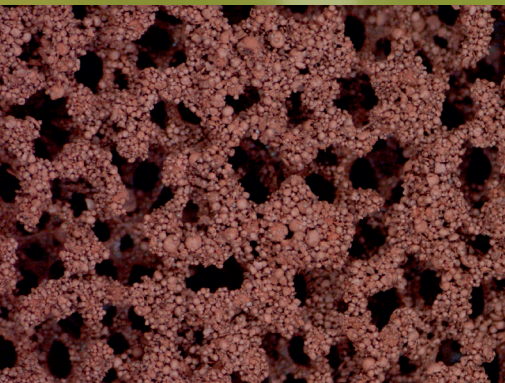




**FOCUS ON**

# Bioenergie im Strom- und Wärmemarkt

Projektergebnisse 2019-2020



Informieren Sie sich  
über die Projekte und  
Partner\*innen im  
Förderbereich »Energetische  
Biomassenutzung«



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



## KURZ ZUSAMMENGEFASST

Das Fokusheft »Bioenergie im Strom- und Wärmemarkt« wird im Rahmen der Schriftenreihe »Energetische Biomassenutzung« des BMWi-Forschungsnetzwerkes veröffentlicht. In der aktuellen und letzten Ausgabe des Fokushefts werden die neuesten Projektergebnisse der letzten zwei Jahre (2019–2020) anschaulich und prägnant dargestellt.

Mit dem Fokusheft stellen wir das Wissen über den Stand der Forschung und insbesondere über die bestehenden Herausforderungen bei der Markteinführung neuer Technologien und Konzepte zusammen.

Wir bedanken uns bei den Autorinnen und Autoren sowie den Projektpartnern für Ihre wertvollen Beiträge und beim BMWi für die Förderung einer intelligenten und passgenauen Energieform – der Bioenergie!

Seit 2018 fördert das BMWi Bioenergiethemen mit dem Förderbereich »Energetische Nutzung biogener Rest- und Abfallstoffe« im Rahmen des 7. Energieforschungsprogramms.

Startpunkt der Förderung war - im Juni 2008 - das Förderprogramm »Energetische Biomassenutzung – Förderung von Forschung und Entwicklung zur klimaeffizienten Optimierung der energetischen Biomassenutzung«, welches vom Bundesumweltministerium initiiert wurde. 2014 wechselte das Programm in den Verantwortungsbereich des BMWi. Seit 2016 ist das Programm als Forschungsnetzwerk BIOENERGIE Teil der Forschungsnetzwerke Energie des BMWi.

Im Fokus steht die Erforschung und Entwicklung von zukunftsweisenden Technologien sowie Verfahrens- und Prozessoptimierungen, die eine effiziente, wirtschaftliche und nachhaltige

Nutzung der Bioenergie ermöglichen und zur Versorgungssicherheit beitragen. Dazu unterstützt das Ministerium vor allem praxisorientierte Lösungen mit Demonstrations- und Pilotcharakter, die zur Flexibilisierung der Strom- und Wärmeerzeugung aus Biomasse beitragen. Systemintegration, Sektorkopplung, Digitalisierung sowie die erfolgreiche Kombination von Anlagen und Konzepten zur Nutzung Erneuerbarer Energien sind weitere wesentliche Aspekte.

Zur Verbesserung der nachhaltigen energetischen Nutzung im (gekoppelten) Wärme- und Strombereich sowie Verkehrsbereich sollen vor allem Biomassereststoff- und Abfallpotenziale erschlossen werden.

Fördermittelempfänger sind klassische Forschungseinrichtungen, aber vor allem auch klein- und mittelständische Unternehmen, die die Markteinführung bestimmter Technologien anstreben. Insgesamt sind seit 2009 rund 320 Institutionen (davon ca. 140 KMU) mit mehr als 520 Projektbeteiligten in mehr als 190 Projekten im Netzwerk beteiligt gewesen. Über die konkrete Projektarbeit hinaus ist das Forschungsnetzwerk Bioenergie inzwischen auf insgesamt 720 Beteiligte angewachsen. (Stand April 2021)

Wir wünschen Ihnen eine spannende Lektüre.  
Ihre Begleitforschung BeForce





# INHALT

## 9 BIOMASSEVERBRENNUNG UND -VERGASUNG

Emissionsminderung, alternative Brennstoffe, dezentrale Vergasung und Flexibilisierung

11 Annett Pollex, André Herrmann

### Strohgaz

*Entwicklung eines Verfahrens zur Vergasung von asche- und chlorhaltiger Biomasse am Beispiel Stroh*

21 Annett Pollex, Thomas Zeng, Jana Mühlenberg, Katja Oehmichen, Daniel Kuptz, Simon Lesche, Hans Hartmann, Georg Kuffer

### VergaOpt

*Mittel- und langfristige Sicherung des Holzvergaseranlagenbestandes und Beitrag zu dessen weiterem Ausbau durch Erschließung preiswerter Brennstoffsportimente*

31 Thomas Trabold, Jürgen Karl

### Ash to gas

*Mikrobielle Biomethan-Erzeugung mit Wasserstoff aus der thermischen Vergasung von Biomasse mit Nährstoffen aus Vergasungsrückständen*

43 Bodo Groß, Alexander Berhardt, Daniel Hegele, Josef Heinzle, Stephan Schulte, Thomas Uhle

### EmiLy IntEleKt

*Mit IntEleKt und EmiLy sekundäre und primäre Lösungen zur Senkung von Staub- und weiteren Schadstoffemissionen bei Holzfeuerungen entwickelt*

55 Mohammad Aleysa

### VREM-System

*Intelligentes Kombinationssystem (VREM-System) zur regelungstechnischen Optimierung der Verbrennung und zur Vermeidung der Fehlbedienung in Biomasseheizkesseln durch den Einsatz der O<sub>2</sub>/CO<sub>e</sub>-Sonde*

66 Esther Stahl, Philipp Danz, Julia Behling

### SET-Laub

*Systematische Ermittlung von Emissionsdaten bei der thermischen Umsetzung unterschiedlicher Laubabfallfraktionen*

76 Federica Torrigino, Fabian Grimm, Michael Neubert, Jürgen Karl, Mandy Schipke, Sören Birth

### FlexSOFC

*Verwertung biogener Schwachgase schwankender Qualität in SOFCs (Solid oxide fuel cells)*

87 Thomas Zeng, Kathrin Bienert, Katja Oehmichen, Torsten Schmidt-Baum, Dominik Alt, Werner Klenk, Holger Burkhardt

### Dampf-KWK

*Entwicklung eines Klein-KWK-Dampfmotors zur Nachrüstung von Feuerungsanlagen im mittleren Leistungsbereich*

## 94 BIOGAS

Emissionsminderung, Effizienzsteigerung, Flexibilisierung, Sensorenentwicklung, optimierte Einsatz von Rest- und Abfallstoffen

97 Björn Schwarz

### STEP

*Verwertung strohbasierter Energiepellets und Geflügelmist in Biogasanlagen mit wärmeautarker Gärrestveredelung*

108 Stefan Bierhals, Olaf Luschnig

### Hybrid-Kläranlagen

*Pilot- und Demonstrationsvorhaben »Hybridkläranlage«*

- 115 Eric Mauky, Jörg Kretzschmar, Jürgen Pröter, Hartmann Hieber,  
Matthias Fritzsch, Bernhard Stollberg

## OptiMand

*Optimierter Einsatz von Mühlennachprodukten zur bedarfsgerechten Bioenergieproduktion durch innovative Überwachungs-, Mess- und Regelungsmethoden*

- 121 Torsten Reinelt, Harald Wedwitschka, Michael Tietze, Jürgen Reinhold

## FermKomp

*Abgestimmte Effizienzsteigerung und Emissionsminderung der Feststofffermentation mit nachfolgender Kompostierung*

- 129 Stefan Junne

## FlexFeed

*Flexibilisierte Fütterung in Biogasprozessen mit Modell-basierter Prozesserkennung im Praxismaßstab*

- 135 Stefan Junne

## Lasersize

*Laserrückreflexions-basierte Analyse der Größenverteilung von Partikeln zur Ultraschall-gestützten Optimierung der Flüssigphase in Gärprozessen*

- 143 Marc Lincke, Uwe Petasch, Andreas Tillmann, Uwe Gaitzsch, Michael Tietze,  
Falko Niebling

## SuRIOx: Sulfur Removal with IronOxid

*Verfahrensentwicklung und Erprobung für In-Situ regenerierbare Adsorbenschäume zur Entfernung von Schwefelwasserstoff aus Biogas und Gewinnung von Schwefel*

- 151 Jürgen Pröter

## EliRas: Dynamik im Hexenkessel

*Systematische Untersuchung von Desintegrationseffekten an Biogasanlagen: Entwicklung eines Leitfadens zur Auswahl von standortspezifisch angepassten Rühr- und Substrat-aufschlussverfahren für Biogasanlagen*

## I58 SYSTEMRELEVANT

### Reststoff-, Wärme und Stromnutzung

- 160 Felix Richter, Thomas Raussen, Jana Wagner, Michael Kern

### Grün-OPTI

*Optimierung der Erfassung, Aufbereitung und stofflich-energetischen Verwertung von Grüngut in Deutschland*

- 170 Matthias Koch, Klaus Hennenberg, Markus Haller, Tilman Hesse,  
Katja Hünecke, Christian Winger

### BioStromWärme

*Rolle der Bioenergie im Strom- und Wärmemarkt bis 2050 unter Einbeziehung des zukünftigen Gebäudebestandes*

- 176 Bernhard Wern, Michael Porzig, Cornelia Vogler, Frank Scholl

### Altholz Quo vadis

*Wie können sich EEG-geförderte Altholz-anlagen in Deutschland zukünftig entwickeln?*

## I88 KURZ & PRÄGNANT

- 191 Nora Szarka, Christopher Schmid

### SmarKt

*Bewertung des Marktpotenzials und Systembeitrags von integrierten Bioenergiekonzepten*

- 194 Jessica Hudde, Maik Orth, Gerd Kirchenberg, Beate Richter

### WAS2E: Waste and Sludge to Energy

*Entsorgungskonzept für Schiffsabfälle internationaler Herkunft*

## I96 IMPRESSUM



# **BIOMASSEVERBRENNUNG UND -VERGASUNG**



**Emissionsminderung, alternative Brennstoffe,  
dezentrale Vergasung und Flexibilisierung**





FKZ-NR.: 03KB085  
 LAUFZEIT 01.08.2013–31.12.2018  
 ZUWENDUNGSSUMME: 190.020 €

#### KOORDINATION

DBFZ - Deutsches Biomasse-  
 forschungszentrum gGmbH  
 Torgauer Straße 116  
 04347 Leipzig  
 www.dbfz.de

#### PARTNER

Entrade Energiesysteme AG  
 Berliner Allee 42  
 40212 Düsseldorf

#### KONTAKT

Projektleiterin:  
 Dr. rer. nat. Annett Pollex  
 Telefon: +49 (0)341 2434484  
 E-Mail: annett.pollex@dbfz.de

#### Zitat der Projektleiterin

**Annett Pollex:**

*Der Einsatz von Stroh für die Energieerzeugung ist nicht trivial. Mit einer entsprechenden Vorbehandlung können Brennstoffqualitäten erzeugt werden, mit denen die Verwendung in Vergasungsanlagen im kleinen Leistungsbereich realisiert werden kann.*

**Annett Pollex,  
 André Herrmann**

**Entwicklung eines Verfahrens zur  
 Vergasung von asche- und chlorhaltiger  
 Biomasse am Beispiel Stroh**

# StROHgas

## THEMEN SCHWERPUNKTE:

- Homogenisierung und Aufbereitung von Stroh
- Gewaschene und additivierte Brennstoffe
- Vermeidung von Ascheverschlackung
- Festbettvergasung

## ZIELE

Das Projekt soll dazu beitragen, den Wandel im Energiesystem hin zu kleinen flexiblen Wärme-Kraft-Kopplungs-Systemen (WKK) auf eine möglichst breite Brennstoffbasis zu stellen. Umfangreiche Versuche sollten am Laborvergaser des DBFZ durchgeführt werden und dabei grundlegende Aussagen zum Einsatz von Strohpellets in der Vergasung und der dabei notwendigen Aufbereitung liefern.

## ZUSAMMEN FASSUNG

Im Rahmen des Projektes erfolgten am Beispiel Stroh Untersuchungen zum Einfluss verschiedener Aufbereitungsvarianten (Additivierung, Waschen) auf die chemische Zusammensetzung und das Verschlackungsverhalten der Feuerraumasche. Damit sollte die Eignung für die Vergasung abgeschätzt werden. Vorgesehen waren Vergasungsversuche im Technikumsmaßstab am DBFZ und im industriellen Maßstab beim Industriepartner Entrade. Da Stroh bezüglich seiner chemischen Zusammensetzung sehr heterogen ist, wurden Verfahren entwickelt, um Brennstoffchargen im Umfang von 1–4 Tonnen zu homogenisieren. Dies ist notwendig, um den Einfluss verschiedener Aufbereitungsoptionen auf das Vergasungsverhalten zu ermitteln und die Vergleichbarkeit der Ergebnisse sicherzustellen. Die Homogenisierungsverfahren wurden im Rahmen des Projektes erprobt und analytisch begleitet, um die erfolgreiche Homogenisierung nachzuvollziehen und die Ergebnisse der Arbeiten publizieren zu können. Durch die Insolvenz des Industriepartners konnten die Vergasungsversuche nicht abgeschlossen werden.



Within the scope of the project, the influence of various fuel pre-treatment options (i.e. application of additives and washing techniques) on the chemical composition and ash slagging behavior of straw was investigated. This was done to evaluate the suitability of the pre-treated fuels for gasification. Gasification tests were intended on a fixed bed gasification reactor at DBFZ and on an industrial scale at the industrial partner Entrade. Since straw is very heterogeneous in terms of its chemical composition, strategies were developed to homogenize fuel batches of 1–4 tonnes. This is necessary to determine the influence of different treatment options on the gasification behaviour and to ensure the comparability of the results. The homogenization processes were tested and numerous samples were analyzed along the process chain in order to verify the successful homogenization and to be able to publish the results. The insolvency of the industrial partner led to the termination of the project. As a result, a number of gasification experiments could not be completed.

## SUMMARY (ENG.)

### KERN BOTSCHAFTEN

Aufgrund der Erkenntnisse des Projektes:

- kann die Modellierung und Prozessführung von Anlagen zur flexiblen Bioenergiebereitstellung erfolgen, was einen umwelt- und ressourcenschonenden Anlagenbetrieb ermöglicht.
- erscheint die Vermeidung von Schlackebildung bei der Nutzung von Strohpellets aussichtsreich.
- konnte eine wesentliche Voraussetzung für weitere technische Entwicklungen im Bereich der Kleinf Feuerungsanlagen zur Nutzung von Stroh geschaffen werden.
- wurde die Basis für weiterführende Vergasungsversuche mit einer Vielzahl verschiedener Biomassebrennstoffe geschaffen, aus denen wichtige Erkenntnisse abgeleitet werden können, wie eine Flexibilisierung der Vergaser hinsichtlich der Brennstoffe erreicht werden kann.

### METHODIK MASSNAHMEN

- Bestimmung der Heterogenität von Brennstoffeigenschaften in Halmgutbrennstoffen (Beprobung und Analyse)
- Durchführung von Homogenisierungsarbeiten im Technikums- und Industriemaßstab sowie wissenschaftliche Begleitung mittels Beprobung und Brennstoffanalyse
- Waschen von Stroh zur Verbesserung der Brennstoffeigenschaften
- Additivierung von Stroh zur Verringerung des Verschlackungsrisikos in der Feuerraumasche
- Verbrennungsversuche mit Vorvergasung
- Vergasungsversuche im Festbettvergaser (Technikumsmaßstab)
- Vorversuche im industriellen Hochtemperaturvergaser

## ERGEBNISSE Ergebnisse auf einen Blick

Publikation:

- Zeitschriftenbeiträge
  - Artikel in einer Fachzeitschrift (in Vorbereitung)
  - DBFZ-interne Handlungsempfehlung zur Homogenisierung von biogenen Brennstoffen
  - Tagungsband zur DBFZ Jahrestagung 2020
- Anlage:
  - Weiterentwicklung der Laboranlage zur Verbrennung mit Vorvergasung
- Daten & Methoden:
  - Homogenisierungsvorschrift

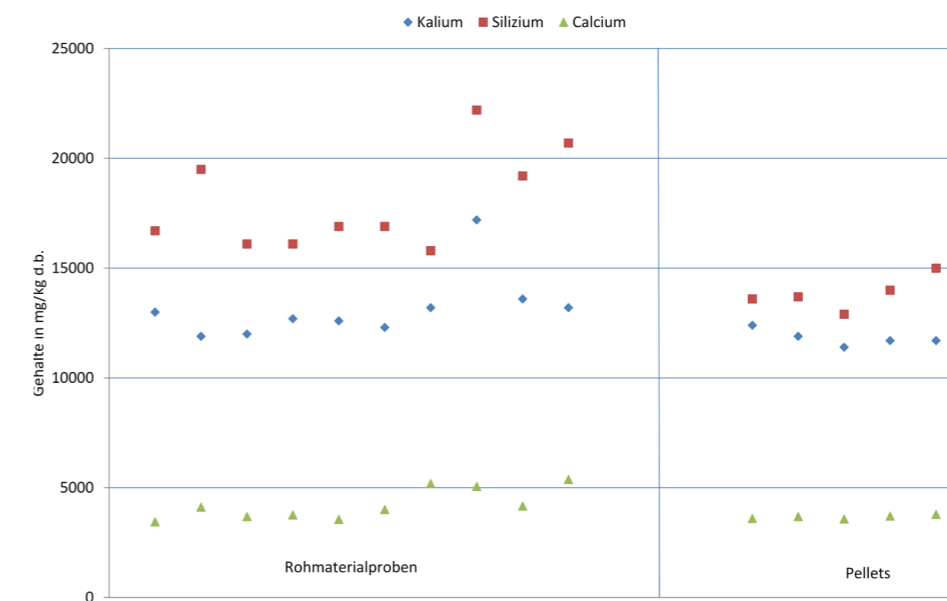


Abbildung 1:  
Heterogenität der wichtigsten Aschebildner in der verwendeten Strohcharge vor der Homogenisierung und nach der Homogenisierung

### ERGEBNIS FAKTEN

#### Brennstoffheterogenität

Für die Auswertung der Vergasungsversuche und die Bewertung der Ergebnisse ist die Kenntnis der chemischen Zusammensetzung des verwendeten Rohmaterials notwendig. Um eine repräsentative Probenahme sicherzustellen, wurde die Heterogenität der Analyseparameter innerhalb der Gesamtcharge anhand der Analyse von Einzelproben aus der Gesamtmenge bestimmt. Dabei zeigte sich, dass bestimmte Parameter, wie z. B. der Silizium- oder der Calciumgehalt, innerhalb einer Charge um bis zu 30% schwanken können. Um den Einfluss verschiedener Aufbereitungsoptionen auf das Vergasungsverhalten zu ermitteln, war daher eine Homogenisierung der verwendeten Gesamtcharge vor der Anwendung der Aufbereitungsvarianten zwingend erforderlich.

**Homogenisierung im Technikumsmaßstab**

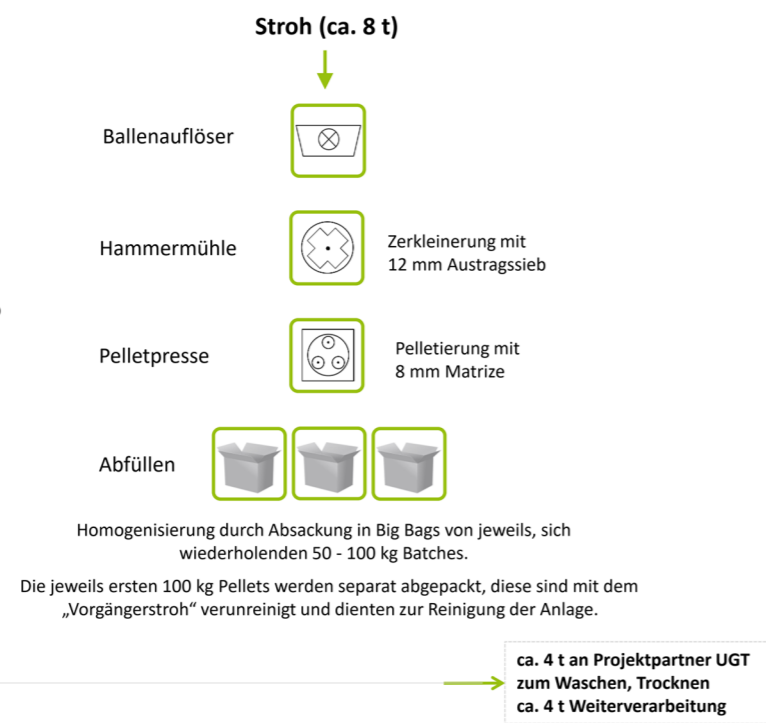
Die Homogenisierung im Technikumsmaßstab erfolgte in sieben Schritten:

- 1 händische Ballenauflösung zu Teilchargen á ca. 50 kg (Kapazität des Paddelmischers)
- 2 Grob- und Feinzerkleinerung der Teilchargen mittels Strohhackse bzw. Hammermühle
- 3 Erste Homogenisierung der Teilchargen mittels Paddelmischer
- 4 Manuelles Verschneiden der Teilchargen
- 5 Homogenisierung der verschnittenen Chargen mittels Paddelmischer
- 6 Konditionierung und Pelletierung im Technikum des DBFZ

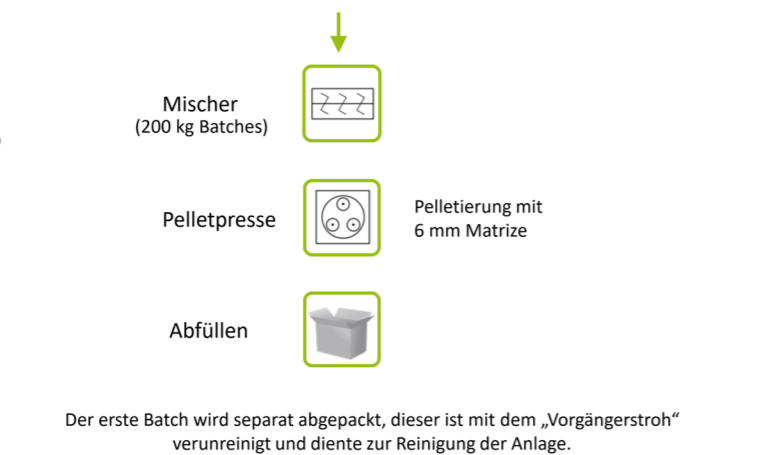
Es konnte gezeigt werden, dass die gewünschte Homogenität bezüglich der Eigenschaften und der inhaltsstofflichen Zusammensetzung durch den gewählten Ansatz in der Tat erreicht werden kann. Insgesamt konnte durch den gewählten Ansatz die Heterogenität soweit herabgesetzt werden, dass in den Pellets eine Standardabweichung bezüglich der Gehalte der wichtigsten Aschebildner von kleiner als 10% erreicht wird.

Abbildung 2: Schematische Darstellung der Vorgehensweise zur Homogenisierung der Großcharge

Teil 1: 28.02.2018: Homogenisierung der Strohcharge; Herstellung von Krix



Teil 2: 04.04.2018: Homogenisierung und Pelletherstellung



Wiederholung mit ca. 4t gewaschenem und getrocknetem Stroh

**Herstellung homogener Chargen im industriellen Maßstab**

Im größeren Maßstab (mehrere Tonnen) kann Stroh in zwei Stufen im Rahmen der Abfüllung homogenisiert werden:

- 1 Grobpelletierung auf 8 mm (Krix). Hierbei wurde eine erste Homogenisierung dadurch erreicht, dass die Abfüllung der Bigbags sequentiell in Schichten á ca. 100 kg erfolgte, wobei zunächst alle für die Gesamtmenge erforderlichen BigBags zunächst mit einer 100 kg Schicht befüllt wurden und dann schichtweise weiter befüllt wurde.
- 2 Feinpelletierung der Krix auf 6 mm ebenfalls inklusive Homogenisierung durch Abfüllung wie oben beschrieben in Schichten á ca. 100 kg in verschiedenen BigBags

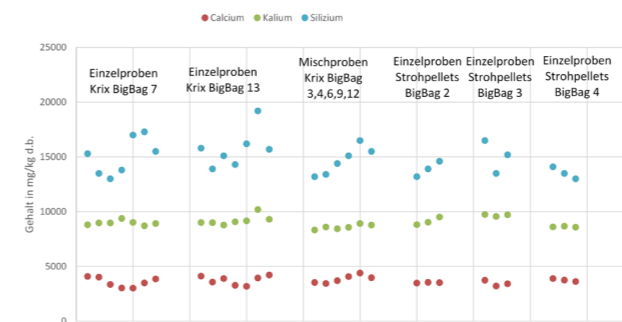


Abbildung 3: Gehalte der Hauptaschebildner Calcium, Kalium und Silizium der Ausgangscharge (Einzelproben Krix), nach der ersten Homogenisierung (Mischproben Krix) und nach der zweiten Homogenisierung (Einzelproben Strohpellets)

**Brennstoffheterogenität und Homogenisierung von Brennstoffen**

- Bestimmte Parameter, wie z. B. der Siliziumgehalt können innerhalb einer Charge um bis zu 30% schwanken.
- Durch eine zweistufige Homogenisierung kann eine ausreichende Homogenität innerhalb der Charge erreicht werden.

Durch entsprechende Beprobung und Analyse wurde die erfolgreiche Homogenisierung anhand der Aschegehalte und der wichtigsten Inhaltsstoffe bestätigt, bei denen die Standardabweichung von 10% immer unterschritten wurde.

Wie bei der Homogenisierung im Technikumsmaßstab zeigte sich, dass vor allem bei Silizium trotz der Homogenisierung mit größeren Schwankungen als bei den anderen Inhaltsstoffen zu rechnen ist.

**Waschen von Stroh**

Das für Gras und Laub erfolgreiche Wasch-Auspressverfahren (aus dem Projekt IbeKET, Ptj, FKZ 03KB088A-F) ist aufgrund des zu hohen Trockenmassegehaltes nicht für Stroh geeignet. Die Anwendung eines alternativen, noch nicht optimierten Waschverfahrens ermöglichte die Reduzierung des Aschegehalts um mehr als 20%. Der Kaliumgehalt der gewaschenen Pellets entspricht nur noch ca. einem Drittel des Kaliumgehalts der ungewaschenen Strohpellets. Der Chlorgehalt sogar nur rund ein Zehntel. Aus ökonomischer und ökologischer Sicht

besteht noch erheblicher technischer Optimierungsbedarf bei dem angewandten Waschverfahren. Da das zerkleinerte Stroh nach dem Waschen nur abgetropft und nicht mechanisch abgepresst wurde, war der Wassergehalt noch erheblich. Wahrscheinlich lässt sich der Gehalt kritischer Elemente durch das mechanische Auspressen auch noch weiter reduzieren. Dadurch war der anschließende Trocknungsprozess zeit- und energieaufwändig und damit auch teuer.



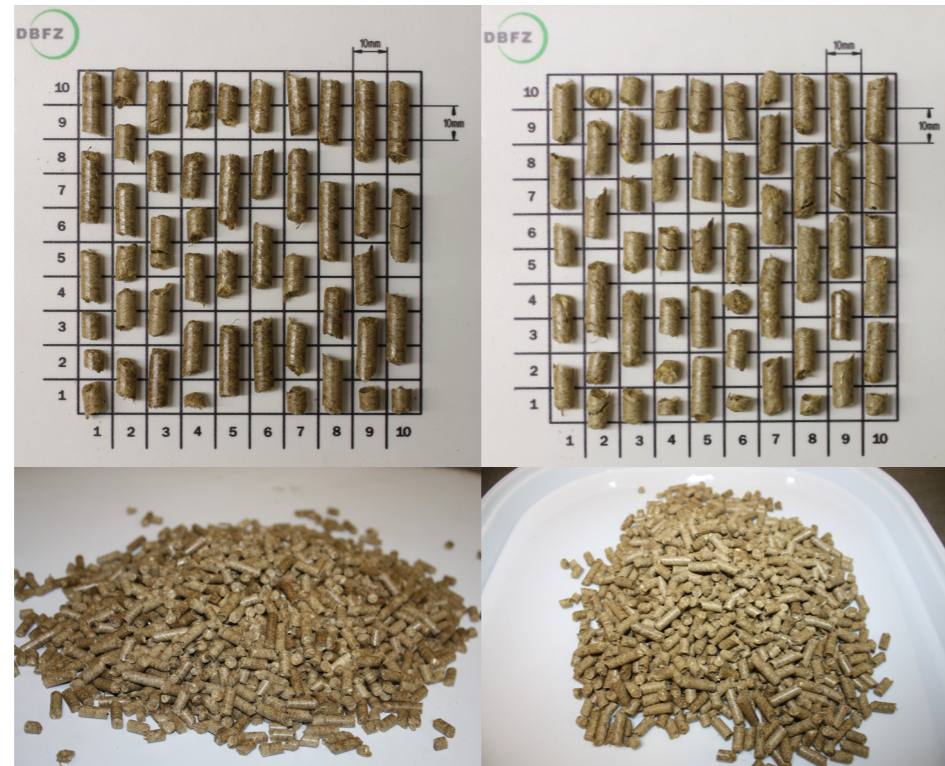


Abbildung 4:  
Pellets aus  
ungewaschenem (links)  
und ausgewaschenem  
Stroh (rechts)

#### Additivieren von Stroh und Ascheschmelzverhalten

Als Additive wurden entsprechend den Ergebnissen der Literatur-recherche Calciumcarbonat und Kaolin verwendet. Zur Untersuchung des Ascheschmelzverhaltens wurden die additivierten Strohpellets unter Normbedingungen (DIN EN ISO 18122) zunächst bei 550 °C kontrolliert verascht. Die dabei gewonnenen Strohaschen wurden dann vier verschiedenen, vergasungstypischen Temperaturen zwischen 700 °C und 1.000 °C ausgesetzt. Nach Abkühlen der Proben erfolgte die visuelle und haptische Beurteilung der Proben.

Die Untersuchungen zeigen deutlich, dass Kaolin bei gleicher Additivmenge zu einer stärkeren Reduzierung des Verschlackungsgrades führt. Ausgehend von den Untersuchungen zum Ascheschmelzverhalten kann die Additivmenge für die untersuchte Strohcharge nicht wesentlich unter den Wert von 4% Kaolin abgesenkt werden. Für  $\text{CaCO}_3$  wird sogar noch eine größere Menge benötigt, damit die Verschlackung bei 1.000 °C sicher vermieden wird.

- ohne Additive
- 2 % Kaolin
- 4 % Kaolin
- 2 %  $\text{CaCO}_3$
- 4 %  $\text{CaCO}_3$

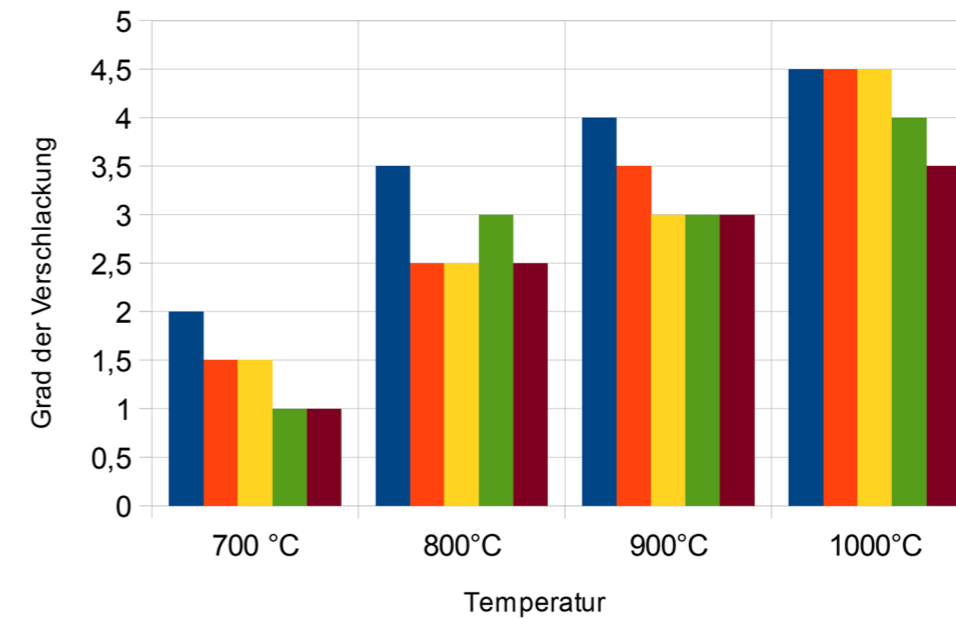


Abbildung 5:  
Ergebnisse der  
Ascheschmelzunter-  
suchungen die mit  
den Aschen der  
additivierten Pellets  
durchgeführt wurden

#### Thermochemisches Konversionsverhalten

Aus den durchgeführten Versuchen können folgende Schlüsse gezogen werden:

- Nicht nur additiviert Pellets auch gewaschene Pellets erfordern aufgrund des Aschegehalts von deutlich über 4 Ma.-% ein leistungsfähiges Ascheaustragssystem.
- Beim Test mit einem Anflanschbrenner konnte gezeigt werden, dass durch die weitere Reduzierung der Primärluftzufuhr eine ausreichende Temperaturverringern im Glutbett möglich ist, so dass auch bei Verwendung von nicht vorbehandelten Strohpellets die Verschlackungen vermieden werden könnten.
- Erste Vorversuche zur Vergasung mit Strohpellets im industriellen Maßstab zeigten, dass die Anlage nur mit einer Mischung von Holz- und Strohpellets störungsfrei betrieben werden kann. Die maximale Zumischmenge an ungewaschenem und nicht additiviertem Stroh lag 20%. Bei additiviertem Stroh könnten aufgrund des Aschegehaltes noch geringere Mengen zugemischt werden.

## HERAUSFORDERUNGEN

Bei allen Forschungsarbeiten zu biogenen Reststoffen und Agrarnebenprodukten, bei denen unterschiedliche Aufbereitungsverfahren zum Einsatz kommen, um das kritische Konversions- und Emissionsverhalten zu verbessern, ist die Gewährleistung einer ausreichenden Homogenität dieser Brennstoffe innerhalb der eingesetzten Versuchscharge von immanenter Bedeutung. Nur bei Verwendung einer homogenen Gesamtcharge können sinnvolle Schlussfolgerungen gezogen werden, wie sich die angewandten Aufbereitungsstrategien auf das Vergasungs- und Ascheverhalten auswirken.

Die vorgestellten Daten zur Homogenisierung wurden erstmalig erhoben und zeigen eine bislang wenig berücksichtigte Herausforderung bei der Forschung mit biogenen Reststoffen und Agrarnebenprodukten. Mit dem zunehmenden Interesse an solchen Brennstoffen und deren gezielter Aufbereitung werden auch die Fragen der Homogenisierung eine zunehmende Rolle spielen.

## AUSBLICK

In den nächsten Jahren ist sowohl mit einem zunehmenden Interesse an der Nutzung und Aufbereitung nichtholzartiger Brennstoffe zu rechnen, die schwierigere Brennstoffeigenschaften aufweisen und in der Regel heterogener sind als holzartige Brennstoffe. Die gewonnenen Erkenntnisse und die erarbeiteten Lösungsansätze zur Homogenisierung solcher Brennstoffe tragen wesentlich dazu bei, diese Forschung zu ermöglichen und zu erleichtern. Für Versuche mit halmgutartigen Brennstoffen wurden Arbeitsvorschriften abgeleitet, die bei zukünftigen Projekten mit solchen Brennstoffen am DBFZ und im Rahmen des Förderprogramms zur Anwendung kommen.

Das Waschen bzw. mechanische Auspressen von nichtholzartigen Brennstoffen ist eines der aussichtsreichsten Verfahren zur Verbesserung der Brennstoffeigenschaften. Die im Rahmen des Projektes durchgeführten Versuche zur Aufbereitung einer Strohcharge im Technikumsmaßstab und einer weiteren Charge für den Projektpartner Entrade habe wichtige Erkenntnisse zu den Herausforderungen und Optimierungsnotwendigkeiten geliefert, die in aktuell angelaufene Projekte und Folgeprojekte einfließen werden. Bei den Versuchen zur Verbrennung

mit Vorvergasung konnte an Holzpellets gezeigt werden, dass durch gezielte Luftsteuerung die Temperatur im Glutbett so weit gesenkt werden kann, dass auch die Vermeidung von Schlackebildung bei der Nutzung von Strohpellets aussichtsreich erscheint. Damit konnte eine wesentliche Voraussetzung für weitere technische Entwicklungen im Bereich der Kleinf Feuerungsanlagen zur Nutzung von Stroh geschaffen werden.

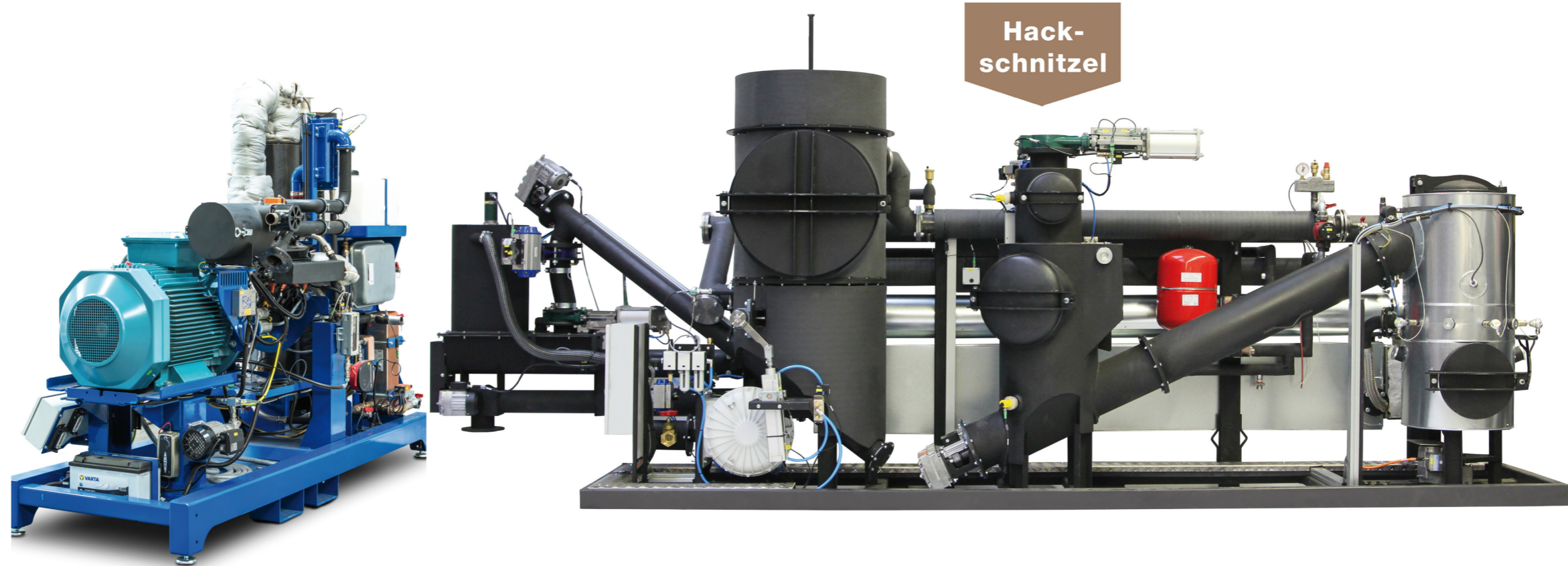
### Folgeprojekte

Vergasungsversuche können wesentliche Anhaltspunkte liefern, welche Anpassungen bei den bis dato wenig berücksichtigten Parametern der Vergasung wie z. B. der Vergasungstemperatur und die Vergasungsmittelmenge notwendig sind und in welchem Ausmaß durch gezielte Aufbereitung die Einsatzfähigkeit von Strohpellets in der Vergasung erreicht werden kann. Diese Untersuchungen sollen in einem Folgeprojekt erfolgen, das im Herbst 2020 starten soll.

- [https://www.energetische-biomassenutzung.de/fileadmin/Steckbriefe/dokumente/03KB085B\\_StROHgas\\_Schlussbericht.pdf](https://www.energetische-biomassenutzung.de/fileadmin/Steckbriefe/dokumente/03KB085B_StROHgas_Schlussbericht.pdf)

## WEITERE INFORMATIONEN





**ZIELE** Ziel des Projektes ist die Felderprobung von flexiblen, leistungsfähigen und kostengünstigen Aufbereitungswegen und einfachen aber gleichzeitig zuverlässigen Schnelltestverfahren zur Kontrolle der Brennstoffqualität von holzartigen Biomasserest- und -abfallstoffen vor Ort. Somit kann der Beitrag von kleinen, biomassegefeuerten BHKWs im zukünftigen, von fluktuierenden Energiequellen geprägten Energiesystem gesichert werden.

- THEMEN  
SCHWERPUNKTE**
- Nutzung von Rest- und Abfallholz minderer Qualität
  - Brennstoffaufbereitung durch Trocknung und Siebung
  - Nutzung in Holzgas BHKWs <math>< 50 \text{ kW}\_{el}</math>
  - On-site Schnelltestverfahren für die Brennstoffqualität

FKZ-NR.: FKZ 03KB135	<b>PROJEKTLEITERIN</b>	Spanner Re <sup>2</sup> Renewable
LAUFZEIT 01.09.2017–31.07.2020	Dr. Annett Pollex	Energy Experts GmbH
ZUWENDUNGSSUMME: 186.722 €	Telefon: +49 (0)341 2434-484	Niederfeldstraße 38
	E-Mail: annett.pollex@dbfz.de	84088 Neufahrn i. NB
		www.holz-kraft.com/de/

<b>KOORDINATION</b>	<b>PARTNER</b>
DBFZ Deutsches Biomasseforschungszentrum gemeinnützige GmbH Torgauer Str. 116, 04347 Leipzig www.dbfz.de	Technologie- und Förderzentrum im Kompetenzzentrum für Nachwachsende Rohstoffe (TFZ) Schulgasse 18, 94315 Straubing www.tfz.bayern.de

Hack-schnitzel

Wärme

Annett Pollex, Thomas Zeng, Jana Mühlenber,  
Katja Oehmichen, Daniel Kuptz, Simon Lesche,  
Hans Hartmann, Georg Kuffer

# VergaOpt

Mittel- und langfristige Sicherung des Holzvergaseranlagenbestandes und Beitrag zu dessen weiterem Ausbau durch Erschließung preiswerter Brennstoffsortimente

## ZUSAMMENFASSUNG

Brennstoffe auf der Basis hochqualitativer Holzsortimente werden durch verstärkte Kreislauf- und Kaskadennutzung zukünftig zunehmend durch Biomassereststoffe und biogene Abfallströme wie z. B. Waldrestholz oder Altholz ersetzt werden, welche sehr heterogen und brennstofftechnisch anspruchsvoll sind. Um kleine, biomassegefeuerte BHKWs wirtschaftlich betreiben zu können, müssen solche Brennstoffe entsprechend aufbereitet werden.

Innerhalb des Projektes wurden im Rahmen von Feldversuchen verschiedene Trocknungstechnologien und Siebungsverfahren zur Aufbereitung von minderwertigen Holzsortimenten (z. B. Straßenbegleitholz, Kalamitätenholz bzw. Schadholz) eingesetzt und der Einfluss der Aufbereitung auf die Eigenschaften (Partikelgrößenverteilung, Aschegehalt, Wassergehalt, Heizwert, Ascheschmelzverhalten) und die



### Zitat der Projektleiterin: Annett Pollex

Durch eine angepasste Brennstoffaufbereitung lassen sich auch aus minderwertigen Holzsortimenten für die Biomassevergasung <math>< 50 \text{ kW}\_{el}</math>, geeignete Holzhackschnittelqualitäten erzeugen. Hauptaugenmerk sollte auf der möglichst vollständigen Abtrennung des Feinanteils <math>< 3,15 \text{ mm}</math> und auf einem homogenen Wassergehalt der Holzhackschnittel von <math>< 15 \text{ Ma.-%}</math> liegen.



Zusammensetzung der Holzhackschnitzel untersucht. Anhand der Analyseergebnisse entlang der untersuchten Prozessketten konnten Empfehlungen bezüglich der Reihenfolge der Aufbereitungsschritte sowie anzuwendender Prozessparameter und Technologien abgeleitet werden. Durch die Feldversuche an Vergasungsanlagen der Fa. Spanner Re<sup>2</sup> konnte demonstriert werden, dass die Qualität von Kalamitäts- und Straßenbegleitholz soweit verbessert wurde, dass sich die aufbereiteten Holzhackschnitzel für den Einsatz in Biomassevergaser <50 kW<sub>el</sub> eignen. Zur Ermittlung der Brennstoffqualität wurde ein zuverlässiges Schnelltestverfahren auf der Basis von günstig verfügbarer Bodenanalytikausrüstung entwickelt. Mit diesem lässt sich der Kaliumgehalt in Holzproben in weniger als 15 Minuten zu einem Preis von rund 5 Euro/Probe bestimmen und erlaubt damit die Kontrolle der Brennstoffqualität im Rahmen der Eigenüberwachung und Qualitätssicherung vor Ort.

## SUMMARY

There is a growing competition for high quality wood assortments. Consequently, low quality forest by-products and waste streams like forest residues from calamities or scrap wood will be increasingly used for bioenergy purposes. These materials are commonly characterized by challenging fuel characteristics like higher ash content as well as disadvantageous particle size distribution. Thus, mechanical fuel pretreatment is usually a prerequisite for the use of these assortments in small-scale gasification plants.

Within the project, different drying and screening technologies were applied to low-grade wood assortments (i.e. roadside maintenance wood and calamity wood) and the influence of the pretreatment on fuel quality (particle size distribution, ash content, moisture, calorific value, ash melting temperatures) and the composition of the wood chips was investigated. Based on the analysis results obtained for samples along the investigated process chains, recommendations regarding the sequence of the pretreatment steps as well as the process parameters and technologies could be derived. Gasification tests were performed with the pretreated low-grade wood chips using three wood gasification plants of the manufacturer Spanner Re<sup>2</sup> GmbH. It was demonstrated that the quality of calamity wood and roadside maintenance wood was improved to such an extent that the pretreated wood chips were suitable fuels for biomass gasification plants <50kW<sub>el</sub>. A reliable rapid test method was developed based on inexpensive soil analysis equipment. With this method, the potassium content in wood samples can be determined in 10–15 minutes at a price of about 5 Euro/sample and thus, on-site control of the fuel quality can be realized.

- Verwendung von holzartigen Rest- und Abfallsortimenten minderer Qualität
- Aufbereitung von Holzhackschnitzeln minderer Qualität durch Trocknung und Siebung in verschiedenen Prozessketten (Feldanlagen)
- Intensive Beprobung entlang der gesamten Aufbereitungsketten
- Analyse der Proben bezüglich brennstofftechnischer Eigenschaften und chemischer Zusammensetzung
- Messtechnische Ausrüstung von Biomassevergaseranlagen im Feld
- Durchführung von Vergasungsversuchen an Feldanlagen inklusive Bilanzierung
- Entwicklung und Validierung eines inhaltsstofflichen Schnelltestverfahrens zur Bewertung der Brennstoffqualität vor Ort

## MASSNAHMEN

## ERGEBNISSE

### Publikationen:

- Endbericht
- ISI-Publikationen - Research article:
  - »Development of a simple and rapid test method for potassium (RAPPOD) to ensure fuel quality of woody biomass fuels« eingereicht zur begutachteten Veröffentlichung in der Zeitschrift Biomass & Bioenergy
  - POLLEX ET AL. (2020): »Influence of screening and drying on low quality wood chips for small-scale gasification«. In: *Special Issue Bioenergy: X-Factor der Zeitschrift Chemical Engineering & Technology*. [10.1002/ceat.202000034](https://doi.org/10.1002/ceat.202000034)
- Tagungsband – Beiträge:
  - 28. EUBCE 2020: »Development of a simple and rapid test method for potassium (RAPPOD) to ensure fuel quality of woody biomass fuels« (Mühlenberg J., Pollex A., Zeng T.)
  - 27. EUBCE 2019: Posterpräsentation »Screening and drying techniques to upgrade low quality wood chips for the use in small-scale gasifier-CHP plants« und Konferenzproceedings »Evaluation of screening and drying as process steps to improve fuel properties of low quality wood chips for the use in small-scale gasifier CHP plants« (Lesche et al. 2019a)
  - FORMEC 2019: »Evaluation of screening and drying as process steps to improve fuel properties of low quality wood chips for the use in small-scale gasifier CHP plants« (Lesche et al. 2019b)
  - ZENG, T.; LESCHE, S.; KUPTZ, D.; POLLEX, A.; KUFFER, G.; MÜHLENBERG, J.; LENZ, V.; HARTMANN, H. (2019): »Aufbereitung von niedrigqualitativen Holzhackschnitzeln zur Steigerung der Effizienz und Betriebssicherheit von Biomassevergaseranlagen im kleinen und mittleren Leistungsbereich«, Tagungsband der 8. Statuskonferenz Energetische Biomassenutzung 2019. 60-61. 978-3-946629-27-6.

### Auszeichnungen:

- Vortrag auf der Europäischen Biomassekonferenz (28. EUBCE 2020): ausgewählt als Highlight für die Closing Session

### Daten & Methoden:

- Repräsentative Beprobung und Brennstoffanalyse entlang von drei verschiedenen Prozessketten zur Aufbereitung zweier verschiedener Holzsortimente minderer Qualität
- Vergasungsversuche in drei Holzvergaser <50 kW<sub>el</sub> im Feld unter Verwendung der aufbereiteten Holzsortimente minderer Qualität inklusive Bilanzierung

### Brennstoffbereitstellung zum Vergleich von Aufbereitungsketten

Speziell angepasste Maßnahmen bei der Brennstoffbereitstellung können sicherstellen, dass die Holzhackschnitzel bei Verwendung schwieriger Ausgangsstoffe nicht zusätzlich durch den Bereitstellungsprozess kontaminiert werden.

- Verwendung desselben Hackers mit neuen, scharfen Messern (Abbildung I)
- Einsatz desselben Bedienpersonals beim Hacken für alle Rohmaterialien
- Vermeidung von Arbeiten auf unbefestigtem Grund unter ungünstigen Witterungsbedingungen

## ERGEBNIS FAKTEN



Abbildung 1: Eingesetzter Hacker Albach Diamant 2000 und neue, scharfe Messer (Quelle: TFZ)

Um die verschiedenen Aufbereitungsketten vergleichen zu können, wurde folgendes Vorgehen zur Erzeugung der Teilmengen für die Versuchsbrennstoffe angewandt:

- Homogenisierung der jeweiligen Sortimente auf gereinigtem, befestigtem Grund mittels Radlader
- Alternierende Befüllung der Container für die jeweiligen Aufbereitungsketten

Entsprechend wurden drei vergleichbare Holzhack-schnitzel-Teilmengen im Umfang von rund 30m<sup>3</sup> für die Holzsortimente minderer Qualität (Kalamitäts-holz, Straßenbegleitholz, Altholz) sowie für den Referenzbrennstoff Energierundholz erzeugt.

**Aufbereitung und Analyse von Holzsortimen-ten minderer Qualität**

Die Aufbereitung der Holzsortimente minderer Qualität erfolgte in Feldanlagen unter Anwendung verschiedener Trocknungstechnologien und Siebverfahren:

- Variante 1: Schubbodentrocknung mit anschlie-ßender Siebung mittels Trommelsieb (Feinanteil-abtrennung über 3×20mm Rechtecklöcher und Abtrennung der Überlängen mittels 48mm Rund-lochsieb)
- Variante 2: Schubbodentrocknung mit anschlie-ßender Siebung in der Steigschnecke der Brenn-stoffzufuhr (Feinanteilabtrennung über 4,5mm Rundlöcher und Abtrennung der Überlängen mittels 50×85mm Rechtecklöcher

**Brennstoffbereitstellung**

Gerade bei Holzsortimenten minderer Qualität muss schon bei der Brennstoffbereitstellung auf möglichst sauberes Arbeiten geachtet werden, um zusätzliche Verschmutzungen zu vermeiden  
→ Stichwort »Brennstoffhygiene«.

Dadurch können Probleme bei der Aufbereitung und Nutzung schon am Beginn der Bereitstellungskette minimiert werden.

- Variante 3: vorgelagerte Siebung mittels Trommelsieb (Feinanteilabtrennung über 10×10mm Rechtecklöcher und Abtrennung der Überlängen mittels 40×40mm Rechteck-löcher) und anschließende Containertrocknung

Entlang der Aufbereitungsketten erfolgte eine umfangreiche Beprobung wie in Abbildung 2 dargestellt. Folgende Parameter wurden bestimmt. Schüttdichte, Partikelgrößenverteilung, Aschegehalt, Wassergehalt, Heizwert, Gehalt an Kohlenstoff, Stickstoff und Wasserstoff, Gesamtgehalt S und Cl, Haupt- und Nebenelemente (Al, As, Ca, Cd, Cr, Cu, Fe, K, Hg, Mg, Mn, Na, Ni, P, Pb, Si, Zn) sowie für ausgewählte Fraktionen die Bestimmung des Ascheschmelzverhaltens.

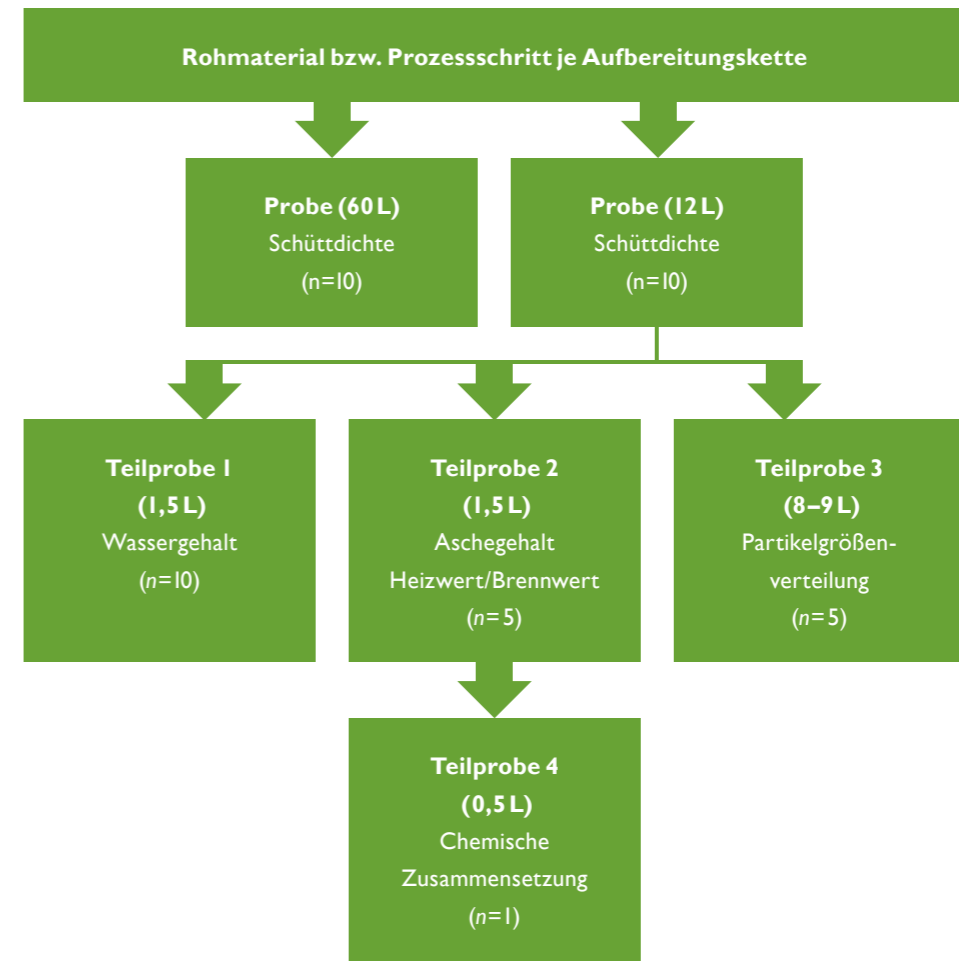
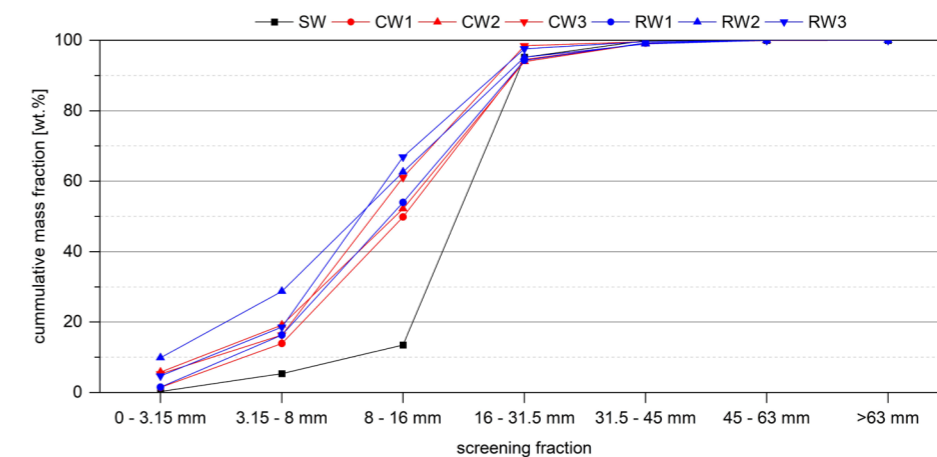


Abbildung 2: Probennahmeplan

Bei den minderwertigen Holzsortimenten ist auch nach der Aufbereitung ein deutlich höherer Anteil an kleinen Partikeln der Siebfraktionen F3.15-8mm sowie F8-16mm enthalten (Abbildung 3). Bei Variante 3 kommt es zu den größten Verlusten an prinzipiell für die Vergasung geeigneten Brennstoffpartikeln.

Abbildung 3: Partikelgrößenverteilung in den Endprodukten der drei Aufbereitungsketten (Variante 1, 2 und 3). Schwarze Quadrate: Referenz Energierundholz (SW), Rot: Kalamitätenholz (CW), Blau: Straßenbegleitholz (RW), ausgefüllter Kreis. Aufbereitungskette Variante 1, ausgefülltes Dreieck mit Spitze nach oben: Aufbereitungskette Variante 2, ausgefülltes Dreieck mit Spitze nach unten: Aufbereitungs-kette Variante 3 – Entnommen aus der OpenAccess Publikation (Pollex et al. 2020)



Die Analyseergebnisse zeigten, dass sich durch die Aufbereitung der Aschegehalt und der Gehalt an kritischen Inhaltsstoffen, insbesondere Stickstoff, aerosolbildende Elemente (K, Na, Pb, Zn, S und Cl) sowie die für das Verschlackungsrisiko kritischen Inhaltsstoffe (K, Si, P) reduziert wurden und es zu einer Anreicherung dieser Stoffe in der abgetrennten Feinfraktion kam. Dort reicherten sich auch die Elemente an, anhand derer eine Verschmutzung durch anhaftende Erde abgeleitet werden kann, also insbesondere Al und Fe. **Auf der Basis der Ergebnisse sollte das Material erst getrocknet und dann gesiebt werden, um anhaftende Verschmutzung bestmöglich zu entfernen.**

### Aufbereitung

Wenn Holzhackschnitzel von Holzsortimenten minderer Qualität für den Einsatz in Kleinvergäsern mit einer Leistung von  $<50\text{ kW}_{el}$  aufbereitet werden, sollte die Siebung daraufhin optimiert werden, den Feinanteil  $<3,15\text{ mm}$  möglichst vollständig zu entfernen und dabei aber so wenig wie möglich größerer Partikel  $>3,15\text{ mm}$  mit abzusieben.

### Einsatz aufbereiteter Holzhackschnitzel in Biomassevergäsern $<50\text{ kW}_{el}$

Ohne Aufbereitung waren die Holzsortimente minderer Qualität nicht für den Einsatz in Holzgas-BHKWs  $<50\text{ kW}_{el}$  geeignet. Die aufbereiteten Holzhackschnitzel konnten jedoch alle erfolgreich in verschiedenen Vergasungsanlagen der Fa. Spanner Re<sup>2</sup> (Abbildung 4) im Feld eingesetzt werden. Durchschnittlich konnten mit den aufbereiteten Holzsortimenten minderer Qualität vergleichbare Wirkungsgrade erzielt werden, wie mit dem Referenzbrennstoff Energierundholz.

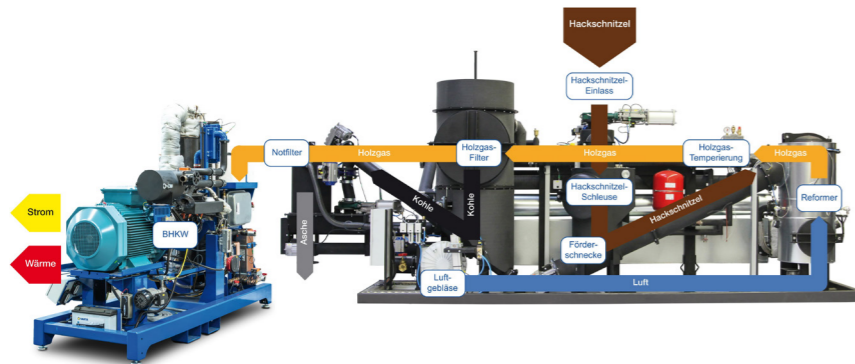


Abbildung 4:  
Aufbau der für die  
Vergasungsversuche  
eingesetzten Anlagen  
der Fa. Spanner

Im Vergleich zum Referenzbrennstoff Energierundholz kam es zu einer größeren Anzahl an Störungen, wobei nicht eindeutig zugeordnet werden konnte, ob die Störungen tatsächlich auf die Brennstoffqualität zurückzuführen waren.

**Dies zeigt, dass minderwertige Brennstoffsportimente mit der entsprechenden Aufbereitung durchaus in Vergasungsanlagen  $<50\text{ kW}_{el}$  eingesetzt werden können**, allerdings muss ein höherer Überwachungsaufwand beim Einsatz solcher Sortimente berücksichtigt werden.

### Entwicklung und Validierung eines inhaltsstofflichen Schnelltestverfahrens

Auf der Basis preiswerter Bodenanalytik (Anschaffungskosten von weniger als 1.000 Euro) wurde ein zuverlässiges Schnelltestverfahren (RAPPOD) zur Ermittlung der Brennstoffqualität entwickelt (Abbildung 5). Mit diesem Analyseverfahren lässt sich der Kaliumgehalt von zerkleinerten Holzproben in 10–15 Minuten zu einem Preis von rund 5 Euro/Probe bestimmen, wodurch die Kontrolle der Brennstoffqualität im Rahmen der Eigenüberwachung und Qualitätssicherung vor Ort schnell und einfach gewährleistet werden kann.

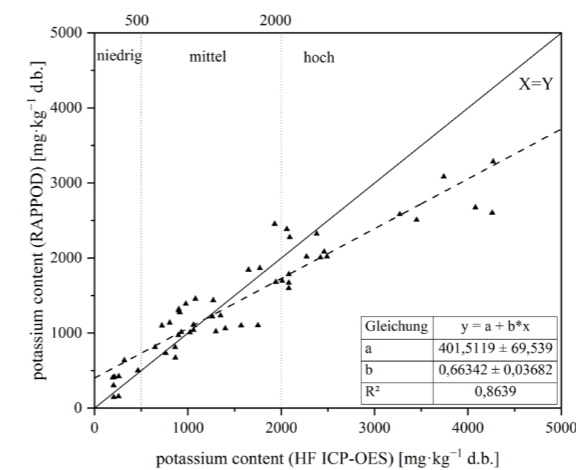


Abbildung 5:  
Vergleich von mittels ICP-OES nach HF-Aufschluss ermittelten Kaliumgehalten und dem Kaliumgehalt aus dem entwickelten Schnelltestverfahren RAPPOD (RApid POTassium Determination).  
Gestrichelte Linie: Regressionslinie

Das Verfahren kann auch im Bereich der Holzpelletherstellung zu einer verbesserten Qualitätskontrolle beitragen und z. B. zur Vermeidung des Risikos von hohen Gesamtstaubemission bei der Pelletverbrennung in Kleinf Feuerungsanlagen führen.

Erste Untersuchungen zur Nutzung preiswerter NIR-Sensoren als alternatives Schnelltestverfahren zur Bestimmung inhaltsstofflicher Parameter ergaben ebenfalls vielversprechende Ergebnisse. Das Verfahren wird aktuell in einem laufenden Projekt zur online-Bestimmung der Brennstoffqualität in der Brennstoffzufuhr weiterentwickelt (FKZ: 22033218, BMEL/FNR). Die Projektpartner wollen dieses Verfahren darüber hinaus in einem Folgeprojekt zur Beurteilung des potenziellen Verschlackungsrisikos erproben.

### Klimaschutzwirkung

Wenn davon ausgegangen wird, dass durch das Projekt bis 2030 rund 10 % des verfügbaren technischen Potenzials holzartiger Biomassen von 12 Mio. Tonnen mobilisiert werden können, um in Holzgas-BHKWs genutzt zu werden, dann würde das die Errichtung 5.000 neuer 30 kW-Spanneranlagen erlauben und bei einer angenommenen Auslastung von 8000 h/a, was auf der Basis der bisher installierten Anlagen der Fa. Spanner Re<sup>2</sup> einen realistischen Wert darstellt, die **Einsparung von rund 450.000 t CO<sub>2</sub>-Äq./a** im Vergleich zu einem Erdgas GuD ermöglichen, wenn wie bisher üblich die Verwendung eines Trommelsiebes zugrunde gelegt wird. Würde für die Siebung lediglich die auch im Projekt untersuchte vereinfachte Variante der Steigschneckensiebung zum Einsatz kommen, könnten pro Jahr sogar 455.000 t CO<sub>2</sub>-Äq./a eingespart werden.



## HERAUSFORDERUNGEN

Das geschredderte Altholz wies einen sehr hohen Anteil an Grobfraktion (ca. 60–80%) und insgesamt eine ungünstige Partikelstruktur (längliche Partikel mit hohem Anteil an Überlängen) auf. Daher war der **Einsatz von Altholz in der Vergasung auch nach der Aufbereitung nicht möglich**. Weitere Forschung ist notwendig, um durch angepasste Aufbereitung auch diese Sortimente, die aus chemischer und brennstofftechnischer Sicht für die Vergasung günstige Eigenschaften aufweisen, für den Einsatz in dieser Technologie verfügbar zu machen. Auch **rechtlich Hemmnisse** müssen hier überwunden werden. Die genannten Aspekte werden für die Anwendung von Altholz in der Biomasseverbrennung in dem aktuellen Projekt AbfallEnde (FKZ 03KB160, BMWi/Ptj) bearbeitet.

Insgesamt hat sich gezeigt, dass im Rahmen von Feldversuchen die elektrischen Wirkungsgrade gut ermittelt werden können. Die Bestimmung des **thermischen Wirkungsgrades** gestaltete sich jedoch extrem **schwierig** und wurde durch viele Faktoren beeinflusst. Hier sind weitere Forschungsarbeiten notwendig, um reproduzierbare und verlässliche Ergebnisse erzielen zu können. Vorversuche dazu sollen in einem aktuellen Projekt an der Spanner-Technikumsanlage des DBFZ erfolgen und ggf. in einem Folgeprojekt intensiver erforscht werden.

## AUSBLICK

Die im Projekt durchgeführten Vorversuche zur Anwendbarkeit eines tragbaren Pocket-NIR-Sensors zur Abschätzung inhaltsstofflicher Parameter lieferten vielversprechende Resultate. Entsprechend ergeben sich weitere Anwendungsmöglichkeiten in verschiedenen Bereichen der thermochemischen Biomassekonversion und Prozesssteuerung (insbesondere Online-Monitoring).

Die Methode wird derzeit im **Projekt oNIReduce** (Projektstart: 07/2019, FKZ: 22033218, BMEL/FNR) weiterentwickelt. Die konkrete Einbindung in die Steuerung von Biomassekeseln soll in einem weiteren Projekt realisiert werden. Entsprechende Projektskizzen sind in Vorbereitung.

Im Februar 2021 fand organisiert durch das TFZ im Rahmen des Projekts »**EBA-Holz** – Evaluierung von Schnellmess-technik zur Brennstoffanalytik in Holz-(Heiz-)Kraftwerken« (FKZ: 2219NR294, BMEL/FNR) ein Expertenworkshop zur Laboranalytik und Schnellmesstechnik von Holzbrennstoffen statt. Dabei beteiligte sich das Projektteam mit der Vorstellung der Ergebnisse zur Kaliumbestimmung mittels Bodenkoffanalytik sowie der Präsentation erster Ergebnisse zur Verwendung der NIR-Spektroskopie für die Bestimmung verbrennungsrelevanter Brennstoffeigenschaften an dem Workshop. Im Projekt EBA-Holz werden zudem weitere Schnellmessmethoden (RFA, NIR, etc.), vornehmlich für den Einsatz an größeren Biomasseheiz(kraft)werken getestet. Ein Online-monitoring des Brennstoffes wäre für die Vergasungssysteme von Vorteil, um Abweichungen und Störungen im Vorfeld erkennen zu können. Die Onlinebestimmung des Kaliumgehalts und dessen Einfluss auf die Schlackebildung sowie der Stickstoffgehalte mit ihren maßgeblichen Effekten bei den brennstoffbedingten NO<sub>x</sub>-Emissionen, wären für die nächsten Vergasergenerationen sehr interessant.

Die Arbeiten haben bestätigt, dass der wesentliche **Schlüssel zum störungsfreien Betrieb in der Aufbereitung des Brennstoffes** liegt. Bzgl. Altholz muss das Augenmerk auf die Holzaufbereitung gelegt werden. Dann wäre ein Einsatz und neue Einsatzgebiete für die Holzvergasungsanlagen möglich. Die Ergebnisse haben zudem gezeigt, dass schon eine **einfache Siebung über das Lochblech in der Zuführschnecke eine kostengünstige Lösung zur Reduzierung aschebedingter Störungen** ist.

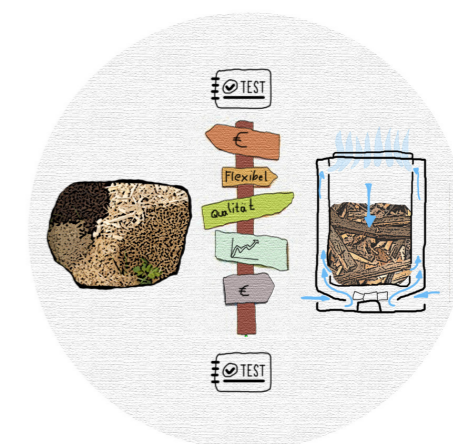
## LITERATUR

LESCHÉ, S.; KUPTZ, D.; ZENG, T.; POLLEX, A.; KUFFER, G.; MÜHLENBERG, J.; HARTMANN, H. (2019a): Evaluation of Screening and Drying as Process Steps to Improve Fuel Properties of Low Quality Wood Chips for the Use in Small-scale Gasifier-CHP Plants. In: *Proceedings of the 27th European Conference & Exhibition (EU BC&E)*. Lisbon (Portugal), S. 1004–1008. ([online abrufbar](#)).

LESCHÉ, S.; KUPTZ, D.; ZENG, T.; POLLEX, A.; KUFFER, G.; MÜHLENBERG, J.; HARTMANN, H. (2019b): Evaluation of Screening and Drying to Improve Fuel Properties of Low Quality Wood Chips for the Use in Small Wood Gasifier CHP-plants. In: *Proceedings of FORMEC 2019 - Exceeding the Vision: Forest Mechanisation of the Future*. Sopron (Hungary).

MÜHLENBERG, J.; POLLEX, A.; ZENG, T. (2020): Development of a simple and rapid test method for potassium to ensure fuel quality of woody biomass fuel. Conference proceedings. In: 28th EUBC, 6-9 July 2020, online. [10.5071/28thEUBCE2020-2AO.2.2](https://doi.org/10.5071/28thEUBCE2020-2AO.2.2).

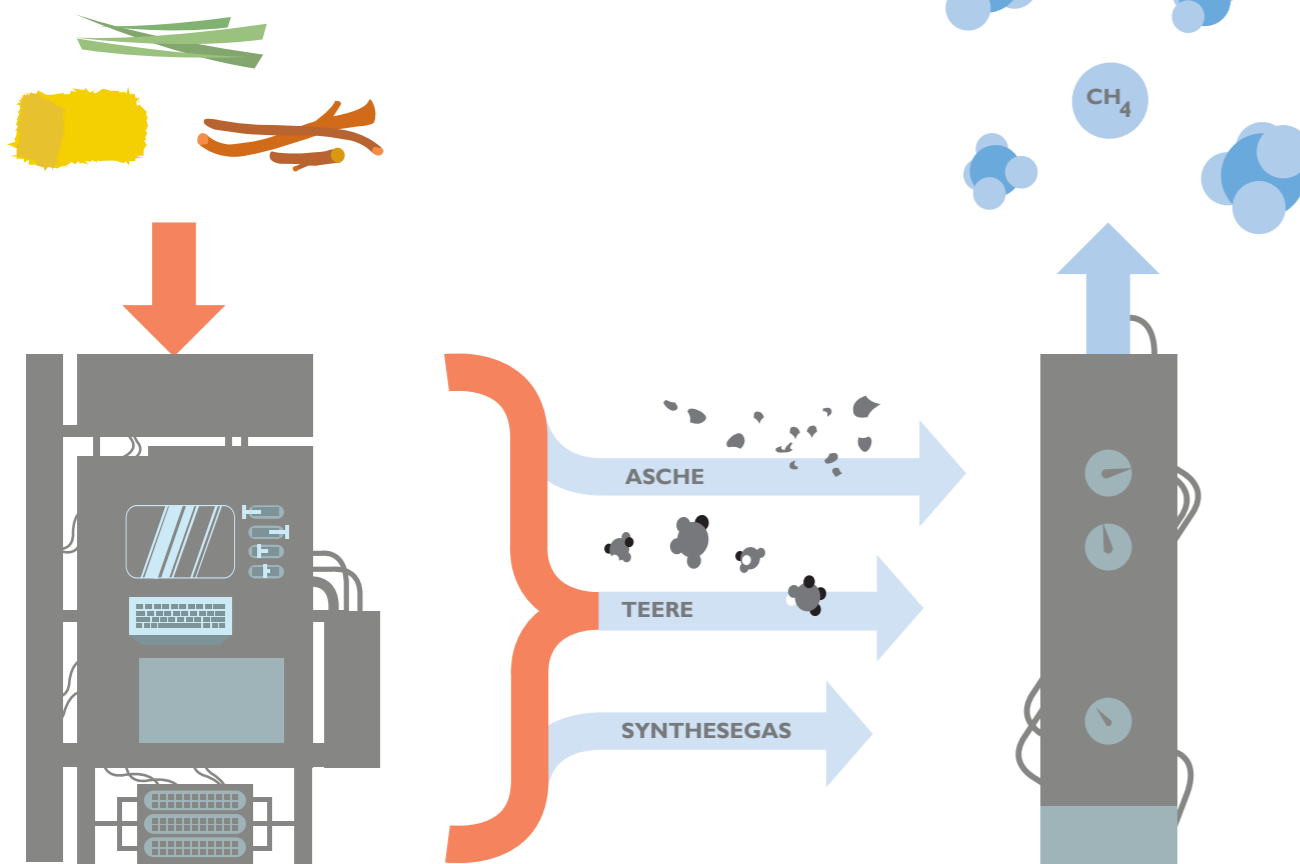
POLLEX, A.; LESCHÉ, S.; KUPTZ, D.; ZENG, T.; KUFFER, G.; MÜHLENBERG, J.; HARTMANN, H.; LENZ, V. (2020): Influence of Screening and Drying on Low-Quality Wood Chips for Application in Small-Scale Gasification Plants. In: *Chem. Eng. Technol.* 162 (3). S. 248. [10.1002/ceat.202000034](https://doi.org/10.1002/ceat.202000034).



Thomas Trabold, Jürgen Karl

# Ash to gas

## SCHEMA DER PROJEKTIDEE ASH-TO-GAS



## Mikrobielle Biomethan-Erzeugung mit Wasserstoff aus der thermischen Vergasung von Biomasse mit Nährstoffen aus Vergasungsrückständen

Bestimmte Mikroorganismen, sogenannte Archaeen, sind in der Lage CO<sub>2</sub> und H<sub>2</sub> zu Methan zu verstoffwechseln. Dieses kann reguläres Erdgas CO<sub>2</sub>-neutral substituieren und damit einen wichtigen Beitrag zum Klimaschutz leisten. State-of-the-Art ist es, den nötigen Wasserstoff aus der Elektrolyse zu gewinnen und damit CO<sub>2</sub>, das natürlicherweise in Biogas vorliegt, umzuwandeln. Ziel des Projektes war die Untersuchung der Machbarkeit eines innovativen Prozesses bei der CO<sub>2</sub> und ein Großteil des Wasserstoffes aus holzartiger Biomasse bezogen wird. Dadurch kann die Bandbreite an Edukten für die biologische Methanisierung massiv vergrößert werden. Durch die Loslösung von günstigem Strom für die Elektrolyse, kann die Wirtschaftlichkeit des Prozesses verbessert werden. Die Biomasse wird deshalb in der thermochemischen Vergasung zu Synthesegas (CO<sub>2</sub>, CO, H<sub>2</sub>) umgesetzt, welches anschließend von den Archaeen weiter zu Methan umgesetzt werden kann. Entscheidend ist

dabei, ob die Mikroorganismen CO und Verunreinigungen im Synthesegas, wie zum Beispiel Teere, verstoffwechseln oder zumindest tolerieren. Außerdem wurde untersucht, inwiefern Asche als Nährstofflieferant für die Mikroorganismen dienen kann. Zentrales Ergebnis ist, dass ein Proof-of-Concept mit unterschiedlichen Anlagen erfolgreich durchgeführt werden konnte. Nach einer Adaptionsphase konnten alle Bestandteile des Synthesegases toleriert und bis auf die Asche verwertet werden. Zentraler Baustein weiterer Forschung muss die Teerfracht sein.

### ALLOTHERME HOLZVERGASUNG

FKZ-NR.: 03KB097  
LAUFZEIT:  
15.12.2014–31.05.2018  
ZUWENDUNGSSUMME:  
EVT: 202.147 €  
MP: 325.125 €  
UMSICHT: 72.626 €

**KOORDINATION**  
Friedrich-Alexander-Universität  
Erlangen-Nürnberg (FAU)  
Lehrstuhl für  
Energieverfahrenstechnik  
Fürther Straße 244f  
90429 Nürnberg  
<https://www.evt.tf.fau.de/>

**PARTNER**  
MicroPyros GmbH  
Europaring 4  
94315 Straubing  
Fraunhofer UMSICHT  
Institutsteil Sulzbach-Rosenberg  
An der Maxhütte 1  
92237 Sulzbach-Rosenberg

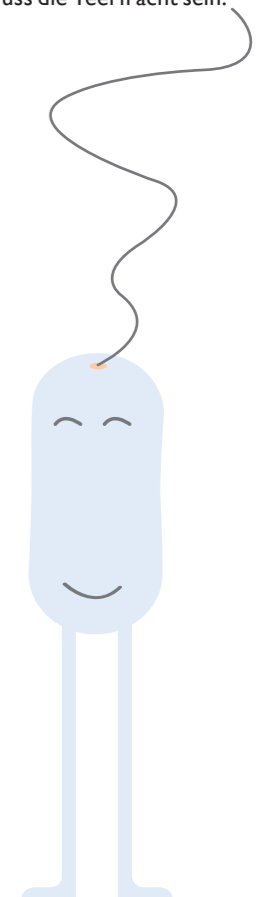
### BIOLOGISCHE METHANISIERUNG

**KONTAKT**  
Projektkoordinator:  
Prof. Dr.-Ing. Jürgen Karl  
Thomas Trabold, M.Sc.  
Telefon: 091153029027  
E-Mail: [thomas.trabold@fau.de](mailto:thomas.trabold@fau.de)



### Zitat des Projektleiters: Thomas Trabold

*Die biologische Methanisierung ist derzeit von günstigem Strom für Elektrolyse-Wasserstoff abhängig. Das kann der Umstieg auf Synthesegas aus Biomasse ändern. Mit dem Projekt Ash-to-Gas ist ein wichtiger Schritt zur Wirtschaftlichkeit der biologischen Methanisierung gemacht.*





**ZIELE** Ziel des Projektes war es, die biologische Methanisierung mit der thermischen Konversion (Vergasung) von Biomasse zu koppeln (vgl. oberes Schema der Projektidee). Dadurch kann Erdgas substituiert werden und CO<sub>2</sub> eingespart werden.

## THEMEN SCHWERPUNKTE

- Erdgassubstitution
- Biomasse-Vergasung
- Biologische Methanisierung
- Fermenterbau
- Mikrobiologie

Some microorganisms of the domain of the archaea are able to synthesize methane from of H<sub>2</sub> and CO<sub>2</sub> or CO, respectively. This ability can substitute natural gas. Therefore, the product gas of a biogas plant and H<sub>2</sub> produced by electrolysis react to methane concentration of levels that satisfy injection criteria of the gas grid without CO<sub>2</sub> separation. The project Ash-to-Gas addresses a new source of feedstock for this technology: thermochemically converted lignocellulosic biomass out of gasifiers. This makes new resources available leading to low costs for primary energy sources like roadside greenery, broader areas of application and a reduced dependency on cheap volatile electricity for the electrolysis.

Therefore, microorganism turn synthesis gas out of the thermochemical gasification into methane. The crucial challenge is whether the microorganisms tolerate or even metabolize CO and impurities like tars in the syngas. Further, we held out experiments on ash as nutrient deliverer. Main result is a successful proof-of-concept with different facilities. The archaea tolerated all components of the syngas after an adaption phase and used up all, exceptionally the ashes, which had no effect on the process.

## METHODIK MASSNAHMEN

Für das Projekt Ash-to-Gas arbeiteten der Lehrstuhl für Energieverfahrenstechnik, FAU Erlangen-Nürnberg, Fraunhofer UMSICHT und die MicroPyros GmbH Hand in Hand zusammen. Es ergeben sich folgende zentralen Maßnahmenpakete:

- MicroPyros GmbH führte ein Mikroorganismen-Screening durch, um geeignete Mikroorganismen für die Synthesegas-Verstoffwechslung zu finden. Diese wurden der FAU bereitgestellt.
- An der FAU wurde ein druckaufgeladener Anaerob-Rührfermenter aufgebaut (Abbildung 1) und mittels einer steuerprogrammierbarer Steuerung (SPS) vollständig automatisiert. Dieser verblieb während des Projektes an der FAU und wurde mit der Kultur von MicroPyros angeimpft. Zusätzlich wurde ein allothermer Wasserdampfvergaser auf die Bedürfnisse des Projektes abgestimmt.

## SUMMARY

- Zunächst erfolgte die Zugabe einzelner Synthesegaskomponenten in den Rührfermenter, um die Toleranz gegenüber den Komponenten sicherzustellen. Anschließend wurden Vergaser und Fermenter zusammengeschlossen. Hierfür war der Aufbau eines Dosiersystems für heiße, teerbelastete Gase notwendig.
- Die FAU stellte verschiedene Vergasungs- und Verbrennungaschen unter definierten Parametern her und führte Elementaranalysen der Aschen und ihrer Eluate durch. Die Eluate wurden durch MicroPyros an verschiedenen Mikroorganismen als Nährsubstrat getestet.
- Fraunhofer UMSICHT stellte eine TCR-Konversionsanlage (thermo-catalytical reforming) bereit, die an einen hauseigenen Fermenter der MicroPyros gekoppelt wurde. Auch hier konnte das Roh-Synthesegas zu Methan umgesetzt werden. Das finale Ziel, den Proof-of-Concept durchzuführen, wurde so auf zwei Pfaden erreicht.

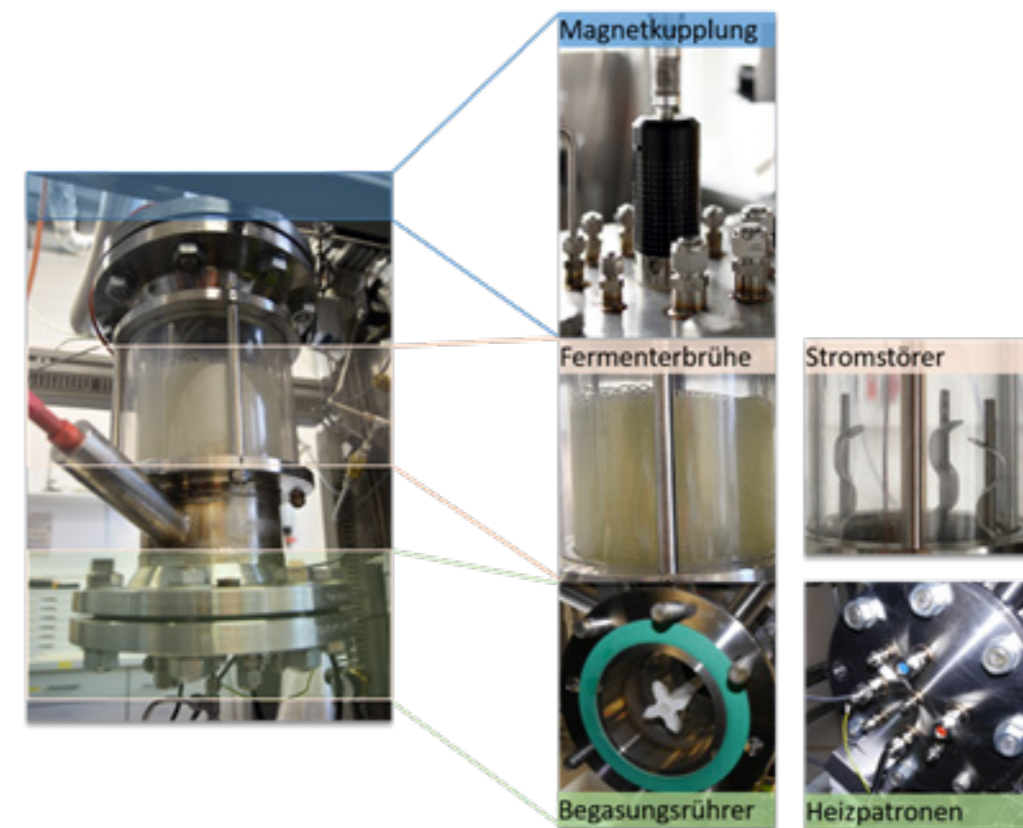


Abbildung 1:  
*Fotografie des Fermenterkörpers  
mit Hervorhebungen  
einzelner Bauteile*

Diese Maßnahmen wurden stets von einiger Messmethodik und Herangehensweise begleitet:

- Druck-, Temperatur- und Massenstrommessung und –regelung
- Online-Gasanalytik rund um die Uhr
- Vitalitätsprüfung und Zellzählung am Mikroskop
- Datenerfassung mittels der SPS

### Asche als Nährmediumersatz

Asche kann nicht als Nährmediumersatz verwendet werden. Es wurden verschiedenste Aschen aus biogenen Brennstoffen (z.B. Holz, Straßenbegleitgrün, Heu, usw.) hergestellt. Darin enthalten ist ein durchaus ausreichender Anteil an Nährstoffen, der per Elementaranalyse untersucht werden konnte. Es ist jedoch nicht möglich die Nährstoffe unter Fermentationsbedingungen aus der Asche zu extrahieren. Die Asche wird zwar von den Mikroorganismen toleriert, bringt aber keine Vorteile.



Abbildung 2:  
Verbrennungsasche  
aus Straßenbegleitgrün

## ERGEBNISSE

### Die Methanproduktionsrate

Zur Bewertung des Prozesses der biologischen Methanisierung wird die Größe der Methanproduktionsrate herangezogen. Die Methanproduktionsrate ist ein Ausdruck der Raum-Zeit-Ausbeute und damit die wichtigste Größe zur Bewertung der Prozessgüte. Sie gibt an, wie viel Methanvolumen in welcher Zeit, in welchem Fermentervolumen produziert wird.

### Mischkultur schlägt Reinkultur

Ein zentraler Schlüssel der biologischen Methanisierung ist die verwendete Kultur. Diese muss an die entsprechenden Bestandteile des Synthesegases adaptiert werden. Außerdem exprimieren Mikroorganismen Nebenprodukte, durch die sie sich teils selbst hemmen. Diese müssen entweder aus dem Fermenter ausgespült werden, oder von einer weiteren Kultur unschädlich gemacht werden, die diese Nebenprodukte weiter verstoffwechselt.

Der vom Industriepartner vorgeschlagene Ansatz, Reinkulturen für die Methanisierung einzusetzen führte nicht zum Erfolg und ermöglichte keine stationäre Methanisierung. Von der Reinkultur ist grundsätzlich eine bessere Performance zu erwarten, da sie exakt auf den Anwendungsfall abgestimmt werden kann. Jedoch unterliegt die Produktivität der Mikroorganismen unregelmäßigen Schwankungen, wenn sie lediglich mit einem mineralischen Substrat versorgt wird. Zusätzlich sind Reinkulturen wesentlich anfälliger gegen Verunreinigungen, wie sie zum Beispiel durch den Teer im Synthesegas zu erwarten sind. Durch einen Umstieg auf eine Mischkultur konnten wesentlich bessere Ergebnisse und ein stabiler Methanisierungsbetrieb erreicht werden.

## PROJEKTKERNFRAGEN

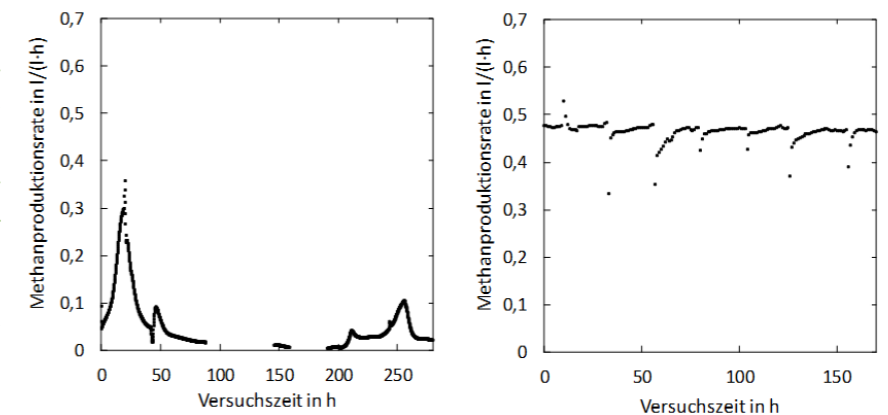
1. KÖNNEN KULTUREN DER ARCHAEEN ENTWICKELT WERDEN, DIE NEBEN WASSERSTOFF UND CO<sub>2</sub> AUCH KOHLENSTOFFMONOXID (CO) UMSETZEN?

2. KÖNNEN DIE MIKROORGANISMEN AUCH IN GEGENWART VON TEEREN IM SYNTHESGAS IHRE HOHEN UMSATZRATEN BEIBEHALTEN?

3. KÖNNEN ASCHEN UND KOKSPARTIKEL AUS DER VERGASUNG ALS NAHRUNG (NÄHRSTOFF) FÜR DIE ARCHAEEN VERWENDET WERDEN UND SOMIT PROZESSKOSTEN GESPART WERDEN?



Abbildung 3:  
Beispielhafte Darstellung der Methanbildungsrate über die Zeit mit konstanten Versuchsparametern.  
Links: Zugabe von mineralischer Nährlösung und Verwendung einer Reinkultur.  
Rechts: Zugabe von Nachgärschlamm aus einer Biogasanlage und Bildung einer Mischkultur.



Das zweite Diagramm zeigt den Verlauf der Methanproduktion für eine Mischkultur. Hier zeigt sich eine wesentliche höhere Methanproduktionsrate, die zugleich deutlich verstetigt ist. Der Unterschied liegt in der Kultur. Für das rechte Diagramm in Abbildung 3 wurde die Reinkultur aus dem rechten Diagramm mit Nachgärschlamm aus einer Biogasanlage erweitert. Eine weitere Kultur aus diesem Nachgärschlamm ist bei Fermenterbedingungen lebensfähig, wodurch eine Mischkultur entsteht, die gleichzeitig von den Nährstoffen aus eben diesem Nachgärschlamm profitiert. Die zu sehende, verbleibende Unstetigkeit ist auf den Auslass von überschüssiger Fermenterbrühe zurück zu führen und verschwindet bei dessen Vergleichmäßigung.



### CO-Verstoffwechslung

Die Zudosierung von CO stellte für die verwendeten Organismen kein Problem dar. Es wurde zu CO<sub>2</sub> umgesetzt und steht damit im realen Anwendungsfall für die Methanisierung zur Verfügung. Dies deckt sich mit der einschlägigen Literatur.

### Teer im Synthesegas

Der Anteil an Teer im realen Synthesegas stellt sich als die zentrale Herausforderung der biologischen Methanisierung von Synthesegas aus der Holzvergasung dar. Im Verlauf der Untersuchungen kann jedoch gezeigt werden, dass eine Adaption der Kultur an die Teere unter Verringerung der Methanproduktionsrate möglich ist. Die Mikroorganismen sterben also nicht mehr ab. Die Teere werden letztlich höchstwahrscheinlich von den Mikroorganismen abgebaut. Dies legen Mikroskopaufnahmen nahe, unter denen Teerperlen mit der Zeit verschwinden. Diese sind in Abbildung 4 zu sehen.

Abbildung 4:  
Mikroskopaufnahmen  
direkt nach (links) bzw.  
drei Tage nach (rechts)  
der Zugabe von  
Synthesegas aus der  
Vergasung von Teerperlen



Allerdings wird die Kultur bei dauerhaft, zu hoher Teerbelastung nachhaltig geschädigt, deaktiviert und stirbt schließlich ab. Dadurch ergibt sich an dieser Stelle der größte Bedarf an weiterer Forschung, was die Abbauraten, -produkte, Belastungsgrenzen und vor allem die Adaptionsfähigkeit weiterer Kulturen angeht.

### Löslichkeit von Wasserstoff

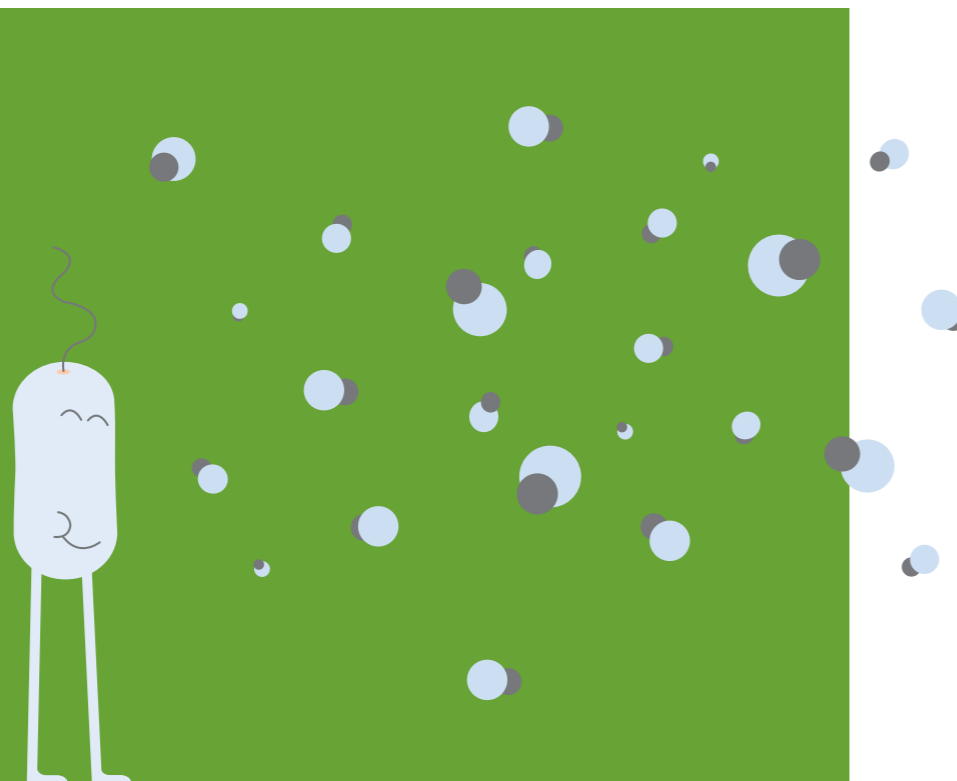
Der geschwindigkeitsbestimmende Schritt der biologischen Methanisierung ist die Löslichkeit von Wasserstoff in Wasser. Der Wasserstoff muss, um verstoffwechselt werden zu können, im Wasser der Fermenterbrühe gelöst sein. Diese Löslichkeit liegt bei Fermentationsbedingungen in etwa 23-fach niedriger als die des ebenfalls einzulösenden CO<sub>2</sub>. Damit sind die Archaeen chronisch mit Wasserstoff unterversorgt. Für diese Problematik gibt es unterschiedliche Lösungsansätze. Zum einen können physikalische Größen wie Druck und Temperatur verändert werden, um die maximale Löslichkeit zu erhöhen. Bei der Temperatur sind jedoch äußerst enge Grenzen gesetzt, weil die verwendeten Kulturen bestimmte Idealtemperaturen aufweisen. Der Druck bietet einen größeren Spielraum bis hin zu den jeweiligen Anlagenspezifikationen bzw. ergibt sich in der realen Anwendung ein Optimum zwischen Kosten für Anlage

und Gasverdichtung und dem Nutzen im Sinne einer höheren Methanproduktionsrate.

Zum anderen muss die theoretische Löslichkeit maximal ausgeschöpft werden. Dies geschieht durch die Maximierung der Phasengrenzfläche, wodurch bei kleinen Gradienten dennoch möglichst viel Stoffübergang erzeugt werden kann. Für einen Rührfermenter wird ein sogenannter Begasungsrührer, wie er in Abbildung 1 zu sehen ist, verbaut. Dieser sorgt für kleinste Gasblasen in der Fermenterbrühe, die ein sehr hohes Oberflächen/Volumenverhältnis aufweisen. Andere Reaktortypen sind von Haus aus besser geeignet, um große Phasengrenzfläche zu erzeugen. Ein gutes Beispiel ist der Rieselbettfermenter.

## ANTWORT

Kohlenstoffmonoxid (CO) wird komplett akzeptiert und verstoffwechselt.



## ANTWORT

Verbrennungs- und Vergasungsgasche tolerieren die Mikroorganismen. Die Asche genügt jedoch nicht als alleiniges Nährstoffsubstitut.



### Rieselbettfermenter

Der Rieselbettfermenter wurde vom Lehrstuhl Energieverfahrenstechnik als geeignete Alternative zum Rührfermenter vorgeschlagen. Die Nutzung eines Rieselbettfermenters war im Projektantrag nicht vorgesehen, wurde aber vom Konsortium als wertvolle Ergänzung des Versuchsprogramms gewertet und daher in kleinem Maßstab an der FAU erprobt. Es lässt sich ebenso wie im Rührfermenter eine stabile Kultur herstellen. Die Ergebnisse lassen vermuten, dass die Verwendung dieses Fermentertyps für die biologische Methanisierung noch erhebliches Potential zur weiteren Prozessoptimierung vorhanden ist, weshalb ein Folgeprojekt (ORBIT) auf den Weg gebracht wurde. Dieses ist mittlerweile so erfolgreich zum Abschluss gebracht, dass es in einem weiteren Projekt ORBIT2 im industriellen Umfeld erprobt wird. Ein schönes Beispiel, wie aus einer Idee mit Hilfe der Forschung eine ernstzunehmende Option wird.

## HERAUSFORDERUNGEN

### Aufbau des anaeroben Rührfermenters

Der Aufbau eines druckaufgeladenen Bioreaktors, der im kontinuierlichen Betrieb läuft war problembehaftet. Nur mit höheren Drücken kann der o.g. schlechten Wasserstofflöslichkeit und damit dem Hauptemmnis der biologischen Methanisierung begegnet werden. Ein kontinuierlicher Betrieb ist notwendig, weil ein Batch-Verfahren für die Kopplung mit einer Biomasse-Vergasung ungeeignet und in der industriellen Anwendung nicht sinnvoll ist. Gleichzeitig muss der Fermenter hermetisch gegen die Atmosphäre abgeschirmt werden, da die verwendeten Archaeen strikt anaerob leben. Diese Herausforderungen wurden im Laufe des Projektes gemeistert.

### Teere als Inhibitoren

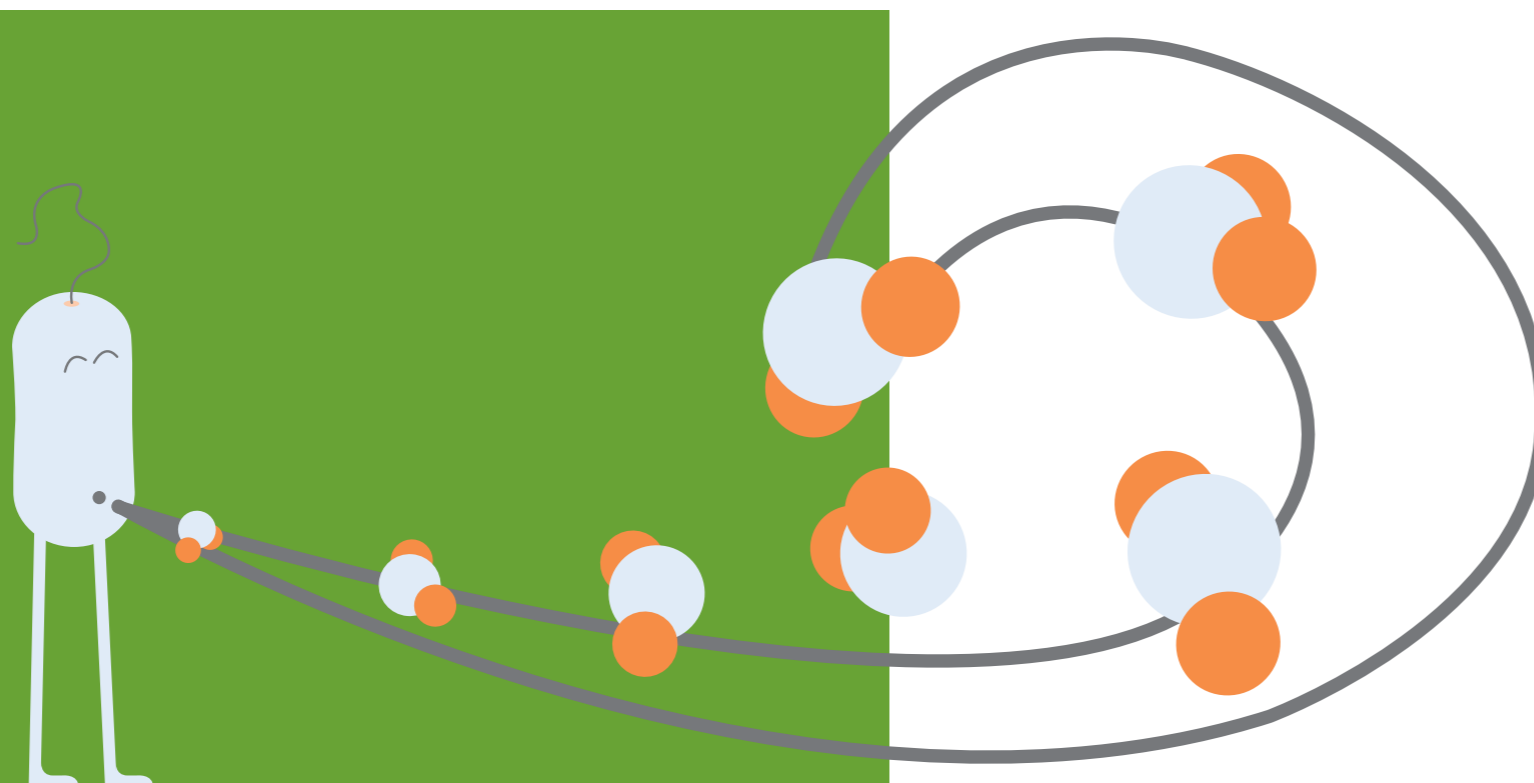
Es konnte im Projekt Ash-to-Gas in beiden Proof-of-Concept-Wegen gezeigt werden, dass Synthesegas aus der Biomassevergasung bzw. das TCR Gas methanisiert werden kann.

Jedoch wurden bei der Kopplung der TCR-Anlage von UMSICHT mit dem MicroPyros-Fermenter im Reformierungsschritt des TCR die Teere fast zur Gänze zerstört und bei der Kopplung an der FAU jeweils eine verminderte Aktivität der Kultur festgestellt. Auch Zugabe einzelner Teerkomponenten zeigte teilweise einen Abfall der Methanproduktionsrate.

Im Anschluss an die Kopplungsversuche und synthetischen Teerzugaben reaktivierte die Kultur innerhalb von Stunden jeweils. Zeitgleich sind Teertröpfchen mehrere Tage unter dem Mikroskop erkennbar. Damit ist naheliegend, dass einige, aber nicht alle Teerkomponenten inhibierend wirken und dass Teere schlussendlich durch die Kultur abgebaut werden können. Hieraus ergibt sich ein weiterführender Forschungsbedarf bezüglich Höchstkonzentrationen, Deaktivierungs- und Abbauraten der einzelnen Teerkomponenten. Diese Forschung wird derzeit an der FAU vorangetrieben.

## ANTWORT

Archaeen »dulden« alle Komponenten im realen Synthesegas aus der Vergasung. Aber: alles in Maßen.



## AUSBLICK

Das wirtschaftliche Ziel der Nährsubstratsubstitution wird mit Aschen aus der Vergasung nicht zu machen sein. Ein Aufschluss und damit ein Zugänglichmachen der grundsätzlich vorhandenen Nährstoffe ist nicht unter Fermentationsbedingungen zu erreichen.

Durch den erfolgreichen Proof-of-Concept steht der biologischen Methanisierung jedoch ein neues Feld an Edukten zur Verfügung. Dadurch kann sich die Technologie zumindest zeitweise von Elektrolyse-Wasserstoff lösen und diesen nur zu Zeiten günstigen erneuerbaren Stromes nutzen, während bspw. Windflauten mit Holzgas überbrückt werden können.

Das bedeutet einen großen Schritt hin zur Wirtschaftlichkeit dieser Technologie.

Für die weitere Forschung bleibt jedoch der desaktivierende Einfluss der verschiedenen Vergasungsteere zu untersuchen. Diese Forschung hat bereits begonnen.

## WEITERE INFORMATIONEN

### ■ Link zum Abschlussbericht:

- <https://www.evt.tf.fau.de/files/2019/11/03KB097B-Abschlussbericht-Ash2Gas.pdf> (FAU)
- <http://publica.fraunhofer.de/documents/N-532050.html> (MicroPyros)
- Faktenfalter

### ■ Publikationen:

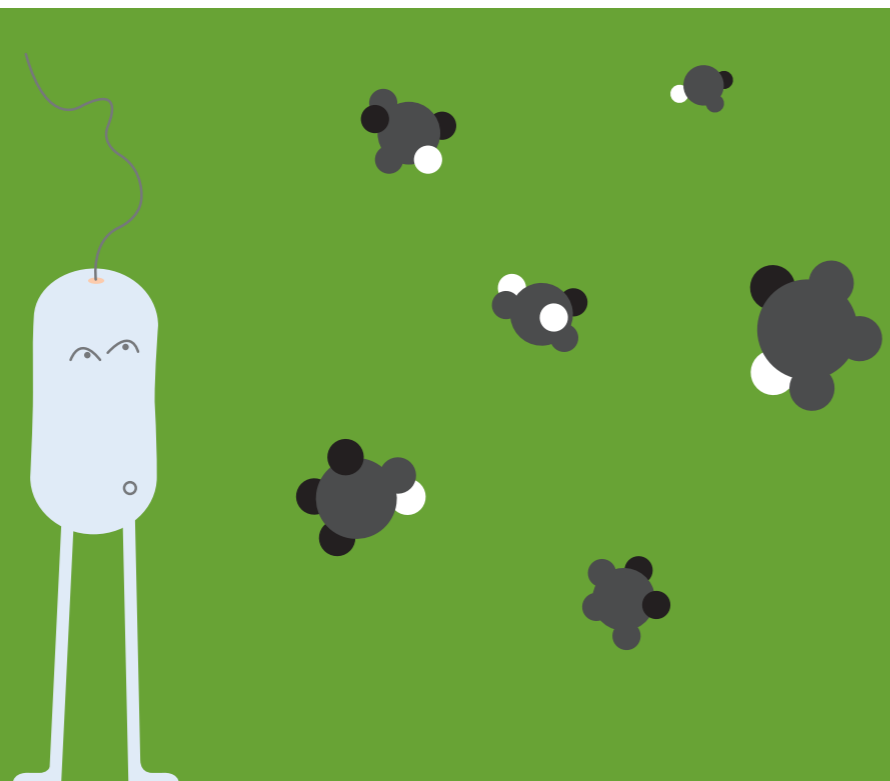
- WOLFF, M.; BROTSACK, R.; KARL, J. (2015): Allothermal Steam Gasification with Biological Methanation: Biomethane from Lignocellulosic Feedstock. Conference Proceedings of the 23rd European Biomass Conference and Exhibition, 2015.
- WOLFF, M.; BROTSACK, R.; KARL, J. (2015): Allothermal Steam Gasification with Biological Methanation: Biomethane from Lignocellulosic Feedstock. European Biomass Conference, EUBCE, Wien, 01.-04.06.2015
- TRABOLD, T.; KARL, J. (2016): Bioverfügbarkeit und Inhaltsstoffe biogener Aschen. 2. Fachforum Biologische Methanisierung, Regensburg, 25.10.2016
- TRABOLD, T.; KARL, J. (2017): Ash-to-Gas: Mikrobielle Biomethan-Erzeugung mit Wasserstoff aus der thermischen Vergasung von Biomasse mit Nährstoffen aus Vergasungsrückständen. 7. Statuskonferenz »Bioenergie: Flexibel und integriert in die nächste Epoche!«, Leipzig, 20.-21.11.2017

- TRABOLD, T.; DILLIG, M.; NEUBERT, M.; KARL, J. (2018): Direct Biological Methanation of the Synthesis Gas of an Allothermal Wood Gasifier. EUBCE 2018 – 26th European Biomass Conference & Exhibition, Kopenhagen, Dänemark, 14.-17.05.2018
- TRABOLD, T.; DILLIG, M.; NEUBERT, M.; KARL, J. (2018): Direct Biological Methanation of the Synthesis Gas of an Allothermal Wood Gasifier. Conference Proceedings of the 26th European Biomass Conference and Exhibition, 2018.
- TRABOLD, T.; TREIBER P.; KARL, J. (2018): Biologische Direkt-Methanisierung von Synthesegas aus der allothermen Holzvergasung. I. Deutsches Doktorandenkolloquium Biomasse (DBZF), Leipzig, 20.-21.09.2018
- TRABOLD, T.; WEIDLICH, T.; KARL, J. (2019): Direct Biological Methanation of the Synthesis Gas of an Allothermal Wood Gasifier. 13th International Renewable Energy Storage Conference (IRES 2019), Düsseldorf, 12.-14.03.2019.

- WEIDLICH, T.; TRABOLD, T.; THEMA, M.; STERNER, M.; KARL, J. (2019): Trickle-Bed Reactor for Biological Methanation. 13th International Renewable Energy Storage Conference (IRES 2019), Düsseldorf, 12.-14.03.2019.
- THEMA, M.; WEIDLICH, T.; HOERL, M.; BELLACK, A.; MOERS, F.; HACKL, F.; KOHLMAYER, M.; GLEICH, J.; STABENAU, C.; TRABOLD, T.; NEUBERT, M.; ORTLOFF, F.; BROTSACK, R.; SCHMACK, D.; HUBER, H.; HAFENBRADL, D.; KARL, J.; STERNER, M. (2019): Biological CO<sub>2</sub>-Methanation: An Approach to Standardization. In: *Energies*, Volume 12, Issue 9, 2019, Article number 1670, 01.05.2019. DOI: [10.3390/en12091670](https://doi.org/10.3390/en12091670)

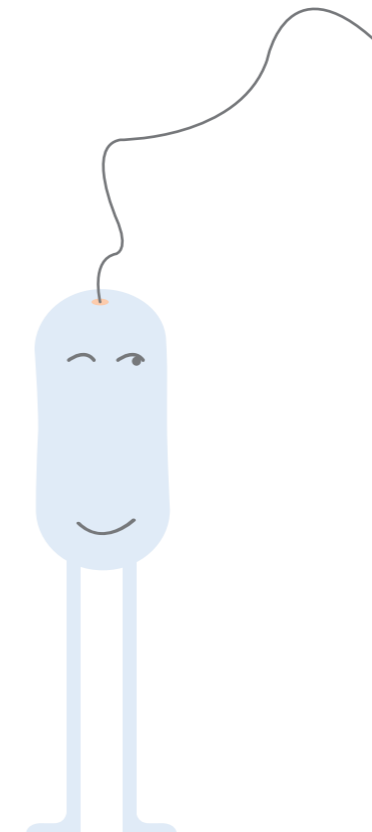
## ANTWORT

Archaeen reagieren unterschiedlich auf verschieden große Teermoleküle. Vermutung: je größer, desto schwieriger für die Archaeen



## EXKURS

Die Ergebnisse aus den Versuchen mit dem an der FAU errichteten Rieselbettfermenter waren sehr vielversprechend. Aus diesem Grund wurde das Projekt ORBIT auf den Weg gebracht. Hier arbeitete die FAU mit wissenschaftlichen Partnern von der OTH Regensburg und der Universität Regensburg, sowie den Industriepartnern Elektrochaea GmbH, MicrobEnergy GmbH, MicroPyros GmbH und der Westnetz GmbH zusammen. Das Projekt ORBIT verlief nahezu maximal erfolgreich: Es wurde ein Up-Scaling in den Technikumsmaßstab erreicht. Mit dem Technikumsreaktor konnte ein Proof-of-Concept durchgeführt und Methan ins Erdgasnetz eingespeist werden. Mit einem Normierungsausschuss und allen wichtigen Playern konnte der vergleichsweise neue Zweig der biologischen Methanisierung zu einer gemeinsamen Basis vereinheitlicht werden. Diese hervorragenden Ergebnisse und CFD-Simulationen zur Reaktoroptimierung werden jetzt in das Folgeprojekt ORBIT2 einfließen, indem das Konzept im industriellen Umfeld erprobt wird.







Bodo Groß, Alexander Berhardt, Daniel Hegele,  
Josef Heinzle, Stephan Schulte, Thomas Uhle

Mit IntEleKt und EmiLy  
sekundäre und primäre  
Lösungen zur Senkung  
von Staub- und weiteren  
Schadstoffemissionen bei  
Holzfeuerungen entwickelt

# EmiLy IntEleKt



#### Zitat der Projektleiter:

**Bodo Groß und Thomas Uhle**

Hauptziel unserer beiden Vorhaben war für potentielle Nutzer attraktive und umsetzbare Lösungen für die im Klimaschutzplan 2050 geforderte stärkere Nutzung von Alt- und Restholz-Sortimenten im Wärmemarkt zu entwickeln und zu marktfähigen Konditionen anzubieten. Wenn die Nutzung dieser

Brennstoffe auch in der Breite erfolgreich sein soll, muss man die Brennstoff-Form »Pellets« wählen und die Kesselanlagen möglichst kompakt konzipieren. Das bedingt sowohl einen starken Fokus auf sekundäre Maßnahmen als auch auf emissionsmindernde Primärmaßnahmen bzw. eine Kombination beider Maßnahmen bei besonders hohen Partikel- und sonstigen Schadstoffemissionen.



FKZ-NR.:	03KB095 (IntEleKt) 03KB124 (EmiLy)
LAUFZEIT	01.10.2014 – 31.03.2018 (IntEleKt) 01.07.2017 – 30.04.2020 (EmiLy)
ZUWENDUNGSSUMME	453.657,- € (IntEleKt) 369.049,- € (EmiLy)

#### PARTNER

IZES gGmbH  
(Institut für ZukunftsEnergie-  
und Stoffstromsysteme)  
Altenkesseler Straße 17, Geb. A1  
66115 Saarbrücken  
www.izes.de

#### PARTNER

Hoval GmbH  
Humboldtstr. 30  
85609 Aschheim-Dornach  
www.hoval.de

#### KONTAKT

Dr. Bodo Groß - Projektleiter IZES  
Telefon: +49 (0)681 844 972-51  
E-Mail: gross@izes.de  
Thomas Uhle - Projektleiter Hoval  
Telefon: +49 (0)89 922097-0  
E-Mail: thomas.uhle@hival.com

## ZIELE IntEleKt

- Ziel des Vorhabens war die Überführung und Weiterentwicklung eines unter Laborbedingungen getesteten elektrostatischen Partikelabscheiders zu einem universell einsetzbaren, technisch und wirtschaftlich konkurrenzfähigen Produkt.
- Der zu entwickelnde Partikelabscheider sollte sowohl als vollintegrierbares als auch als nachschaltbares System entwickelt bzw. eingesetzt werden können.
- Zur Zielerreichung wurden drei aufeinanderfolgende Testphasen zur Sicherstellung der Langzeit-, der Massen- und der allgemeinen Praxistauglichkeit an 16 Feldtestanlagen durchgeführt.

**Projekt IntEleKt:** Integrierter Elektrofilter im Kleinsertentest

**Projekt EmiLy:** Emissionsarmer Pelletkessel - Weiterentwicklung und Erprobung eines für alle Pelletqualitäten geeigneten 150kW Biomassekessels als saubere und nachhaltige Alternative für den Wärmemarkt

## ZIELE EmiLy

- Aufbau, Erforschung, experimentelle Entwicklung und Validierung sowie praxistaugliche Weiterentwicklung und Optimierung eines energetisch effizienten, baulich kompakten, ökologisch nachhaltigen und gleichzeitig preislich attraktiven Pelletkessels mit 150kW Nennwärmeleistung als konkurrenzfähige Alternative zu Ölheizkesseln.
- Gesamteffizienzsteigerung und Emissionsminimierung des Pelletkessels speziell im Teillastbetrieb bei konsequenter Nutzung von Pellets, insbesondere der Klassifizierungen A2, B, I1, I2 und I3 gemäß EN ISO 17225-2, bei gleichzeitiger Einhaltung der NOx-, CO- und Staub-Grenzwerte der 1. BImSchV in der 2. Stufe sowie der ab 2020 geltenden »Ökodesign-Richtlinie«.
- Nutzung von Pellets der Klassifizierungen B, I2 und I3 (z.B. derzeit noch nicht genutzte unbehandelte Holzrückstände, Industrieresthölzer) unter Einhaltung aller geforderten Emissionsgrenzwerte mittels eines optionalen, integrierbaren Staubabscheiders

- Test und Versuchsbetrieb elektrostatischer Partikelabscheider, sogenannter sekundärer Maßnahmen, zur herstellerunabhängigen Reduzierung der Partikelemissionen bei Biomassekesseln
- Entwicklung des elektrostatischen Partikelabscheiders als vollintegrierbares und nachschaltbares System
- Entwicklung einer intelligenten Steuer und Regelungseinheit
- Monitoring der Feldtestanlagen inklusive des Controllers und daraus resultierend die Verbesserung der Abscheiderbox sowie der Steuer- und Regelfunktionen im Alltagsbetrieb

## THEMEN SCHWERPUNKTE

### IntEleKt

- Test und Versuchsbetrieb primärer Maßnahmen zur Reduzierung von Partikelemissionen bei Pelletkesseln
- Aufbau eines Versuchskessels und Entwicklung eines Funktionsmusters einer emissionsarmen Brennkammer
- Resultierend aus den Ergebnissen/Erkenntnissen die Entwicklung eines kompakten emissionsarmen Pelletkessels (EmiLy-Kessel) als Alternative zu Ölkesseln
- Monitoring des entwickelten EmiLy-Kessels und basierend auf den Betriebsergebnissen die Optimierung des EmiLy-Kessels

## THEMEN SCHWERPUNKTE

### EmiLy

## ZUSAMMEN FASSUNG

Heizkessel, die mit festen biogenen Brennstoffen betrieben werden emittieren verglichen mit fossil gefeuerten Öl- und Gaskesseln mehr Feinstaub. Um die seit Anfang 2015 geltenden verschärften Emissionsgrenzwerte in allen Betriebszuständen sicher zu einhalten zu können, arbeiteten die IZES gGmbH (Institut für ZukunftsEnergie- und Stoffstromsysteme) und der Heizkesselhersteller Hoval GmbH im Forschungsvorhaben »IntEleKt« gemeinsam daran, mithilfe von sekundären Emissionsminderungsmaßnahmen einen emissionsreduzierten Betrieb von Biomasseheizungen zu erreichen. Mit Beschluss der Ökodesignrichtlinie bzw. der Verordnung (EU) 2015/1189 und deren Inkrafttreten zum 01. Januar 2020 rückten auch Primärmaßnahmen zur Minderung der Kohlenstoffmonoxid-, Stickoxid- und (Fein-)Staubemissionen in den Fokus. Im Vorhaben »EmiLy« wurde der Einsatz dieser Maßnahmen mit Hilfe eines Funktionsmusters einer emissionsarmen Brennkammer sowie mehrerer Testkessel untersucht. Die Ergebnisse dieses Forschungsvorhabens führen in Zukunft zum Ersatz der aktuellen Hoval Kesselserie (> 50 kW) durch eine neue Serie emissionsarmer und kompakterer Pelletkessel im Leistungsbereich bis 150 kW.

## SUMMARY (ENG.)

Boilers that run on solid biogenic fuels emit more particulate matter than fossil fuel-fired oil and gas boilers. In order to be able to comply with the more stringent emission limits in force since the beginning of 2015 in all operating conditions, the IZES gGmbH (Institute for Future Energy and Material Flow Systems) and the boiler manufacturer Hoval GmbH worked together in the research project »IntEleKt« to achieve emission-reduced operation of solid biomass boilers via secondary emission reduction measures.

Since the Ecodesign Directive and Regulation (EU) 2015/1189 was adopted and entered into force on 1 January 2020, respectively, primary measures to reduce carbon monoxide, nitrogen oxide and (fine) dust emissions also moved into stronger focus. In the »EmiLy« project, the use of these measures was supported by a functional model of a low-emission combustion chamber and several test boilers were used to investigate the effects of the new system. The results of this research project will in future lead to the replacement of the current Hoval wood pellet fired boiler series (> 50 kW) by a new series with low-emission and much more compact pellet boilers in the output range up to 150 kW.

## MOTIVATION GRENZWERTE

Seit Anfang 2015 die gesetzlichen Grenzwerte für Feinstaubemissionen in der I. BImSchV (Bundesimmissionsschutzverordnung) verschärft wurden, werden elektrostatische Partikelabscheider auch zunehmend zur Abgasreinigung von Biomassekesseln im kleineren Maßstab genutzt. Relevant ist das vor allem für kleine bis mittlere Biomassekessel mit Nennwärmeleistungen von weniger als 1.000 kW, beispielsweise Pellet-, Holzhackschnitzelheizungen und Stückholzfeuerungen in Ein-, Zwei- und Mehrfamilienhäuser sowie größere Kesselanlagen zur Nahwärmeversorgung von Quartieren.

**Konkret** gelten für neu installierte Biomassekessel bei Staubemissionen in Deutschland Grenzwerte von 0,02 g/Nm<sup>3</sup> (CO: 0,4 g/Nm<sup>3</sup>), bezogen auf 13 % Restsauerstoff im Abgas. Die Anlagen werden alle zwei Jahre messtechnisch überprüft. Werden die Grenzwerte nicht eingehalten, müssen die Heizkessel entsprechend optimiert oder nachgerüstet werden.

Wenn künftig vermehrt alternative und nicht holzartige biogene Rest- und Abfallstoffe, wie beispielsweise Pellets aus Altholz, rindereichem Waldrestholz, halmartigen Materialien, getrockneter bzw. torrefizierter Biomasse sowie Biokohle aus Anlagen zur hydrothermalen Karbonisierung (HTC) verwertet werden sollen, entstehen mit hoher Wahrscheinlichkeit höhere Staubemissionen. Der Einsatz von elektrostatischen Abscheidern ermöglicht es hier, die geltenden Grenzwerte einzuhalten bzw. deutlich zu unterschreiten.



## ERGEBNISSE

### ■ Vorträge

- Vortrag und schriftliche Kurzvorstellung (Tagungsreader) des IntEleKt-Projekts: 6. Abscheider-Fachgespräch zu Partikelabscheidern in häuslichen Feuerungen am 25. Februar 2015 in Straubing: Entwicklung des elektrostatischen Staubabscheidesystems für Biomassefeuerungen der IZES gGmbH: Start der Kleinserie
- Vortrag, schriftliche Abhandlung & Präsentation eines Posters 12th International Conference on Heat Engines and Environmental Protection (HEEP) am 27.-29. Mai 2015 in Pécs (Ungarn): Novel integrated electrostatic precipitator for small scaled biomass boilers
- Vortrag, Posterpräsentation, schriftliche Kurzvorstellung (Tagungsreader) und Teilnahme an einer Podiumsdiskussion (Vertreter der Hoval GmbH): 6. Statuskonferenz des Förderprogramms »Energetische Biomassenutzung« am 12./13. November 2015 in Leipzig: IntEleKt – Start einer Kleinserie
- Vortrag, schriftliche Kurzvorstellung (Tagungsreader): 7. Fachgespräch zu Partikelabscheidern in häuslichen Feuerungen (DBFZ / TFZ) am 09. März 2016 in Leipzig
- Vortrag, Veröffentlichung im Tagungsreader: 8. Fachgespräch »Partikelabscheider in häuslichen Feuerungen« am 08. März 2017 in Straubing
- Vortrag: Statuskonferenz des Förderprogramms »Energetische Biomassenutzung« am 21.11.2017 in Leipzig: Entwicklung des elektrostatischen Staubabscheidesystems für Biomassefeuerungen der IZES gGmbH: Letzte Anpassungen zu einem marktreifen Produkt (Veröffentlichung im Tagungsreader der Veranstaltung)
- Vortrag und Beitrag im Tagungsreader: 9. Fachgespräch zu Partikelabscheidern in häuslichen Feuerungen (DBFZ / TFZ) am 21. März 2018 in Leipzig: »IntEleKt: Entwicklung eines zulassungsfähigen und massentauglichen elektrostatischen Staubabscheiders«

### ■ Poster- und Textbeiträge

- Posterpräsentation und schriftliche Kurzvorstellung: 20. Conference on Nanoparticles der ETH Zürich, 13-16. Juni 2016.
- Posterbeitrag und »Speedpräsentation« des Elektroabscheiders bzw. des Vorhabens bei der DBFZ Jahrestagung am 08. September 2016 in Leipzig.
- Textbeitrag im Tagungsband und Posterbeitrag auf der Tagung: Berhardt, A.; Schulte, S.; Groß, B.; Hegele, D.; Uhle, T.: EFC Filterbox 50 & 100: Elektrostatischer Filter für kleine Biomassekessel bis 160 kW<sub>th</sub> – Eine Entwicklung von IZES und Hoval. In: Luschtinetz, T.; Lehmann, J. (Hrsg.), 23. *Symposium: Nutzung regenerativer Energiequellen und Wasserstofftechnik*. Stralsund, 2016, Tagungsband, S. 18-22, ISBN 978-3-9817740-1-6.

### ■ Publikationen

- BERHARDT, A., LEZSOVITS, F. AND GROSS, B. (2017): Integrated Electrostatic Precipitator for Small-Scaled Biomass Boilers. In: *Chem. Eng. Technol.*, 40: 278-288. Doi: [10.1002/ceat.201600200](https://doi.org/10.1002/ceat.201600200)

## IntEleKt

## EmiLy

### ■ Vorträge

- Vortrag: 8. Statuskonferenz »Energetische Biomassenutzung« – »Bioenergie – Der X-Factor«, Leipzig 2019

### ■ Poster- und Textbeiträge

- Posterpräsentation: 7. Statuskonferenz | Bioenergie. Flexibel und integriert in die nächste Epoche!. Leipzig 2017
- Kurzvorstellung des Projekts: 7. Statuskonferenz | Bioenergie. Flexibel und integriert in die nächste Epoche!. Leipzig 2017

### ■ Publikationen

- SCHULTE, S.; HEINZLE, J.; GROSS, B. (2020), Reduction of Particulate Matter Emissions from a Pellet Boiler Using Primary Measures. In: *Chem. Eng. Technol.* 10.1002/ceat.20190064.

### Anlagen:

- **IntEleKt** Feldtestanlagen: Verschiedene Kesseltypen zwischen 8 und 160 kW Nennwärmeleistung
- **EmiLy**: Pilotanlage eines emissionsarmen Pelletkessels mit 150 kW Nennwärmeleistung

### Daten & Methoden:

- Monitoring des Versuchsbetriebs aller Versuchsanlagen in beiden Vorhaben und daraus abgeleitet die Durchführung entsprechender Optimierungsmaßnahmen.
- Messmethode Partikelemissionen: Messapparatur gemäß VDI 2066

### Markt:

- **IntEleKt**: Durchführung eines Folgeprojekts (FKZ: 22006218) mit dem Ziel der Überführung der Ergebnisse in ein kostenoptimiertes und damit marktattraktives Produkt.
- **EmiLy**: Überführung der Pilotanlage des entwickelten emissionsarmen Pelletkessels in die wirtschaftliche Nutzung. Übernahme in den Produktkatalog und Verkaufsstart des Kessels für 2023 geplant.

### Exkurs Elektroabscheider:

Ein elektrostatischer Abscheider arbeitet nach dem physikalischen Prinzip der elektrostatischen Felddaufladung. Damit lassen sich feste, flüssige und gasförmige Komponenten ionisieren und abscheiden. Es können Abscheideraten von bis zu 99 % erreicht werden.

Einsatzbereiche sind die Reinigung von Produkt- oder Abgasen aus technischen Prozessen, insbesondere von Verbrennungsprozessen. Die elektrophysikalischen Vorgänge in einem elektrostatischen Abscheider können grundsätzlich in vier Teilprozesse untergliedert werden:

- Gasentladung bzw. Koronabildung
- Teilchenionisierung
- Teilchentransport
- Teilchenabscheidung

Eine Koronaentladung an einer Hochspannungs-Sprühelektrode sorgt dafür, dass die Partikel im Rauchgas elektrisch aufgeladen werden. Anschließend passiert das Rauchgas die Abscheideelektrode, an der die ionisierten Partikel abgeschieden werden. Die Abreinigung der abgelagerten Teilchen erfolgt meist mechanisch.



## IntEleKt **IntEleKt – Entwicklung eines elektrostatischen Staubabscheiders als sekundäre Maßnahme zur Reduzierung von Partikelemissionen:**

Im Rahmen des Vorhabens »IntEleKt – Integrierter Elektrofilter im Kleinsorientest«, haben die IZES gGmbH und die Hoval GmbH gemeinsam einen elektrostatischen Staubabscheider für kleinere Biomasseheizkessel entwickelt. Das einfache und robuste System eignet sich für verschiedene Kesseltypen und Kesselleistungen bis etwa 160 kW Nennwärmeleistung.

Je nach Kesseltyp lässt sich der entwickelte Abscheider in den Heizkessel integrieren oder als Nachrüstlösung mittels einer speziell entwickelten Abscheiderbox direkt an den Kesselkörper anbauen. Der Abscheider eignet sich zur Nutzung in Kombination mit Holzheizkesseln unabhängig von Hersteller und Kesseltyp bzw. kann speziell an die Anforderungen dieser Heizkessel angepasst werden.

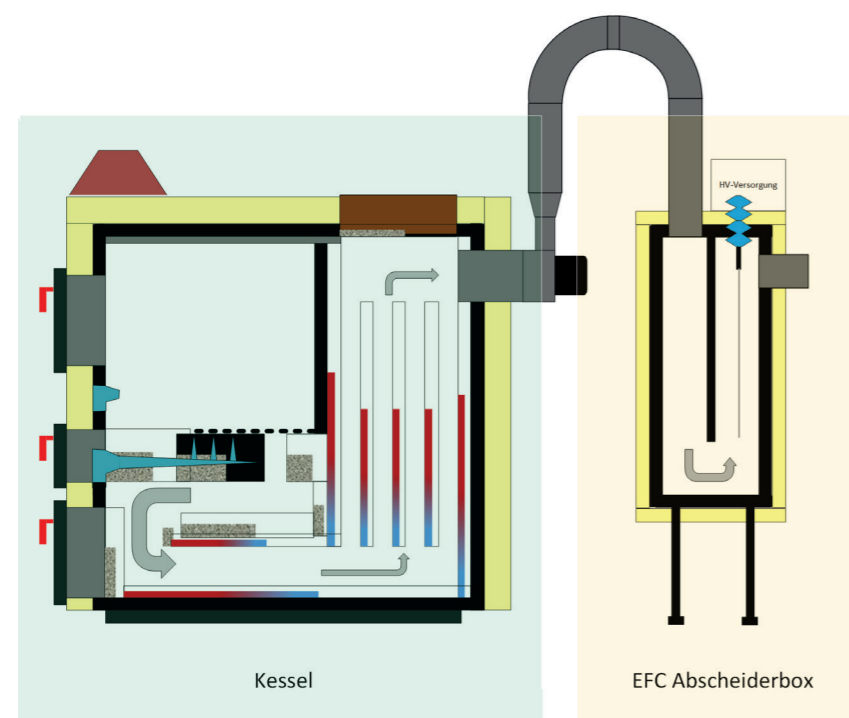


Abbildung 1: (Projekt IntEleKt) Stückholzfeuerung mit nachgeschalteten Abscheider zur Reduzierung der Staubemissionen, (Quelle: IZES gGmbH / Hoval GmbH)

### Umfangreiche Feldtests

Innerhalb des Vorhabens IntEleKt wurde das entwickelte elektrostatische Staubabscheidersystem in umfangreichen Feldtests in Kombination mit insgesamt 16 Kesselkonfigurationen getestet. Für die durchgeführten Untersuchungen wurden Holzhackschnitzel-, Pellet-, Energiekorn- und Stückholzkessel mit Nennwärmeleistungen bis 160 kW mit verschiedenen Varianten des Abscheiders ausgerüstet. Dieser arbeitet mit hohen Betriebsspannungen bis zu 30.000 V, ist modular

aufgebaut und besteht aus dem eigentlichen Abscheidesystem (Abscheiderbox und Sprühelektrode) und der zugehörigen Hochspannungskontroll- und Regelungseinheit. Innerhalb der durchgeführten Feldtestreihe wurden die Betriebseigenschaften der eingesetzten Systeme kumuliert in über 20.000 Betriebsstunden intensiv getestet.

### Optimiertes Abscheidesystem

Im Rahmen der Bearbeitung des Vorhabens entwickelten die Verbundpartner eine verbesserte Abscheiderstrecke mit optimiertem Strömungsverlauf, eine leistungsfähigere Sprühelektrode sowie eine optimierte automatisierte Betriebsführung für das Abscheidesystem. Um dauerhaft hohe Abscheidegrade zu erreichen, sind Reinigungseinrichtungen an der Sprüh- und Niederschlagselektrode erforderlich. Diese wurden sowohl als manuelle als auch als automatisierte Variante während der Laufzeit des Vorhabens in einigen der ausgestatteten Feldtestanlagen eingebaut und getestet. Es zeigte sich, dass sich der nötige Reinigungsaufwand abhängig vom Einbausystem und Kesseltyp stark unterscheidet.

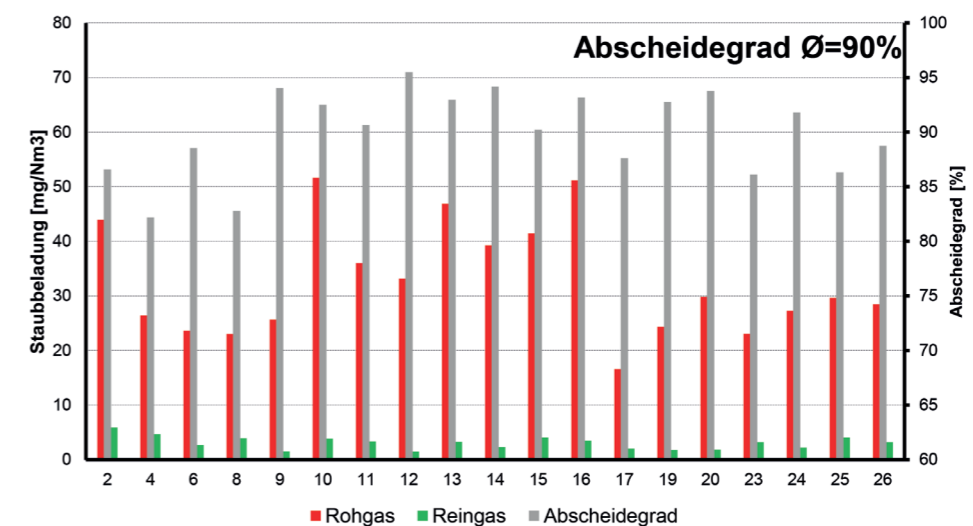


Abbildung 2: Gravimetrisch bestimmte Abscheidegrade des im Projekt IntEleKt entwickelten elektrostatischen Partikelabscheiders an einer Stückholzfeuerung mit 35 kW Nennwärmeleistung; Brennstoff: Laubmischholz, Quelle: IZES gGmbH / Hoval GmbH.

## EmiLy – Entwicklung eines emissionsarmen Pelletkessels mittels primärer Maßnahmen für größere Lesitungen bis 150 kW

Neben der Entwicklung des elektrostatischen Abscheidesystems als sekundäre Emissionsminderungsmaßnahme wurde im ebenfalls gemeinsam von der IZES gGmbH und der Hoval GmbH durchgeführten Vorhaben »EmiLy« die Weiterentwicklung und Erprobung eines Pelletkessels für größere Nennwärmeleistungen bis 150 kW als emissionsarme und nachhaltige Alternative für den Wärmemarkt durchgeführt.

Der aus dem Vorhaben resultierende emissionsarme EmiLy-Pelletkessel soll sich für alle Pelletqualitäten nach EN ISO 17225-2 eignen und dabei insbesondere die aktuell gültigen Grenzwerte für Schadstoffemissionen bei der Nutzung von A1 und A2-Qualitäten einhalten. Zur Erreichung dieser Anforderungen wurden Primärmaßnahmen wie beispielsweise gestufte Verbrennung, Abgasrückführung und der Einsatz von Reduktionszonen erprobt.

## EmiLy

**Motivation & Anforderungen**

Motivation zur Durchführung von des Vorhabens EmiLy war, dass die Nutzung von Pelletheizungen speziell im größeren Leistungsbereich ein sehr hohes Potential zur Substitution heizölbefuerter Anlagen hat. Dabei ist es wichtig die im Vergleich zu Ölkessel erhöhten Staub-, CO- und NO<sub>x</sub>-Emissionen zu minimieren. Weitere Anforderungen in diesem Kontext sind kompakte Heizkesselabmessungen sowie im Vergleich zu fossil befeuerten Anlagen konkurrenzfähige Kosten.

Primärmaßnahmen lassen sich, vor allem bei Neuentwicklungen, sehr gut integrieren und ermöglichen dadurch emissionsarme und gleichzeitig sehr kompakte Kessel. Durch gleichzeitige Erweiterung der Brennstoffbandbreite, hin zu qualitativ weniger hochwertigen Pelletqualitäten, lassen sich zusätzlich die Brennstoffkosten deutlich minimieren, während weiterhin alle geforderten Emissionsgrenzwerte eingehalten werden können. Da die Brennstoffkosten die Kosten für die Wärmebereitstellung maßgeblich beeinflussen sind dadurch neben ökologischen auch ökonomische Vorteile im Vergleich mit ölbefeuerten Heizungsanlagen zu erwarten.

Im Bedarfsfall kann jedoch auch beim »EmiLy-Pelletkessel« zusätzlich ein elektrostatischer Partikelabscheider integriert werden, um beispielsweise bei besonders schlechter Brennstoffqualität die gesetzlichen Grenzwerte für Partikelemissionen einhalten zu können.

**Test der Primärmaßnahmen**

Im Rahmen des Vorhabens EmiLy wurde der Einsatz von Primärmaßnahmen zur Reduzierung von NO<sub>x</sub>-, CO- und Staubemissionen untersucht. Dazu wurden zunächst an zwei Testanlagen, einem Funktionsmuster einer emissionsarmen Versuchsbrennkammer und einem seriennahen Testkessel, Versuche mit verbessertem Wärmeübertrager, gestufter Verbrennungsluftführung, dem Einsatz von Reduktionszonen und Abgasrückführung durchgeführt.

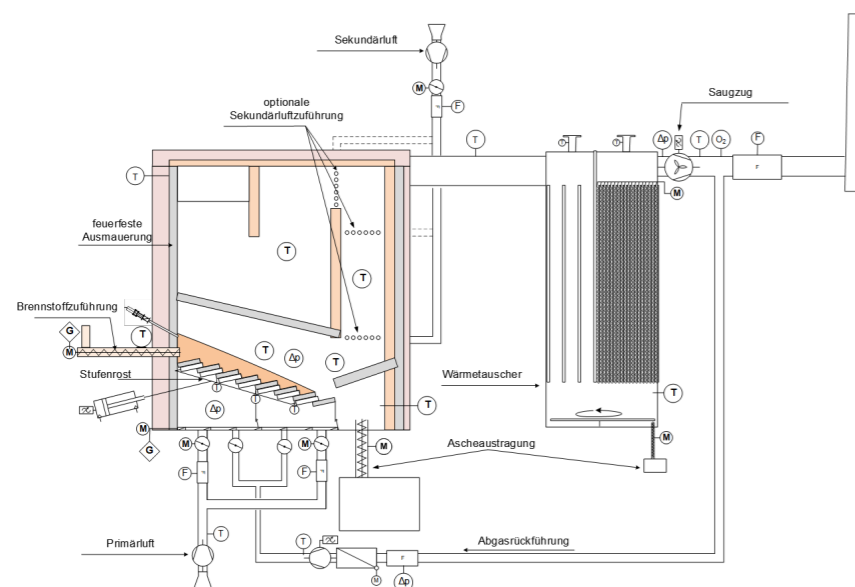


Abbildung 3: Schematische Darstellung der Versuchsbrennkammer, optimiert auf den Einsatz von Primärmaßnahmen wie Abgasrückführung, gestufte Verbrennung und Reduktionszonen, Quelle: Hoval GmbH

Abbildung 4: Einsatz von Primärmaßnahmen zur Reduzierung der NO<sub>x</sub>-Emissionen; Realisierung einer Reduktionszone zwischen Primär- und Sekundärbrennkammer und Abhängigkeit der NO<sub>x</sub> Emissionen vom Luftüberschuss in der Primärbrennkammer (λ-Primär); Brennstoff: Sonnen-blumenkernschalenpellets, Stickstoffgehalt 0,83% der Trockenmasse (Zum Vergleich: Grenzwert A1-Pellets 0,3%), Quelle: IZES gGmbH / Hoval GmbH

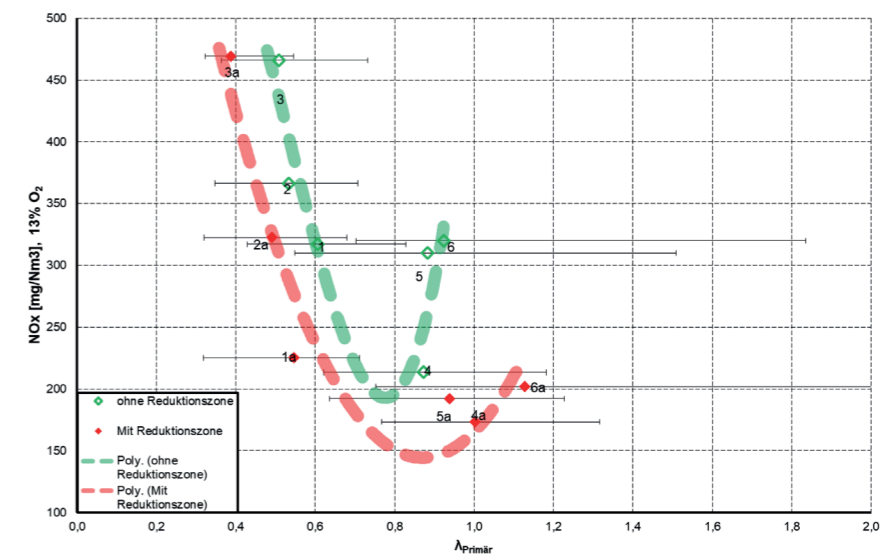
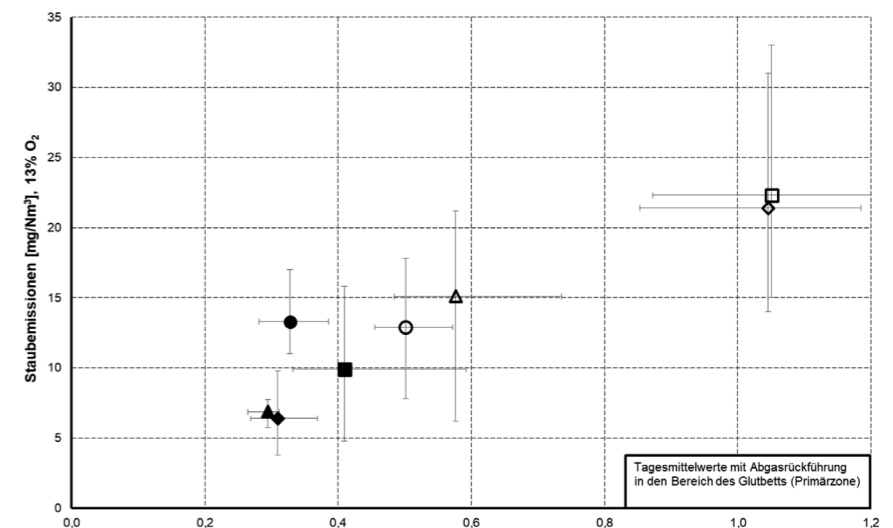


Abbildung 5: Einsatz von Primärmaßnahmen zur Reduzierung der Staubemissionen; Abhängigkeit der Staubemissionen vom Luftüberschuss in der Primärbrennkammer (λ-Primär) bei Nutzung der Abgasrückführung in den Bereich des Glutbetts; Brennstoff A2-Pellets, Quelle: IZES gGmbH / Hoval GmbH



- Dabei konnten die theoretischen Vorüberlegungen weitgehend bestätigt werden.
- Durch Nutzung der Abgasrückführung unter den Rost bei gleichzeitig niedrigem Luftüberschuss im Bereich des Glutbetts konnte der Staubgehalt des Abgases um bis zu 85% gegenüber der bis dahin genutzten Kesselkonfiguration reduziert werden.
- Durch Schaffung einer Reduktionszone über dem Glutbett durch spätere Zugabe von Sekundärluft konnten die NO<sub>x</sub>-Emissionen deutlich reduziert werden.
- Durch zusätzliche Rückführung des Abgases kann dieser Effekt weiter verstärkt werden.

Der Einsatz von Primärmaßnahmen hat jedoch Auswirkungen auf alle Emissionen. Zur Sicherstellungen von niedrigen Gesamtemissionen lassen sich verschiedene Primärmaßnahmen oder Primär- und Sekundärmaßnahmen kombinieren.

### Überführung der Ergebnisse auf den EmiLy-Kessel

Die Ergebnisse aus den Versuchsanlagen wurden anschließend in den EmiLy-Kessel überführt. Mit Abschluss des Vorhabens steht ein emissionsarmer und moderner Pelletheizkessel zur Verfügung. Abschließende Test und daraus resultierende Optimierungsmaßnahmen werden in den Monaten nach Projektabschluss bei Hoval durchgeführt. Nach deren Abschluss ist die Markteinführung des EmiLy-Kessels als Nachfolge-Generation der derzeitigen Pelletkessel-Baureihe (< 50 kW) geplant.

## HERAUSFORDERUNGEN, HEMMNISSE UND AUSBLICK

### IntEleKt

### EmiLy

Die wesentliche Herausforderung zur Markteinführung des entwickelten Abscheiders ist die Senkung der Herstellungskosten sowie die Verlängerung der Wartungsintervalle. Ein Hemmnis bezüglich der breiten Markteinführung ist die noch immer geringe Nachfrage für elektrostatische Partikelabscheider. In einem weiteren Vorhaben (MeliNa, FKZ 22006218) sollen vor allem die Herstellungskosten gesenkt und damit ein marktattractives Abscheidesystem entwickelt werden.

Eine relevante Herausforderung bei der Markteinführung des entwickelten EmiLy-Kessels ist der noch nicht vorhandene Brennstoffmarkt von weniger hochwertigen und damit preisgünstigeren Pellets der Klassen A2, B usw.. Daher lassen sich die sich daraus ergebenden wirtschaftlichen Vorteile – Nutzung von preisgünstigeren Pellets bei gleichzeitiger Einhaltung aller Emissionsvorgaben – noch nicht als Argument für den EmiLy-Kessen einsetzen. Man kann also "nur" mit den ökologischen Vorteilen der deutlich reduzierten Emissionen bei der Verwendung von A1 Pellets punkten. Das größte Hemmnis für einen guten Markterfolg von Pelletkesseln dieser Größenordnung ist jedoch nach wie vor der extrem günstige Heizölpreis, der Investoren trotz der sehr guten BAFA-Förderbedingungen seit 01. Januar 2020 nicht zum Handeln bzw. zum Heizungstausch bewegt.

Als Ausblick lässt sich aber trotzdem eine Marktbewegung erkennen, außerdem wird die lange gepriesene »all-electric-Strategie« (also Wärmepumpen für jede Anwendung zu empfehlen) in jüngster Zeit auch immer wieder kritisch diskutiert. Dies stärkt den Holzpelletmarkt zusätzlich.

### Projektsteckbriefe und Endberichte

#### IntEleKt:

[www.energetische-biomassenutzung.de/projekte-partner/details/project/show/Project/IntEleKt-521](http://www.energetische-biomassenutzung.de/projekte-partner/details/project/show/Project/IntEleKt-521)

#### EmiLy:

[www.energetische-biomassenutzung.de/projekte-partner/details/project/show/Project/EmiLy-539](http://www.energetische-biomassenutzung.de/projekte-partner/details/project/show/Project/EmiLy-539)

#### Projektbeschreibungen Partnerseiten:

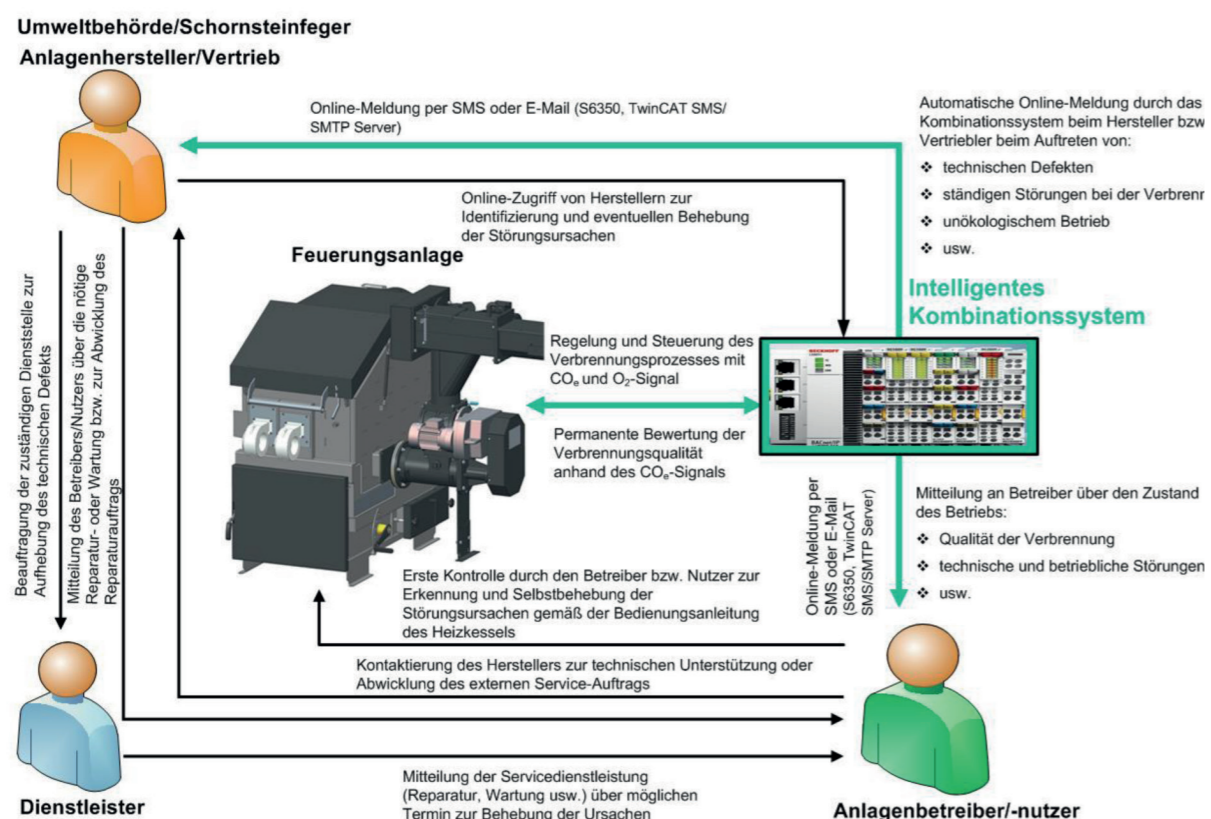
- [www.izes.de/de/projekte/intelekt-%E2%80%93-integrierter-elektrofilter-im-kleinserientest](http://www.izes.de/de/projekte/intelekt-%E2%80%93-integrierter-elektrofilter-im-kleinserientest)
- [www.izes.de/de/projekte/emilly-emissionsarmer-pelletkessel](http://www.izes.de/de/projekte/emilly-emissionsarmer-pelletkessel)
- [www.hoval.com](http://www.hoval.com)

#### Publikationen

- SCHULTE, S.; HEINZLE, J.; GROSS, B. (2020): Reduction of Particulate Matter Emissions from a Pellet Boiler Using Primary Measures. In: *Chem. Eng. Technol.*, 43: 1506-1513. [10.1002/ceat.201900641](https://doi.org/10.1002/ceat.201900641)
- BERHARDT, A.; LEZSOVITS, F.; GROSS, B. (2017): Integrated Electrostatic Precipitator for Small-Scaled Biomass Boilers. In: *Chem. Eng. Technol.*, 40: 278-288. [10.1002/ceat.201600200](https://doi.org/10.1002/ceat.201600200)

## WEITERE INFORMATIONEN





#### Zitat des Projektleiters: Mohammad Aleysa

Die Biomasse zählt zu den tragenden Säulen der Energiewirtschaft in Deutschland insbesondere angesichts der kommenden Energiewende. Die zunehmende energetische Nutzung von Biomasse im Haushaltsbereich erfordert den Einsatz innovativer Technologien zur Verbesserung und permanenten

Bewertung des Emissionsverhaltens im Praxisbetrieb, welches sich aufgrund der nicht zufriedenstellenden Luftqualität in Deutschland als äußerst notwendig und dank innovativer Sensortechnik als möglich erwiesen hat.

FKZ-NR.: 03KB109

LAUFZEIT: 01.07.2016 –

30.06.2018

ZUWENDUNGSSUMME:

252.379 €

#### KOORDINATION

Fraunhofer-Institut

für Bauphysik IBP

Nobelstr. 12,

70569 Stuttgart

[www.ibp.fraunhofer.de/](http://www.ibp.fraunhofer.de/)

Mohammad Aleysa

# VREM – System

Intelligentes Kombinationssystem (VREM-System) zur regelungstechnischen Optimierung der Verbrennung und zur Vermeidung der Fehlbedienung in Biomasseheizkesseln durch den Einsatz der  $\text{O}_2/\text{CO}_2$ -Sonde

## THEMEN SCHWERPUNKTE

- Charakterisierung der  $\text{O}_2/\text{CO}_2$ -Sonde für die Verbrennung von festen Brennstoffen in der Praxis,
- Entwicklung und Erprobung einer geeigneten Regelung für den schadstoffarmen und effizienten Betrieb auf Basis der  $\text{O}_2/\text{CO}_2$ -Sonde,
- Entwicklung und Erprobung eines Systems für die Emissionsüberwachung und Betriebsbewertung,
- Praxisuntersuchung der  $\text{O}_2/\text{CO}_2$ -Sonde mit dem entwickelten System

## ZIEL(E)

Entwicklung und Erprobung eines Kombinationssystems auf Basis der  $\text{O}_2/\text{CO}_2$ -Sonde für die regelungstechnische Optimierung sowie Emissionsüberwachung und Betriebsüberwachung in Biomasseheizkesseln

## ZUSAMMENFASSUNG

Im Rahmen dieses Forschungsprojekts wurde ein neuartiges System (das sogenannte VREM-System: Verbrennungsregelungs- und Emissionsmonitoring- bzw. Überwachungssystem) als präventive Maßnahme zur Schadstoffminderung und Effizienzsteigerung beim Betrieb von Biomasseheizkesseln erfolgreich entwickelt und erprobt.

Das Konzept des VREM-Systems beruht darauf, dass der Verbrennungsprozess mit einem möglichst geringen aber für eine vollständige Verbrennung ausreichend hohen Sauerstoffgehalt im Abgas, unabhängig von der Verbrennungstechnik bzw. dem Verbrennungskonzept sowie dem eingesetzten Brennstoff, an der sogenannten Emissionskante geregelt wird.

Um diese Art der Sauerstoffregelung technisch zu realisieren, wird eine neuartige Sensorik bzw.  $\text{O}_2/\text{CO}_2$ -Sonde eingesetzt, mit der sowohl der Gehalt an Sauerstoff als auch an Kohlenstoffmonoxid-Äquivalenten (z. B. Kohlenstoffmonoxid, unterschiedliche Kohlenwasserstoffe wie Methan, Propan usw.) als wichtige Indikatoren für die Verbrennungsqualität bzw. -vollständigkeit im Abgas detektiert werden können. Bei der Regelung an der Emissionskante sollen die geringste Abgasmenge und

somit thermischen Abgasverluste bzw. die höchste Verbrennungseffizienz ohne Überschreitung der Emissionsgrenzwerte gewährleistet werden.

Dank dieses Regelkonzepts können nicht nur hochqualitative Brennstoffe, sondern auch unterschiedliche heterogene biogene Brennstoffe mit variablen verbrennungstechnischen Eigenschaften für die thermische Nutzung von Biomasse eingesetzt werden, bei denen der optimale Sauerstoffbereich für eine sachgemäße Verbrennung stark variiert bzw. nicht als fester Sollwert in der Regelung angegeben wird. Ein weiterer Vorteil des VREM-Systems ergibt sich dadurch, dass sowohl die Emissionen überwacht als auch der gesamte Betrieb technisch, ökonomisch und ökologisch bewertet sowie Nutzer und gegebenenfalls Externe über einen als positiv oder negativ zu bewertenden Betrieb informiert werden können. Nur mit solchen innovativen Konzepten kann die Biomasse einen großen Beitrag zum Erreichen der Klimaschutzziele sowie zur kommenden Energiewende in Deutschland leisten.

#### PARTNER

LAMTEC Meß- und Regeltechnik für Feuerungen GmbH & Co KG

Wiesenstraße 6, 69190 Walldorf

[www.lamtec.de/](http://www.lamtec.de/)

HDG Bavaria GmbH

Siemensstraße 22, 84323 Massing

[www.hdg-bavaria.com/](http://www.hdg-bavaria.com/)

#### KONTAKT

Projektleiter: Dr.-Ing. Mohammad Aleysa

Telefon: +49 (0)711 970 3455

E-Mail: [mohammadshayesh.aleysa@ibp.fraunhofer.de](mailto:mohammadshayesh.aleysa@ibp.fraunhofer.de)

[ibp.fraunhofer.de](http://ibp.fraunhofer.de)

## SUMMARY (ENG.)

In the frame of this research project, an intelligent system (the so-called VREM-System: Combustion Control and Emission Monitoring System) has been developed for improving the combustion control and the permanent monitoring of biomass boilers. The basis of the control technology improvement according to the VREM-System is to operate the combustion system independently of the fuel used and the combustion technology with the lowest possible excess of oxygen without adversely affecting the quality of combustion.

Technically, the VREM-System is mainly based on the  $O_2/CO_e$ -Sensor, which allows to measure the oxygen content inside the exhaust gas as well as carbon monoxide-equivalents (for example carbon monoxide, different kind of carbon hydrogen such as methane, propane etc.) as important indicators to evaluate the combustion quality. Due to this controlling concept, the lowest exhaust gas mass flow and corresponding heat loss as well as highest efficiencies can be achieved without exceeding the emission limit values.

The controller can be applied for high and low quality fuels with different combustion characteristics. These fuels need various oxygen contents, whereby a proper combustion cannot be achieved by the operation with fixed oxygen set points. An additional advantage of the VREM-System is that not only the emissions but also the entire operation can be evaluated. The user or external persons can subsequently be informed about the negative or positive operation. Thanks to such kind of concepts, biomass will make an important contribution to the climate protection policy and the associated energy transition in Germany.

## MAIN MESSAGES

- The VREM-System can optimize the combustion controlling, as a technical procedure, on the one hand, on the other can serve as an additional measure to improve the customer service, whereby the technical function and combustion can be assessed in practice.
- According to the state of the art, the  $O_2/CO_e$ -sensor can be recommended for emission monitoring in practice. The suitability was shown during permanent operation in manually- and automatically fed boilers.
- A non-proper operation can occur due to technical errors related to the combustion technology, the use of unsuitable fuels or even incorrect operation. In manually fed systems, typical errors such as the use of unsuitable fuels or inconvenient feeding can be recognized by the VREM-System. The same also applies for automatic feeding systems such as the wood chips- and pellets fed boilers, where the fuel and combustion quality of two different kinds of fuels can be easily identified and reported, thanks to the VREM-System.
- Unlike the monitoring of the chimney sweeper, which is carried out using random probes, the emission monitoring using VREM-System is done permanently. It provides more comprehensive, useful and realistic combustion evaluation concept on the basis of I. BImSchV.
- The VREM-System ensures high level of environment protection due to the permanent emission monitoring. This system can be applied not only for all responsible bodies, but also users and manufacturers.

## HAUPT BOTSCHAFTEN

- Das VREM-System kann sowohl als regelungstechnische Maßnahme zur Verbesserung der Verbrennungsqualität bzw. der Verbrennungseffizienz als auch als zusätzliche Maßnahmen für die Verbesserung der Kundendienstleistung angeboten werden, wobei die technische Funktionalität des Heizkessels bzw. Sachmäßigkeit der Verbrennung in der Praxis überwacht werden kann.
- Gemäß dem Stand der Technik ist die  $O_2/CO_e$ -Sonde sehr gut für die Emissionsüberwachung in der Praxis geeignet. Das konnte im Rahmen von Dauererprobungen des VREM-Systems in zwei Biomasseheizkesseln (hand- und automatisch beschickt) gezeigt werden.
- Eine nicht sachgemäße Verbrennung kann durch Fehler in der Verbrennungstechnik, die Nutzung ungeeigneter Brennstoffe oder Fehlbedienungen entstehen. Bei dem handbeschickten Heizkessel wurden typische Betriebsfehler bzw. Fehlbedienungen, wie z. B. durch den Einsatz ungeeigneter Brennstoffe oder die Verwendung ungünstiger Beschickungsregime erkannt und erfolgreich gemeldet. Das Gleiche gilt für den automatisch beschickten Heizkessel (Hackschnitzel- und Pellettheizkessel), wobei die Qualität von zwei Brennstofflieferungen trotz kleiner Unterschiede in dem Verbrennungs- bzw. Betriebsverhalten gut erkannt und gemeldet werden konnten.
- Da es sich bei der permanenten Überwachung nicht um eine stichprobenartige Messung – wie bei der Überwachung durch den Schornsteinfeger – sondern um eine permanente Ermittlung der Verbrennungsqualität über den gesamten Betrieb handelt, welche die stichprobenartige Messung sinnvoll ergänzen soll, kann eine im Vergleich zur heutigen Kontrolle gemäß der I. BImSchV vollständigere, konsequentere Überwachung und somit eine realistische Bewertung von Biomasseheizkesseln erreicht werden.
- Durch die Umsetzung des VREM-Systems kann im Speziellen mit Hilfe der Emissionsüberwachung ein hohes Umweltschutzniveau gewährleistet werden. Die Vorteile dieses Systems ergeben sich nicht nur für die verantwortlichen Stellen, sondern auch für die Betreiber und Anlagenhersteller.

## METHODIK/ MASSNAHMEN

- Charakterisierung der  $O_2/CO_e$ -Sonde des Typs KSID von der Firma LAMTEC Meß- und Regeltechnik für Feuerungen GmbH & Co KG in einem speziellen Abgassimulator.
- Entwicklung von neuen Regelschleifen, wodurch der Sauerstoffgehalt im Abgas an der sogenannten Emissionskante eingestellt bzw. geregelt werden kann. Durch die Anwendung dieser Regelung soll der höchstmögliche feuerungstechnische und Kesselwirkungsgrad erreicht werden.
- Simulation unterschiedlicher praxisrelevanter Betriebsstörungen, wobei das Betriebsverhalten studiert wurde. Die unterschiedlichen Betriebscharakteristika bei den simulierten Betriebsstörungen wurden als Algorithmen in das VREM-System hinterlegt und werden für die Ursachenanalyse und Betriebsbewertung genutzt.
- Praxiserprobung der Betriebsüberwachung auf Basis der  $O_2/CO_e$ -Sonde in hand- und automatisch beschickten Biomasseheizkesseln.
- Erste Anwendung der Betriebsüberwachung durch die Firma Kutzner und Weber GmbH zur Untersuchung vom Einfluss der Verbrennungsqualität auf das Abscheideverhalten von Staubabscheidern in der Praxis.

## ERGEBNISSE Ergebnistyp – Ergebnisse auf einen Blick

### Publikationen:

#### ■ Zeitschriftenbeiträge

- ALEYS, M.; HAMMER, F. (2019): Es liegt was in der Luft. In: HLH-Magazin BD. 70, 6. 34-37
- ALEYS, M.; HAMMER, F. (2019): Emissionen mit System überwacht. In: HLH-Magazin BD 70, 7-8. 34-38

#### ■ Tagungsbände

- ALEYS, M. (2014): Innovatives Konzept zur regelungstechnischen Optimierung der Verbrennung und permanenten Überwachung des Betriebs von Biomassekleinfeuerungsanlagen der 1. BImSchV. In: VDI Wissensforum GmbH (Hrsg.), *Anlagenbezogenes Monitoring, Neue Anforderungen – Neue Konzepte, VDI-Berichte 2215*, VDI-Verlag, Düsseldorf
- ALEYS, M.; AKBARY, N.; MERIEE, S. (2016): Innovatives Regelungs- und Überwachungssystem zur Steigerung der Effizienz und Schadstoffminderung in automatischen und handbeschickten Vielbrennstoffsystemen. In: *Tagungsband - Beiträge zum Fachkolloquium »Biomass to Power and Heat« 01. - 02. Juni 2016 in Zittau*, Autorenmanuskripte, Hrsg. v. Hochschule Zittau/Görlitz, Zittau 2016. 83-91. ISBN 978-3-941521-23-0
- ALEYS, M.; AKBARY, N. (2018): Intelligent Combustion and Emissions Monitoring System (CCEM-System) for Low Pollutants and High Efficiency in Biomass Combustion Plants. In: *7th international symposium on energy from biomass and waste*, Scuola Grande di San Giovanni Evangelista, Venice, 17. October 2018

#### ■ Zeitungsartikel

- STUR, B. (2019): Raus aus der Raucherecke: Frühwarnsystem für Heizkessel reduziert Feinstaub, IDW-online, <https://idw-online.de/de/news717997>, 24.06.2019
- BERGER, C. (2019): Die richtige Bedienung von Biomasseheizkesseln, Springerprofessional, Technische Gebäudeausrüstung, <https://www.springerprofessional.de/en/technische-gebaeudeausruestung/biomasse/die-richtige-bedienung-von-biomasseheizkesseln/16850966>
- KOOP, D. (2019): Frühwarnsystem für Holz-Heizkessel, IKZ Haustechnik, <https://www.ikz.de/detail/news/detail/fruehwarnsystem-fuer-holz-heizkessel/>

### Konzept/

#### ■ Machbarkeitsstudie:

- Anlagenkonzept
- Informationskonzept
- Machbarkeitsstudie

### Anlage:

- Demonstrationsanlage
- Pilot-Anlage
- Technikumsanlage
- Laboranlage
- Anlagenteile / Systemkomponenten
- Verfahren
- Nachrüstung Bestandsanlage

### Daten & Methoden:

- Modell/Modellierung
- Datenbank
- Szenarien
- Monitoring
- Messreihe/-programm

### Markt:

- Marktprognosen
- Businessplan
- Patent
- Markteinführung neuer Technologien (Anzahl Zulassungen)
- Markteinführung neuer Komponenten (Anzahl Zulassungen)
- Überführung Pilot und Demo-Anlage in wirtschaftliche Nutzung
- Einbringen in Richtlinien / Normen

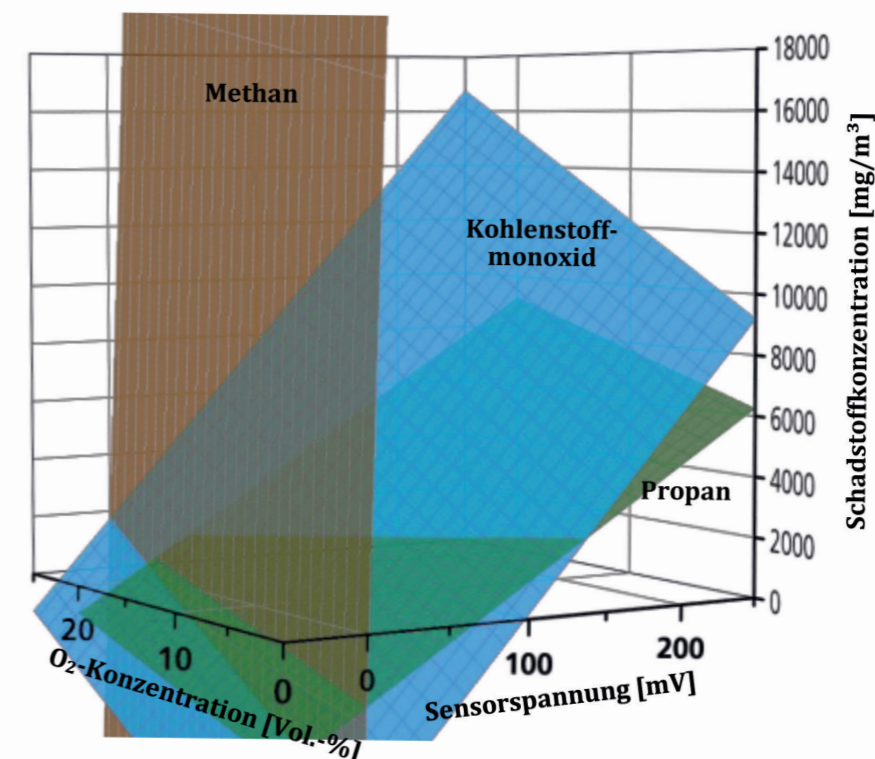
### Ergebnis-Fakten: Ergebnisdarstellung

In diesem Forschungsprojekt wurde ein intelligentes System für eine regelungstechnische Verbesserung der Verbrennung und permanente Überwachung von Biomasseheizkesseln (das sogenannte VREM-System: Verbrennungsregelungs- und Emissionsmonitoringsystem) entwickelt. Das VREM-System wurde sowohl auf einem Prüfstand im Fraunhofer-Institut für Bauphysik IBP als auch in der Praxis dauererprobt.

### Charakterisierung der O<sub>2</sub>/CO<sub>e</sub>-Sonde

Da zu Beginn dieses Forschungsprojekts nur wenige Langzeiterfahrungen mit dem Einsatz der O<sub>2</sub>/CO<sub>e</sub>-Sonde in mit Festbrennstoffen betriebenen Heizkesseln vorlagen, musste die O<sub>2</sub>/CO<sub>e</sub>-Sonde charakterisiert werden.

Abbildung 1:  
Korrelationsebenen  
als Abhängigkeit zur  
Sensorspannung  
und Konzentration  
brennbarer Gase



Bei der Charakterisierung der O<sub>2</sub>/CO<sub>e</sub>-Sonde in dem Abgassimulator wurde die Sonde mit unterschiedlichen brennbaren Gasen (Methan, Propan, Kohlenstoffmonoxid und Wasserstoff) und verschiedenen Sauerstoffgehalten im Abgas beaufschlagt, wobei das Sensorverhalten untersucht wurde. Dabei hat die Sensitivität der Sonde stark variiert. In Abbildung 1 sind die Korrelationsebenen dargestellt, welche die Abhängigkeit zwischen der Sensorspannung (nicht-nernst'sche Spannung) und den Konzentrationen an brennbaren Gasen bei unterschiedlichen Sauerstoffkonzentrationen beschreiben.

Bei den Reaktionen von nicht verbrannten Bestandteilen an dem O<sub>2</sub>/CO<sub>e</sub>-Sensor ist die Beschreibung der Konzentrationen an unverbrannten Bestandteilen als CO-Äquivalente am geeignetsten.



### Regelverhalten beim Betrieb

Für die Charakterisierung des Verbrennungsverhaltens wurde die Entwicklung des Sauerstoffgehalts im Abgas mit dem Kohlenstoffmonoxid sowie mit dem Kohlenstoffdioxid während der Verbrennung studiert. In Abbildung 2 lässt sich das Regelverhalten des VREM-Systems während des Betriebs der Verbrennungsversuchsanlage mit der  $O_2/CO_e$ - bzw. Emissionskantenregelung erkennen. Sobald die Anfahrbetriebsphase überwunden und die Stabilisierung des Sauerstoffgehalts im Abgas erreicht sowie die  $CO_e$ -Konzentrationen die in der Regelung hinterlegte Emissionskante (in diesem Beispiel  $100\text{ mg/Vm}^3$ ) unterschritten wird, wird der Sauerstoffsollwert im Abgas sukzessiv durch die Regelung des VREM-Systems reduziert. Es ist deutlich zu sehen, dass der Sauerstoffgehalt im Abgas durch die Regelung an der Emissionskante von etwa  $8,0\text{ Vol.-%}$  auf  $5,3\text{ Vol.-%}$  reduziert wird. Gleichzeitig werden die Konzentrationen an Kohlenstoffdioxid im Abgas von ca.  $13\text{ Vol.-%}$  auf  $15\text{ Vol.-%}$  erhöht. **Durch das innovative Regelverhalten lässt sich der Wirkungsgrad im Biomasseheizkessel während des Betriebs um etwa  $3\%$  steigern.**

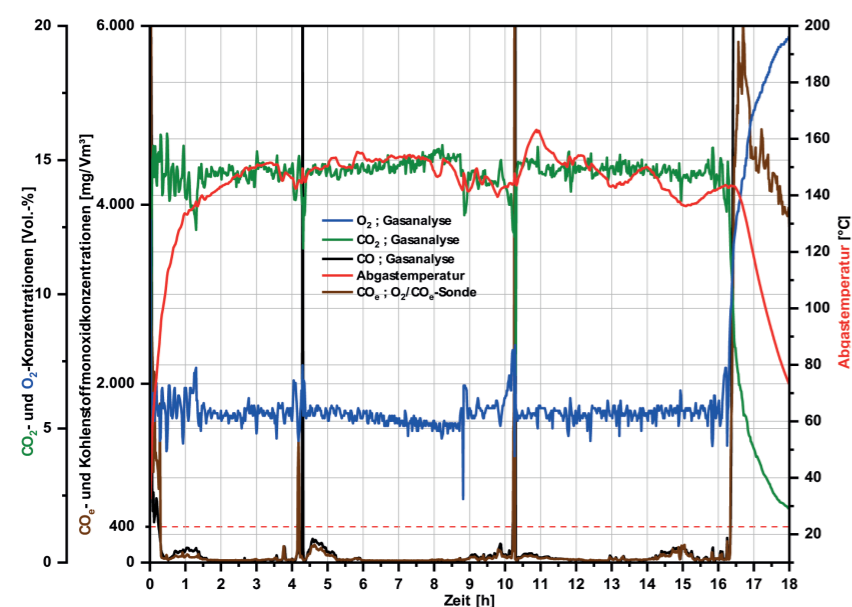


Abbildung 2: Regelverhalten des Vrem-Systems an der Versuchsanlage

### Ergebnisse bei der Emissionsüberwachung und Betriebsbewertung

Das VREM-System wurde in der Praxis in einem handbeschickten Bio-masseheizkessel und einem automatisch beschickten Biomasseheizkessel mit einer thermischen Leistung von ca.  $100\text{ kW}$  über  $600$  Betriebsstunden erprobt. Der automatisch beschickte Biomasseheizkessel wird ganzjährig für die Bereitstellung von Wärme und Warmwasser in den Gebäuden eines mittelständischen Unternehmens in Bayern genutzt, wobei Hackgut mit unterschiedlichen Qualitäten verwendet wird.

Abbildung 3 und 4 stellen drei Abschnitte der gesamten Überwachungszeit dar, wobei Abbildung 3 den Betrieb bei der Verbrennung mit hochqualitativen und das untere Diagramm den Betrieb mit minderqualitativen Brennstoffen zeigt. Beim Betrieb mit hochqualitativen Brennstoffen (oberes Diagramm) wird eine optimale Verbrennung mit durchschnittlichen  $CO_e$ -Konzentrationen von unter  $30\text{ mg/Vm}^3$  erreicht.

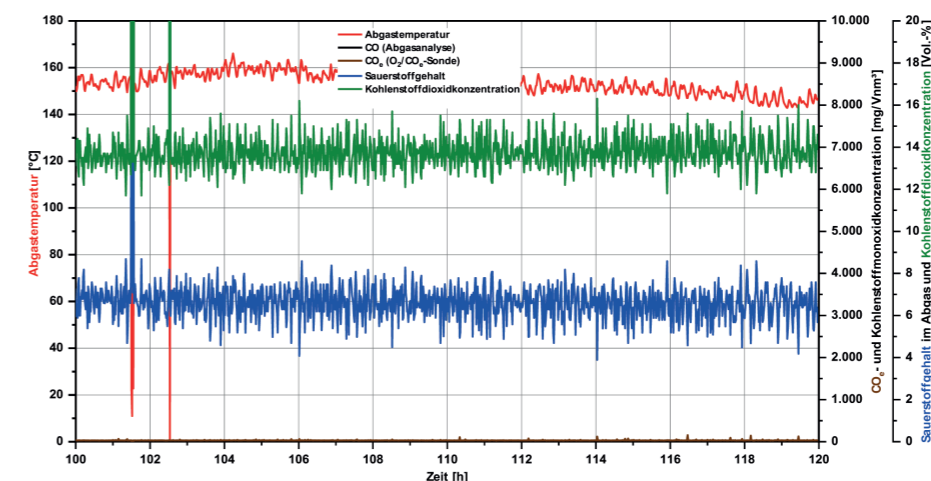


Abbildung 3: Verbrennungsverhalten im automatisch beschickten Heizkessel im Regelbetrieb bei der Erprobung des VREM-Systems in der Praxis

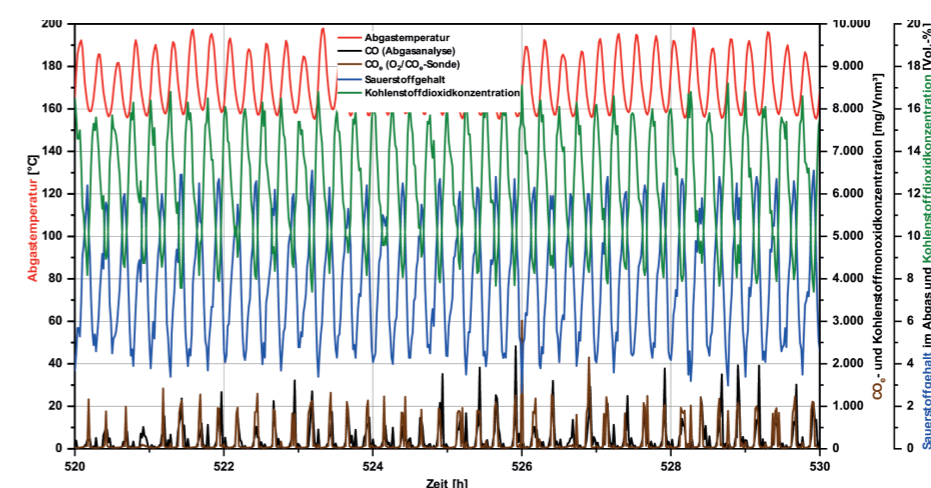


Abbildung 4: Verbrennungsverhalten im automatisch beschickten Heizkessel nach einer neuen Brennstoffanlieferung

Nach etwa  $420$  Stunden wurde ein neu angelieferter Brennstoff verwendet. In Abbildung 4 ist dargestellt, dass die  $CO_e$ -Konzentrationen nach der Beschickung mit der neuen Brennstoffcharge stark schwanken bzw. zeitweise deutlich über  $1.000\text{ mg/m}^3$  liegen. Die nicht sachgemäße Verbrennung lässt sich in diesem Fall eindeutig auf die Qualität des Brennstoffs zurückführen. Durch das VREM-System wurden entsprechende Nachrichten über die Fluktuationen und die mittleren  $CO_e$ -Konzentrationen beim Auftreten der Fluktuationen mit entsprechender Bewertung versendet.

### Klimaschutzwirkung vom VREM-System

Im Praxisbetrieb weisen herkömmliche Biomasseheizkessel einen geringeren Wirkungsgrad (ca.  $78\%$ ) als beim Betrieb auf dem Prüfstand auf. Das ist hauptsächlich auf die Qualitätsunterschiede der eingesetzten Brennstoffe, Bedienungsqualität der Verbrennungstechnik sowie auf die Dynamik der Wärmeproduktion sowie die Wärmenutzung zurückzuführen. **Mit dem VREM kann die Effizienz auf bis zu  $94\%$  im Dauerbetrieb gesteigert werden.**

Um die ökologischen Vorteile des VREM-Systems quantitativ zu erklären wurde eine Hochrechnung für die Energie- und  $CO_2$ -Ersparnisse durchgeführt. In Abbildung 5 sind die Szenarien für die  $CO_2$ -Einsparungen in Abhängigkeit von der thermischen Leistung

im Praxisbetrieb von Biomasseheizkesseln bei unterschiedlichen mittleren Kesselwirkungsgraden (78% + 5%, 78% + 10%, 78% + 15%) dargestellt, welche mit dem VREM-System erreicht werden können.

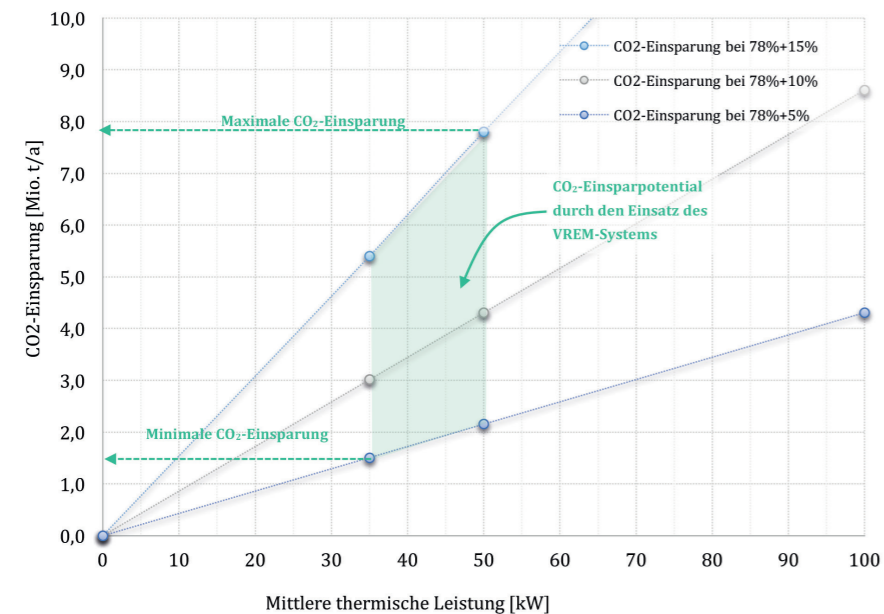


Abbildung 5: Szenarien für die Einsparung an Kohlenstoffdioxid bei unterschiedlichen mittleren thermischen Leistungen durch eine breite Anwendung des VREM-Systems

Mit zunehmender thermischer Leistung steigen die CO<sub>2</sub>-Einsparungen an, wobei bei einer Wirkungsgradsteigerung von 15% sowie einer mittleren thermischen Leistung von 50 kW etwa 7,8 Millionen Tonnen CO<sub>2</sub> pro Jahr eingespart werden können.

#### Empfehlungen für die Umsetzung innovativer Produkte

Für die Verstärkung des Einsatzes der Biomasseheizkessel für die Bereitstellung von Wärme und Warmwasser sollten zukünftig folgende Maßnahmen getroffen werden:

- Einbeziehung aller Wirtschaftsakteure, die an dem Aufbau und der Installation von Biomasseheizkesseln beteiligt sind. Beispielsweise sollten die Heizungsbauer als wichtiges Durchführungsorgan herangezogen und entsprechend mitgefördert werden.
- Veranstaltung von Schulungen und Bildungsmaßnahmen für die Heizungsbauer.
- Information an sonstige Wirtschaftsakteure über die Förderungsmöglichkeiten sowie über die Wichtigkeit und die Rolle der Biomasse in der Energiewirtschaft in Deutschland.
- Umsetzung technischer Maßnahmen, sodass die thermische Verwertung der Biomasse in der Öffentlichkeit gemäß ihrer wichtigen Rolle für eine nachhaltige Energiewirtschaft in Deutschland besser dargestellt wird.
- Stärkung des Vertrauens in die Kleinf Feuerungsanlagentechnik für die thermische Verwertung der Biomasse bzw. Energiebereitstellung in Haushalten. Das VREM-System bietet sich als innovative Maßnahme zur Stärkung des Vertrauens an, womit technische Fehler, Fehlbedienungen und ein unsachgemäßer Betrieb bzw. Einsatz ungünstiger Brennstoffe vermieden werden können, welche in der Regel einen erhöhten Ausstoß vieler staub- und gasförmiger Schadstoffemissionen verantworten.
- Eine gesetzliche Regelung für den verpflichteten Einsatz von Filtertechnologien mit einer entsprechend hohen staatlichen Förderung ist erforderlich.

- Aufnahme der neu erforschten innovativen Technologien zur Effizienzerhöhung und zur Emissions- bzw. CO<sub>2</sub>-Minderung in die BAFA-Förderung. Hier sollte ein Gesetz für eine zusätzliche Förderung zu der bestehenden BAFA-Förderung erlassen werden.
- Sowohl für die Entwicklung als auch Umsetzung und anschließende Einführung besonders innovativer Technologien sollten die Unternehmen mit einer entsprechenden Schubfinanzierung unterstützt werden.
- Neugestaltung und Vereinfachung des Genehmigungsverfahrens der BAFA-Förderung, so dass nicht nur innovative Technologien besonders unterstützt, sondern auch die Biomasse immer konkurrenzfähiger gegenüber anderen fossilen Energieträgern bleiben sollte.
- Es sollten bestimmte staatliche Förderung für technologische ganzheitliche Lösungen zur Energieversorgung mit Biomasseheizkesseln und nicht nur für Einzeltechnologien des gesamten Energieversorgungssystems berücksichtigt werden. Die Optimierung eines Prozessteils führt nicht unbedingt zur Optimierung des gesamten Prozesssystems.

Für eine erfolgreiche Verwertung der erreichten Forschungsergebnisse sind noch Herausforderungen zu bewältigen, die hier aus einer wissenschaftlichen, technischen, wirtschaftlichen und markttechnischen Sicht dargelegt werden:

- Für die Umsetzung und die Verwertung der Projektergebnisse sind weitere Dauererprobungen der O<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub>-Sonde zwecks der Sicherstellung der technischen Stabilität sowie der Funktionalität über eine längere Betriebszeit (länger als drei Jahre) notwendig. Die Dauererprobung soll im Rahmen von Folgeprojekten erfolgen.
- Entwicklung eines neuen Verfahrens für die zuverlässige Wiederkalibrierung der O<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub>-Sonde.
- Die technische Umsetzung neuer Konzepte bzw. Vermarktung neuer Verbrennungstechnologien lässt sich nur durch eine zusätzliche finanzielle Unterstützung (z. B. eine Schubfinanzierung für die Unternehmen) umsetzen.

## HERAUSFORDERUNGEN

Aus technischer Sicht ist die Verwertbarkeit des VREM-Systems als sehr positiv zu bewerten. Die größten Herausforderungen für die Umsetzung des Forschungsprojekts gab es in Bezug auf die Charakterisierung der  $O_2/CO_e$ -Sonde und die Entwicklung von entsprechenden Algorithmen für die Regelung und Überwachung des Betriebs. Die Charakterisierung der  $O_2/CO_e$ -Sonde konnte nur an einem speziellen für solche Anwendungen entwickelten Abgassimulator durchgeführt werden, welcher im Fraunhofer-Institut für Bauphysik im Rahmen eines vorherigen erfolgreich abgeschlossenen Forschungsprojekts entwickelt wurde. Für die Entwicklung der Regelung und Überwachung von Biomasseheizkesseln ist sowohl ein breites Know-How über die Verbrennung von biogenen Brennstoffen als auch über die Regelungstechnik erforderlich. Im Fraunhofer-Institut für Bauphysik IBP werden diese beiden Disziplinen seit mehreren Jahren zusammengeführt und für die Entwicklung von neuer Regelungstechnik genutzt.

## AUSBLICK

Die wirtschaftlichen Erfolgsaussichten und Übertragbarkeit vom VREM-System für den breiten Einsatz sind als sehr positiv zu bewerten. Ein großer Vorteil ergibt sich dadurch, dass nicht nur die Hersteller, sondern insbesondere die Nutzer einen großen wirtschaftlichen Vorteil durch die Anwendung des VREM-Systems haben werden. Durch den Einsatz der Emissionskantenregelung des VREM-Systems haben die Nutzer die Möglichkeit, nicht nur hochqualitative biogene Brennstoffe, sondern unterschiedlichste biogene Brennstoffe schadstoffarm und effizient zu verbrennen. Da sich die Kosten für die  $O_2/CO_e$ -Sonde nur geringfügig von den Kosten für die herkömmliche Lambda-Sonde unterscheiden, kann bei einer Markteinführung des VREM-Systems mit einer großen Kundennachfrage gerechnet werden. Das VREM-System wird sich nach durchschnittlich etwa drei Jahren wirtschaftlich amortisieren.

Im Rahmen von Folgeprojekten soll die Praxistauglichkeit dieser Technik über lange Betriebszeit ausführlich weiterstudiert werden. Die Ergebnisse aus diesen Praxisuntersuchungen sollen durch intensive Öffentlichkeitsarbeit publiziert und die Anwendung des VREM-Systems dadurch für viele Hersteller attraktiv werden.

## WEITERE INFORMATIONEN

Der Abschlussbericht zu diesem Forschungsprojekt ist unter dem folgenden Link abrufbar:

[https://www.energetische-biomassenutzung.de/fileadmin/Steckbriefe/dokumente/03KBI09\\_Abschlussbericht\\_Kombinationssystem.pdf](https://www.energetische-biomassenutzung.de/fileadmin/Steckbriefe/dokumente/03KBI09_Abschlussbericht_Kombinationssystem.pdf)



# SET-LAUB

Esther Stahl,  
Philipp Danz, Julia Behling

Systematische Ermittlung von Emissionsdaten bei der  
thermischen Umsetzung unterschiedlicher Laubabfallfraktionen

FKZ-NR.: 03KB111  
LAUFZEIT: 01.09.2016 - 31.12.2019  
ZUWENDUNGSSUMME: 268.782,64 €

## PARTNER (BIS 31.12.2017)

Netz Ingenieurbüro GmbH  
Hansestraße 14, 48477 Riesenbeck  
www.netz-gmbh.eu

## KOORDINATION

Fraunhofer-Institut für Umwelt-, Sicherheits- und  
Energietechnik UMSICHT  
Osterfelder Str. 3, 46047 Oberhausen  
www.umsicht.fraunhofer.de

## PROJEKTLEITUNG

Dr.-Ing. Esther Stahl  
Telefon: +49 (0)208 8598 1158  
E-Mail: esther.stahl@umsicht.fraunhofer.de



## ZIELE & ZUSAMMENFASSUNG THEMENSCHWERPUNKTE

Während der Verbrennung von Laub sollten mögliche Umweltbeeinträchtigungen (Staub, NO<sub>x</sub>, CO, organische und anorganische Stoffe) quantifiziert werden und eine Einschätzung über den Einsatz in Feuerungsanlagen erfolgen. Dazu wurde der Einfluss des Sammelorts (Straßenlaub, Parkpflege, etc.), der Expositionsdauer und der Lagerungsart (Silierung und Ballierung, Briquets usw.) auf das Emissionsverhalten des potenziellen Brennstoffs untersucht, um eine kostengünstige und energieeffiziente Nutzung für eine spätere Wärmebereitstellung zu schaffen. Kommunen sollen nach Abschluss des Projektes in die Lage versetzt werden, einen Brennstoff für die eigene energetische und praxisnahe Verwertung (z. B. Wertstoff- und Energiehöfe) oder zur Vermarktung an größere Biomassefeuerungen auf Laubbasis zu bewerten. Ziel ist es, einen möglichst engen räumlichen Verwertungszyklus von ausgewählten Laubfraktionen innerhalb der städtischen und regionalen Grenzen zu entwerfen und eine kostengünstige, ganzjährige Wärmebereitstellung durch die Lagerung von Laubbrennstoff über einen längeren Zeitraum zu erlauben.

- Brennstoffqualitätsprüfung
- Brennstoffcharakterisierung (Trocknungs-, Zünd- und Ausbrandverhalten)
- Überprüfung des Einflusses der Laubmitverbrennung auf die Emissionen der Feuerungsanlage und die Ausbrandgüte
- Entwicklung einer geeigneten Lagerungsmethode und Brennstoffaufbereitung
- Wirtschaftliche und logistische Wärmebereitstellung

## ERGEBNIS

Unter Einhaltung der Anforderungen an die Feuerungsanlagen gemäß 4. BImSchV und TA Luft wurden unterschiedliche Laubfraktionen in Mischungsanteilen mit einem konventionellen, holzartigen Brennstoff in einer Verbrennungsanlage (440 kW) thermisch verwertet und ihre Eignung zur energetischen Nutzung demonstriert.

FOTOSTORY  
FKZ-Nr. 03KB111  
Vom Laub zur  
Bioenergie





**1.** Die Idee: Laub fällt im Herbst in großen Mengen an und wird üblicherweise kompostiert. Allein 620.000 bis 740.000 Tonnen sind es pro Jahr in Deutschland.<sup>1</sup> **ABER:** Aufgrund des saisonal hohen Aufkommens und der teilweise schlechten Rotteigenschaften ist Laub in Kompostierungsanlagen eher problematisch.



**2.** Die Frage:

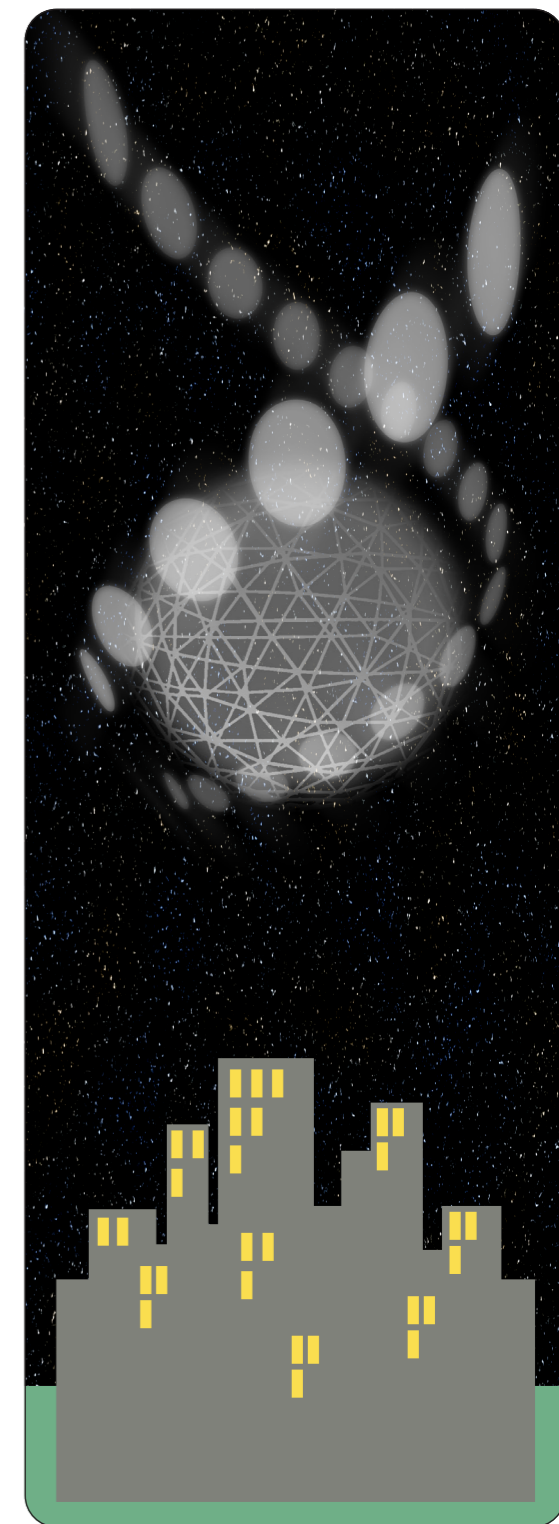
Wir, als Wissenschaftler\*innen vom Fraunhofer UMSICHT in Oberhausen wollten im Projekt SET-Laub herausfinden, wie sich das Laub in der Praxis für die Verbrennung zur Beheizung bspw. von kommunalen Gebäuden eignet. Außerdem interessierte uns, wie sich Aufbereitungs- und Lagerungsmethoden wie Silierung, Trocknung, Siebung, Brikettierung oder Pelletierung auf die Verbrennung auswirken.

Dr. Esther Stahl, Fraunhofer-Institut für Umwelt-, Sicherheits- und Energietechnik UMSICHT, Abteilungsleiterin Strategische Projekte.

**3.** Am Anfang war das Laub: Über zwei Jahre wurden jeweils mehrere Kubikmeter Laub an drei charakteristischen Sammelstellen an Hauptstraßen, in Wohngebieten und Parks in Gelsenkirchen gesammelt.



Das Laub wurde mit einem LKW mit Greifarm in Bigbags gefüllt. Zuvor war es mit Laubbläsern und einem Radlader oder mit einem Laubsauger gesammelt worden. Zudem gab es eine zentrale Sammelstelle für Bürger\*innen in einem Wohngebiet. Der Einsatz von Laubbläsern anstelle von Rechen oder Straßenkehrmaschinen vermindert die Aufnahme störender bzw. verunreinigter Teile.



Laub weist relevante Heizwerte auf, sodass eine energetische Nutzung, im Sinne einer Verbrennung, insbesondere für Kommunen interessant ist. Allerdings ist Laub nicht explizit als Regelbrennstoff für kleine und mittlere Feuerungsanlagen in der Ersten Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (1. BImSchV) aufgeführt. Aktuell kann Laub daher nur in genehmigungspflichtigen Anlagen eingesetzt werden.







**4.** Qualität des Laubs: Die Laubproben unterschieden sich deutlich sichtbar in Feuchtegehalt und Grad der Verunreinigung (Fremdstoffe, Schwermetalle, Chlor etc.). Um das Laub gut bewerten zu können, mussten die Proben mindestens doppelt bis dreifach analysiert werden.



**6.** Vom Laub zum Brikett: Bei der Trocknung musste auf eine gute Auflockerung des Laubs geachtet werden, da die Blätter sonst aneinander haften blieben und schlecht trockneten.



**5.** Die Beprobung: Viel Aufwand wurde in die Beprobung gesteckt: Zwei parallele Probenahmen wurden durchgeführt, um wissenschaftlich vergleichbare Aussagen treffen zu können. Teilproben wurden durch Kegeln und Vierteln zu einer Mischprobe vereint.



Brickettproben in unterschiedlicher Zusammensetzung. Links: 100 % Laub, rechts: 50 % Laub, 50 % Holz



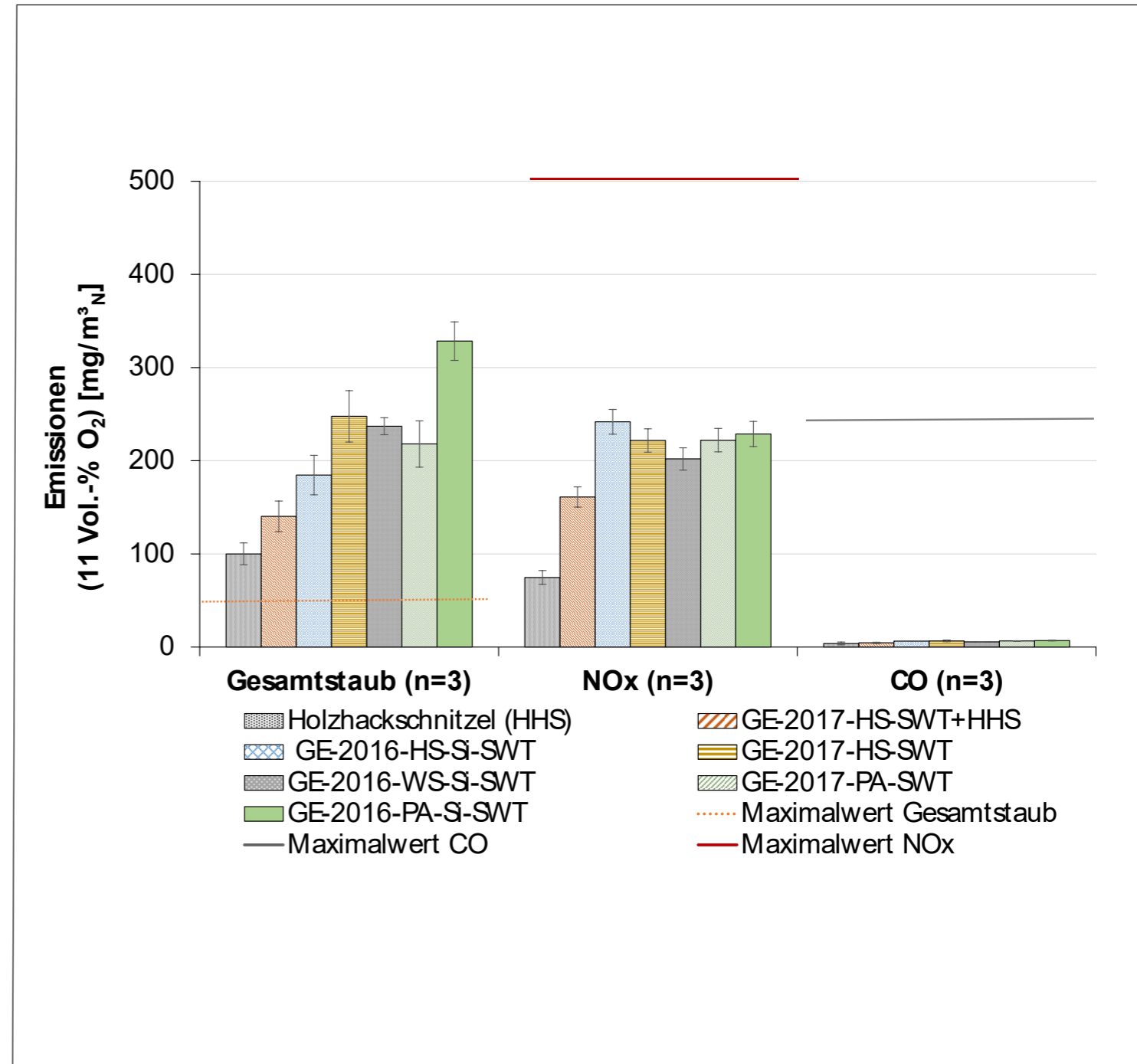
Die Aufbereitung, Trocknung und Brikettierung frisch gesammelter und siliierter Laubproben wurde bei der Firma RIELA®, Karl-Heinz Knoop e.K. (RIELA®-Energiehof) durchgeführt.



**7. Verbrennung:** Die Proben wurden in einer Rostfeuerung mit einer Feuerungsleistung von  $440 \text{ kW}_{\text{th}}$  verbrannt und das Verbrennungsverhalten sowie die entstehenden Emissionen ermittelt. Die Verbrennung lief insgesamt gut. Da die Laubbriketts deutlich höhere Aschegehalte aufwiesen als ein normaler Holzbrennstoff, musste die Rostgeschwindigkeit angepasst werden.



**9. Emissionen kontrollierbar:** Insgesamt entstanden bei der Verbrennung des Laubs mehr Emissionen an Staub und Stickoxiden (NOx) als bei der Verbrennung von Holz. Die Staubemissionen sind mit den üblicherweise einsetzbaren Staubabscheidern kontrollierbar. Die Stickoxidemissionen und die übrigen untersuchten Emissionen wie Kohlenmonoxid (CO), Stickstoffmonoxid und Stickstoffdioxid (NOx), Summe gasförmiger organischer Stoffe, Dioxine und Furane (PCDD/F) sowie Benzo(a)pyren (BaP) lagen allesamt unter den Grenzwerten der TA Luft<sup>2</sup> und waren damit unkritisch.



**8. Herausforderung bei der Feuerung:** Positiv ist, dass die Asche nicht oder nur sehr gering verschlackt war. Manchmal kam es zu einer Brückenbildung der Briketts bei der Zuführung zur Feuerung, sodass der Brennstoff nicht mehr zur Feuerungsanlage transportiert wurde. Hier ist bei einer späteren Umsetzung auf eine geeignete Brennstoffzuführung zu achten.

**Abkürzungen:**  
 HS = Hauptstraße  
 PA = Parkanlage  
 Si = silliert  
 SWT = Schubwendetrockner  
 WS = Wohnstraße

Die Verbrennungsversuche wurden beim Fraunhofer UMSICHT am Standort Sulzbach-Rosenberg an einer Rostfeuerung durchgeführt. Die Emissionsmessungen wurden von einer zugelassenen Messstelle nach § 29BImSchG durchgeführt. Dabei wurden folgende Emissionswerte untersucht: Kohlenmonoxid (CO), Stickstoffmonoxid und Stickstoffdioxid (NOx), Summe gasförmiger organischer Stoffe, angegeben als Gesamtkohlenstoffgehalt (Gesamt-C), Gesamtstaub, Sauerstoff (O<sub>2</sub>), Dioxine und Furane (PCDD/F), Benzo(a)pyren (BaP).





**10.** Durch Silierung für die spätere Nutzung lagern: Parallel wurde das Laub aus dem ersten Jahr zu großen Ballen gepresst und luftdicht mit Kunststoffolie eingewickelt. Der einsetzende Prozess der Milchsäuregärung führt zu einer Konservierung und heißt Silierung.



... auch wenn der Wassergehalt durch Abbauprozesse etwas höher und der Heizwert etwas niedriger ist, kann die Silierung zur Lagerung über einen begrenzten Zeitraum, z. B. über den Winter, eingesetzt werden. Damit könnte Laub auch nach der Herbstsaison zur Verbrennung genutzt werden.



Insgesamt konnte das untersuchte Laub gut verbrannt werden.

Unsere Empfehlungen:

- Die Emissionen sind kontrollierbar, allerdings sollten Störstoffe bereits bei der Sammlung möglichst reduziert werden, denn die erhöhten Aschewerte im Brennstoff und die Staubwerte im Abgas führen zu einer höheren Belastung der Feuerungsanlage. Auch ist nicht jede Anlage für diesen Brennstoff geeignet.

- Durch eine vorherige Siebung konnten enthaltene Verunreinigungen und damit Schwermetall- und Aschekonzentrationen zum Teil deutlich reduziert werden. Zudem steigt durch die Absiebung der Heizwert. Eine vorherige Trocknung verbessert die Absiebung.

- Die Möglichkeiten zur Verbesserung der Brennstoffqualitäten durch die Sammlung und durch eine Siebung sollten noch genauer untersucht werden.

**FUßNOTEN**

<sup>1</sup> Basierend auf öffentlich verfügbaren Angaben zum Laubanfall in 38 Städten und Kommunen sowie einer Hochrechnung über die jeweiligen Flächen und Einwohnerzahlen.  
Vgl. STAHL, E.; DANZ, P., BEHLING, J. (2019): »Systematische Ermittlung von Emissionsdaten bei der thermischen Umsetzung unterschiedlicher Laubabfallfraktionen – SET-Laub«, Laufzeit 1.9.2016 bis 31.3.2019, BMWi, Förderkennzeichen 03KB111. Schlussbericht, Fraunhofer-Institut für Umwelt-, Sicherheits- und Energietechnik UMSICHT, Oberhausen.

→ [https://www.energetische-biomassenutzung.de/fileadmin/Steckbriefe/dokumente/03KB111\\_Endbericht\\_SET-Laub.pdf](https://www.energetische-biomassenutzung.de/fileadmin/Steckbriefe/dokumente/03KB111_Endbericht_SET-Laub.pdf)

<sup>2</sup> Die TA Luft gibt die Grenzwerte für genehmigungspflichtige Anlagen vor.

**BILDRECHTE**

Alle Bilder Copyright Fraunhofer UMSICHT, außer Foto 2: Copyright Esther Stahl  
Alle Grafiken Copyright DBFZ, außer Grafik 9: Copyright Fraunhofer UMSICHT

**WEITERFÜHRENDE QUELLEN**

»Laub als Brennstoff? Charakterisierung und Aufbereitung verschiedener Laubfraktionen für die energetische Nutzung«, Dr. Esther Stahl, Philipp Danz, Martin Meiller und Julian Walberer. In: *Müll und Abfall*, Fachzeitschrift für Kreislauf und Ressourcenwirtschaft 12/2019.

→ [https://muellundabfall.de/ce/laub-als-brennstoff/\\_sid/WPDE-778149-Sqo6/detail.html](https://muellundabfall.de/ce/laub-als-brennstoff/_sid/WPDE-778149-Sqo6/detail.html)

**KOMPAKTE INFORMATIONEN**

Einen Projektsteckbrief finden Sie auf der Website des Förderprogramms »Energetische Biomassenutzung«.

→ [www.energetische-biomassenutzung.de/projekte-partner/details/project/show/Project/SET-Laub-472](http://www.energetische-biomassenutzung.de/projekte-partner/details/project/show/Project/SET-Laub-472)

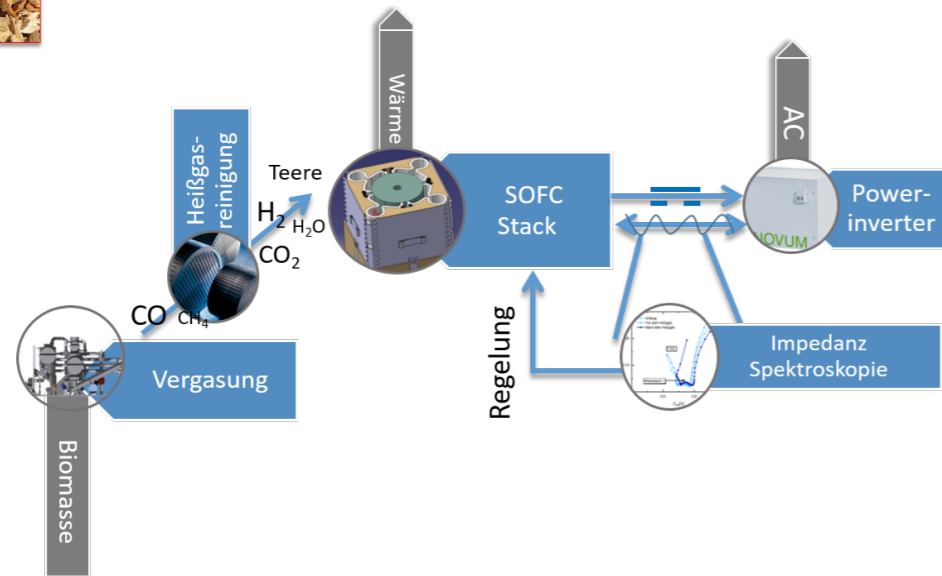
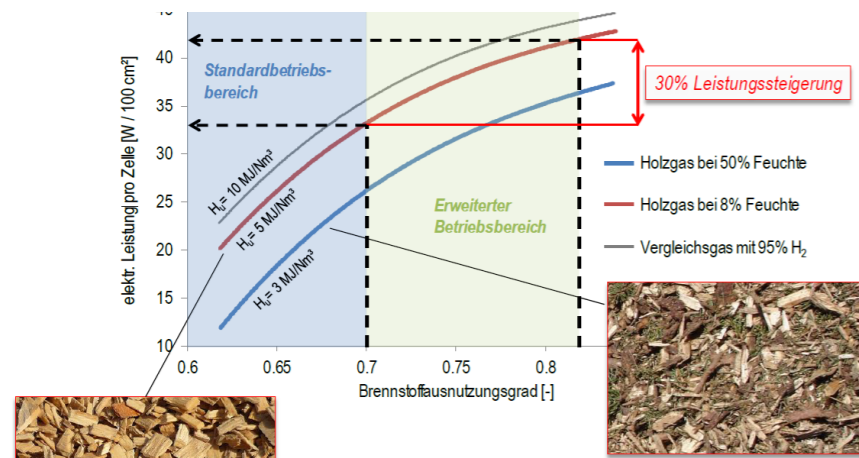
**AUSBLICK**

Am 1.4.2021 startete das Folgeprojekt »LaubCycle – Etablierung eines nachhaltigen Stoff- und Energiekreislaufs für den biogenen Reststoff Laub auf kommunaler Ebene«. Projektsteckbrief:

→ <https://www.energetische-biomassenutzung.de/projekte-partner/projektsuche>







**ZIELE**

Im Zuge des Projekts FlexSOFC war das wissenschaftliche und technische Arbeitsziel die Online-Identifizierung der kritischen Betriebszustände eines kommerziellen Hochtemperaturbrennstoffzellen (engl. *Solide Oxide Fuel Cell*; SOFC) -Stacks mithilfe der elektrochemischen Impedanzspektroskopie (EIS). Dabei wurde der Fokus darauf gelegt, dass die SOFC-Stacks in Betrieb mit unterschiedlichen biogenen Gasen schwankender Gasqualität nicht zersetzt werden.

**THEMEN SCHWERPUNKTE**

- Entwicklung und Integration der EIS-Einheit (Projektpartner NOVUM Engineering)
- Methodenentwicklung der EIS zur Validierung und Interpretation der Ergebnisse
- Technische Realisierung der Kraft-Wärme-Kopplung eines Laborvergasers mit einem kommerziellen 1 kW<sub>el</sub> SOFC-Stack
- Experimentelle Untersuchung zur Verwertung biogener Schwachgase schwankender Qualität in SOFCs



FKZ-NR.: FKZ 03KB112  
 LAUFZEIT 01.08.2016–30.04.2020  
 ZUWENDUNGSSUMME: 243.244,66 €

**KOORDINATION**

Lehrstuhl für  
 Energieverfahrenstechnik  
 Friedrich-Alexander-Universität  
 Erlangen-Nürnberg (FAU),  
 Fürther Straße 244f, 90429  
 www.evt.tf.fau.de

**PARTNER**

NOVUM engineering GmbH,  
 Weißeritzstr. 3, 01067 Dresden  
 www.novum-engineering.com

**PROJEKTLEITUNG**

Prof. Dr.-Ing. Jürgen Karl  
 Telefon: +49 911 5302 9021  
 E-Mail: juergen.karl@fau.de

**Zitat des Projektleiters:** »Für die Kraft-Wärme-Kopplung mit Biomasse fehlen im kleinen Leistungsbereich noch immer zuverlässige Lösungen. Kleine Holzvergaser produzieren Holzgas zuverlässig und effizient, deren Nutzung bleibt aber aufgrund des Teergehalts problematisch. Hochtemperatur-Brennstoffzellen sind in der Lage diese Teere umzusetzen. Um Schädigungen der Brennstoffzelle beim Betrieb mit Holzgas auszuschließen, wurde im Projekt FlexSOFC eine Impedanzmessung für die Online-Überwachung des Brennstoffzellen-stacks entwickelt und erfolgreich eingesetzt.«



Federica Torrigino, Fabian Grimm,  
 Michael Neubert, Jürgen Karl,  
 Mandy Schipke, Sören Birth

**FlexSOFC**

**Verwertung biogener Schwachgase schwankender Qualität in SOFCs (Solid oxide fuel cells)**

**ZUSAMMENFASSUNG**

Im Bereich der Energiegewinnung stellen insbesondere die Hochtemperaturbrennstoffzellen (Betriebs-temperatur 600 °C–1000 °C) aufgrund ihrer Brennstoffflexibilität und ihrem sehr hohen Wirkungsgrad, da die anfallende Abwärme in technisch relevanten Anwendungen zur Kraft-Wärme-Kopplung genutzt werden kann, eine Alternative zu konventionellen Energiesystemen dar. So gekoppelt können Gesamtwirkungsgrade von > 80 % erreicht werden. Im Rahmen des Forschungsvorhabens wurde die Holzvergasungs-Einheit mit einem kommerziellen SOFC-Stack der Firma Hexis gekoppelt. Dabei stand die Untersuchung des Einflusses der biogenen Schwachgase (Holzgase) schwankender Qualität und deren Einfluss auf die Leistung des SOFC-Stacks im Vordergrund. Durch die zerstörungsfreie Messmethode der elektrochemischen Impedanzspektroskopie konnten die kritischen Betriebszustände abhängig vom Brenngas und der damit verbundenen auftretenden Degradation des SOFC-Systems identifiziert werden. Aus den Ergebnissen lässt sich ein Handlungsplan ableiten, mit dem im realen Betrieb die Degradation am SOFC-Stack verlangsamt werden kann.



Folgendes konnte erfolgreich umgesetzt werden:

- Konzeption und Entwicklung softwareseitiger Impedanzspektroskopie
- Aufbau und Inbetriebnahme des Frequenzanalyzers
- Dauerprobetrieb des Online-Diagnostik Messkonzepts
- Kopplung und Dauerbetrieb des 1 kW<sub>el</sub> SOFC Stacks mit einem Laborvergaser.

## HAUPT BOTSCHAFTEN

In the field of energy generation, solide oxide fuel cells (SOFC) represent a sustainable alternative to fossil fuels due to their fuel flexibility and high efficiency (SOFC), as the waste heat produced can also be used in technically relevant applications for combined heat and power (CHP) generation. The research project FlexSOFC aims to couple the wood gasification with a commercial SOFC-stack. Using an online-monitoring method by means of the electrochemical impedance spectroscopy (EIS) the influence of biogenic wood gases with fluctuating quality on the SOFC-stack were investigated. With the in-situ EIS measurements the critical operating conditions and the associated degradation occurring in the fuel cells could be identified. Based on the results a procedure to slow down the degradation on the SOFC-stack during a real operation has been successfully created.

## SUMMARY (ENG.)

The following could be successfully implemented:

- Conception and development of software-based impedance spectroscopy
- Continuous test operation of the online diagnostic monitoring concept
- Setup and commissioning of the Frequency Response Analyzer
- Continuous test operation of a 1 kW<sub>el</sub> SOFC Stacks with a lab-gasificator.

## MAIN MESSAGES

Im Zuge des Projekts wurde auf die veröffentlichte Fachliteratur und die zur Verfügung gestellten unten aufgelisteten Tools zurückgegriffen. Um die Stack-Betriebsbedingungen optimal anzupassen und mögliche Degradationsphänomene zu unterbinden ist eine sorgfältige und tiefere Analyse der EIS-Ergebnisse notwendig.

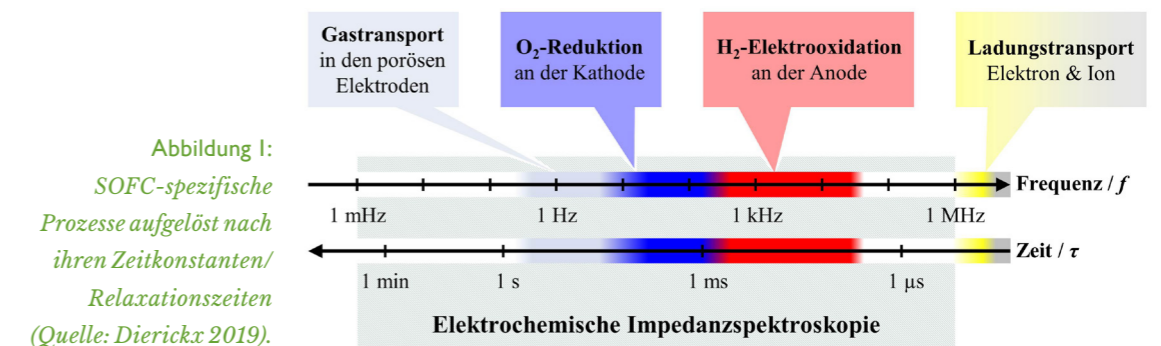
## METHODIK MASSNAHMEN

Die angewandten Maßnahme bestehen aus zwei wichtigen Schritten:

1. Validierung der Ergebnisse durch die Kramers-Kronig Beziehungen:
  - Verifikation des Impedanz Spektrums hinsichtlich seiner Kausalität, Linearität und Zeitinvarianz.
  - Tool Lin-KK des Karlsruhers Institut für Technologie; Lehrstuhl IAM – Werkstoffe der Elektrotechnik (Boukamp 1995; BOUKAMP 1993; Schönleber und Ivers-Tiffée 2015; Schönleber et al. 2014)
  - Je kleiner die Abweichung zwischen Fitting-Modell und gemessenen Daten ist, desto besser ist die Erfüllung der Kriterien des EIS-Spektrums möglich.

2. Interpretation der Ergebnisse durch die DRT (engl.: distribution function of relaxation times; DRT) Analyse:

- Verteilung der Relaxationzeit der unterschiedlichen Prozesse: jeder physikalische Prozess in einer SOFC wird durch eine Zeitkonstante  $\tau$  charakterisiert, welche Information über die Geschwindigkeit des Prozesses enthält.
- Unterscheidungsmöglichkeit der physikalischen Prozesse je nach Ihrer Relaxationszeit (siehe Abbildung 1).
- Freizugängliches Tool



Zur Validierung der EIS Ergebnisse aus dem NOVUM-Frequenzgangsanalysator (siehe Abbildung 2) wurde zuerst durch die Variierung der Erregungsamplitude eine Parametrisierung durchgeführt. Wie in Abbildung 3 dargestellt wurden die Nyquist-Plots der Messungen zuerst mittels Lin-KK überprüft. Die Messung, welche die geringste Abweichung zeigt, wurde im Anschluss mittels DRT-Tool genau analysiert. So konnte für jeden Messpunkt ein DRT-Spektrum erstellt werden. Jede durchgeführte EIS-Messung am SOFC-Prüfstand wurde dreimal wiederholt und dabei die Erregungsamplitude von 100 mA auf 180 mA erhöht.

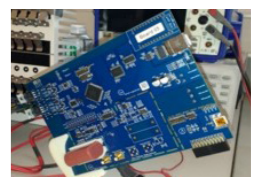
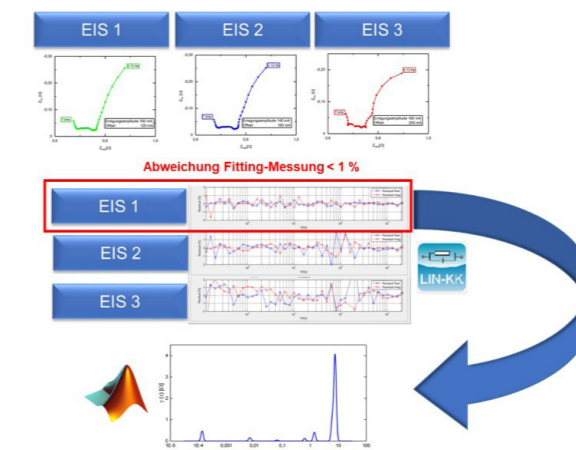


Abbildung 2: Frequency Response Analyzer (FRA) der Firma NOVUM Engineering.

Abbildung 3: Übersicht der Validierungsmethode der unterschiedlichen EIS-Eingangsparameter und deren Auswirkung auf die Linearitäts- bzw. Kausalitätsprüfung über das KIT Tool LIN-KK und Erstellung des DRT-Plots.



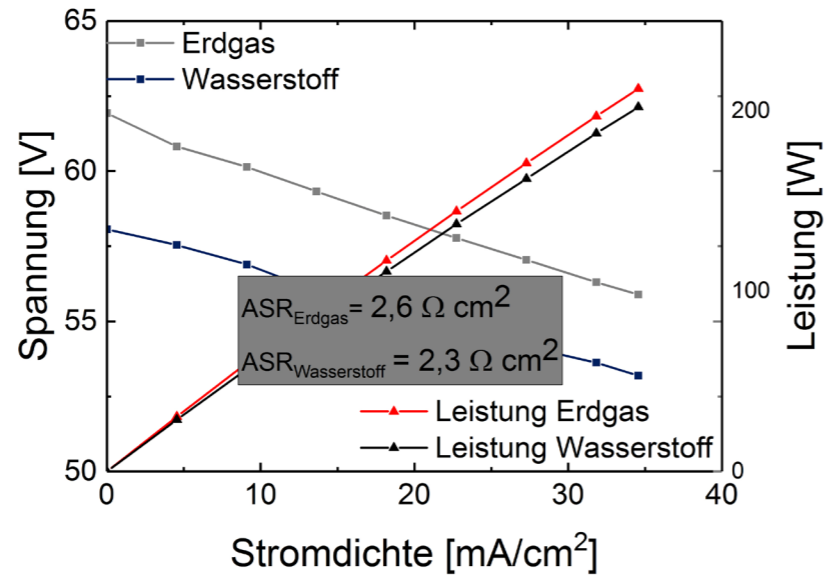


Abbildung 4:  
UI-Kennlinie und Leistungskennlinie  
im Erdgas- und Wasserstoffbetrieb

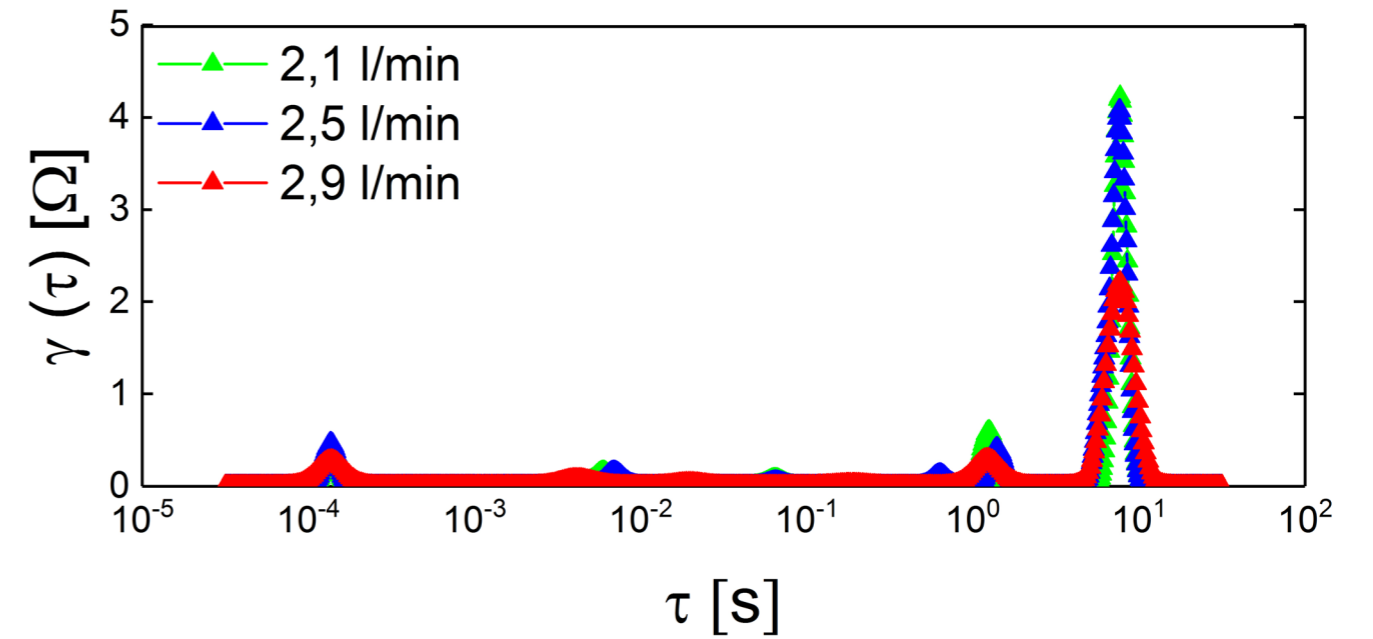


Abbildung 5:  
Darstellung des DRT-Plots im Erdgasbetrieb mit einer  
Volumenvariation von 2,1 auf 2,9 l/min, T=820 °C.

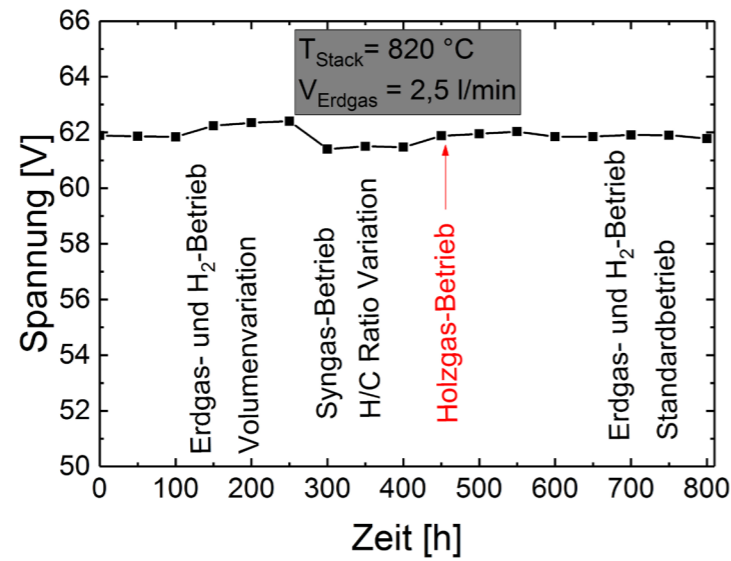


Abbildung 6:  
Verlauf der Stack-Spannung,  
beeinflusst durch die unterschiedlichen  
Versuchskampagnen, dargestellt  
über die gesamte Versuchslaufzeit.

## ERGEBNISSE

### Veröffentlichungen

- HERRMANN, T.; BIRTH, S.; KARL, J.; DILLIG, M. (2018): Monitoring a commercial  $\mu$ -CHP SOFC-Stack by electrochemical impedance spectroscopy. In: *Proceedings of the 13th European SOFC & SOE Forum 2018*. Luzern, CH
- Ergebnisse aus der experimentellen Untersuchung
  - Wasserstoff und Erdgas
  - Langzeitdegradation
  - Synthetisches Gas
  - Holzgas

### Ergebnisse auf einen Blick:

Die im Projekt entstandenen Ergebnisse fokussieren sich auf die Untersuchung der Volumenvariation und der Langzeitdegradation mit Wasserstoff ( $\geq 99,9\%$  Reinheit) und Erdgas. Des Weiteren werden verschiedene Brennstoffgaszusammensetzungen mit synthetischem Syngas ( $H_2$ ,  $CO$ ,  $CO_2$ ,  $N_2$ ) und realem Holzgas, das aus am Lehrstuhl mit einem Holzvergaser produziert wird, untersucht und analysiert. Die Ergebnisse sind für die offene Klemmspannung (OCV) sowie für den Lastbetrieb dargestellt.

### Erdgas und Wasserstoffbetrieb

Im Gegensatz zu der Literatur (Sonn et al. 2008; Subotić et al. 2018) ist aus Abbildung 4 erkennbar, dass der SOFC-Stack eine bessere Leistung im Erdgasbetrieb (Referenzbedingungen: Volumenstrom = 2,5 L/min,  $T = 820^\circ C$ ) als im Wasserstoffbetrieb erbringt. Das ist auf die Vorreformierungseinheit (Luft-Brennstoffverhältnis = 0,27) und eine interne Reformierung des Erdgases im Stack zurückzuführen. Aus der DRT Analyse ist erkennbar (Abbildung 5), dass die Erdgas-Volumenvariation einen wesentlichen Effekt auf den Gastransport ( $\tau = 1-10s$ ) hat. Die Zunahme des Peaks mit sinkenden Brenngasvolumenstrom spiegelt sich in einer Zunahme der Diffusionsverluste wider. Die unverän-

derte Höhe der Peaks bei niedrigen Zeitkonstanten ( $\tau = 10^{-4}$ ), welcher den Prozess der elektrochemischen Oxidation des Brenngases abbildet, kann auf den OCV-Betrieb zurückgeführt werden.

### Langzeitdegradation

Der Stack-Spannungsverlauf (Abbildung 6) zeigt, dass die durchgeführten Messkampagnen, zu einer niedrigen Degradationserscheinung ( $\sim 100mV / 100h$  über 800h) geführt haben. Der SOFC-Stack war vor den dargestellten Messkampagnen schon insgesamt 12000h im Betrieb. Aufgrund dessen wird

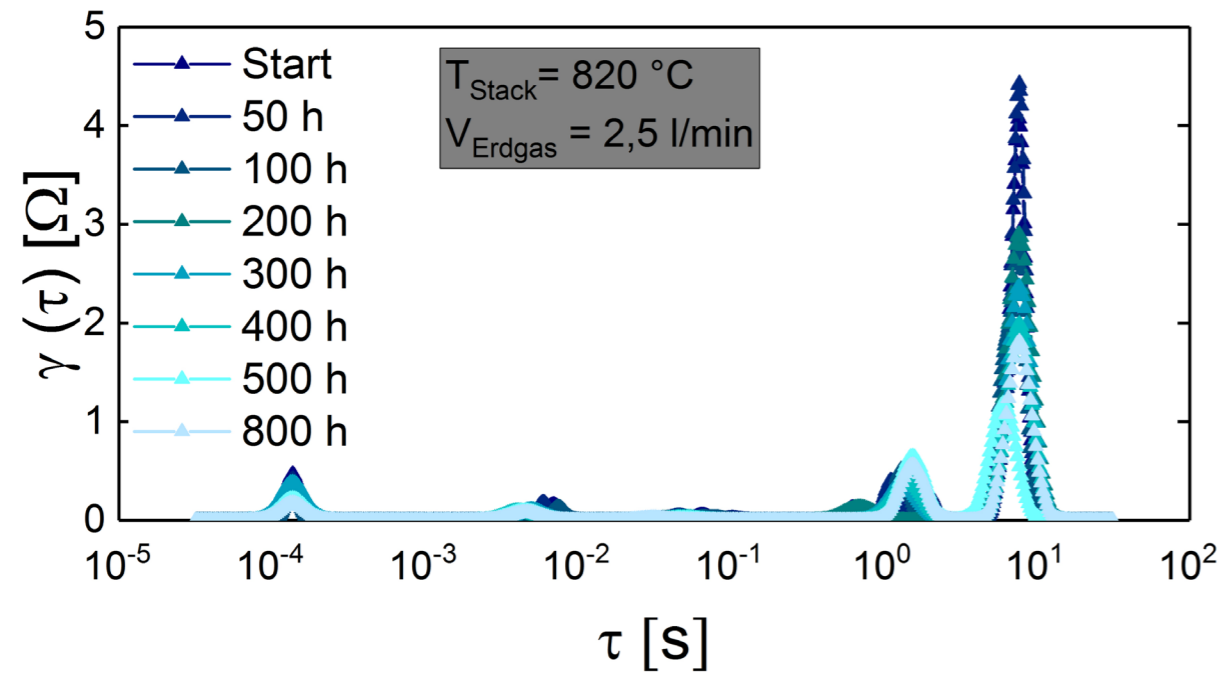


Abbildung 7:  
DRT-Plot des Erdgasbetriebs über die  
Versuchsdauer (0-800h),  $T= 820\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

### Synthetisches Gas

Im Rahmen der Synthesegasversuche wurde der Einfluss unterschiedlicher Gasmischungen bzw. dem H/C-Verhältnis (Wasserstoff zu Kohlenstoff Verhältnis) auf das thermische Verhalten des SOFC-Stacks untersucht. Anhand des DRT-Spektrums kann davon ausgegangen werden, dass bei niedrigen H/C Verhältnissen (ca. 4) ein größerer Gasdiffusions- und Oxidationswiderstand des Brenngases existiert. Diese Annahme lässt sich darauf zurückführen, dass aufgrund des erhöhten C-Anteils im Brenngas die Menge an zu übertragenden Elektronen pro Brenngas-Atom, und demzufolge der Oxidationswiderstand, steigt.

Zusätzlich wirkt sich die volumetrische Zunahme des Brenngases, im Gegensatz der kleineren Volumina in Bezug auf  $\text{H}_2$ , negativ auf den Gasdiffusionswiderstand aus (Abbildung 8). Die Ergebnisse lassen schlussfolgern, dass ein größeres H/C-Verhältnis zu einer besseren Stack-Leistung führt.

angenommen, dass mögliche Ablagerungen aus den vorherigen Messkampagnen brenngasseitig während des erneuten Betriebs abgebrannt sind. Diese Annahme spiegelt sich in dem sukzessiven Absinken der DRT-Peaks im Bereich von 1–10s, welcher den Widerstand der Gasdiffusion darstellt, über die Betriebsstunden wieder (siehe Abbildung 7). Folglich wird die Diffusion der Gase im Laufe des Versuches immer weniger gehemmt und der Widerstand des Gastransportes nimmt ab.

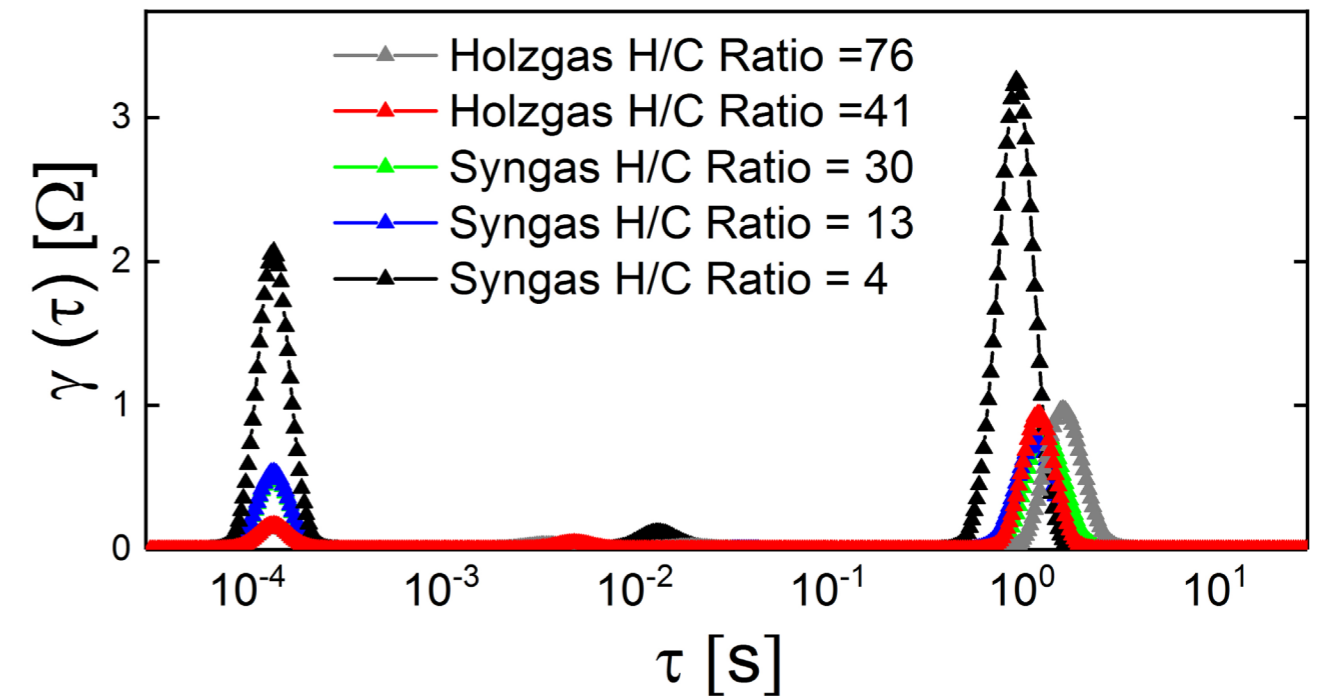


Abbildung 8:  
Darstellung der DRT-Plots im Syngasbetrieb bei verschiedenen  
H/C Ratio – im Lastbetrieb ( $10\text{ mA/cm}^2$ ),  $T=820\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

### Holzgas

Das gleiche Verhalten wie aus den zuvor beschriebenen Synthesegasversuchen lässt sich auch im Rahmen der realen Holzgasversuche beobachten. Die Holzgasversuche zeigen eine leichte Erhöhung der aufgenommenen U-I-Kennlinie (Abbildung 9), welche auf die komplexe Reaktion der Teere wie Benzol und Toluol zurückzuführen ist. Diese Untersuchungen konnten jedoch nicht in den Bereich der kritischen Brennstoffausnutzung (H/C Ratio < 13) ausgeweitet werden, da der SOFC-Stack (aus Sicherheitsgründen) die thermische Grundlast über eine externe Wasserstoffversorgung regelt.

Somit konnte im Holzgasbetrieb als kleinster H/C-Wert nur ein Wert von 41 angefahren werden. Zusammenfassend stellte der Betrieb unter Holzgas, mit einer vorgeschalteten Entschwefelungsanlage, bezüglich einer beschleunigten Degradation und der Stack-Leistung kein Problem dar.

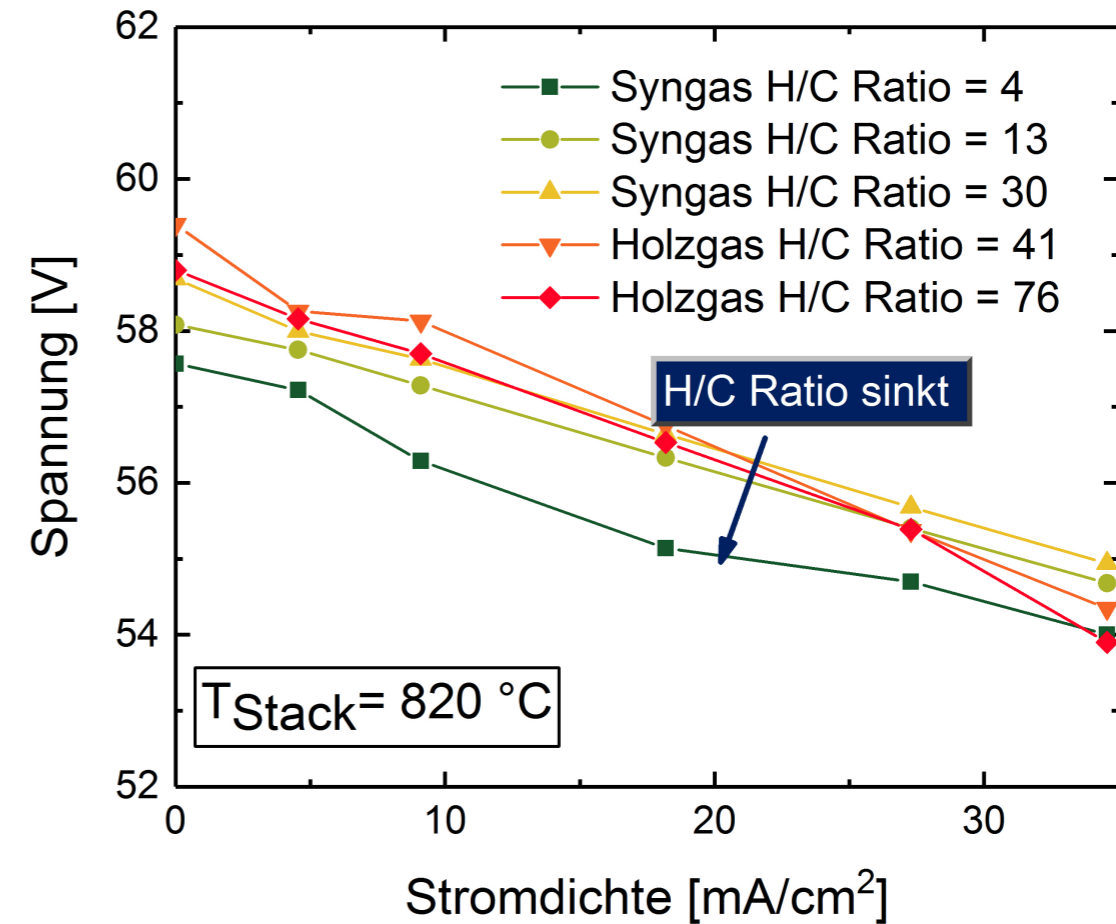
## HERAUSFORDERUNGEN

Ein Hauptproblem im Rahmen des Projekts war die Validierung und Interpretation der EIS-Messergebnisse, da die elektrochemische Impedanzspektroskopie eine störungsempfindliche Messmethode ist. Zum einen ist die Validierung der Spektren, aufgrund von möglichen Störsignalen, sehr schwierig.

Zum anderen stellt die Interpretation bzw. die Auswertung der Daten eine herausfordernde Aufgabe dar. Aus den genannten Gründen erfolgte in der zweiten Projektphase die Entkopplung der elektronischen Last (Simulator eines Verbrauchers) und der EIS-Einheit durch den Einsatz eines DC-DC Wandlers (Projektpartner NOVUM).



Abbildung 9:  
Darstellung der U-I/Kennlinie im Syngas-Betrieb  
(H/C Ratio von 30,13 und 4) und Holzgasbetrieb (H/C Ratio  
von 76 und 41) bei variierendem H/C Ratio,  $T = 820\text{ °C}$ .



## AUSBLICK

Im Zuge des Projekts »Flex SOFC« zeigten die Versuche am SOFC-System einerseits einfache Zusammenhänge wie die höhere Leistung durch Zunahme des Brenngasstroms, aber auch komplexe Phänomene wie die Auswirkung von Teeren auf die Leistung des gesamten SOFC-Systems. Durch weitere Untersuchungen kann die Methodenentwicklung der EIS und DRT Analyse verbessert werden und das Verständnis über SOFC-spezifische Prozesse vertieft werden. Im Detail wird der Einfluss der Temperatur bei verschiedenen Gaszusammensetzungen, die Auswirkung der Dauerbelastung im Erdgasbetrieb und deren Einfluss auf die EIS und DRT untersucht. Zusätzlich wird der SOFC-Stack nochmals mit einem Holzvergaser gekoppelt. Dabei soll die sich aus den Versuchen ergebende kritische Holzgas-Mischung (H/C Ratio < 13) genau detektieren bzw. analysieren werden.

## LITERATUR

- BOUKAMP, B. A. (1995): A Linear Kronig-Kramers Transform Test for Impedance Data Validation. In: *J. Electrochem. Soc.* 142 (6), S. 1885–1894. DOI: [10.1149/1.2044210](https://doi.org/10.1149/1.2044210).
- BOUKAMP, B. A. (1993): Practical application of the Kramers-Kronig transformation on impedance measurements in solid state electrochemistry. In: *Solid State Ionics* 62 (1-2), S. 131–141. DOI: [10.1016/0167-2738\(93\)90261-Z](https://doi.org/10.1016/0167-2738(93)90261-Z).
- DIERICKX, S. (2019): Charakterisierung, Modellentwicklung und Simulation von mehrschichtigen Brenngaselektroden in Festoxid-Brennstoffzellen. Karlsruhe: KIT Scientific Publishing (Schriften des Instituts für Angewandte Materialien - Werkstoffe der Elektrotechnik, Karlsruher Institut für Technologie, Band 38).

SCHÖNLEBER, M.; IVERS-TIFFÉE, E. (2015): Approximability of impedance spectra by RC elements and implications for impedance analysis. In: *Electrochemistry Communications* 58, S. 15–19. DOI: [10.1016/j.elecom.2015.05.018](https://doi.org/10.1016/j.elecom.2015.05.018).

SCHÖNLEBER, M.; KLOTZ, D.; IVERS-TIFFÉE, E. (2014): A Method for Improving the Robustness of linear Kramers-Kronig Validity Tests. In: *Electrochimica Acta* 131, S. 20–27. DOI: [10.1016/j.electacta.2014.01.034](https://doi.org/10.1016/j.electacta.2014.01.034).

SONN, V.; LEONIDE, A.; IVERS-TIFFÉE, E. (2008): Combined Deconvolution and CNLS Fitting Approach Applied on the Impedance Response of Technical Ni/8YSZ Cermet Electrodes. In: *J. Electrochem. Soc.* 155 (7), B675. DOI: [10.1149/1.2908860](https://doi.org/10.1149/1.2908860).

SUBOTIĆ, V.; STOECKL, B.; LAWLOR, V.; STRASSER, J.; SCHROETTNER, H.; HOCHENAUER, C. (2018): Towards a practical tool for online monitoring of solid oxide fuel cell operation: An experimental study and application of advanced data analysis approaches. In: *Applied Energy* 222, S. 748–761. DOI: [10.1016/j.apenergy.2018.03.182](https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.03.182).



FKZ-NR.: 03KB118  
LAUFZEIT 01.07.2016 – 30.06.2019  
ZUWENDUNGSSUMME: 428.390 €

#### KOORDINATION

DBFZ Deutsches  
Biomasseforschungszentrum  
gemeinnützige GmbH  
Torgauer Straße 116,  
04347 Leipzig  
www.dbfz.de

#### PARTNER

Burkhardt GmbH  
Kreutweg 2  
92360 Mühlhausen  
www.burkhardt-gmbh.de

#### KONTAKT

Projektleiter: Dr.-Ing. Thomas Zeng  
Telefon: +49 (0)341 2434 542  
E-Mail: thomas.zeng@dbfz.de



#### Zitat des Projektleiters:

##### Thomas Zeng

»Mit dem Dampf-KWK-System wurde demonstriert, dass bestehende und neu zu installierende Biomassefeuerungen mit hohem elektrischen Wirkungsgrad und THG-Minderungspotenzial betrieben werden können. Vor allem im Gewerbe- und Industriesektor mit einem kontinuierlich hohen Wärme- und Strombedarf bietet diese Technologie ein hohes Übertragungspotenzial.«

## ZIELE

- 1 Entwicklung eines Rauchgasverdampfers, welcher mit möglichst minimiertem Wartungsaufwand zuverlässig betrieben werden kann.
- 2 Regelungstechnische Integration des Gesamtsystems in die Gebäudeversorgung.
- 3 Technisch-ökonomische und ökologische Bewertung des Gesamtsystems.
- 4 Entwicklung von Strategien zur Markteinführung.

Thomas Zeng, Kathrin Bienert,  
Katja Oehmichen, Torsten Schmidt-Baum,  
Dominik Alt, Werner Klenk, Holger Burkhardt

# DAMPF-KWK

Entwicklung eines Klein-KWK-Dampfmotors  
zur Nachrüstung von Feuerungsanlagen  
im mittleren Leistungsbereich

Während in den letzten Jahren dank der Nutzung der KWK-Technologie eine Effizienzsteigerung in der energetischen Nutzung von Biomasse erzielt werden konnte, gibt es Anlagenkonzepte, die von einer adaptiven Integration dieser gekoppelten Kraft-Wärme-Nutzung profitieren können. Abwärme von Feuerungsanlagen könnte so effizient genutzt und durch Umwandlung in Nutzwärme und Strom prozessintern oder -extern nutzbar gemacht werden. Durch eine Prozessoptimierung von Biomassefeuerungsanlagen kann die **Gesamteffizienz** der Anlage gesteigert und somit die Attraktivität solcher Anlagen für potenzielle Stakeholder gesteigert werden. Zusätzlich kann ein positiver Beitrag für die Energiewende aufgrund der **Gesamtwirkungsgradsteigerung** der Konversion von Biomasse in Wärme und Strom generiert werden.

Vor diesem Hintergrund soll ein **Kraft-Wärme-Kopplungsprozess auf Dampfbasis in Verbindung mit Biomasse-Festbrennstofffeuerungen** entscheidend weiter entwickelt und anhand einer Demonstrationsanlage im unteren Leistungsbereich (bis 30 kW<sub>e</sub>) mit hohem Übertragungspotenzial demonstriert werden.

Der Neuheitsgrad des Vorhabens besteht darin, ein Wärmeübertragungssystem zur Dampferzeugung zu entwickeln, mit dem bei vertretbarem Aufwand ein Dampf-KWK-System mit einer Biomassefeuerung betrieben werden kann und dieses System an einer existierenden Feuerung zu demonstrieren. Dadurch wird es ermöglicht, sowohl bei bestehenden Feuerungen als auch bei neu zu errichtenden Systemen ergänzend zur Wärmeversorgung auch durch die bedarfsgerechte Strombereitstellung einen Beitrag zur Netzstabilisierung zu leisten.

- Biomassegefeuerte Dampf-KWK-Anlage
- Energetische und exergetische Bilanzierung
- Wirtschaftlichkeitsbetrachtung
- Bewertung rechtliche Rahmenbedingungen
- Markteinführungsstrategien

## ZUSAMMENFASSUNG

## THEMEN SCHWERPUNKTE



- Beim Anlagenbetrieb zeigte sich ein für die eingesetzten Holzhackschnitzel typisches **Emissionsniveau** ( $\text{CO} < 50 \text{ mg/m}^3$  i.N.,  $\text{NO}_x < 300 \text{ mg/m}^3$  i.N.). Es besteht ein Risiko, dass Brennstoff- und Aschepartikel aus dem Feuer- raum ausgetragen und in den Rauchgasweg gelangen können.
- Der **maximale Exergiewirkungsgrad** beträgt 19,8%. Die Obergrenze für die elektrische Leistung liegt bei ca.  $20 \text{ kW}_{\text{el}}$ .
- Es wurden verschiedene Möglichkeiten zur **Steigerung der elektrischen Leistung** getestet. Es konnte eine Steigerung der elektrischen Generatorleistung von  $9,9 \text{ kW}_{\text{el}}$  auf  $16,4 \text{ kW}_{\text{el}}$  sowie eine **Steigerung der Stromausbeute** von 4,39% auf 5,07% und der Stromkennzahl von 5,73% auf 6,71% erreicht werden. Der maximale elektrische Bruttowirkungsgrad beträgt 13,45% und der energetische Gesamtwirkungsgrad beträgt ca. 80%.
- Die **Eigenstromnutzung** ist am wirtschaftlichsten. Je nach Bezugskosten an Fremdstrom und auskoppelbarer elektrischer Leistung ist eine Nachrüstung bis zu einem Anlagenalter von 13 Jahren und einer Restlaufzeit von 2 Jahren wirtschaftlich. Die Wirtschaftlichkeit ist vor allem abhängig vom Brennstoffpreis und von der Auslastung der Anlage.
- Wendet man die spezifische **THG-Minderung** auf die jährlich produzierte Wärmemenge an, so lässt sich ein THG-Minderungspotenzial von  $20 \text{ t CO}_2\text{-Äq}$  pro Jahr gegenüber einem konventionell betriebenen Biomasseheizkessel errechnen.
- Es konnten potenziell ca. **1.900 Anlagen** zwischen  $300 \text{ kW}$  und  $1.000 \text{ kW}$  abgeschätzt werden, die aufgrund des Alters und der Größenklasse für eine **Nachrüstung** in Frage kommen.

## HAUPT BOTSCHAFTEN

### SUMMARY (ENG.)

While in recent years it was possible to increase efficiency in the energetic use of biomass due to the use of CHP technology, there are plant concepts that can benefit from an adaptive integration of this technology. Heat from combustion plants could thus be used efficiently and converted into heat and electricity and the overall efficiency and the attractiveness of such plants for potential stakeholders can be increased. Against this background, the aim of this project was to decisively further develop and demonstrate an overall steam-based CHP process in conjunction with biomass firing systems in the range of  $10\text{-}30 \text{ kW}_{\text{el}}$ . This will make it possible to contribute to grid stabilization both for existing and new combustion plants.

## MAIN MESSAGES

- During plant operation, an emission level was observed which is typical for wood chip combustion ( $\text{CO} < 50 \text{ mg/m}^3$ ,  $\text{NO}_x < 300 \text{ mg/m}^3$ ). There is an increased risk that fuel and ash particles may be discharged from the combustion chamber into the flue gas section.
- The maximum exergy efficiency is 19.8%. The upper limit for the electrical output is approx.  $20 \text{ kW}_{\text{el}}$ .
- Different possibilities for the increase of the electrical power were investigated. An increase of the electrical output of the generator from  $9.9 \text{ kW}_{\text{el}}$  to  $16.4 \text{ kW}_{\text{el}}$  as well as an increase of the electrical yield from 4.39% to 5.07% and the CHP coefficient from 5.73% to 6.71% could be achieved. The maximum gross electrical efficiency is 13.45% and the total overall energetic efficiency is approx. 80%.
- The on-site electricity consumption the most economical plant operation. Depending on the procurement costs for external electricity and electrical output of the plant, retrofitting of combustion systems, which are operating up to 13 years, is possible. The economic operation is mainly depending on the fuel price and the yearly operational hours of the plant.
- A GHG reduction potential of  $20 \text{ t CO}_2$  eq per year can be calculated compared to a conventionally operated biomass boiler.
- Approx. 1,900 plants between  $300 \text{ kW}$  and  $1,000 \text{ kW}$  could be estimated, which could be retrofitted due to their age and size class.

- Konstruktion, Aufbau und Betrieb einer neuartigen biomassegefeuerten Dampf-KWK-Anlage
- Energetische Bilanzierung
- Ökonomische Bewertung mittels Annuitätenmethode
- Ökologische Bewertung nach dem Methodenhandbuch Stoffstrom-orientierte Bilanzierung der Klimagaseffekte (Version 4, 2013)
- Strategien zur Markteinführung, u.a. mittels SWOT Analyse und Bewertung rechtlicher Rahmenbedingungen

## METHODIK MASSNAHMEN

- ISI-Publikation peer-reviewed: AÇIKKALP, E.; ZENG, T.; ORTWEIN, A.; BURKHARDT, H.; KLENK, W. (2018): Exergy, Exergoeconomic and Enviroeconomic Evaluation of a Biomass Boiler-Steam Engine Micro-CHP System. In: *Chem. Eng. Technol.*, 41 (11). S. 2141–2149. [10.1002/ceat.201800041](https://doi.org/10.1002/ceat.201800041).
- Tagungsband 7. Statuskonferenz: [www.energetische-biomassenutzung.de/fileadmin/media/3\\_Veranstaltungen/7\\_SK/7SK\\_Reader\\_2017\\_min.pdf](http://www.energetische-biomassenutzung.de/fileadmin/media/3_Veranstaltungen/7_SK/7SK_Reader_2017_min.pdf)
- Endbericht: [www.energetische-biomassenutzung.de/projekte-partner/details/project/show/Project/Dampf-KWK-486](http://www.energetische-biomassenutzung.de/projekte-partner/details/project/show/Project/Dampf-KWK-486)
- Demonstrationsanlage
- Strategien zur Markteinführung inkl. Wirtschaftlichkeitsbeurteilung

## ERGEBNISSE



**ERGEBNIS A:**

**Aufbau und Betrieb der biomassegefeuerten Dampf-KWK-Anlage**

Im Zuge des Projekts wurden auf dem Betriebsgelände der Fa. Burkhardt die notwendigen technischen Voraussetzungen geschaffen. Dazu zählte die Errichtung eines Aufstellraumes für die Anlagentechnik, die Einbindung des Kessels (Fa. Viessmann, Typ Vitoflex 300) und des Dampfmotors in das bestehende Heizungsnetz, sowie der Umbau der Brennstofffördertechnik zur Versorgung des Biomassekessels. Der Dampfmotor wurde von der Firma SteamDrive bezogen und von der Fa. Burkhardt angepasst und in das System eingebunden, Abbildung 1.

Abbildung 1: Energieflussbild des Gesamtsystems unterteilt in die Teilsysteme I (Heizkessel und Dampferzeuger) und II (Nachverstromungsanlage)

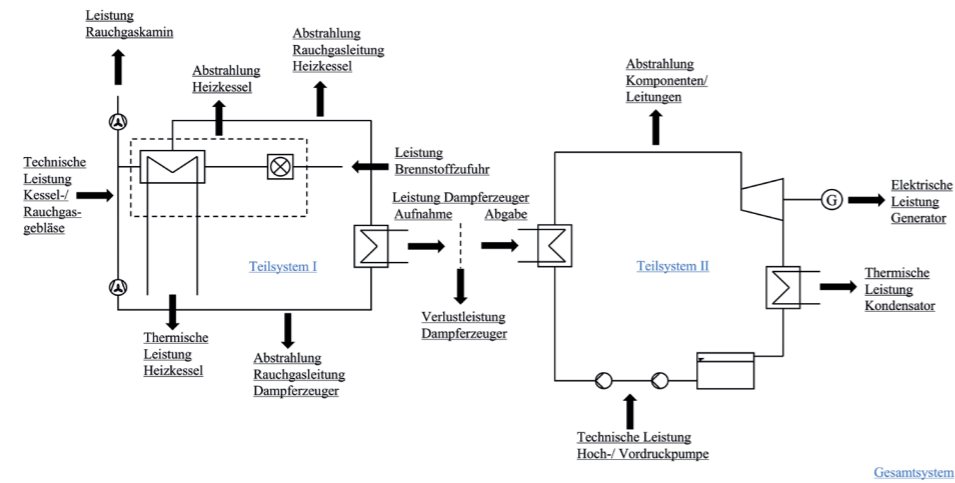


Tabelle 1: Spezifische KWK-Kennzahlen der Leistungssteigerungen der Volllast-Betriebspunkte

	AUSGANGS-ZUSTAND	EINSCHUB-ROHRE	EINSCHUBROHRE + SCHAMOTTESTEINE	EINSCHUBROHRE + SCHAMOTTESTEINE + ISOLIERUNG
$H_{KWK} [-]$	0,9900	0,9899	0,9893	0,9932
$H_{EL, BRUTTO, KWK} [-]$	0,1190	0,1325	0,1321	0,1345
$H_{EL, NETTO, KWK} [-]$	0,0949	0,1091	0,1106	0,1163

Es wurden verschiedene Maßnahmen zur Steigerung der elektrischen Leistung der Nachverstromungsanlage implementiert und getestet. In Tabelle 1 werden die Leistungsdaten für den Volllastbetriebspunkt gegenübergestellt.

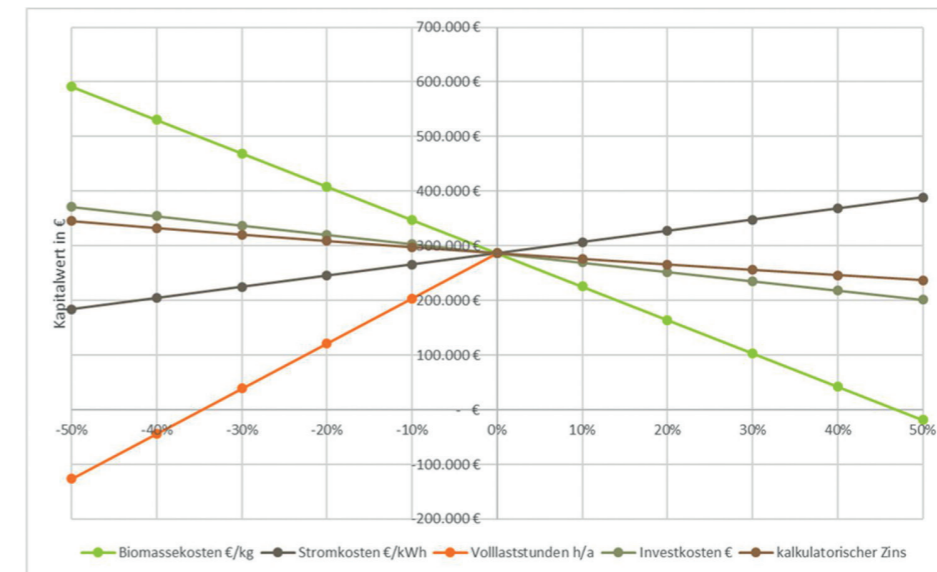
**ERGEBNIS B:**

**Wirtschaftlichkeit der biomassegefeuerten Dampf-KWK-Anlage**

Die Wirtschaftlichkeitsbewertung zeigte, dass sich eine Nachrüstung bis zu einem Anlagenalter 13 Jahre wirtschaftlich bereits lohnt. Der Kapitalwert der Kombinationsanlage beträgt bei einer Nachrüstung im Alter 13 Jahren 30.232 € und weist eine Annuität von 15.845 € auf. Die Referenzanlage hat mit 23.953 € einen rund 6.279 € geringeren Kapitalwert sowie mit 12.555 € eine um 3.290 € geringere Annuität auf.

Die Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse (Abbildung 2) zeigen, dass die Wirtschaftlichkeit vor allem abhängig ist von der Auslastung der Dampf-KWK-Anlage. Bereits bei einer um rund 35 % niedrigen Auslastung ergibt sich ein negativer Kapitalwert. Auch die Brennstoffbezugskosten haben einen starken Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit der Kombinationsanlage. Bei einem Anstieg des Brennstoffpreises um 47 %, beträgt der Kapitalwert Null. Mit steigenden Strom- und Gaspreisen und möglichst niedrigen Biomassekosten wird die Wettbewerbsfähigkeit der KWK-Anlage weiter verbessert.

Abbildung 2: Sensitivitätsbetrachtung



**ERGEBNIS C:**

**Ökologische Bewertung der biomassegefeuerten Dampf-KWK-Anlage**

Die THG-Bilanzierung zeigt wie in Abbildung 3 dargestellt ein hohes Minderungspotenzial auf Seiten der biogenen Wärmebereitstellung gegenüber der Wärmebereitstellung eines erdgasbetriebenen Heizkessel und des unterstellten Wärmeerzeugungsmixes. Gegenüber Letzterem kann die THG-Minderung durch die beschriebene Nachrüstung eines konventionellen Biomasseheizkessels zu einem Dampf-KWK System von 92 % auf 96 % erhöht werden.

**ERGEBNIS D:**

**Strategien zur Markteinführung der biomassegefeuerten Dampf-KWK-Anlage**

Es konnten potenziell ca. 1.900 Anlagen zwischen 300 kW und 1.000 kW abgeschätzt werden, die aufgrund des Alters und der Größenklasse für eine Nachrüstung in Frage kommen. Insgesamt ist davon auszugehen, dass somit eher Anlagen im Marktsegment Industrie, welche eine hohe Zahl von Vollbenutzungsstunden für die Bereitstellung von Prozesswärme aufweisen, für eine Nutzung des Systems geeignet sind. Anlagen im Bereich der Industrie mit einem kontinuierlich hohen Wärmebedarf haben meist auch einen hohen Strombedarf.

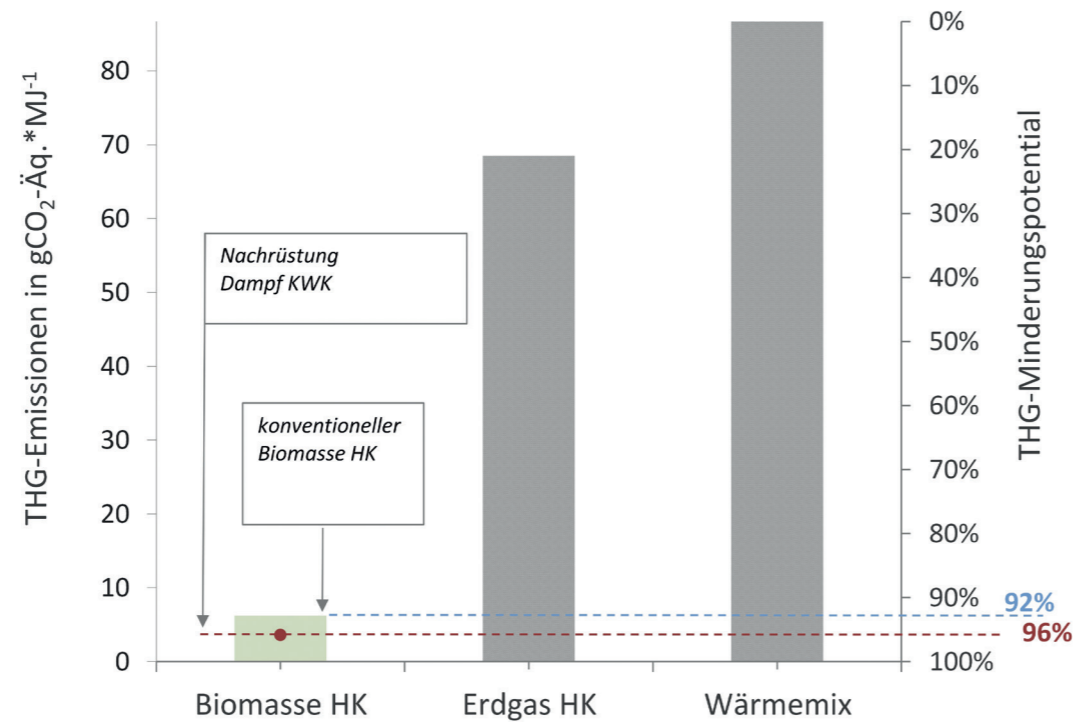


Abbildung 3:  
Vergleich der spezifischen THG-Emissionen der biogenen Wärmeerzeugung mit fossilen Referenzwerten  
Wärmeerzeugung mit fossilen Referenzwerten

Das größte Potenzial für das Dampf-KWK-System wird z. B. in den folgenden Marktakteursgruppen gesehen:



- Unternehmen mit Altholzfall der Güteklassen AI und AII, die diesen Brennstoff für den eigenen Wärme- und Strombedarf nutzen können, statt diese Stoffe zu entsorgen (Verwendung am Entstehungsort, Einsparung von Entsorgungskosten), z. B. Baufirmen.
- Kommunale Gebäude(komplexe), die das in ihrem Bereich anfallende Straßenbegleitgrün (von Straßenmeistereien) zur Wärme und Stromversorgung nutzen wollen.
- Sägewerke und Holzverarbeitende Industrie, die ihre anfallenden holzartigen Reststoffe zukünftig zur Eigenstromversorgung nutzen wollen.

## HERAUSFORDERUNGEN (HEMMNISSE)

Lediglich der Austrag von Brennstoff- und Aschepartikeln aus dem Feuerraum in den Rauchgasweg sowie der Eintrag der Wärme in den Dampferzeuger stellt eine aktuelle Herausforderung dar. Mit einer Anpassung der Heizanlagentechnik sollte auch diese Herausforderung bewältigt werden können.

Basierend auf diesen Projektergebnissen und aufbauend auf dem weltweit funktionierenden Vertriebsnetz der BHKW- und Vergaseranlagen kann die Firma Burkardt GmbH zukünftig den Verkauf der Dampf-KWK Anlagen vorantreiben und in den kommenden 5 bis 10 Jahren etablieren. Die anhand der energetischen und exergetischen Bilanzierung sowie der rechtlichen und technisch-ökonomischen und ökologischen Analysen gewonnenen Erkenntnisse und die erarbeiteten Lösungsansätze bilden dabei eine wichtige Grundlage, die bei zukünftigen Projekten mit solchen Systemen am DBFZ und im Rahmen des Förderprogramms zur Anwendung kommen. Die entwickelten technischen Lösungen und Handlungsempfehlungen zeigen den Forschungsbedarf für weitere Nutzungs- und Entwicklungsaktivitäten. Es sind insbesondere weitere Untersuchungen notwendig, um herauszufinden, wie der Wirkungsgrad der Anlage gesteigert sowie eine flexible Strombereitstellung gewährleistet werden kann. Des Weiteren sollte auch die Integration in unterschiedliche lokale Stromnetze untersucht werden, die dann zu einer Anpassung der Anlagenkonfiguration bzw. des Anlagenbetriebs führen können. Auf der Basis der Ergebnisse wird die Zusammenarbeit des DBFZ mit der Firma Burkhardt kurz- und mittelfristig weiter ausgebaut und vertieft.

## AUSBLICK

Beispiel für Smart Bioenergie: Strom und Wärme aus Holzgas  
<https://www.dbfz.de/index.php?id=1050>

## WEITERE INFORMATIONEN



**BIOGAS**



**Emissionsminderung, Effizienzsteigerung, Flexibilisierung,  
Sensorenentwicklung, optimierte Einsatz von Rest- und Abfallstoffen**


**Zitat des Projektleiters:**
**Björn Schwarz**

Die flexible Bereitstellung von regenerativem Strom und Wärme stellt eine wichtige Zukunftsaufgabe dar. Neben Wind, Sonne und Energie-Speicherung spielt hier Biomasse eine bedeutende Rolle. Flexibler Strom, Wärme und Kraftstoffe aus der Vergärung von Stroh und Hühnerkot sollten dies-bezüglich stärker eingesetzt werden.

**Björn Schwarz**

# STEP

**Verwertung strohbasierter Energiepellets und Geflügelmist in Biogasanlagen mit wärmeautarker Gärrestveredlung**

Zielsetzung war zum einen der Nachweis der Praxistauglichkeit von strohbasierten Energiepellets in einer großtechnischen BGA und zum anderen die weitere Verbesserung der Energiebilanz bei der gezielten Aufbereitung von Gärresten zu Wertstoffen und Prozesswasser. Weiterhin sollte neben der Erzeugung von Düngeprodukten ein Brennstoff aus Gärresten erzeugt werden, welcher hinsichtlich seiner Verbrennungseigenschaften für eine direkte Nutzung in Heizkesseln geeignet ist.

## ZIELE

## THEMEN SCHWERPUNKTE

- Aufbereitung von Stroh für die Vergärung (200t-Maßstab)
- Pilotvergärung von Strohpellets in Praxisanlage
- Wärmeeffiziente Aufbereitung von Gärresten
- Verbrennung von Faserfraktionen aus Gärrest

## ZUSAMMENFASSUNG

Im Projekt STEP wurde eine Prozesskette für die vollständige und weitgehend rückstandsfreie energetische und stoffliche Verwertung der Einsatzstoffe Stroh und Geflügelmist weiterentwickelt und im praktischen Maßstab technisch sowie wirtschaftlich validiert. Die 4 Themenschwerpunkte lagen im Bereich der Pelletierung von Stroh unter Zugabe von NaOH im praktischen Maßstab, dem großtechnischen Einsatz von Stroh-NaOH-Pellets in einer Biogasanlage, der wärmeautarken Behandlung der anfallenden Gärreste mit dem Ziel der maximalen Wasserabtrennung (Verdampfung) und der Nutzung der Gärreste für die Verbrennung im praktischen Maßstab. Dafür wurden systematische Untersuchungen vom kleintechnischen Maßstab bis zum Demonstrationsmaßstab durchgeführt und im Labor analytisch begleitet und versuchstechnisch unterstützt.

**KOORDINATION**

Fraunhofer Institut für  
Keramische Technologien und  
Systeme, Dresden (IKTS),  
Winterbergstraße 28,  
01277 Dresden  
<https://www.ibp.fraunhofer.de/>

**KONTAKT**

Projektleiter: Björn Schwarz  
Tel.: 0351 2553 7745  
[bjoern.schwarz@ikts.fraunhofer.de](mailto:bjoern.schwarz@ikts.fraunhofer.de)

**PARTNER**

REGEB Energieerzeugung und -  
verteilung Bersenbrück GmbH &  
Co. KG  
Hermann-Kemper-Straße 5  
49593 Bersenbrück

DBFZ Deutsches  
Biomasseforschungszentrum  
gemeinnützige GmbH  
Torgauer Straße 116,  
04347 Leipzig  
[www.dbfz.de](http://www.dbfz.de)

GM Biogas GmbH & Co. KG  
Feldstrasse 5, 06388 Baasdorf  
[www.gm-biogas.de](http://www.gm-biogas.de)  
Rückert NatUrgas GmbH  
Marktplatz 17,  
91207 Lauf/Pegnitz  
[www.rueckert-naturgas.de](http://www.rueckert-naturgas.de)

ATS - Agro Trading & Solutions GmbH  
Zementfabrik 4, 37181 Hardegsen  
[www.agro-trading.de](http://www.agro-trading.de)  
A.P. Bioenergietechnik GmbH  
Träglhof 2, 92242 Hirschau  
[www.oeko-therm.net](http://www.oeko-therm.net)

FKZ-NR.: 03KB116A-G

LAUFZEIT 01.08.2016 –  
30.04.2019

ZUWENDUNGSSUMME:  
1.056.060 €



## HAUPT BOTSCHAFTEN

- Pelletierung von Stroh mit Natronlauge erfolgreich in der Praxis umgesetzt
- Pellets bieten einfaches Handling, einen unkomplizierten Transport und es entsteht kein Staub
- Kinetik der Biogasbildung aus Strohpellets ist vergleichbar mit der aus Mais
- Gärreste lassen sich mit einer mehrstufigen Vakuumverdampfung effizient aufkonzentrieren
- Separierte Gärrestfasern eignen sich prinzipiell als alternativer Brennstoff

## SUMMARY (ENG.)

Straw and poultry manure accumulate in large quantities and are suitable for material- and energy-based processing in biogas plants. This is where the STEP research project comes in – Utilisation of straw-based energy pellets and poultry manure in biogas plants with thermally self-sufficient digestate processing. The participating partners developed and optimised a complete process chain ranging from the straw treatment and combined digestion with poultry manure to the digestate treatment and partial thermal utilisation of the separated residues.

## MAIN MESSAGES

- Pelleting of straw with caustic soda successfully implemented in practice
- Pellets are easy to handle, easy to transport and do not produce dust
- The kinetics of biogas production from straw pellets is comparable to that from maize
- Digestate can be efficiently concentrated with multi-stage vacuum evaporation
- Separated digestate fibres are suitable as an alternative fuel

## METHODIK MASSNAHMEN

### IKTS

Das IKTS analysierte und bewertete alle Input- und Outputströme der Prozessstufen Substratvorbehandlung, Vergärung und Gärrestbehandlung. Bezüglich der Langzeitstabilität beim Einsatz von Kondensaten aus der Eindampfung und beim Einsatz von Strohpellets mit Natronlauge wurden kontinuierliche Versuche im Labor durchgeführt. Weiterhin wirkte das IKTS konzeptionell und experimentell in den Bereichen der Gärrestseparation und der Verbesserung der Verbrennungseigenschaften mit.

### DBFZ

Das DBFZ charakterisierte die anfallenden Gärreste hinsichtlich ihrer brennstofftechnischen Eigenschaften. Daran anknüpfend wurden ergänzende Reinigungsschritte angewendet, um die bei der Verbrennung auftretenden Emissionen zu minimieren. Basis für das Vorgehen waren die Ergebnisse aus dem Projekt CLEANPELLET, welche auf die projektkonkreten Substrate (Input: Stroh und Geflügelmist) übertragen werden sollten.

### Rückert NatUrgas

Zentrale Zielstellungen waren die Minimierung von Energiebedarf und auszubringenden Mengen sowie die Maximierung der Wertschöpfung durch Erzeugung von Wertstoffen bei der Gärrestbehandlung. Dazu wurden umfangreiche Tests zur Vorentwässerung (insbesondere Feinststoffentfernung) vor der Eindampferstufe im praktisch relevanten Maßstab organisiert. Darüber hinaus wurden Tests zur effizienten Trocknung der einzelnen Zwischenprodukte der Gärrestbehandlung durchgeführt und bewertet.

### GM Biogas

Der Projektpartner GM Biogas betreibt eine 2,4 MW Biogasanlage mit drei parallelen Fermenterstraßen. Innerhalb des Projektes wurde in einer dieser Straßen die zugeführte Menge an NaWaRo durch die im Projekt erzeugten strohbasierten Biogaspellets ersetzt. Dieser Vergleichsbetrieb wurde durch GM Biogas organisiert und durchgeführt.

### ATS

Durch ATS wurde ein Demonstrationsversuch zur Herstellung von ca. 200t Biogaspellets konzipiert und die notwendigen organisatorischen und sicherheitstechnischen Maßnahmen realisiert. Weiterhin übernahm ATS zum einen die Herstellung größerer Mengen Pellets aus separierten, getrockneten sowie optional konditionierten Gärresten. Zum anderen befasste sich ATS mit der Möglichkeit, ein Düngepellet oder -granulat aus der Zusammenführung von Verbrennungaschen und den Konzentratströmen der Gärresteindampfung herzustellen.

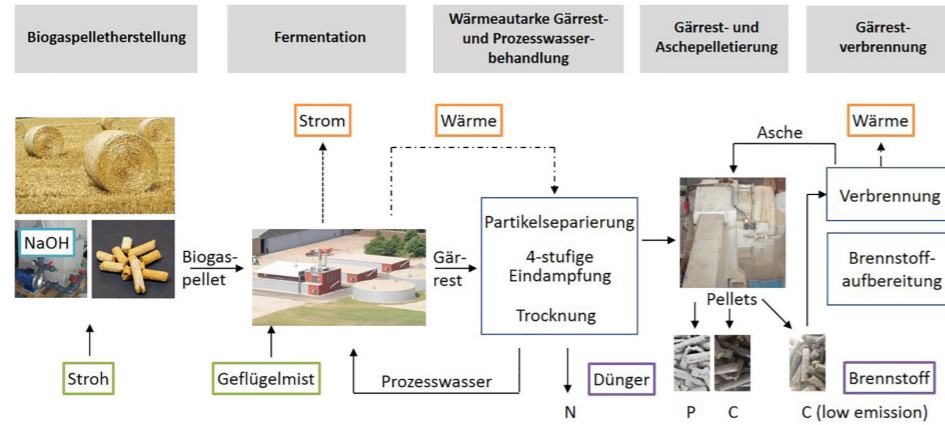
### A.P. Bioenergietechnik

Die A.P. Bioenergietechnik GmbH befasste sich mit der Optimierung und Weiterentwicklung der Verbrennungsstrecke bei der thermischen Verwertung von unbehandelten und behandelten Gärresten aus dem Projekt. Durch Einstellung und Anpassung verschiedener Parameter wurden die Emissionen aus der Verbrennung deutlich gesenkt sowie eine Verschlackung der Heizkessel vermieden. Die Verbrennungsversuche fanden bis in einen Maßstab von 400kW im Technikum der Fa. A.P. Bioenergietechnik GmbH statt.

### REGEB

REGEB war innerhalb des Projektes verantwortlich für die Durchführung von Eindampfversuchen im großtechnischen Maßstab für verschieden vorbehandelte Flüssigphasen von Gärresten. Dafür wurde durch REGEB eine neuartige vierstufige Verdampferanlage zur Verfügung gestellt und betreut. Insbesondere ging es um die Erreichung und den Nachweis der Wärmeautarkie dieser Behandlungstechnik. Zusätzlich sollte die Gesamteffizienz der Anlage innerhalb des Projektes durch die Ergänzung einer Vorentgasung weiter gesteigert werden.

Abbildung 1: Prozessschema für die energetische und stoffliche Verwertung der Einsatzstoffe Stroh und Geflügelmist



**Pelletierung von Stroh**

Innerhalb des Projektes wurde durch den Partner ATS eine komplette Aufbereitungslinie für die NaOH-Pelletierung von Stroh konzipiert, installiert und optimiert. Dabei mussten verschiedene Hindernisse (z.B. schwieriges Förderverhalten von Stroh, Erstarren von 50%iger NaOH bei T<11 °C) technisch überwunden werden. Die geforderten Behandlungszielstellungen aus den Vorversuchen (hoher Vorzerkleinerungsgrad, max. mgl. Feuchtigkeit, kurze Behandlungsdauer) führten zur Kombination von Hammermühle und Ringmatrize.

Die Herstellung von ca. 180t Strohpellets im Projekt konnte erfolgreich realisiert werden. Insbesondere der Zusatz von NaOH führte zu Pellets mit besonders hoher Stabilität, Transportfestigkeit und Schüttdichte. Diese Stabilität führte aber auch zu einer etwas geringeren Auflösegeschwindigkeit in Wasser im Vergleich zu den Pellets des Vorgängerprojektes EFFIGEST. Dennoch reichte die Auflösegeschwindigkeit für einen Einsatz in Nassfermentern aus. Das Biogaspotenzial korrelierte sehr gut mit der Intensität der Behandlung und dem erreichten Grad an freigesetztem CSB. Mit Werten von über 300NL CH<sub>4</sub> pro kg oTR wurden sehr hohe Gasausbeuten erreicht.

**Vergärung**

Im Projekt STEP wurde die Vergärung einer großtechnisch relevanten Menge in einer Praxis-BGA getestet. Dazu wurde eine von 3 parallelen Straßen der BGA Baasdorf (Projektpartner GM-Biogas) mit Strohpellets statt Maissilage beschickt. Dabei ersetzen bis zu 8,4t Strohpellets etwa 17,3t Maissilage pro Tag. Weitere Substrate waren Geflügelmist und Grassilage sowie Prozesswasser. Die wesentlichen Ableitungen, welche aus dem Praxisversuch gewonnen werden konnten, waren:



**ERGEBNISSE Ergebnisse auf einen Blick**

- Publikation**
  - Broschüre
  - Tagungsband
  - Schlussbericht
- Daten & Methoden**
  - Monitoring
  - Messreihe/-programm
- Konzept/ Machbarkeitsstudie**
  - Anlagenkonzept
  - Machbarkeitsstudie
- Markt**
  - Businessplan
  - Dienstleistungen
- Anlage**
  - Demonstrationsanlage
  - Pilot-Anlage
  - Verfahren
  - Nachrüstung
  - Bestandsanlage

**SCHLÜSSELFRAGEN**

Im Projekt STEP sollte eine Prozesskette für die vollständige und weitgehend rückstandsfreie energetische und stoffliche Verwertung der Einsatzstoffe Stroh und Geflügelmist entwickelt und im praktischen Maßstab technisch sowie wirtschaftlich validiert werden. Motiviert wurde dieses Vorhaben insbesondere durch das enorme Mengen- und Energiepotenzial der beiden Stoffströme (bes. Stroh) sowie durch die hohen Anforderungen bei der Vergärung dieser. Schlüsselfragen bestanden bezüglich:

- Der Pelletierung von Stroh unter Zugabe von NaOH im praktischen Maßstab
- Des großtechnischen Einsatzes von Stroh-NaOH-Pellets in einer Biogasanlage
- Der wärmeautarken Behandlung der anfallenden Gärreste mit dem Ziel der maximalen Wasserabtrennung
- Der Nutzung der Gärreste für die Verbrennung im praktischen Maßstab

**ERGEBNIS FAKTEN**

Zur Beantwortung dieser Fragestellungen wurden systematische Untersuchungen vom kleintechnischen Maßstab bis zum Demonstrationsmaßstab durchgeführt und im Labor analytisch begleitet und versuchstechnisch unterstützt. Im Konsortium des Verbundprojektes arbeiteten fünf Praxispartner und zwei Forschungseinrichtungen zusammen. Im Folgenden werden die Erkenntnisse der einzelnen Themenschwerpunkte zusammengefasst.

**FAZIT GROSSTECHNISCHE VERGÄRUNG**

- Sehr gute Gasbildung aus Strohpellets (Geschwindigkeit und Menge vergleichbar mit Mais und Referenzreaktoren)
- Einfaches Handling (leichter Transport, kein Staub)
- ABER: eine höhere Aufmerksamkeit bei der Dosierung und Durchmischung ist geboten, um Ansammlungen von größeren undurchmischbaren »Strohpelletthaufen« im Fermenter zu vermeiden

Letzteres war eine Erfahrung aus einer aufgetretenen Störung, bei welcher schlecht eingemischte und schlecht verdünnte Pellets zur Beschädigung des Rührwerkes führten.



Neben dem großtechnischen Test, welcher aus Kapazitätsgründen zeitlich begrenzt war, wurden planmäßig im Labor des Partners IKTS Langzeitversuche zur Vergärung von Strohpellets durchgeführt, um den Einfluss von NaOH und von verschiedenen Prozesswässern auf die Vergärung zu bewerten. Dafür wurden 10 L Vergleichsreaktoren über insgesamt 420 Tage kontinuierlich mit Geflügelmist und Strohpellets (oTR-Anteile: 1:1) beschickt. Die oTR-spezifische Gasausbeute lag stabil bei 500 bis 600 NL/kg oTR. Durch die NaOH-Behandlung konnte die Gasausbeute aus Stroh um bis zu 25 % zusätzlich gesteigert werden. Die Halbierung des  $\text{NH}_4$ -Gehaltes im Reaktor durch die Verwendung von Stroh + Wasser statt

Mais + Gras + Wasser konnte durch die Verwendung von NaOH und der damit verbundenen Abbausteigerung nochmals um 20 % gesenkt werden. Die gestiegene Leitfähigkeit (+45 %) im Reaktor durch NaOH führte zu keiner Hemmung der Vergärung.

Prozesswasser aus einer HTC-Stufe konnte zwar als Co-Substrat eingesetzt werden, aber die darin enthaltenen Begleitstoffe hemmten die Methanogenen, so dass eine geringere  $\text{CH}_4$ -Ausbeute die Folge war. Prozesswasser (Kondensate) aus der Stufe der Verdampfung konnten ohne Einschränkung als Kreislaufwasser verwendet werden. Die Kreislaufführung von abgepressten Flüssigphasen der Gärreste führte zu einer Überschreitung von Grenzwerten bei Natrium und Kalium und in der Folge auch zu Hemmungen im Abbau.



### Gärrestbehandlung/Verdampfung

Wie aus den Langzeitversuchen zur Vergärung abgeleitet, kommt für eine Kreislaufführung von Flüssigkeiten nur weitgehend aufbereitetes Wasser in Frage. Zusätzlich war es Projektziel, die Gärrestaufkonzentrierung zu maximieren, um Nährstoffüberschüsse möglichst effizient transportieren zu können. Die mehrstufige Verdampfung am Standort Bersenbrück (Partner REGEB) sollte dafür untersucht und verbessert werden. Dazu wurden verschiedene Vorbehandlungsmethoden und Aggregate vom Labor- bis zum Praxismaßstab getestet und deren potenzieller Einfluss auf die Verdampfungseffektivität bewertet. Als **wichtige Optimierungsgröße wurde die Viskosität** der separierten Gärreste im Zulauf zur Verdampfung erkannt. Im Vergleich zu einer Flüssigphase nach Schneckenpresse konnte Zentrifugat nach Dekanter etwa doppelt so weit aufkonzentriert werden. Dieser enorme Effektivitätssprung wurde durch die Entfernung von feinen Partikeln und der damit deutlich gesenkten Viskosität erreicht. Die technisch und kostenseitig aufwendige Zentrifugation von Gärresten stellte damit den Vergleichsmaßstab dar. Allerdings

konnten nahezu alle im Projekt getesteten Alternativverfahren (Feinflotation, Flockungsfiltration, Ultraschallbehandlung, Hydrothermale Carbonisierung) keine ähnliche Gesamteffektivität erreichen, wie ein Dekanter. Einzige Ausnahme stellt das Filtrationsverfahren VakuSep der Fa. BeTeBe GmbH dar, welches in weiteren Untersuchungen näher bewertet werden sollte.

Die praxisnahe Beprobung und Bilanzierung des **mehrstufigen Verdampfungsverfahrens** der Fa. Arnold konnte eine **überdurchschnittliche Effizienz** nachweisen. Mit einem Wärmebedarf von ca. 0,27 kWh pro kg Wasserverdampfung und Feststoffgehalt im Konzentrat von bis zu 30 % handelt es sich um eine sehr ausgereifte Technologie.



### Trocknung

Das Endprodukt der Verdampfungsstufe ist von der Konsistenz mit einem zähflüssigen Schlamm zu vergleichen, welcher weder flüssig noch fest direkt ausgebracht werden kann. Eine weitere Trocknung dieses Materials wäre daher von großem Vorteil. Für diesen Anwendungsfall sollte innerhalb des Projektes ein geeignetes Trocknungsverfahren gefunden und bewertet werden. Eine besondere Herausforderung war dabei die wärmetechnische Kopplung mit dem Verdampfer mit dem Ziel der maximalen Energieeffizienz. Der Projektpartner Rückert hat für diesen Bereich umfangreiche Recherchen und Tests organisiert. Darüber hinaus wurde gemeinsam mit der Fa. VER GmbH aus Dresden ein Bilanztool entwickelt, welches die Wärmebilanz von gekoppelter Trocknung und Verdampfung in sehr detaillierter Weise abbildet.

**Ergebnis der Untersuchungen sind zwei potenziell geeignete Trocknungsverfahren, welche mit Hochtemperaturwärme betrieben und deren Brüden für die Wärmerückgewinnung kondensiert werden.** Die dabei zurückgewonnene Wärme wird dann dem Verdampfer zur Verfügung gestellt. Die Firmen SWISS COMBI aus der Schweiz und VER GmbH aus Dresden bieten derartige Technologien an. Der Gesamtwirkungsgrad (inkl. Verdampfung) beträgt etwa  $0,42 \text{ kWh}_{\text{th}}/\text{kg H}_2\text{O}$ . Die erhaltenen Produkte sind ein streufähiger Mehrnährstoffdünger sowie ein weitgehend gereinigtes Kondensat.

### Pelletierung von Gärrest



**1** Zum einen wurde Asche aus der Gärrestverbrennung mit Konzentrat aus der Verdampfung im Labor des Partners DBFZ gemeinsam pelletiert, um das Handling beider Fraktionen zu verbessern. Allerdings besaßen die erhaltenen Produkte eine sehr geringe Festigkeit und Transportstabilität. Außerdem ging aufgrund der pH-Wertverschiebung durch die basische Asche viel Stickstoff in Form von Ammoniak während der Mischung verloren. Eine bessere Alternative zu Herstellung dieser Phosphor und Kalium angereicherten Dünger wäre die Granulierung.

**2** Zum anderen wurden im Projekt auch Versuche zur Pelletierung von separierten und getrockneten Gärrestfeststoffen sowohl beim DBFZ als auch bei ATS durchgeführt. Aufgrund des sehr hohen Gehaltes an mineralischen Komponenten im projektspezifischen Gärrest war dabei der hohe Verschleiß an den Kollern ein Problem. Für die Verhinderung von Verblockungen in der Matrice wurde ein optimaler Wassergehalt gefunden und Veränderung an der Matrizengeometrie vorgeschlagen. Perspektivisch wäre ein Pellet mit Qualitätskriterien nach ISO 17225-6, Klasse B zu erreichen, aber wahrscheinlich nicht wirtschaftlich.

Abbildung 2:  
Verdampferanlage  
(Quelle: Rückert  
NatUrgas GmbH)



Abbildung 2:  
Pelletiermaschine  
von ATS, am  
Standort Hardegsen



### Brennstoffoptimierung (Weiterführung Pelletierung von Gärrest)

Ziel der Brennstoffoptimierung beim Partner IKTS war die Verminderung von Störstoffen im Gärrest. Mit Ausnahme des Parameters Schwefel können durch mehrmaliges Waschen mit viel Waschwasser alle relevanten Grenzwerte eingehalten werden. Jedoch ist der Frischwassereinsatz zu hoch. Eine reine Abpressung ist für viele Parameter bereits effektiv. Die Ausnahme bilden jedoch vor allem die Parameter Asche und Chlor. Nickel- und Chromeintrag kann durch das Herauslösen aus Entwässerungsgeräten und Behältern (CrNi-Stahl) verursacht werden und sollte durch alternative Materialien vermieden werden:

Im Projekt wurde auf den Aschegehalt fokussiert, da dieser aufgrund des HTK-Anteils sehr hoch war. Folgende Erkenntnisse konnten gewonnen werden:

- Je mehr Wasser bzw. je geringer der TR-Gehalt beim Waschen, desto besser die Aschereduktion (freies Absetzen)
  - Dabei wichtig: Bodensatz nicht mit entwässern, um abgesetzte Sandpartikel bzw. Kalkpartikel zurückzuhalten
- Erst bei Wassergehalten von mehr als 92% kann mit einem verstärkten freien Absetzen der mineralischen Fracht gerechnet werden
- Mit hoch energetischem Ultraschall kann das freie Absetzen der mineralischen Störstoffe verbessert werden
  - Wirtschaftlichkeit fraglich
  - Systematische Untersuchung sind in einem separatem Projekt nötig.

### Verbrennung

Im Projekt wurden mehrere Verbrennungsversuche mit projektspezifischen Gärresten durchgeführt. Im Technikum des DBFZ wurde ein 49kW Kessel mit pelletierten Gärresten befeuert. Die Staubemissionen waren aufgrund der Pelletierung beherrschbar. Aufgrund des hohen Aschegehaltes der Brennstoffe fand verstärkt eine Verschlackung im Brennraum statt. Hohe CO-Gehalte im Abgas zeigten einen schlechten Ausbrand an wodurch die Temperatur im Kessel leicht sank und vermehrt Gehalte an SO<sub>2</sub> und NO<sub>x</sub> gemessen wurden.

Beim Partner A.P. Bioenergietechnik wurde neben systematischen Vorversuchen auch ein 3 tägiger Praxiseinsatz von Iosem Material (Gärrest + Sägespäne 1:1) in eine 400kW Kessel durchgeführt. Speziell für den hohen Aschanteil im Produkt wurden sowohl neue Ascheschieber mit Luftlöchern als auch spezielle Einbauten im Brennraum getestet.

### Wirtschaftlichkeit

Abgeleitet aus den Prozessparametern der einzelnen Verfahrensstufen wurde eine Kostenabschätzung durchgeführt. Grundlage dafür war eine Biogasanlage mit einer elektrischen Leistung von 800kW und eine ausschließlichen Beschickung von Stroh und HTK (je 50% oTR-Anteil). Die Stromgestehungskosten setzen sich wie folgt zusammen:

- 7,7 bis 9,5 ct/kWh (Substrate, je nach Strohkosten (<55 EUR/t))
- 6,8 ct/kWh (Fermentation)
- 5,4 ct/kWh (Gärrestbehandlung mit Separation + Verdampfung)

Insgesamt liegen damit die Gesteungskosten für Biogasstrom aus Stroh und Geflügelmist bei **14,5 ct/kWh<sub>el</sub>** (günstigste Substratbereitstellung, ohne Gärrestbehandlung) bis **21,7 ct/kWh<sub>el</sub>**



Insgesamt konnte damit im Rahmen des Projekts gezeigt werden, dass aus den Ausgangsstoffen Stroh und Hühnermist durch Vergärung und weitere Aufbereitungsschritte ein Brennstoff hergestellt werden kann, der sich technisch und mit gutem Ausbrand thermisch verwerten lässt.

Die Emissionen von Kohlenmonoxid und Stickoxid lagen in einem Bereich, der mit Regelbrennstoffen vergleichbar ist. Weitere Emissionen wie Staub, Schwefeldioxid und Chlorwasserstoff können durch sekundäre Abgasbehandlung reduziert werden.



(inkl. Gärrestbehandlung). Sie liegen damit deutlich höher als andere regenerative Energiequellen und zum Teil auch etwas höher als bei der Nutzung von Maissilage. Im Vergleich zu den Endverbraucherpreisen für elektrischen Strom liegen diese Kosten aber immer noch im Limit.

Ein wichtiger Vorteil dieser Technologie ist die verlässliche dezentrale Stromerzeugung auf Basis von nachhaltigen Reststoffen ohne Flächenkonkurrenz und ohne Auswirkungen auf das Landschaftsbild. Über Gaseinspeisung können außerdem große Energiespeicher regenerativ befüllt werden, was insbesondere für die Zielstellungen von 100% erneuerbar von großer Bedeutung wäre.

Die Gärrestverbrennung als Add-on bringt zwar mehr Energieausbeute vor allem für den Wärmesektor, aber keinen zusätzlichen monetären Gewinn für das Gesamtverfahren.



Eine Verbesserung der Gesamtwirtschaftlichkeit kann erreicht werden, wenn es gelingt, statt der ausschließlichen Verwendung von Stroh andere alternative Reststoffe (z.B. Spelzen und Getreideausputz) zu integrieren, welche keine oder nur sehr geringe Kosten verursachen. Weiterhin sollte es angestrebt werden, die Kosten durch eine Zwischennutzung der Strohpellets als Einstreu in der Tierhaltung zu senken. Diese Ansätze werden in einem Folgeprojekt (KoSaTZ, 03EI5403) näher untersucht.



#### Weiteres Optimierungspotenzial:

- Preiswerterer Substratmix (z. B. Stroh + Reste aus Getreideverarbeitung) (BMW-Projekt »KoSaTZ«)
    - Alternative Strohvorbehandlung
    - Spezielle Anmischverfahren (z. B. Turbo-Maische)
    - $\text{NH}_3$ -Aufschluss statt NaOH (FNR-Projekt » $\text{NH}_3$ -Feed«)
    - Brikettierung statt Pelletierung (BMW-Projekt »KoSaTZ«)
  - Zwischennutzung von Strohpellets als Einstreu (BMW-Projekt »KoSaTZ«)
  - Einmischbedingungen im Fermenter »absichern« (BMW-Projekt »KoSaTZ«)
- 
- Links zum Endbericht
    - Energetische Biomassenutzung: [www.energetische-biomassenutzung.de/projekte-partner/details/project/show/Project/STEP-482](http://www.energetische-biomassenutzung.de/projekte-partner/details/project/show/Project/STEP-482)
    - [www.strom-forschung.de/projekt/biogasanlage-nutzt-stroh-und-huehnermist/](http://www.strom-forschung.de/projekt/biogasanlage-nutzt-stroh-und-huehnermist/)

## AUSBLICK

## WEITERE INFORMATIONEN





#### Zitat des Projektleiters:

**Stefan Bierhals**

*Kläranlagen sind die Biofabriken der Zukunft. In der Zukunft könnten Kläranlagen ein Dreh- und Angelpunkt der Bioökonomie sein.*

Pilot- und Demonstrationsvorhaben  
»Hybridkläranlage«

# HYBRID KLÄRANLAGEN

## ZIELE

Im Projektvorhaben Hybridkläranlage stand die Energieautarkie für kommunale Kläranlagen im Fokus. Grundgedanke war die Co-Fermentation biogener Reststoffe an Kläranlagen, sowie mögliche Realisierungsansätze.

## THEMEN SCHWERPUNKTE

- Co-Fermentation
- Biogas
- Kläranlagen
- Bioökonomie
- Co-Vergärung an Kläranlagen
- Mehrstufige, mehrphasige Reststoffvergärung

FKZ-NR.: 03KB110A, 03KB110C  
LAUFZEIT 01.08.2016–31.07.2019  
ZUWENDUNGSSUMME:  
236.930,44 € (03KB110A)  
73.116,00 € (03KB110C)

### KOORDINATION

Bio H2 Umwelt GmbH  
Am Wiedich 15  
98593 Floh-Seligenthal  
<https://www.bio-h2.de>

### PARTNER

Bierhals Wasser Consult  
Franz-Petrich-Straße 28  
07545 Gera  
<http://bwc-gera.de>

## ZUSAMMEN FASSUNG

Im Fokus des Projektvorhabens Hybridkläranlage stand der Grundgedanke der Co-Fermentation biogener Reststoffe an Kläranlagen (im Projekt am Beispiel der Kläranlage Pöbneck), sowie mögliche Realisierungsansätze. Es zeigte sich, dass eine Umrüstung, allein der Energieautarkie wegen, nicht wirtschaftlich lukrativ wäre. Eine durchgeführte Energieeffizienzanalyse zeigte, dass durch technische Optimierung und Anschaffung aktueller technischer Produkte für Kläranlagen ein Großteil der benötigten Energie bereits bereitgestellt werden könnte. Im Fall der Kläranlage Pöbneck würde nach einer energetischen Optimierung und geplanten Anschaffung eines Faulturms nur 130.656 kWh/a an Zusatzenergie zur Energieautarkie benötigt. Diese zusätzliche Menge an Energie über Co-Fermentation bereitzustellen, würde für sich allein noch nicht die Umstellung auf eine anaerobe Schlammstabilisierung rechtfertigen und wäre

Stefan Bierhals, Olaf Luschig

durch zusätzliche Fermenter- und Substratbehandlungstechnologien sehr kostenintensiv. Insbesondere ein Faulturm ist hier ein kostentreibender Faktor. Die angesprochene Umrüstung (anaerobe Schlammstabilisierung inklusive Vergärung von biogenen Reststoffen) wäre für die Kläranlage erst dann relevant, wenn größere Mengen an Reststoffen umgesetzt würden, welche im Falle der Stadt Pöbneck auch vorhanden wären. In unmittelbarer Nähe der Kläranlage finden sich ausreichende Mengen an Grünschnitt, Reststoffe aus der Landwirtschaft, Fleischabfälle, Biertreber, zuckerhaltige Abwässer (Melasse) und Glycerin.

**Es besteht also das Potential, die Kläranlage Pöbneck nicht nur energieautark, sondern zu einem Energieproduzenten zu wandeln.**



- Allein durch eine technische Optimierung können Kläranlagen energieautark werden (Beispiel der Kläranlage Pöbneck).
- Allein zum Erreichen der Energieautarkie ist ein Hybrid aus Kläranlage und Biogasanlage nicht notwendig.
- Die Kombination aus Kläranlage und Biogasanlage wäre dann sinnvoll, wenn massiv kommunale Reststoffe verwertet würden.
- Eine umfangreiche Reststoffverwertung an Kläranlagen ist nur durch eine umfangreiche kommunale Zusammenarbeit möglich.
- Die Verwertung kommunaler Reststoffe ist in vielen Kläranlagen nicht Bestandteil der Vereinssatzung, wird darin aber in vielen Fällen nicht untersagt. Hier ist die Eigeninitiative der Abwasserverbunde gefragt.

## HAUPT BOTSCHAFTEN

## SUMMARY (ENGL.)

The project Hybrid Sewage Treatment Plant focused on the basic idea of co-fermentation of biogenic residues at sewage treatment plants (using the example of the sewage treatment plant in the city of Pöbneck), as well as possible implementation approaches. It turned out that retrofitting, simply because of the energy self-sufficiency, would not be economically lucrative. An energy efficiency analysis carried out showed that technical optimization and the purchase of current technical products for sewage treatment plants could already provide a large part of the energy required. In the case of the Pöbneck sewage treatment plant, after energy optimization and the planned purchase of a digestion tower, only 130,656 kWh/a of additional energy would be required for energy self-sufficiency. Providing this additional amount of energy via co-fermentation would not in itself justify the switch to anaerobic sludge stabilization and would be very costly due to additional fermenter and substrate treatment technologies. A digesting tower in particular is a cost-driving factor here. The mentioned conversion (anaerobic sludge stabilization including fermentation of biogenic residues) would only be relevant for the sewage treatment plant if larger quantities of residues were converted, which would also be available in the case of the city of Pöbneck. In the immediate vicinity of the sewage treatment plant there are sufficient amounts of green waste, agricultural residues, meat waste, brewer's grains, sugar-containing wastewater (molasses) and glycerine. So, there is the potential to not only make the water treatment plant of Pöbneck self-sufficient, but to transform it into an energy producer.

## MAIN MESSAGES

- Sewage treatment plants can become energy self-sufficient through technical optimization alone (example of the Pöbneck sewage treatment plant).
- A hybrid of sewage treatment plant and biogas plant is not necessary to achieve energy self-sufficiency.
- The combination of sewage treatment plant and biogas plant would make sense if massive municipal residues were recycled.
- Comprehensive waste recycling at sewage treatment plants is only feasible through extensive communal cooperation.
- The recycling of municipal residues is not part of the association's statutes in many sewage treatment plants, but in many cases it is not prohibited. This is where the wastewater associations' initiative is required.

- Mehrstufige- & mehrphasige Fermentationsprozesse
- Anaerobe Gärung (Laborfermenter)
- VDI 4630 (Methodik zur Bestimmung von Gasbildungspotential)
- 16S-rRNA Sequenzierung zur Bewertung von Gärprozessen

## METHODIK MAßNAHMEN

### Ergebnisse auf einen Blick

## ERGEBNISSE

### Publikation

- ISI-Publikation (SCI Science Citation Index etc.): siehe Ergebnis B
- Artikel in Fachzeitschrift (z. B. Euwid)

### Konzept/

#### Machbarkeitsstudie

- Anlagenkonzept
- Informationskonzept
- Machbarkeitsstudie

### Anlage

- Demonstrationsanlage
- Laboranlage
- Anlagenteile / Systemkomponenten
- Verfahren

### Daten & Methoden

- Szenarien
- Methode (z. B. analytisch, prozessbeschreibend)
- Monitoring

### Markt

- Marktprognosen

### Weitere wichtige Ergebnistypen bzw. Konkretisierung

- Strategie
- Evaluation

**Ergebnis A**

Es wurde ein Demonstrator gebaut, welcher die Möglichkeit zur Kombination von Biogas- und Kläranlagen aufzeigt. Es erfolgten mehrere laborgestützte Begleitversuche (Umfangreiche Sammlung prozesschemischer Parameter). Diese wurden in internationalen Fachzeitschriften publiziert.

**Ergebnis B**

Um Kläranlagen mit Biogasanlagen zu integrieren und Reststoffe zu verwerten ist auch eine gesellschaftliche Weiterentwicklung notwendig, insbesondere im Bereich der kommunalen Zusammenarbeit. Dies wurde studienartig im Abschlussbericht dargestellt.

■ **Wissenschaftliche Publikationen:**

- ABENDROTH, C.; SIMEONOV, C.; PERETÓ, J.; ANTÚNEZ, O.; GAVIDIA, R.; LUSCHNIG, O.; PORCAR, M. (2017): From grass to gas: microbiome dynamics of grass biomass acidification under mesophilic and thermophilic temperatures. In: *Biotechnology for Biofuels*. 10, 171. [10.1186/s13068-017-0859-0](https://doi.org/10.1186/s13068-017-0859-0)
- HARDEGEN, J.; LATORRE-PÉREZ, A.; VILANOVA, C.; GÜNTHER, T.; PORCAR, M.; LUSCHNIG, O.; SIMEONOV, C.; ABENDROTH, C. (2018): Methanogenic community shifts during the transition from sewage mono-digestion to co-digestion of grass biomass. In: *Bioresource Technology*. 6, 265. 275–281. [10.1016/j.biortech.2018.06.005](https://doi.org/10.1016/j.biortech.2018.06.005)
- ABENDROTH, C.; HAHNKE, S.; SIMEONOV, C.; KLOCKE, M.; CASANIMIRAVALLS, M.; RAMM, P.; BÜRGER, C.; LUSCHNIG, O.; PORCAR, M. (2017): Microbial communities involved in biogas production exhibit high resilience to heat shocks. In: *Bioresource Technology*. 249, 1074–1079. [10.1016/j.biortech.2017.10.093](https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.10.093)

**HERAUSFORDERUNGEN  
HEMNMISSE**

Die Herausforderung, Biogas- und Kläranlagen Hybride zur Reststoffverwertung an Kläranlagen umzusetzen, besteht insbesondere in der kommunalen Zusammenarbeit zwischen Industrie (Reststoffproduzenten), Wertstoffhöfen und Abwasserverbänden.

Eine zu überwindende Problemstellung ist in diesem Zusammenhang eine unzureichende Vernetzung der benannten Institutionen.

Es wurden mehrere Fachpublikationen in internationalen Journalen vorgestellt, auf welchen nun wissenschaftlich aufgebaut werden kann. Eine Optimierungsmöglichkeit besteht in der methanogenen Vergärung des Abwassereinflaßes an Kläranlagen, um die Kohlenstofffracht effizienter zu nutzen. Hier besteht noch erheblicher Handlungsbedarf.

**AUSBLICK**

Es besteht auch eine industrielle Anschlussfähigkeit. Die Firma Bierhals Wasser Consult (BWC) hat neue Erkenntnisse im Hinblick auf die energetische Optimierung von Kläranlagen gewonnen, welche nun in Form einer Dienstleistung vertrieben werden können. Die Firma Bio H2 Umwelt GmbH hat durch den umgesetzten Demonstrator technische Know-how erarbeitet, welches nun für kundenspezifische Lösungen zur Verfügung steht.





#### Zitat des Projektleiters:

**Eric Mauky**

*Flexible Gasproduktion ist auch bei stoffbelasteten Substraten mit hoher Dynamik möglich. Modellbasierte Optimierung erlaubt Identifikation optimaler Beschickungs- und Betriebsregime für die Praxis.*

FKZ-NR.: 03KB115  
LAUFZEIT 01.09.2016 - 31.09.2019  
ZUWENDUNGSSUMME: 546.151€

#### KOORDINATION

DBFZ - Deutsches  
Biomasseforschungszentrum gGmbH  
Torgauer Straße 116  
04347 Leipzig  
www.dbfz.de

#### PARTNER

ICR - International  
Consulting Bureaux  
Wilhelm-Külz-Str. 18,  
99423 Weimar  
www.icrjena.de

S+B Service und Betrieb GmbH  
Lauterbacher Straße 32,  
08459 Neukirchen/Pleiße  
http://www.service-betrieb.de

#### KONTAKT

Projektleiter  
Dr.-Ing. Eric Mauky  
Tel.: +49-(0) 341 2434-745  
E-Mail: eric.mauky@dbfz.de

## SUMMARY

The aim of the project OptiMand was the use of milling by-products and grain batches that are no longer suitable for food production for the demand-oriented biogas production.

For this purpose:

- 1** the optimization of the high-load fermentation of this substrates was investigated,
- 2** an application-oriented process control was developed and
- 3** two novel approaches for monitoring the biogas process were further developed. These are a microbial electrochemical sensor for measuring acetate and other volatile fatty acids in the fermentation liquid and a semiconductor sensor for measuring volatile fatty acids in the gas phase.

# OptiMand

**Eric Mauky, Jörg Kretzschmar,  
Jürgen Pröter, Hartmann Hieber,  
Matthias Fritsch, Bernhard Stollberg**

**Optimierter Einsatz von Mühlennachprodukten zur bedarfsgerechten Bioenergieproduktion durch innovative Überwachungs-, Mess- und Regelungsmethoden**

## ZUSAMMENFASSUNG

Das Verbundvorhaben OptiMand hatte zum Ziel, den Einsatz von Mühlennachprodukten und Getreidechargen, die für die Nahrungsmittelerzeugung nicht mehr geeignet sind, in der Biogasproduktion zur bedarfsgerechten Erzeugung von Biogas bzw. Strom und Wärme einzusetzen.

Dafür wurde:

- 1** die Optimierung der Hochlastvergärung der genannten Substrate untersucht und
- 2** eine flexible anwendungsorientierte Prozessregelung entwickelt.

Zur Flexibilisierung des Biogasprozesses für eine bedarfsgerechte Biogaserzeugung wurde im Vorhaben der Ansatz des aktiven Fütterungsmanagements bzw. der modellprädiktiven Prozessregelung eingesetzt. Bei der Flexibilisierung der Biogasproduk-

tion über das Fütterungsmanagement wird die Biogasproduktion durch unterschiedliche Substratmengen sowie angepasste Fütterungszeitpunkte beeinflusst. Ein derartiger Eingriff in den Prozess der Biogasproduktion bedarf nicht zuletzt zur Vermeidung von Prozessinstabilitäten einer zeitlich hochaufgelösten Messung relevanter Indikatoren bzw. Prozessparameter. Da dafür in der Praxis keine kostengünstigen Sensoren bzw. Messmethoden existieren, wurden im Projekt zwei neuartige Ansätze zur Überwachung des Biogasprozesses weiterentwickelt. Dabei handelt es sich um einen mikrobiellen elektrochemischen Sensor zur Messung von Acetat und anderen flüchtigen Fettsäuren in der Fermentationsflüssigkeit und einen Halbleitersensor zur Messung von flüchtigen Fettsäuren in der Gasphase.

## HAUPT BOTSCHAFTEN MAIN MESSAGES

- Bei der Vergärung von stoffbelasteten Getreidereststoffen konnten u.a. das **Flexibilisierungspotenzial, Störungssituationen** und **Hemmungen** untersucht werden.
- Im Vorhaben wurde das Konzept eines **mikrobiellen elektrochemischen Sensors** zur Überwachung der Acetatkonzentration im Biogasprozess und anderen biotechnologischen Prozessen weiterentwickelt.
- Es konnte ein **Prototyp des Halbleitersensors** zur Messung von flüchtigen Fettsäuren in der Gasphase an einer Praxisanlage installiert und getestet werden.
- Flexibility potentials, disturbance situations and inhibitions in the fermentation of grain residues was investigated.
- In the project, the concept of a microbial electrochemical sensor for monitoring the acetate concentration in the biogas process and other biotechnological processes was further developed.
- A prototype of the semiconductor sensor for measuring volatile fatty acids in the gas phase was installed and tested at an industrial biogas plant.

- Fermentationsuntersuchungen vom Labor- bis in den Praxismaßstab
- Prozessmodellierung und -optimierung auf Basis des ADMI (Anaerobic digestion model No. 1)
- Evaluierung verschiedener Beschickungs- und Betriebsregime für Praxisanlagen unter Zuhilfenahme von Prozessmodellen
- Nutzung des Konzepts der Modellprädiktive Regelung (Abbildung 1)
- Erhöhung der Stabilität, und des Messbereichs der mikrobiellen elektrochemischen Sensoren
- Entwicklung einer Methode zur in situ Überwachung der Integrität / Funktionalität des Biosensors

## METHODIK MAßNAHMEN

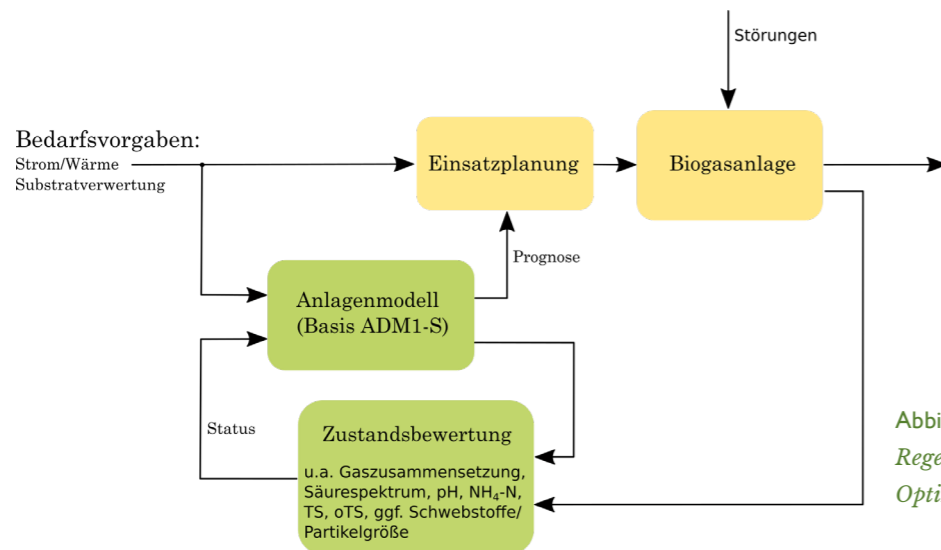


Abbildung 1: Modellgestützte Regelungsstruktur im Projekt OptiMand (Quelle: DBFZ)

## ERGEBNISSE

Ausgewählte Ergebnisse im Bereich der Modellierung und Prozessführung

- **Erweiterung der ADMI-Modellstruktur** hinsichtlich der Stickstoff- und Schwefelumwandlungsprozesse bzw. der dadurch möglichen Prozessinhibition
- **Modellbasierte Optimierung** erlaubt Identifikation optimaler Beschickungs- und Betriebsregime bei Nutzung der untersuchten Reststoffe.
- **Flexible Fütterung** von Mühlennachprodukten bis Raumbelastungen von  $5,2 \text{ g}_{\text{OTS}} \text{ m}^{-3} \text{ d}^{-1}$  bei stabilem Prozess und mit hoher Dynamik möglich (Labormaßstab).

- Durch die flexible Fütterung konnten theoretische **Gasspeichereinsparungen von bis zu 40%** gegenüber einer konstanten Beschickung erreicht werden (Abb. 3). Allerdings sinkt das Flexibilisierungspotenzial mit steigender Raumbelastung und steigendem Anteil an Getreidespelzen
- **Mikrobielle elektrochemische Sensoren** sind für den Einsatz im Biogasprozess geeignet, bedürfen aber spezieller Strategien zum Schutz und der Überwachung des mikrobiellen Rezeptors.

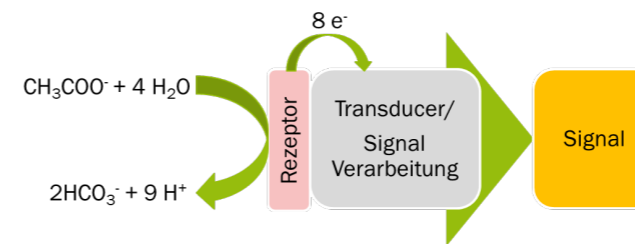


Abbildung 2: Konzept des mikrobiellen elektrochemischen Sensors; (Quelle: J. Kretzschmar, DBFZ)

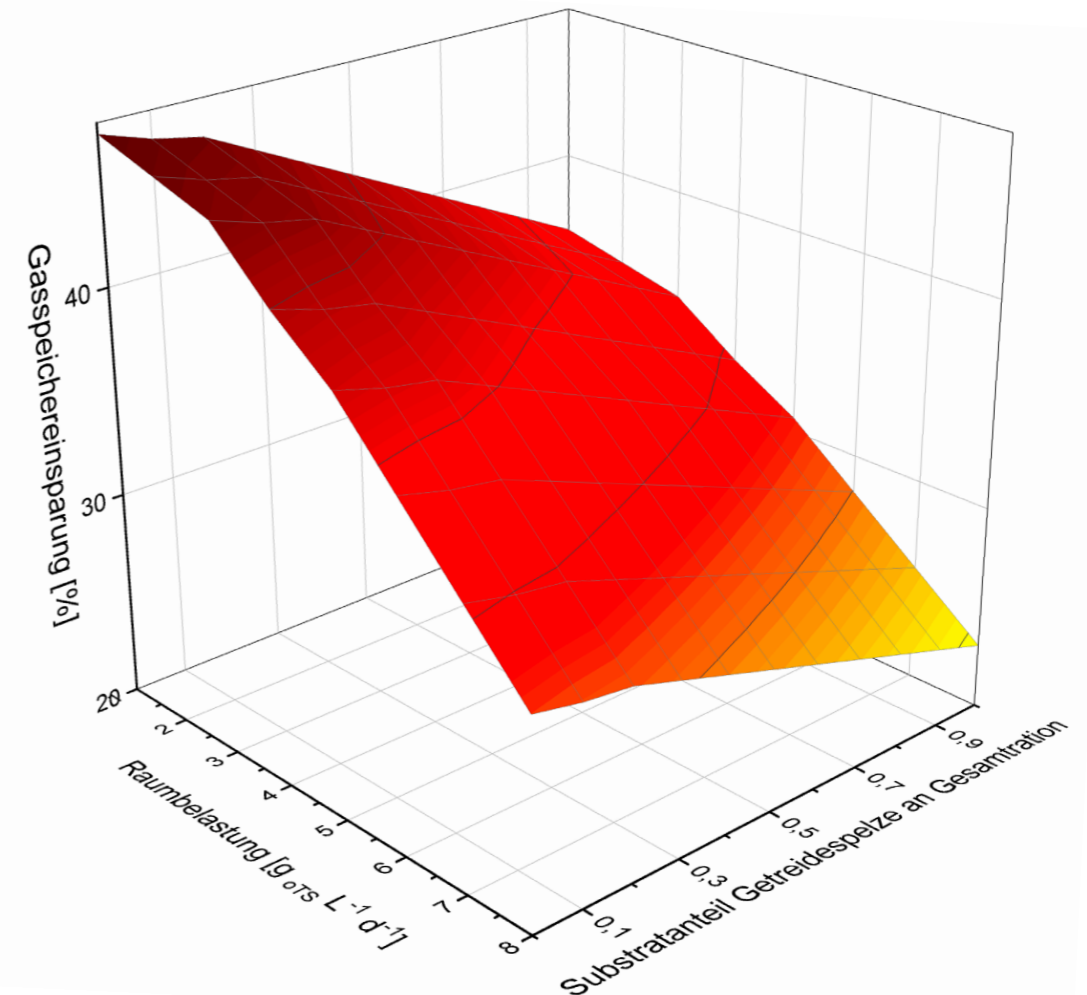


Abbildung 3: Zusammenhang zwischen Gasspeichereinsparpotenzial und Raumbelastung sowie dem Substratanteil an Getreidespelzen (Saisonfahrplan »Frühling«) (Quelle: DBFZ)



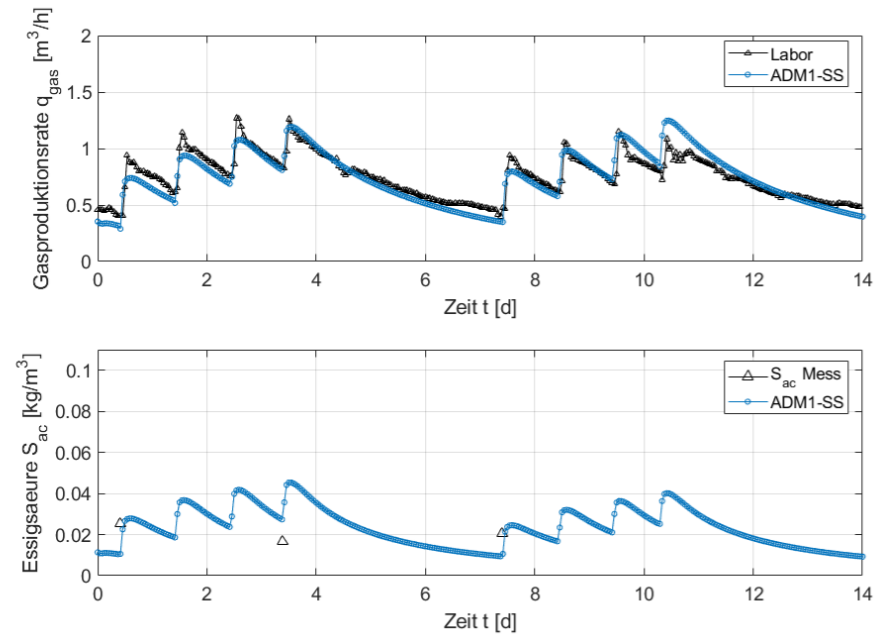


Abbildung 4: Beispielhafter Verlauf der simulierten und gemessenen Gasproduktionsrate und der Essigsäurekonzentration (Quelle: DBFZ)

Insbesondere die Entwicklung und Etablierung von geeigneten Schnittstellen zum Datenaustausch von und zur Praxisanlage stellte uns vor große Herausforderungen.

## HERAUSFORDERUNGEN

### AUSBLICK

Die Erkenntnisse des Projektes OptiMand haben zur Entwicklung neuer Projektideen beigetragen, z. B. Projekt RestFlex – Untersuchung der Eignung landwirtschaftlicher Reststoffe zur Flexibilisierung des Biogasprozesses mittels modellgestützter Methoden und Verschneidung der Ergebnisse mit vorhandenen Mengenpotenzialen (FNR, FKZ 22041818). Ebenso sind Erfahrungen zum Substratmanagement aus der Getreidereststoffnutzung in die Durchführung aktu-

eller Versuche im Rahmen des Projektes GAZELLE – Ganzheitliche Regelung von Biogasanlagen zur Flexibilisierung und energetischen Optimierung (SAB, FZK 100267056) integriert worden. Weiterhin sind Erkenntnisse aus der Sensorentwicklung der mikrobiellen Sensorplattform und des Halbleitersensors innerhalb neuer Projektanbahnungen aufgegriffen worden. Die Entwicklung des mikrobiellen elektrochemischen Sensors führte zur Anbahnung längerfristiger Kooperationen zwischen dem DBFZ, der Universität Pannonien (University of Pannonia, Veszprém, Ungarn) und der Universität Wageningen (Wageningen University and Research – WUR, Wageningen, Niederlande).

### WEITERE INFORMATIONEN

■ Projektsteckbrief und Endbericht: <https://www.energetische-biomassenutzung.de/projekte-partner/details/project/show/Project/OptiMand-480>

- Projektposter aus 2019: [https://www.energetische-biomassenutzung.de/fileadmin/Steckbriefe/dokumente/03KB115\\_OptiMand\\_Poster2019\\_final.pdf](https://www.energetische-biomassenutzung.de/fileadmin/Steckbriefe/dokumente/03KB115_OptiMand_Poster2019_final.pdf)
- Präsentation auf der 7. Statuskonferenz »Energetische Biomassenutzung« 2017: [https://www.energetische-biomassenutzung.de/fileadmin/Steckbriefe/dokumente/03KB115\\_Mauky\\_Statuskonf\\_OptiMand.pdf](https://www.energetische-biomassenutzung.de/fileadmin/Steckbriefe/dokumente/03KB115_Mauky_Statuskonf_OptiMand.pdf)

### Wissenschaftliche Paper:

- KRETZSCHMAR, J.; BÖHME, P.; LIEBETRAU, J.; MERTIG, M.; HARNISCH, F. (2018): Microbial Electrochemical Sensors for Anaerobic Digestion Process Control – Performance of Electroactive Biofilms under Real Conditions. In: *Chem. Eng. Technol.* 41, 4. 687–695. [10.1002/ceat.201700539](https://doi.org/10.1002/ceat.201700539)
- KOÓK, L.; BAKONYI, P.; HARNISCH, F.; KRETZSCHMAR, J.; CHAE, K.-J.; ZHEN, G.; KUMAR, G.; RÖZSENBERSZKI, T.; TÓTH, G.; NEMESTÓTHY, N.; BÉLAFI-BAKÓ, K. (2019): Biofouling of membranes in microbial electrochemical technologies: Causes, characterization methods and mitigation strategies. In: *Bioresource Technology*. 279. 327-338. [10.1016/j.biortech.2019.02.001](https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.02.001)

- KORTH, B.; KRETZSCHMAR, J.; BARTZ, M.; KUCHENBUCH, A.; HARNISCH, F. (2020) Determining incremental coulombic efficiency and physiological parameters of early stage *Geobacter* spp. enrichment biofilms. In: *PLoS One*. 15 (6). [10.1371/journal.pone.0234077](https://doi.org/10.1371/journal.pone.0234077)

### Beiträge in Tagungsbänden:

- Statuskonferenz Förderprogramm »Energetische Biomassenutzung« 2019: [https://www.energetische-biomassenutzung.de/fileadmin/media/3\\_Veranstaltungen/8\\_SK/Programm\\_Anfahrt\\_Hotels/8SK\\_Reader\\_2019.pdf](https://www.energetische-biomassenutzung.de/fileadmin/media/3_Veranstaltungen/8_SK/Programm_Anfahrt_Hotels/8SK_Reader_2019.pdf). S. 104.

## LITERATUR

- ANDERSON, G. ; CAMPOS, C. ; CHERNICHARO, L. ; SMITH, L. (1991): Evaluation of the inhibitory effects of lithium when used as a tracer for anaerobic digesters. In: *Water Research* Bd. 25, Nr. 7, S. 755–760. [10.1016/0043-1354\(91\)90154-I](https://doi.org/10.1016/0043-1354(91)90154-I).
- BANEMANN, D. (2012): Mündliche Mitteilung. 26.09.2012.
- BIOABFV: Verordnung über die Verwertung von Bioabfällen auf landwirtschaftlich, forstwirtschaftlich und gärtnerisch genutzten Böden (Bioabfallverordnung – BioAbfV). BGBl. I. (Abgerufen 23. April 2021).
- BORROTO, J.; DOMINGUEZ, J.; GRIFFITH, J.; FICK, M.; LECLERC, J. (2003): Technetium-99m as a tracer for the liquid RTD measurement in opaque anaerobic digester: Application in a sugar wastewater treatment plant. In: *Chemical Engineering and Processing* Bd. 42, 857–865. [10.1016/S0255-2701\(02\)00109-5](https://doi.org/10.1016/S0255-2701(02)00109-5).
- BREHMER, M. (2011a): Rheological properties of substrates for the biogas production from renewable resources, Progress in Biogas II, IBBK Fachgruppe Biogas GmbH. Bd. Teil 2— ISBN 978-3-940706-02-7.
- BREHMER, M. (2011b): Rheologische Charakterisierung von Gärsubstraten. In: 14. Köthener-Rührer-Kolloquium. Köthen.
- BREHMER, M. (2011c): Durchmischung im Fermenter – Fluidynamische Untersuchungen zur Optimierung von Biogasanlagen. In: biogas – expo & congress 2011. Offenburg.
- BUCHAUER, K. (1998): A comparison of two simple titration procedures to determine volatile fatty acids in influents to waste-water and sludge treatment processes. In: *Water S. A.* 24 (1). S. 49.

- BUSWELL, A.; MUELLER, H. F. (1952): Mechanism of Methane Fermentation. In: *Industrial & Engineering Chemistry*. 44, 3. 550–552. [10.1021/ie50507a033](https://doi.org/10.1021/ie50507a033).
- CRUWYS, J.A.; DINDALE, R.M.; HAWKES, F.R.; HAWKES, D.L. (2002): Development of a static headspace gas chromatographic procedure for the routine analysis of volatile fatty acids in wastewaters. In: *Journal of Chromatography*. 945 (1–2). 195–209. [10.1016/S0021-9673\(01\)01514-X](https://doi.org/10.1016/S0021-9673(01)01514-X).
- DANCKWERTS, P. V. (1953): Continuous flow systems—distribution of residence times. In: *Chem. Eng. Sci.* Bd. 2, S. 1–13. [10.1016/0009-2509\(53\)80001-I](https://doi.org/10.1016/0009-2509(53)80001-I).
- DEBATIN, K.: Experimentelle Strömungsmechanik, ergänzendes Skript zur Vorlesung.
- DEERBERG, G.; GRÄN-HEEDFELD, J.; HENNING, T.; DUDLIK, A. (2009): Strömungs- und Wärmetransportoptimierung in Biogasanlagen: Abschlussbericht zum [BMELV-]Vorhaben. Oberhausen: Fraunhofer UMSICHT.
- DEUTSCHE NORM (2001a): Charakterisierung von Schlämmen – Bestimmung des Trockenrückstandes und des Wassergehaltes. Deutsche Fassung. Aufl. Berlin: DIN Deutsches Institut für Normung e.V..
- DEUTSCHE NORM (2001b): Charakterisierung von Schlämmen – Bestimmung des Glühverlustes der Trockenmasse. Deutsche Fassung. Aufl. Berlin : DIN Deutsches Institut für Normung e.V..



FKZ-NR.: 03KB100  
LAUFZEIT 01.10.2014 – 30.09.2017  
ZUWENDUNGSSUMME 240.146 €

#### KOORDINATION

DBFZ Deutsches Biomasse-  
forschungszentrum  
gemeinnützige GmbH  
Torgauer Straße 116, 04347 Leipzig  
www.dbfz.de

#### PARTNER

Großmann Ingenieur Consult  
Holding GmbH (GICON)  
Tiergartenstr. 48  
01219 Dresden  
www.gicon.de

Dr. Reinhold & Kollegen  
Mildred-Harnack-Str. 6  
14480 Potsdam

#### PROJEKTLEITER

Torsten Reinelt

Direkter Ansprechpartner/  
Autor: Harald Wedwitschka  
+49 (0)341 2434 562  
harald.wedwitschka@dbfz.de

#### Zitat der Projektleiter:

*Die Behandlung von Bioabfall mittels anaerober Vergärung und anschließender Kompostierung stellt einen Ansatz zur kombinierten energetischen und stofflichen Reststoffnutzung dar. Zielstellung des kombinierten Verfahrens ist die Reduzierung anfallender Bioabfallmengen und die emissionsarme Produktion von Biogas und hochwertiger Kompostmaterialien. Das Projekt FermKomp soll einen Beitrag zur Optimierung der Verfahrenskombination leisten*

**ZIELE** Prozesstechnische Optimierung der Bioabfallvergärung im Garagenverfahren und der nachgeschalteten Gärrestkompostierung mit dem Ziel der Verminderung von Treibhausgasemissionen und der Steigerung der Biogasproduktion.

#### THEMEN SCHWERPUNKTE

- Bioabfallvergärung im Garagenverfahren
- Einsatzstoffkonditionierung
- Gärrestkompostierung
- Emissionsmessungen

#### HAUPT BOTSCHAFTEN

- Die Verfahrenskombination aus Bioabfallvergärung im Garagenfermentationsverfahren und nachgeschalteter Kompostierung ist eine effiziente Form der energetischen Reststoffnutzung und Abfallbehandlung.
- Bioabfalleigenschaften wie Materialstruktur und Permeabilität (Wasserdurchlässigkeit) haben einen wesentlichen Einfluss auf die Leistungsfähigkeit und Nachhaltigkeit der Verfahren.
- Bioabfall variiert in der Materialzusammensetzung stark mit saisonalen Schwankungen und in Abhängigkeit vom Einzugsgebiet
- Durch eine Optimierung der Materialeigenschaften von Bioabfall durch Strukturstoffzugabe kann die Materialeignung für das Trockenfermentations- und Kompostierungsverfahren verbessert werden.

Torsten Reinelt,  
Harald Wedwitschka,  
Michael Tietze, Jürgen Reinhold

# FermKomp

**Abgestimmte Effizienzsteigerung und Emissionsminderung der Feststofffermentation mit nachfolgender Kompostierung**

#### ZUSAMMEN FASSUNG

Laut statistischem Bundesamt wurden 2016 in Deutschland rund 14,11 Millionen t a<sup>-1</sup> biologisch abbaubare Abfälle (im Wesentlichen Biotonnen-Inhalte, biologisch abbaubare Garten- und Parkabfälle, Markt- und Parkabfälle, weitere biologisch abbaubare Abfälle aus verschiedenen Herkunftsbereichen) in Kompostierungsanlagen (davon etwa 7,51 Millionen t a<sup>-1</sup>) sowie Vergärungsanlagen (inkl. kombinierter Anlagen; davon etwa 6,60 Millionen t a<sup>-1</sup>) behandelt. Die anaerobe und nachfolgend aerobe Behandlung von Abfällen setzt eine Materialstruktur voraus, die eine Perkolations von Flüssigkeiten (anaerobe Stufe) oder die Durchdringung mit Luft (aerobe Nachkompostierung) ermöglicht. Eine unzureichende Materialstruktur des Einsatzstoffes kann zu einem verringerten biologischen Abbau sowohl im aeroben als auch im anaeroben Bereich führen. In der Kompostierung kann es hierdurch zu erheblichen Treibhausgasemissionen kommen. Im Rahmen des Forschungsvorhabens FermKomp sollte auf Basis einer optimierten Materialstruktur der Einsatzstoffe der Abbau in beiden Verfahrensstufen verbessert sowie eine effiziente Abstimmung der Prozesse aufeinander demonstriert

werden. Dabei wurden Materialanforderungen an Substrat-/Strukturmaterialmischungen ermittelt und darauf aufbauend mit gezielt eingestellten Mischungen Untersuchungen zur Effizienzsteigerung der Vergärungsstufe und einer emissionsarmen Nachrotte (Kompostierung) im Pilotmaßstab durchgeführt. Die wesentlichen Ziele des Projektes umfassten die Etablierung einer praxistauglichen Methode zur Materialcharakterisierung, die Ermittlung einer optimalen Struktur für den anaeroben und aeroben Behandlungsschritt, die Quantifizierung und Bewertung der erreichten Effizienzsteigerung in der Vergärung und der Emissionsminderung in der Kompostierung sowie die ökologische Bewertung der Projektergebnisse.



## SUMMARY (ENGL.)

Anaerobic and subsequent aerobic treatment of organic waste requires a material structure that allows percolation of liquids (anaerobic stage) or permeation with air (aerobic post-composting). Inadequate material structure of the feedstock can lead to reduced biodegradation in both aerobic and anaerobic stages. This can lead to significant greenhouse gas emissions in the composting process. The FermKomp research project aimed to improve degradation in both process stages on the basis of an optimized structure and to demonstrate efficient synchronization of the processes. Material requirements for substrate/structure material mixtures was determined and, based on this, investigations were carried out on a pilot scale with specifically adjusted material mixtures to increase the efficiency of the fermentation stage and to reduce emissions from digestate composting. The main objectives of the project included the establishment of a practical method for material characterization, the determination of an optimal feedstock structure for the anaerobic and aerobic treatment step, the quantification and evaluation of the achieved efficiency increase in digestion and emission reduction in composting as well as the ecological evaluation of the project results.

## MAIN MESSAGES

- The process combination of dry fermentation and digestate composting is an efficient form of energetic utilization of residue materials and organic waste treatment.
- Organic household waste properties such as material structure and permeability have a significant influence on the performance and sustainability of the processes.
- Organic household waste varies greatly in material composition with seasonal variations and depending on the collection area.
- Optimizing the material properties of biowaste by adding structural material can improve the material suitability for the dry fermentation and composting process.

## METHODIK MASSNAHMEN

Im Rahmen des Projektes sind Versuche zur Materialcharakterisierung von Bioabfallproben, Referenzmaterialien und Strukturstoffen im Labor- und Technikumsmaßstab durchgeführt worden. Weiterhin fanden Trockenvergärungsversuche mit strukturoptimierten Einsatzstoffmischungen zur Untersuchung der Biogasbildung statt. Die praktischen Versuche wurden durch statistische Untersuchungen zu den Zusammenhängen zwischen Materialzusammensetzung, Permeabilität, Strukturbeständigkeit und der Biogasausbeute begleitet. Gärprodukte aus den Garagenfermentation im Pilotmaßstab wurden einer Mietenkompostierung zugeführt und die Bildung von Emissionen untersucht. Hierfür fanden Untersuchungen der Porengaszusammensetzung und der Emissionsraten statt. Abschließend erfolgte eine ökologische Bewertung der Versuchsergebnisse.

## DATEN METHODEN

Eine ausreichende Perkolierfähigkeit ist für Einsatzstoffe der Garagenfermentation zwingend erforderlich. Zur Bestimmung des Wasserdurchlässigkeitskoeffizienten ( $k_f$ ) wurde ein apparativer Aufbau entwickelt, der die Analyse des Wasserdurchlässigkeitswertes von losen und verdichteten Materialschüttungen ermöglicht. Somit können differenzierte Einbauhöhen der Substrate im Fermenter simuliert werden. Die ermittelten Daten können Aufschluss über die maximal möglich Haufwerkshöhe liefern, bei der eine Perkolatation möglich ist. Mit Hilfe der beschriebenen Labormethode können Einsatzstoffe mit geringer Wasserdurchlässigkeit durch Materialkonditionierung mittels Strukturstoffzugabe in ihren Perkolatationseigenschaften optimiert werden.



Abbildung 1:  
GICON  
Fassversuchsanlage



Abbildung 2:  
GICON  
Großtechnikum Cottbus

## ERGEBNIS DARSTELLUNG

Aus den Projektergebnissen lassen sich folgende Handlungsempfehlungen für eine optimierte Garagenfermentation ableiten:

- Eine Homogenisierung des Bioabfalls vor der Garagenfermentation ist zwingend erforderlich.
- Die Strukturstoffzugabe bei hoher Feuchtroh- bzw. Schüttdichte des Einsatzmaterials kann zu einer Verbesserung der Materialpermeabilität und Strukturbeständigkeit führen.
- Eine ausreichende Perkolation während des Prozesses muss sichergestellt sein.
- Eine zu starke Perkolation bewirkt eine Verdichtung der Haufwerksoberfläche und führt zu einer Strukturabnahme des Einsatzmaterials.
- Eine zu schwache Perkolation verzögert die Biogasbildung.
- Der Aufstau von Perkolat zu Beginn der Fermentation kann zu einer Beschleunigung des Biogasprozesses führen.

Hinsichtlich einer optimierten Kompostierung von Gärresten können die Handlungsempfehlungen wie folgt zusammengefasst werden:

- Die Einhaltung einer guten fachlichen Praxis der Kompostierung [Landesamt für Umwelt, Gesundheit und Verbraucherschutz, 2015; Bundesgütegemeinschaft Kompost e.V., 2010, 1. Aufl.; 2010, 4. Aufl.] ist auch bei der Gärrestkompostierung anzuwenden.
- Vermeidbare THG- bzw. Methanemissionen aus der Kompostierung können so z. B. verhindert werden, indem eine strenge aerobe Rotteführung angestrebt wird. Das kann gewährleistet werden indem eine ausreichende Umsetzung der Kompostrotte und ein ausreichender Gasaustausch sichergestellt wird.
- Die gezielte Einstellung der Materialstruktur und des Luftporenvolumens durch Mischung unterschiedlicher Bioabfälle oder durch Zugabe eines Strukturstoffs kann zur Verbesserung der Belüftungsfähigkeit des Rottegutes beitragen.
- Ein günstiges C:N-Verhältnis von über 25:1 für die Kompostierung kann durch die Mischung unterschiedlicher Bio- und Grüngutabfälle ermöglicht werden.
- Abhängig von der Gärrestbeschaffenheit muss auf die Befeuchtung des Rottegutes bei sehr trockenem Material und auf die Verhinderung von Staunässe bei sehr feuchten Gärresten geachtet werden.

## ERGEBNISSE

### ■ Vorträge:

- REINELT, T. (2015): Projektvorstellung FermKomp (03KB100A-C) (6. Statuskonferenz des Förderprogramms »Energetische Biomassenutzung« - Bioenergie. Mehr als eine sichere Reserve?!). Leipzig, 11.11.2015
- WEDWITSCHKA, H. (2017): Projektvorstellung: Abgestimmte Effizienzsteigerung und Emissionsminderung der Feststofffermentation mit nachfolgender Kompostierung (FermKomp) (Workshop FermKomp - 7. Statuskonferenz des BMWi-Förderprogramms »Energetische Biomassenutzung« - Bioenergie. Flexibel und integriert in die nächste Epoche!). Leipzig, 20.11.2017
- REINELT, T. (2017): Emissionsmessung an offenen Kompostmieten (Workshop FermKomp – 7. Statuskonferenz des BMWi-Förderprogramms »Energetische Biomassenutzung« - Bioenergie. Flexibel und integriert in die nächste Epoche!). Leipzig, 20.11.2017
- TIETZE, M. (2017): Bioabfallbehandlung mit dem zweistufigen Trocken-Nass-Fermentationsverfahren (GICON-Verfahren) (Workshop FermKomp - 7. Statuskonferenz des BMWi-Förderprogramms »Energetische Biomassenutzung« - Bioenergie. Flexibel und integriert in die nächste Epoche!). Leipzig, 20.11.2017
- REINHOLD, H.-J. (2017): Betrachtungen zu Möglichkeiten der Optimierung der offenen Mietenkompostierung (Workshop FermKomp - 7. Statuskonferenz des BMWi-Förderprogramms »Energetische Biomassenutzung« - Bioenergie. Flexibel und integriert in die nächste Epoche!). Leipzig, 20.11.2017

### ■ Zeitschriftenartikel (nicht peer-reviewed):

- RUDOLPH, W. (2018): Box und Miete bestens kombiniert. In: Fachverband Biogas (Hrsg.): *Biogas Journal*, 1\_2018, S. 22–25

### ■ Zeitschriftenartikel (peer-reviewed):

- REINHOLD, H.-J. (2018): Förderung emissionsarmer Rotteprozesse bei der offenen Bioabfall-Mietenkompostierung durch Nutzung von Feldmess- und Diagnosemethoden. In: *Gefahrstoffe Reinhaltung der Luft*, Mai 2018 S. 207 bis 214, Springer-VDI-Verlag GmbH & Co. KG Düsseldorf
- WEDWITSCHKA, H.; GALLEGOS, D.; TIETZE, M.; REINHOLD, J.; JENSON, E.; LIEBETRAU, J.; NELLES, M. (2019): Effect of Substrate Characteristics and Process Fluid Percolation on Dry Anaerobic Digestion Processes. In: *Chem. Eng. Technol.* 43, 1. 59–67. [10.1002/ceat.201900404](https://doi.org/10.1002/ceat.201900404)

### ■ Poster:

- WEDWITSCHKA, H.; REINELT, T. (2015): Optimierung anaerober Perkulationsprozesse mit anschließender Nachrotte auf Basis von Methoden zur Substratcharakterisierung. Leipzig: 11.-12.11.2015

### ■ Methoden:

- WEDWITSCHKA, H.; GALLEGOS, D.; LIEBETRAU, J., JENSON, E. (2020): Substrate suitability assessment for anaerobic dry digestion processes - Method to determine substrate material permeability under compaction. In: Liebetrau J., Pfeiffer D. (Eds.), *Collection of Methods for Biogas – Methods to determine parameters for analysis purposes and parameters that describe processes in the biogas sector*. Series »Biomass energy use«. 07, 2. 424-427. ISBN 978-3-946629-47-4, ISSN (online): 2698-9190, [10.48480/z641-5235](https://doi.org/10.48480/z641-5235)



## HERAUSFORDERUNGEN (HEMMNISSE)

Bioabfall ist ein Probenmaterial mit sehr heterogener Zusammensetzung. Die Durchführung statistisch abgesicherter Versuche erfordert eine hohe Anzahl von Mehrfachbestimmungen, was im Pilotmaßstab zu hohen Kosten führen kann.

## AUSBLICK

Die aus den Ergebnissen des FermKomp Projekts abgeleiteten Handlungsempfehlungen liefern nützliche Hinweise für Betreiber von Garagenfermentations- und Kompostierungsanlagen zur Steigerung der Prozesseffizienz und der Vermeidung von Emissionen. Im Projekt wurden weitere Potenziale zur Prozessoptimierung der biologischen Abfallbehandlung identifiziert und es besteht weiterer Forschungsbedarf.

Link zum Endbericht:

[https://www.energetische-biomassenutzung.de/fileadmin/Steckbriefe/dokumente/03KB100A-C\\_Fermkomp\\_Schlussbericht.pdf](https://www.energetische-biomassenutzung.de/fileadmin/Steckbriefe/dokumente/03KB100A-C_Fermkomp_Schlussbericht.pdf)

## WEITERE INFORMATIONEN

## LITERATUR

[1] STATISTISCHE BUNDESAMT (DESTATIS) (Hrsg.): Umwelt: Abfallentsorgung - 2016. 2018 (Fachserie 19, Reihe 1).

[2] STRACH K. (2020): Determination of total solids (dry matter) and volatile solids (organic dry matter). In: Liebetrau J., Pfeiffer D. (Eds.), *Collection of Methods for Biogas—Methods to determine parameters for analysis purposes and parameters that describe processes in the biogas sector*. Series »Biomass energy use« Vol. 07, 2. 50-51. ISBN 978-3-946629-47-4, ISSN (online): 2698-9190, 10.48480/z641-5235.

[3] LANDESAMT FÜR UMWELT, GESUNDHEIT UND VERBRAUCHERSCHUTZ (HRSG.): Empfehlungen zur Limitierung klimarelevanter Emission aus der offenen Mietenkompostierung. Potsdam, 2015 (Fachbeiträge des LUGV 148).

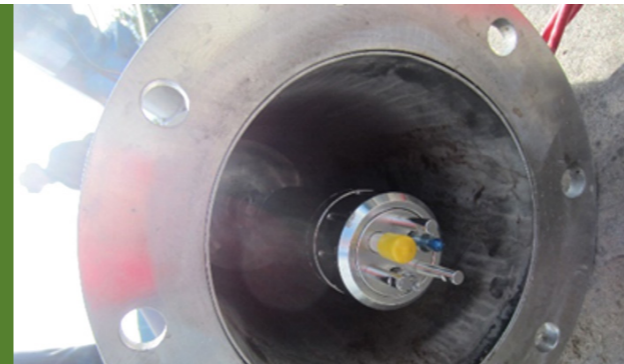
[4] BUNDESGÜTEGEMEINSCHAFT KOMPOST E.V. (HRSG.) (2010): Betrieb von Kompostierungsanlagen mit geringen Emissionen klimarelevanter Gase. 1. Aufl. Köln.

[5] BUNDESGÜTEGEMEINSCHAFT KOMPOST E.V. (HRSG.) (2010): Hygiene Baumuster Prüfsystem (HBPS): Kompostierungsanlagen, Vergärungsanlagen. 4. Aufl. Köln.



#### Zitat des Projektleiters: Stefan Junne

Es wurden dynamische Fütterungsversuche und die Erprobung von Sensortechnik an einer Versuchsbiogasanlage durchgeführt, die die Datenbasis für eine Modell-basierte Vorhersage in einer Demonstrationsstudie gelegt hat. Das Vorhaben trägt dazu bei, Biogasanlagen flexibler betreiben und somit auf Schwankungen auf der Substratseite und der Produktnachfrageseite reagieren und gleichzeitig eine gewisse Prozessstabilität gewährleisten zu können.



FKZ-NR.: 03KB101  
LAUFZEIT 01.10.2014–31.03.2018  
ZUWENDUNGSSUMME 337.289,00 €

#### KONTAKT

Projektleiter  
Direkter Ansprechpartner/Autor  
Dr.-Ing. Stefan Junne  
Telefon: +49 (0)30 314-72527  
E-Mail: stefan.junne@tu-berlin.de

#### KOORDINATION

Technische Universität Berlin  
Fachgebiet Bioverfahrenstechnik  
Ackerstraße 76 ACK 24  
D-13355 Berlin  
www.bioprocess.tu-berlin.de

#### PARTNER

Universität Hohenheim  
Landesanstalt für Landesanstalt  
für Agrartechnik und Bioenergie  
Garbenstr. 9, 70599 Stuttgart  
https://la-bioenergie.uni-hohenheim.de

SOTA Solutions GmbH  
Am Studio 2, D-12489 Berlin  
http://sota-solutions.de



## THEMEN SCHWERPUNKTE

- Flexibilisierung der Fütterung und Biogasproduktion
- Verbesserung des Echtzeit-Monitorings
- Modell-basierte Vorhersage zur Auslegung des Fütterungsmanagements

## ZIELE

Untersuchung und Demonstration eines flexiblen Fütterungsmanagements zur dynamischen Biogasproduktion, unterstützt durch Maßnahmen des Monitorings, insbesondere in der Flüssigphase einer Versuchsbiogasanlage sowie einer Vorhersage der Biogassyntheseleistung mittels eines mechanistischen Modells und im Vergleich mittels eines neuronalen Netzwerks basierend auf historischen Anlagendaten.

## HAUPT BOTSCHAFTEN

- Flexible Fahrweise mittels dynamischem Fütterungsmanagement wurde erfolgreich demonstriert
- Eine Reduktion der Raum-Zeit-Ausbeute war nicht zu beobachten
- Die ortsaufgelöste Leitfähigkeitsmessung kann zur Prozessrelevanten Bewertung der Vermischung und des Abbaus von Substrat sowie zur Optimierung des Leistungseintrages (Rührzeiten) beitragen
- Ein erweitertes Modell AM2 kann zur Vorhersage der Biogasproduktion unter dynamischer Fütterung dienen.

Abbildung 1: Integration des Sensorkopfes in Ventilaufsatz zur Multipositionsmessung (oben). Aufsatz des Sensorkopfmoduls auf Ventileinbauten im Reaktordeckel (unten).

# Stefan Junne FlexFeed

## Flexibilisierte Fütterung in Biogasprozessen mit Modell-basierter Prozesserkennung im Praxismaßstab

Mit Hilfe der speicherbaren Substrat-seitigen Biomasse besteht die Möglichkeit, Fermenter an Biogasanlagen flexibel und regelbar über das Fütterungsmanagement zu betreiben. Auswirkungen eines stark variierenden Fütterungsmanagements auf die biologischen, rheologischen und verfahrenstechnischen Parameter sind bislang jedoch unbekannt. Zudem werden Vorhersagen benötigt, um die Produktion auf erwartbare Schwankungen in der Strombereitstellung anderer Energieträger anpassen zu können. Im Projekt wurde daher untersucht, inwiefern ein flexibles Beladungsmanagement eine bedarfsgerechte Gaserzeugung unterstützen kann, und inwiefern Modell-basierte Ansätze zu einem stabilen, vorher-sagbaren Betrieb beitragen können.

Es wurden ferner verschiedene Sensoren, insbesondere ein akustischer Wellenleiter und Nahinfrarotspektroskopie zur schnellen Substratbewertung sowie die Leitfähigkeit in der Flüssigphase zur Bewertung der Homogenität untersucht. Es zeigte sich, dass mit einem mechanistischen Modell die Möglichkeit zur schnellen Abschätzung der Methanproduktion realisierbar ist.



## SUMMARY

With the help of the storable biomass substrate, it is possible to operate digesters at biogas plants flexibly and controllably via a feeding management. However, effects of a varying feeding management on biological, rheological and process parameters are unknown so far. In addition, predictions are needed to adapt production to fluctuations in the power supply of other energy sources. The project therefore investigated the extent to which a flexible feeding management can support demand-driven gas production, and the extent to which model-based approaches can contribute to a stable, predictable operation.

Various sensors, in particular an acoustic waveguide and near-infrared spectroscopy for rapid substrate evaluation, and liquid phase conductivity measure-

ments for homogeneity evaluation, were also investigated. It was found that with a mechanistic model, the ability to rapidly estimate methane production is feasible.

## MAIN MESSAGES

- Flexible operation by means of a dynamic feeding management was successfully demonstrated
- A reduction in space-time yield was not observed
- Spatially resolved conductivity monitoring can support the evaluation of substrate mixing and degradation as well as the optimization of the power input (agitation times)
- A modified model AM2 can be used to predict biogas production under dynamic feeding.

## METHODIK MASSNAHMEN

- Dynamische Fütterung in einer Versuchsbiogasanlage
- Einsatz verschiedener Sensorik, auch an verschiedenen Orten in der Flüssigphase während des dynamischen Fütterungsmanagements
- Anwendung eines durch punktuelle Erweiterungen angepassten Modells (AM2) zur Abbildung der anhand des Fütterungsmanagements fluktuierenden Biogasproduktion

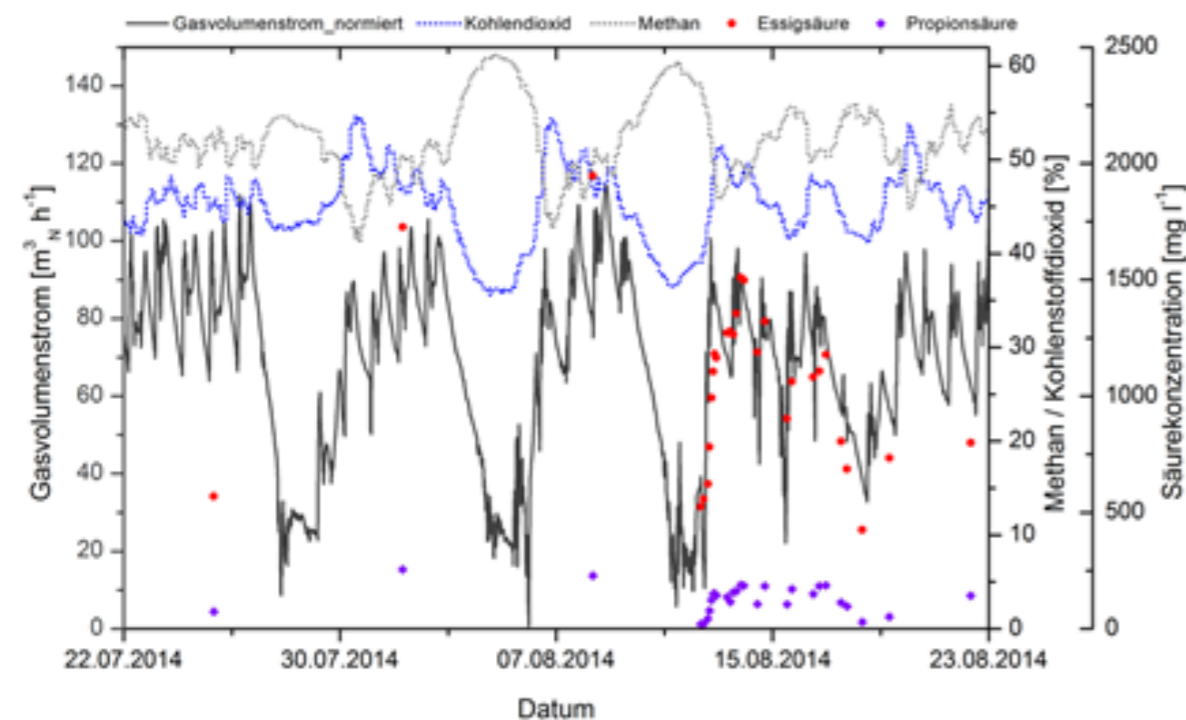


Abbildung 2:  
Beispiel flexible  
Biogasproduktion  
bei dynamischen  
Fütterungsmanagement  
in der Versuchsbiogasanlage.

## ERGEBNISSE

### Publikationen (Auswahl):

- BOCKISCH, A.; JUNNE, S.; NEUBAUER, P. (2020): In-situ investigation of multiple physico-chemical parameters in the liquid phase of digesters with mobile sensor devices. In: Liebetrau, J., Pfeiffer, D. (Hrsg.). *Collection of Methods for Biogas – Methods to determine parameters for analysis purposes and parameters that describe processes in the biogas sector*. Series »Biomass energy use«. 07, 2. 405-411. ISBN 978-3-946629-47-4. 10.48480/z641-5235
- JUNNE, J.; NÄGELE, H.-J.; KRESS, P.; BOCKISCH, A.; ARZATE, J.-A.; LEMOINE, A.; NEUBAUER, P.; OECHSNER, H. (2019): Flexibilisierte Fütterung in Biogasprozessen mit Modell-basierter Prozesserkennung im Praxismaßstab. In: *Tagungsband 8. Statuskonferenz Energetische Biomassenutzung*, 68-69. [https://www.energetische-biomassenutzung.de/fileadmin/media/3\\_Veranstaltungen/8\\_SK/Programm\\_Anfahrt\\_Hotels/BSK\\_Reader\\_2019.pdf](https://www.energetische-biomassenutzung.de/fileadmin/media/3_Veranstaltungen/8_SK/Programm_Anfahrt_Hotels/BSK_Reader_2019.pdf)
- JUNNE, J.; LEMOINE, A.; NEUBAUER, P.; CRUZ BOURNAZOU, N. M. (2015): Von Blackbox zu Whitebox Modellierung: Konzepte für eine Modell-basierte Überwachung von Biogasanlagen. In: Arnold, G. (ed.) *Energy EcoSystems 2014: Konferenzbeiträge und Beiträge der Fachgespräche »Energiesysteme der Zukunft«*. Leipziger Beiträge zur Informatik. InfAI. ISBN: 9783941608368; 3941608363

### Publikationen (Peer-Review):

- ARZATE, J.A. ET AL. (2017): Anaerobic Digestion Model (AM2) for the Description of Biogas Processes at Dynamic Feedstock Loading Rates. In: *Chemie Ingenieur Technik*, 89 (5). 10.1002/cite.201600176

- KRESS, P.; NÄGELE, H.-J.; OECHSNER, H.; Ruile, S. (2018) Effect of agitation time on nutrient distribution in full-scale CSTR biogas digesters. In: Special Issue on Recent Advances in Anaerobic Digestion, Samir Khanal, Hans Oechsner, Mohammad Taherzadeh, Rongsheng Roger Ruan and Irini Angelidaki (Eds), *Bioresource Technology* 247, 1-6. 10.1016/j.biortech.2017.09.054

### Konzept/Machbarkeitsstudie:

- Machbarkeitsstudie an Forschungsbiogasanlage

### Anlage:

- Demonstrationsanlage
- Laboranlage
- Anlagenteile / Systemkomponenten

### Daten & Methoden:

- Modell/Modellierung
- Szenarien
- Monitoring
- Messreihe/-programm

### Markt:

- Marktprognosen
- Best-Practice Lösung

### Auszeichnungen:

- Gewinn Science-Slam Statuskonferenz Energetische Biomassenutzung 2015



## ERGEBNIS-FAKTEN

### Ergebnis A

Die Ergebnisse zeigten, dass eine dynamische Fahrweise der Biogasanlage gut realisierbar war. Der Gasvolumenstrom konnte durch variables Füttermanagement um 50% im Tageszeitraum variiert werden, ohne dass es zu Prozess-relevanten Störungen im Anlagenbetrieb kam.

### Ergebnis B

Es konnte gezeigt werden, dass das reduzierte Modell AM2 in der Lage ist, die dynamischen Bedingungen bei den applizierten Zuständen mit dynamischer Fütterung abzubilden. Eine Zustandserkennung der Biogasanlage hinsichtlich der Biogasproduktion ist möglich.

### Ergebnis C

On-line Sensorik wie die Leitfähigkeitsmessung kann einen potentiell wichtigen Beitrag leisten, um Veränderungen in der Durchmischung durch geänderte Substrateinträge schnell zu detektieren.

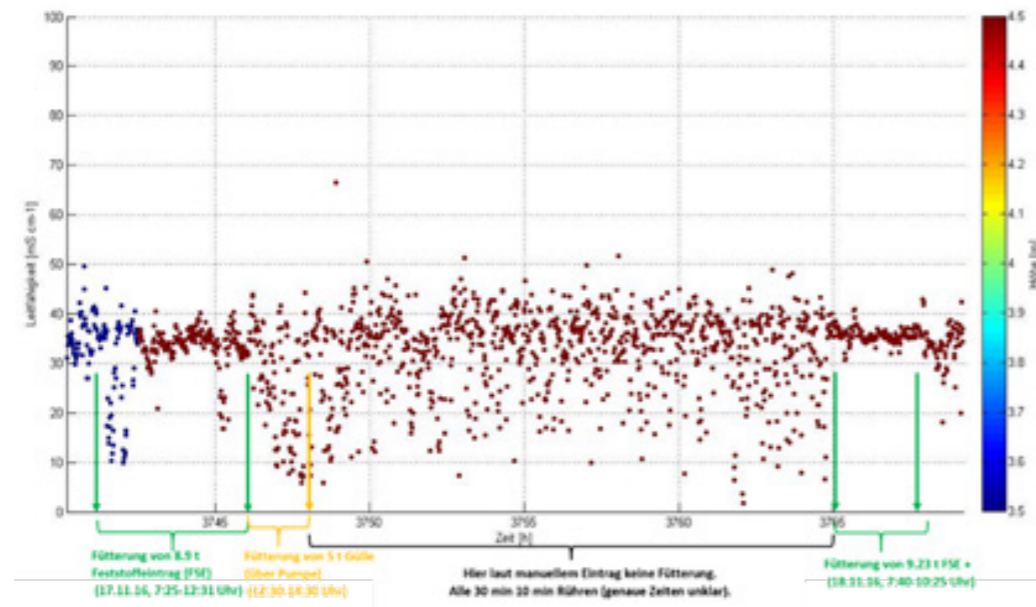


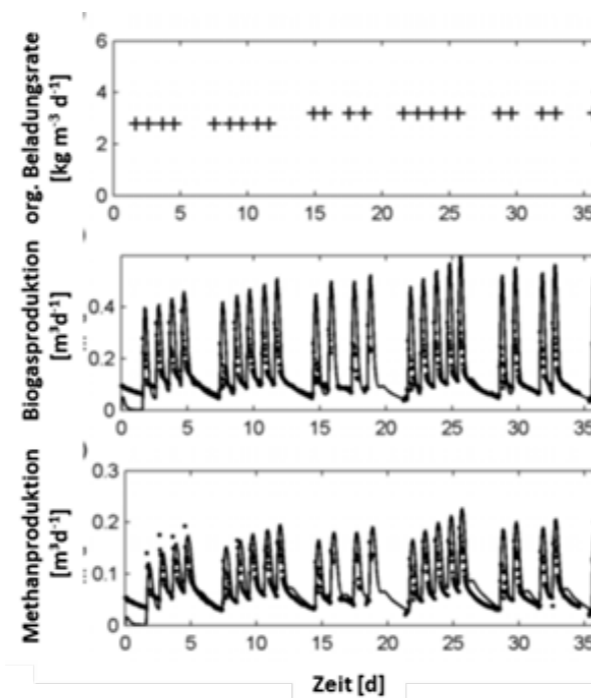
Abbildung 3: Verlauf der Leitfähigkeit bei unterschiedlichen Substraten: der Abbau des hydrolysierten Festmisteintrages (grün) führt zu wesentlicher homogener Leitfähigkeit als Gülle. Der Abbau und die Verwertung von Gülle ist durch eine geringere Gradientenbildung der Leitfähigkeit beobachtbar (gelb und schwarz).

### Ergebnis D

Es wurden für verschiedenen Beladungsszenarien Kennzahlen von Lebenszyklusanalysen anhand der Modellprädiktion analysiert. Es ergab sich in allen Fällen, dass die flexible Substratnutzung zu gleichwertigen oder sogar tendenziell etwas günstigeren Werten führte.

Abbildung 4:

oben: Organische Beladungsrate,  
mitte: Biogasproduktion und  
unten: Methanproduktion bei tagesweise flexibler  
Beladung von Maissilage im 50 L Maßstab,  
simuliert mit dem Modell AM 2 mit Erweiterungen  
zur Beschreibung des Stickstoffhaushalts und der  
Hydrolyse (Punkte stellen experimentelle  
Messwerte dar, Linien die Modellsimulation)



## HERAUSFORDERUNGEN

Die vergleichsweise langen Verweilzeiten und die damit verbundenen Zeiten zur Generierung einer geeigneten Datenbasis, gekoppelt mit schwankenden Zusammensetzungen des Mikrobioms in der Flüssigphase, führen in der Regel zu limitierten Möglichkeiten, die Übertragbarkeit zu demonstrieren. Es muss jeweils spezifisch untersucht werden, wie viele Daten an jeder Anlage genutzt werden können und müssen, um die dynamische Fahrweise vorhersagen zu können und damit eine gewisse Betriebssicherheit erlangen zu können.

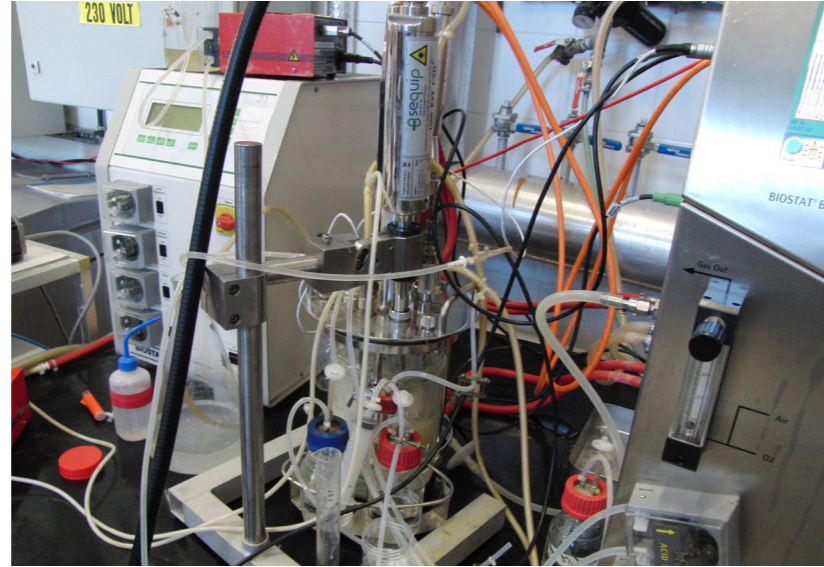
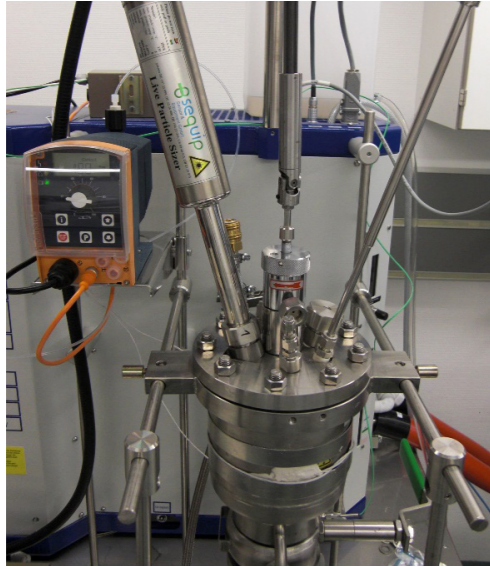
## AUSBLICK

- Das dynamische Fütterungsmanagement wird mittlerweile appliziert und in Folgeprojekten weiter untersucht.
- Die Modell-basierte Vorhersage, gekoppelt mit einem Fütterungsmanagement, findet ebenso erste Anwendungen im industriellen Umfeld. Mehrere Marktteilnehmende setzen dabei auch auf die Einbindung mechanistischer Modelle.
- Die Multipositionssensorik erlaubt die Erfassung von Gradienten in der Flüssigphase. Das »Mapping« dieser Gradienten erlaubt die Optimierung des Einsatzes von Rührern, aber auch die adäquate Positionierung von Sensoren und Probennahmestellen. Zur Zeit werden u. a. im Netzwerk »Bio-PAT e.V.« weitere Konzepte zur Überführung in die Anwendung erarbeitet und entsprechende Dienstleistungen angeboten.

## WEITERE INFORMATIONEN

- ARZATE, J.A. (2018): Modeling and simulation of biogas production based on anaerobic digestion of energy crops and manure (Dissertation). URL: [https://depositoncenter.tu-berlin.de/bitstream/11303/9132/10/arsate\\_salgado\\_juanantonio.pdf](https://depositoncenter.tu-berlin.de/bitstream/11303/9132/10/arsate_salgado_juanantonio.pdf)
- KRESS, P; NÄGELE, H.-J.; LEMMER, A.; KOLB, B. (2020): Strömungsgeschwindigkeiten und Strömungsprofile in einem vollständig durchmischten Biogasfermenter. In: *Landtechnik* 75, 2. 35–50. 10.15150/lt.2020.3230
- Projektsteckbrief und Endbericht (2018): <https://www.energetische-biomassenutzung.de/projekte-partner/details/project/show/Project/FlexFeed-456>
- Netzwerk Bio-PAT e.V.: [www.bio-pat.org](http://www.bio-pat.org)
- Fallstudie
  - JUNNE, S. (2018): Fallstudie FlexFeed – Flexibilisierte Fütterung in Biogasprozessen mit Modell-basierter Prozesserkennung im Praxismaßstab. Workshop Tools und Best-Practice zur Verwertung von Forschungsergebnissen, im Rahmen der DBFZ Jahrestagung 2018. <https://www.energetische-biomassenutzung.de/veranstaltungen/workshops/workshop-wie-wird-der-frosch-zum-prinzen-tools-und-best-practise-zur-verwertung-von-forschungsergebnissen>
- Vortrag
  - NÄGELE, H.-J. (2017): 8. Biogastagung der Landwirtschaftskammer Niedersachsen. »Flexibel in die Zukunft – ein Morgen für Biogas«, 14.03.2017., Landesanstalt für Agrartechnik und Bioenergie Universität Hohenheim. <https://www.lwk-niedersachsen.de/index.cfm/portal/57/nav/1251/article/30642.html>





## THEMEN SCHWERPUNKTE

- Etablierung einer schnellen *in situ* Methode zur Messung der Größenverteilung sowie des Anteils biologisch aktiver Zellen mittels Laserlicht-Rückreflexion zur Prozessoptimierung
- Einsatz zur Evaluierung verschiedener Vorbehandlungen von Gärsubstrat auf Prozesse, sowohl im Labormaßstab als auch im industriellen Maßstab, insbesondere von Ultraschall im Durchlaufverfahren
- Evaluierung der Sondentechnik als mobiles, prozessanalytisches Werkzeug für den praxisnahen Einsatz an industriellen Biogasanlagen

## HAUPT BOTSCHAFTEN ZIELE

- Die Änderung der Partikelgrößenverteilung hängt in einem bestimmten Bereich mit der Vergärbarkeit des Substrates zusammen
  - Dieser Größenbereich zwischen 20 und 200 µm kann bei den untersuchten Substraten für die Optimierung des Leistungseintrages beim Aufschluss genutzt werden
  - Um die Eigenschaften unterschiedlicher Substrate zu berücksichtigen, wird ein standardisiertes Vorgehen aus vorherigen Labortests und der schnellen Optimierung vor Ort vorgeschlagen
  - Das Verfahren wurde über verschiedene Maßstäbe hinweg für den Einsatz von Ultraschall in der Flüssigphase von Vergärern demonstriert.
- In dem Projekt »Lasersize« wurde eine *in situ* Größenbestimmung von Partikeln angestrebt, die eine zentrale Bedeutung für den biologischen Aufschluss und damit die Substratflexibilität, die Rheologie und das Strömungsprofil in Biogasanlagen besitzt. Ziel war die Entwicklung einer Methode für eine Anlagen-spezifische Optimierung der Aufbereitung von Substraten sowie die Art und Weise der Vorbereitung und der Behandlung in der Flüssigphase mittels Laserlicht-basierter Rückreflexionsmessung. Zugleich sollte mit der Methodik der Einsatz von Ultraschall bewertet und optimiert werden. Ziel war ein Beitrag zur Erhöhung der Substratflexibilität und Anlageneffizienz gemessen an der Raum-Zeit-Ausbeute und einem auf das Substrat abgestimmten Energieeintrag von Aufschlussmethoden.

**Zitat des Projektleiters: Stefan Junne**  
*Es gibt vielfältige Aufschlussverfahren, deren Energieeintrag jedoch nur schwer optimierbar ist, da die Wirkungen auf die Raum-Zeit-Ausbeuten in industriellen Biogasanlagen oftmals erst nach Monaten und generell schwer einschätzbar sind. Hier wurde ein Konzept entwickelt, mit dem bei vergleichsweise geringen Kosten vor Ort sehr schnell eine Optimierung des Leistungseintrages erfolgen kann, üblicherweise innerhalb von 12 h anstatt in 120 Tagen.*



FKZ-NR.: 03KB120  
 LAUFZEIT 01.11.2016–31.12.2019  
 ZUWENDUNGSSUMME 297.264,00 €

### KONTAKT

Projektleiter  
 Direkter Ansprechpartner  
 Dr.-Ing. Stefan Junne  
 Telefon: +49 (0)30 314-72527  
 E-Mail: stefan.junne@tu-berlin.de

### KOORDINATION

Technische Universität Berlin  
 Fachgebiet Bioverfahrenstechnik  
 Ackerstraße 76 ACK 24, 13355 Berlin  
[www.bioprocess.tu-berlin.de](http://www.bioprocess.tu-berlin.de)

### PARTNER

S+E Sequip GmbH  
 Angermunder Straße 22, D- 40489 Düsseldorf  
[www.sequip-particle-technology.de/](http://www.sequip-particle-technology.de/)

Devad GmbH  
 Oderstraße 53  
 D-14513 Teltow  
<http://www.devad.biz/>

**Laserrückreflexions-basierte Analyse der Größenverteilung von Partikeln zur Ultraschall-gestützten Optimierung der Flüssigphase in Gärprozessen**

# Lasersize

Stefan Junne

Der Zusammenhang zwischen der Partikelgröße, des Substrataufschlusses und der Vergärbarkeit sollte untersucht werden. Im Projekt wurde eine Monitoring-Lösung angestrebt, die einfach in Bestandsanlagen integrierbar sein sollte und deren Signale durch online Messung schnell und ohne Eingriff von außen auswertbar sind. Der Einsatz von Ultraschall, u. a. zum Zerkleinern von Agglomeraten und dem Aufschluss biologischen Materials, sowie mechanische und enzymatische Verfahren sollten dazu exemplarisch mit der Laserlichtrückreflexion verfolgt werden.

Es konnte an mehreren Substratmischungen ein Effekt der Partikelgrößenverteilung auf die Vergärbarkeit festgestellt und der Einsatz von Ultraschall hinsichtlich Verweilzeit bzw. Leistung evaluiert und optimiert werden. Dazu genügte die Messung der Partikelgrößenverteilung direkt hinter der Ultraschalleinheit bzw. direkt nach der jeweiligen Behandlungsweise. In Abhängigkeit der applizierten Laserlichtleistung stellt der biologisch aktive Teil kein Problem bei der Messung dar. Es wird vorgeschlagen, zunächst im Labormaßstab und Batch-Gärtests zu untersuchen, ob die Verringerung der Festphasenpartikelgröße den Prozess in den jeweils spezifischen Fällen beschleunigen kann.

Durch einen zeitlich begrenzten, zweckgebundenen Einsatz der Sondentechnik in einem Optimierungsprotokoll entsteht zudem eine wirtschaftliche Lösung, die sowohl an neuen wie an Bestandsanlagen angewendet werden kann.

## MAIN MESSAGES

- The change of the particle size distribution depends in a certain range on the fermentability of the substrate
- This size range between 20 and 200  $\mu\text{m}$  can be used to optimize the power input during digestion for the substrates studied
- In order to consider the characteristics of different substrates, a standardized procedure is proposed from first laboratory tests and rapid on-site optimization
- The procedure was demonstrated across different scales for the use of ultrasound in the liquid phase of fermenters.

## SUMMARY

The relation between the particle size distribution, substrate pre-treatment and the digestion yield shall be examined. The project aimed at a monitoring solution that could be easily integrated into existing plants and whose signals could be evaluated quickly and without external intervention by means of online measurement. The use of ultrasound, e.g. for breaking up agglomerates and disintegrating biological material, as well as mechanical and enzymatic processes were monitored using laser light back-reflection.

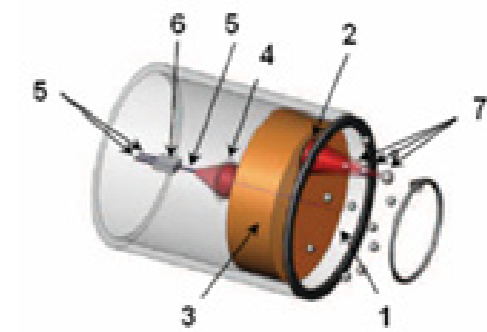
An effect of the particle size distribution on the digestibility was determined on several substrate mixtu-

res and the use of ultrasound was evaluated and optimized with regard to residence time or power. For this purpose, it was sufficient to measure the particle size distribution directly behind the ultrasonic unit or directly after the respective treatment method. Depending on the applied laser light power, the biologically active part does not pose a problem for the measurement. It is proposed to first investigate on a laboratory scale and batch fermentation tests whether the reduction of solid phase particles can accelerate the process in the specific cases.

A time-limited, purpose-bound utilization of the sensor technology in an optimization protocol also creates an economical solution that can be applied to both new and existing plants.

## METHODIK MASSNAHMEN

- Die Laserlicht-basierte Rückreflexion wurde zunächst in Laboranlagen in Kombination mit verschiedenen Aufschlussmethoden zur Partikelgrößenbestimmung appliziert und technisch angepasst
- Gleichzeitig wurden Batch-Gärtests mit gekoppelter Gasanalytik und eine Korrelationsanalyse mit der Partikelgrößenverteilung durchgeführt
- Die gefundenen Korrelationen wurden genutzt, um Leistungseinträge zum Substrataufschluss über verschiedene Maßstäbe hinweg zu optimieren, um indirekt über die Korrelation zwischen der Partikelgrößenverteilung und der initialen  $\text{CO}_2$ -Bildungsraten in Batch-Gärtests die Vergärbarkeit zu beschleunigen



1. Saphirfenster
2. Fokuslinie
3. Rotierendes optisches System
4. Optische Kupplung in der Linse
5. Single Mode Leiter
6. Fiberoptische Kopplung
7. Dynamischer Fokus

Abbildung 1: Ultraschallsonotrode im Bypass  
Abbildung 2: Aufbauprinzip optische Einheit - Tiefenbeweglicher selektiver Fokus

## ERGEBNISSE

### Publikationen (Peer-Review):

- BOCKISCH, A.; KIELHORN, E.; NEUBAUER, P.; JUNNE, S. (2019): Process analytical technologies to monitor the liquid phase of anaerobic cultures. In: *Process Biochemistry* 76. 1-10. [10.1016/j.procbio.2018.10.005](https://doi.org/10.1016/j.procbio.2018.10.005)

### Tagungsbände (Auswahl):

- LEMOINE, A.; QUIETZSCH, M.; BARRILARO, C.; SCHWARTZ, F. H.; HIELSCHER, H.; NEUBAUER, P.; JUNNE, S. (2019): Laserrückreflexions-basierte Analyse der Partikelgrößenverteilung zur Ultraschall-gestützten Optimierung in Gärprozessen. In: *Tagungsband 8. Statuskonferenz: Energetische Biomassenutzung*. 108-109. <https://www.energetische-biomassenutzung.de/index.php?id=94>
- JUNNE, S.; EMMERICH, J.; SCHWARTZ, F. H.; MARBA-ARDEBOL, A.-M.; PELLICER ALBORCH, K.; NEUBAUER, P. (2019): In Line particle and single-cell measurements in microbial bioprocesses. European Conference on Applied Biotechnology, Florenz 2019. <https://www.aidic.it/eccel2/programma/pro.html#820junne.docx>
- JUNNE, S. (2019): Evaluation of pre-treatment methods by in-line particle size distribution monitoring with laserlight backreflection. IV. CMP International Conference on Monitoring & Process Control of Anaerobic Digestion Plants 2019. <https://www.energetische-biomassenutzung.de/veranstaltungen/tagungen/iv-cmp>
- JUNNE, S.; SCHWARTZ, H. B.; BARRILARO, C.; QUIETZSCH, M.; NEUBAUER, P. (2018): Laser-based in situ back reflection analysis of particle sizes during feedstock pre-treatment by multi capture signal interpretation. 5th BioProScale Symposium 2018, Berlin. 37-38. <https://biotechnologie.ifgb.de/sites/biotechnologie.ifgb.de/files/2019-08/Biopro2018-online.pdf>



- JUNNE, S. (2017): Laserrückreflexions-basierte Analyse der Größenverteilung von Partikeln zur Optimierung des Einsatzes von Ultraschall in Gäranlagen. In: *Tagungsband 7. Statuskonferenz Energetische Biomassenutzung*. S. 28. <https://www.energetische-biomassenutzung.de/veranstaltungen/statuskonferenzen/7-statuskonferenz>
- JUNNE, S.; KIELHORN, E.; BOCKISCH, A.; Habermann, B.; Neubauer, P. (2017): Monitoring tools for improved characterization of the liquid phase in anaerobic digestion. In: *International Symposium on Microbial Research and Biotechnology for Biomass Utilization*. S. 37. <http://ds.cc.yamaguchi-u.ac.jp/~jsps/AbstractBook.pdf>
- BioProScale International Conference, Berlin 2019 (Tandem Vortrag Sequip und TU Berlin)
- Bioökonomie-Stammtisch der Länder Berlin und Brandenburg, Potsdam 2018.
- 2. Bio-PAT Symposium, Berlin 2018

#### Präsentationen (Poster):

- EFIB Konferenz, Brüssel 2019
- EUBCE, Lissabon 2019
- ESBS International Conference on Applied Biotechnologie, Lissabon 2018
- Dechema Sensor Symposium, Dresden 2017
- Erstes frz. industrielles Biotech Symposium Lille, 2017

#### Konzept/Machbarkeitsstudie:

- Machbarkeitsstudie an Biogasanlage

#### Anlage:

- Laboranlage
- Anlagenteile / Systemkomponenten

#### Daten & Methoden:

- Szenarien
- Monitoring
- Messreihe/-programm

#### Markt:

- Marktprognosen
- Best-Practice Lösung

#### Workshops

- PAT für den Aufschluss und die Nutzung biogener Roh- und Reststoffe in anaeroben Gärverfahren. 28.01.2021, online. <https://bio-pat.org/case/bio-pat-webinar-pat-fuer-den-aufschluss-und-die-nutzung-biogener-roh-und-reststoffe>

#### Präsentationen, Auswahl (Vorträge):

- DBFZ Jahrestagung, Leipzig 2019 und 2017
- European Conference of Applied Biotechnology, Florenz 2019
- DBFZ Konferenz Monitoring in Biogasprozessen, Leipzig 2019

## ERGEBNIS FAKTEN

### Ergebnis A

Es konnte eine eindeutige Korrelation zwischen der Änderung der Partikelgrößenverteilung und der Schnelligkeit der Substratwandlung in Gärprozessen für eine Vielzahl von Substraten und Substratmischungen identifiziert werden. Die Laserlicht-basierte Rückreflexionsmessung kann somit indirekt durch die Messung der Änderung der Partikelgrößenverteilung in Kulturbrühe die Änderung der Vergärbarkeit messen.

### Ergebnis B

Das Ziel eines Optimierungsansatzes, der bezahlbar und bei einer Großzahl der Anlagen anwendbar ist, wurde erreicht. Die Effizienz von Hochleistungsultraschallanlagen kann nun gesteigert und ihr Leistungseintrag optimiert und damit der Nutzen erhöht werden. Dies wurde an verschiedenen Maßstäben bis hin zum industriellen Maßstab demonstriert.

Abbildung 3: Auswirkungen auf die Partikelgrößenverteilung in Kulturbrühe vor (blau) und nach (gelb) Behandlung mit Ultraschall im Durchlaufverfahren mittels Laserlichtrückreflexion. Die beiden Kreise bezeichnen Subklassen: i) links eine typische Größenverteilung von mikrobiellen Partikeln inkl. Agglomeraten, ii) rechts Substratpartikel.

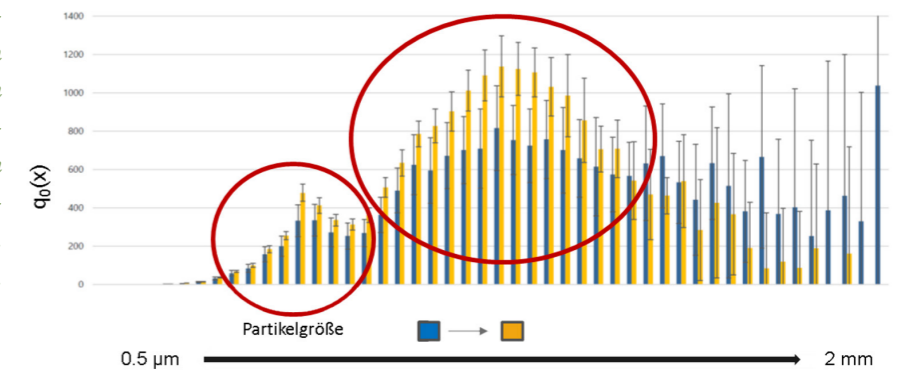
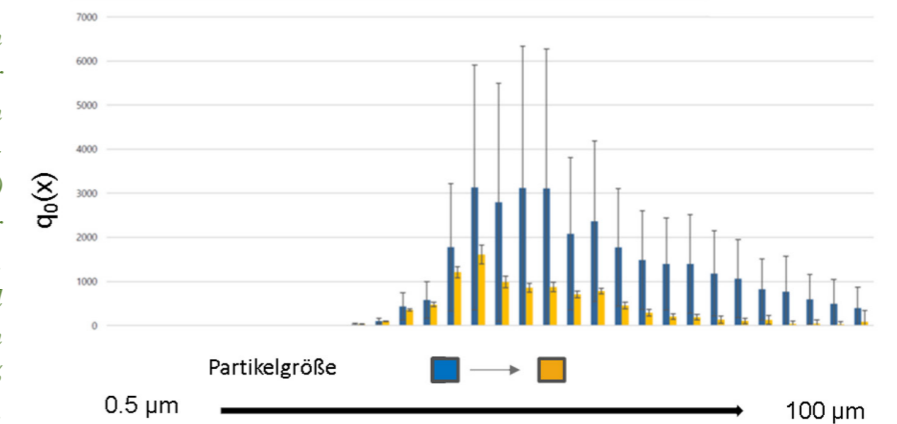


Abbildung 4: Veränderungen der Reproduzierbarkeit der Partikelgrößenverteilung in Landschaftspflegematerial-Mischungen (TS-Gehalt 8%) vor (blau) und nach der Optimierung (gelb). Das Vertrauensintervall konnte durch die verschiedenen Maßnahmen um mehr als 95% verringert werden.



### Ergebnis C

Es wurde aufgrund der gewonnenen Datenbasis ein Prozessschema entworfen. Dieses sieht vor:

- Übersendung von Inokulum aus der Anlage zur Durchführung eines Batch-Gärtests mit Substrat im Labormaßstab mit und ohne Vorbehandlung mit den hier ermittelten Parametern.
- Vergleich der Gärtests und Partikelgrößenverteilung und Feststellung der Sensitivität der Partikelgrößenverteilung auf den Gärprozess.
- Scale-up der Vorbehandlung durch Rückgriff auf kommerziell erhältliche Maschinen und Verfahren.
- Implementierung der Laserlichtrückreflexion an der Anlage vor Ort zur Partikelgrößenmessung nach Behandlung und Einstellung des Leistungseintrages als ein- bis zweitägige Serviceleistung.
- Bewertung des Erfolges im Nachgang (üblicherweise 3 Verweilzeiten) auf die Raum-Zeit-Ausbeute der verwertbaren Substratanteile als finale Validierung.

Tabelle 1: *Mindeständerung der Methan-basierten Raum-Zeit-Ausbeute (Durchschnitt) innerhalb von 7 Tagen zur Referenz ohne Ultraschall bei kontinuierlichem Betrieb zur Biogasherstellung*

Versuch I	Bedingungen	$\Delta$ Raum-Zeit-Ausbeute (7 Tage)	90 % Signifikanzintervall
Lebensmittelreste	Max. $\Delta$ D50	2.2%	0.8%
Lebensmittelreste	Halb-Max. $\Delta$ D50	n.d.	0.9%
Mais-GPS	Max. $\Delta$ D50	3.2%	0.3%
Mais-GPS	Halb-Max. $\Delta$ D50	1.3%	0.2%

## HERAUSFORDERUNGEN HEMMNISSE

Die Übertragbarkeit zwischen verschiedenen Substraten sowie die Anwendung in der Praxis in einem marktfähigen Modell muss noch gezeigt werden. Um eine entsprechende Kosteneffizienz zu gewährleisten, wurde das angesprochene Prozessschema entwickelt.

## AUSBLICK

Das entwickelte Schema kann zunächst beim Einsatz von Ultraschall in der Praxis fortlaufend validiert werden. Die überaus positiven Wirkungen der Partikelzerkleinerung mittels Hochleistungslasersonnen in Flüssigphasen bei vielfältigen biochemischen Prozessen sind hinreichend bekannt. Durch die realisierte Bypass-Lösung ist eine nachträgliche Integration von Ultraschallkomponenten in Anlagen möglich. In der Startphase ist die Laserlicht-Rückreflexions-Sonde zur Optimierung der Anlage erforderlich. Diese kann direkt während des Betriebes zum Einsatz kommen. Hier genügen typische Sondenanschlüsse, die zu sehr geringen Kosten auch nachträglich integriert werden können. Eine weitergehende Anwendung bei anderen Aufschlussverfahren wurde im Labormaßstab demonstriert und kann ebenso wie beim Ultraschall gezeigt auch im industriellen Maßstab erfolgen.

## WEITERE INFORMATIONEN

- Netzwerk Bio-PAT e.V.: [www.bio-pat.org](http://www.bio-pat.org)
- PAT für den Aufschluss und die Nutzung biogener Roh- und Reststoffe in anaeroben Gärverfahren. URL: <https://bio-pat.org/case/bio-pat-webinar-pat-fuer-den-aufschluss-und-die-nutzung-biogener-roh-und-reststoffe>
- Projektsteckbrief und Endbericht Lasersize (2020): <https://www.energetische-biomassenutzung.de/projekte-partner/details/project/show/Project/Lasersize-490>



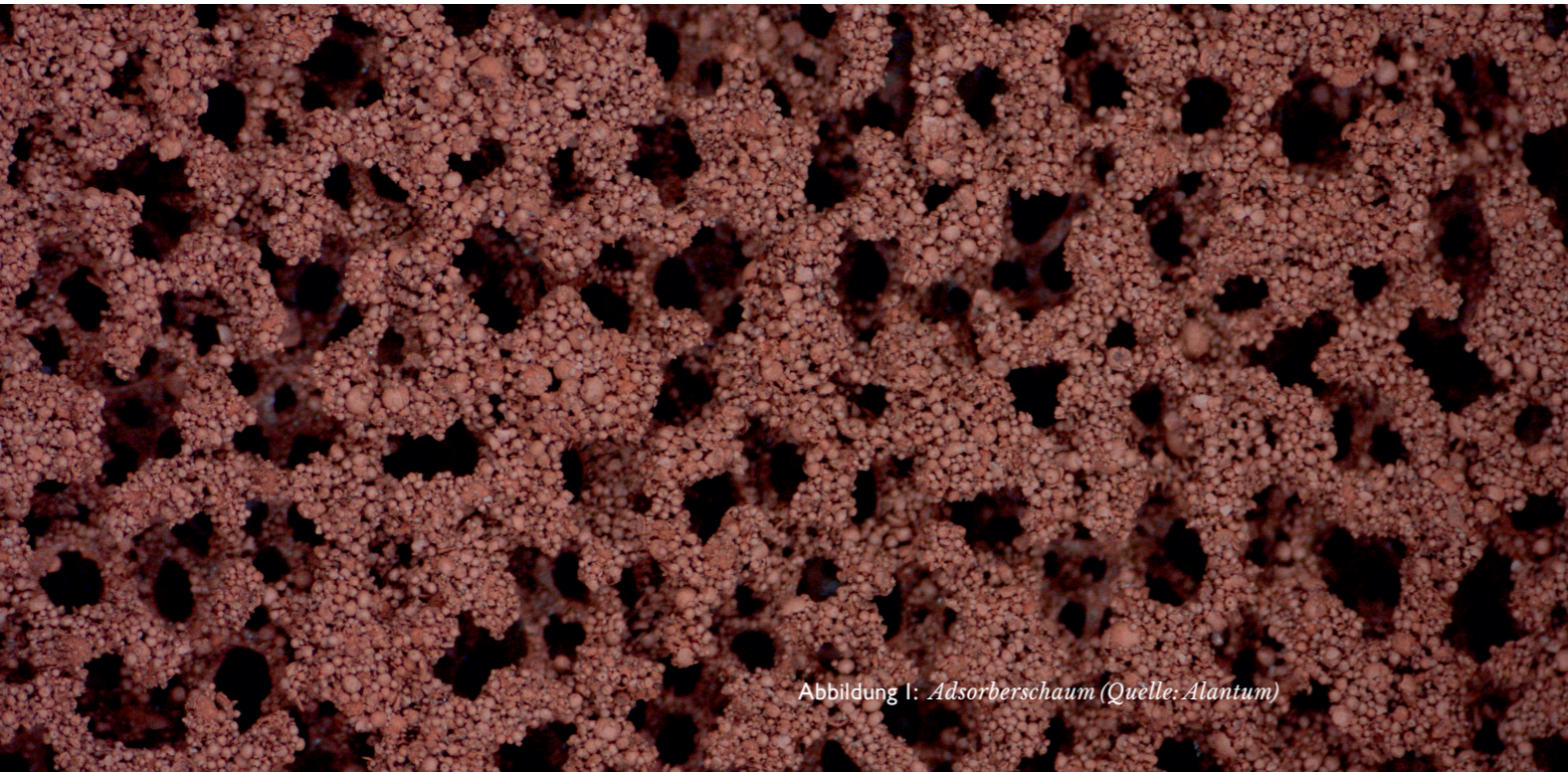


Abbildung 1: Adsorbierschaum (Quelle: Alantum)

FKZ-NR.: 03KB098  
LAUFZEIT 01.11.2014–30.06.2018  
ZUWENDUNGSSUMME 888.000,00 €

#### PARTNER

Alantum Europe GmbH (AEU),  
Balanstraße 73, 81541 München  
www.alantum.com

#### KONTAKT

Marc Lincke, Telefon:  
+ 49 351 2553-7766,  
E-Mail: marc.lincke@ikts.fraun-  
hofer.de

Fraunhofer IFAM Dresden  
Winterbergstraße 28, 01277 Dresden  
www.ifam.fraunhofer.de/de/Institutsprofil/Standorte/  
Dresden.html

#### KOORDINATION

Fraunhofer Institut für  
Keramische Technologien und  
Systeme (IKTS), Marc Lincke  
Winterbergstraße 28  
01277 Dresden  
www.ikts.fraunhofer.de

GICON - Großmann Ingenieur Consult GmbH (GICON)  
Tiergartenstraße 48, 01219 Dresden  
www.gicon.de  
Emission Partner GmbH & Co. KG (EP)  
Industriestr. 5, 26683 Saterland-Ramsloh  
www.emission-partner.de



#### Zitat des Projektleiters: Marc Lincke

Biogas wird auch zukünftig ein wichtiger und fester Bestandteil im Bereich der erneuerbaren Energie einnehmen, wobei für eine Einspeisung und Nutzung als Erdgassubstitut eine effiziente Gasaufbereitung erforderlich ist. Das in SuRIOx entwickelte Entschwefelungssystem ist für die Feinentschwefelung geeignet und ist durch den Zero-Waste-Ansatz mit seiner Recyclingfähigkeit und der Gewinnung von elementarem Schwefel ökonomisch und ökologisch einsetzbar. SuRIOx kann somit einen Beitrag zum Ausbau der Bioenergie leisten.

Marc Lincke, Uwe Petasch,  
Andreas Tillmann, Uwe Gaitzsch,  
Michael Tietze, Falko Niebling

# SuRIOx

# SULFUR REMOVAL WITH IRON OXIDE

Verfahrensentwicklung und Erprobung für  
In-Situ regenerierbare Adsorbierschäume  
zur Entfernung von Schwefelwasserstoff aus  
Biogas und Gewinnung von Schwefel

## THEMEN SCHWERPUNKTE

Im Rahmen des Verbundprojektes wurden folgende Schwerpunkte bearbeitet:

- Bewertung und Auswahl geeigneter eisenbasierter Sorbentmaterialien
- Entwicklung eines Trägermaterials (Werkstofffestlegung, Porengröße)
- Entwicklung einer Beschichtungstechnologie zum Aufbringen der Sorbens
- Prozessentwicklung zur Biogasentschwefelung und In-Situ Adsorberreaktivierung mit Luftsauerstoff
- Prozessentwicklung zur thermischen Regeneration des Adsorbers sowie zur Schwefelrückgewinnung (Ex-situ Regeneration)
- Verfahrenstechnische Erprobung Biogasentschwefelung Labor (Adsorbervolumen < 0,01 m<sup>3</sup>) und Demonstrator (Adsorbervolumen < 0,25 m<sup>3</sup>)

## ZIELE

Das Vorhaben SuRIOx hat das Ziel, die Energie- und Rohstoffeffizienz bei der Biogasentschwefelung im Kontext der Bereitstellung von Biomethan (Bio-Erdgas) im Vergleich zum Stand der Technik ambitioniert zu verbessern. Durch den Einsatz des neuartigen Entschwefelungsverfahrens können sowohl ökonomische als auch ökologische Anreize für eine weitere Erhöhung des Biomethananteils im Erdgasnetz geschaffen werden.

Ziel des Verbundprojektes SuRIOx war die Entwicklung eines neuartigen thermisch regenerierbaren Adsorbentmaterials für die Biogasentschwefelung, bestehend aus einem metallischen Schaum als Trägermaterial und einer speziell zur Entschwefelung geeigneten und regenerierbaren Sorbens, dem Eisen(III)-hydroxid (FeOOH). Im Rahmen des Projektes sollte die Materialentwicklung sowie der Nachweis der Eignung des Systems für die Feinentschwefelung, d.h. die Einhaltung des H<sub>2</sub>S-Grenzwertes von 5 mg/m<sup>3</sup> nach DVGW G260, die Entfernung des Schwefels von der Oberfläche sowie die Gewinnung von Schwefel als Rohstoff erfolgen.

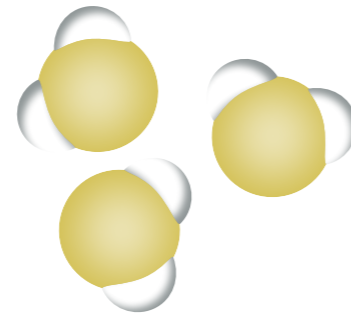


## ZUSAMMENFASSUNG

Ein wesentlicher Verfahrensschritt bei der effizienten Nutzung von Biogas vor Ort (BHKW) und am Ort der Wärmenutzung bzw. als Erdgassubstitut (Einspeisung ins Erdgasnetz) stellt die Entfernung von Schwefelwasserstoff ( $H_2S$ ) dar. Dieser Reinigungsschritt ist für die Biogasqualität und -nutzung von zentraler Bedeutung, da durch  $H_2S$  verursachte Korrosionsschädigungen vermieden werden müssen. Im speziellen Fall der Gaseinspeisung wird der  $H_2S$ -Gehalt durch die Arbeitsblätter G260 und G262 des Deutschen Vereins des Gas- und Wasserfachs e.V. (DVGW) geregelt und darf maximal  $5 \text{ mg/m}^3$  betragen.

Ziel des Verbundprojektes SuRIOx war die material- und verfahrenstechnische Entwicklung und Erprobung eines Entschwefelungssystems, welches für die Feinentschwefelung geeignet ist. Das entwickelnde Adsorbermaterial besteht aus einem metallischen Trägerschaum sowie einer speziell zur Entschwefelung geeigneten eisenhaltigen Sorbens. Im Rahmen des Projektes erfolgte die Entwicklung des eisenhaltigen Adsorbermaterials sowie der Herstellungsprozedur, bestehend aus Rezeptur der Suspension, Beschichtung, Trocknung und Kalzinierung. Durch die Nutzung von metallischen Schäumen als Träger ist eine thermische Regeneration möglich. Der Schwefel kann somit aus dem Adsorbermaterial entfernt werden. Das Adsorbermaterial steht einer weiteren Nutzung zur Verfügung.

Für dieses neuartige Adsorbermaterial wurden die einzelnen Verfahrensschritte der Biogasentschwefelung, der In-Situ Reaktivierung sowie der thermischen Ex-Situ Regeneration inkl. Schwefelrückgewinnung entwickelt und im Labormaßstab erprobt. Im Vergleich zu den bestehenden Entschwefelungsverfahren (z. B. Aktivkohle) weist dieses Verfahren mehrere ökologische und ökonomische Vorteile auf, wie z. B. die Rückgewinnung von Schwefel, das Adsorbermaterial ist thermische regenerierbar und weist eine sehr hohe Recyclingquote auf. Der gewonnene Schwefel kann als Grundchemikalie oder Dünger vermarktet werden.

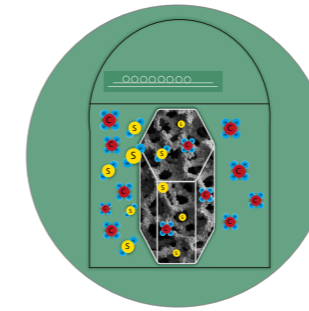


## SUMMARY (ENGL.)

An essential process step in the efficient use of biogas on site (CHP) and at the point of heat utilization or as a natural gas substitute (injection into the natural gas grid) is the removal of hydrogen sulfide ( $H_2S$ ). This cleaning step is of critical importance for biogas quality and utilization, since corrosion caused by  $H_2S$  must be avoided. In the specific case of gas injection, the  $H_2S$  content is regulated by Worksheets G260 and G262 of the German Technical and Scientific Association for Gas and Water (DVGW) and may not exceed  $5 \text{ mg/m}^3$ .

The aim of the SuRIOx project was the material and process engineering development and testing of a desulfurization system suitable for fine desulfurization. The adsorber material to be developed consists of a metallic carrier foam and a ferrous sorbent specially suited for desulfurization. The project involved the development of the ferrous adsorbent material and the manufacturing procedure, consisting of formulation suspension, coating, drying and calcination. By using metallic foams as a carrier, thermal regeneration is possible. The sulfur can thus be removed from the adsorbent material. The adsorber material is available for further use.

For this novel adsorber material, the individual process steps of biogas desulfurization, in-situ reactivation and thermal ex-situ regeneration including sulfur recovery were developed and tested on a laboratory scale. Compared to existing desulfurization processes (e.g. activated carbon), this process has several ecological and economical advantages, such as sulfur recovery, adsorber material is thermally regenerable and has a very high recycling rate. The recovered sulfur can be marketed as a base chemical or fertilizer.



## ERGEBNISSE

### Beschichtungsverfahren für Adsorberschäume

Im ersten Schritt wurden verschiedene **Eisenoxide** und **Eisenhydroxide** hinsichtlich ihrer granulometrischen Eigenschaften sowie ihrer Entschwefelungsleistung und Luft-Reaktivierbarkeit bewertet. Eisenhydroxide zeigten im Vergleich zu den Eisenoxiden eine deutlich größere Oberfläche (BET), was die Adsorption und oberflächenbasierte Reaktionen von Schwefelwasserstoff begünstigt. Die Entschwefelungsleistung wurde im Labormaßstab mit einem Glasmodul mit einem Innendurchmesser von 12 mm und einer Länge von 160 mm getestet. Aus den Durchbruchkurven des ersten Zyklus der Sorptionsmaterialien zeigte sich, dass die ausgewählten Materialien sehr unterschiedliche Entschwefelungsleistungen aufwiesen. Die Sorptionsmittel mit der größten gewichtsbezogenen Oberfläche (BET) zeigen im ersten Zyklus die beste Entschwefelungsleistung. Es handelte sich hierbei um amorphe Eisenhydroxide und Goethit. Nach der ersten und zweiten Luftregeneration konnten mit einem Eisenhydroxid noch gute Entschwefelungsleistungen erzielt werden. Daher wurden die Beschichtungsversuche mit Eisenhydroxid durchgeführt. Die Beschichtung erfolgte in den Arbeitsschritten:

- Rezepturentwicklung Suspension (Sorbenspulver Eisenoxid, Binder, Wasser)
- Suspensionszubereitung
- Beschichtung mit dem Nasspulversprühverfahren
- Trocknungsbedingungen
- Kalzinierungsbedingungen

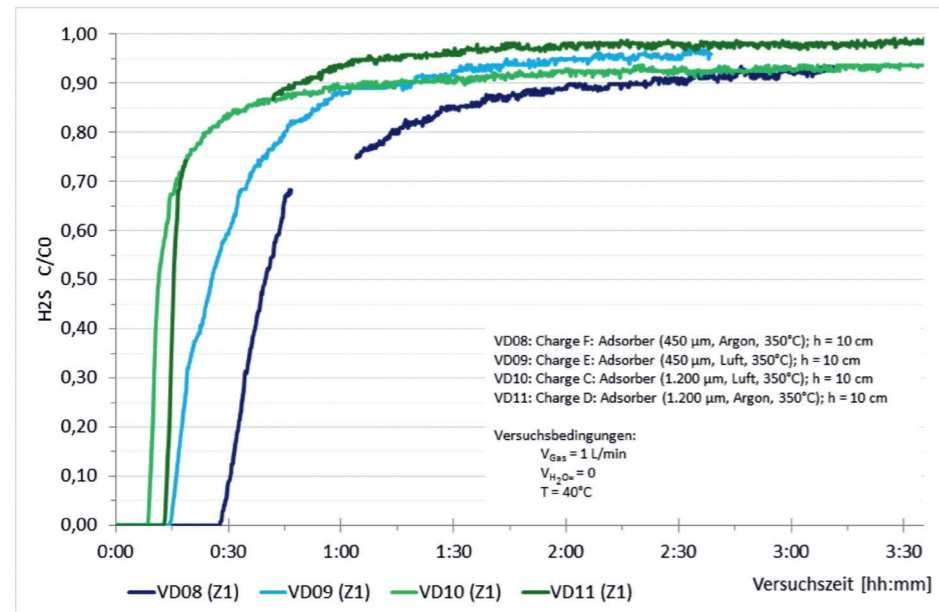
Die Suspensionsrezeptur und die Prozessparameter in jedem Arbeitsschritt wurden zum Erreichen einer Zielbeladung, einer guten Haftung des Sorbenspulvers auf dem Trägerschaum und einer guten Entschwefelungsleistung gezielt angepasst. Die Abbildung 1 zeigt beispielhaft die Durchbruchkurven für die Variation der Kalzinierungsumgebung (Argon, Luft) und der Porenweite des Trägerschaums. Die Charge F (Porenweite  $450 \mu$ , Argon,  $350^\circ\text{C}$ ) erzielt die beste Entschwefelungsleistung.

## METHODIK MASSNAHMEN

- Auswahl und Bewertung eisenbasierter Sorbensmaterialien hinsichtlich Entschwefelungsleistung
- Legierung und Voroxidation des Ni-Basis-Schaumes (Vergrößerung der Oberfläche des Ni-Träger-Schaum)
- Rezepturentwicklung Beschichtungssuspension
- Auswahl und Bewertung verschiedener Beschichtungsverfahren (Tauchbeschichtung, Nasspulversprühen) zum Auftrag der Sorbens auf den Trägerschaum
- Entwicklung Kalzinierungsprozedur zur Entfernung der organischen Bestandteile des Binders und Fixierung der Sorbens
- Labortechnische Bewertung der Entschwefelungsleistung der unterschiedlichen Adsorberschäume
- Verfahrenstechnische Erprobung und Optimierung der Prozessstufen Biogasentschwefelung und In-Situ Adsorberreaktivierung mit Luftsauerstoff (Labormaßstab)
- Verfahrensentwicklung und Erprobung der thermischen Regeneration und Schwefelrückgewinnung (Ex-situ Regeneration) im Labor
- Testung der Entschwefelungsleistung mit realem Biogas im Technikumsmaßstab
- Wirtschaftlichkeitsbetrachtung



Abbildung 2:  
Durchbruchkurven  
Charge C, D, F und E,  
jeweils Zyklus 1



Die Herstellung weiter Versuchsmuster für Labor- und Technikumuntersuchungen erfolgt mit Hilfe der Nasspulversprühbeschichtung, dem Trägerschaum 450  $\mu\text{m}$  und der Sorbens Eisenhydroxid.

### Entschwefelung und In-Situ-Luftreaktivierung im Labormaßstab

Neben den materialtechnischen Einflussgrößen kann die Performance der Adsorbenschäume stark durch verfahrenstechnischen Parameter beeinflusst werden. Im Rahmen der Laboruntersuchungen wurden daher die folgenden Parameter näher betrachtet:

- Raumgeschwindigkeit (Verweilzeit),
- Temperatur,
- Gasfeuchte,
- Druck sowie
- Konzentration  $\text{H}_2\text{S}$ .

Im Folgenden sind beispielhaft der Einfluss der Verweilzeit und der Gasfeuchte beschrieben.

Die Verweilzeit bzw. die Raumgeschwindigkeit (Reziprok der Verweilzeit) gibt an, wie lange sich das zu reinigende Gas (Reaktand) im Adsorbentbett aufhält und ist keineswegs identisch mit der Zeit, in der sich ein Reaktand in Wechselwirkung mit der Adsorbentoberfläche befindet. Unter den Laborbedingungen konnte mit sinkendem Volumenstrom (Raumgeschwindigkeit) die Durchbruchzeit (5 ppm) von ca. 2 h auf ca. 13 h verlängert werden. Die Raumgeschwindigkeit wurde dabei von 3.941 L/h auf 656 L/h abgesenkt. Der 5. Beladungszyklus wurde mit einer Raumgeschwindigkeit von 656 L/h und feuchtem Gas

durchgeführt. Die Durchbruchzeit wurde von 2 h (Zyklus 1) auf über 15 h verlängert. **Somit ist eine Trocknung des Biogas vor der Entschwefelung nicht erforderlich.**

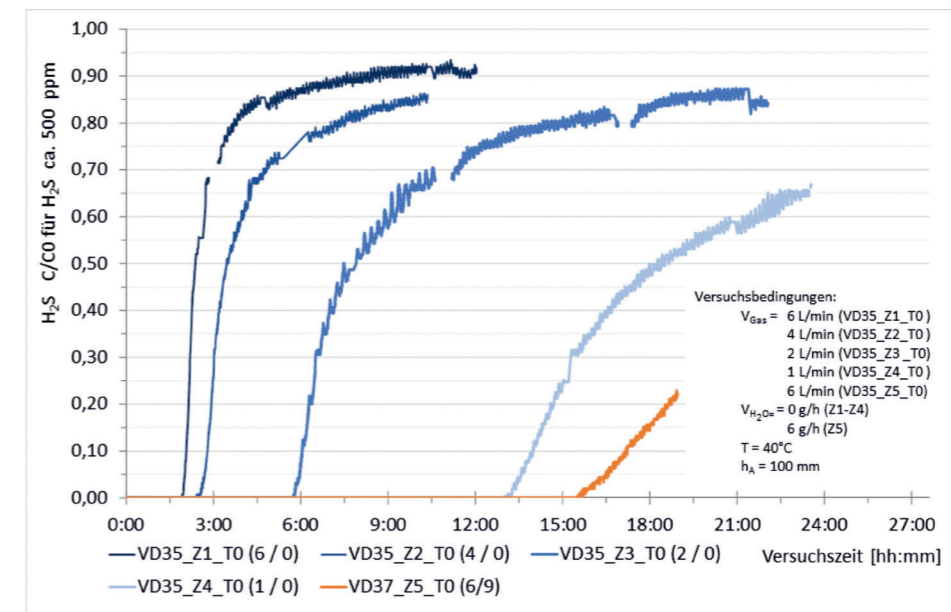


Abbildung 2:  
Durchbruchkurven  
Bewertung Raum-  
geschwindigkeit und  
Gasfeuchte

Bei der Bewertung der Sorbenspulver wurde während der Luftregeneration, insbesondere bei den Pulvern mit einer guten Reinigungsleistung, ein Anstieg der Temperatur sowie  $\text{H}_2\text{S}$ -Peaks festgestellt. In den Laboruntersuchungen mit den Adsorbentstäben zeigte sich, dass sich dies negativ auf die Entschwefelungsleistung der weiteren Zyklen auswirkt. Im Rahmen der Laborversuche konnte nachgewiesen werden, dass eine gezielte Steuerung der Luftreaktivierung durch eine Pause zwischen Beladung und Luftreaktivierung sowie durch die geregelte Zuführung von Sauerstoff möglich ist. **Durch eine gezielte Steuerung der Luftreaktivierung konnten die Entschwefelungsleistung der nachfolgenden Beladungszyklen deutlich verbessert werden.**

### Thermische Ex-Situ Regeneration und Schwefelgewinnung

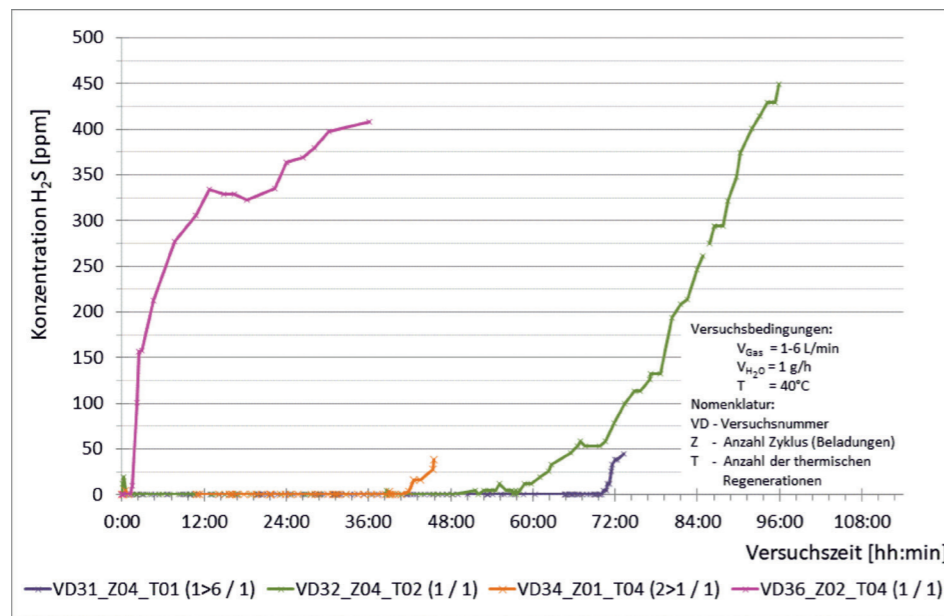
Durch den bei der In-Situ Reaktivierung auf der Schaumoberfläche verbleibenden elementaren Schwefel kommt es zu einer Verringerung der aktiven Adsorbentoberfläche. Oberhalb einer kritischen Schwefelbeladung ist die geforderte Reinheit nicht mehr zu gewährleisten, so dass das Filterelement ausgetauscht oder regeneriert werden muss. Bisherige Technologien (Aktivkohle, Zinkoxid und Trägermaterial Holzpellets) sehen in diesem Fall nur einen Austausch und Deponierung des Adsorbentmaterials vor. Dieser Nachteil soll in SuRIOx durch eine Technologie gelöst werden, durch die der Schwefel von der Schaumoberfläche thermisch entfernt wird, ohne dass es zu einer nachteiligen

Beeinflussung des Filtersystems (insbesondere zu einer Deaktivierung der Sorbens oder einer nachhaltigen Schädigung des Schaums) kommt.

Im Rahmen des Projektes wurde die Möglichkeit einer **thermischen Schwefelentfernung** im Labormaßstab untersucht. Durch Erhitzen soll der elementare Schwefel von der Oberfläche entfernt und aus dem Adsorber transportiert werden. In den ersten Untersuchungen wurde untersucht, inwiefern metallische Elemente sowie die Sorbens mit Schwefel im Temperaturbereich von 100 – 400 °C reagieren. Ab einer Temperatur von 300 °C konnten sowohl bei Ni, Fe als auch bei Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> vereinzelt Sulfidbildung detektiert werden. Um eine gute Regeneration zu erzielen wurde auch bei den folgenden Untersuchungen Temperatur von 200 – 400 °C betrachtet. Die Bildung von Sulfiden wurden weiter bewertet.

In weiteren Testreihen zur thermischen Regeneration, welche mit schwefelbeladenen Adsorbenschäume aus den labortechnischen Untersuchungen zur Entschwefelung von synthetischem Biogas stammten, wurden unterschiedliche Prozessparameter variiert. Der Schwefel wurde nahezu vollständig aus dem Adsorber entfernt und die Adsorbenschäume liefern auch nach der thermischen Regeneration noch gute Entschwefelungsergebnisse. Die Untersuchungen haben aber gezeigt, dass es durch eine mehrmalige thermische Regeneration zu einer Verschlechterung der Reinigungsleistung kommt. Nach der vierten thermischen Regeneration konnte der Grenzwert von 5 ppm nur für wenige Sekunden unterschritten werden. Im Verlauf der Versuchsreihe kam es bei den Adsorbenschäumen zu einer Verfärbung von Rot hin zum Schwarz. Ursache hierfür könnte zum einen die Ablagerung von Schwefelverbindungen auf der Oberfläche bzw. Umwandlung des Adsorbentmaterials sein. Beides hätte eine Reduzierung der aktiven Komponenten zur Folge. Durch eine weitere Anpassung der Prozessparameter können diese Umwandlungsprozesse reduziert bzw. verhindert werden.

Abbildung 4: Durchbruchkurven nach der thermischen Regeneration



**Verfahrenskonzepte**

Mit Hilfe der Ergebnisse aus den Untersuchungen im Labor und kleintechnischen Maßstab konnten erste Überlegungen zur Maßstabsübertagung durchgeführt werden. In der folgenden Abbildung ist eine mögliche Modulverschaltung als Fließschemen für die Verfahrensstufen »Biogasreinigung« (Beladung) und »In-Situ Adsorberreaktivierung« sowie für die thermische »Ex-Situ Adsorberregeneration« dargestellt.

Aktuell gibt es kein Adsorbentmaterial oder Verfahren am Markt, welches eine thermische Regeneration des

beladenen Adsorbentmaterials unter Gewinnung von elementarem Schwefel ermöglicht. In den meisten Fällen muss das mit Schwefel beladene Adsorbentmaterial kostenpflichtig als Abfall entsorgt werden. Auch eine Verwendung als Dünger bzw. als Bodenverbesserer, z.B. beladene Aktivkohle ohne Imprägnierung, wird meist durch die aktuelle Gesetzgebung (z.B. Düngemittelverordnung) eingeschränkt. Der verfolgte Ansatz verfügt somit über mehrere Alleinstellungsmerkmale sowie ökonomische und ökologische Vorteile gegenüber den etablierten Verfahren zur Biogasentschwefelung.

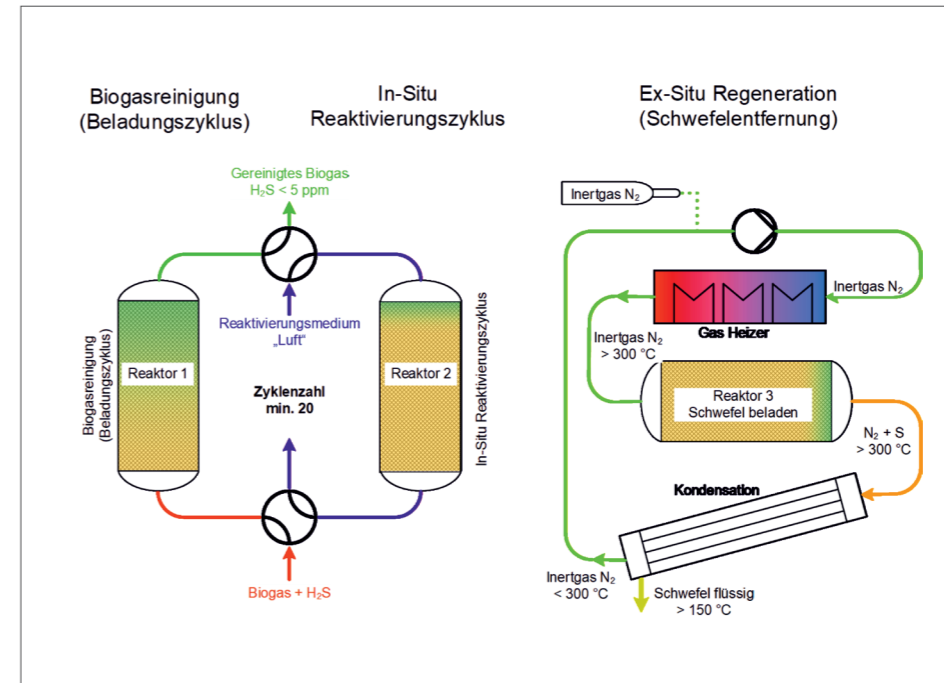


Abbildung 5: Verfahrensschritte »Biogasreinigung« und »In-Situ Adsorberreaktivierung« (links) sowie thermische »Ex-situ Adsorberregeneration« (rechts)

Im Projekt SuRIOx konnten die **katalytische Effektivität** sowie das **Degradationsverhalten** und die **Beständigkeit** nochmals **Signifikant verbessert** werden. Die Machbarkeit der Zyklen Entschwefelung (< 5 mgH<sub>2</sub>S/m<sup>3</sup>) und In-Situ Luftreaktivierungen konnte für neue als auch für mehrmals thermisch regenerierte Adsorbenschäume nachgewiesen werden. Die prozesstechnischen Herausforderungen liegen aktuell in der Reduzierung der Degradation durch die In-Situ-Luftreaktivierung sowie vor allem der Vermeidung der Umwandlungsprozesse bei der thermischen Regeneration der Adsorbentmaterialien. Die Untersuchungen in SuRIOx haben bereits erst Möglichkeiten einer Optimierung aufgezeigt. Die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung konnte aufzeigen, dass neben der Verbesserung des Degradationsverhalten auch eine Reduzierung der Materialkosten einen wichtigen Beitrag leisten kann. Daher müssen Recyclingkonzepte, wie eine erneute Beschichtung, zukünftig betrachtet werden.

**HERAUSFORDERUNGEN**

In einem laufenden Forschungsprojekt SuRIOx-pt (FKZ-Nr.: 03KB151) werden aufbauend auf diesen sehr positiven Ergebnissen die notwendigen Entwicklungsschritte in die praxisnahe Anwendung durchgeführt. Für die Maßstabsübertragung werden die Herstellungsprozesse, die Verfahrens- und Prozessparameter sowie die Modul- und Anlagenkonstruktion betrachtet, optimiert und getestet werden.

**AUSBLICK**

SuRIOx: **Paper, Projektsteckbrief**  
 SuRIOx-pt: **Projektsteckbrief**

**WEITERE INFORMATIONEN**





FKZ-Nr.: 03KB106  
 Laufzeit 01.01.2015–30.06.2018  
 Zuwendungssumme 550.969,00 €

#### KOORDINATION

DBFZ Deutsches Biomasse-  
 forschungszentrum  
 gemeinnützige GmbH  
 Torgauer Straße 116, 04347 Leipzig  
 www.dbfz.de

#### PARTNER

Projektleiter:  
 Dr. Jürgen Pröter  
 +49 (0)341 2434-517  
 juergen.proeter@dbfz.de

Mitarbeiterin:  
 Josephine Hofmann  
 +49 (0)341 2434-570  
 josephine.hofmann@dbfz.de

#### Zitat des Projektleiters: Jürgen Pröter

*Der Markt an Substrataufschlussverfahren ist vielschichtigen und unübersichtlich. Wir brauchen einheitliche, objektive und wissenschaftlich fundierte Bewertungskriterien, die den Betreibern die Entscheidung für oder gegen die Installation eines Substrataufschlusses erleichtern.*

Jürgen Pröter

#### ZIELE

Um die Gesamtenergieeffizienz von Biogasanlagen deutlich zu erhöhen und damit Emissionen z. B. aus Gärresten auf ein Minimum zu reduzieren, sollen objektive und einheitliche Bewertungskriterien zur Wirkung des Substrataufschlusses ermittelt werden. Dazu werden zum einen bestimmte Substrataufschlussverfahren auf potenzielle Auswirkungen für den Substratabbau exemplarisch untersucht. Andererseits werden hydrodynamische Effekte auf den Fermenterinhalt (Auswirkung auf die Viskosität, Partikelgröße) betrachtet und bewertet. Die Ergebnisse werden in einem Leitfaden zusammengefasst, der als Entscheidungshilfe für Anlagenbetreiber dienen soll. Die Übertragbarkeit in die Praxis wird anhand einer Demonstration des Algorithmus im großtechnischen Maßstab nachgewiesen.

#### THEMEN SCHWERPUNKTE

- Desintegration = Substrataufschluss
- Rührtechnik
- Hydrodynamik

#### HAUPT BOTSCHAFTEN

Aus der Erstanalyse zu den erwartenden Mehrerträgen kann folgendes geschlossen werden:

- Substrataufschluss wirkt anlagenspezifisch
- Potentielle Mehrerträge nicht allein auf Basis von Batch-Tests zurückschließbar
- Kontinuierliche Gärversuche mindestens im Doppelansatz über eine ausreichend lange Versuchszeit laufen lassen
- Ausgangssubstrat als Bezugsbasis für eine Massenbilanz wählen
- alle Verluste und Additive während der Desintegration berücksichtigen
- Umfassende ökonomische Analyse mit allen Aufwendungen (z. B. Substrate, Betriebsmittel), Einsparungen (z. B. Substrate) und Mehrerlösen (z. B. Gasmehrertrag) durchführen

# ELIRAS: DYNAMIK IM HEXENKESSEL

**Systematische Untersuchung von Desintegrationseffekten an Biogasanlagen: Entwicklung eines Leitfadens zur Auswahl von standortspezifisch angepassten Rühr- und Substrataufschlussverfahren für Biogasanlagen**

#### ZUSAMMEN FASSUNG

Der biologische Prozess in Biogasanlagen kann durch spezifisch angepasstes Rühren und geeignete Substrataufschlussverfahren verbessert werden. Viele Anbieter von Desintegrationsverfahren verweisen auf eine Steigerung der Methanausbeute, die den wirtschaftlichen Aufwand lohnen würde. Das Forschungsprojekt ELIRAS (FKZ: 03KB106) hat nun systematisch untersucht, wie eine verfahrensunabhängige wissenschaftliche Bewertung des Substrataufschlusses erfolgen könnte.

Ausgehend von einer klaren Trennung der drei Haupteffekte eines Substrataufschlusses, den Möglichkeiten des experimentellen Nachweises dieser und unter Berücksichtigung der Ökonomie, konnte eine Vorgehensweise zur Bewertung von Desintegrationsverfahren entwickelt werden.

## SUMMARY

The biological process in biogas plants can be improved by specifically adapted stirring and suitable substrate disintegration processes. Many suppliers of disintegration processes state an increase in methane yield that would make the economic effort worthwhile. The ELIRAS research project (FKZ: 03KB106) has therefore systematically investigated how a process-independent scientific evaluation of substrate disintegration could be carried out.

Based on a clear separation of the three main effects of substrate disintegration, the possibilities of experimental proof of these and taking into account economical aspects, a procedure for evaluating disintegration processes was developed.

## MAIN MESSAGES

From the initial analysis on the expected additional yields, the following can be concluded:

- The effect of substrate disintegration appears plant-specific.
- Potential additional yields cannot be deduced solely on the basis of batch tests.
- Run continuous fermentation tests at least in duplicate over a sufficiently long test period.
- For mass balancing select initial substrate as reference basis
- Consider all losses and additives during disintegration
- Carry out a comprehensive economic analysis with all expenses (e.g. substrates, operating materials), savings (e.g. substrates) and additional revenues (e.g. additional gas yield).

## METHODIK MASSNAHMEN

### Methode zur Bewertung von Desintegration

1. Abschätzung Handlungsbedarf, Ist-Stand-Analyse
  - Vergleich zu Referenzkonzepten
  - Berücksichtigung technischer Faktoren
  - Ausschluss von Hemmungen
2. Ökonomische Grobabschätzung
3. experimentelle Ermittlung der Veränderung des Gasertrags infolge der Desintegration, auch mit Hilfe der Modellierung
4. Finale ökonomische Berechnung
5. Handlungsempfehlung zur Installation einer Desintegrationseinheit

## FRAGEN



Im Rahmen der betriebswirtschaftlichen Bewertung stellen sich folgende Kernfragen:

- Können die untersuchten Substrataufschlussmethoden generell betriebswirtschaftliche Vorteile erzielen?
- Welche der untersuchten Substrataufschlussmethode ist die günstigste?
- Unter welchen Bedingungen kann ein Substrataufschluss mit einer bestimmten Methode wirtschaftlich vorteilhaft sein?
- Typische Frage des Betreibers: Lohnt es sich? / Typische Antwort des Ökonomen: Ja, aber.... Nein, es kommt darauf an...

Aufschlussverfahren, also eine (Vor-) Behandlung von Substraten für die Biogasanlage, werden interessanter, wenn in der Landwirtschaft statt Mais vermehrt lignozellulosehaltige Reststoffe, wie bspw. Mist und Stroh eingesetzt werden. Für den Betreiber einer Biogasanlage ist es wichtig zu wissen, dass bei seiner spezifischen Anlage enzymatische Behandlung oder ein mechanischer Faseraufschluss tatsächlich eine positive Wirkung entfalten, die sich im besten Falle in einem Mehrerlös wieder spiegeln.



Abbildung 1:  
Der enzymatische Aufschluss von Sorghumsilage (Mitte) zeigte eine Zunahme an kleinen Partikeln gegenüber der Referenz (links) und dem chemischen Substrataufschluss mit Harnstoff (rechts).  
(Quelle: DBFZ)



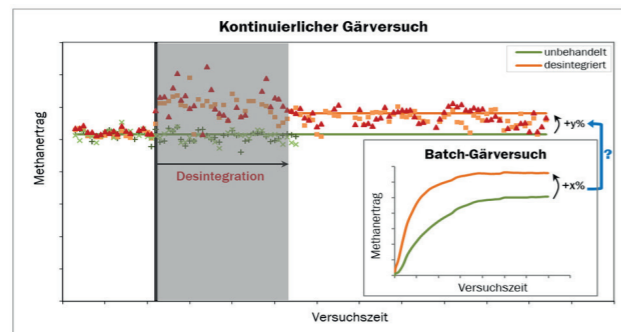
Abbildung 2:  
Forschende des DBFZ haben Weizenstroh gemahlen und mit Natronlauge eingeweicht.

Der mechanisch-chemische Substrataufschluss diente als Beispielverfahren, um Desintegration im Labormaßstab zu untersuchen. (Quelle: DBFZ)





Bisher werden hauptsächlich diskontinuierliche Batch-Tests eingesetzt, um die Wirkungsweise von Desintegrationsverfahren nachzuweisen. Die Ergebnisse dieser Labortests sind jedoch nicht ohne weiteres auf großtechnische kontinuierlich betriebene Biogasanlagen übertragbar. Während die Betreiber immer ein einzelnes Verfahren in den Blick nehmen, erklären die Wissenschaftler\*innen des DBFZ, dass die Bewertung von Substrataufschluss unabhängig vom Verfahren auf Basis einheitlicher, wissenschaftlich fundierter Kriterien erfolgen muss.



Bei der Bewertung eines Substrataufchlusses sollte zuerst der Ist-Stand einer Biogasanlage (evtl. im Vergleich mit Referenzkonzepten) aufgenommen werden, um den konkreten Handlungsbedarf abzuleiten. Wenn eine Biogasanlage bereits lange Verweilzeiten oder gut vergärbare Substrate aufweist, wird der Aufschluss kaum Effekte zeigen. Bei Anlagen mit kurzen Verweilzeiten oder Durchmischungsproblemen kann eine Substratvorbehandlung sinnvoll sein. Bevor mögliche Mehrerträge an Biogas experimentell ermittelt werden, sollte in einer ökonomischen Grobabschätzung zunächst mit angenommenen Gasmehrerträgen geschaut werden, ob ein Desintegrationsverfahren auf der Anlage überhaupt wirtschaftlich tragfähig sein kann. Danach kann die tatsächliche Veränderung der Biogasbildung durch den Substrataufschluss mit Hilfe wissenschaftlicher Analysen bestimmt werden.

**Die Wissenschaftler\*innen führen die positive Wirkung eines Substrataufchlusses auf drei Haupteffekte zurück:**



eine Erhöhung der vergärbaren organischen Anteile, z. B. durch eine Freisetzung von eingeschlossenem Zellmaterial

die Steigerung der Reaktionsgeschwindigkeit, z. B. durch eine Vergrößerung der Partikeloberfläche und

eine Veränderung der Durchmischung und Rührfähigkeit (Hydrodynamik) durch eine Veränderung der Rheologie

*Abbildung 3: Die Steigerungen des Methanertrags, die infolge eines Substrataufchlusses (Desintegration) im Batch-Test gemessen werden, können nicht ohne Weiteres in den kontinuierlichen Prozess und somit nicht auf eine großtechnische Praxisanlage übertragen werden. Das bestätigen Batch-Tests und kontinuierliche Labor-Gärversuche von mechanisch-chemisch (Mahlen+Natronlauge) aufgeschlossenem Stroh. (Quelle: DBFZ)*

Durch einen Substrataufschluss können Sink- und Schwimmschichten vermieden und zeitgleich die Pumpfähigkeit des Fermenterhalts verbessert werden. Ein gut durchmischter Reaktor führt zu mehr Reaktionsvolumen und erhöht die Verweilzeit.



*Abbildung 4: Der thermische Aufschluss im Autoklaven bei 160 °C (Mitte) und 190 °C (rechts) führte zu einer Veränderung der physikalischen Eigenschaften der Sorghumsilage. Im Vergleich zur Referenz (links) sanken leicht aufschwimmende Partikel ab. (Quelle: DBFZ)*

Es gibt im Anlagenbetrieb spürbar weniger Störfälle. Die wissenschaftliche Bewertung sollte demnach auch mögliche Veränderungen der Durchmischung, den dritten Effekt eines Substrataufchlusses berücksichtigen.

Die ersten beiden Effekte einer Desintegration sollten nicht allein auf Basis von Batch-Tests untersucht werden, sondern auch unter Zuhilfenahme kontinuierlicher Gärversuche und der Modellierung. Der im Ergebnis der wissenschaftlichen Betrachtungen ermittelte erwartete Gasmehrertrag fließt in eine finale ökonomische Berechnung ein, deren Ergebnis Handlungsempfehlungen zur Installation eines Desintegrationsverfahrens sind.

Eine wichtige Botschaft geben die Wissenschaftler\*innen mit auf den Weg: »Substrataufschluss wirkt immer anlagenspezifisch«. In der Bewertung muss immer auf die Bedingungen der realen Biogasanlage geschaut werden, um Handlungsempfehlungen abgeben zu können.

## HERAUSFORDERUNGEN HEMMNISSE

- Vielschichtiger, unübersichtlicher Markt zu Desintegrationsverfahren
- Fehlende Kriterien zur einheitlichen Bewertung von Desintegrationsverfahren
- Übliche Herangehensweise zur Ermittlung der Effekte von Desintegrationsverfahren: Batch-Tests »» Kritik: Eingeschränkte Aussagekraft, keine Übertragbarkeit auf den kontinuierlichen Prozess einer großtechnischen Biogasanlage

Die größte Herausforderung im Projekt war der Nachweis eines Effektes eines Substrataufschlusses auf die Biogasbildung, welcher sowohl im Batch- als auch im kontinuierlichen Betrieb im Labormaßstab als statistisch signifikant angesehen werden konnte.

## AUSBLICK

Hersteller von Desintegrationsverfahren können die Zusammenarbeit mit dem DBFZ nutzen, um innovative Ansätze zum Substrataufschluss unabhängig und mit hohem Qualitätsanspruch bewerten zu lassen. Im Ergebnis des Vorhabens ELIRAS können allgemeine Vorgaben und Handlungsempfehlungen für den Einsatz von Desintegrationsverfahren abgeleitet werden. Durch die Zusammenfassung der gewonnenen Erkenntnisse in Form eines Leitfadens werden diese den Vertretern aus Wissenschaft und Praxis zur Verfügung gestellt. Das bestehende Modell wird in nachfolgenden Forschungsprojekten sowohl im Labor- als auch im Praxismaßstab angewendet und auf Grundlage dieser Messdaten evaluiert und weiterentwickelt.

In einem Folgeprojekt mit der Universität Hohenheim (OptiFlex, FNR) wird nun intensiver auf die Hydrodynamik geschaut, da sich gerade aus Substrateigenschaften und dem sich ausbildenden Strömungs- und Durchmischungszustand im Zusammenhang mit verschiedenen Anlagenkomponenten, Optimierungsansätze ableiten lassen. Ferner könnte auf Grundlage der im Vorhaben ELIRAS ermittelten Zusammenhänge zwischen Durchmischung und Biogasbildung in Zusammenarbeit mit einem mittelständigen Unternehmen ein rührwerksbasiertes Regelungskonzept entwickelt werden.

## WEITERE INFORMATIONEN

- Projektsteckbrief und Endbericht: [www.energetische-biomassenutzung.de/projekte-partner/details/project/show/Project/ELIRAS-464](http://www.energetische-biomassenutzung.de/projekte-partner/details/project/show/Project/ELIRAS-464)
- Wissenschaftliche Paper:
  - HOFMANN, J.; PELTRI, G.; STRÄUBER, H.; MÜLLER, L.; SCHUMACHER, B.; MÜLLER, U.; LIEBETRAU, J. (2016): Statistical Interpretation of Semi-Continuous Anaerobic Digestion Experiments on the Laboratory Scale. In: *Chem. Eng. Technol.* 39, 4. 643–651. [10.1002/ceat.201500473](https://doi.org/10.1002/ceat.201500473)
  - HOFMANN, J.; MÜLLER, L.; WEINRICH, S.; DEBEER, L.; SCHUMACHER, B.; VELGHE, F.; LIEBETRAU, J. (2020): Assessing the Effects of Substrate Disintegration on Methane Yield. In: *Chem. Eng. Technol.* 43, 1. 47–58. [10.1002/ceat.201900393](https://doi.org/10.1002/ceat.201900393)
- Vorträge/Beiträge in Tagungsbänden zu ELIRAS:
  - 2. Mitteldeutschen Anwenderforum Rührtechnik (2016)
  - 13. Innovationskongress in Osnabrück 2019 – Tagungsband: [www.biogas-innovationskongress.de/bestellung-tagungsband.html](http://www.biogas-innovationskongress.de/bestellung-tagungsband.html)
  - KTBL Tagung 2019: Biogaskongress
  - Statuskonferenz Förderprogramm »Energetische Biomassenutzung« 2019: [www.energetische-biomassenutzung.de/fileadmin/media/3\\_Veranstaltungen/8\\_SK/Programm\\_Anfahrt\\_Hotels/FI\\_Vortr%C3%A4ge/4\\_Hofmann\\_Kornatz\\_ELIRAS\\_8SK2019.pdf](http://www.energetische-biomassenutzung.de/fileadmin/media/3_Veranstaltungen/8_SK/Programm_Anfahrt_Hotels/FI_Vortr%C3%A4ge/4_Hofmann_Kornatz_ELIRAS_8SK2019.pdf)



# SYSTEMRELEVANT

Reststoff-, Wärme und Stromnutzung





FKZ-Nr.: 03KB107  
 Laufzeit 01.01.2016 - 31.05.2018  
 Zuwendungssumme: 148.461 €

#### KOORDINATION

Witzenhausen-Institut für AbE Umwelt  
 und Energie GmbH  
 Werner-Eisenberg-Weg 1  
 37213 Witzenhausen  
 www.witzenhausen-institut.de

#### KONTAKT

Projektleiter: Thomas Raussen  
 Direkter Ansprechpartner:  
 Dr. Felix Richter  
 Telefon: +49 (0)5542 9380 25  
 E-Mail:  
 f.richter@witzenhausen-institut.de

#### Zitat des Projektleiters: Thomas Raussen (Witzenhausen-Institut)

*Bei der Diskussion organischer Abfälle aus den Haushalten, steht nahezu immer das Thema »Biotonne« im Vordergrund. Grün-OPTI zeigt uns allen, dass sowohl das stoffliche Potenzial in Form qualitativ sehr hochwertiger Komposte als auch das energetische Potenzial des enthaltenen grobstückigen Holzes relevanter ist.*

*Eine Verdopplung der aktuellen Sammelleistung ist möglich und ökologisch sinnvoll. Den kaum merklichen Mehrkosten für die Bürger stehen ein guter Service und ein erheblicher Beitrag zum Umwelt- und Klimaschutz gegenüber!*



## THEMEN SCHWERPUNKTE

- Grüngut
- Stofflich-energetische Verwertung
- Potenzialanalyse
- Rechtliche Rahmenbedingungen
- Festbrennstoff
- Kommunale Konzepte

## ZIELE


- 1** Ermittlung des Ist-Stands der Grüngutentsorgung und der Potenziale von Grüngut in Deutschland im Hinblick auf die Klimaschutz- und Ressourcenrelevanz
- 2** Dokumentation der rechtlichen Rahmenbedingungen für die Erfassung, Aufbereitung und Verwertung von Grüngut in Deutschland
- 3** Dokumentation und Bewertung der kommunalen Erfassung von Grüngut in Deutschland
- 4** Dokumentation und Bewertung der Aufbereitung und Verwertung von Grüngut in Deutschland
- 5** Ansätze zur Optimierung der Qualität von Brennstoffen aus Grüngut im Rahmen der Durchführung und Auswertung von Praxisversuchen
- 6** Ansätze zur Optimierung von Grüngut-Wertschöpfungsketten


# GRÜN-OPTI


## Optimierung der Erfassung, Aufbereitung und stofflich-energetischen Verwertung von Grüngut in Deutschland

Nur knapp die Hälfte des theoretischen Grüngutpotenzials wird derzeit über die Systeme der öffentlich-rechtlichen Entsorgungsträger (örE) erfasst und somit stoffstromspezifisch verwertet. Bei einer separaten Erfassung von 50% der derzeit nicht erfassten Mengen könnten unter Beibehaltung der aktuellen Entsorgungswege zusätzlich ca. 1,5 Mio. Mg Kompost, ca. 450 GWh Strom und ca. 300 GWh Wärme erzeugt bzw. ca. 0,9 Mio. MgCO<sub>2</sub> eingespart werden. Bei der Erfassung von Grüngut zeigt sich, dass vor allem eine entgeltfreie Abgabe haushaltsüblicher Mengen sowie ein dichtes Netz dezentraler Sammelplätze hohe spezifische Erfassungsmengen fördern. Aus einer Befragung der 387 örE in Deutschland geht hervor, dass ca. drei Viertel der Grüngutkompostierungsanlagen holziges Material zur Brennstoffverwertung (im Durchschnitt ca. 18% des Grüngutinputs) abtrennen. Für optimierte Grüngut-Wertschöpfungsketten ist ein zentrales Qualitätsmanagement essentiell, das alle Bereiche von der Erfassung über die Logistik und Aufbereitung, bis zur (separaten) Verwertung der holzigen und krautigen Grüngutanteile sowie des Komposts umfasst.

**Felix Richter,**  
**Thomas Raussen,**  
**Jana Wagner,**  
**Michael Kern**

 1,5 Mio. Mg  
mehr Kompost

 ca. 450 GWh  
mehr Strom

 ca. 300 GWh  
mehr Wärme

## ZUSAMMEN FASSUNG



## SUMMARY (ENG.)

Only about 50% of the theoretical green waste potential is currently collected via the systems of the public waste management authorities and thus used specifically for material flows. If only 50% of the currently uncollected quantities were collected separately, an additional 1.5 million tons of compost, 450 GWh of electricity and 300 GWh of heat could be generated, or approximately 0.9 million tons of CO<sub>2</sub> saved, while retaining the current disposal channels. The collection of green waste shows that above all a free disposal of normal household quantities and a dense network of decentralised collection points promote high specific collection volumes. A survey of the 387 public waste management authorities in Germany reveals that about three quarters of the green waste composting plants separate woody materials for fuel exploitation (on average approx. 18% of the green waste input). A central quality management system is essential for optimised green waste value chains, covering all areas from collection, logistics and treatment up to a (separate) recycling of woody and herbaceous green waste as well as compost.

## METHODIK MAßNAHMEN

- Dokumentation und Bewertung der derzeitigen Erfassungssysteme für Grüngut in Deutschland sowie der Einflussfaktoren auf die Erfassungsmengen durch Auswertung der Abfallbilanzen der Bundesländer sowie der verfügbaren Informationen zur Abfallentsorgung der 387 öffentlich-rechtlichen Entsorgungsträger (öRE) in Deutschland
- Abschätzung der Mengen-, Energie- und Treibhausgaseinsparpotenziale auf Basis der derzeitigen Verwertungspfade von Grüngut in Deutschland
- Durchführung und Auswertung einer schriftlichen Umfrage bei den 387 öRE zur gegenwärtigen Situation der Aufbereitung von Grüngut unter Berücksichtigung der späteren Verwertung mit einem Fokus auf der energetischen Verwertung holziger Siebüberläufe
- Erarbeitung und Darstellung von Ansätzen zur Optimierung von Grüngut-Wertschöpfungsketten
- Dokumentation und Bewertung der derzeit verbindlichen rechtlichen Rahmenbedingungen in Deutschland bei der Erfassung, Aufbereitung und Verwertung von Grüngut unter besonderer Berücksichtigung des aktuellen Diskussionsstands zu nicht eindeutig geregelten Tatbeständen
- Durchführung von Praxisversuchen zu unterschiedlichen Zeitpunkten im Jahr (d. h. mit unterschiedlich zusammengesetztem Inputmaterial) in drei verschiedenen Grüngutbehandlungsanlagen zur Untersuchung von Möglichkeiten zur Qualitätsoptimierung von Brennstoffen aus Grüngut

## ERGEBNISSE

### Ergebnisse auf einen Blick

#### Publikation:

- Artikel in Fachzeitschriften und Tagungsbänden
- Artikel in Fachzeitungen

#### Daten & Methoden:

- Modell/Modellierung
- Szenarien
- Auswertung Abfallbilanzen, Satzungen etc.

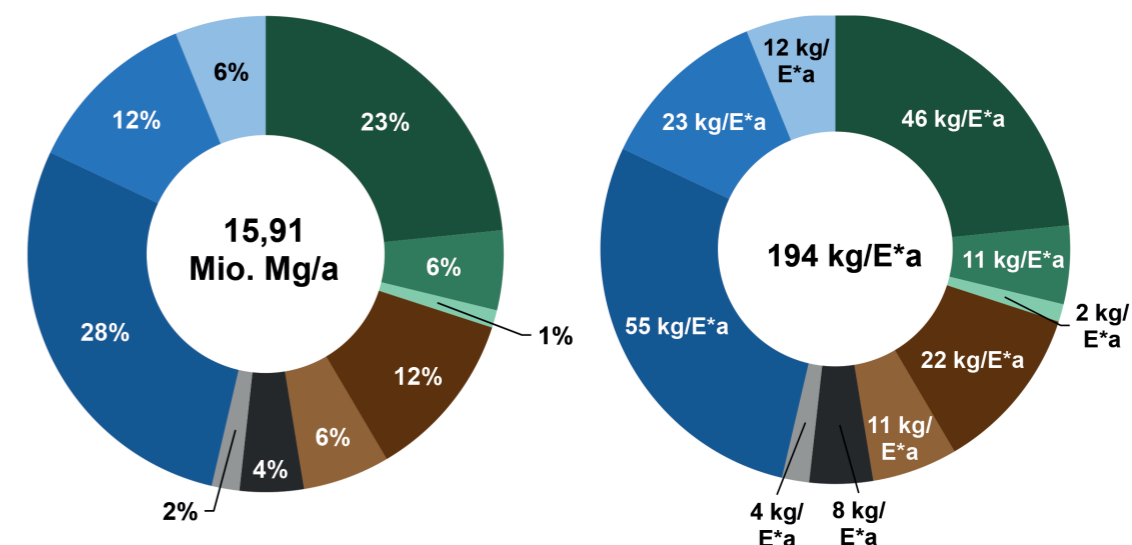
## Ist-Stand der Grüngutentsorgung und Potenziale von Grüngut in Deutschland

Das theoretische Potenzial von Grüngut aus Privatgärten wurde anhand von statistischen Daten und in Anlehnung an KRAUSE et al. (2014) berechnet und liegt bei ca. 194 kg pro Einwohner (E) und Jahr (a) bzw. 15,91 Mio. Mg/a (Abbildung 1).

Betrachtet man zusätzlich kommunale Grünanlagen, so erhöht sich das theoretische Grüngutpotenzial auf ca. 255 kg/E\*a bzw. 20,86 Mio. Mg/a. Knapp die Hälfte des theoretischen Grüngutpotenzials aus Privatgärten wurde 2015 entweder separat als Grüngut (30%) oder über die Biotonne (18%) erfasst und somit stoffstromspezifisch verwertet. Die andere Hälfte wurde entweder zur Eigenkompostierung verwendet bzw. als Mulch auf der Fläche belassen (28%), im eigenen Ofen verbrannt (12%), durch offene Verbrennung bzw. illegale Ablagerung beseitigt (6%) oder über die Restmülltonne entsorgt (6%).

## ERGEBNIS DARSTELLUNG

- Grüngut → Kompostierung
- Grüngut → Verbrennung
- Grüngut → Vergärung
- Biotonne → Kompostierung
- Biotonne → Vergärung
- Restmülltonne → MVA
- Restmülltonne → MBA
- Ohne Erfassung → Eigenkomp./Mulch
- Ohne Erfassung → Verbrennung
- Ohne Erfassung → Beseitigung



Witzenhausen-Institut  
für Abfall, Umwelt und Energie GmbH

Abbildung 1: Theoretisches Grüngutpotenzial mit dem Ist-Stand der Entsorgung von Grüngut aus Privatgärten im Jahr 2015

Über die verschiedenen Verwertungs- bzw. Entsorgungswege wurden aus Grüngut von Privatgärten im Jahr 2015 ca. 2,5 Mio. Mg Kompost (nur Kompost von Kompostierungsanlagen, ohne Eigenkompost), ca. 0,8 Mio. Mg flüssiger Gärrest, ca. 1.000 GWh Strom und ca. 900 GWh genutzte Wärme erzeugt sowie in Summe eine Einsparung von Treibhausgasen (THG) von ca. 0,7 Mio. Mg CO<sub>2</sub> Äq. und eine Einsparung des kumulierten fossilen Energieaufwands (KEA fossil) von ca. 3.300 GWh erzielt.

## ZUKUNFTS AUSSICHTEN

Bei der Betrachtung unterschiedlicher Zukunftsszenarien der Grünguterfassung (Verwertungspfade werden als gleichbleibend unterstellt) liegt das **größte Potenzial zur Erzeugung von Energie und hochwertiger, stofflich nutzbarer Produkte in der separaten Erfassung bislang nicht über bestehende Erfassungssysteme erfasster Grüngutmengen:**

- Szenario 1 (SZ 1): Bislang über den Restmüll entsorgtes Grüngut wird vollständig separat als Grüngut erfasst.
- Szenario 2 (SZ 2): Wie Szenario 1 UND jeweils 25 % des bislang in den drei Entsorgungswegen »ohne Erfassung« befindlichen Grünguts wird separat als Grüngut erfasst.
- Szenario 3 (SZ 3): Wie Szenario 1 UND jeweils 50 % des bislang in den drei Entsorgungswegen »ohne Erfassung« befindlichen Grünguts wird separat als Grüngut erfasst

Im Szenario 3 könnte die Erzeugung von Kompost um ca. 60%, die Erzeugung von Strom um ca. 50%, die Erzeugung von genutzter Wärme um ca. 40%, die Einsparung von THG um ca. 120% und die Einsparung des kumulierten Energieaufwands KEA fossil um ca. 60% gesteigert werden (Abbildung 2).

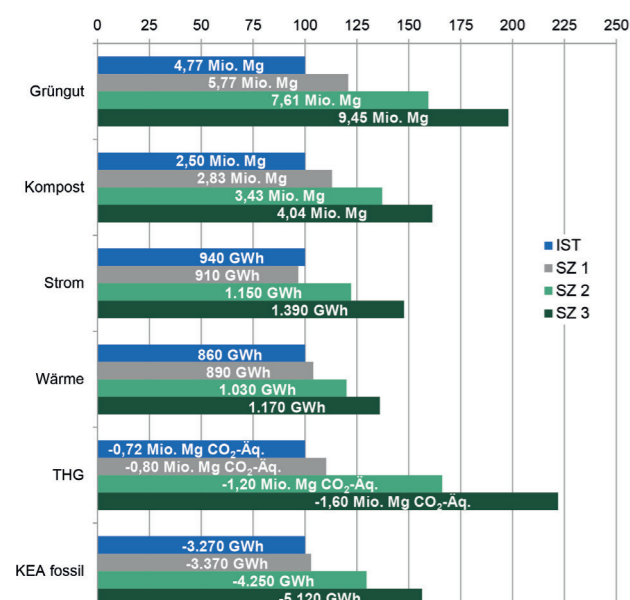


Abbildung 2:

*Relative Veränderungen der separaten Erfassung von Grün- und Kompost, der Erzeugung von Kompost, Strom und genutzter Wärme aus diesem Grün- und Kompost sowie der Einsparung von Treibhausgasen (THG) und kumuliertem fossilen Energieaufwand (KEA fossil) in drei Zukunftsszenarien (SZ1, SZ2, SZ3) im Vergleich zum Ist-Stand (IST) im Jahr 2015. Basisparameter für THG und KEA fossil aus: Knappe et al. (2012), Vogt et al. (2012), Reinhardt (2016).*

## RECHTLICHE RAHMEN BEDINGUNGEN

Die in diesem Vorhaben betrachteten rechtlichen Rahmenbedingungen betreffen die Erfassung und Aufbereitung von Grün- und Kompost sowie die thermische Verwertung von holzigen Siebüberläufen als Brennstoff. Bei der Erfassung über Sammelplätze ist die Lagerkapazität des Platzes zu beachten, da ab einer Lagerkapazität von 100Mg/a an nicht-gefährlichen Abfällen eine immissionsschutzrechtliche Genehmigung für den Platz erforderlich ist. Alle Plätze, auf denen eine Aufbereitung von Grün- und Kompost mit einem

Zerkleinerungs- oder Siebungsaggregat mit einer Durchsatzkapazität von mehr als 10 Mg am Tag stattfindet, sind ebenfalls immissionsschutzrechtlich genehmigungsbedürftig.

**Durch eine entsprechende Aufbereitung können Brennstoffe aus Grün- und Kompost ihre Abfalleigenschaft verlieren bzw. als naturbelassene Brennstoffe angesehen werden.** Dies betrifft den Transport dieser Brennstoffe und den Einsatz in Feuerungsanlagen.

## KOMMUNALE ERFASSUNG VON GRÜNGUT IN DEUTSCHLAND

Insgesamt wurden 2015 in Deutschland rund 4,9 Mio. Mg bzw. durchschnittlich etwa 60 kg/E\*a Grüngut separat erfasst (ABFALLBILANZEN DER BUNDESLÄNDER 2015). Die spezifische Erfassungsleistung der einzelnen öffentlich-rechtlichen Entsorgungsträger (örE) reichte dabei von 0 bis 310 kg/E\*a. Überdurchschnittlich hohe Erfassungsleistungen wurden vor allem in den Bundesländern Niedersachsen, Baden-Württemberg, Rheinland-Pfalz, Saarland und Bayern erzielt, unterdurchschnittliche Erfassungsleistungen in Schleswig-Holstein, Sachsen, Hamburg und Berlin.

Erfassung: ↑  
Baden-Württemberg, Bayern,  
Niedersachsen, Rheinland-Pfalz,  
Saarland

Erfassung: ↓  
Berlin, Hamburg, Sachsen,  
Schleswig-Holstein,

**Den größten Einfluss auf die Erfassungsmengen bei Bringsystemen, die im Durchschnitt höhere Erfassungsmengen generieren als Holsysteme, haben die Gebühren- bzw. Entgeltregelung bei der Abgabe haushaltsüblicher Mengen von Grün- und Kompost sowie die Verteilung bzw. räumliche Nähe der Grüngutsammelstellen.** Die 227 örE, bei denen die Abgabe haushaltsüblicher Mengen von Grün- und Kompost generell entgeltfrei ist, erfassten 2015 im Durchschnitt 75 kg/E\*a, während die 138 örE, bei denen für diese Mengen eine generelle Entgeltspflicht besteht, nur durchschnittlich 39 kg/E\*a erfassten (Abbildung 3).

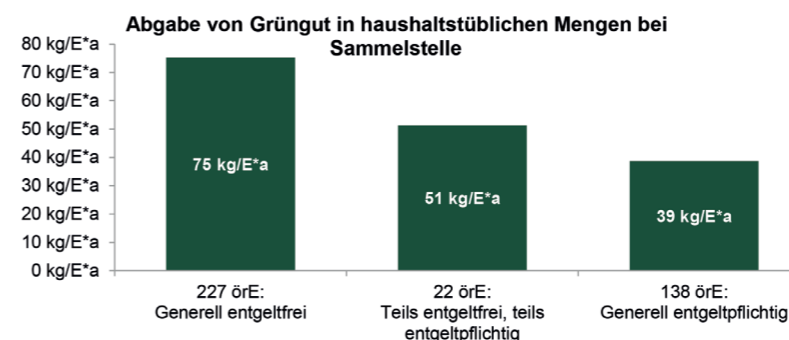
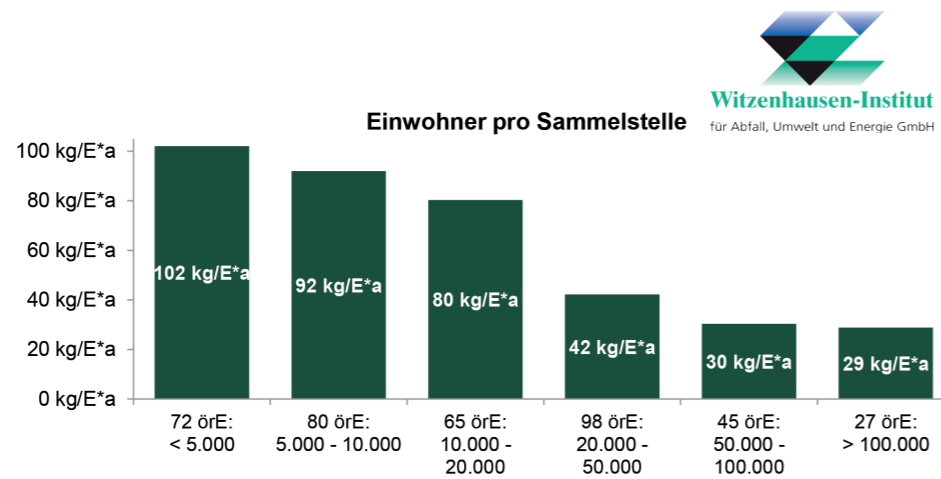


Abbildung 3: *Durchschnittliche einwohnerspezifische Erfassungsmengen für Grün- und Kompost durch die öffentlich-rechtlichen Entsorgungsträger (örE) in Abhängigkeit eines Entgelts für die Abgabe von Grün- und Kompost bei Sammelstellen im Jahr 2015 KEA fossil aus: Knappe et al. (2012), Vogt et al. (2012), Reinhardt (2016).*

Ein Indikator für die räumliche Nähe der Sammelstellen ist die Anzahl an Einwohnern, die auf eine Sammelstelle entfallen, da tendenziell die individuelle Entfernung zur Sammelstelle umso geringer ist, je weniger Einwohner auf dem Gebiet eines örE pro Sammelstelle vorhanden sind. Die 72 örE, die weniger als 5.000 Einwohner pro Sammelstelle aufweisen, erfassten 2015 durchschnittlich 102 kg/E\*a Grüngut, während die 27 örE, die mehr als 100.000 Einwohner pro Sammelstelle aufweisen, nur 29 kg/E\*a erfassten (Abbildung 4).



Abbildung 4: Durchschnittliche einwohnerspezifische Erfassungsmengen für Grüngut durch die öffentlich-rechtlichen Entsorgungsträger (örE) in Abhängigkeit der Einwohner pro Sammelstelle im Jahr 2015



**Witzenhausen-Institut**  
für Abfall, Umwelt und Energie GmbH

## AUFBEREITUNG UND VERWERTUNG VON GRÜNGUT IN DEUTSCHLAND

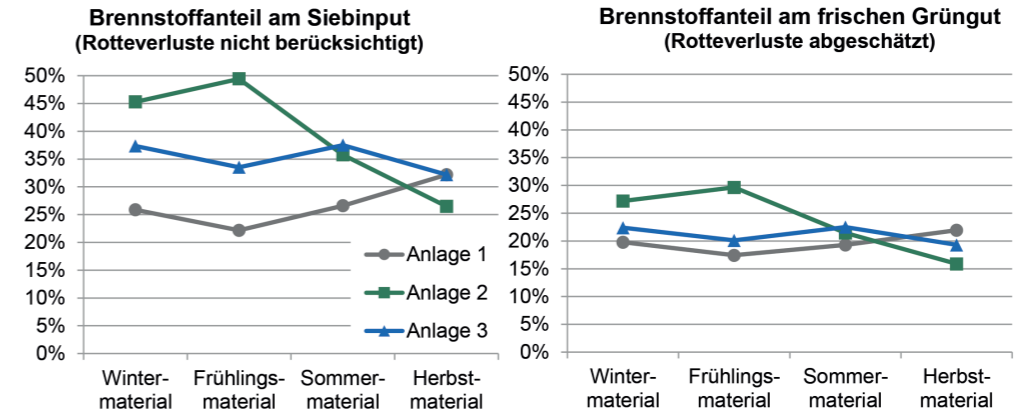
Um die gegenwärtige Situation der Aufbereitung und Verwertung von Grüngut in Deutschland mit einem Fokus auf der energetischen Verwertung holziger Siebüberläufe zu erfassen, wurde eine Umfrage unter den 387 örE durchgeführt. In den zurückgesandten Fragebögen wurden insgesamt 176 Kompostanlagen beschrieben, von denen über die Hälfte eine genehmigte Behandlungskapazität von weniger als 10.000 Mg/a aufweist und von denen rund 80% das Grüngut in einer offenen Mietenkompostierung behandeln.

- Bei knapp drei Viertel der Anlagen werden Siebüberläufe als Brennstoffe ausgeschleust.
- Der Anteil dieser Brennstoffe beträgt bei einer Spanne von 0% bis 50% im Mittel der Anlagen 18% des Grüngutinputs.
- Die so erzeugten Brennstoffe werden zum überwiegenden Teil (66% im Mittel der Anlagen) direkt an Heizkraftwerke vermarktet.
- Zu einem weiteren Teil (22% im Mittel der Anlagen) werden diese Brennstoffe an Brennstoffhändler abgegeben, die wiederum hauptsächlich Heizkraftwerke beliefern.
- Nur ein geringer Anteil wird über reine Heizanlagen (7%) bzw. über mehrere Verwertungswege (5%) vermarktet.

## OPTIMIERUNG DER QUALITÄT VON BRENNSTOFFEN AUS GRÜNGUT

In Bezug auf die Frage, wie sich die Qualität von Brennstoffen aus Grüngut optimieren lässt, wurden Praxisversuche zu unterschiedlichen Zeitpunkten im Jahr (d. h. mit unterschiedlich zusammengesetztem Inputmaterial) in drei verschiedenen Grüngutbehandlungsanlagen durchgeführt. Die Anlagen unterschieden sich sowohl hinsichtlich der Aufbereitungsstrecke als auch hinsichtlich der Verwertung des abgeseibten Brennstoffs (extern in BMHKW, intern in eigenen Heizanlagen).

Während bei einer Anlage die zu erwartenden Unterschiede der Korngrößenverteilung nach der Siebung im Jahresverlauf (deutlich mehr Mittel- und Überkorn zur Verwertung als Brennstoff im baum- und strauchschnittreichen Winter- und



**Witzenhausen-Institut**  
für Abfall, Umwelt und Energie GmbH

Abbildung 5: Brennstoffanteile in Massen-% am Siebinput (links) und am frischen Grüngut (rechts) zu vier verschiedenen Jahreszeiten, aufbereitet in jeweils drei Anlagen

Frühlingsmaterial im Vergleich zum sehr laubreichen Herbstmaterial) auftraten, zeigten sich bei den anderen zwei Anlagen nur unwesentliche Unterschiede im Jahresgang. Vieles deutete darauf hin, dass nicht nur der **Materialinput**, sondern auch die **Wetterlage**, vor allem Niederschläge, in der unmittelbaren Zeit vor dem Absieben des offen gelagerten Grünguts einen **großen Einfluss auf die Verteilung der einzelnen Fraktionen bei der Siebung** haben könnte. Bei der Anlage, die einen ausgeprägten Jahresgang in der Korngrößenverteilung aufwies, wurden zwischen 15% (Herbstmaterial) und 30% (Frühlingsmaterial) des frischen Grünguts als Brennstoff ausgeschleust. Bei den anderen beiden Anlagen lag der Anteil über das Jahr hinweg gleichbleibend bei ca. 20% (Abbildung 5).

Eine Rottephase von einigen Wochen vor der Siebung zur biologischen Trocknung, wie sie bei zwei der drei Anlagen praktiziert wurde, erwies sich positiv im Hinblick auf höhere Trockenmassegehalte sowie tendenziell niedrigere Aschegehalte und höhere Heizwerte in den Brennstofffraktionen.

Die Optimierung einer Grüngut-Wertschöpfungskette umfasst alle Bereiche von der getrennten Erfassung des Grünguts, über eine effiziente Logistik und eine angepasste Aufbereitung bis hin zur Erzeugung und hochwertigen Verwertung der Produkte. Dabei ist jeder Schritt in der Wertschöpfungskette durch ein übergeordnetes Qualitätsmanagement abzusichern.

**Für die Erfassung ist es essentiell, den Bürger\*innen einen hohen Service-Komfort zu bieten, der kurze Wege zur Sammelstelle und eine entgeltfreie Entsorgung haushaltsüblicher Mengen beinhaltet.**

Im Bereich der **Logistik** sollten mögliche Synergien angestrebt werden, beispielsweise durch die Nutzung bestehender Infrastruktur für die Sammlung, den Einsatz von vorhandenem kommunalen Personal oder die interkommunale Kooperation.

## OPTIMIERUNG VON GRÜNGUT WERTSCHÖPFUNGS KETTEN

Die **Aufbereitung** des Materials durch Zerkleinerung und Siebung sollte anlagenspezifisch an die Eigenschaften des Inputmaterials (z. B. Grüngutgemisch oder getrennt erfasstes holziges Grüngut) und die gewünschten Produkte und deren Verwertung (z. B. reine Erzeugung von Kompost oder Erzeugung von Kompost und Brennstoff) angepasst sein. Dafür steht eine Vielzahl technischer Lösungen zur Verfügung.

Die **Verwertung** der Produkte aus Grüngut sollte möglichst hochwertig erfolgen. Grüngutkompost ist als »Premiumkompost« hervorragend zur Erdenherstellung oder zum Einsatz in der ökologischen Landwirtschaft geeignet. Brennstoffe aus Grüngut sollten möglichst in eigenen kommunalen Heizanlagen (z. B. zur Versorgung eines Nahwärmenetzes) eingesetzt werden. Ein umfassendes Qualitätsmanagement ist notwendig, um die gesetzlichen und privatrechtlichen Qualitätsanforderungen an die Produkte zu gewährleisten sowie die einzelnen Schritte der Wertschöpfungskette fortlaufend zu optimieren.

## AUSBLICK

Das Vorhaben Grün-OPTI hat zum Ziel, die gesamte Wertschöpfungskette Grüngut von der Erfassung bis zur Verwertung, mit speziellem Fokus auf der Verwertung holziger Siebüberläufe als Brennstoff, zu optimieren. Dadurch können die Ergebnisse gut auf das gesamte Bundesgebiet übertragen werden. Dies beinhaltet die konkrete Umsetzung in die Praxis durch die öRE mit positiven ökonomischen und ökologischen Effekten sowie die Nutzung im Rahmen des politischen Diskurses und der Öffentlichkeitsarbeit.

Ein Folgeprojekt, das sich speziell mit der separaten Erfassung und energetischen Verwertung von krautigem Grüngut befasst, wird vom 01.10.2019 bis zum 31.03.2021 unter dem Namen »**GreenSelect – Optimierte Nutzung vergärbare Grüngutchargen durch selektive kommunale Erfassung und Konservierung**« und dem Förderkennzeichen 03KB155 von der Witzenhausen-Institut GmbH bearbeitet.

## WEITERE INFORMATIONEN

- **Projektwebseite mit Link zum Schlussbericht**  
<https://www.energetische-biomassenutzung.de/projekte-partner/details/project/show/Project/gruen-opti-466/>

KNAPPE, F.; VOGT, R.; LAZAR, S.; HÖKE, S. (2012): Optimierung der Verwertung organischer Abfälle. TEXTE 31/2012, Umweltforschungsplan des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit. Umweltbundesamt (Hrsg.), ISSN 1862-4804, Dessau-Roßlau.

KRAUSE, P.; OETJEN-DEHNE, R.; DEHNE, I.; DEHNEN, D.; ERCHINGER, H. (2015): Verpflichtende Umsetzung der Getrenntsammlung von Bioabfällen. TEXTE 84/2014, Umweltforschungsplan des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit, Dessau-Roßlau.

REINHARDT, J. (2016): Schriftliche Mitteilung von ökobilanziellen Berechnungsparametern des IFEU – Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg GmbH, Heidelberg.

VOGT, R.; FEHRENBACH, H.; WIEGEL, U.; EBERT, K. (2012): Maßnahmenplan zur Umsetzung einer vorbildhaften klimafreundlichen Abfallentsorgung im Land Berlin. Endbericht. IFEU – Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg GmbH, Heidelberg.

## LITERATUR VERZEICHNIS







Foto von Giorgio Trovato on Unsplash

FKZ-NR.: FKZ 03KB114  
 LAUFZEIT: 15.07.2016–30.04.2018  
 ZUWENDUNGSSUMME: 216.166 €

#### KOORDINATION

Öko-Institut e.V.  
 Merzhauser Straße 173  
 79100 Freiburg  
 www.oeko.de

#### Zitat des Projektleiters: Matthias Koch

*Wir haben in diesem Projekt einen methodischen und einen inhaltlichen Fokus gesetzt. Bei der Modellkopplung mussten wir zunächst zwei unterschiedliche methodische Ansätze zusammenbringen. Diese Kopplung hat sich dann auch auf der inhaltlichen Ebene fortgesetzt, wo der Gebäudesektor und der Stromsektor unter einem gemeinsamen Klimaschutzziel zusammengefasst wurden.*



Matthias Koch, Klaus Hennenberg,  
 Markus Haller, Tilman Hesse,  
 Katja Hünecke, Christian Winger

Rolle der Bioenergie im Strom- und Wärmemarkt bis 2050 unter Einbeziehung des zukünftigen Gebäudebestandes

# BioStromWärme

**ZIELE** Wir haben in diesem Forschungsprojekt den Gebäudesektor und den Stromsektor in Deutschland mit zwei sektorspezifischen Modellen gekoppelt und damit untersucht, welche Rolle die Biomasse in diesen beiden Sektoren für den Klimaschutz spielt. Konkret sind wir der Frage nachgegangen, ob das verfügbare Bioenergieangebot eher für den Stromsektor als Flexibilitätsoption oder besser im Gebäudesektor als erneuerbare Wärmequelle eingesetzt werden sollte, um die Klimaschutzziele für den Strom- und den Gebäudesektor möglichst kosteneffizient einzuhalten.

## THEMEN SCHWERPUNKTE:

- Bioenergie
- Strommarktmodellierung
- Gebäudemodellierung
- Modellkopplung
- Sektorenkopplung Strom und Wärme
- Klimaschutz

Mit dem Strommarktmodell PowerFlex und dem Gebäudemodell Building-STar wurde analysiert, ob das verfügbare Bioenergieangebot eher für den Stromsektor oder besser im Wärmemarkt als erneuerbare Wärmequelle eingesetzt werden sollte, um die Klimaschutzziele für den Strom- und Wärmesektor möglichst kosteneffizient einzuhalten. Als Ergebnis der modellgestützten Szenarienanalyse sind folgende Schlussfolgerungen hervorzuheben:

- Feste Biomasse stellt in der Wärmeversorgung eine wichtige Übergangstechnologie dar, insbesondere für schlecht gedämmte Gebäude.
- Biogas und aufbereitetes Biomethan werden erst bei sehr hohen Minderungszielen für Treibhausgase und einem gleichzeitigeren Angebot an fester Biomasse eingesetzt.
- Die Kopplung des Wärme- und Stromsektors nimmt von 2020 bis 2050 zu. Der Stromsektor kompensiert dabei die Restriktionen des Gebäudebestandes und beteiligt sich überproportional an der gesamten sektorübergreifenden CO<sub>2</sub>-Minderung.

## ZUSAMMEN FASSUNG

## SUMMARY (ENG.)

With the PowerFlex electricity market model and the building mode Building-STAR it was analysed whether the available bioenergy supply should be used more for the electricity sector or better in the heat market as a renewable heat source in order to meet the climate protection targets for the electricity and heat sector as cost-efficiently as possible. As a result of this sector coupling, the following conclusions should be highlighted:

- The use of solid biomass represents an important transitional technology in heat supply, especially for poorly insulated buildings.
- Biogas and upgraded biomethane will only be used when greenhouse gas reduction targets are very high and the supply of solid biomass is low.
- Coupling of the heat and electricity sectors will increase from 2020 to 2050. The electricity sector compensates for the restrictions of the building stock and contributes over-proportionately to the overall cross-sectoral CO<sub>2</sub> reduction.

## FORSCHUNGSFRAGEN UND HINTERGRUND

Aus energetischer Sicht ist Biomasse als erneuerbarer Rohstoff ein Alleskönner. Sie kann direkt als Brennstoff (z.B. Holz) oder als Rohstoff für Bioenergieträger (z.B. Biogas, Biodiesel, synthetische Kraftstoffe) in zahlreichen Anwendungen in den Sektoren Verkehr, Strom und Wärme genutzt werden. Biobrennstoffe sind zudem lagerbar und können Schwankungen der fluktuierenden Stromeinspeisung aus Wind- und Photovoltaikanlagen oder der schwankenden Wärmeerzeugung aus Solarthermie ausgleichen.

Allerdings zeigt die in dieser Studie durchgeführte Auswertung von Potenzialstudien, dass heimische Biomasse als Rohstoff für Bioenergie nur einen geringen Anteil an dem zukünftigen Gesamtenergiebedarf in Deutschland leisten kann. Bioenergie ist damit eine knappe erneuerbare Ressource, die möglichst kostengünstig und energieeffizient in den Energiesektoren eingesetzt werden sollte.

Vor diesem Hintergrund ist es das Ziel dieses Projektes, die Rolle der energetischen Nutzung von Biomasse im Strom- und Wärmemarkt in Deutschland – unter Berücksichtigung der Nachfrage des Verkehrssektors – in einem Zeitraum von 2020 bis 2050 modellgestützt zu analysieren. Folgende zentrale Forschungsfragen in diesem Projekt sind:

- Sollte das verfügbare Bioenergieangebot eher für den Stromsektor (z.B. als Flexibilitätsoption) oder besser im Wärmemarkt als erneuerbare Wärmequelle eingesetzt werden, um die Klimaschutzziele für den Strom- und Wärmesektor möglichst kosteneffizient einzuhalten?
- Wie sensitiv reagiert der Einsatz von Biomasse im Strom- und Wärmesektor auf Änderungen der Wärmenachfrage im Gebäudesektor, wie sie sich infolge unterschiedlicher energetischer Sanierungsintensitäten ergibt?
- Welche Wechselwirkungen ergeben sich zwischen dem Wärme- und dem Stromsektor und welche Funktion nimmt die Biomasse dabei ein?

## METHODIK

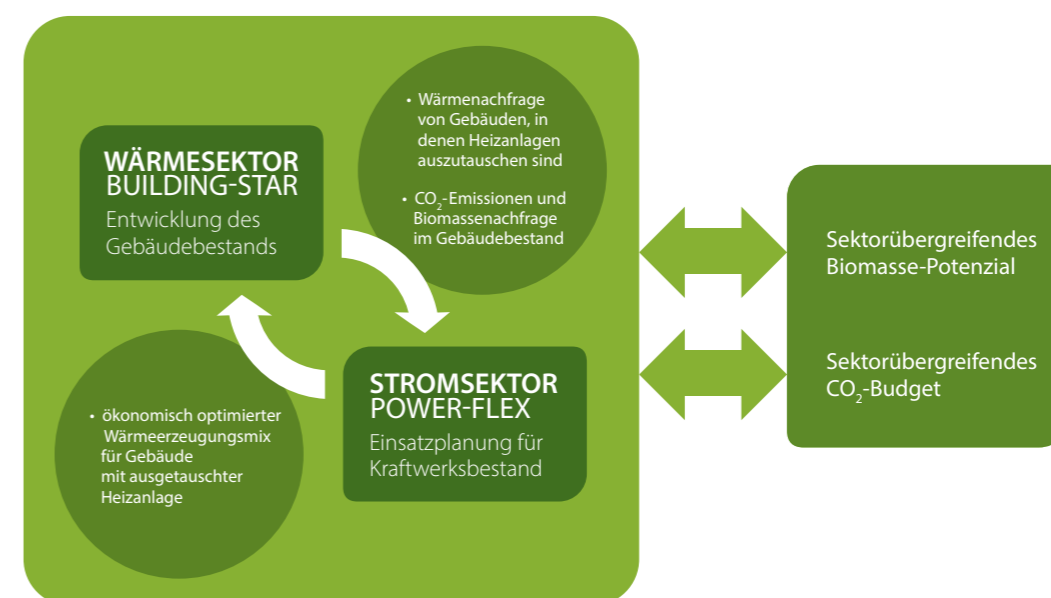
Den methodischen Kern der Untersuchung bildet eine quantitative, modellbasierte Szenarienanalyse auf Basis des Strommarktmodells »PowerFlex« des Öko-Instituts. Dieses Modell wurde dahingehend erweitert, dass die Biomasseallokation Teil der optimalen Lösung ist. Zudem wurde das hauseigene Gebäudemodell »Building-STAR« als zentrale Inputgröße für den Gebäudesektor eingesetzt, um Aspekte wie Anlagen zur Wärmebereitstellung, Wärmeschutzmaßnahmen, Neubau und Abriss modellgestützt zu adressieren. Dabei wurden die beiden Modelle »PowerFlex« und »Building-STAR« über eine Datenschnittstelle miteinander gekoppelt (siehe Abbildung 1 sowie Details in Koch et al. 2018).

Die Grundlage der Analyse bilden vier Szenarien, die sich anhand der beiden Hauptrahmenparameter »Ambitionsniveau Klimaschutz« und »verfügbares Biomasseangebot« sowie hinsichtlich der Sensitivitäten Wärmeeffizienz im Gebäudesektor und beschleunigter Kohleausstieg im Stromsektor unterscheiden:

- **Referenzszenario (Ref)** für die Jahre 2020, 2030 und 2050: Aufbauend auf den Klimaschuttszenarien KS80 (Öko-Institut und Fraunhofer ISI 2015) mit einem mittleren Klimaschutzniveau und einem mittleren Biomassepotenzial für die energetische Nutzung.

- **Referenzszenario-Wärmeeffizienz (Ref\_WE)** für die Jahre 2020, 2030 und 2050: Sensitivität »Wärmeeffizienz durch stärkere Gebäudesanierung« für das Referenzszenario, so dass der Raumwärmebedarf abgesenkt wird.
- **Naturschutzszenario (Nat)** für die Jahre 2020, 2030 und 2050: Aufbauend auf den Klimaschuttszenarien KS95 (Öko-Institut und Fraunhofer ISI 2015) mit einem hohen Klimaschutzniveau und einem aus Naturschutzgründen begrenzten Biomassepotenzial für die energetische Nutzung.
- **Naturschutzszenario-Kohleausstieg (Nat\_KA)**: Sensitivität »beschleunigter Kohleausstieg« für das Naturschutzszenario im Jahr 2020, so dass das in 2020 aus der Stromerzeugung kommende CO<sub>2</sub>-Budgets abgesenkt wird.

Abbildung 1: Kopplung der Modelle für den Wärme- und Stromsektor. Quelle: Koch et al. (2018)





## ERGEBNISSE

Während das Potenzial zur energetischen Nutzung an fester Biomasse (vorwiegend Holz) in allen Szenarien und Stützjahren vollständig ausgeschöpft wird, kommen Biogas und Biomethan aufgrund der vergleichsweise hohen Brennstoffkosten erst im Naturschutzszenario mit verschärften Klimaschutzanforderungen zum Einsatz (vgl. Abbildung 2). Im Referenzszenario wird der weitaus größte Teil der festen Biomasse zur dezentralen Wärmeversorgung in Gebäuden eingesetzt (z.B. Kaminfeuerungen und Pelletheizungen). Im Naturschutzszenario ist das verfügbare Biomassepotenzial auf Grund von Nachhaltigkeitsanforderungen und der erhöhten Biomassenachfrage im Verkehrssektor deutlich reduziert. Das dann noch verfügbare Biomassepotenzial wird fast ausschließlich zur gekoppelten Erzeugung von Strom und Wärme genutzt. In gut gedämmten Gebäuden dominiert zudem der Einsatz von Wärmepumpen, was insbesondere im Szenario »Ref\_WE« (Sensitivität »Wärmeeffizienz durch stärkere

Gebäudesanierung« für das Referenzszenario) deutlich wird. Die Rolle der Biomasse konzentriert sich dann auf den Einsatz als klimaneutraler Brennstoff in schlecht gedämmten Gebäuden. Im Stromsektor besteht die vorrangige Rolle der Biomasse in der Bereitstellung von flexibel einsetzbarer Leistung. Der Strom wird dabei hauptsächlich in den Morgen- und Abendstunden erzeugt, wo die Stromnachfrage besonders hoch und die Stromerzeugung aus Photovoltaik niedrig ist. Diese Flexibilitätsoption kann Biomasse jedoch nur anteilig ausfüllen, da sie im Strommix einen deutlich geringeren Anteil im Vergleich zu Wind und PV aufweist (siehe Abbildung 3). Dem Stromaustausch mit den Nachbarländern als Flexibilitätsoption kommt dabei eine größere Rolle zu.

Hinsichtlich der gemeinsamen Aufgabe zur Dekarbonisierung übernimmt der Stromsektor im Vergleich zum Wärmesektor eine dominierende Rolle. Während im Referenzszenario 2020 fast 60% der CO<sub>2</sub>-Emissionen im Stromsektor anfallen, kehrt sich das Verhältnis bis 2050 im Referenzszenario und Naturschutzszenario um. Eine Verbesserung der Wärmeeffizienz ohne Anpassung des CO<sub>2</sub>-Budgets führt zu einer Verlagerung der CO<sub>2</sub>-Emissionen vom Wärmesektor in den Stromsektor und der Stromsektor bleibt Hauptemittent.

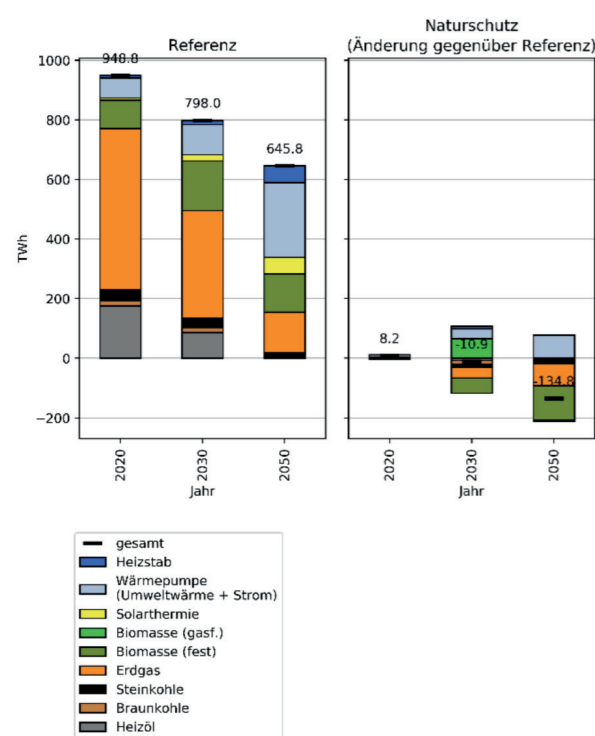


Abbildung 2: Brennstoffspezifischer Erzeugungsmix der Wärmebereitstellung im deutschen Gebäudesektor (Wohngebäude und Nicht-Wohngebäude).  
Quelle: Koch et al. (2018), Haller et al. (2019).

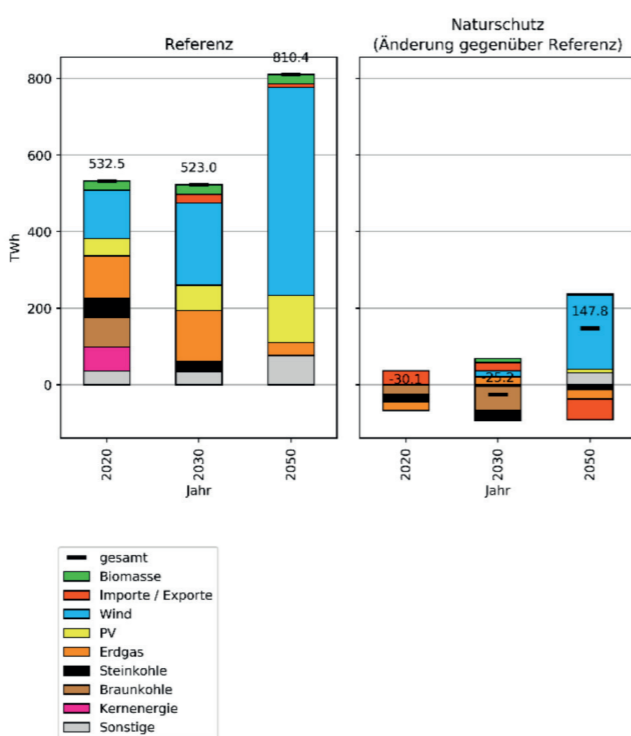


Abbildung 3: Brennstoff-spezifischer Erzeugungsmix der Strombereitstellung.  
Quelle: Koch et al. (2018), Haller et al. (2019).

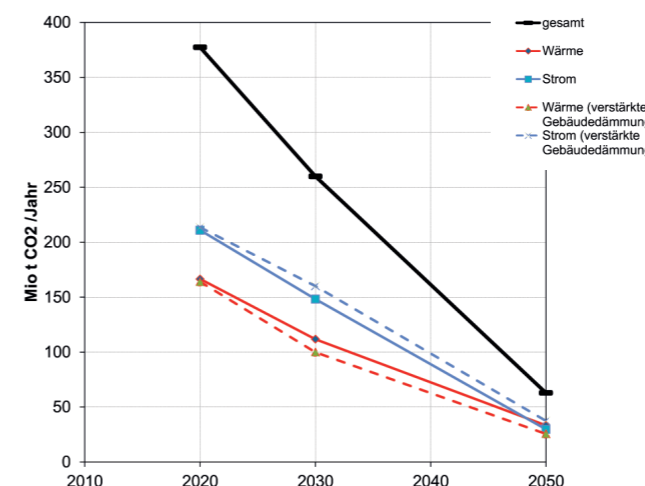


Abbildung 4: Vergleich der CO<sub>2</sub>-Emissionen je Sektor im Referenzszenario und mit der Sensitivität »Wärmeeffizienz durch stärkere Gebäudesanierung«. Durch eine verstärkte Gebäudedämmung werden CO<sub>2</sub>-Emissionen vom Wärmesektor in den Stromsektor verlagert.  
Quelle: Koch et al. (2018), Haller et al. (2019).

## SCHLUSSFOLGERUNGEN

Im Hinblick auf die oben genannten Fragen ziehen wir folgende Schlussfolgerungen:

- **Schlussfolgerung 1:** Erneuerbare Energien verdrängen im Zeitverlauf sowohl im Stromsektor als auch im Gebäudesektor fossile Energieträger, um die vorgegebenen CO<sub>2</sub>-Minderungsziele zu erfüllen.
- **Schlussfolgerung 2:** Die Ergebnisse der Modellierung zeigen, dass sowohl Biogas als auch daraus aufbereitetes Biomethan erst bei sehr hohen THG-Minderungszielen und einem gleichzeitig geringen Angebot an fester Biomasse eingesetzt werden.
- **Schlussfolgerung 3:** Der Einsatz von fester Biomasse stellt in der dezentralen Wärmeversorgung eine wichtige Übergangstechnologie dar, insbesondere für schlecht gedämmte bzw. nur unzureichend energetisch sanierbare Gebäude.
- **Schlussfolgerung 4:** In den Ergebnissen aus der Modellierung ist zudem zu sehen, dass die Kopplung des Wärme- und

Stromsektors von 2020 bis 2050 zunimmt. Diese Kopplung erfolgt über erneuerbaren Strom und elektrische Wärmeerzeugung sowie mit Hilfe von flexiblen KWK-Kraftwerken. Biomasse spielt dabei eine untergeordnete Rolle.

- **Schlussfolgerung 5:** Der Stromsektor kompensiert die Restriktionen des Gebäudebestands und beteiligt sich überproportional an der gesamten sektorübergreifenden CO<sub>2</sub>-Minderung.
- **Schlussfolgerung 6:** Die Reduktion der Kohleverstromung und der Ausbau der Wind- und PV-Stromerzeugung stellen die beiden zentralen Komponenten für die CO<sub>2</sub>-Minderung im Stromsektor dar.

Aufbauend auf die in diesem Projekt erfolgreich durchgeführte modelltechnische Kopplung des Strom- und Wärmesektors und den deutlichen Effekten, die erst bei einer gemeinsamen Betrachtung der beiden Sektoren auftreten, ist als zukünftiger Forschungsbedarf eine Integration des Verkehrssektors in die ökonomische Optimierung anzustreben.

## LITERATUR

HALLER, M.; HENNINGBERG, K.; HESSE, T.; WINGER, C.; HÜNECKE, K.; KOCH, M.; (2019): Rolle der Bioenergie im Strom- und Wärmemarkt bis 2050 unter Einbeziehung des zukünftigen Gebäudebestandes. Beitrag zur 11. Internationale Energiewirtschaftstagung an der TU Wien (IEWT 2019).

KOCH, M.; HENNINGBERG, K.; HÜNECKE, K.; HALLER, M.; HESSE, T.; (2018): Rolle der Bioenergie im Strom- und Wärmemarkt bis 2050 unter Einbeziehung des zukünftigen Gebäudebestandes. Wissenschaftlicher Endbericht (FKZ 03KB114). Öko-Institut e.V., Freiburg. Online verfügbar unter

[https://www.energetische-biomassenutzung.de/fileadmin/steckbriefe/dokumente/03KB114\\_Bericht\\_Bio-Strom-W%C3%A4rme.pdf](https://www.energetische-biomassenutzung.de/fileadmin/steckbriefe/dokumente/03KB114_Bericht_Bio-Strom-W%C3%A4rme.pdf), zuletzt geprüft am 24.03.2019.

ÖKO-INSTITUT E.V.; FRAUNHOFER ISI (2015): Klimaschutzszenario 2050. 2. Modellierungsrunde. Hg. v. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB). Öko-Institut e.V.; Fraunhofer Institut für System- und Innovationsforschung (Fraunhofer ISI). Berlin. Online verfügbar unter <https://www.oeko.de/oekodoc/2451/2015-608-de.pdf>, zuletzt geprüft am 15.05.2017.



FKZ-NR.: FKZ 03KB134  
 LAUFZEIT 01.08.2017–31.12.2019  
 ZUWENDUNGSSUMME: 243.244,66 €

#### KOORDINATION

IZES gGmbH  
 Altenkesslerstraße 15 Geb. A1  
 66115 Saarbrücken  
 www.izes.de

#### PARTNER

STEAG New Energies GmbH  
 St. Johanner Straße 101-105  
 66115 Saarbrücken  
 www.steag-newenergies.com

#### PROJEKTLEITER

Bernhard Wern  
 Telefon: +49 (0)681 844972 74  
 E-Mail: wern@izes.de



Bernhard Wern, Michael Porzig,  
 Cornelia Vogler, Frank Scholl

# ALTHOLZ QUO VADIS

Altholzheiz(kraft)anlagen waren die ersten energetischen Verwerter von Biomasse, die sich über das EEG anteilig refinanzieren. Im Zuge dieser Entwicklung hat sich eine weitgehende Erfassung der Altholz-Stoffströme in Deutschland und in der Folge ein nachhaltiger Entsorgungsmarkt für Altholz etabliert. Die Refinanzierung über das EEG läuft – nach Beendigung des 20-jährigen Vergütungszeitraumes - in den 2020er Jahren aus. Die Studie betrachtet die Situation dieser Kraftwerke sowie die Situation der Altholzverwertung und des Altholzpotezialins insgesamt in Deutschland und Europa. Sie ist weit mehr als eine Bestandsanalyse und erarbeitet konkrete Vorschläge für einen Übergang der EEG-finanzierten Nutzung von Altholz hin zu einer an verschiedenen Märkten refinanzierten energetischen Verwertungsoption. Dabei wird auch die Situation der stofflichen Nutzung in Deutschland mit betrachtet.

- Altholzmarkt in Deutschland und dem angrenzenden Ausland (Recht, Altholzangebot und Förderungen)
- Geschäftsmodelle der energetischen Altholznutzung
- Handlungsempfehlungen für die Politik

## ZIELE

## THEMEN SCHWERPUNKTE

### Wie können sich EEG-geförderte Altholz-anlagen in Deutschland zukünftig entwickeln?

Die energetischen Verwertungsanlagen von Altholz sind ein Erfolgsmodell, da sie die günstige Mobilisierung von Altholz durch eine entsprechende Nachfrage ermöglicht hat. Dies eröffnete auch eine verstärkte stoffliche Nutzung von Altholz im Sinne von Kaskaden. Dadurch ist Deutschland in Europa Vorreiter in der Verwendung von Altholz. Durch das absehbare Auslaufen der Refinanzierung über das EEG ab 2020 muss sich ein Großteil der Anlagen nach neuen Geschäftsmodellen umschauen. Das Projekt diskutiert die Notwendigkeit, Möglichkeiten und Grenzen eines weiteren Betriebes von Altholzheizkraftwerken, die derzeit auf Basis der Refinanzierung durch das EEG betrieben werden und zeigt entsprechende Zukunftsperspektiven auf. Dabei werden neben dem deutschen Altholzmarkt auch europäische Altholzmärkte untersucht. Ein Überblick über bestehende Anlagen wird gegeben. Mögliche Entwicklungen und künftige Geschäftsmodelle werden anhand von Modellanlagen diskutiert.

## ZUSAMMEN FASSUNG



## HAUPT BOTSCHAFTEN

- Altholzheizkraftanlagen werden aus Klimaschutzsicht und aus Entsorgungspflicht für den Entsorgungsmarkt gebraucht.
- Ohne eine thermische Nutzung durch Altholzkraftwerke kann die ordnungsgemäße Verwertung von Altholz nicht sichergestellt werden
- Altholzheizkraftanlagen können sich bei einem entsprechenden Wärmeabsatz auch ohne die Förderung des EEG am Markt refinanzieren.
- Gerade an Fernwärmelinien kann bei einem Wegfall der Wärme aus Kohlekraftwerken die thermische Altholznutzung eine Lösung sein.
- Die Sortierung der Altholzqualitäten und deren Zuweisung zur thermischen oder stofflichen Verwendung dürfen nicht auf Grund von reinen Marktgegebenheiten zur stofflichen Nutzung schlechter Altholzqualitäten und thermischen Nutzung guter Altholzqualitäten führen.

## SUMMARY

The Combined Heat and Power (CHP) plants for waste wood are a model of success, as they have enabled the favourable mobilisation of waste wood through a corresponding demand. This has also enabled increased material use of waste wood in the sense of cascades. As a result, Germany is a pioneer in Europe in the utilisation of waste wood. Due to the foreseeable expiry of the 20 years refinancing phase by the EEG, starting from 2020, a large number of plants will have to look for new business models. The project discusses the necessity, possibilities and limits of continuing to operate waste wood CHP plants that are currently operated on the basis of refinancing through the EEG and shows possible future perspectives. In addition to the German waste wood market, European waste wood markets are also examined. An overview of existing plants is given. Possible developments and future business models are discussed using model plants.

## MAIN MESSAGES

- Waste wood CHP plants are needed for the disposal market from a climate protection point of view and to meet disposal obligations.
- Without thermal utilisation by waste wood CHP plants, the proper recycling of waste wood cannot be ensured
- Waste wood CHP plants can refinance themselves on the market even without the support of the Renewable Energy Sources Act (EEG) if the heat sales are adequate.
- Particularly on district heating lines, thermal use of waste wood can be a solution if heat from coal-fired power plants is no longer available.
- The sorting of waste wood qualities and their allocation for thermal or material use must not lead to the material use of poor waste wood qualities and the thermal use of good waste wood qualities on the basis of given market conditions only.

## METHODIK



### Erarbeitung einer Kraftwerksliste

Das hier vorgestellte Projekt fokussiert Kraftwerke, die Althölzer i.S.d. AltholzV thermisch verwerten und sich – im Hinblick auf potenzielle Optimierungs- und Refinanzierungsoptionen – über eine EEG-basierte Stromvermarktung sowie einen Wärmeverkauf und die Holzentsorgung finanzieren. Der Brennstoffbedarf wird dabei anteilig (Misch) bis 100 % (Mono) durch Altholz gedeckt. Als Grundlage der Kraftwerksliste wurde dabei eine Liste des BAV e.V. auf Aktualität nachrecherchiert und um fehlende Daten erweitert. Hierbei wurde den Anlagen insbesondere die jeweilige EEG-Schlüsselnummer zugeordnet. Nicht-EEG Anlagen wurden aus der Liste gestrichen. Parallel wurde anhand der EEG-Anlagenstammdaten und Bewegungsdaten der Übertragungsnetzbetreiber und den Informationen aus Energymap.info weitere Anlagen mit Altholzeinsatz identifiziert.

### Neuer Ansatz zum Monitoring von Altholzmengen in Deutschland

Um den deutschen Altholzmarkt abzubilden gibt es methodisch zwei, bisher in der Wissenschaft genutzte Wege:

- 1 Auswertung statistischer Ist-Daten (z. B. Langer et. al. 2007; Mantau und Bilitewski 2005; Mantau und Bilitewski 2010) und
- 2 Umfragen bei Altholzverwertern (aus »Mantau«-Studien: Mantau et. al. 2004; Weimar und Mantau 2008; Mantau et. al. 2012; Döring et. al. 2018; sowie eigenen Umfragen)

Im Rahmen des Projektes wurde die statistische Herangehensweise gewählt. Dazu wurde das Statistische Bundesamt (Destatis) mit einer Sonderauswertung beauftragt. Grundlage der entsprechenden Informationen sind dabei die Ergebnisse aus der Destatis Fachserie 19, Reihe 1 »Abfallentsorgung«. Folgende Schlüsselnummern wurden bei Destatis je Bundesland angefragt und entsprechend geliefert (Zeitraum 2006-2016).



- Abfälle der Holzbearbeitung und Herstellung von Platten, Möbeln, Zellstoff, Papier und Pappe: 030101, 030104\*, 030105, 030301
- Verpackungsabfall: 150103, 150110\*
- Bau- und Abbruchabfälle: 170201, 170204\*, 170603\*, 170902\*
- Abfälle aus Abfallbehandlungsanlagen: 191206\*; 191207
- Siedlungsabfälle: 200137\*, 200138, 200307



Die Schlüsselnummern zu »Abfällen aus Abfallbehandlungsanlagen« wurden im Rahmen der Destatis Sonderauswertung mit abgefragt. Sie liegen auf Bundeslandebene vor. Da es sich um aufbereitete Althölzer aus Abfallentsorgungsanlagen handelt, wurden die Abfallschlüsselnummern 191206\* und 191207 bei den innerdeutschen Stoffstrombetrachtungen aus Gründen der Doppelzählung außer acht gelassen. Anders verhält es sich bei den grenzüberschreitenden Stoffstrombetrachtungen. Dort sind insbesondere diese Schlüsselnummern betrachtet worden, da nach Expertenmeinung diese Handelswege vorwiegend mit aufbereiteten Althölzern bedient werden.

Neben der Erhebung des innerdeutschen Aufkommens waren die Im- und Exportbewegungen von Altholz zu erfassen, um das außenhandelsbereinigte Altholzaufkommen auf dem deutschen Markt umfassend abzubilden. Die ins Ausland exportierten notifizierte Abfälle sowie die entsprechenden nach Deutschland importierten Mengen sind in der Destatis Fachserie 19, Reihe 1, 2015 nicht enthalten. Diese Mengen werden nach dem Basler Übereinkommen überwacht und für Deutschland vom Umweltbundesamt (UBA) statistisch ausgewertet. Das UBA hat neueste Zahlenreihen zu notifizierte Abfällen in Jahresberichten veröffentlicht. Diese fließen in die Aufkommensdarstellung als bereinigende Faktoren ein. Die nicht-notifizierten Altholzmengen können im Rahmen des Projektes nicht fehlerfrei erhoben werden, da

sie ohne öffentliche Genehmigung über die Grenzen verbracht werden dürfen. Jede Schlüsselnummer wurde zudem mit einem Reduktionsfaktor gearbeitet, der den realen Altholzanteil widerspiegeln soll. Der Ansatz wurde zur Verifizierung mit der Hochschule Münster (Frau Prof. Flamme) abgeglichen, die zur gleichen Zeit ein Projekt zum Thema Evaluierung der Altholzverordnung erarbeitet hatten (Flamme et. al.2020).



### Entwicklung von Kostenstrukturen für Altholzheizkraftwerke

Die Kostenstruktur von Biomasse-Energieanlagen ändert sich über die Anlagenlaufzeit erheblich. Während in der Anfangsphase kapitalgebundene Kosten einen wesentlichen Bestandteil der Gesamtkosten bilden, treten gegen Ende der Abschreibungsperiode im Hinblick auf Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen Ersatzinvestitionen, Reparaturkosten, Brennstoff- und Entsorgungskosten, Erlöse aus der Energievermarktung sowie der Personalaufwand in den Vordergrund.

Im Rahmen der Untersuchungen zeigte sich, dass die in Deutschland betriebenen Altholzkraftwerke unterschiedlich konzipiert sind, was für die jeweiligen Kosten- und Erlöstreiber in den Anlagen wesentlich ist. Es gibt daher nicht das eine Kraftwerk, dessen Kostenstruktur repräsentativ für alle anderen Anlagen steht. Deshalb wurden auf der Basis der aus dem Anlagenbetrieb bekannten, wirtschaftlichen Kennzahlen Modellanlagen im Sinne definierter Cluster (5 MW<sub>el</sub>, 10 MW<sub>el</sub>, 20 MW<sub>el</sub>) kalkuliert. Dabei wurde die Zahlenbasis auf Basis von konkreten Anlagen ermittelt. Es standen dabei etwa 20 % des Anlagenparks in Deutschland zur Verfügung, so dass eine hinreichende Genauigkeit angenommen wird. Zusätzlich wurden diese Zahlen mit anderen Forschungsgruppen wie Fraunhofer IEE (Uwe Hoffstede) diskutiert.

### Weitere Methoden

Parallel zum methodischen Ansatz der Ermittlung der Mengen in Deutschland wurde auf Basis von Eurostat in den angrenzenden EU Staaten Altholzmengen analysiert. Durch diesen gleichen Mengenansatz konnten die Mobilisierungsgrade der Altholzmengen in diesen Ländern für die Jahre 2004 bis 2016 herausgearbeitet werden.

Zur Überprüfung der technischen Weiterentwicklungsmöglichkeiten der Anlagen wurden zwei Anlagen von STEAG NE als Referenzanlagen untersucht. Die beiden Anlagen sind sich im Hinblick auf die eingesetzte Technik sehr ähnlich. Sie bieten sich daher für eine vergleichende Untersuchung hinsichtlich der Anwendbarkeit verschiedener Maßnahmen zur Anlagenoptimierung an. Folgenden Maßnahmen wurden für die zwei Anlagen dabei analysiert:

- Umbau zur KWK-Anlage und Einbindung in ein Fernwärmesystem
- Einsatz alternativer Brennstoffe (Klärschlamm, unsortierter Sperrmüll)
- Nutzung von Power-to-Gas

Die Flexibilisierung wird nicht betrachtet, da Anlagen sich nicht über eine Flexibilisierung refinanzieren können.

Im Folgenden werden einzelne Ergebnisse dargestellt, im Abschlussbericht (Wern et al. 2020) sind alle Ergebnisse ausführlich dargestellt.

## ERGEBNIS DARSTELLUNG

### Geschäftsmodellideen

Die Geschäftsmodellideen wurden im engen Dialog mit Praktikern und Kraftwerksbetreibern im Rahmen des Projektes entwickelt. Hierzu wurden ein projektbegleitender Ausschuss und ein Beirat gebildet und zu regelmäßigen Treffen eingeladen. Insbesondere folgende Ideen wurden im Rahmen dieser Kreise entwickelt und inhaltlich breit diskutiert:

- 1 Weitergabe der Kosten der Altholzverwertung an Erzeuger
- 2 Ausbau der Wärmeerzeugung durch Altholzheizkraftwerke über Primärenergiefaktoren  
CO<sub>2</sub> Steuer als übergreifendes Instrument des Klimaschutzes
- 3 Streckung der EEG Vergütung
- 4 a) Quotaler Brennstoffeinsatz  
b) Power Purchase Agreements platzieren
- 5 Power to Hydrogen: Wasserstoffproduktion
- 6 Investitionszuschuss für innovative Neubauprojekte
- 7 Getrenntfassung und frühe Stoffstromlenkung (UK)

Die »Referenz« der Post EEG Geschäftsmodelle stellt die Weitergabe erhöhter Kosten für die Altholzverwertung an den Abfallerzeuger, also dem Endkunden dar.

**Weiterführende Geschäftsmodellideen**, die im Rahmen des Projektes entwickelt wurden, umfassen u. a. einige **rahmen-setzende Vorschläge**, die einen Wettbewerbsvorteil für die biogenen Brennstoffe allgemein (Stärkung der Bioenergie über die Primärenergiefaktoren) oder aller erneuerbaren Energieträger (CO<sub>2</sub> Besteuerung) zur Folge hätten.

Darüber hinaus wurden einige Ideen entwickelt, die **lenkende Wirkung ohne förderpolitische Implikationen** hätten. Hierzu zählen insbesondere die Streckung des EEG Zeitraumes, um den Kraftwerksbetreibern Zeit zur Marktintegration zu geben und den Übergang in die Post EEG Phase fließend zu gestalten. Zwei diskutierte Favoriten in diesem Zusammenhang sind die Veränderung des Brennstoffbandes, als auch den Abschluss von Power Purchase Agreements mit Unternehmen. Hierzu bedarf es der Sicherung des Einspeisevorrangs von Altholzkraftwerken, aber auch einer Öffnung des Ausschließlichkeitsprinzips. Diese Ideen würden die jährliche EEG Umlage für die 66 Altholzkraftwerke in Deutschland reduzieren.

**Andere Ansätze**, z. B. das Marktintegrationsmodell des BAV e.V. hingegen **haben förderpolitisch negative Auswirkungen**, da sie eine Verlängerung des EEG Förderzeitraums für eini-

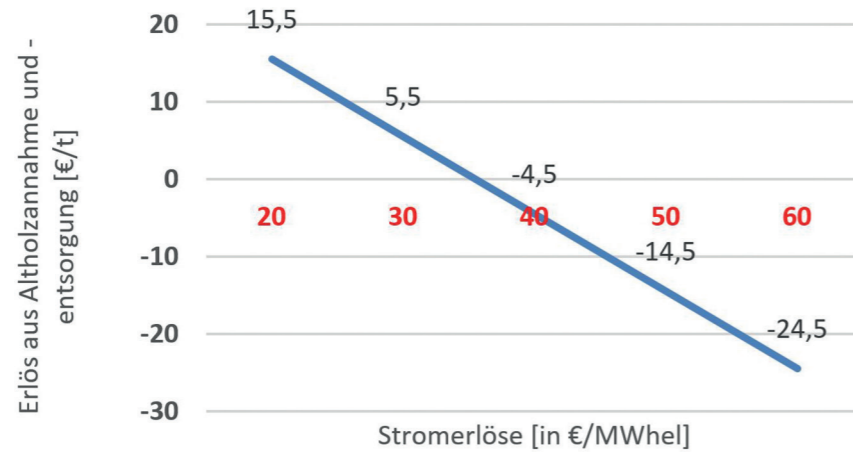
ge Anlagen implizieren und damit zu einer Steigerung der EEG Umlage führen würden. Andererseits steht bei diesem Konzept auch die Sicherung des Anlagenbestandes im Vordergrund des Engagements.

**Weitere Geschäftsmodelle**, die erarbeitet wurden, **beziehen sich auf technische Optionen**, die je nach individueller Anlagenkonzeption durchkalkuliert werden können und zu einem positiven wirtschaftlichen Beitrag des Kraftwerkes führen können. So zu nennen ist insbesondere die verstärkte Wärmeauskopplung aber u. a. die Produktion von Wasserstoff.

In jüngster Vergangenheit gibt es vermehrt Planungen für neue altholzbetriebene Kraftwerksstandorte deutschlandweit und im nahen Ausland. Diese meist sehr **großen Neuanlagen** sollen **wärmegeführt** betrieben werden und sind zumeist an Fernwärmeleitungen angebunden. Sie sollen ein breites Brennstoffband einsetzen können und hocheffizient Strom und Wärme erzeugen. Diese Anlagen können bereits heute **ohne Förderung aus dem EEG wirtschaftlich** betrieben werden und sind damit die ersten biogenen Energieanlagen, die dieses Ziel der Marktintegration schaffen.



Abbildung 1: Neuanlage mit 300.000 MWh Wärmeauskopplung mit einem Erlösbedarf von 35,5€



In einer modellhaften Berechnung wurde für diese Großanlagen ein Erlösbedarf von 35,5 Euro/MWh<sub>el</sub> ermittelt. Stellt man diesen Erlösbedarf als Wertepaar zwischen Erlöse aus der Altholz- bzw. Brennstoffannahme und dem Stromerlös auf, so ergibt sich die Grafik, wie in Abbildung 1 dargestellt.



**Lenkungswirkung der Novelle**

Neben den Geschäftsmodellen wurde die Lenkungswirkung, die die Novelle der Altholzverordnung in Deutschland auch auf die Rohstoffverfügbarkeit haben kann, diskutiert. Bezug nehmend auf das parallel laufende UFO Plan Vorhaben zur »Evaluierung der Altholzverordnung im Hinblick auf eine notwendige Novellierung« wird vom Projektkonsortium der Wunsch nach einer stärkeren Trennung der stofflichen und energetischen Verwertungswege und einer Etablierung differenzierter Preisansätze formuliert. Dieser Vorschlag ist angelehnt an ein Vorgehen, welches z. B. in Großbritannien praktiziert wird. Eine solche Segmentierung des Marktes nach Verwertungsoptionen könnte bei gleichbleibender Verfügbarkeit von Altholz im Markt zu einer Marktberuhigung führen.

**Der Stoffstrom Holz**

In der Vergangenheit – d. h. bis einschließlich 2016 - konnte das Altholzaufkommen im Rahmen mit der oben beschriebenen Methodik valide recherchiert werden. Für die Erstellung einer Trendlinie in die Zukunft wurden die Korrelationsanalysen zur Hilfe genommen. Abbildung 2 stellt die Ergebnisse graphisch dar.

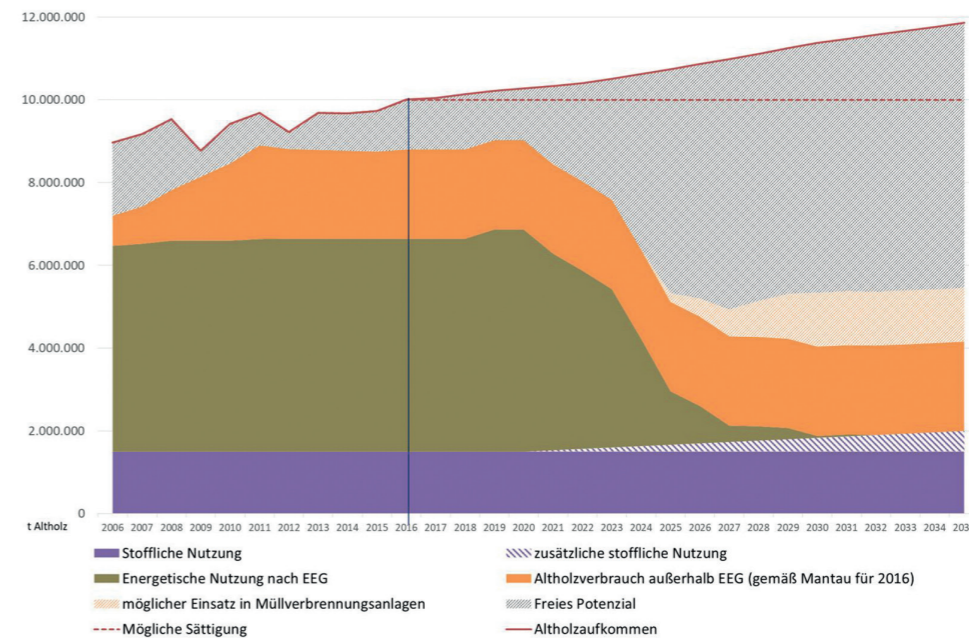


Abbildung 2: Zusammenstellung Aufkommen und Verbleib von Altholz Vergangenheit und Zukunft (Eigene Darstellung)

Neben der oberen roten Linie, die das Gesamtaufkommen repräsentiert, ist der Verbleib der Mengen ausgewiesen.

Für die stoffliche Nutzung wurde nach Auskunft des VHI angenommen, dass aktuell 1,5 Mio. Tonnen Altholz eingesetzt werden (violetter Querbalken) und dass im Kontext der aktuellen Rahmenbedingungen eine weitere Aufnahmekapazität von 0,5 Mio. Tonnen Altholz (violett-gestreifter Balken) darstellbar ist (eingerechnet bis zum Jahr 2035) (Strohmeier 2019). Wenn neuere Innovationen es ermöglichen, z. B. im Bereich OSB- und MDF-Platten höhere Mengen an Altholz einzusetzen, dann könnte sich die Gesamtaufnahmekapazität laut VHI auch auf etwa 3,0 Mio. Tonnen Altholz erhöhen. Aus diesem Grund ist die in der folgenden Abbildung vorgenommene Abschätzung bezüglich der stofflichen Nutzungsanteile im Jahr 2035 von 2,0 Mio. t nicht als Fixgröße zu sehen, sondern kann je nach technischer Innovation und Marktlage auch etwas höher ausfallen. Daneben wurden die bestehenden EEG-Altholzkraftwerke als Abnehmer von derzeit 5,14 Mio. Tonnen

– in Korrelation zu den auslaufenden EEG-Vergütungszeiträumen mit verringerten Tonnagen bis 2030 - in die Übersicht aufgenommen. Unter Bezugnahme auf den insgesamt vorhandenen Einsatz von Altholz in der energetischen Verwertung von 7,4 Mio. t gemäß Mantau et al. 2018a,b und 2016 können die verbrauchten Altholz-mengen außerhalb des EEGs auf knapp 2,25 Mio. Tonnen im Jahr 2018 beziffert werden. Einschränkend müssen hierbei die unterschiedlichen Bemessungsjahre der Mantau-Studien berücksichtigt werden, so dass vereinfacht mit einer außerhalb des EEG energetisch verwerteten Menge von 2 Mio. Tonnen gerechnet wird. Dieser Wert wurde in der Zeitschiene als konstant beibehalten um darzustellen, dass weitere Mengen im Markt auch außerhalb des EEG, z. B. in reinen Altholzheizwerken platziert sind. Werden die derzeit noch im EEG platzierten Kraftwerke nach Auslaufen der jeweiligen Vergütungszeiträume weiter betrieben, steigt diese Menge zukünftig an.

Als weiterer Abnehmer von Altholz-mengen – teilweise als Bestandteil von Mischfraktionen - wurden Müllverbrennungs- und EBS- Anlagen identifiziert. Diese besitzen nach (Mantau et. al. 2018a) eine Aufnahmekapazität von maximal 1,3 Mio. Tonnen.

Die verbleibende grau schraffierte Fläche veranschaulicht die im Rückblick darstellbaren und zukünftig – als worst case – möglichen Altholz-mengen ohne Markt- bzw. Abnahmezuordnung. Die zurückliegenden und aktuellen Mengen, wie sie aus den Destatis Zahlen ermittelt wurden, beinhalten dabei auch schwer erschließbare Altholz-mengen, die wahrscheinlich gar nicht auf dem Markt als Handelsgut erscheinen, da sie in Produkten wie Sofas oder anderen Verbundmaterialien anfallen, deren Trennung nicht wirtschaftlich ist.

Die zentrale Aussage aus der Abbildung 2 ist, dass die Menge des nicht am Markt platzierten Altholzes unter der theoretischen Annahme eines Wegfalls der EEG-Altholzverbrennungsanlagen deutlich zunehmen würde. Sollten daher die EEG-Anlagen – nach Wegfall der EEG-Vergütung – nicht mehr weiter betrieben werden, entsteht potenziell ein Entsorgungsproblem in Deutschland.

### Die europäische Dimension

Altholz ist ein Abfall, der grundsätzlich in allen Ländern Europas anfällt und dessen Entsorgung entsprechend zu organisieren ist. Allerdings sind sowohl die Erfassung von Altholz, als auch seine Verwertung im Kontext der jeweiligen **Preisbildungsmechanismen und Standards länderspezifisch sehr unterschiedlich**.

Differierende Entsorgungsstrukturen mit teilweise noch sehr hohen Deponierungsquoten, abweichenden Finanzierungs- und Anreizsystemen sowie uneinheitlichen technischen Standards und Kontrollmechanismen führen dabei insgesamt zu einer sehr heterogenen Situation im europäischen Altholz-Entsorgungsmarkt.

In den **Ländern mit weitest gehenden Ausstieg aus der Deponierung organischer Abfälle**: Teilweise unterstützt durch Anreizsysteme zur Nutzung erneuerbarer Energien sind tendenziell tragfähigere Systeme zur Altholz-Verwertung etabliert, als in denjenigen in denen das Altholz neben dem Siedlungsabfall und anderen biologisch abbaubaren Reststoffen weiterhin auf Deponien abgelagert wird oder eine Verwertung über nicht transparente Wege stattfindet (KOM 2019).

In **Ländern** wie insbesondere **Spanien, Italien, Polen und Tschechien**: Wegen fehlender inländischer Erfassungssysteme wird Altholz importiert, um es dort in der Spanplattenproduktion einzusetzen. Nach Branchenangaben sind die Ansprüche an die eingesetzten Altholzqualitäten hier allerdings unterhalb denjenigen des deutschen Niveaus. Eine energetische Verwertung von Altholz in Biomasseheiz-/kraftwerken findet hier so gut wie nicht statt.

Vor diesem Hintergrund erscheint eine **Harmonisierung der europäischen Rahmenbedingungen zur Altholz-Verwertung und -Entsorgung dringend angeraten**. Neben der bereits verfügbaren Reduktion der Abfalldeponierung ist zu empfehlen **tragfähige Recyclingquoten europaweit festzulegen**. Dies sollte im Kontext der verfügb- bzw. ausbaubaren Märkte sowie verträglicher Standards für Inputmaterialien stofflicher und energetischer Verwertungsketten im Hinblick auf abgesicherte Produktqualitäten und ein umweltverträgliches Emissionsverhalten erfolgen. Im Bereich der energetischen Verwertung ist in diesem Zusammenhang auf eine **effiziente Nutzung des Stoffstroms Altholz zu achten**. Auch ist bei der Ausgestaltung des Abfallrechtes im Hinblick auf Kaskadennutzungen zu beachten, dass die stoffliche Industrie alleine nicht das gesamte in der EU anfallende Altholz verwerten kann und somit die **energetische Nutzung des Altholzes unabdingbarer Eckpfeiler einer ordnungsgemäßen Verwertung** ist. Die energetische Verwertung von Altholz und seiner Erfassung muss deshalb in der EU vorangetrieben werden.

## HEMNMISSE

Die Altholzverordnung in Deutschland hat eine große Lenkungswirkung bzgl. der Rohstoffverfügbarkeit. Bezugnehmend auf das parallel laufende Vorhaben zur »Evaluierung der Altholzverordnung im Hinblick auf eine notwendige Novellierung« (Flamme et al. 2019) wird eine stärkere, an Qualitätsvorgaben orientierte Trennung der stofflichen und energetischen Verwertungswege zur Etablierung getrennter Markt-/Preisgefüge als sinnvoll erachtet. Dieser Vorschlag ist angelehnt an ein Vorgehen, wie es z. B. in Großbritannien praktiziert wird. Mit einer entsprechenden Marktentwicklung könnte – in Kombination mit einer weiteren hohen Verfügbarkeit von Altholz – keine verstärkte Konkurrenz um den Rohstoff Holz sondern eine Marktberuhigung einhergehen.

Letztendlich gilt es in den nächsten Jahren von der Politik aktiv einen Übergang zu gestalten, welcher Marktverzerrungen zwischen den noch im EEG laufenden und den bereits aus dem EEG gefallenen Anlagen im Sinne des Gesamtsystems vermeidet. Ab einem Zeitraum 2025/2026 wird die Wirtschaftlichkeit im Kontext einer bis dann wahrscheinlich wirksamen CO<sub>2</sub>-Bepreisung – unabhängig von sonstigen Fördermechanismen - über die Strom- und Wärmeerlöse sowie den Altholz-Entsorgungspreis definiert.

Einflussgrößen der künftigen Entwicklung des Altholzmarktes und damit auch einer Risikoabschätzung für künftige Projektierungen mit Altholz sind die Entwicklungen der ausländischen Märkte, die Neuformulierung der Altholzverordnung bzw. damit verbunden die Verschiebungen in der Konkurrenz zwischen der stofflichen und der energetischen Nutzung sowie letztlich auch neue stoffliche und energetische Verwertungen von Altholz. Hierbei sind v. a. der Treibhausgasemissionshandel und damit verbundene steigende Preise einer fossilen Bereitstellung von Energie sowie das Auslaufen von Kohlekraftwerken, die Fernwärmenetze versorgt haben, zu nennen.

## AUSBLICK

### WEITERE INFORMATIONEN

Die nachfolgenden Publikationen können unter folgendem Link heruntergeladen werden:  
<http://www.izes.de/de/projekte/altholz-quo-vadis>



## ERGEBNISSE

### ■ Publikationen:

Zum Projekt wurde ein Abschlussbericht formuliert und unter der DOI 10.13140/RG.2.2.22503.47526 veröffentlicht.

### ■ Artikel in Fachzeitschrift (2x Holz-Zentralblatt)

- BAUR, F.; VOGLER, C.; SCHOLL, F. (2019): Altholzkraftwerke im Post-EEG Zeitalter Projekt »Altholz-Quo vadis?« analysiert Altholzmarkt, Wirtschaftlichkeit und Perspektiven der Bestandsanlagen. In: *Holz-Zentralblatt*. Nr. 22, 31.05.2019.
- SCHOLL, F.; WERN B.; VOGLER, C. (2019): Altholzkraftwerke im Post-EEG-Zeitalter. Altholzheizkraftwerke können ohne EEG wirtschaftlich betrieben werden, wenn die Weichen richtig gestellt sind (Teil 2). In: *Holz-Zentralblatt*, Nr. 47, 22.11.2019

### ■ Tagungsband und Präsentationen

- 11.07.2017 »Projektvorstellung Altholz quo vadis« in der Arbeitsgruppe Kraftwerke im Fachverband Holzenergie (FVH im BBE), Straubing
- 21.11.2017 03KB134 – »Altholz Quo Vadis« – Kurzvorstellung des Projektes auf der 7. Statuskonferenz energetische Biomassenutzung, Leipzig
- 02.02.2018 »Beiratstreffen Altholz quo vadis« in Berlin, Präsentation erster Forschungsergebnisse vor Wirtschaft, Wissenschaft und Politik, Berlin
- 18.04.2018 »Altholzmengen auf Grundlage statistischer Daten« auf dem Jahrestagung des Bundesverband der Altholzverwerter BAV, Kassel
- 04.05.2018 »Kurzvorstellung der Altholzmengen in Deutschland«, Beiratstreffen des UBA Projektes »Evaluierung der Altholzverordnung«, Berlin
- 08.06.2018 »Altholzmengen – statistische Zahlen versus Marktvolumen«, Präsentation auf der Arbeitsgruppe Holz des FVH, Berlin
- 20.09.2018 »Kaskadennutzung von Holz – welche Optionen ergeben sich für eine smarte Energiebereitstellung«, DBFZ Jahrestagung, Leipzig
- 26.09.2018 »Altholz quo vadis« Holzheizkraftwerke Experten Workshop »Bio2020Plus«, Würzburg
- 28.09.2018 »Altholz - quo vadis«, Block 5 – Parallelforum B, Holzenergiekongress des BBE, hier: Projektvorstellung, Organisation von weiteren Präsentationen (Ludger Gordalla (EEG fragen), Detlef Schmiel (Fraunhofer ICT), Leitung der Podiumsdiskussion durch die IZES gGmbH, Würzburg
- 28.11.2018 »Altholz – Quo Vadis« – Erkenntnisse aus dem BMWi Forschungsvorhaben der IZES gGmbH und STEAG New Energies GmbH. DUH Netzwerktreffen Bioökonomie, Berlin
- 10.04.2019 »Altholz in Deutschland – Mengen, Kosten, Wirtschaftlichkeit, Perspektiven«, 31. Kasseler Abfall- und Ressourcenforum, Kassel
- 19.09.2019 »Ergebnisse der Studie Altholz – quo vadis«. BAV Altholztag, München
- 26.09.2019 »Ergebnisse, Erkenntnisse und Geschäftsmodelle aus dem Projekt Altholz-Quo Vadis«, Holzenergiekongress des BBE, Würzburg

### ■ Jahresbericht 2020 der IZES gGmbH

## LITERATUR

ALTHOLZV: Verordnung über Anforderungen an die Verwertung und Beseitigung von Altholz: Altholzverordnung vom 15. August 2002 (Altholzverordnung – AltholzV). BGBl. I S. 3302, BGBl. I S. 626.

DESTATIS: Umwelt – Abfallentsorgung (Statistisches Bundesamt - Destatis –). Fachserie 19, Reihe 1.

DÖRING, P.; CORDS, M.; MANTAU, U. (2018): Rohstoffmonitoring Holz – Altholz im Entsorgungsmarkt – Aufkommen und Verwertung 2016. Teilbericht. Hamburg: Universität Eigenverlag. 20 p.

EEG: Gesetz für den Vorrang Erneuerbarer Energien: Erneuerbare-Energien-Gesetz vom 21. Juli 2014 (Erneuerbare Energien Gesetz – EEG). BGBl. I S. 1066, BGBl. I S. 706.

FLAMME, S.; HAMS, S.; BISCHOFF, J.; FRICKE, C. (2020): Evaluierung der Altholzverordnung im Hinblick auf eine notwendige Novellierung. Abschlussbericht. FKZ 3717353400 im Auftrag des Umweltbundesamtes. Münster.

MANTAU, U.; BILITEWSKI, B. (2005): Stoffstrom-Modell-Holz. Bestimmung des Aufkommens, der Verwendung und des Verbleibs von Holzprodukten. Abschlussbericht, Studie im Auftrag des Verbandes Deutscher Papierfabriken e.V. (VDP). Celle.

MANTAU, U.; BILITEWSKI, B. (2010): Stoffstrom-Modell-Holz 2007, Rohstoffströme und CO<sub>2</sub>-Speicherung in der Holzverwendung, Forschungsbericht für das Kuratorium für Forschung und Technik des Verbandes der Deutschen Papierfabriken e.V. (VDP). Celle.

MANTAU, U.; WEIMAR, H.; KLOOCK, T. (2012): Standorte der Holzwirtschaft : Altholz im Entsorgungsmarkt - Aufkommens- und Vertriebsstruktur. Hamburg: Universität Eigenverlag. 30 p.

MANTAU, U.; WEIMAR, H.; SÖRGEL C. (2004): Holzrohstoffbilanz Deutschland - Bestandsaufnahme. Hamburg: Universität Eigenverlag. 37 p.

MÜLLER-LANGER, F.; WITT, J.; THRÄN, D.; SCHNEIDER, S.; BAUR, F.; KOCH, M.; FRITSCH, U.; WIEGMANN, K. (2007): Monitoring zur Wirkung der Biomasseverordnung. Endbericht. FKZ 20441133 im Auftrag des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit und des Umweltbundesamtes. Leipzig.

WEIMAR, H.; MANTAU, U. (2008): Standorte der Holzwirtschaft : Altholz im Entsorgungsmarkt - Aufkommens- und Vermarktungsstruktur. Hamburg: Universität Eigenverlag. 22 p.

WERN, B.; VOGLER, C.; PORZIG, M.; HAUSER, E.; GUSS, H.; BAUR, F.; SCHOLL, F.; BÖFFEL, A.; MECHENBIER, D. (2020): Altholz – Quo vadis?. Abschlussbericht. FKZ 03KB134, gefördert durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie. Saarbrücken. 10.13140/RG.2.2.22503.47526.

**KURZ & PRÄGNANT**





DBFZ



FKZ-NR.: 03KB130  
 LAUFZEIT 01.09.2017-30.06.2020  
 ZUWENDUNGSSUMME: 416.905 €

**PROJEKTLEITUNG**

Nora Szarka  
 Tel.: +49-(0) 3412434-489  
 E-Mail: nora.szarka@dbfz.de

**PARTNER**

Prognos AG  
 Goethestraße 85  
 10623 Berlin

Nora Szarka, Christopher Schmid

**Bewertung des Marktpotenzials und  
 Systembeitrags von integrierten  
 Bioenergiekonzepten**

# SMARKT

»Was macht ein integriertes Bioenergiekonzept aus, wie kann man dies umfassend bewerten und anschaulich darstellen, sowie das Marktpotenzial einschätzen?«

## WAS? DIE ZIELE DES PROJEKTES

- Bewertung und Quantifizierung des Systembeitrags und des Marktpotenzials von zukunftsfähigen, integrierten (»smarten«) Bioenergiekonzepten
- Auswahl und Beschreibung potenziell innovativer Bioenergiekonzepte, die entsprechend eines Ziel- und Indikatorenkatalogs ausgewählt wurden
- Entwicklung einer übergeordneten Bewertungsmatrix für das Marktpotenzial und den Systembeitrag von zukunftsfähigen, integrierten (»smarten«) Bioenergiekonzepten.
- Bewertung des Systembeitrags der Technologien und Analyse von diesbezüglichen Hemmnissen
- Bewertung des Marktpotenzials der Bioenergiekonzepte (Einordnung in energiewirtschaftliche Märkte/Branchen) und Analyse von diesbezüglichen Hemmnissen
- Einordnung in das energie- und klimapolitische Zielsystem
- Zusammenführung der Ergebnisse und Handlungsempfehlungen

## WEITERE INFORMATIONEN UND ERGEBNISSE

Weitere Informationen zu den Ergebnissen, Handlungsempfehlungen, Zusammenfassungen und Ergebnisgraphiken finden Sie auf der Projektwebseite:

[www.dbfz.de/projektseiten/smarkt/](http://www.dbfz.de/projektseiten/smarkt/)

### >>> Endbericht

### Wissenschaftliche Paper:

SZARKA, N.; SCHMID, C.; PFEIFFER, D.; THRÄN, D. (2020), All in one: A comprehensive goal and indicator system for smart bioenergy. In: *Chem. Eng. Technol.* 43,8. 1554-1563. [10.1002/ceat.202000033](https://doi.org/10.1002/ceat.202000033)

SZARKA, N.; SCHMID, C.; PFEIFFER, D.; THRÄN, D. (2021), The system role of smart bioenergy: a multi-criteria assessment. Paper eingereicht.

## WOZU?

Die Ergebnisse des Projektes SmarKt können folgende Diskussionen unterstützen:

- Konzept-/Projekteinschätzung: Das Ziel- und Indikatorensystem kann zur Eigeneinschätzung eines neuen oder laufenden Projektes bzw. eines Bioenergiekonzeptes genutzt werden.
- Potenzialhebung: Aussagen über das Verbesserungspotenzial von integrierten Bioenergiekonzepten können getroffen werden.
- Fortschritte eines neuen Konzepts können Vergleich zum Status-Quo dargestellt werden.
- Versachlichung der Diskussion: Mithilfe eines online-Tools (Indikatorensystems) kann die sachliche Darstellung und Diskussion der Auswirkungen von Bioenergiekonzepten unterstützt werden.

## WIE?

Über eine umfassende und übergeordnete Bewertungsmatrix wurde der Systembeitrag von zukunftsfähigen, integrierten (»smarten«) Bioenergiekonzepten transparent bewertet. Hierzu wurde ein mehrstufiges multikriterielles Bewertungstool, namens **SMARTbioGO** (basierend auf dem Analytic Hierarchy Process - AHP) entwickelt und angewendet. Als Bewertungsgrundlage wurde ein umfangreicher Ziel- und Indikatorenkatalog mit 48 Indikatoren aufgebaut. Das Marktpotenzial wurde bottom-up und top-down analysiert. Hierzu wurden die Anwendungspotenziale auf Basis der geförderten Projekte untersucht (Bottom-up-Analyse) und mit den Nachfragepotenzialen auf Basis von Ergebnissen einer Analyse ausgewählter Szenarien (Top-down Analyse) verglichen.

Smarkt: Ziel- und Indikatorensystem

**Integrierte Bioenergie - Fingerprints**

Detaillierte Auswertung über alle Indikatoren für alle Einzelziele

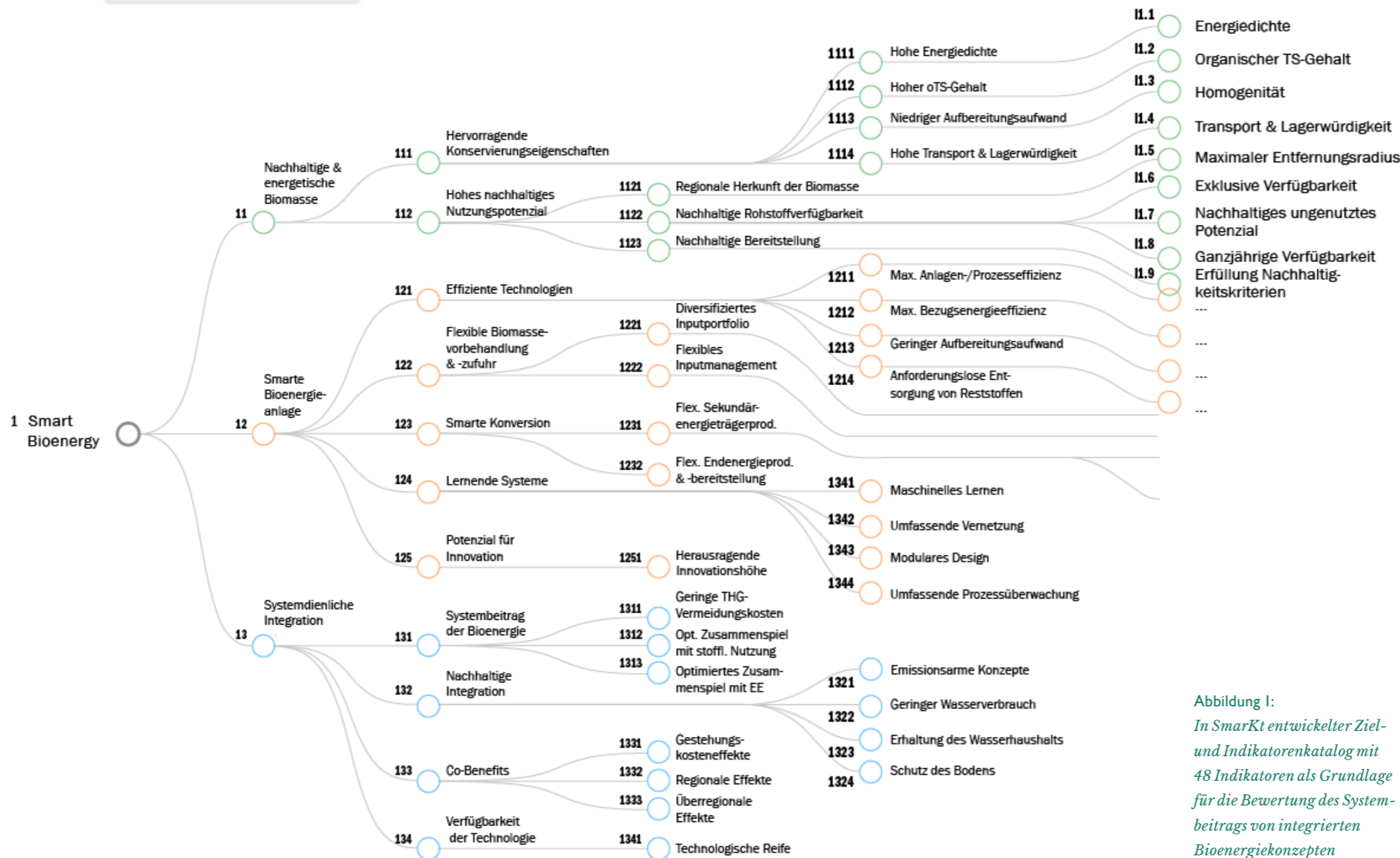


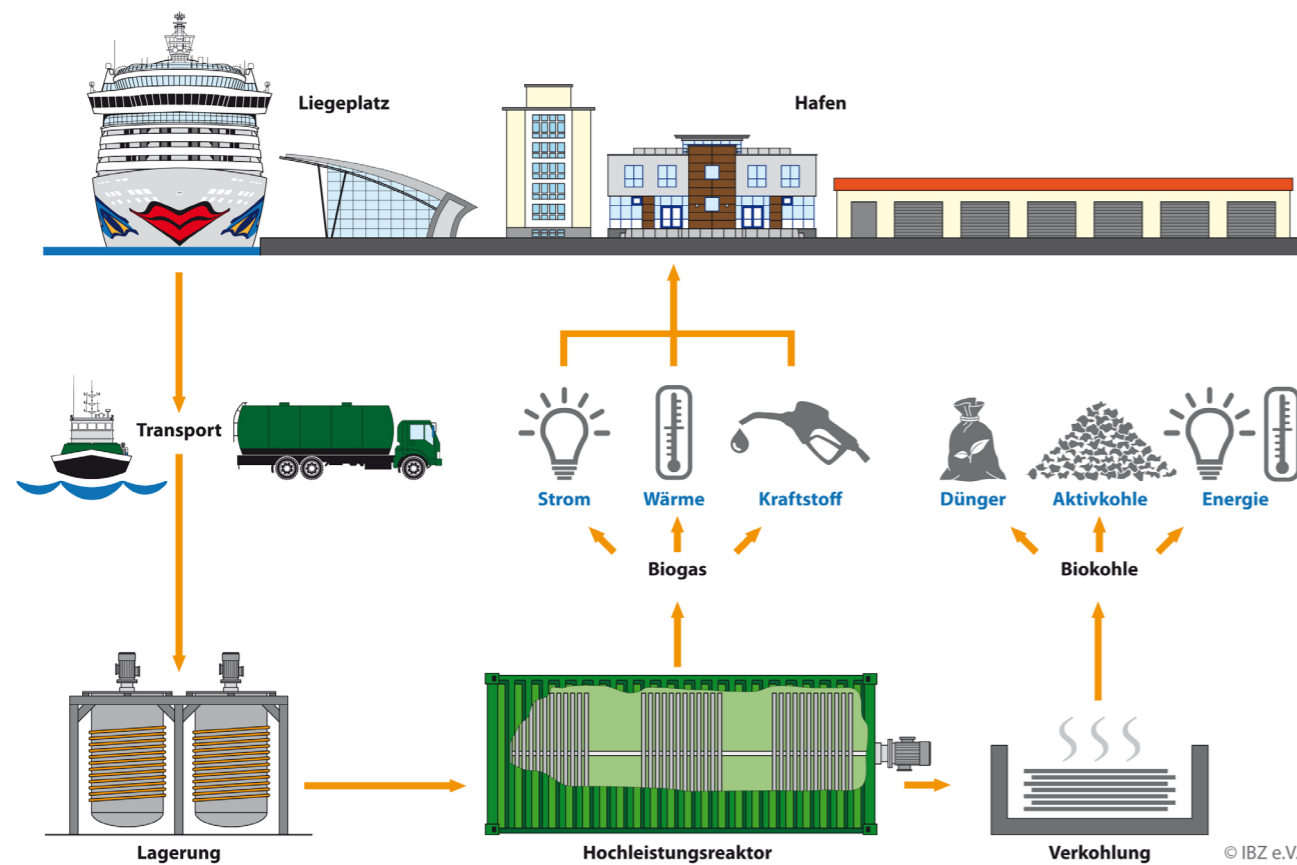
Abbildung 1: In SmarKt entwickelter Ziel- und Indikatorenkatalog mit 48 Indikatoren als Grundlage für die Bewertung des Systembeitrags von integrierten Bioenergiekonzepten

Die Auswertung hat grundsätzlich ergeben, dass Bioenergiekonzepte einen smarten und systemrelevanten Beitrag zum Energiesystem leisten können. Ausgehend von Energiesystemszenarien und der energiepolitischen Bewertung gegenwärtiger Technologien sind folgende künftige Schwerpunktsetzungen in der Forschungsförderung denkbar:

- Technologiecluster-spezifische Schwachstellen: Umweltverträglichkeit von Verbrennungs- und Vergärungstechnologien, Wettbewerbsfähigkeit von Vergasungstechnologien;
- Technologiecluster-übergreifende Wissenslücken: umfassende Umweltauswirkungen, Beiträge zur Schließung von Stoffkreisläufen und zur regionalen Wertschöpfung, Passfähigkeit zu bestehenden Infrastrukturen und Anpassungsfähigkeit an sich verändernde Rahmenbedingungen (technisch, politisch, infrastrukturell);
- Biomassenutzungen im Wärmesektor, insbesondere im Hochtemperaturbereich industrieller Anwendungen, da hier eine verstärkte Nachfrage nach Biomasse erwartet wird;
- Systemleistungen von Vergärungstechnologien, insbesondere bedarfsgerechte Strom- und Wärmeerzeugung, da die nachfrageunabhängige Energiebereitstellung aus Biomasse insbesondere im Stromsektor voraussichtlich nicht wettbewerbsfähig werden wird;
- Biomassebasierte Generierung von Negativ-Emissionen, z. B. BECCS/BECCU, da diese Vermeidungsoption vielfach als erforderlich zum Erreichen der Netto-Klimaneutralität 2050 eingestuft wird, gleichzeitig aber keine ausreichenden Anreize für die Technologieentwicklung bestehen.

Zur weiteren Ausdifferenzierung solcher Schwerpunktsetzungen sollte eine unterstützende – Technologiekonzept- und Sektoren-übergreifende – strategische Bedarfsplanung in Bezug auf die Rolle von Biomasse im Energiesystem und der Bioökonomie vorgenommen werden. Empfohlen wird zudem die kontinuierliche Berücksichtigung aktueller Energiesystemszenarien, um der dynamischen Technologieentwicklung Rechnung zu tragen und wandelnde Bedarfe des Energiesystems frühzeitig adressieren zu können.



**PARTNER**

Innovations- und Bildungszentrum Hohen Luckow e.V.  
Bützower Str. 1a  
18239 Hohen Luckow  
www.ibz-hl.de

ROSOMA - Rostocker Sondermaschinen- und Anlagenbau GmbH  
Werkstr. 3a  
18069 Rostock  
www.rosoma.de

LMS Agrarberatung GmbH  
Graf-Lippe-Str. 1  
18059 Rostock  
www.lms-beratung.de



FKZ-NR.: 03KB119  
LAUFZEIT: 01.12.2016 – 31.11.2018  
ZUWENDUNGSSUMME: 407.254,59 €

**KOORDINATION**

Maik Orth  
Tel.: +49-38295 74 104  
E-Mail: maik.orth@ibz-hl.de

**PROJEKTLEITUNG**

Jessica Hudde  
Tel.: +49-38295 74101  
E-Mail: ibz@ibz-hl.de

Jessica Hudde, Maik Orth,  
Gerd Kirchenberg, Beate Richter

Entsorgungskonzept für Schiffsabfälle  
internationaler Herkunft

# Waste and Sludge to Energy

## WIE? DIE TEILZIELE UND ERGEBNISSE:

- **Eine effiziente feuchte Lagerung der Stoffe an Bord für eine anschließende anaerobe Behandlung an Land.** Im Rahmen von Batch- und kontinuierlichen Lagerungsversuchen konnte nachgewiesen werden, dass eine feuchte Lagerung mit geringer Gasentstehung bei niedrigen pH-Werten möglich ist.
- **Eine effiziente anaerobe Behandlung der Stoffe an Land durch eine Oberflächenfermentation:** In den Untersuchungen konnten die gelagerten (versäuerten) Schiffsabfälle stabil im Biogasprozess behandelt werden. Im Rahmen des Projektes wurden Untersuchungen zur Oberflächenfermentation (Materialauswahl, kontinuierliche Versuche) mit positiven Ergebnissen hinsichtlich des Methanertrages durchgeführt. Für einen langfristig stabilen Betrieb sind jedoch weitere Untersuchungen notwendig. Für die angestrebte rechtliche Anerkennung des Verfahrens ist dies nicht Voraussetzung.
- **Einsatz der Hydrothermalen Karbonisierung bzw. Pyrolyse/Torrefizierung zur Hygienisierung:** Die Ergebnisse zeigen, dass mittels beider thermochemischer Verfahren die geforderte Hygienisierung sicherzustellen ist. Damit wurde das primäre Ziel erreicht, da dies Voraussetzung für eine rechtliche Anerkennung als alternatives Verfahren ist. Darüber hinaus konnten wichtige Erkenntnisse hinsichtlich erreichbarer Kohlequalitäten bei unterschiedlichen Prozessparametern sowie zur Beurteilung der HTC-Prozesswasser gewonnen werden.
- **Auslegung des Gesamtkonzeptes:** Am Beispiel der potentiell anfallenden Mengen im Hafen Rostock wurde ein Gesamtkonzept erarbeitet. Dies umfasste die anaerobe Prozessstrecke (Lagerung, Fermentation, energetische Verwertung) sowie die Einbindung der hydrothermalen Prozesse. Bestandteil waren dabei auch Untersuchungen zur Betriebsführung (kontinuierlicher / saisonaler Betrieb). Dies betraf u.a. Versuche zur Fest-Flüssigtrennung zur möglichen Zwischenlagerung von energiereichen Substraten zur Überbrückung des saisonalen Anfalls der Stoffe.

## WOZU?

Die Entsorgung organischer Rest- und Abfallstoffe von Kreuzfahrtschiffen wird, aufgrund rechtlicher Restriktionen und fehlender Technologien kostenbedingt und zu Lasten der Umwelt immer noch in die Meere geleitet. Der Kreuzfahrtbranche wird künftig ein weiteres Wachstum prognostiziert, mit dem auch ein erhebliches Abfallaufkommen auf den Meeren einhergeht. Durch die Entwicklung eines effektiven Biogas-Verfahrens soll ein Anreiz für Reedereien zur landseitigen Abgabe der organischen Abfälle geschaffen werden, um Nährstoffeinträge in die Meere zu unterbinden und klimaneutral Energie zu erzeugen. Die Ergebnisse zeigen, dass das angedachte Entsorgungskonzept die rechtlichen Anforderungen hinsichtlich der Hygienisierung erfüllt und im Sinne des Förderprogrammes einen Beitrag zur Erschließung dieser bisher nicht genutzten biogener Rest- und Abfallstoffe für eine energetische Nutzung erschließen kann. Gegenüber dem Stand der Technik kann das neue Verfahren durch die energetische Nutzung dieser Stoffströme sowie durch Energieeinsparungen durch den Wegfall der Trocknung an Bord der Schiffe eine Einsparung an CO<sub>2</sub>-Emissionen von bis zu 87% erreichen.

## WAS? DIE ZIELE DES PROJEKTES

Das Ziel von WAS2E bestand in der Entwicklung eines Verfahrens zur anaeroben Verwertung biogener Rest- und Abfallstoffe aus der Kreuzschiffahrt, insbesondere im Hinblick auf die erschwerenden rechtlichen Anforderungen zur Verwendung von Küchenabfällen international eingesetzter Verkehrsmittel aus der Verordnung (EG) Nr. 1069/2009 (EG Nr. 1069/2009). Derzeit werden diese relativ zentral anfallenden Abfallstoffe trotz hohen Energiegehalts und steigendem Aufkommen nur beseitigt und z. T. zu Lasten der Umwelt in die Meere geleitet. Ursache sind fehlende Technologien und umsetzbare rechtliche Restriktionen.

Weitere Informationen zu den Ergebnissen, Handlungsempfehlungen, Zusammenfassungen und Ergebnisgraphiken finden Sie hier:

>>> [Projektwebseite](#)

>>> [Endbericht](#)

>>> [Was2e - BINE-Projektinformation](#)

**HERAUSGEBENDE** Daniela Thrän, Diana Pfeiffer

DBFZ Deutsches Biomasseforschungszentrum  
gemeinnützige GmbH  
Torgauer Str. 116, 04347 Leipzig  
www.energetische-biomassenutzung.de

Fokusheft: Energetische Biomassenutzung  
Focus on: Bioenergie im Strom- und Wärmemarkt:  
Projektergebnisse 2019-2020, Leipzig 2021.

**GESCHÄFTSFÜHRUNG** Prof. Dr. mont. Michael Nelles  
(wiss. Geschäftsführer)  
Daniel Mayer  
(admin. Geschäftsführer)

**REDAKTION/V.I.S.D.P.** Diana Pfeiffer

**LAYOUT & SATZ** Joshua Röbisch

**BILDER** Titel: D. Pfeiffer, DBFZ; J. Röbisch, DBFZ;  
T. Urbicht, DBFZ; F. Henschel, DBFZ  
Diverse Bilder: sofern nicht am Bild vermerkt:  
© DBFZ.

Das DBFZ ist nicht verantwortlich für den Inhalt  
der eingereichten Beiträge. Die Verantwortung  
für die Texte sowie der Bilder/Grafiken liegt bei  
den Autoren.

**FÖRDERUNG** Gefördert vom Bundesministerium für Wirt-  
schaft und Energie (BMWi) aufgrund eines Be-  
schlusses des Deutschen Bundestages.

© 2021 Deutsches Biomasseforschungszentrum  
gemeinnützige GmbH

Copyright: Alle Rechte vorbehalten. Kein Teil  
dieses Werkes darf ohne die schriftliche Ge-  
nehmigung des Herausgebers vervielfältigt oder  
verbreitet werden. Unter dieses Verbot fällt ins-  
besondere auch die gewerbliche Vervielfältigung  
per Kopie, die Aufnahme in elektronische Daten-  
banken und die Vervielfältigung auf anderen digi-  
talen Datenträgern.

ISSN: 2701-1860 (online)  
ISBN: 978-3-946629-71-9  
DOI: 10.48480/red6-sr61



Gefördert durch:



Bundesministerium  
für Wirtschaft  
und Energie

Projekträger:



Begleitvorhaben:



aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages