Spree



Michael Meiler, Martin Meiller

## Integration von Biomasse in industrielle Hochtemperatur-Prozesswärme

### Klischga II

**FKZ-Nr. 03EI5449:**  
Klimaschutzgas aus Holz und biogenen Reststoffen: Schritte zur ganzheitlichen Prozessintegration in den Keramikherstellungsprozess

### BioBrick II

**FKZ-Nr. 03EI5461:**  
CO<sub>2</sub>-neutrale Produktion von Ziegeln – Ganzheitliche Integration eines Holzvergasers in die Ziegelproduktion

In Deutschland werden in der Industrie 440 Terrawattstunden, ca. 67% des Energiebedarfs der Industrie für die Bereitstellung von Prozesswärme benötigt. Im Jahr 2020 wurden mehr als 70% dieser Prozesswärme mit fossilen Energieträgern (Gas, Öl, Kohle) erzeugt. Nur 6% aus Erneuerbaren Energien und 8% aus Strom.

Die Prozesswärmewende ist im Gegensatz zur Wärmewende im Bereich Gebäude in der öffentlichen Diskussion und der politischen Agenda trotz dieser Zahlen nur ein Randthema. Erst durch die aktuelle geopolitische Lage zeigt sich die Abhängigkeit vor allem von Erdgas. Während für die Wärmeerzeugung in Gebäuden diverse Alternativen zur Unabhängigkeit von fossilen Energieträgern marktverfügbar sind, besteht im Bereich der Prozesswärmeezeugung enormer Entwicklungsbedarf. Die Umstellung bestehender Prozesse auf elektrische Beheizung ist meist mit enormen Investitions- und Umbaukosten verbunden. Die Umstellung auf den politisch bevorzugten Wasserstoff wird noch Jahr(zehnt)en dauern. Kurzfristiger umsetzbare Alternativen könnte hier der Bioenergiesektor liefern.

### Bisherige Ergebnisse

UMSICHT hat mit Partnern aus der Industrie im Bereich der Prozesswärmeebereitung mehrere konkrete Anwendungen untersucht. Dadurch konnten Erfahrungen gesammelt und positive Resultate aufgezeigt werden.

Im Projekt BioBrick (Biomasse als Schlüssel für eine nachhaltige Produktion von Ziegeln – Energieversorgung, Erzeugung von Prozesswärme und stoffliche Verwertung von Vergaserrückständen) wurde die Integration eines Holzvergasers zur Erdgassubstitution im Tunnelofen konzeptionell geprüft. Weiterhin wurde die Nutzung von Vergaserkoks als Porosierungsmittel in der Ziegelherstellung praktisch untersucht. Neben der technischen Machbarkeit wurden die ökonomische und ökologische Bewertung durchgeführt.

Die erfolgreiche Porosierung mit bis zu 0,8 Ma.-% Vergaserkoks im Rohziegel und dadurch bis zu 20% Erdgaseinsparung konnten direkt im Ziegelwerk gezeigt werden.

Am Technikaufbau konnten Brennerversuche mit Holzgas durchgeführt werden, die zeigten, dass mit modifizierter Brenntechnik geringe Emissionen, ausreichende Wurflängen und Temperaturen erreicht werden können.

Bei Projektende (Anfang 2022) war unter den Rahmenbedingungen eine Einbindung eines Holzvergasers(-BHKW) noch nicht wirtschaftlich, dies ist stark abhängig von Preisentwicklung im Energiesektor (Erdgas, Strom) und des CO<sub>2</sub> Preises.

### Aktuelle Projekte

Aufbauend auf die positiven Ergebnisse laufen derzeit die Projekte KliSchGa2 (Klimaschutzgas aus Holz und biogenen Reststoffen – Schritte zur ganzheitlichen Prozessintegration in den Keramikherstellungsprozess) und BioBrick2 (CO<sub>2</sub>-neutrale Produktion von Ziegeln – Ganzheitliche Integration eines Holzvergasers in die Ziegelproduktion).

### KLISCHGA2

In KliSchGa2 wird der nächste Schritt hin zu einer vollintegrierten Bioenergie-basierten Prozesswärmeversorgung in der Keramikindustrie gegangen. Es wird Hochtemperatur-Prozesswärme aus dem Synthesegas eines Holzvergasers bereitgestellt und direkt im

Tunnelofen genutzt. Nach den Anpassungen und Optimierungen der Brenntechnik soll dies auch im Langzeitbetrieb demonstriert werden. Durch den Einsatz von im Projekt aus regional anfallenden Biomassereststoffen hergestellten Pellets soll die Brennstoffflexibilität gesteigert und die Technologie eine ökonomische Aufwertung erhalten. Die Holzkohle aus dem Vergaser wird wiederum auf die Eignung als nachhaltiges Porosierungsmaterial für spezifische Keramikprodukte getestet. Durch diese Kaskadennutzung soll der wirtschaftliche Einsatz von Biomasse und Reststoffen für das übergeordnete Ziel der »Grünen Keramik« optimiert werden.

### BIOBRICK2

Im Projekt BioBrick2 soll verallgemeinerungsfähiges Wissen und Know-how im Hinblick auf die Integration von Bioenergie als Quelle für industrielle Hochtemperaturanwendungen erzielt werden. Hierzu ist unter anderem auch ein Workshop geplant, um noch mehr Verständnis und Rückmeldung über nötige Anpassungen, Bedenken und Bedarfe direkt aus der Industrie zu bekommen.

### Aktuelle Ergebnisse/Stand

Im Projekt KliSchGa2 erfolgte kürzlich die erfolgreiche Integration des Vergasers am Tunnelofen. Der Vergaser konnte bei Rösler CeramInno aufgestellt werden. Nach Installation des Holzgasgebläses, der Gasregelstrecke und Anpassungen der vorhandenen Brenner am Schnellbrandofen folgte der erfolgreiche Heißbetrieb des Ofens mit Holzgas aus Pellets. Im weiteren Projektverlauf werden nun noch die erzielbaren Temperaturen, sowie die Auswirkungen auf die gebrannten Keramiken und Emissionen untersucht, ebenso die Eignung von weiteren Biobrennstoffen im Vergaser. Zudem wird die Einbringung von Holzkohle als Porosierungsmittel in Produkten der technischen Keramik weiter untersucht. Abschließend erfolgt eine technoökonomische und ökologische Bewertung, um Wege zur CO<sub>2</sub>-neutralen Keramikherstellung aufzeigen zu können.

### Partner in den Projekten

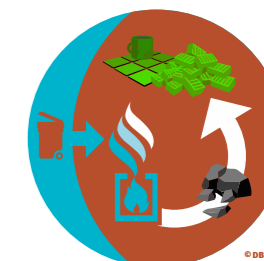
Das Forschungsprojekt KliSchGa 2 ist ein Projekt mit folgenden Partnern:

- Burkhardt GmbH
- Fraunhofer-Institut für Umwelt-, Sicherheits- und Energietechnik UMSICHT, Institutsteil Sulzbach-Rosenberg
- Fraunhofer IKTS
- Rösler CeramInno GmbH

Das Forschungsprojekt BioBrick 2 ist ein Projekt mit folgenden Partnern:

- A. Berentelg & Co. KG (ABC Klinker)
- Burkhardt GmbH
- Fraunhofer-Institut für Umwelt-, Sicherheits- und Energietechnik UMSICHT, Institutsteil Sulzbach-Rosenberg

In4climate.Nrw (Hrsg.) 2022: Prozesswärme Für Eine Klimaneutrale Industrie. Impulspapier Der Initiative In4climate. NRW, Düsseldorf



**Abbildung 1:**  
Holzgasflamme im Schnellbrandofen der Firma RöslerCeramInno zur Herstellung technischer Keramik

### Literatur

M. Eng. Michael Meiler (Hauptautor:in),  
M. Eng. Dipl.-Wi.-Ing. Martin Meiller

michael.meiler@umsicht.fraunhofer.de

Fraunhofer-Institut für Umwelt-, Sicherheits- und Energietechnik UMSICHT, Institutsteil Sulzbach-Rosenberg;

An der Maxhütte 1, 92237 Sulzbach-Rosenberg  
www.umsicht-suro.fraunhofer.de

## BioRestBrennstoff

Viktoria Scheff, Gregor Dürl, David Laner, Korbinian Kätzl, Hafiz Ali Raza



## Siebüberlauf aus der Bioabfallbehandlung als biogener Festbrennstoff: Effekt verschiedener Methoden der Brennstoffaufbereitung auf das Ascheschmelzverhalten

**FKZ-Nr. 03EL5427:**  
Energieeffiziente Nutzung sekundärer biogener Rest- und Abfallstoffe in Biomassefeuerungen durch stufenweise Aufbereitung und Brennstoffkonfektionierung

Vor dem Hintergrund der geltenden Getrennthaltungspflicht von Bioabfällen (§ 11 KrWG) und den höheren Qualitätsanforderungen an Kompost ist davon auszugehen, dass die Mengen an Siebüberlauf aus der Bioabfallbehandlung weiter ansteigen werden. Derzeit wird dieser Sekundärabfall meist in Müllverbrennungsanlagen oder Altholzkraftwerken thermisch verwertet [1]. Neben einem hohen Fremdstoffgehalt (15-20 Ma.-%f) und Feinanteil (30-50 Ma.-%f), beinhaltet der Siebüberlauf einen hohen Anteil an holzigen Bestandteilen (30-50 Ma.-%f), die in Biomasseheizkraftwerken (BMHKWs) eingesetzt werden können. Im Rahmen des Forschungsprojektes BioRestBrennstoff wird dabei unter anderem untersucht, wie Siebüberlauf aus der Bioabfallbehandlung durch stufenweise Aufbereitung und Brennstoffkonfektionierung als biogener Festbrennstoff in BMHKWs eingesetzt werden kann.

Die mineralischen Inhaltsstoffe von Brennstoffen führen bei niedrigen Ascheschmelztemperaturen in verschiedenen Bereichen von Verbrennungsanlagen vermehrt zu Verschlackungen und Korrosionsvorgängen. Im Vergleich zu konventionellen Brennstoffen beinhalten biogene Festbrennstoffe typischerweise vermehrt Bestandteile wie Chlor, Kalium und Natrium, die zu einer Erniedrigung der Ascheschmelztemperatur und einem erhöhten Verschlackungsrisiko führen. Verschlackungen an Rost, Feuerraumwänden und Wärmetauscherflächen führen zu Anlagenschäden und einer erheblichen Verringerung des Wärmeübergangs und somit zu einer Verringerung der Energieeffizienz [2,3]. In diesem Zusammenhang leistet ein besseres Verständnis des Ascheschmelzverhaltens biogener Rest- und Abfallstoffe einen wichtigen Beitrag zum vermehrten Einsatz entsprechender Brennstoffe im Sinne der Kreislaufwirtschaft und Bioökonomie [4]. Auf Basis der Kenntnis des Ascheschmelzverhaltens können Rückschlüsse hinsichtlich notwendiger Aufbereitungs- und Konditionierungsschritte des biogenen Reststoffs vor dem eigentlichen Einsatz in der Verbrennungsanlage gezogen und damit Anlagenschäden vermieden werden. In diesem Beitrag werden verschiedene Aufbereitungsstrategien für den Siebüberlauf aus der Bioabfallbehandlung in Hinblick auf das Ascheschmelzverhalten gegenübergestellt und bewertet.

### Aktivitäten und Maßnahmen

Insgesamt werden die Ergebnisse von sechs generierten Brennstoffchargen sowie zwei Referenzbrennstoffen vorgestellt. Tabelle 1 zeigt eine Übersicht der Brennstoffchargen und der jeweiligen angewendeten Aufbereitungsschritte.

Als Referenzbrennstoff dient Landschaftspflegematerial (LPM). Die mechanische Aufbereitung wurde am Standort einer Bioabfallbehandlungsanlage großtechnisch durchgeführt. Die Waschversuche wurden in zwei aufeinanderfolgenden Waschstufen mit säurehaltigem Wasser und reinem Leitungswasser in Anlehnung an das an der Universität Kassel entwickelte IFBB-Verfahren (Integrierte Festbrennstoff- und Biogasproduktion aus Biomasse, [5]) umgesetzt. Dabei wurde zwischen einer groben unzerkleinerten und einer zerkleinerten und vom Feinanteil < 2 mm abgesiebten Fraktion unterschieden. Alle Brennstoffchargen wurden nach den derzeit geltenden Normen für biogene Festbrennstoffe analysiert.

### Keywords

biogene Rest- und Abfallstoffe, Brennstoffaufbereitung, Ascheschmelzverhalten

Nr.	Charge	Beschreibung
1	SÜ50	Siebung 10 mm, 50 mm, Zerkleinerung < 20 mm
2	SÜH50	Siebung 10 mm, 50 mm, manuelle Sortierung, Zerkleinerung < 20 mm
3	SÜm80	Siebung 10 mm, 80 mm, 40 mm, Windsichtung, Fe-Abscheidung, Zerkleinerung auf < 20 mm
4	SÜm1080	Siebung 10 mm, 80 mm, 40 mm, Windsichtung, Fe-Abscheidung, Zerkleinerung auf < 20 mm
5	SÜHw grob	Klaubung von Holz-Sortimenten, 1. Waschung 5 Ma.-% Essigsäure 40°C, 2. Waschung Wasser 40°C
6	SÜHsw zerkl	Klaubung von Holz-Sortimenten, Zerkleinerung < 20 mm, Absiebung bei 2 mm, 1. Waschung 5 Ma.-% Essigsäure 40°C, 2. Waschung Wasser 40°C

### Ergebnisse

Die Ascheanalysen der Brennstoffchargen sind in Tabelle 2 dargestellt. Auffällig ist der hohe Aschegehalt in der kleineren Korngröße SÜm1080, der aus vermehrten Anlagerungen von Sand und Erde resultiert. Für die Chargen mit hohem Aschegehalt wurden entsprechend hohe Erweichungstemperaturen (DT) ermittelt, die mit den mineralischen Anlagerungen zusammenhängen. Der größte Effekt auf das Ascheschmelzverhalten der holzigen Bestandteile konnte mit dem zerkleinerten, abgesiebten und gewaschenen Material (SÜHsw zerkl) erreicht werden. Durch die vergrößerte Oberfläche wurde ein höherer Auswascheffekt der kritischen Parameter  $K_2O$  und  $Na_2O$ , gemessen an der Asche, festgestellt. Die Untersuchungen weisen darauf hin, dass das Ascheschmelzverhalten einen kritischen Brennstoffparameter für die holzigen Sortimente aus dem Siebüberlauf darstellt, den es für den Brennstoffeinsatz zu optimieren gilt. Dementsprechend konnte durch eine angepasste Brennstoffaufbereitung eine mit Landschaftspflegematerial vergleichbare Brennstoffcharge erzeugt werden.

Nr.	Charge	Asche Ma.-% d	DT °C	$K_2O$ Ma.-% d	$Na_2O$ Ma.-% d	$SiO_2$ Ma.-% d	$Al_2O_3$ Ma.-% d	CaO Ma.-% d
1	SÜ50	10,0	1108	15,4	3,7	35,8	5,1	13,9
2	SÜH50	5,1	646	28,3	6,6	15,6	1,8	11,2
3	SÜm80	6,3	1163	22,9	7,2	14,6	1,8	14,1
4	SÜm1080	19,1	1139	11,9	3,8	35,6	5,2	15,5
5	SÜHw grob	3,8	648	28,3	6,4	12,0	1,4	13,2
6	SÜHsw zerkl	2,9	1152	9,4	2,5	39,5	5,7	15,4
Ref	LPM	3,3	1241	8,2	0,7	32,0	4,4	22,1

[1] Gallery S., Hüttner A., Turk T. et al (2021), Optimierte Verwertung von Siebresten aus Biogutvergärungs- und -kompostierungsanlagen (Sieb-OPTI), Schlussbericht, S. 137.

[2] Niu, Y., Houzhang, T., Hui, S. (2016): Ash related issues during biomass combustion: Alkali-induced slagging, silicate melt-induced slagging (ash fusion), agglomeration, corrosion, ash utilization, and related countermeasures. Progress in Energy and Combustion Science. 52. 1-61.

[3] Kaltschmitt, M.; Hartmann, H.; Hofbauer, H. (ed.) (2016) Energie aus Biomasse, Grundlagen, Techniken und Verfahren, 3. Auflage

[4] Thrän, D. (ed) (2015): Smart Bioenergy: Technologies and concepts for a more flexible bioenergy provision in future energy systems, Springer International Publishing, Switzerland pag. 185.

[5] Bühle, L.; Hengen, F.; Urban, A.; Wachendorf, M.; Dürl, G. (2014): Effects of hydrothermal conditioning and mechanical dewatering on ash melting behavior of solid fuel produced from European semi-natural grassland; Fuel, 118 123/129

**Tabelle 1:** Übersicht der generierten Brennstoffchargen mit zugehörigen Aufbereitungsschritten, SÜ = Siebüberlauf



**Tabelle 2:** Analyse der Aschen aus den Brennstoffchargen

### Literatur

Viktoria Scheff (Hauptautor:in),  
Gregor Dürl, Prof. Dr. David Laner,  
Korbinian Kätzl<sup>1</sup>, Hafiz Ali Raza<sup>2</sup>

scheff@uni-kassel.de

Universität Kassel

<sup>1</sup> Fachgebiet Ressourcenmanagement und Abfalltechnik

<sup>2</sup> Fachgebiet Grünlandwissenschaft und Nachhaltige Rohstoffe  
Mönchebergstraße 7, 34125 Kassel

## ResOpt

Dorothea Stein, Jürgen Reichelt, Markus Ricker, Elisabeth Eiche, Jochen Kolb



## Optimierung der verbrennungstechnischen Eigenschaften von biogenen Rest- und Abfallstoffen auf Basis eines Biobrennstoffkataloges

**FKZ-Nr. 03EI5454:**  
Optimierung der verbrennungstechnischen Eigenschaften von biogenen Rest- und Abfallstoffen auf Basis eines Biobrennstoffkataloges im Hinblick auf eine erweiterte Ressourcennutzung und Erhöhung der Energieeffizienz von Biomassekraftwerken

Während der thermischen Behandlung von Biobrennstoffen entstehen in Biomasse(heiz)kraftwerken Anbackungen im Verbrennungsraum und Beläge auf den Wärmetauscherflächen im konvektiven Kesselteil. Dies führt während des Betriebes zu einer Verringerung der Wärmeübertragung und einer Veränderung des Temperaturprofils innerhalb der Anlagen. Die Anbackungen und Beläge müssen während regelmäßiger Wartungsarbeiten und Revisionen entfernt werden, was das Herunterfahren der Anlage impliziert.

Der thermisch behandelte Biobrennstoff trägt durch freigesetzte Partikel und Gase wesentlich zur Bildung der Anbackungen und Beläge bei. Im Rahmen von zwei Projekten [1,2] wurde ein Biobrennstoffkatalog entwickelt, welcher verschiedene Bioenergieträger anhand der Auswirkungen auf die bei der thermischen Behandlung entstehenden Anbackungen im Verbrennungsraum und im konvektiven Kesselbereich klassifiziert. Weiterhin wurde die Vorgehensweise zur Erstellung des Biobrennstoffkataloges validiert und die Übertragbarkeit auf Biomassekraftwerke unterschiedlicher Verfahrenstechnik nachgewiesen. Das aktuelle Projekt »ResOpt« hat als Hauptziel biogene Brennstoffgemische zu optimieren, wobei ein besonderer Schwerpunkt auch auf derzeit noch weniger genutzten und technisch schwierig zu behandelnden biogenen Rest- und Abfallstoffen (z.B. Miscanthus, Klärschlämme, Siebrückstände) liegt.

Das Hauptziel des Projektes ist die Optimierung der verbrennungstechnischen Eigenschaften von Biobrennstoffgemischen, die sich aus unterschiedlichsten biogenen Rest- und Abfallstoffen zusammensetzen. Dies soll zu einer Verlängerung der Laufzeiten der Biomasseverbrennungsanlagen führen, die mit einer Steigerung der Energieeffizienz verbunden ist, sowie zu einer Erhöhung der Anlagenflexibilität, um sich an die jeweilige Marktlage eines veränderten Biomasseangebotes anpassen zu können. Durch das Projekt soll außerdem die Marktfähigkeit von kritischen biogenen Rest- und Abfallstoffen erhöht werden und somit zu einer erweiternden Ressourcennutzung beitragen.

Basis des Projektes sind Optimierungen von Biobrennstoffgemischen durch Labor- und Technikumsversuche, die anschließend großtechnisch in vier Biomassekraftwerken im Regelbetrieb behandelt werden sollen. Im Rahmen des Projektes wird eine detaillierte Charakterisierung der Textur, Geochemie und Mineralogie von Anbackungen, Belägen und Rostaschen in Abhängigkeit von der Brennstoff-zusammensetzung, der Verbrennungstemperatur und einer Zugabe von Additiven durchgeführt. Darauf basierend sollen die Reaktionswege aus mineralogischer und thermodynamischer Sicht sowie die Bildungsbedingungen für kritische Phasen modelliert werden.

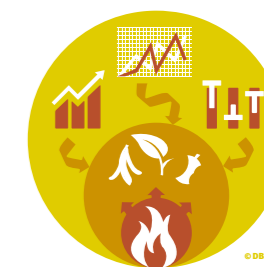
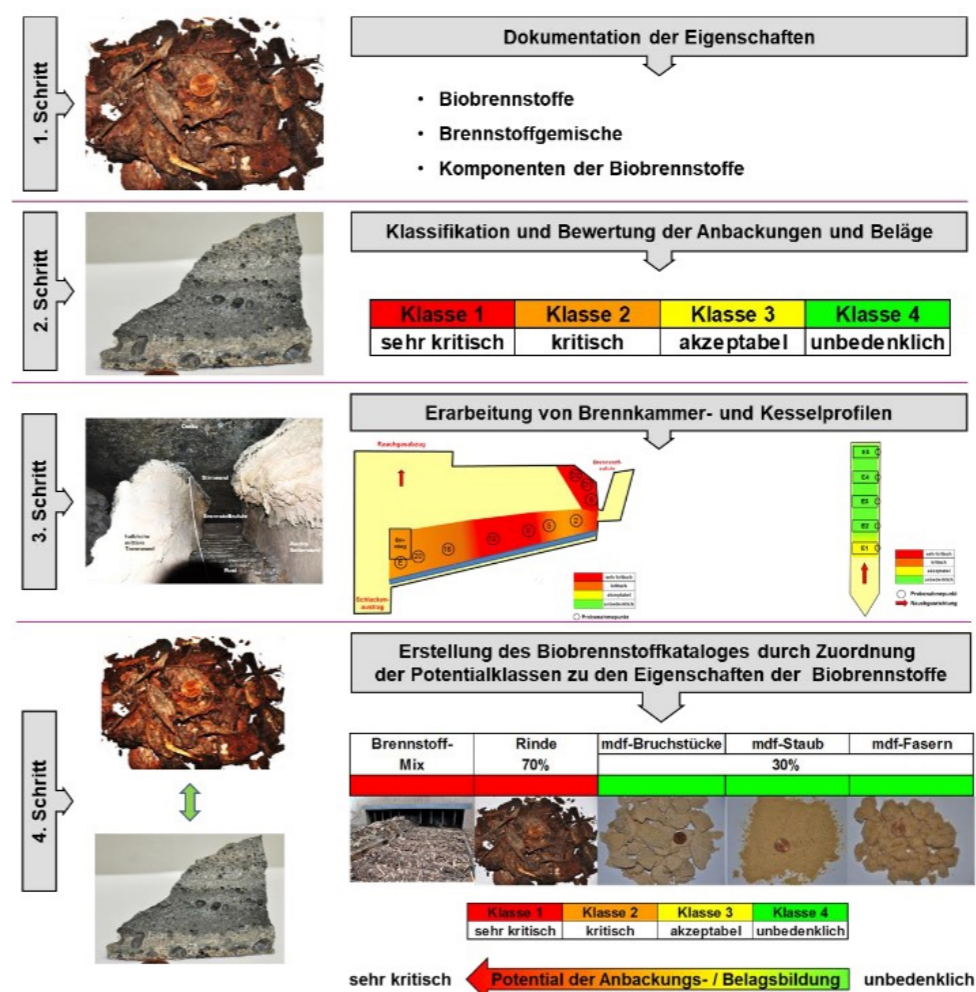
Die Wirksamkeit der optimierten Brennstoffgemische wird anhand der Reduktion von Anbackungen und Belägen im Regelbetrieb der beteiligten Biomassekraftwerke beurteilt. Weiterhin wird das Schadstoff- bzw. Rohstoffpotential von Rostaschen in Abhängigkeit der eingesetzten Biobrennstoffe bewertet.

### Keywords

Biogene Rest- und Abfallstoffe, Biobrennstoffkatalog, Erhöhung Energieeffizienz, erweiterte Ressourcennutzung

### Weitere Informationen

[https://egg.agw.kit.edu/64\\_989.php](https://egg.agw.kit.edu/64_989.php), <https://www.energetische-biomassenutzung.de/en/projects-partners/details/project/show/Project/ResOpt-718>



- [1] Reichelt, J., Pfrang-Stotz, G., Bergfeldt, B., Seifert, H. & Karrer, E. (2015): Entwicklung eines Klassifikationsschemas zur Bewertung marktorientierter Biobrennstoffe auf der Grundlage des mineralogisch-chemischen Verschlackungs- und Belagsbildungspotentials im Verbrennungsraum und im konvektiven Kesselbereich von Biomasseheizkraftwerken. RWB-EFRE Projekt 292308, 324 S.
- [2] Reichelt, J., Pfrang-Stotz, G., Bergfeldt, B., Karrer, E., Ricker, M. (2021): Effizienzsteigerung bei der Energiegewinnung in Biomassekraftwerken durch die technische Anwendung eines Biobrennstoffkataloges. BMWi-Förderprogramm: Energetische Biomassenutzung, Verbundvorhaben BiotAB (03KB125A-C), Abschlussbericht, S. 214

### Literatur

Dorothea Stein<sup>1</sup> (Hauptautor:in),  
Dr.-Ing. Jürgen Reichelt<sup>2</sup>, Marcus Ricker<sup>3</sup>,  
Dr. Elisabeth Eiche<sup>1</sup>, Prof. Dr. Jochen Kolb<sup>1</sup>

Dorothea.Stein@kit.edu,  
IBR.Reichelt@t-online.de

<sup>1</sup> Karlsruher Institut für Technologie (IT), Institut für Angewandte Geowissenschaften (AGW), Adenauerring 20b, 76131 Karlsruhe  
[www.agw.kit.edu](http://www.agw.kit.edu)

<sup>2</sup> Institut für angewandte Bau- und Reststoff-Forschung (IBR GbR), Obergrombacher Str. 29, 76646 Bruchsal ([www.IBR-KVA.de](http://www.IBR-KVA.de))

<sup>3</sup> INTEC Engineering GmbH, John-Deere-Straße 43, 76646 Bruchsal ([www.INTEC-energy.de](http://www.INTEC-energy.de))

**CarboFerro**

Nikolaus Manolikakes, Daniel Dzofou Ngoumelah, Thomas Zeng, Sven Nefigmann, Gerrit Peters, Nils Jansen, Jörg Kretzschmar



## Entwicklung und Validierung eines innovativen Eisen-Kohlenstoff Präparates zur Gasreinigung und Effizienzsteigerung des Biogasprozesses

**FKZ-Nr. 03EI5453:**  
Entwicklung und Validierung eines innovativen Eisen-Kohlenstoff Präparates zur Gasreinigung und Effizienzsteigerung des Biogasprozesses

Zur Entfernung von Schwefelwasserstoff aus Biogas ist der Einsatz von fossil basierter Aktivkohle in der Gasphase bzw. von Eisenpräparaten in der Flüssigphase bereits gängige Praxis. Des Weiteren wird im Rahmen wissenschaftlicher Untersuchungen zunehmend der stabilisierende und effizienzsteigernde Effekt von kohlenstoffhaltigen bzw. leitfähigen Additiven wie z. B. Biokohle im Biogasprozess aufgezeigt. Im Rahmen des Vorhabens CarboFerro soll daher ein kompaktiertes Kohlenstoff-Eisen Präparat (CarboFerro Pellet oder Granulat) entwickelt werden, welches sowohl für die Biogasreinigung (als Aktivkohleersatz) bzw. für die Stabilisierung des Biogasprozesses (als Prozessadditiv), eingesetzt werden kann. Die notwendigen Ausgangsstoffe zur Herstellung der Pellets sind Biokohle aus der Pyrolyse von holzartiger Biomasse (z. B. Landschaftspflegematerial und Straßenbegleitgrün) sowie ein Eisenmineralgemisch (bergbaulich gewonnene Eisen(III)-hydroxide zur Pigmentherstellung).

Die übergeordnete Zielstellung des Vorhabens CarboFerro ist die Entwicklung eines Kohlenstoff-Eisen-Kompaktates und dessen Evaluation im Labormaßstab sowie unter praxisnahen Bedingungen an der Forschungsbiogasanlage des DBFZ. Im Rahmen des Vorhabens werden dabei folgende Untersuchungen durchgeführt:

- Untersuchungen zur Herstellung eines stabilen Kompaktates mit unterschiedlichen Anteilen der Ausgangsstoffe,
- Untersuchungen zur Wirkung der Einzelpräparate (Biokohle und Eisenmineral) sowie geeigneter Eisen-Kohle Kompaktate als Biogas-Prozessadditiv (Ammoniumadsorption, Senkung der Konzentration flüchtiger Fettsäuren, Erhöhung des Biogasertrages und der Biogasbildungskinetik),
- Untersuchungen zur Biogasreinigungseffizienz ( $H_2S$  Entfernung) der Kompaktate als Aktivkohleersatz,
- Bearbeitung von genehmigungsrechtlichen Fragestellungen zum Inverkehrbringen derartiger Kompaktate,
- ökonomische Bewertungen (Gestehungskosten, Entwicklung von Business Cases), sowie
- ökologische Bewertung (Beitrag der Kompaktate zur THG Emissionsminderung im Biogasbereich).

**Keywords**

Biokohle, Biogas, Ammoniumstickstoff, Schwefelwasserstoff, Kompaktierung, Pellet, Brikett

Ziel des Beitrages ist es, eine erste Bewertung zur Kompaktierung dieser neuartigen Materialien zu geben und weitere Schritte für die Entwicklung eines marktfähigen Produktes aufzuzeigen. Bisher wurden zwei unterschiedliche Biokohlen sowie ein Eisenmineral für die Herstellung von Pellets identifiziert und bereitgestellt. In ersten Pelletierversuchen wurden die eingangs definierten Materialien einzeln und unter Variation der Restfeuchte

und der Pressmatrize pelletiert. Dabei wurde festgestellt, dass sowohl Restfeuchte als auch Matrize eine entscheidende Bedeutung zukommt. So wurde ermittelt, dass die Restfeuchte der Kohlen in etwa 40-50% (w/w) und des Eisenhydroxids in etwa 10-15% (w/w) betragen muss, um pelletiert werden zu können. Eine Variation der Matrizen mit Presskanaldurchmesser und Presskanallänge von 4x20 mm, 6x20 mm und 6x30 mm hatte zum Ergebnis, dass sich die Kohlen nur mit der 4x20 mm und der 6x20 mm Matrize und das Eisenhydroxid nur mit der 6x20 mm Matrize pelletieren lassen.

Alle hergestellten Pellets wiesen jedoch beim Test in der Abriebkammer unzureichende mechanische Festigkeiten auf (0,02-38 Ma. % FM), welche noch weit von dem Ziel >95 Ma. % FM entfernt sind. Deshalb sollen im nächsten Schritt Versuche durchgeführt werden, bei denen neben Wasser zur Einstellung der Restfeuchte, noch Stärke als Bindemittel hinzugegeben werden soll. Auf Basis der Ergebnisse aus diesen Versuchen werden weitere Versuche durchgeführt, bei denen aus unterschiedlichen Anteilen von Kohle und Eisenhydroxid unter Zugabe von Bindemittel Kohle-Eisen Kompaktate hergestellt werden. Zukünftig ist auch die Untersuchung weiterer Kompaktierungsverfahren wie Brikettierung und Granulierung geplant.

**Weitere Informationen**

<https://www.energetische-biomassennutzung.de/projekte-partner/details/project/show/Project/CarboFerro-727>

Nikolaus Manolikakes<sup>1</sup>, Nils Jansen<sup>2</sup>,  
Dr. Daniel Dzofou Ngoumelah<sup>1</sup>  
(Hauptautor:innen), Dr. Thomas Zeng<sup>1</sup>,  
Sven Nefigmann<sup>2</sup>, Gerrit Peters<sup>2</sup>,  
Dr. Jörg Kretzschmar<sup>1</sup>

<sup>1</sup> DBFZ Deutsches Biomasseforschungszentrum gemeinnützige GmbH  
Torgauer Straße 116, 04347 Leipzig  
<sup>2</sup> LUCRAT GmbH  
Hollich 79, 48565 Steinfurt

[nikolaus.manolikakes@dbfz.de](mailto:nikolaus.manolikakes@dbfz.de)  
[n.jansen@lucrat.de](mailto:n.jansen@lucrat.de)



Ronja Wollnik et al.



## Dynamics of bio-based carbon dioxide removal

### Keywords

Carbon Dioxide Removal (CDR); Negative Emissions; Multi-dimensional Assessment; Portfolio; Biomass

Bio-based carbon dioxide removal (CDR) encompasses a wide range of (i) natural sink enhancement concepts in forestry, agriculture and on organic soils including peatlands, (ii) biomass building materials, and (iii) bioenergy production with CO<sub>2</sub> capture and storage (BECCS). While this range is seen as a strategic cornerstone of negative emissions strategies, the implementation on climate-relevant scales in Germany faces many challenges. A low CO<sub>2</sub> removal potential and low reliability of storage durability on one hand may be compensated for by delivering crucial biodiversity functions on the other hand. High investment costs due to a lacking CO<sub>2</sub> transport and storage infrastructure could in turn also mean a constant and high CO<sub>2</sub> removal. Missing regulational security and controversial public and political perceptions of bio-based CDR further add to the complexities of bio-based CDR implementation.

In a multi-dimensional research approach, we study these natural, technical, or social challenges for a range of CDR methods. Based on the dynamics revealed in our analysis, implementing bio-based CDR in Germany will likely demand a portfolio approach for maximizing benefits while minimizing adverse effects. All concepts investigated could theoretically be scaled up to remove 1 million tons of CO<sub>2</sub> over 25 years, contributing to the German climate neutrality target.

### Weitere Informationen

<https://cdrterra.de/consortia/bionet>

Ronja Wollnik<sup>1</sup> (Hauptautor:in),  
Susanne Abel<sup>2</sup>, Malgorzata Borchers<sup>3</sup>,  
Peter Elsasser<sup>4</sup>, Johannes Förster<sup>3</sup>,  
Pia Henning<sup>1</sup>, Pierre Herrmann<sup>4</sup>,  
Jakob Hildebrandt<sup>5</sup>, Stanislav Kazmin<sup>1</sup>,  
Nils Matzner<sup>6</sup>, Kathleen Meisel<sup>1</sup>, Danny Otto<sup>1,3</sup>,  
Kai Radtke<sup>1</sup>, Ruben Seibert<sup>7</sup>, Marco Selig<sup>1</sup>,  
Nora Szarka<sup>1</sup>, Daniela Thrän<sup>1,3</sup>  
  
ronja.wollnik@dbfz.de

<sup>1</sup> DBFZ Deutsches Biomasseforschungszentrum  
<sup>2</sup> UG – University of Greifswald  
<sup>3</sup> UFZ – Helmholtz Centre for Environmental Research GmbH  
<sup>4</sup> TI-WF – Thünen Institute  
<sup>5</sup> HSZG – Zittau/Görlitz University of Applied Sciences  
<sup>6</sup> Technische Universität München  
<sup>7</sup> JLU – Justus Liebig University Giessen

Maria Fulde

## HyRegio® – CO<sub>2</sub> aus der Luft entfernt, Wasserstoff erzeugt. Am richtigen Ort. Zur richtigen Zeit.

Nachhaltig produzierter Wasserstoff ist die Grundlage für eine saubere, sichere und wirtschaftliche Energiewende. Der verstärkten Umwandlung von Biomasse und hier insbesondere von Reststoffen in hochwertige Energieträger sowie Spezialprodukte wird in den kommenden Jahren eine immer größere Bedeutung zukommen.

Aus diesem Grund ist das Ziel des Projekts, die Entwicklung eines energieautarken Moduls für die Erzeugung von nachhaltigem Wasserstoff aus Biomasse. Ein weiterer Wertstoff im Verfahren ist ein hochreiner BioCarbon – ein elementar-Kohlenstoff. Innerhalb des Moduls werden ein neu entwickeltes Reinigungsverfahren für Biogas mit einem Mikrowellen-Pyrolysereaktor, sowie einer Gasaufbereitung der Reaktionsgase erstmals direkt gekoppelt und über ein BHKW betrieben. Durch den direkten Anschluss des Mikrowellen-Pyrolysereaktors an eine Biogasanlage wird die Möglichkeit einer wirtschaftlichen dezentralen Wasserstoff-Produktion geschaffen.

Der Einsatz von Bioabfällen zur Biogasherstellung sichert einen Wasserstoff mit negativem CO<sub>2</sub>-Fußabdruck. Der gewonnene BioCarbon steht für den Immobilisierungseffekt von Kohlendioxid. Verwendet als Additiv bzw. Compound-Baustein in langlebigen Produkten, ermöglicht er eine aktive Entnahme von Kohlendioxid aus der Atmosphäre und liefert einen Beitrag zu der dauerhaften Luftdekarbonisierung.

Weitere Produkte wie biogenes CO<sub>2</sub>, Strom als auch hohe Exergie der Stoffströme eröffnen weitere Einsatzmöglichkeiten von Wertprodukten in regionalen Ökosystemen als auch in der Industrie. In der Verfahrensentwicklung wird ein besonderes Augenmerk auf die energetische Autarkie des Prozesses sowie Prozesssteuerung gelegt, mit dem Ziel, auf die Strom- bzw. Wasserstoff-Nachfrage flexibel zu reagieren. Ferner sollen neuartige Methoden zur Gastrennung und Reinigung entwickelt und getestet werden. Das ausgearbeitete Geschäftsmodell trägt zur Stärkung der Kommunen bei und ermöglicht einen Beitrag diverser Sektoren zur Erreichung der Klimaziele.

Dr. Maria Fulde  
maria.fulde@fld-technologies.com

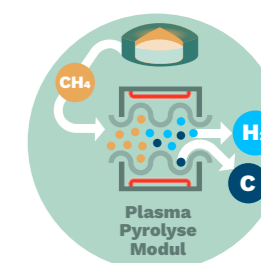
FLD Technologies GmbH  
Tambourweg 5, 63071 Offenbach am Main

### ReHydroPro



FKZ-Nr. 03EI5453:

Regionale und energieautarke Produktion von grünem Wasserstoff durch direkte Kopplung eines Moduls zur Methanpyrolyse an eine Biogasanlage



## Ihr Projekt Out of the Box: Der Science Wettbewerb

In einen Karton passt viel hinein – auch ein ganzes Forschungsprojekt? Zeigen Sie uns, was in Ihrem Karton steckt! Präsentieren Sie in drei Minuten Ihr Forschungsprojekt aus einer Box.

Suchen Sie sich einen Karton und bringen Sie darin mit, was Ihr Projekt am besten darstellt. Alles, was hinein passt, ist erlaubt - solange Sie den Karton noch selbst auf die Bühne bringen können. Am Mittwoch, dem ersten Abend der Konferenz ist dann ihr Moment: Nutzen Sie den Inhalt einer Box als Einstieg, um dem Publikum in drei Minuten Ihr spannendes Projekt zu präsentieren. Ist es ein Glas voll flüssiger Biomasse, ein neu entwickeltes Bauteil oder eher ein symbolischer Gegenstand für etwas, das überhaupt nicht eingepackt werden kann?

Die Präsentationen werden von einer Jury nach Verständlichkeit, Publikumsreaktion und Kreativität bewertet und die beste Idee mit einem tollen Preis prämiert, der ihre Wissenschaftskommunikation auf ein neues Level hebt. Mit einer multimedialen Reportage werden wir das Gewinnerprojekt für andere Forscher:innen, Stakeholder:innen und alle anderen Interessierten erlebbar machen. Mit Ihnen gemeinsam produzieren wir Audio- und Videoclips, entwickeln interaktive Grafiken und schreiben informative Texte. Daraus wird ein innovatives Storytelling-Format, was Ihnen für Ihre Wissenschaftskommunikation in Form einer Website zur freien Verfügung steht.

# 3 min



Hier gehts zur Anmeldung!

ZU GEWINNEN:

Videoclips, interaktive Grafiken,  
informative Texte: Der Preis ist  
eine multimediale Reportage über  
Ihre Forschung.



## Organisationsteam



**Prof. Dr. Daniela Thrän**  
Projektleitung  
E-Mail: [daniela.thraen@dbfz.de](mailto:daniela.thraen@dbfz.de)  
Telefon: +49 (0)341 2434 435



**Tina Händler**  
Projektkoordination  
E-Mail: [tina.haendler@dbfz.de](mailto:tina.haendler@dbfz.de)  
Telefon: +49 (0)341 2434 554



**Anna Flora Schade**  
Kommunikation und Wissenstransfer  
E-Mail: [anna.flora.schade@dbfz.de](mailto:anna.flora.schade@dbfz.de)  
Telefon: +49 (0)341 2434 597



**Joshua Röbisch**  
Satz & Layout & Grafiken  
E-Mail: [joshua.roebisch@dbfz.de](mailto:joshua.roebisch@dbfz.de)  
Telefon: +49 (0)341 2434 599

## Impressum

### Herausgeber:innen

Daniela Thrän, Tina Händler

### Kontakt

DBFZ Deutsches Biomasseforschungszentrum gemeinnützige GmbH  
Torgauer Straße 116, 04347 Leipzig  
Telefon: +49 (0)341 2434-554  
Telefax: +49 (0)341 2434-133  
E-Mail: [begleitforschung@dbfz.de](mailto:begleitforschung@dbfz.de)  
[www.energetische-biomassenutzung.de](http://www.energetische-biomassenutzung.de)

### Geschäftsführung

Wissenschaftlicher Geschäftsführer: Prof. Dr. mont. Michael Nelles  
Administrativer Geschäftsführer: Dr. Christoph Kruenkamp

### Bildnachweise

Titel: Joshua Röbisch  
Grafiken und Icons: Joshua Röbisch, weitere sind individuell ausgewiesen  
Bei jedem Beitrag sind die Autor:innen für die korrekte und rechtskonforme Verwendung ihrer Darstellungen und Bilder selbst verantwortlich.

### Layout, Satz

Joshua Röbisch

### Förderung

Gefördert vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages.

ISSN (online) 2698-6809  
ISBN 978-3-946629-98-6  
DOI: 10.48480/x66n-ev26

Alle Rechte vorbehalten. Kein Teil dieses Werkes darf ohne die schriftliche Genehmigung des Herausgebers vervielfältigt oder verbreitet werden. Unter dieses Verbot fällt insbesondere auch die gewerbliche Vervielfältigung per Kopie, die Aufnahme in elektronische Datenbanken und die Vervielfältigung auf anderen digitalen Datenträgern.

© 2023 DBFZ Deutsches Biomasseforschungszentrum gemeinnützige GmbH



Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

