

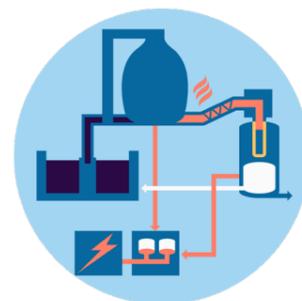
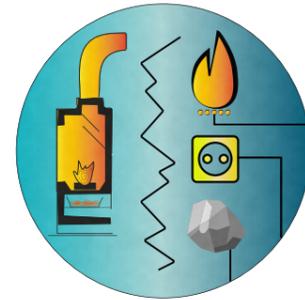
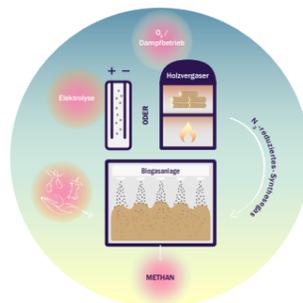
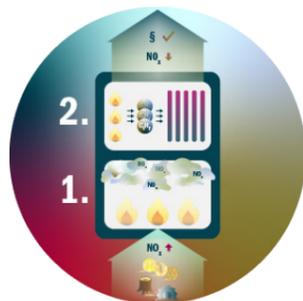


FOCUS ON

Bioenergie im Strom- und Wärmemarkt

Flexibilisierung & alternative Brennstoffe
Projektergebnisse 2023-2024





KURZ ZUSAMMENGEFASST

Das BMWK fördert seit 2008 die Weiterentwicklung der energetischen Biomassenutzung, mit dem Ziel, vielversprechende Forschungsergebnisse schnell in der Praxis umzusetzen und den Technologie- und Innovationstransfer für eine erfolgreiche Energiewende zu beschleunigen. Der Schwerpunkt liegt auf zukunftsweisenden, effizienten und kostengünstigen Technologien zur Strom- und Wärmeerzeugung sowie im Verkehrsbereich, mit Fokus auf intelligente Systemintegration und Sektorkopplung.

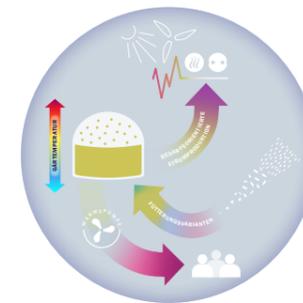
Das BMWK fördert vor allem praxisorientierte Lösungen mit Demonstrations- und Pilotcharakter, die Flexibilisierung der Strom- und Wärmeerzeugung aus Biomasse ermöglichen, um wesentliche Möglichkeiten von Biomasse für eine schnelle Klimagasreduktion im Strom- und Wärmesektor zu erschließen.

Seit 2016 ist das Fokusteil »Bioenergie im Strom- und Wärmemarkt« eine etablierte feste Größe, in dem die Ergebnisse der innovativen Forschungsprojekte visualisiert werden. Folgende Forschungsprojekte präsentieren Ihre Ergebnisse in den Bereichen »Flexibilisierung von Biomassefeuerungen & Biogasproduktion«, »Alternative Brennstoffe und dezentrale Vergasung«, sowie Entwicklungen in der »Anlageneffizienz«:

Das Projekt **flexigast** ermittelte bedarfsgerechte Biogasproduktion & Wärmespeicherung durch Temperaturvariation. **FlexNox** erprobte eine neue Feuerung und reduzierte NOx-Emissionen aus biogenem Festbrennstoff-Verbrennung um mehr als 50%. Das **BioRestBrennstoff**-Projekt erweitert das Brennstoffspektrum von Biomasseheiz(kraft)werken. Das Projekt **OBEN** identifiziert Hemmnisse & erprobt Ansätze für Ersatz von Ölheizungen mit Biomasse. **VergaFlex** evaluiert Methoden zur Charakterisierung von Vergaserkoken und untersucht Nutzungsoptionen. **IntenseMethane** kombinierte

Holzvergasungsanlage mit Bioabfall-Fermenter für biologische Methanisierung von Holzgas. Das Projekt **SyntheseReady** erforscht Power-to-Gas mit Biomasse in flexibler und nachhaltiger Energieproduktion. **MoBiFuels** zum Tragen gekommen. Das Projekt zeigt: Laub-Holz-Pellets erfüllen Emissionsgrenzwerte der I.BImSchV bei Verwendung geeigneter Feuerungsanlage mit Gewebefilter < 100kW Feuerungswärmeleistung. Simulationsmodelle und eine Toolbox für thermochemische Vergasungsreaktoren entwickelt **OpToKNuS.FLXsynErgy** untersuchte eine effiziente Faulgas-Nutzung, Wärmespeicherung und Eigenstromerhöhung in Kläranlagen. Zudem wurde die Teilnahme am Regelenergiemarkt und eine Optimierung des BHKW-Betriebes mit PV und Windkraft beforscht. Das **PyroGasII**-Projekt erforschte die Klärschlamm-Vorbehandlung für Flugstromvergasung. Im Projekt **LaubCycle** wurde das Kreislaufsystem für Laub in Kommunen untersucht, in wie weit die Verbrennung von vorbehandeltem Laub klimaneutrale Energie liefert sowie Nährstoffe rückgeführt werden können.

Wir wünschen Ihnen eine spannende Lektüre.
Ihre Begleitforschung



SEKTORKOPPLUNG & SYSTEMINTERGRATION Projektergebnisse 2023-2024

Flexibilisierung von Biomassefeuerungen & Biogasproduktion

8 Ingolf Seick, Jürgen Wiese

flexigast

Entwicklung und Erprobung eines Verfahrens zur flexiblen Biogasproduktion und optimierten Wärmespeicherung auf Basis gezielter Variationen der Gärtemperaturen

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

FlexNOx

Entwicklung einer Feuerung mit Brennstoffstufung zur Stickoxidminderung und Flexibilisierung von Biomassefeuerungsanlagen

26 Viktoria Scheff, Hafiz Ali Raza, Konstantin Bachmann, Korbinian Kaetzl, Michael Wachendorf, David Laner

BioRestBrennstoff

Energieeffiziente Nutzung sekundärer biogener Rest- und Abfallstoffe in Biomassefeuerungen durch stufenweise Aufbereitung und Brennstoffkonfektionierung

Alternative Brennstoffe und dezentrale Vergasung

40 Volker Lenz, Nora Szarka, Laura García Laverde, Kerstin Wurdinger, Torsten Schmidt-Baum, Eva Siebenhühner, Daniela Pomsel

OBEN

Ölersatz Biomasse Heizung

48 Annett Pollex

VergaFlex

Flexibilisierung der Biomassevergasung durch Nutzung des Vergaserkokses als Biomaterial für die stoffliche Verwertung und als Brennstoff für Kleinstvergaser <5 kW_{el}

58 Christian Wondra, Peter Treiber

IntenseMethane

Prozessintensivierung und –flexibilisierung einer mit Bioabfall betriebenen Trockenfermentationsanlage durch die biologische Methanisierung von wasserstoffreichen Synthesegasen

64 Christian Wondra

SyntheseReady

Entwicklung flexibler Biomasseheizkraftwerke zur Sektorkopplung

Anlageneffizienz

70 Lisa Röver, Roman Adam, Philipp Schneider, Hans Werner

MoBiFuels

Analyse und Beseitigung von Markthemmnissen von technisch modifizierten Bioenergieträgern

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

OpToKNuS

Entwicklung einer „Toolbox“ basierend auf numerischen Modellen und Praxismessungen zur Auslegung bzw. Optimierung von thermochemischen Anlagen zur Energiebereitstellung aus alternativen Brennstoffen

88 Christian Hubert, Bettina Steiniger, Christian Schaum, Jörg Kretschmar, Manuel Winkler, Eric Mauky, Konstantinos Athanasiadis, Jens Henker, Stefan Einsiedel, Johannes Wallacher, Markus Heinrich

FLXsynErgy

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

95 Andreas Ewald, Sebastian Fendt, Hartmut Spliethoff, Florian Henze, Robert Völkl

PyroGasII

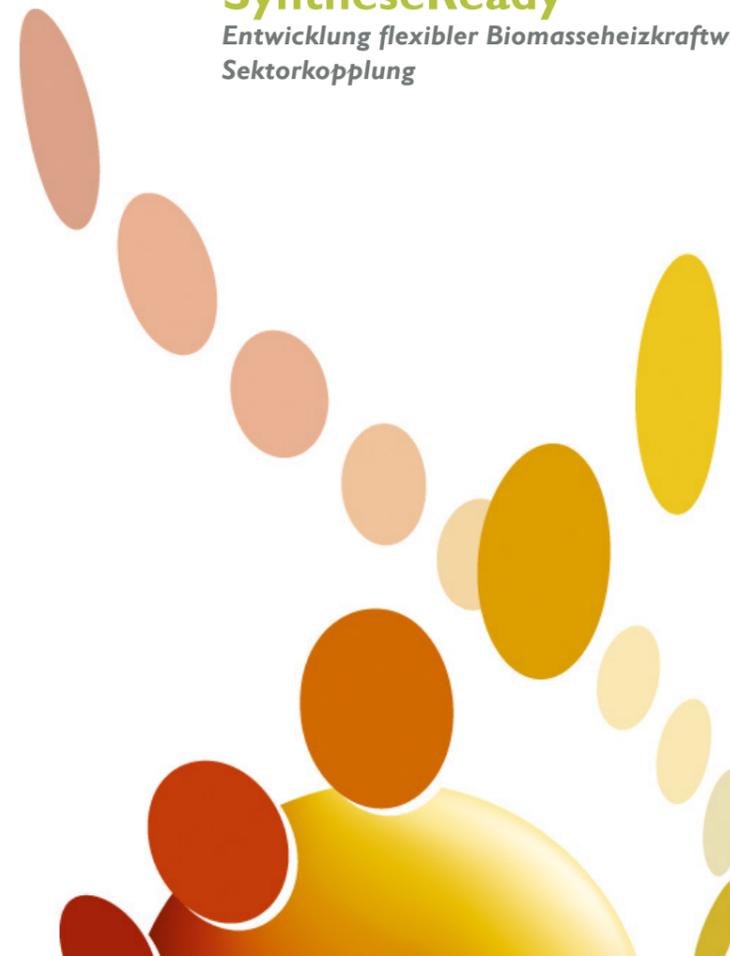
Dezentrale Verwertung von Klärschlamm mittels Pyrolyse und anschließender Flugstromvergasung zur gasmotorischen Nutzung; Teilvorhaben: Untersuchung der Flugstromvergasung von Klärschlamm bezüglich Prozessstabilität und Emissionen

104 Esther Stahl, Andreas Huft, Lasse Harloff, Florian Schanz, Karsten Töpel, Frank Schweppe

LaubCycle

Etablierung eines nachhaltigen Stoff- und Energiekreislaufs für den biogenen Reststoff Laub auf kommunaler Ebene

112 Impressum



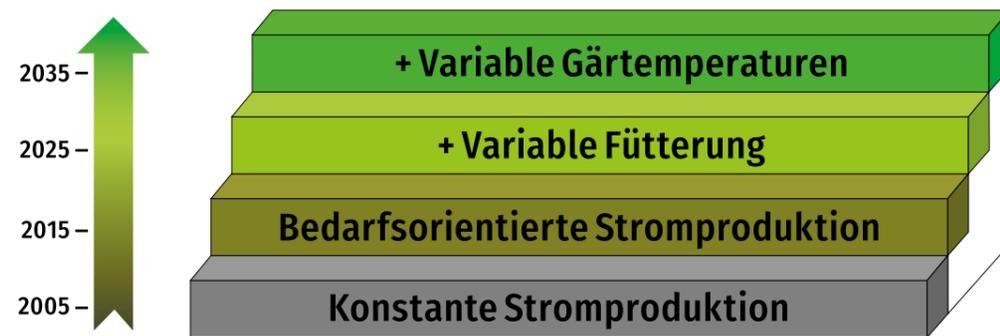
FLEXIBILISIERUNG VON BIOMASSEFEUERUNGEN & BIOGASPRODUKTION



Ingolf Seick, Jürgen Wiese

flexigast

Entwicklung und Erprobung eines Verfahrens zur flexiblen Biogasproduktion und optimierten Wärmespeicherung auf Basis gezielter Variationen der Gärtemperaturen



Entwicklung der Flexibilität von Biogasanlagen (Quelle: Seick)

SUMMARY

The newly developed flexigast process enables demand-oriented biogas production and optimised heat storage through targeted variation of the temperatures in the fermenters. If, for example, a demand-driven combined heat and power plant ('Flex-CHP') is switched off according to the electricity schedule, the fermenter temperature is lowered in order to reduce gas production, with the fermenter simultaneously serving as a heat store for external heat utilisation. When the CHP unit starts up again, the fermenter temperature is raised, which increases gas production and charges the 'fermenter heat store'. These temperature variations must be combined with flexible feeding of the fermenter. The feeding variations are coordinated with the temperature changes. A decrease in the average methane yield and process stability can be avoided through controlled process management. The use of a heat pump improves the potential of temperature reductions in the fermenter and at the same time significantly increases the temperature and amount of useful heat for external consumers (see Figure 1).

Zitat der Projektleitung

» Gerade mit Blick auf die aktuellen Herausforderungen für die Biogasbranche kommt das neue 'flexigast-Verfahren' zur richtigen Zeit. Es kann beispielsweise Bestandsanlagen durch kostengünstige Flexibilisierungslösungen Perspektiven für einen wirtschaftlichen Weiterbetrieb bieten oder auch zusätzliche Flexibilität und Wärmeversorgungssicherheit bei hoch flexiblen Biogasanlagen ermöglichen. «

MOTIVATION ZIELE

Das Projekt hat die Entwicklung und Erprobung eines Verfahrens zur flexiblen Biogasproduktion und optimierten Wärmespeicherung basierend auf Variationen der Gärtemperaturen und der Fütterung zum Ziel. Dieses neuartige »flexigast-Verfahren« soll die Flexibilisierung von Biogasanlagen verbessern.

Wesentliche Ziele des Verfahrens sind die:

- signifikante Reduzierung des zur Flexibilisierung erforderlichen Gasspeichervolumens,
- Vermeidung von zusätzlich zu errichtenden Wärmespeichern,
- betriebliche Optimierung des Wärmemanagements.

ZUSAMMENFASSUNG

Das neu entwickelte flexigast-Verfahren ermöglicht eine bedarfsorientierte Biogasproduktion und optimierte Wärmespeicherung durch gezielte Variation der Gärtemperaturen in den Fermentern. Wenn beispielsweise ein bedarfsgerecht betriebenes Blockheizkraftwerk (»Flex-BHKW«) gemäß Stromfahrplan ausgeschaltet wird, wird die Fermentertemperatur abgesenkt, um die Gasproduktion zu reduzieren wobei der Fermenter gleichzeitig als Wärmespeicher für externe Wärmenutzungen dient. Geht das BHKW wieder in Betrieb wird die Gärtemperatur rechtzeitig erhöht, womit die Gasproduktion ansteigt und der »Fermenter-Wärmespeicher« aufgeladen wird. Diese Temperaturvariationen sind mit einer flexiblen Fütterung des Fermenters zu kombinieren. Die Fütterungsvariationen erfolgen abgestimmt mit den Temperaturänderungen. Ein Rückgang des mittleren Methanertrages und der Prozessstabilität kann durch kontrollierte Prozessführung vermieden werden. Durch Einsatz einer Wärmepumpe werden das Potenzial und die Regelbarkeit der Temperaturabsenkungen im Fermenter verbessert und gleichzeitig Temperatur und Menge der Nutzwärme für externe Verbraucher deutlich gehoben (siehe Abbildung 1).

FKZ-NR.: 03EI5424
LAUFZEIT: 01.02.2021–30.06.2024
ZUWENDUNGSSUMME: 575,020 €

KOORDINATION
bue Anlagentechnik GmbH
Am Anger 11, 06249 Mülcheln
www.bue-anlagentechnik.de

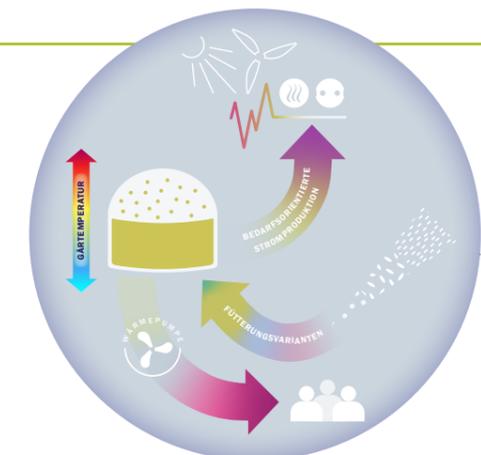
KONTAKT
Projektleitung:
Prof. Dr.-Ing. Jürgen Wiese
Direkter Ansprechperson/
Autor: Ingolf Seick
Telefon: +49 (0)391 886 4365
E-Mail: ingolf.seick@h2.de

PARTNER
ORMatic GmbH
Am Friedrichshain 22, 10407 Berlin
www.ormatic.de

Technische Beratung
für Systemtechnik
Mittelstraße 13a, 04205 Leipzig
www.bernd-felgentreff.de

Hochschule Magdeburg-Stendal
Fachbereich Wasser, Umwelt, Bau
und Sicherheit,
Arbeitsgruppe Siedlungswasser-
wirtschaft / Abwasser
Breitscheidstraße 2
39114 Magdeburg
www.h2.de/abwassergruppe

Gesellschaft zur Förderung
von Medizin-, Bio- und Umwelt-
technologien e.V. (GMBU),
Fachsektion Halle -
Umweltbiotechnologie
Erich Neuß Weg 5
06120 Halle (Saale)
www.gmbu.de



KEY MESSAGES

- Eine gezielte Variation der Fermentertemperatur, abgestimmt mit flexibler Fütterung, beeinträchtigt nicht die Effizienz und Stabilität des Biogasprozesses.
- Dies eröffnet neue Möglichkeiten für eine flexible Biogasproduktion und gleichzeitig für die Nutzung der Gärbehälter als Wärmespeicher.
- Das entwickelte flexigast-Verfahren kann kostengünstige und effektive Lösungen für die Flexibilisierung von Biogasanlagen bieten.
- Dynamische Simulationsmodelle zum Wärmemanagement und zur Prozessbiologie unterstützen Verfahrensentwicklungen, ergänzen Gärversuche und helfen bei der Anlagensoptimierung.

KEY MESSAGES

- Controlled variation of the fermenter temperature, coordinated with flexible feeding, does not impair the efficiency and stability of the biogas process.
- This opens up new possibilities for flexible biogas production and for utilising the fermentation tanks as heat storage.
- The flexigast process developed can offer low-cost and effective solutions for the flexibilisation of biogas plants.
- Dynamic simulation models for heat management and process biology support process development, supplement fermentation tests and help with plant optimisation.

METHODIK bzw. MAßNAHMEN

- Verfahrenskonzeption und Variantenentwicklung anhand von Beispielsystemen
- Kontinuierliche Labor-Gärversuche in verschiedenen Maßstäben (bis zum 20 L Fermenter)
- Halbtechnische Erprobung mit Container-Biogasanlage (zwei 1m³ Gärbehälter)
- Charakterisierung und Bewertung der Fermenterbiologie u. a. mittels quantitativer Echtzeit-PCR (RT-qPCR)
- Analysen und Verfahrensoptimierungen mit dynamischen Simulationsmodellen zur Prozessbiologie und zum Wärmemanagement
- Datenanalysen für großtechnische Biogasanlagen, um den Einfluss schwankender Gärtemperaturen auf den Biogasprozess zu untersuchen

ERGEBNISSE AUF EINEN BLICK

■ Schlussbericht

- **Tagungsband:** (Seick, I.; Wiese, J.: Flexible Biogasproduktion mit Variation der Fermentertemperatur. In: Tagungsband zur 10. Statuskonferenz im BMWi-Forschungsnetzwerk Bioenergie »Bioenergie – eine Partnerin für alle Fälle«, 29.-30.11.2021 (Online), Reader: ISBN 978-3-946629-78-8.)
- **Konzepte/Machbarkeitsstudien:** Anlagenkonzept
- **Anlagen:** Verfahren
- **Daten & Methoden:** Modell, Messreihe / Messprogramm

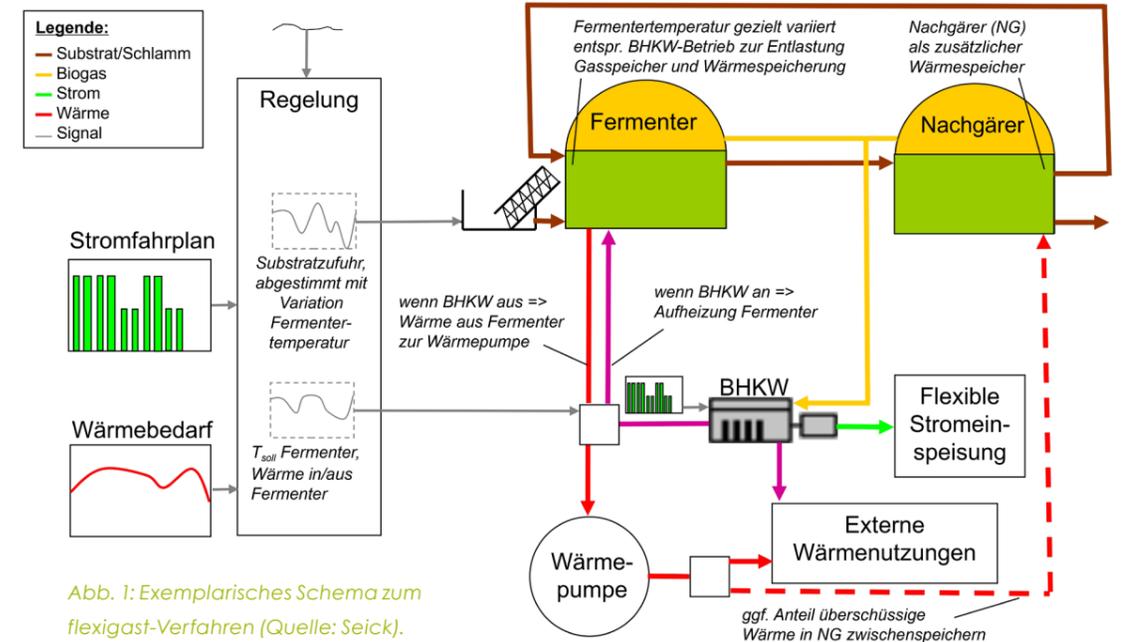


Abb. 1: Exemplarisches Schema zum flexigast-Verfahren (Quelle: Seick).

DARSTELLUNG DER ERGEBNISSE

Überblick:

Im Projekt erfolgten zunächst die Verfahrenskonzeption und der Nachweis im Labor, dass die Prozessbiologie und Substrateffizienz unbeeinträchtigt durch die flexiblen Gärtemperaturen und Fütterungsmengen sind. Dies wurde durch Erprobung auf einer Container-Biogasanlage bestätigt. Mit Hilfe von Modellen zur Simulation des Biogasprozesses und des Wärmemanagements wurden Verfahrensvarianten für Beispielsysteme (flexibilisierte Biogasanlagen mit Wärmenutzung) untersucht.

Verfahren:

Die Verfahrensentwicklung erfolgte für verschiedene Anwendungsfälle durch Definition von praxisrelevanten Beispielsystemen von Biogasantypen mit Blick auf Anlagendesign, Fütterungskonzept, Flexibilitätskonzept, Gasspeichermanagement und Wärmenutzung.

Daraus resultieren die folgenden Einschätzungen des Projektverbundes zum Anwendungspotenzial des flexigast-Verfahrens für Biogasanlagen:

- Das Verfahren ist prädestiniert für kleinere bis mittlere Flexibilisierungsprojekte (2- bis 3-fache Überbauung). Hierfür ist eine moderate Nachrüstung von Wärmeaustauschfläche für die Be- und Entladung des Fermenter-Wärmespeichers nötig. Durch Einsatz einer Wärmepumpe während

der Entladephase werden ein effektiverer Wärmeentzug aus dem Fermenter erreicht und die nutzbare Wärmemenge für externe Verbraucher, während das »Flex-BHKW« aus ist, erhöht. Eingespart wird ein zusätzlicher Wärmespeicherbehälter, und die Gasspeichererweiterung wird geringer ausfallen (u. U. reicht bereits die Abdeckung der Gärrestlager). Damit werden die Investitionskosten insgesamt gesenkt und zusätzliche Perspektiven für die EEG-Anschlussförderung geboten.

- Zudem kann »flexigast« höher flexibilisierte Biogasanlagen (>3-fache Überbauung) unterstützen, welche üblicherweise mit einem externen Warmwasser-Wärmespeicher und entsprechend großem Gasspeichervolumen ausgestattet sind. Hier kann durch die variable Fermentertemperatur mehr Wärme gespeichert und ein besseres Gasspeichermanagement erreicht werden. Somit wird zusätzliche Flexibilität und (Wärme-) Versorgungssicherheit gewonnen. Im einfachsten Fall ist nur die Fermenterheizung temporär auszuschalten, wenn das Flex-BHKW aus ist (z. B. Absenkung um 1-2K am Wochenende), um den Warmwasser-Wärmespeicher voll für den externen Wärmebedarf nutzen zu können. Zusammen mit der flexiblen Fütterung wird dann auch der Gasspeicher deutlich entlastet. Die Implementie-

Die »flexigast-Basislösung« erfordert weder eine Wärmepumpe noch die Nachrüstung von Wärmetauschern, womit praktisch keine Investitionskosten anfallen. Es ist lediglich mit einem gewissen Aufwand bei der Umstellung des Anlagenbetriebes (Prozessmonitoring) zu rechnen.

- Auch für Biogasanlagen, die auf Biomethanproduktion umstellen und mit dem Wegfall der BHKW-Abwärme neue Wärmequellen für die Fermenterheizung benötigen gibt es Anwendungsoptionen für angepasste Komponenten des flexigast-Verfahrens: So kann z. B. die Fermenterheizung mit Hilfe einer Wärmerückgewinnung aus dem Gärrestlager erhöht werden, wenn der Strombezug einer dafür betriebenen Wärmepumpe günstig ist (z. B. am Wochenende). Während der Zeiten hoher Strompreise (i. d. R. an den Wochentagen) kann dann eine Reduktion oder zeitweise Ausschaltung der Wärmepumpe bzw. der Fermenterheizung erfolgen, womit die Fermenterheizung wieder langsam absinken würde. Auch hier würde die flexible Temperaturführung neue Perspektiven bieten.



Abb. 2: Laborbiogasanlage für die kontinuierlichen Gärversuche (Quelle: Seick).



Abb. 4: Container-Biogasanlage für die halbtechnische Erprobung (Quelle: Vergara-Araya).

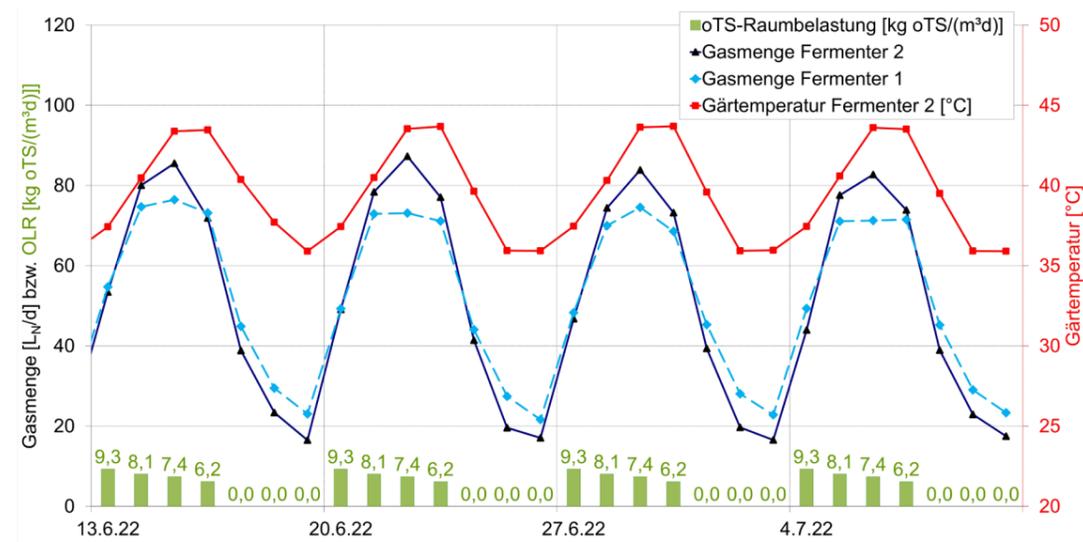


Abb. 3: Gasproduktion von Fermenter 2 in Abhängigkeit von Fütterung und Gärtemperatur im Vergleich mit Fermenter 1, für 4 Wochen des Laborgärversuches 2022, jeweils Tageswerte (Quelle: Seick).

ERPROBUNG IM LABOR UND TECHNIKUM:

Es wurden zunächst kontinuierliche Gärversuche an einer Laborbiogasanlage mit zwei 20 Liter-Fermentern im Parallelbetrieb durchgeführt (Abbildung 2). Die mittlere Raumbelastung (OLR) lag dabei zwischen 3 und 4,5 g organischer Trockenmasse (oTS) je L Fermentervolumen und Tag. Fermenter 1 wurde als Referenz mit konstant 42°C und Fermenter 2 mit variabler Gärtemperatur bei ansonsten gleicher Betriebsweise bzw. Fütterung gefahren. Die Temperatur in Fermenter 2 wurde in einem Bereich von 34 bis 48°C mit täglichen Änderungen von ±2 bis ±5 K variiert. Die Fütterung beider Fermenter erfolgte mit je 50% Rindergülle und 50% Maissilage einmal pro Wochentag mit zunächst konstanten Mengenrationen. Die grundsätzlichen Fütterungspausen an den Wochenenden lassen sich durch synchrone Temperaturabsenkung im Fermenter 2 gut in den Versuch integrieren, was bereits eine einfache flexible Fütterung darstellt. In einzelnen Versuchsphasen wurde die Fütterungsflexibilität erweitert, indem zum Wochenbeginn das 2-fache der mittleren Fütterungsmenge dosiert und nach schrittweiser Absenkung der Fütterung bis zum Donnerstag eine dreitägige Fütterungspause (Freitag bis Sonntag) folgte. Abbildung 3 veranschaulicht exemplarisch für eine Versuchsphase die mit der erweiterten Fütterungsflexibilität erzielbare Dynamik der Gasproduktion, welche durch Temperaturvariation im Fermenter 2 verstärkt wird.

Wie durch die kontinuierlichen Gärversuche gezeigt, ist die Steuerung der Biogasproduktion mit Temperaturvariationen aus Sicht des Biogasprozesses effektiv möglich, was im Detail bedeutet:

- Temperaturvariationen im Bereich von 34-48°C (innerhalb einer Woche) sind auch bei OLR von i. M. 4,5 kg oTS/(m³d) problemlos möglich.
- Dies gilt insbesondere bei abgestimmtem Fütterungsmanagement.
- Der Effekt der Fütterungsvariation auf die Flexibilität der Gasproduktion lässt sich durch angepasste Wochenfütterung und Ausdehnung des Fütterungsstopps am Wochenende auf 3 Tage deutlich steigern.
- Zusätzliche Flexibilität wird durch die o. g. Temperaturvariationen erreicht.
- Die Fermenterbiologie bleibt dabei unbeeinträchtigt (FOS/TAC ≈ 0,3; pH ≈ 7,5; gute Biogasqualität => Methangehalt ≈ 54%)
- Die mittleren Methanerträge lagen in allen Versuchen über 300 L/kg oTS. Die Substrateffizienz hängt dabei maßgeblich von der mittleren Gärtemperatur ab. Ab 40°C (im Wochenmittel) wurde kein Minderertrag gegenüber der Referenz (mit konstant 42°C) beobachtet.
- Der Gasspeicherbedarf kann durch Variation der Gärtemperatur um ca. 10% und insgesamt (mit flexibler Fütterung) um mehr als 50% reduziert werden.

Die erfolgreichen Laborversuche bestätigen die grundsätzliche Eignung des flexigast-Verfahrens für eine signifikante Gasspeichereinsparung und zur Wärmespeicherung in den Gärbehältern, ohne dass der Methanertrag oder die Prozessbiologie beeinträchtigt werden.

In der zweiten Projekthälfte wurde das Verfahren durch einen halbtechnischen Versuch auf einer Container-Biogasanlage erprobt (siehe Abbildung 4). Diese Anlage verfügt über zwei 1 m³ Rührkessel-Anaerobreaktoren, die für den Versuch in Reihe geschaltet, d. h. als Hauptfermenter und Nachgärer betrieben wurden. Während der Einfahr- und Referenzphase wurde die Fermenterheizung auf 42°C eingestellt und dann in vergleichbarer Weise wie bei den Laborversuchen zusammen mit der Fütterung variiert. Der Nachgärer wurde generell mit konstant 42°C betrieben. Die Erprobung bestätigt die zuvor beschriebenen Ergebnisse der Laborversuche.

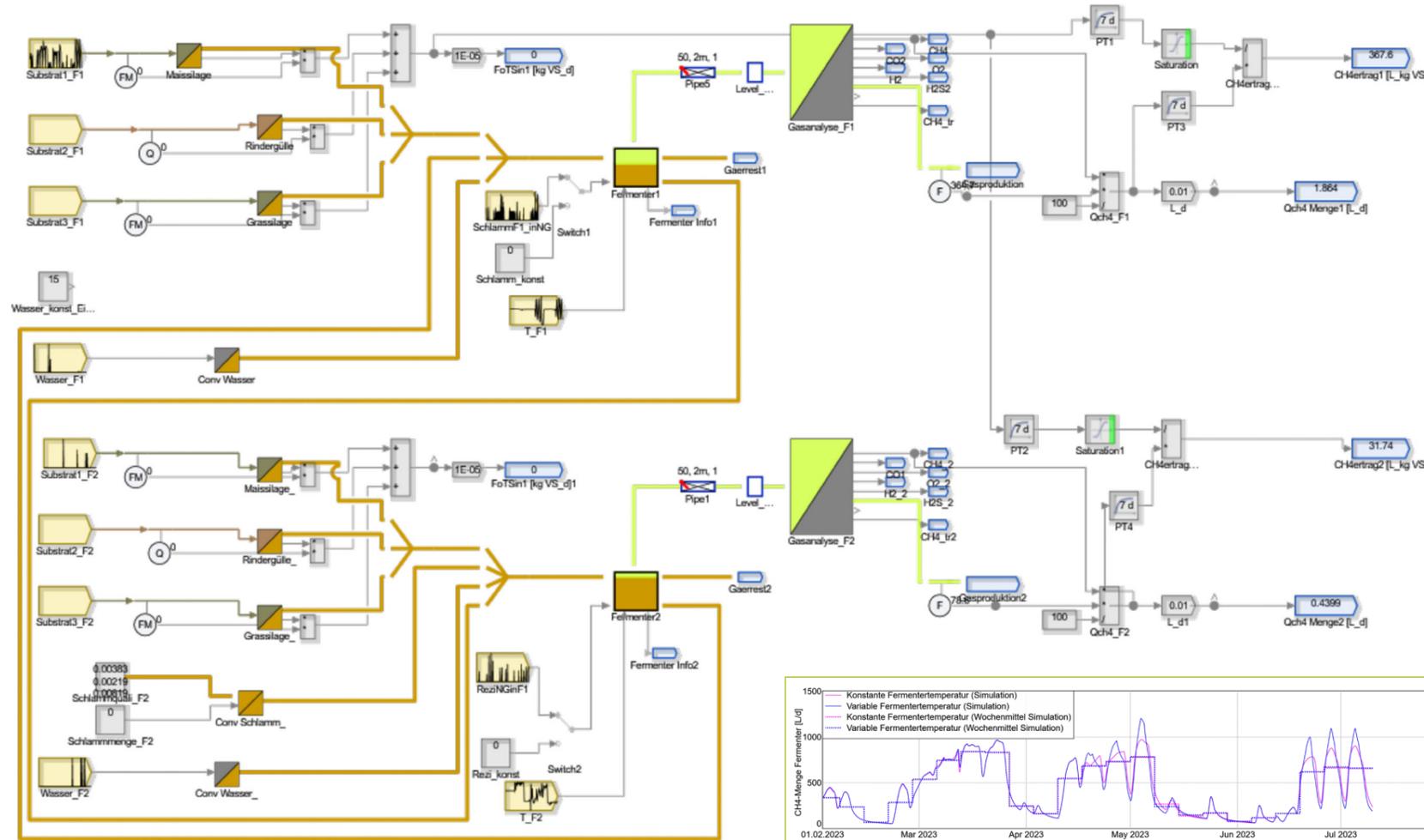


Abb. 5: Modell der Container-Biogasanlage zur Simulation der Technikumsversuche 2023, „Fermenter1“ = Hauptfermenter, „Fermenter2“ = Nachgärer (Quelle: Seick).

Simulationen:

Im Projekt wurden verschiedene Simulationsmodelle eingesetzt, welche auf dem Simulationsprogramm SIMBA# (SIMBA 2023) basieren. Es erfolgte eine modellbasierte Planung und Begleitung der Gärversuche im Labor und im Technikum, um Versuchsvarianten und -einstellungen zu testen, Messungen auf Plausibilität zu prüfen und um die Versuchsauswertung zu unterstützen. Dabei wurden als Ansatz zur Beschreibung der Prozessbiologie das ADMI (BATSTONE et al. 2002) in der Modifikation ADMI_{da} (OGUREK et al. 2013) mit Grundeinstellungen nach SEICK et al. (2022) verwendet. Abbildung 5 zeigt exemplarisch das SIMBA-Modell der Container-Biogasanlage.

Abb. 6: Simulierte Methanmengen (bei konstant ca. 42°C im Fermenter, verglichen mit variabler Fermentertemperatur entsprechend Versuch). Erkennbar ist der zusätzliche Effekt der Temperaturvariation auf die Dynamik der Methanproduktion (blaue Kurven) in den relevanten Versuchsphasen (Mitte April bis Anfang Mai sowie Mitte Juni bis Anfang Juli 2023). Die dargestellten Wochenmittelwerte dieser Simulationen zeigen, dass die Temperaturvariation nicht zu Einbußen in der Methanproduktion führt (Quelle: Seick).

Das Modell kann auch verwendet werden, um den Effekt der Temperaturvariation auf die Anlagenleistung besser abzuschätzen. Dies ist insbesondere deshalb von Vorteil, weil mit dem Aufbau des Technikumsversuches (Fermenter und Nachgärer) keine zeitlich parallele Referenz mit konstanter Fermentertemperatur gefahren werden konnte. So wurde eine Simulation des gesamten Versuchszeitraumes mit konstanter Vorgabe der Fermentertemperatur durchgeführt. Der Vergleich mit dem entsprechenden Simulationsverlauf des Versuches gibt hier Aufschluss zum Einfluss der Fermentertemperatur auf die Dynamik und mittlere Höhe der Gas- bzw. Methanproduktion (siehe Abbildung 6).

Zudem wurden integrierte Modelle zur dynamischen Simulation des Gasspeicher- und Wärmemanagements im Zusammenhang mit der temperaturabhängigen Prozessbiologie und Gasproduktion für die Beispielsysteme erstellt. Damit lassen sich die Potenziale der Speichereinsparungen abschätzen sowie Möglichkeiten und Anforderungen für fallspezifische flexigast-Implementierungen aufzeigen. Abbildung 7 zeigt beispielsweise die Simulation des Gasspeicherverlaufes über 12 Wochen mit einem einfachen Modell einer Biogasanlage mit angenommenen Stopps eines Flex-BHKW über jeweils 60 Stunden an den Wochenenden. Dabei wurden 3 Teilphasen mit je 4 Wochen simuliert:

- 1. Fütterung und Fermentertemperatur konstant => Referenz,
- 2. Fütterung flexibel und Fermentertemperatur konstant,
- 3. Fütterung flexibel (wie in 2.) und Fermentertemperatur flexibel => flexigast (hier: Montag bis Donnerstag Beheizung, Freitag bis Sonntag Kühlung/Wärmeentnahme).

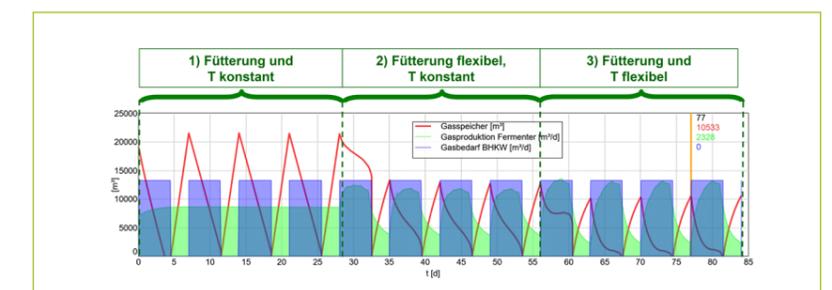


Abb. 7: Beispielsimulation mit integriertem Modell: Gasproduktion, Gasbedarf BHKW sowie resultierender Gasspeicherverlauf (Quelle: Seick).

Erkennbar ist gegenüber dem maximalen Gasspeicherbedarf von ca. 21.000 m³ in Phase I, die Reduzierung des erforderlichen Gasspeichers allein durch flexible Fütterung auf ca. 12.500 m³ (60%) in Phase 2 sowie auf ca. 10.000 m³ (<50%) durch zusätzlich flexible Fermentertemperatur. Die hier nicht dargestellte Einsparung von Wärmespeicher durch flexigast betrug in dieser Beispielsimulation bis zu 100%.

HERAUSFORDERUNGEN bzw. HEMMNISSE

- Folgende Hemmnisse sind generell für eine Vermarktung relevant:
- Wirtschaftliche Situation vieler Biogasanlagen und politische Unsicherheiten senken Investitionsbereitschaft für Flexibilisierungsprojekte
 - Verschärfung verschiedenster fachrechtlicher Anforderungen
 - Fallspezifisch ggf. zu hoher Aufwand bei Anpassung der vorhandenen Wärminfrastruktur am Standort

AUSBLICK

Die Verfahrensentwicklung erfolgte mit Blick auf eine möglichst breite Übertragbarkeit in die Praxis für verschiedene Biogasanlagenkonzepte. Damit werden, wie oben genauer ausgeführt, Anwendungspotenziale des flexigast-Verfahrens sowohl für eine kostengünstige Ertüchtigung bestehender Biogasanlagen für den wirtschaftlichen Weiterbetrieb als auch zur Schaffung zusätzlicher Flexibilität im Rahmen ambitionierter Flexibilisierungsprojekte gesehen. Auch für Anlagen, die auf Biomethanproduktion umstellen, können angepasste Varianten des flexigast-Verfahrens interessant werden. Aktuell werden im Projekt akquirierte Betriebsdaten verschiedener großtechnischer Biogasanlagen mit Blick auf den Einfluss schwankender Gärtemperaturen auf den Biogasprozess ausgewertet, um den Praxisbezug weiter zu erhöhen.

Besonders geeignet für die nächsten Schritte in die Praxis ist das o. g. Konzept der „flexigast-Basislösung“, welche praktisch ohne Umrüstungen auf den entsprechenden Biogasanlagen implementiert werden kann.

LITERATUR

BATSTONE, D.J.; KELLER, J.; ANGELIDAKI, I.; KALYUZHNYI, S.V.; PAVLOSTATHIS, S.G.; ROZZI, A.; SANDERS, W.T.M.; SIEGRIST, H.; VAVILIN, V.A. (2002): Anaerobic Digestion Model No. 1. IWA Task Group on Mathematical Modelling of Anaerobic Digestion Processes. IWA Scientific and Technical Report No. 13. 2002.

OGUREK, M.; SEICK, I.; KUJAWSKI, O.; ALEX, J. (2013): Toward modeling of biogas plants in engineering practice. 11th IWA conference on instrumentation control and automation, 18.-20. September 2013, Narbonne, France.

SEICK, I.; VERGARA-ARAYA, M.; WIESE, J. (2022): Model-Based Analysis to Increase the Substrate Efficiency of a Biogas Plant. Chem. Eng. Technol.. <https://doi.org/10.1002/ceat.202100370> (2022).

SIMBA (2023): SIMBA# 5.0 - Simulationssystem für modellgestützte Lösungskonzepte im Wasser-, Abwasser- und Biogasbereich. Institut für Automation und Kommunikation e.V. (ifak), Magdeburg, 2023.

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

FlexNOx

Entwicklung einer Feuerung mit Brennstoffstufung
zur Stickoxidminderung und Flexibilisierung von
Biomassefeuerungsanlagen

ZUSAMMENFASSUNG

Das Ziel des Projektes war die Entwicklung und Erprobung einer neuen Feuerung, mit der die NO_x-Emissionen aus der Verbrennung von biogenen Festbrennstoffen gegenüber dem Stand der Technik um mindestens 50 % reduziert werden, was zukünftig vor allem bei der Nutzung von Restholz, aufgrund der teilweise hohen NO_x-Emissionen, sehr wichtig wird. Die Reduzierung der Emissionen erfolgt dabei durch Brennstoffstufung. Die neu entwickelte Feuerung verfügt über eine zusätzliche Reduktionszone, bei welcher durch Zugabe eines Sekundärbrennstoffes die Stickoxide abgebaut werden. Als Reduktionsbrennstoff wurde Erdgas verwendet.

Durch die Brennstoffstufung konnte das ursprünglich gesetzte Ziel, die Stickoxidemissionen um 50 % zu reduzieren, deutlich übertraffen werden. Aus diesem Grund wurde sich als weiteres Ziel die Einhaltung der Grenzwerte der 44. BImSchV, welcher bei 370 mg/m³ bei einem Bezugssauerstoff von 6 Vol.-% liegt, gesetzt. Auch dieser Wert konnte unterschritten werden.

THEMEN SCHWERPUNKTE

- Stickoxidminderung
- Brennstoffstufung
- Leistungsbereich von 0,1 bis 2 MW
- Nutzung biogener Rest- und Abfallstoffe

KERN BOTSCHAFTEN

- Prinzip der Brennstoffstufung zur Reduktion der Stickoxide
- NO_x-Reduktion um mindestens 50%
- Nutzung von Restholz als Primärbrennstoff
- Erdgas als gasförmiger Reduktionsbrennstoff, um Prinzip nachzuweisen
- Spätere Untersuchungen hinsichtlich alternativer Reduktionsbrennstoffe

KONTAKT

Projektleitung: Niklas Gebhard
Telefon: +49 (0)9661 8155-622
E-Mail: niklas.gebhard@umsicht.
fraunhofer.de

FKZ-NR.: 03EI5426
LAUFZEIT: 01.02.2021-31.07.2024
ZUWENDUNGSSUMME: 770,861€

KOORDINATION

Fraunhofer UMSICHT
Institutsteil Sulzbach-Rosenberg
An der Maxhütte 1
92237 Sulzbach-Rosenberg
www.umsicht-suro.fraunhofer.de/

PARTNER

Endress
Holzfeuerungsanlagen GmbH
Industriestr. 18, 91593 Burgbernheim
www.endress-feuerungen.de

Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg
Lehrstuhl für Energieverfahrenstechnik
Fürther Str. 244f
90429 Nürnberg
https://www.evt.tf.fau.de/

SUMMARY

The aim of the project was the development and testing of a new combustion system that would reduce NO_x emissions from the combustion of biogenic solid fuels by at least 50% compared to the state of the art. This is particularly important for the future use of residual wood, due to the partially high NO_x emissions. The reduction of emissions is achieved through fuel staging. The newly developed combustion system features an additional reduction zone, where nitrogen oxides are broken down by the addition of a secondary fuel. Natural gas was used as the reduction fuel.

Through fuel staging, the originally set goal of reducing nitrogen oxide emissions by 50% was significantly exceeded. For this reason, an additional goal was set to comply with the limit values of the 44th BImSchV, which is 370 mg/m³ with a reference oxygen content of 6 vol.-%. This value was also undercut.

KEY MESSAGES

- Principle of fuel staging for nitrogen oxide reduction
- NO_x reduction by at least 50%
- Use of residual wood as primary fuel
- Natural gas as a gaseous reduction fuel to demonstrate the principle
- Subsequent investigations regarding alternative reduction fuel

Zitat der Projektleitung: Niklas Gebhard

Bisher existiert keine geeignete, auf dem Markt verfügbare Lösung zur Stickoxidminderung in dezentralen Feuerungsanlagen mit einer Leistung zwischen 100 kW und 2 MW. Im Rahmen des Projektes FlexNOx soll das Prinzip der Brennstoffstufung weiterentwickelt werden, um diese Lücke zu schließen. Dies wird insbesondere für die Holzverarbeitende Industrie bei der Nutzung von Restholz relevant, wenn in Zukunft die 1. BImSchV, welche aktuell keine Grenzwerte hinsichtlich Stickoxide beinhaltet, mit diesen Grenzwerten erweitert wird.

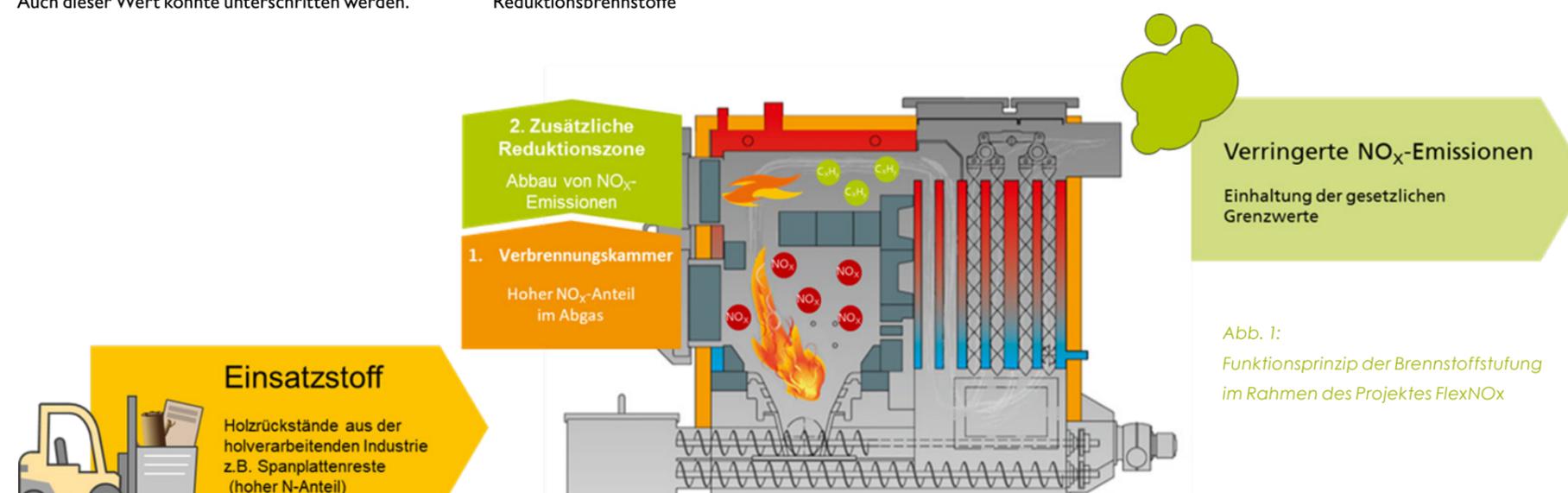
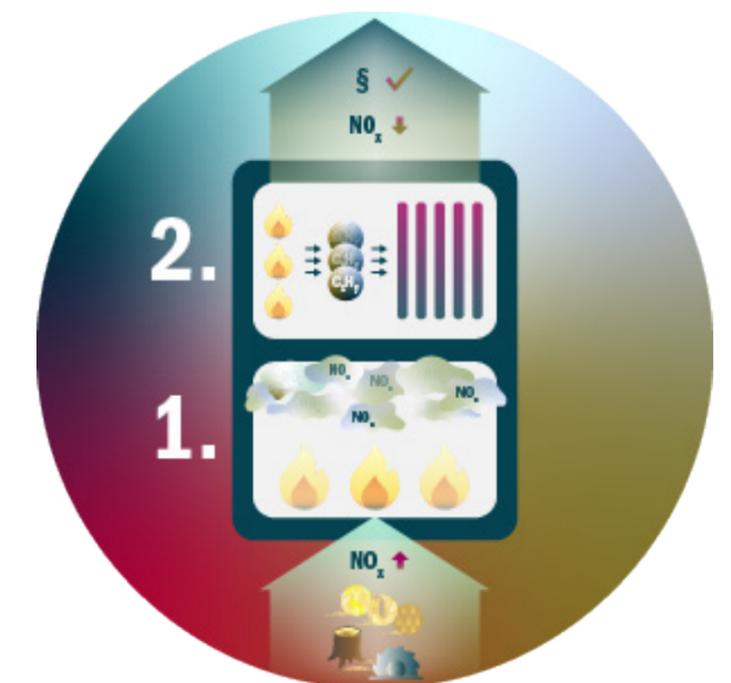


Abb. 1:
Funktionsprinzip der Brennstoffstufung
im Rahmen des Projektes FlexNOx



METHODIK bzw. MASSNAHMEN

- Im Rahmen des Projektes wurden Versuche an einer Bestandsanlage im Feld mit dem Brennstoff, welcher auch in der restlichen Projektlaufzeit verwendet wurde, durchgeführt, um den Ist-Zustand der Stickoxid-Emissionen mit diesem Brennstoff zu ermitteln
- Beim verwendeten Brennstoff handelt es sich um Briketts aus Spanplattenresten aus der Möbel-Industrie. Dieser weist aufgrund des Klebstoffes und der Beschichtung einen vergleichsweise hohen Stickstoffgehalt auf, wodurch wiederum hohe Stickoxid-Emissionen zu erwarten sind. Der Brennstoff fällt dementsprechend unter § 3 Nummer 6 und 7 der I. BImSchV.
- Von der Firma Endress wurde ein Prototyp gebaut, mit welchem die übrigen Versuche durchgeführt wurden. Hierbei wurde zwischen Brennkammer und Wärmeübertrager, aus welchen die Anlage normalerweise besteht, als dritten Bestandteil das Reduktionsmodul eingebaut
- Für die Auslegung der neuen Anlage führte die FAU CFD-Simulationen durch
- Nach erfolgreichem Aufbau und Inbetriebnahme der Anlage wurden zunächst Versuche unter Standardeinstellungen durchgeführt, um auch bei der neuen Anlage den Ist-Zustand bewerten zu können. Anschließend wurden einige Versuche mit Brennstoffstufung durchgeführt. Ziel war die Identifikation optimaler Einstellungen
- Nachdem die optimalen Einstellungen gefunden waren, wurde Versuche mit variierender Gaszufuhr durchgeführt. Diese werden im späteren Verlauf genauer erläutert.

WEITERE INFORMATIONEN

- Link zur [Projektseite](#)
- Link zum [Endbericht](#)

ERGEBNISSE AUF EINEN BLICK

- **Schlussbericht**
- **Beitrag im Tagungsband:**
 - Gebhard N, Meiller M, Heese M, Hamberger A, Nix J, Lukas J (2023): »Entwicklung einer Feuerung mit Brennstoffstufung – Stickoxidminderung und Flexibilisierung von Biomassefeuerungsanlagen«, In: Thrän & Händler. Statuskonferenz Bioenergie 2023; p.98-99. DOI: 10.48480/x66n-ev26
- **Anlagen:**
 - Technikumsanlage
 - Nachrüstung Bestandsanlage
- **Daten & Methoden:**
 - Messreihe oder Messprogramm
- **Markt:**
 - Vorbereitung der Markteinführung neuer Technologien
 - Vorbereitung der Markteinführung neuer Komponenten
- **Weitere Ergebnistypen:**
 - Evaluation oder Validierung
 - Einbringen in Richtlinien / Normen (Standardisierung)

DARSTELLUNG DER ERGEBNISSE

Erklärung des Prinzips der Brennstoffstufung

Als Primärbrennstoff werden dabei Spanplattenreste mit einem hohen Stickstoffgehalt verwendet. Dies hat zur Folge, dass bei der Verbrennung ein hoher Anteil an NO_x-Emissionen auftritt. Um diese Emissionen zu verringern, befindet sich im Anschluss an die Verbrennungskammer eine zusätzliche Reduktionszone. Hierbei wird ein zweiter Brennstoff, im Rahmen von FlexNOx handelt es sich dabei um Erdgas, in die Reduktionskammer eingedüst. Dabei entsteht eine Zone mit Brennstoffüberschuss, wodurch hier nun die entscheidenden NO-Abbaureaktionen stattfinden. Dadurch können die Kohlenwasserstoffradikale, welche durch den zugegebenen Reduktionsbrennstoff entstehen, zusammen mit dem gebildeten NO_x über HCN und NH-Spezies zu molekularem Stickstoff reagieren. Im Anschluss an diese Reaktionen wird weitere Verbrennungsluft zugegeben, um eine vollständige Verbrennung zu erzielen, bei welcher allerdings die Rückoxidation der N-Spezies zu NO möglichst gering gehalten werden soll. Am Ende sollen durch dieses Prinzip deutlich geringere NO_x-Emissionen im Abgas der Anlage vorliegen.

Ein wichtiges Kriterium für die Bewertung der Effizienz der Brennstoffstufung ist der sogenannte RFR-Wert (Reburn-Fuel-Rate), welcher den Anteil des Reduktionsbrennstoffes an der Gesamtwärmeleistung darstellt und über folgende Gleichung bestimmt werden kann:

$$RFR = \frac{m_2 \times H_{U2}}{m_1 \times H_{U1} + m_2 \times H_{U2}}$$

m_1 : Masse Primärbrennstoff

m_2 : Masse Reduktionsbrennstoff

H_{U1} : Heizwert Primärbrennstoff

H_{U2} : Heizwert Reduktionsbrennstoff

Aufbau der Anlage

Ziel beim Aufbautagebau war es, dass zukünftig Bestandsanlagen möglichst einfach an diese angepasst werden können. Die Anlage besteht aus drei Modulen, dem Kessel und dem Wärmeübertrager, welche beide bereits Teil einer in Serie gefertigten Anlage der Firma Endress sind, sowie der Reduktionszone, welche zwischen Kessel und Gewölbe ergänzt wird. Die Reduktionszone ist mit mehreren Öffnungen ausgestattet, über welche der Reduktionsbrennstoff, sowie der Tertiärluft zugegeben werden kann. Auch weitere Messtechnik, wie Thermolemente oder eine Lambdasonde sind über diese Öffnungen integriert. Durch die Reduktionszone kann die für den NO-Abbau notwendige Verweilzeit (bei $\lambda < 1$) ermöglicht werden. Die Anlage ist in folgender Abbildung 2 dargestellt.

Zündbrenner
(Sicherheitseinrichtung) **(A)**

Zugabe
Tertiärluft **(B)**

Zugabe
Reduktionsbrennstoff **(C)**



Abb. 2:
Aufbau der Versuchsanlage

Brennstoffanalyse

Im Laufe des Projektes wurde der verwendete Brennstoff ausführlich hinsichtlich des Wassergehaltes, sowie des Heizwertes und der chemischen Zusammensetzung analysiert. Am wichtigsten ist für das Projekt der Stickstoff-Gehalt des Brennstoffs, welcher bei ca. 4,6% lag. Die Ergebnisse sind in Tabelle 1 dargestellt.

Tab. 1: Ergebnisse der Brennstoffanalyse

Übersicht der Ergebnisse der Brennstoffanalyse

Wassergehalt	Heizwert	N-Anteil	C-Anteil	H-Anteil	S-Anteil	O-Anteil
5,8%	18.235 kJ/kg	4,6%	47,4%	6,7%	0,0%	41,4%

Anmerkungen zu den Versuchsergebnisse

Im Folgenden werden einige Versuchsergebnisse dargestellt. Das ursprüngliche Projektziel, welches bei einer NOx-Reduzierung von mindestens 50% liegt, konnte bereits in den ersten Versuchen erreicht werden. Aus diesem Grund haben sich die Projektpartner dazu entschieden, sich als zweites Ziel eine Einhaltung der Grenzwerte der 44. BImSchV zu setzen. In der 44. BImSchV liegt der Grenzwert von Stickoxiden bei Anlagen unter 5 MW bei 370 mg/m³ bei 6% O₂. Aus diesem Grund werden auch im Folgenden die Emissionsmesswerte auf eine Sauerstoffkonzentration von 6% bezogen.

Versuchsergebnisse ohne Brennstoffstufung

Abbildung 3 zeigt einen Verlauf der Messwerte für einen Versuch ohne Brennstoffstufung. Hierbei liegen die Standard-einstellungen der Anlage vor. Es zeigt sich, dass mit einem deutlichen Luftüberschuss gefahren wird, um mögliche CO-Emissionen zu verhindern. Außerdem ist die Anlage so geregelt, dass diese möglichst eigenständig fährt. Dies hat zur Folge, dass die CO-Emissionen zwar sehr gering sind, gleichzeitig aber die NOx-Emissionen aufgrund der Luftüberschusses sehr hoch.

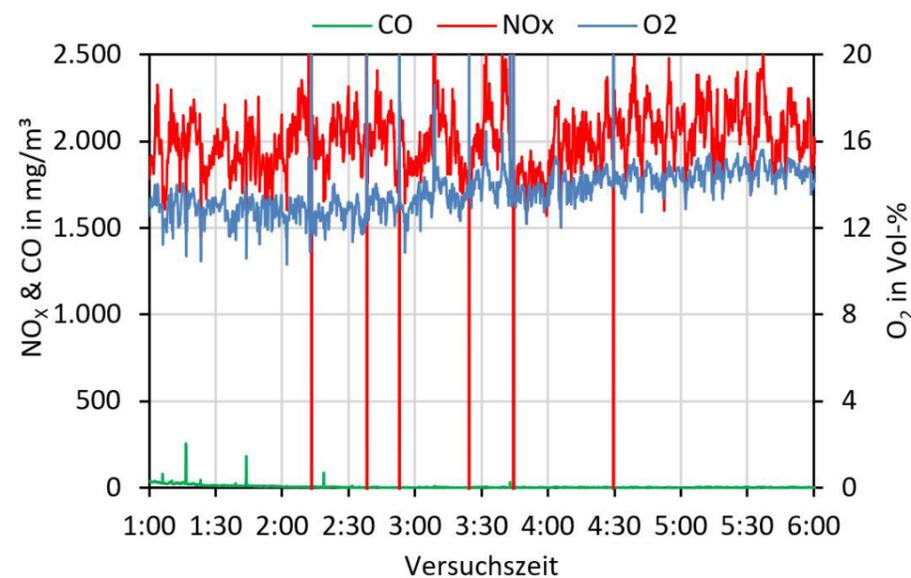


Abb. 3: Emissionsverlauf für einen Versuch ohne Brennstoffstufung

Tab. 2: Mittelwerte der Messungen für den Versuch ohne Brennstoffstufung

Mittelwerte der Messungen ohne Brennstoffstufung		
NOx in mg/m ³	CO in mg/m ³	O2 in Vol.-%
1955	6,3	13,7

Versuchsergebnisse mit Brennstoffstufung

Nach den Vorversuchen wurde das Konzept der Brennstoffstufung erprobt. Hierbei wurden verschiedene Einstellungen variiert, um den optimalen Betriebspunkt zu finden. Bei diesem sollen in erster Linie die NOx-Emissionen möglichst gering sein. Gleichzeitig sollen aber auch die übrigen Messgrößen, wie die CO-Emissionen, aber auch die Brennraumtemperatur nicht zu sehr ansteigen. Als Zielwerte wurde dabei eine Primärluftzahl von 1,1 bis 1,2 definiert. Dadurch soll einerseits eine vollständige Feststoffverbrennung im Brennraum garantiert werden und gleichzeitig aber eine nicht zu hohe Reduktionsbrennstoffmenge benötigt werden, um in der Reduktionszone für unterstöchiometrische Bedingungen zu sorgen. (Meiller, Daschner, Walberer, & Horning, 2016).

Dabei wurde die normale Regelung deaktiviert und konstante Werte für die Brennstoff- und Luftzufuhr vorgegeben. Um die optimale Primärluftzahl einzustellen, wurde die Sekundärluft der Anlage weitestgehend reduziert und ein großer Anteil an Rezirkulationsluft eingedüst. Die Tertiärluft wurde dabei so eingestellt, dass gerade so möglichst geringe CO-Emissionen vorliegen, um die Rückreaktionen zu NOx zu minimieren.

Für einen dieser Versuche sind die Verläufe der Messwerte in folgender Abbildung 4 dargestellt. Wie dem Diagramm entnommen werden kann, wurde im Laufe des Versuches die Menge des Erdgases variiert. Hierbei wurden verschiedensten RFR-Werte angefahren. Nach der Umstellung auf 32 % RFR wurden erhöhte CO und CH₄-Emissionen gemessen (siehe Tabelle 3), weshalb einige Anpassungen am Anlagenbetrieb vorgenommen wurden. Dadurch konnten die CO und CH₄-Peaks minimiert werden, allerdings lagen auch höhere NOx-Emissionen vor. Die geringsten Stickoxidemissionen wurden bei einem RFR-Wert von 38 % gemessen. Eine zusätzliche Erhöhung

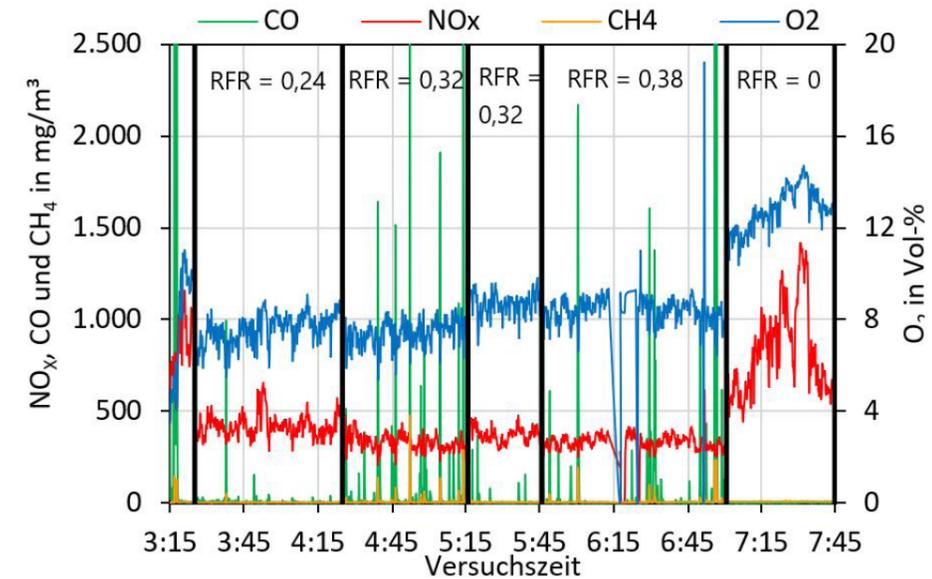


Abb. 4: Emissionsverlauf für einen Versuch mit Brennstoffstufung

des RFR-Wertes hätte voraussichtlich eine weitere Reduzierung der NOx-Emissionen bewirkt, allerdings ist dann der Anteil des Erdgases zu hoch, um dies noch als sinnvollen Betriebspunkt zu bezeichnen. Beim letzten Betriebspunkt wurde die Erdgas-Zuführung ausgeschaltet, die Tertiärluft wurde allerdings weiterhin zugeführt. Demzufolge liegt hier eine Art Luftstufung und auch magere Verbrennung im Brennraum vor, wodurch auch hier die NOx-Emissionen deutlich geringer sind als in Abbildung 3. In Tabelle 3 sind die Mittelwerte für diese fünf Phasen abgebildet.

Tab. 3: Mittelwerte der Messungen für den Versuch mit Brennstoffstufung

Mittelwerte der Messungen mit Brennstoffstufung				
RFR in %	NO _x in mg/m ³	CO in mg/m ³	O ₂ in Vol.-%	CH ₄ in mg/m ³
24	423	10,7	7,6	4,9
32	333	106,7	7,4	12,7
32	372	26,5	8,7	6,9
38	321	85,2	8,4	10,2
0	825	2,3	12,8	8,8

Der Tabelle kann entnommen werden, dass mit Hilfe der Brennstoffstufung das ursprüngliche Projektziel eine Reduzierung der NO_x-Emissionen um 50 % deutlich übertroffen wurde. Bei gewissen Einstellungen können auch zukünftige Grenzwerte eingehalten werden. In Phase zwei und vier konnten die Grenzwerte sogar bemerkbar unterschritten werden, allerdings treten hier ab und zu CO-Peaks auf. Hierzu muss aber erwähnt werden, dass aufgrund der aktuellen Phase dieser Untersuchungen die Regelung von Rezirkulations- und Tertiärluft händisch durchgeführt wurde. Bei weiteren Untersuchungen wäre ein Ziel, hier eine Automatisierung einzubauen, um den Anlagenbetrieb stabiler zu gestalten und so auch möglicherweise die CO-Emissionen reduzieren zu können.

HERAUSFORDERUNGEN bzw. HEMMNISSE

Die größte Herausforderung im Laufe der Versuche war es, ein Gleichgewicht zwischen der Luftzahl und Temperatur im Brennraum einzuhalten. Einerseits sollte die Temperatur nicht 1.100 °C überschreiten, damit die Anlage nicht unnötig belastet und die Bildung von Schlacke verhindert wird. Andererseits ist es für das Prinzip der Brennstoffstufung wichtig, dass die Luftzahl im Brennraum möglichst nahe an „1“ liegt, damit möglichst wenig Sauerstoff vom Reduktionsbrennstoff „verbraucht“ werden muss und somit hohe Reduktionsraten hinsichtlich der Stickoxide ermöglicht werden. Demzufolge wurde die Sekundärluftzufuhr der Anlage so weit wie möglich reduziert. Allerdings ist diese auch für die Kühlung der Anlage wichtig, wodurch sie nicht ganz weggelassen werden konnte. Die spätere Regelung fand über die Zugabe von Primär- und Rezirkulationsluft statt, welche über eine Lambdasonde nach der ersten Verbrennungskammer bewertet werden konnte. Um hierfür die optimalen Einstellungen zu finden, war eine große Anzahl an Versuchen und anschließenden Anpassungen notwendig.

AUSBLICK

Über das Projekt FlexNOx konnten die Einflüsse der Brennstoffstufung auf die Stickoxidemissionen nachgewiesen werden. Hierbei wurde Brennstoff mit einem hohen Stickstoffgehalt verwendet, bei welchem die NO_x-Emissionen normalerweise bei fast 2.000 mg/m³ (bei 6 Vol.-% O₂) liegen. Durch die Brennstoffstufung kann eine Reduzierung auf etwas über 300 mg/m³ erzielt werden, wodurch hier die Grenzwerte der 44. BImSchV unterschritten werden können. Die Marktrelevanz ist gegeben, da dies ist vor allem für die Holzverarbeitende Industrie enorm wichtig ist. Gleichzeitig wurde die Anlage so aufgebaut, dass das auch Bestandsanlagen mit dem neuen Zwischenmodul, in leicht angepasster Form, ergänzt und somit die Brennstoffstufung betrieben werden kann.

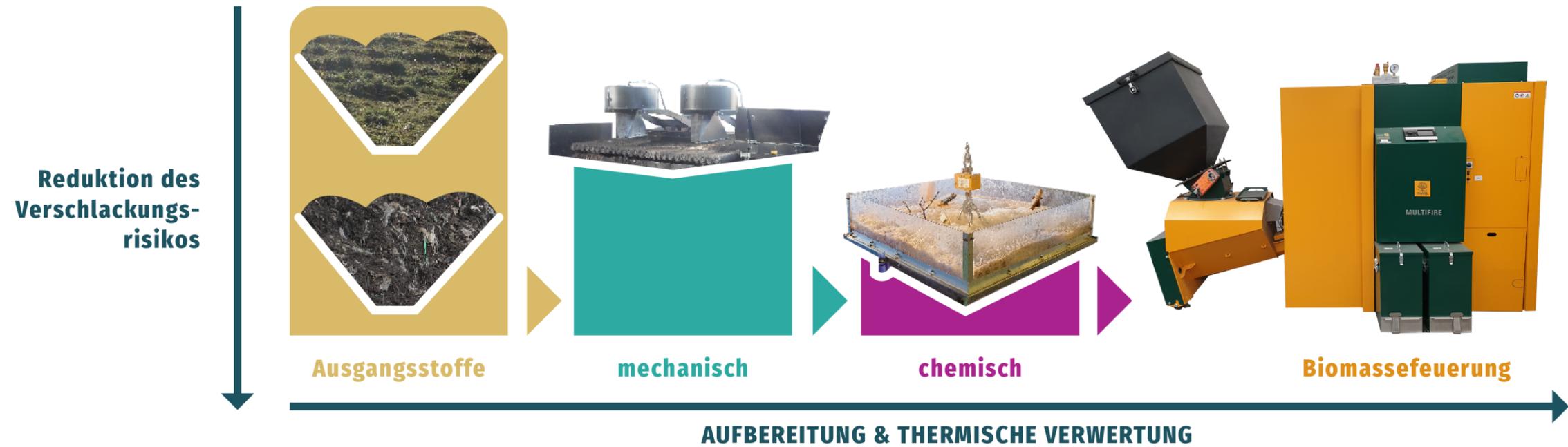
Demzufolge sind auch die wissenschaftlichen und technischen Aussichten sehr gut. Wirtschaftlich betrachtet fallen zwar durch den Umbau der Anlage und der benötigten Reduktionsbrennstoff höhere Kosten

an, allerdings ist dies in Zukunft auch nötig, damit die Anlage auch bei Anpassungen der Vorschriften noch mit den aktuellen Primärbrennstoffen betrieben werden kann.

Die Projektpartner Fraunhofer UMSICHT und die Firma Endress haben außerdem bereits mit den Plänen für ein Folgeprojekt begonnen. Das Ziel ist die Weiterentwicklung der Anlage und der Beginn von Feldtests, um die Technologie an den Markt heranzuführen. Dafür sollen weitere Primärbrennstoffe, aber vor allem alternative Reduktionsbrennstoffe praktisch untersucht werden. Außerdem soll der Betrieb automatisiert und anschließend im Rahmen der Feldtests bewertet werden.

LITERATUR

- Meiller, M., Daschner, R., Walberer, J., & Hornung, A. (2016). Boiler Design with Solid-Gaseous Fuel Staging to Reduce NO_x Emissions and Optimize Load Flexibility.
- Thran, D., & Händler, T. (2023). Statuskonferenz Bioenergie 2023. Leipzig, Deutschland: DBFZ Deutsches Biomasseforschungszentrum gGmbH.



Viktoria Scheff, Hafiz Ali Raza, Konstantin Bachmann, Korbinian Kaetzl, Michael Wachendorf, David Laner

BioRestBrennstoff

Energieeffiziente Nutzung sekundärer biogener Rest- und Abfallstoffe in Biomassefeuerungen durch stufenweise Aufbereitung und Brennstoffkonfektionierung

ZIELE DES PROJEKTES

Das übergeordnete Ziel von BioRestBrennstoff war es, das Brennstoffeinsatzspektrum von Biomasseheiz(kraft)werken durch die gezielte und optimierte Aufbereitung ausgewählter biogener Rest- und Abfallstoffe zu erweitern. Anhand von Kompost-Siebüberlauf aus der Bioabfallbehandlung sowie Grünlandreststoffen wurde eine energetische Verwertung in Biomassefeuerungen in Hinblick auf eine effiziente und störungsfreie Verbrennung untersucht. Ein Fokus lag dabei auf dem Ascheschmelzverhalten, um Verschlackungsrisiken basierend auf Brennstoffkenngrößen abschätzen zu können.

THEMEN SCHWERPUNKTE

- Erschließung sekundärer biogener Rest- und Abfallstoffe
- Aufbereitung durch mechanische und chemische Verfahren
- Einsatz in BMH(K)Ws > 1 MW FWL
- Modellhafte Bewertung des Verschlackungsrisikos auf Basis des Ascheschmelzverhaltens
- Ökologische und ökonomische Bewertung



FKZ-NR.: 03E15427

LAUFZEIT: 01.03.2021–29.02.2024

ZUWENDUNGSSUMME: 441.410 €

KONTAKT

Projektleitung: Prof. David Laner

Hauptbearbeiterin: Viktoria Scheff

Telefon: +49 561 804 3744

E-Mail: abfalltechnik@uni-kassel.de

KOORDINATION

Universität Kassel, Fachgebiet Ressourcenmanagement und Abfalltechnik, Mönchebergstraße 7, 34125 Kassel
www.uni-kassel.de/go/RMAT/

PARTNER

Universität Kassel, Fachgebiet Grünlandwissenschaft und Nachwachsende Rohstoffe
 Steinstraße 19, 37213 Witzenhausen
www.uni-kassel.de/go/gnr

Seeger Engineering GmbH
 Industriestraße 25-27, 37235 Hessisch Lichtenau
<https://seeger-engineering.eu/>

Abfallentsorgung Kreis Kassel, Standort
 Entsorgungszentrum Lohfelden, Sandwiesen 5, 34253 Lohfelden
<https://www.abfall-kreis-kassel.de/>

SUMMARY ZUSAMMEFASSUNG

In a circular bioeconomy, an increased utilization of biogenic residues and waste for energy generation will occur. For biomass combustion, this signifies a shift from high-quality wood to more heterogeneous materials containing higher levels of fuel-critical components. This project examined different pre-treatment methods for compost oversize material and residual grassland biomass, because these residues typically cannot be used for high-quality thermal utilization processes without treatment. To enhance fuel quality, various processing methods were investigated, with washing recognized as most effective. The ash content, nitrogen, potassium, sodium, chlorine and the ash melting behavior proved to be critical fuel parameters, which have a substantial influence on the slagging risk. Ecological and economic analyses revealed that utilizing such materials in biomass combustion systems is advantageous if minimum fuel requirements can be achieved through targeted processing. On this basis, it was demonstrated that biogenic residues and waste can potentially replace conventional high-quality solid biofuels.

In einer kreislaforientierten Bioökonomie sollen verstärkt biogene Rest- und Abfallstoffe zur Energiebereitstellung erschlossen werden. Für Biomassefeuerungen bedeutet dies einen Umstieg von hochwertigem Holz auf heterogenere Materialien mit höheren Anteilen brennstoffkritischer Komponenten, was eine vorherige Aufbereitung erforderlich macht. Im Projekt wurden für Kompost-Siebüberlauf aus der Bioabfallbehandlung und Grünlandreststoffe unterschiedliche Aufbereitungsmaßnahmen untersucht, da diese Reststoffe typischerweise ohne Behandlung nicht hochwertig thermisch genutzt werden können. Zur Verbesserung der Brennstoffqualität kamen unterschiedliche Prozessschritte zum Einsatz, wobei sich insbesondere Waschprozesse als wirksam herausstellten. Als kritische Brennstoffparameter erwiesen sich vor allem der Aschegehalt, Stickstoff, Kalium, Natrium, Chlor sowie das Ascheschmelzverhalten, die das Verschlackungsrisiko maßgeblich beeinflussen. Aus ökologischer und ökonomischer Sicht konnte gezeigt werden, dass sich der Einsatz in Biomassefeuerungen vorteilhaft darstellt, wenn durch zielorientierte Aufbereitung Mindestbrennstoffanforderungen erreicht werden. Dadurch konnte gezeigt werden, dass biogene Rest- und Abfallstoffe potenziell hochwertige Festbrennstoffe in Biomassefeuerungen ersetzen können.

KEY MESSAGES KERN BOTSCHAFTEN

- Utilizing secondary biogenic residues and waste for thermal utilization can enhance value chains and promote sustainable energy generation.
- Substantial improvements in fuel quality were achieved through appropriate pre-treatment techniques for compost oversize material from biowaste treatment and press cake from IFBB-treatment (Integrated Solid Fuel and Biogas Production from Biomass) of grassland residues.
- Adhesions of minerals, ash content, nitrogen, chlorine, potassium, sodium, and low ash melting temperatures were identified as critical fuel parameters.
- Washing and leaching turned out to be essential pre-treatment steps for reducing critical fuel parameters.
- Assessing the slagging risk based on fuel characteristics requires process-specific analysis and thorough knowledge of the materials.
- Durch die Erschließung sekundärer biogener Rest- und Abfallstoffe für die thermische Verwertung kann eine höhere Wertschöpfung und nachhaltige Energiebereitstellung erreicht werden.
- Eine signifikante Verbesserung der Brennstoffqualität konnte durch die gezielte Aufbereitung von Kompost-Siebüberlauf aus der Bioabfallbehandlung sowie von Presskuchen aus der IFBB-Aufbereitung (Integrierte Festbrennstoff- und Biogasproduktion aus Biomasse) von Grünlandreststoffen erreicht werden.
- Mineralische Anhaftungen, Aschegehalt, Stickstoff, Chlor, Kalium, Natrium und niedrige Ascheschmelztemperaturen wurden als kritische Brennstoffparameter der untersuchten Materialien identifiziert.
- Waschen und Laugen stellte sich als wesentlicher Aufbereitungsschritt zur Reduktion kritischer Brennstoffparameter heraus
- Eine Bewertung des Verschlackungsrisikos anhand von Brennstoffkenngrößen erfordert eine spezifische Betrachtung und gute Kenntnisse der Materialien.

METHODIK bzw. MASSNAHMEN

Das Projekt BioRestBrennstoff wurde unter der Leitung des Fachgebiets Ressourcenmanagement und Abfalltechnik (RMAT) der Universität Kassel im Verbund mehrerer Projektpartner bearbeitet, welche die unterschiedlichen Arbeitspakete in enger Zusammenarbeit ausführten. Von der Universität Kassel war außerdem das Fachgebiet Grünlandwissenschaften und Nachwachsende Rohstoffe für die Durchführung und Bewertung der Aufbereitung von Grünlandreststoffen (GNR) beteiligt. Die Abfallentsorgung Kreis Kassel (AKK) und Seeger Engineering GmbH (SE) waren als Praxispartner involviert. Folgende Maßnahmen wurden im Einzelnen bearbeitet:

- Mechanische Aufbereitung von Kompost-Siebüberlauf am Standort Lohfelden von AKK; Probenahme entlang der Prozessschritte; Prozessbewertung mittels Materialflussanalysen mit der Software STAN (<https://www.stan2web.net/>); Zerkleinerung von Siebüberlauf-Holz auf < 20 mm (vecoplan VHZ 600) im Technikum von RMAT; Waschen im Wasserbad der IFBB-Testanlage am Standort Neu-Eichenberg von GNR
- Sicherung, Silierung und Aufbereitung von Grünlandreststoffen mittels IFBB-Aufbereitung am Standort Neu-Eichenberg; Pelletierung des Presskuchens mit 6 mm Durchmesser (Ecoworxx PM44)
- Brennstoffanalysen (Immediatanalyse, CHNS-Bestimmung, Kalorimetrie, Erhitzungsmikroskopie) sowie Verbrennungsversuche in einem 40 kW Kessel mit Rostfeuerung der Firma KWB (Typ Multifire MF2 ZI-40)
- Erstellung einer excel-basierten Stoffdatenbank (<https://doi.org/10.48662/daks-47>)
- Analysen des Ascheschmelzverhaltens (Erhitzungsmikroskopie, Muffelofenversuche gemäß CIEMAT-Methode, Korrelationsanalysen, chemische Fraktionierung durchgeführt im Rahmen einer Gastwissenschaft am DBFZ).
- Probenahme, -aufbereitung und Analyse der Verschlackungen des Partner-BMH(K)Ws in Bad Arolsen.
- Ökobilanzielle Bewertung unterschiedlicher Verwertungswege (Softwarewerkzeuge: EASE-TECH (<http://www.easetech.dk/>) und OpenLCA Version 1.11, Datenbank: Ecoinvent 3.9.1)
- Ökonomische Bewertung unterschiedlicher Verwertungswege über Ermittlung der Gesteungskosten.
- Entwicklung eines Bewertungsansatzes für das Verschlackungsrisiko und einer Praxishilfe zum Einsatz biogener Rest- und Abfallstoffe für die thermische Verwertung in Biomassefeuerungen.

ERGEBNISSE AUF EINEN BLICK

- **Leitfäden:**
 - **Bewertungsansatz** zur Prognose des Verschlackungsrisikos
 - **Praxishilfe** zur Bewertung biogener Rest- und Abfallstoffe für den Einsatz in Biomassefeuerungen (detaillierte Ausführungen der Leitfäden sind im Schlussbericht enthalten)
- **Tagungsbände:**
 - D. Laner, V. Scheff, A. Rink, T. Steindamm, und M. Wachendorf, „Energieeffiziente Nutzung sekundärer biogener Rest- und Abfallstoffe in Biomassefeuerungen durch stufenweise Aufbereitung und Brennstoffkonfektionierung“, in Reader: 10. Statuskonferenz, Deutsches Biomasseforschungszentrum, Hrsg. DBFZ Deutsches Biomasseforschungszentrum gGmbH, 2021, S. 34–35.
 - H.A. Raza, V. Scheff, G. Dürl, M. Wachendorf und K. Kaetzl, „Converting Extensive Grassland Biomass into High Quality Solid Fuel and Biogas using an Advanced Hydrothermal Process“, Vortrag und Poster im Rahmen des 6th Doctoral Colloquium Bioenergy (DOC) von 18. – 19. September 2023, Göttingen.
 - V. Scheff, T. Zeng und D. Laner, „Modellierung des Ascheschmelzverhaltens als Grundlage für den Einsatz biogener Rest- und Abfallstoffe in Biomassefeuerungen“, in 13. Wissenschaftskongress Abfall- und Ressourcenwirtschaft, A. Bockreis, Hrsg. Innsbruck: innsbruck universitypress, 2024, S. 111-115, DOI 10.15203/99106-120-5.
 - V. Scheff, G. Dürl, H. A. Raza, K. Kätzl, D. Laner, „Thermische Verwertung von Siebüberlauf aus der Bioabfallbehandlung vor dem Hintergrund einer energieeffizienten Ressourcennutzung“, in Reader: 11. Statuskonferenz, Deutsches Biomasseforschungszentrum, Hrsg. DBFZ Deutsches Biomasseforschungszentrum gGmbH, 2023, S. 74–75.

- V. Scheff, G. Dürl und D. Laner, „Composition, characterization and mechanical processing of compost oversize material from biowaste treatment plants“, in SARDINIA 2023, 19th international symposium on waste management and sustainable landfilling, R. Cossu, P. He, M. Huber-Humer, J. Kumpiene, und R. Stegmann, Hrsg. Padova: CISA Publisher, 2023.
- V. Scheff, G. Dürl, H. A. Raza, K. Kätzl und D. Laner, „Efficient thermal utilization of compost oversize material: processing steps for the improvement of fuel quality and combustion behavior. in SARDINIA 2023, 19th international symposium on waste management and sustainable landfilling, R. Cossu, P. He, M. Huber-Humer, J. Kumpiene, und R. Stegmann, Hrsg. Padova: CISA Publisher, 2023.
- V. Scheff, G. Dürl, D. Laner, „Processing steps for compost oversize fraction as a solid biofuel for thermal utilization with the focus on bottom ash slagging“, Vortrag im Rahmen der 31. European Biomass Conference & Exhibition (EUBCE) von 5. – 9. Juni 2023, Bologna.
- V. Scheff, G. Dürl, D. Laner, „Aufbereitung von Siebüberlauf aus der Bioabfallbehandlung zu biogenem Restbrennstoff“, in Recy & DepoTech, Roland Pomberger, Josef Adam, Michael Altendorfer, Therese Bouvier-Schwarz, Peter Haslauer, Lisa Kandlbauer, Karim Khodier, Gerald Koinig, Nikolai Kuhn, Tatjana Lasch, Namrata Mhaddolkar, Thomas Nigl, Bettina Rutrecht, Renato Sarc, Theresa Sattler, Sabine Schlögl, Hana Stipanovic, Alexia Tischberger-Aldrian und Sandra Viczek, Hrsg. Montanuniversität Leoben, 2022, S. 331-334
- V. Scheff, G. Dürl und D. Laner, „Compost oversize as a solid biofuel – processing and characterization steps“, Vortrag im Rahmen des 5th Doctoral Colloquium Bioenergy (DOC) von 13. – 14. September 2022, Leipzig.
- V. Scheff und D. Laner, „Thermische Verwertung von Siebüberlauf aus der Bioabfallbehandlung durch stufenweise Aufbereitung und Brennstoffkonfektionierung“, in 11. Wissenschaftskongress Abfall- und Ressourcenwirtschaft, A. Bockreis, Hrsg. Innsbruck: innsbruck university press, 2022, S. 87–91.
- V. Scheff, I. Dzene, M. Wachendorf, und D. Laner, „Ressourcenpotenziale biogener Rest- und Abfallstoffe für die thermische Verwertung in Deutschland: Mengen, Energiegehalt, Klassifikation, Kaskadennutzung und Klimaschutzpotenzial“, in Reader: 10. Statuskonferenz, Deutsches Biomasseforschungszentrum, Hrsg. DBFZ Deutsches Biomasseforschungszentrum gGmbH, 2021, S. 148–149.
- **Konzepte/Machbarkeitsstudien:**
 - Musteraufbereitungsstrecke für den Kompost-Siebüberlauf zur Aufbereitung zu einem biogenen Festbrennstoff, veröffentlicht im [Schlussbericht](#) des Projekts
- **Anlagen:**
 - IFBB-Technikumsanlage
- **Daten & Methoden:**
 - BRB-Stoffdatenbank mit untersuchten Materialien aus dem Projekt: <https://doi.org/10.48662/daks-47>
- **Weitere Ergebnistypen:**
 - Best-Practice Lösung
 - Einbringen in Richtlinien / Normen (Standardisierung) ⇒ Durch den projektbezogenen Austausch im Forschungsnetzwerk Bioenergie wurde eine Arbeitsgruppe gegründet, die ein Methodenhandbuch zur Homogenisierung verschiedener Biomassesortimente und Chargen für Laboranalysen und Versuche im größeren Maßstab ausarbeitet (derzeit noch in Bearbeitung). Ergebnisse des Projekts hinsichtlich der Untersuchung sehr heterogener Stoffgemische bzw. Abfälle bringen hier neue Aspekte gegenüber konventionellen biogenen Brennstoffen ein, die in das Methodenhandbuch zur Homogenisierung einfließen sollen (kurzfristig). Ergebnisse aus den Untersuchungen mit dem Erhitzungsmikroskop können in die Überarbeitung der DIN EN ISO 21404 einfließen.
- **Auszeichnungen:**
 - Preis für den Vortrag (Platz Eins) auf dem 13. DGAW-Wissenschaftskongress 2024 in Wien, Viktoria Scheff: »Modellierung des Ascheschmelzverhaltens als Grundlage für den Einsatz biogener Rest- und Abfallstoffe in Biomassefeuerungen«
 - Preis für das Poster bei der DBFZ Jahrestagung 2022 in Leipzig, Viktoria Scheff, Gregor Dürl, David Laner: »BioRestBrennstoff – Energieeffiziente Nutzung biogener Rest- und Abfallstoffe in Biomassefeuerungen durch stufenweise Aufbereitung und Brennstoffkonfektionierung«

WEITERE INFORMATIONEN

- [Projektseite](#) der Begleitforschung zur Energetischen Biomassenutzung -Projektdatenbank
- Der [Schlussbericht](#) wird auf der Projektseite verlinkt und ist über die TIB als pdf verfügbar

DARSTELLUNG DER ERGEBNISSE

Aufbereitung von Kompost-Siebüberlauf

Unter Kompost-Siebüberlauf versteht man im Allgemeinen das Überkorn aus der Absiebung des rohen Kompostmaterials nach der biologischen Behandlung von biologischen Abfällen. Die dabei verwendete Sieblochung liegt in der Regel im Bereich von 8 bis 20 mm. Nach den Zahlen des statistischen Bundesamtes lag der Jahresdurchsatz biologischer Behandlungsanlagen in Deutschland im Jahr 2022 bei 15,7 Millionen Mg (Statistisches Bundesamt, 2024). Die durchschnittliche auf den Anlageninput bezogene Menge an Kompost-Siebüberlauf liegt bei 11,8 Ma.-% bei Biogut-Kompostierungsanlagen und 13,5 Ma.-% bei Biogut-Vergärungsanlagen (Gallery et al., 2020). Auf Basis der Studie von Gallery et al. (2020) und den Zahlen des statistischen Bundesamtes kann ein technisches Potenzial von Kompost-Siebüberlauf auf 1 bis 2 Millionen Mg (feucht) abgeschätzt werden. In Abhängigkeit von Jahreszeit und regionalen Unterschieden kann im Kompost-Siebüberlauf auch ein hoher Anteil an Fremdstoffen, wie Kunststoffe, Papier, Glas und andere Mineralien, enthalten sein (Gallery et al., 2020). Im Projekt wurde der Kompost-Siebüberlauf der Abfallentsorgung Kreis Kassel am Standort Lohfelden untersucht und in insgesamt 14 Fraktionen sortiert (Abb. 1). Dabei wurde ein Holzpotenzial zwischen 30 und 50 Ma.-% (feucht) ermittelt, was hochgerechnet für

Deutschland ein Mengenpotenzial von 0,3 bis 1 Millionen Mg (feucht) von Siebüberlauf-Holz (SÜ-Holz) ergibt und nach erfolgter Separierung potenziell für eine thermische Verwertung in Biomassefeuerungen zur Verfügung steht. Eine weitere Separation der Holzfraktionen ergab eine Unterscheidung in Naturholz (70 Ma.-%), Industrieholz (10 Ma.-%) und Geäst (20 Ma.-%). Im Rahmen von drei Aufbereitungskampagnen (AK) wurden im Projekt verschiedene Intensitäten der Aufbereitung untersucht, um das SÜ-Holz zu separieren und zu einem biogenen Festbrennstoff aufzubereiten.

- AK1 – niedrige Intensität: Verwendung am Standort verfügbarer Aufbereitungsmaschinen (Siebe und Zerkleinerer)
- AK2 – mittlere Intensität: erweiterte mechanische Aufbereitung mittels Windsichtung und Fe-Metall Abscheidung
- AK3 – hohe Intensität: manuelle Aussortierung von SÜ-Holz, Waschen und Laugen (grobes und zerkleinertes Holz)

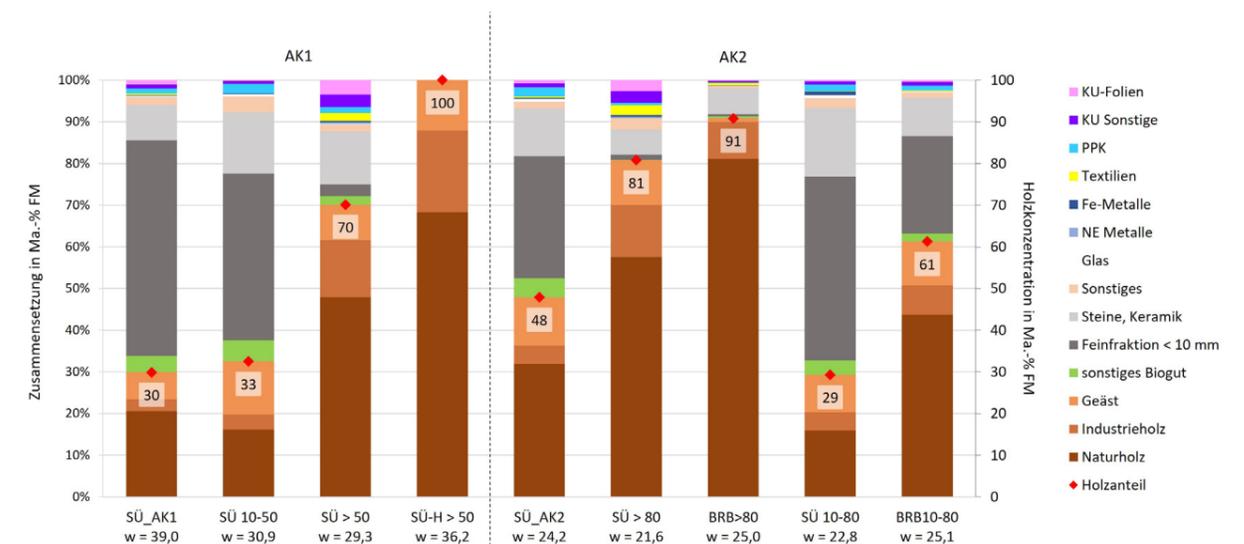


Abb. 1: Gegenüberstellung der Materialzusammensetzungen aus den Aufbereitungskampagnen 1 und 2.

Quelle: Schlussbericht BioRestBrennstoff

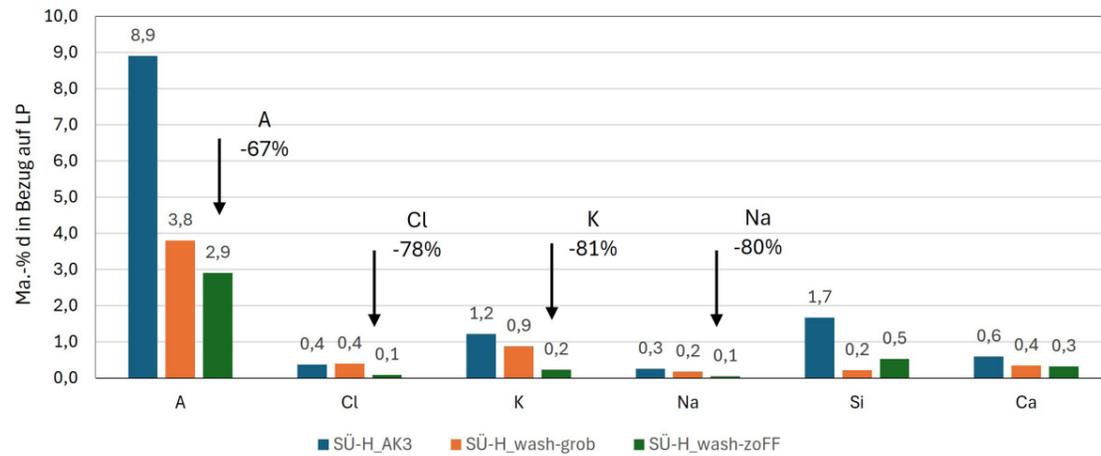


Abb. 2: Konzentrationen des Aschegehaltes A, Cl, K, Na, Si und Ca gemessen an der Biomasse, Quelle: Schlussbericht BioRestBrennstoff

Die ersten beiden Aufbereitungskampagnen zeigten deutlich, dass die Siebreste durch einfache mechanische Prozesse erheblich in ihrer Zusammensetzung verändert und der Fremdstoffanteil im erzeugten Brennstoff signifikant reduziert werden konnte. Eine erneute Absiebung der Siebreste bei 10 mm reduzierte die Gesamtmasse der zu entsorgenden Siebreste um etwa 40 Ma.-%. Dies spart nicht nur Kosten, sondern generiert auch zusätzliche Wertschöpfung durch einen höheren Anteil marktfähigen Komposts. Die mechanische Aufbereitung erwies sich aufgrund der Kontamination der holzigen Bestandteile mit kritischen Inhaltsstoffen selbst bei einer hohen Reinheit der erzeugten Holzfraktion immer noch als unzureichend. Durch das Waschen und Laugen von zerkleinertem Siebüberlauf-Holz konnte eine signifikante Reduktion der kritischen Parameter Chlor, Kalium, Natrium und Aschegehalt erreicht werden (Abb. 2). Dadurch wurden in Bezug auf das Ascheschmelzverhalten und anderer Brennstoffparameter vergleichbare Qualitätseigenschaften zu den holzigen Referenzbrennstoffen Landschaftspflegematerial und Holzhackschnitzel erreicht. Der Waschprozess in der dritten Aufbereitungskampagne erwies sich als wesentlicher Schritt, um zum einen feine Anhaftungen abzutrennen und zum anderen kritische Inhaltsstoffe aus dem Holz zu entfernen. Vor diesem Hintergrund wurden Empfehlungen für die Aufbereitung von Kompost-Siebüberlauf formuliert und eine

Muster-Aufbereitungsstrecke entworfen, die basierend auf den Ergebnissen einen einsatzfähigen Biorestbrennstoff aus dem Kompost-Siebüberlauf generiert (Abb. 3). Der Vergleich mit den Annahmekriterien und den Referenzbrennstoffen konnte aufzeigen, dass der Einsatz in Biomasseheiz(kraft)werken (BMH(K)Ws) aufgrund des erhöhten Stickstoff- und Chlorgehaltes bislang nur im Gemisch mit Holzbrennstoffen möglich ist. Mit dem gelaugten SÜ-Holz wurden im Rahmen der Verbrennungsversuche vergleichbare Emissionswerte zu den Landschaftspflegematerialien ermittelt. Weiterhin überhöhte Emissionen in Bezug auf die Grenzwerte der 44. BImSchV wurden für NO₂ und Stäube ermittelt, die in der verwendeten Versuchsanlage allerdings auch bei den untersuchten Landschaftspflegematerialien ermittelt wurden. Beim Einsatz in Biomassefeuerungen ist demzufolge sowohl auf eine gestufte Luftzufuhr als auch auf eine geeignete Staubabscheidung zu achten.

Aufbereitung von Grünlandreststoffen

Grünland lässt sich aufgrund des Standortes, der botanischen Zusammensetzung und der Nutzungsweise in intensives Grünland (u.a. relativ artenarm, Nutzung als Futtermittel), extensives Grünland (u.a. artenreich, ungedüngt, geringe Futtermittelqualität) und Biotopgrünland (u.a. sehr artenreich, Naturschutzflächen, kaum Nutzung) unterscheiden (Praxis-Agrar, 2024). Verbleibt die Biomasse als Mulchmaterial auf den Flächen, können durch die Mineralisierung der Biomasse Nährstoffe (u.a. Nitrat und Phosphat) in die Böden und Gewässer eingetragen werden, was zu einer Eutrophierung von Gewässern beitragen kann. Daher ist insbesondere bei extensivem Dauergrünland

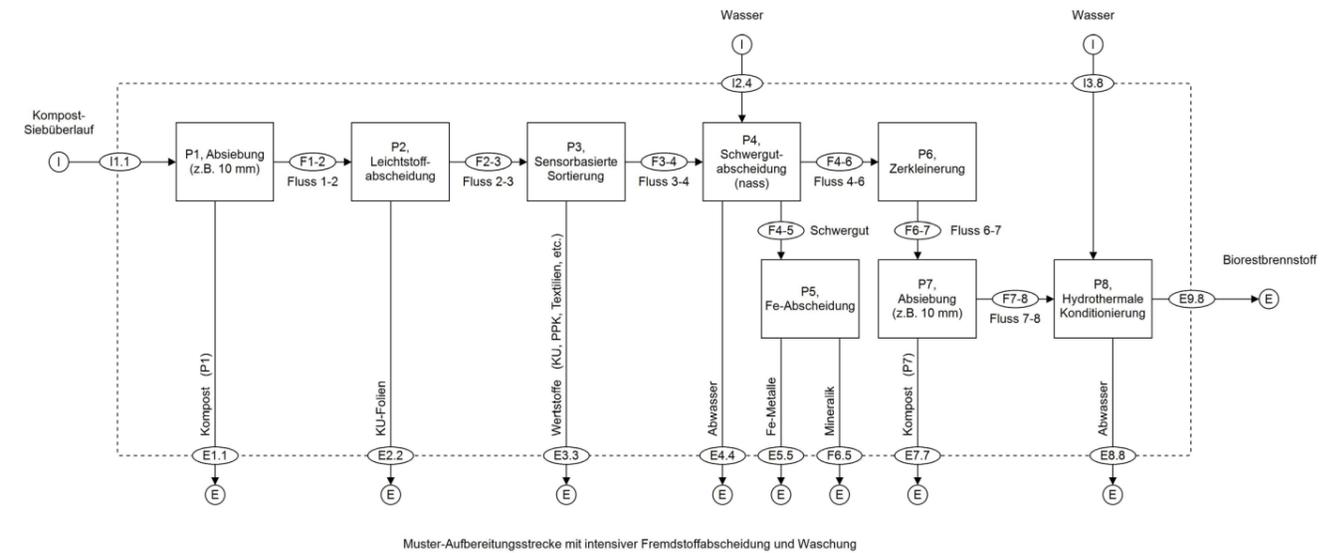


Abb. 3: Empfehlung für die Aufbereitung von Kompost-Siebüberlauf zu biogenem Festbrennstoff, Quelle: Schlussbericht BioRestBrennstoff

eine Abfuhr der Biomassen von den Flächen erforderlich (Joseph et al., 2020). Das Verfahren zur Integrierten Erzeugung von Festbrennstoff und Biogas aus Biomassen (IFBB-Verfahren) stellt einen aussichtsreichen Ansatz zur Aufbereitung von Grünlandreststoffen für die energetische Nutzung in thermo-chemischen Verfahren dar (Abb. 4). Die im Rahmen des Vorhabens gewonnenen Erkenntnisse zur Aufbereitung von Grünlandreststoffen mittels IFBB-Verfahren haben gezeigt, dass durch eine angepasste Aufbereitung die Risiken bei einer thermischen Nutzung von Grünlandreststoffen in BMH(K)Ws reduziert werden können. Bei guter Durchmischung der Biomasse-Wasser-Suspension während der hydrothermalen Konditionierung und durch die gezielte und biomassespezifische Zugabe von Basen und milden organischen Säuren (Essigsäure) können selbst stark lignifizierte Grünlandreststoffe zu hochwertigen Festbrennstoffen

verarbeitet werden und der Aschegehalt um bis zu 80 Ma.-% reduziert werden. Insbesondere die Reduktion von Chlor, Stickstoff, Schwefel und von schmelzpunkt-senkenden Aschebildnern wie Kalium, Phosphor und Magnesium hat zu einer Verbesserung der Qualität des Brennstoffs geführt, welcher potenziell für unterschiedliche thermochemische Konversionsprozesse wie die Verbrennung eingesetzt werden kann.

Ascheschmelzverhalten und Verschlackung

Das Ascheschmelzverhalten ist eine Brennstoffeigenschaft, die üblicherweise über die Ermittlung charakteristischer Temperaturen mit einem Erhitzungsmikroskop ermittelt wird (DIN Deutsches Institut für Normung e.V., 2020). Die Auswertung erfolgt dabei über die Formänderung eines zylindrischen Ascheprobekörpers während der Erhitzung auf bis zu 1600 °C. Die meisten modellbasierten Vorhersagemethoden des Verschlackungsrisikos in Zusammenhang mit dem Brennstoffeinsatz basieren auf dem Ascheschmelzverhalten und enthalten für die Abschätzung Parameter, die im Rahmen der Brennstoffanalytik standardmäßig untersucht werden. Aus diesem Grund sind derartige Prognosemodelle einfach und günstig anzuwenden (Zeng et al., 2018). Für neue unerprobte Brennstoffe kann die Anwendung einer modellbasierten Vorhersagemethode mit großen Unsicherheiten verbunden sein, da in der Regel keine Daten zur Validierung vorhanden sind. Im Rahmen des Projektes wurde ein allgemeiner Bewertungsansatz zur Abschätzung des

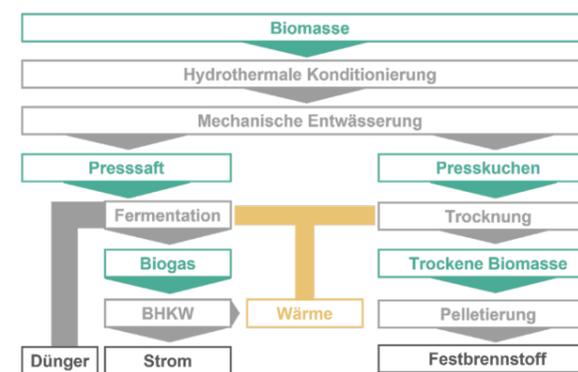


Abb. 4: Schematische Darstellung des IFBB-Verfahrens



Abb. 5:
Bewertungsansatz zur Abschätzung
des Verschlackungsrisikos
(Design von Joshua Röbisch)

Verschlackungsrisikos entwickelt und im **Schlussbericht** veröffentlicht. In Abb. 5 ist eine schematische Darstellung dieses Bewertungsansatzes dargestellt. Hierfür wurden bisher entwickelte Modelle bewertet sowie Korrelationsanalysen von Brennstoffparametern mit dem Ascheschmelzverhalten durchgeführt. Als Basis für die Korrelationsanalysen wurde im Rahmen des Projekts eine **Stoffdatenbank** erstellt. Zudem wurden neben der Erhitzungsmikroskopie weitere laboranalytische Methoden zur Vorhersage der Verschlackungsneigung angewendet. Zusammenfassend zeigen die Ergebnisse aus den laboranalytischen und modellbasierten Vorhersagemethoden, dass auf Basis der chemischen und brennstofftypischen Eigenschaften eines Brennstoffes eine Vorabschätzung des Verschlackungsrisikos vorgenommen werden kann. Diese Abschätzung ist allerdings unter Vorbehalt zu betrachten, da es brennstoffspezifisch zu widersprüchlichen Ergebnissen oder missverständlichen Interpretationen kommen kann. Eine sorgfältige Auswahl geeigneter Methoden zur Vorhersage ist für die Genauigkeit der Abschätzung entscheidend.

Ökologische und ökonomische Bewertung

Die Aufbereitung und Nutzung von Kompost-Siebüberlauf in der Biomassefeuerung bietet in Bezug auf die Treibhausgasbilanz deutliche Vorteile gegenüber der direkten Entsorgung in der Müllverbrennung, mit Nettoeinsparungen von etwa 100 bis 200 kg CO₂-Äquivalenten pro Mg (Feuchtmasse), abhängig von jahreszeitlichen Schwankungen in der Zusammensetzung und im Wassergehalt. Die Bewertung der Auswirkungen auf Versauerung und Eutrophierung erfordert eine differenziertere Betrachtung, da

die Emissionen aus der Biomassefeuerung und die Substitutionswirkung des zusätzlich bereitgestellten Komposts (neben der Substitution im Strom- und Wärmesystem) entscheidend sind. Eine optimale Verwertung umfasst eine weitergehende Aufbereitung, um emissionsarmen Brennstoff zu erzeugen, und eine maximale Rückgewinnung von Feinmaterial als marktfähigen Kompost. Bei erfolgreicher Umsetzung ist die Nutzung in Biomassefeuerungen auch hinsichtlich Versauerung und Eutrophierung ökologisch vorteilhaft. Zudem ist die Vermarktung aufbereiteter Biorestbrennstoffe trotz intensiver Aufbereitungstechnik vor dem Hintergrund der hohen Entsorgungskosten in Müllverbrennungsanlagen, die bei etwa 120 € pro Mg (Gallery et al., 2020) liegen, auch aus ökonomischer Sicht vorteilhaft.

Die durch das IFBB-Verfahren erzeugten Biorestbrennstoffe zeigen als alternative Energieträger deutliche Vorteile für die Klimabilanz und Landschaftspflege. Die Produktion von Presskuchenpellets und Biogas eröffnet Perspektiven für eine flexible, erneuerbare Energieversorgung. Im Vergleich zum deutschen Strommix und zu herkömmlichen Fernwärmequellen bietet die Umwandlung von Grünlandreststoffen in Strom und Wärme ein signifikantes Potenzial zur CO₂-Reduktion von insgesamt 581 kg CO₂-Äquivalenten pro Mg (Trockenmasse). Aus Klimasicht stellt das IFBB-Verfahren eine vorteilhafte Lösung für die nachhaltige Bewirtschaftung von extensiven Grünlandflächen und die Bereitstellung von erneuerbaren Energieträgern dar. In Bezug auf versauernde und eutrophierende Emissionen sind vor allem eine ökologisch optimale Nutzung der Rückstände als Dünger sowie die emissionsarme Verbrennung der IFBB-Pellets wichtige Faktoren zur Reduktion des Eutrophierungs- und des Versauerungspotenzials der IFBB-Verwertung. Wirtschaftlich sind IFBB-Pellets eine interessante Alternative zu Holzpellets und können zu ähnlichen Preisen bzw. mit geringfügig niedrigeren Kosten bereitgestellt werden.

HERAUSFORDERUNGEN bzw. HEMMNISSE

Der Kompost-Siebüberlauf ist ein heterogenes Materialgemisch mit Schwankungen in der Zusammensetzung und im Wassergehalt. Eine gezielte Aufbereitung zur Separation der enthaltenen Fremdstoffe, wie Kunststoffe, Textilien, Metalle, wird durch die Schwankungen und die Vielzahl unterschiedlicher Produkte, wie Schnüre, Kaffeekapseln, Gartengerät, erschwert. Durch die im Rahmen der Praxisversuche des Projektes eingesetzte Aufbereitungstechnik konnte der Fremdstoffanteil von 50 auf 10 Ma.-% (feucht) reduziert werden. **Trotz des Aufbereitungserfolgs war die eingesetzte Aufbereitungstechnik immer noch unzureichend, um die Fremdstoffe für den Einsatz in Biomasseheizkraftwerken hinreichend auszuschleusen.** Fremdstoffe wie Kunststoffe und Textilien waren in den gewonnen Outputströmen noch visuell sichtbar, was eine Annahme in BMH(K)Ws unwahrscheinlich macht. Schnurartige Fremdstoffe und Kunststofffolien erschwerten die Abtrennung zusätzlich aufgrund von Verwicklungen mit den enthaltenen Holzteilen. **Die mechanische Aufbereitung erwies sich außerdem als wenig effektiv hinsichtlich der Reduktion an kritischen Inhaltsstoffen in den Holzmaterialien.** Der Waschprozess der holzigen Bestandteile zeigte sich in diesem Zusammenhang als wesentlicher Schritt, um Anhaftungen zu reduzieren und kritische Inhaltsstoffe im Holz auszuwaschen. Damit umfasst die empfohlene Muster-Aufbereitungstrecke relativ viele Aufbereitungsschritte, um einen einsetzbaren biogenen Festbrennstoff aus Kompost-Siebüberlauf zu erzeugen. Der empfohlene Waschprozess wurde im Projekt mit dem Waschbottich der IFBB-Anlage durchgeführt und nicht großtechnisch untersucht. Hemmnisse für den Einsatz biogener Rest- und Abfallstoffe wurden auch im Rahmen eines Akteursworkshops identifiziert. Aus der Diskussion wurde klar,

dass eine zentrale Herausforderung in der Einstufung biogener Rest- und Abfallstoffe als Abfälle vs. Produkte (**»Abfall-Ende-Kriterium«**) besteht, was deren Einsatz in Biomassefeuerungen erschwert. Genehmigungsbehörden spielen eine entscheidende Rolle und müssen verstärkt in die Vernetzung der relevanten Akteure eingebunden werden, um die regulatorischen Rahmenbedingungen zu verbessern. Für Brennstoffhersteller besteht die Herausforderung darin, die bestehenden Brennstoffanforderungen zu erfüllen. Anpassungen der bestehenden **Brennstoffanforderungen**, insbesondere die Erweiterung der Toleranzbereiche für Fremdstoffgehalte, sind notwendig, um Materialien, die in Brennstoffmischungen eingesetzt werden, besser integrieren zu können. Dabei sollte das **Verschlackungsrisiko** als zusätzliches Kriterium in die Brennstoffanforderungen aufgenommen werden. Ebenso sollten Qualitätsanforderungen für biogene Rest- und Abfallstoffe in die DIN ISO 17225 aufgenommen werden, um einheitliche Standards zu gewährleisten und kritische Parameter miteinzubeziehen, die bislang nicht berücksichtigt werden. Eine weitere Maßnahme wäre die Festlegung eines Grenzwertes für das Ascheschmelzverhalten über Kenngrößen aus der Ermittlung der charakteristischen Temperaturen. Darüber hinaus können spezifische **modellbasierte Vorhersagemethoden** etwa in Form brennstoffspezifischer Indizes zur vorausschauenden Bewertung des Emissions- und Verschlackungsrisikos in Qualitätsspezifikationen aufgenommen werden.

AUSBLICK

In Bezug auf Kompost-Siebüberlauf besteht fortwährend Bedarf zur Aufklärung der Bürger hinsichtlich der Bedeutung einer sortenreinen Erfassung von Bioabfällen. Zudem sollten ungenutzte Potenziale biogener Rest- und Abfallstoffe in kommunale Energiekonzepte integriert werden, um die Nutzung dieser Ressourcen zu fördern. Dies erfordert die Entwicklung geeigneter Verfahren zur Brennstoffaufbereitung, wie etwa Waschprozesse und andere technologische Innovationen. Der Einsatz innovativer Verfahren, wie das IFBB-Verfahren, kann dabei eine Schlüsselrolle spielen, um die Qualität der Brennstoffe zu erhöhen. Betreiber von Biomassefeuerungen stehen vor der Herausforderung, mit schwankenden Brennstoffqualitäten umzugehen. Biogene Rest- und Abfallstoffe bergen ein erhöhtes Verschlackungsrisiko, das schwer vorherzusehen ist. Dieses Risiko kann zu Anlagenschäden und hohen Reparaturkosten führen, wobei die ökonomischen Einbußen oft erst zeitverzögert spürbar werden. Eine Anpassung der Anlagentechnik und der Prozessregelung ist daher notwendig, um diese Risiken zu minimieren. Zudem spielt eine Homogenisierung des Brennstoffinputs, insbesondere bei Brennstoffmischungen, eine große Rolle. Sukzessive Zumischungen von Reststoffen könnten helfen, die Betriebssicherheit zu erhöhen. Pilotprojekte und positive Beispiele aus der Praxis sind entscheidend, um Vorbehalte abzubauen und

Vertrauen in neue Verwertungsmethoden zu schaffen. Auf Basis der erstellten **BRB-Stoffdatenbank** wird der Datenpool in Bezug auf biogene Rest- und Abfallstoffe erweitert und steht öffentlich zur Verfügung.

Die Ergebnisse des Projekts haben vor dem Hintergrund begrenzter Biomasseverfügbarkeit und dem gleichzeitig erhöhten Bedarf an Energie aus erneuerbaren Quellen eine große Bedeutung im Bereich der Bioökonomie. Die geplante nationale Biomassestrategie wird zu einem erhöhten Bedarf an qualitativ hochwertigen Biomassen als Rohstoff in anderen industriellen Bereichen führen. Die Priorität der stofflichen Verwertung bewirkt zudem, dass für die energetische Verwertung der Einsatz biogener Rest- und Abfallstoffe stärker in den Fokus rückt. Die Verfügbarkeit von Holz als Festbrennstoff wird in Zukunft potenziell abnehmen, wodurch Betreiber von Biomasseheiz(kraft)werken alternative Brennstoffe einsetzen müssen, um diese Lücken zu schließen. Für die Praxis ist es daher von hoher Relevanz, die Eignung spezifischer biogener Rest- und Abfallstoffe zu bewerten. Als Beispiel für ein mögliches Bewertungsschema kann die Vorgehensweise der einzelnen Arbeitsschritte im Projekt herangezogen werden. Die zur Verfügung gestellte **Praxishilfe** fasst die wesentlichen Erkenntnisse zusammen und bietet einen Leitfaden, wie man bei der Bewertung biogener Rest- und Abfallstoffe für den Einsatz in Biomassefeuerungen vorgehen kann. So können ungenutzte Potenziale biogener Rest- und Abfallstoffe erschlossen und damit die Ressourceneffizienz gesteigert sowie das Brennstoffeinsatzspektrum von Biomassefeuerungen erweitert werden.

LITERATUR

DIN Deutsches Institut für Normung e.V. (2020). Biogene Festbrennstoffe - Bestimmung des Asche-Schmelzverhaltens: (ISO 21404:2020) (Norm DIN EN ISO 21404). Beuth Verlag GmbH.

Gallery, S., Hüttner, A., Turk, T., Warning, L. & Richter, F. (2020). Optimierte Verwertung von Siebresten aus Biogutvergärungs- und -kompostierungsanlagen (Sieb-OPTI): Schlussbericht. Witzenhausen-Institut.

Joseph, B., Hensgen, F. & Wachendorf, M. (2020). Life Cycle Assessment of bioenergy production from mountainous grasslands invaded by lupine (*Lupinus polyphyllus* Lindl.). *Journal of environmental management*, 275, 111182. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.111182>

Praxis-Agrar. (2024, 15. Juli). Grünlandwirtschaft in Deutschland. Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung. <https://www.praxis-agrar.de/pflanze/gruenland/gruenlandwirtschaft>

Statistisches Bundesamt. (2024, 6. September). Abfallentsorgungsanlagen. <https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Umwelt/Abfallwirtschaft/Tabellen/liste-abfallentsorgungsanlagen.html#1128356>

Zeng, T., Pollex, A., Weller, N., Lenz, V. & Nelles, M. (2018). Blended biomass pellets as fuel for small scale combustion appliances: Effect of blending on slag formation in the bottom ash and pre-evaluation options. *Fuel*, 212, 108–116. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2017.10.036>

**ALTERNATIVE
BRENNSTOFFE
UND DEZENTRALE
VERGASUNG**



Volker Lenz, Nora Szarka, Laura García Laverde, Kerstin Wurdinger,
Torsten Schmidt-Baum, Eva Siebenhühner, Daniela Pomsel

OBEN

Ölersatz Biomasse Heizung

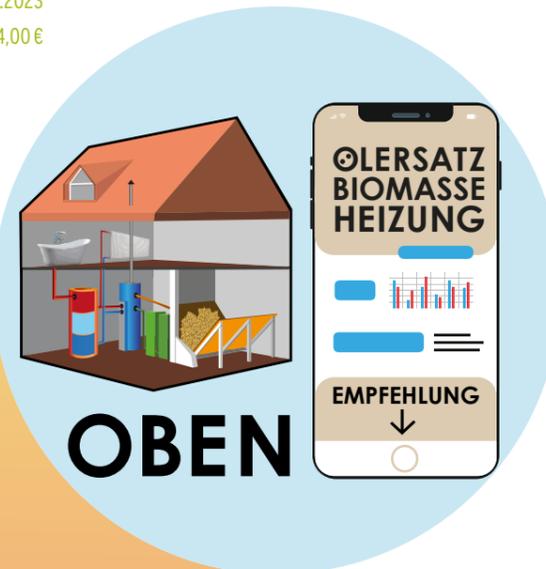
KOORDINATION

DBFZ Deutsches Biomasseforschungs-
zentrum gemeinnützige GmbH
Torgauer Str. 116, D - 04347 Leipzig
www.dbfz.de

KONTAKT

Projektleitung: Dr.-Ing. Volker Lenz
Telefon: +49 (0)341 2434-450
E-Mail: volker.lenz@dbfz.de

FKZ-NR.: 03KB156
LAUFZEIT: 01.09.2019–31.10.2023
ZUWENDUNGSSUMME: 380.944,00 €



ZUSAMMENFASSUNG

Das Projekt OBEN – Ölersatz Biomasse Heizung stand vor dem Hintergrund, dass es in Deutschland rund 5,6 Mio. Ölheizanlagen gab und jährlich mehr als 60.000 Ölheizungen neu installiert wurden. Hersteller von Biomassekesseln, insbesondere von Pelletkesseln, propagierten, dass sie Ölheizungen klimafreundlich in allen Fällen ersetzen können. Trotz der hohen möglichen Treibhausgasminderungen, einer verringerten Abhängigkeit von Ölimporten und dem geringeren Risiko bei Havarien, war ein endgültiges Auslaufen der Installationen von Ölheizungen nicht abzusehen. Insofern erschien es zwingend notwendig, die vorhandenen Hemmnisse vollständig zu identifizieren und neue Ansätze und Konzepte zu entwickeln und zu erproben, mit denen der vollständige Ersatz von Ölheizungsneueinstellungen technisch möglich, ökonomisch akzeptabel und im Nutzerbewusstsein durchsetzbar und verständlich wird. Auch galt es die politischen Handlungsbedarfe zu identifizieren, die aus wissenschaftlicher Sicht den Umstieg von Ölfeuerungen auf Biomasselösungen möglichst effektiv beschleunigen können. Diese Aufgaben wurden im Projekt OBEN intensiv bearbeitet.

ZIELE DES PROJEKTES

Um eine Chance zu haben, die Klimaschutzziele der Weltgemeinschaft zu erreichen, ist es wichtig, dass möglichst keine neuen Öl- und Gaskessel mehr in Deutschland installiert werden, sondern erneuerbare Energien bevorzugt werden. Das Projektziel bestand darin herauszufinden, warum Gebäudeeigentümer:innen vor allem im Bestand immer noch Öl- und Gaskessel präferieren und wie hier Abhilfe geschaffen werden kann. Dafür sollten unter Einbeziehung der verschiedenen Stakeholder (u.a. Eigentümer:innen, Handwerker:innen, Energieberater:innen) die Hemmnisse beim Heizungstausch identifiziert, geclustert und priorisiert werden. Ein weiteres Ziel war es, geeignete Lösungskonzepte zur Überwindung der Hemmnisse zu entwickeln und beispielhaft zu demonstrieren. Aufbauend auf diesen Erkenntnissen sollten entsprechende politische Handlungsempfehlungen abgeleitet werden.

THEMEN SCHWERPUNKTE

- Hemmnis- und Treiberanalyse und bisherige Marktintegrationskonzepte
- Operationalisierung technischer Lösungen
- Ableitung politischer Handlungsbedarfe
- Erprobung in der Praxis
- Ergebnisdarstellung und Ableitung von Handlungsoptionen für eine flächendeckende Umsetzung
- Wissenstransfer / Wissenschaftskommunikation



Zitat der Projektleitung: Volker Lenz

Die Wärmewende im privaten Wohneigentum wird nur funktionieren, wenn die Eigentümer:innen von Wohngebäuden erneuerbare Lösungen wie leitungsgebundene erneuerbare Wärme, Wärmepumpen, Wärmepumpen-Biomasse-Hybride oder Biomassefeuerungen als für sich persönlich positiv, passend und machbar wahrnehmen. Mit dem im Projekt OBEN entwickelten Wärmewendecheck soll genau diese positive Wahrnehmung angestoßen werden. <<<

KERN BOTSCHAFTEN

- Die Unabhängigkeit und Glaubwürdigkeit von Beratung und Informationen hinsichtlich verfügbarer und passender Heizungslösungen ist ein sehr wichtiger Aspekt im Entscheidungsprozess für den Heizungstausch.
- Der erste Impuls ist oft entscheidend. Daher ist der Einfluss von Intermediären (z. B. Handwerkern, Installateuren, Beratern) und deren eigene Präferenzen in Bezug auf bestimmte Heizsysteme einer der Schlüsselfaktoren für die Wahl oder Ablehnung von Heizsystemen auf Basis erneuerbarer Energien.
- Wichtig ist ein starker und positiver erster Impuls. Hierfür ist eine Stärkung der Rolle der Energieberater:innen als zentrale und neutrale Anlauf- und Koordinierungsstelle bei der Planung von Energieeffizienzmaßnahmen und damit verbundenen Heizungswechseln wichtig. Ergänzend kann ein erster niederschwelliger Einstieg über ein Online-Tool die Entscheidung für eine erneuerbare Lösung vorbereiten.
- Der im Projekt OBEN entwickelte Wärmewendecheck ist eine Informationswebseite, die Eigentümer:innen vor einer Energieberatung nutzen können, um erste Empfehlungen für ein für sie passendes umweltfreundliches Heizungssystem zu erhalten.
- Für verlässliche politische Rahmenbedingungen sollte sich die Politik auf Bundes-, Landes- und Regionalebene klar zu Klimaschutzziele und nachhaltigen Heizsystemen positionieren und entsprechende Regelungen und Förderprogramme eindeutig gestalten.

SUMMARY

The project OBEN - Oil Replacement Biomass Heating was based on the fact that there were around 5.6 million oil heating systems in Germany and more than 60,000 new oil heating systems were installed every year. Manufacturers of biomass boilers, especially pellet boilers, propagated that they could replace oil heating systems in all cases in a climate-friendly way. Despite the high potential greenhouse gas reductions, reduced dependence on oil imports and the lower risk of breakdowns, a definitive phase-out of oil-fired heating systems was not in sight. In this respect, it seemed imperative to fully identify the existing obstacles and to develop and test new approaches and concepts that would make the complete replacement of new oil heating installations technically possible, economically acceptable and enforceable and understandable in terms of user awareness. It was also necessary to identify the need for political action which, from a scientific point of view, could accelerate the switch from oil-fired heating systems to biomass solutions as effectively as possible. These tasks were worked on intensively in the OBEN project.

KEY MESSAGES

- The independence and credibility of advice and information regarding available and suitable heating solutions is a very important aspect in the decision-making process for replacing a heating system.
- The first impulse is often decisive. Therefore, the influence of intermediaries (e.g. tradespeople, installers, consultants) and their own preferences regarding certain heating systems is one of the key factors in the choice or rejection of heating systems based on renewable energy.
- A strong and positive initial impulse is important. To this end, it is important to strengthen the role of energy consultants as a central and neutral point of contact and coordination when planning energy efficiency measures and the associated heating system changes. In addition, an initial low-threshold introduction via an online tool can prepare the decision for a renewable solution.
- The heat transition check developed in the OBEN project is an information website that owners can use prior to an energy consultation to receive initial recommendations for an environmentally friendly heating system that is suitable for them.
- For a reliable political framework, politicians at federal, state and regional level should take a clear position on climate protection targets and sustainable heating systems and clearly define the corresponding regulations and funding programs.

ERGEBNISSE AUF EINEN BLICK

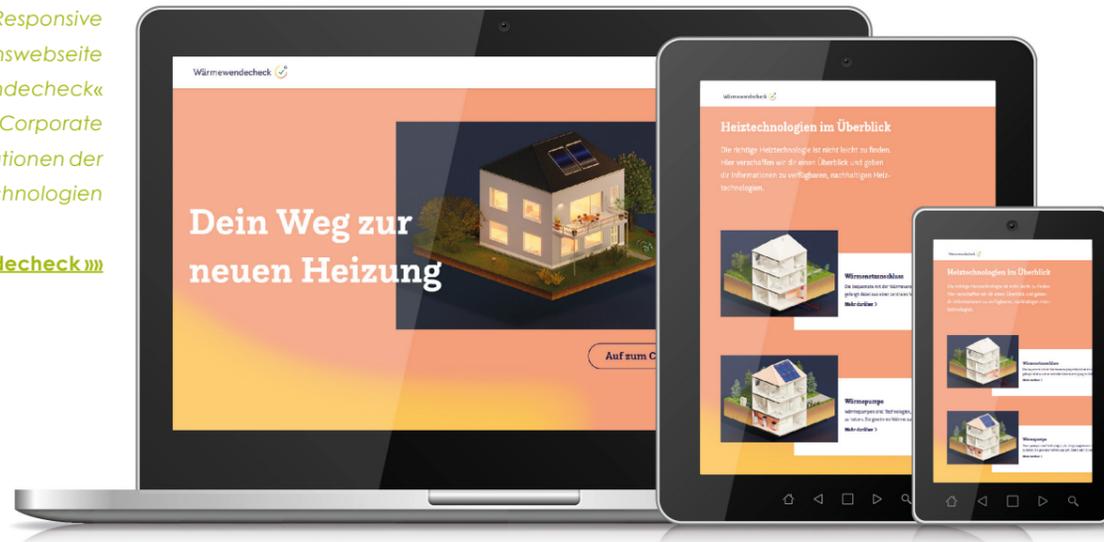
- **Video zum Projekt**
- **Schlussbericht**
- **Artikel in Fachzeitschrift:**
 - ISI-Publikation (aktuell noch in Arbeit)
- **Tagungsband:**
 - Lenz, V.; Pomsel, D.; Wurdinger, K.; García, L.; Schmidt-Baum, T.; Szarka, N. (2020). Projekt OBEN: Ölersatz Biomasseheizung als Beitrag zur nationalen Bioökonomiestrategie. In: DBFZ Jahrestagung 2020: Bioenergie zwischen Klimapaket und Bioökonomiestrategie. Leipzig, 16./17. September 2020. Leipzig: DBFZ. (Tagungsreader, 19). ISBN: 978-3-946629-61-0. S. 272–273. <https://www.dbfz.de/index.php?id=1152>
 - Wurdinger, K.; Pomsel, D.; Lenz, V.; Szarka, N. (2020). Unterstützung des Entscheidungsprozesses von Stakeholdern für ein erneuerbares Heizungssystem durch digitale Technologien. In: Thrän, D.; Pfeiffer, Diana (Hrsg.) Digitalisieren, Sektoren koppen, flexibilisieren: Systemische Integration der Bioenergie und weiterer erneuerbarer Energien in Gebäuden und Quartieren. Gemeinsame Fachkonferenz der BMWi-Forschungsnetzwerke Bioenergie und Energiewendebauen. Leipzig: DBFZ. (Reader Energetische Biomassenutzung). ISBN: 978-3-946629-62-7. S. 66–68. <https://energetische-biomassenutzung.de/de/node/59>
 - Pomsel, D.; Wurdinger, K.; García, L.; Szarka, N.; Lenz, V. (2020). Ölersatz Biomasse Feuerung. In: Nelles, M. (Hrsg.) 14. Rostocker Bioenergieforum - 19. Dialog Abfallwirtschaft MV: geplant am 16./17. + 18. Juni 2020 an der Universität Rostock (nicht durchgeführt aufgrund der Beschränkungen im Zuge der Corona-Pandemie). Rostock: Univ., Professur Abfall- und Stoffstromwirtschaft. (Schriftenreihe Umweltingenieurwesen, 95). ISBN: 978-3-86009-507-2. S. 311–321. https://rosdok.uni-rostock.de/resolve/id/rosdok_document_0000016074
 - Schmidt-Baum, T.; Laverde García, L.; Pomsel, D.; Szarka, N.; Lenz, V. (2021). "Handwerkerschafts-Dilemma" beim Umstieg auf Biomasseheizanlagen. In: Nelles, M. (Hrsg.) 15. Rostocker Bioenergieforum: Am 16./17. Juni 2021 online als Videokonferenz: Tagungsband. Rostock: Universität Rostock, Agrar- und Umweltwissenschaftliche Fakultät, Professur Abfall- und Stoffstromwirtschaft. (Schriftenreihe Umweltingenieurwesen, Band 105). ISBN: 978-3-86009-524-9. S. 321–337. https://rosdok.uni-rostock.de/file/rosdok_document_0000017597/rosdok_derivate_0000103489/Nelles_15Bioenergieforum_2021.pdf
- García Laverde, L.; Schmidt-Baum, T.; Szarka, N.; Lenz, V. (2021). Heizungsaustausch: Erleichterung des Entscheidungs-, Planungs- und Installationsprozesses für Hauseigentümer:innen. In: Thrän, D.; Tens, Vera (Hrsg.) 10. Statuskonferenz Bioenergie: Eine Partnerin für alle Fälle. Leipzig: DBFZ. (Reader Energetische Biomassenutzung). ISBN: 978-3-946629-78-8. S. 146–147. <https://energetische-biomassenutzung.de/de/node/80>
- García Laverde, L.; Schmidt-Baum, T.; Szarka, N.; Lenz, V.; Pomsel, D.; Wurdinger, K. (2022). Obstacles and Solutions for the Replacement of Oil-Fired Boilers for Biomass-Based Heating Systems. Integrating Bioenergy in Energy Systems, 3CV.4. In: EUBCE (Hrsg.) Book of Abstracts: Summaries. S. 194. <https://insightsimaging.springeropen.com/articles/10.1186/s13244-022-01337-x>
- **Zeitungsartikel:**
 - Pressemitteilungen:
 - Forum für Zukunftsenergien (2022). Wärmewende im Endkundenmarkt – Wie lassen sich 20 Mio. Einzelheizungen erneuerbar umstellen? Berlin. https://stage.zukunftsenergien.de/fileadmin/user_upload/PM_AKZ86_ann_docx.pdf
 - DBFZ (2024). Klimaschutz im Fokus: kostenfreies Online-Tool »Wärmewendecheck« des DBFZ unterstützt beim Umstieg auf ein neues Heizungssystem. Leipzig. [LINK](#)
 - Jahresbericht
 - Jahresbericht 2023 (2024). Leipzig: DBFZ. 164 S. ISBN: 978-3-949807-04-6. DOI: [10.48480/84w6-cp75](https://doi.org/10.48480/84w6-cp75)
 - Beiträge für den gesellschaftlichen oder politischen Diskurs (Positionspapiere etc.):
 - Schmidt-Baum, T.; Lenz, V.; Szarka, N.; García Laverde, L.; Wurdinger, K.; Pomsel, D. Wärmewende im Endkundenmarkt für Einzelheizungen beschleunigen: Handlungsempfehlungen für politische Entscheidungsträger:innen. Statementpapier (2023). Leipzig. <https://www.dbfz.de/oben-oelersatz-biomasse-heizung/ergebnisse>

Wissenstransfer.

Es wurde wie geplant ein Wissenstransferkonzept in Verbindung mit einem internen Projektworkshop erstellt und umgesetzt. Darin wurden verschiedene Kommunikationsprodukte geplant und umgesetzt. Hier ist insbesondere die Informationswebseite »Wärmewendecheck« zu nennen.

Wärmewendecheck

Abb. 2: Responsive Informationswebseite »Wärmewendecheck« mit modernem Corporate Design und Illustrationen der Heizungstechnologien [zum Wärmewendecheck»»](#)



HERAUSFORDERUNGEN bzw. HEMMNISSE

Grundsätzlich wurden alle geplanten Arbeitspakete im Hinblick auf die generelle Zielsetzung erfolgreich bearbeitet. Durch die Corona-Pandemie mit Kontaktbeschränkungen und Lieferkettenproblemen sowie den völkerrechtswidrigen Angriffskrieg Russlands auf die Ukraine mit entsprechenden Energiepreiskapriolen und den umfangreichen Diskussionen um jegliche politische Rahmensetzung kam es wiederholt zu Verzögerungen und Anpassungen in der Detailausgestaltung der Arbeitspakete. Hierdurch entfielen Vorratslösungen und Schnellvarianten und verschob sich ein Schwerpunkt der Bearbeitung auf die Informationswebseite »Wärmewendecheck«. In diesem Sinne wurde auch ein Arbeitspaket zur Wissenschaftskommunikation neu ins Projekt mit aufgenommen und mit Mitteln aus den anderen Arbeitspaketen ausgestattet. In Folge der Anpassungen hat das Arbeitspaket zur Erprobung in der Praxis einen etwas abgewandelten Fokus bekommen, der sich mehr auf die Reichweite des Tools und das Einholen von Feedback bezieht.

Für die inhaltliche Ausgestaltung des Tools wirkte sich vor allem die politische Diskussion über die Novellierung des GEG hemmend aus. Die Ergebnisse der Diskussion mussten zunächst abgewartet werden, bis Logik und Inhalte final erstellt werden konnten.

Aufgrund der leider im Projektverlauf erst späten Fertigstellung des Wärmewendechecks konnte die Breitenwirkung in der realen Praxis nur in einem eher kleinen und aufgrund des Fokus nicht nach Siedlungsgebieten differenzierten Umfeld evaluiert werden. Dieser Punkt wird aber im Zuge der weiteren Verwertung weiterverfolgt werden.

AUSBLICK

Bisher hat sich das DBFZ vor allem auf technische Forschungsfragen fokussiert. Das Projekt OBEN hat aber sehr deutlich gezeigt, dass gerade im Bereich der Wärmebereitstellung aus Biomasse zwar noch sehr konkrete Einzelfragen forschungsseitig zu bearbeiten sind, dass aber die Wärmewende vor allem an politischen Rahmensetzungen (Gesetzgebung, Förderung, CO₂-Preis) und an Wahrnehmung und Information hängt. Insofern wurde am DBFZ begonnen hausübergreifend der Wissenschaftskommunikation mehr Bedeutung beizumessen. In diesem Zusammenhang sollen die Projektergebnisse Ausgangspunkt für eine kontinuierlich zu verbessernde Kommunikation des wissenschaftlichen Erkenntnisstands in die Bevölkerung sein, die zu einem positiven Gelingen der Wärmewende beitragen. Hierzu sind die nächsten Schritte zu einer Ausweitung der Reichweite des Wärmewendechecks und zu einer Vergrößerung der Informationsinhalte hausintern geplant und sollen dann auch zeitnah in Zusammenarbeit mit den oben beispielhaft aufgeführten Institutionen vorangetrieben werden.

Mit der erfolgreichen Projektumsetzung hat das DBFZ wesentliche Erkenntnisse im Hinblick auf Hemmnisse und Treiber sowie Marktintegrationskonzepte gewonnen. Zudem hat der intensive Austausch mit verschiedenen Akteuren vertiefte Markteinblicke erbracht. Auch der Austausch mit der Politik hat vielfältige zusätzliche Erkenntnisse generiert. Dieses Wissen bietet dem DBFZ direkt und indirekt die Chance zur Akquise neuer Forschungsprojekte, sei es im Bereich der öffentlichen Förderung oder der industriegetriebenen Forschung und Entwicklung. Im Hinblick auf den Wärmewendecheck arbeitet das DBFZ

bereits an einer Verstärkung des Betriebs in Verbindung mit einer erweiterten Webseite, die umfangreiche aktualisierte Informationen zur erneuerbaren Wärmeversorgung leicht verständlich anbieten soll. Der Check selbst soll innerhalb der nächsten 12 Monate auch über mindestens drei weitere häufig genutzte Webseiten der Energieszene erreichbar sein. Dabei sollen, wo immer sinnvoll, Hinweise und Vorschläge der Partner in den Check aufgenommen werden, ohne dessen grundsätzlichen Charakter zu verändern. Hier bietet sich ggf. auch eine Ausweitung auf einen europäischen Kontext mit entsprechenden Förderoptionen an.

Weitere Aufgaben über das Projektende hinaus sind:

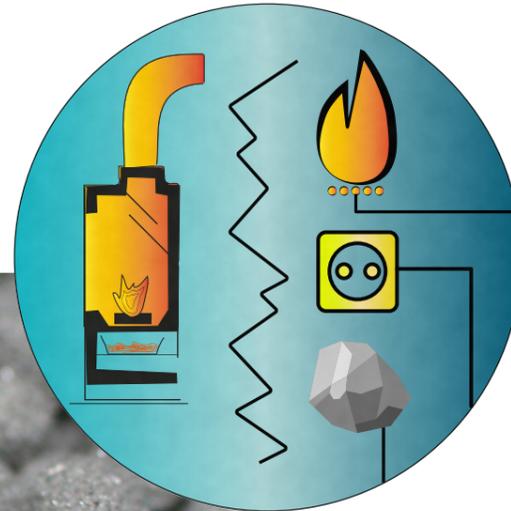
- Ausweitung der Informationsangebote inkl. Verlinkung auf andere qualifizierte Webseiten, Detailplanungswerkzeuge und Akteurslisten
- Vernetzung mit anderen glaubwürdigen Beratungsinitiativen zur Steigerung der Reichweite des Wärmewendechecks
- Vorbereitung einer Aktualisierung des Statementpapiers zu politischen Handlungsempfehlungen in Vorbereitung auf die kommende Bundestagswahl
- Einordnung der Relevanz der Wärmewende für den Klimaschutz im nationalen Kontext
- Ausweitung der Reichweite über den nationalen Kontext hinaus.

Annett Pollex

VergaFlex

Flexibilisierung der Biomassevergasung durch Nutzung des Vergaserkokes als Biomaterial für die stoffliche Verwertung und als Brennstoff für Kleinstvergaser <5 kW_{el}

Granulierter Vergaserkoks



Zitat der Projektleitung: Dr. Annett Pollex

Vergaserkoks wird als kohlenstoffreicher Reststoff bei der Biomassevergasung gebildet. Um die derzeit übliche Entsorgung als Abfall zu überwinden, müssen Nutzungsperspektiven eröffnet werden. Darauf aufbauend können sich lastflexible Vergaserkonzepte etablieren, mit denen im zukünftigen Energiesystem Strom und Wärme bedarfsgerecht eingespeist werden. <<<

ZIELE DES PROJEKTES

Die Entwicklung und Einführung von Produktnormen für pyrogene Kohlenstoffmaterialien – zu denen auch Vergaserkoks zählt – und die Standardisierung von Analyseverfahren für die Qualitätssicherung von Vergaserkoks sollen die Voraussetzung für dessen Nutzung und Vermarktung schaffen. Standardisierte Umweltanalytik ist dabei die unbedingte Voraussetzung für den nachhaltigen Einsatz des Vergaserkokes.

ZUSAMMENFASSUNG

Im Rahmen des Projektes wurden Analysemethoden zur Charakterisierung von Vergaserkoks evaluiert, angepasst und validiert. Das durchgeführte Screening, bei dem 129 Vergaserkoksproben von 17 verschiedenen Vergasungstechnologien untersucht wurden, verdeutlichte eine große Bandbreite der Eigenschaften und des Gehalts an organischen Schadstoffen. Für die erfolgreiche Vermarktung ist in vielen Fällen die Optimierung des Anlagenbetriebs bzw. die thermische Nachbehandlung erforderlich, um eine stoffliche Nutzung analog zur Pflanzenkohle aus der Pyrolyse zu ermöglichen. Verschiedene Nutzungsoptionen wurden im Detail untersucht und es konnten vielversprechende Strategien identifiziert werden. Damit konnten das Bewusstsein für potentielle Nutzungswege geschaffen und die Basis für einen flexibleren Anlagenbetrieb sowie eine verstärkte Anwendung von Vergaserkoks für die langfristige Kohlenstoffspeicherung gelegt werden.

Durch die Initialisierung des Normungsgremiums NA 062-02-85 AA »Pyrogene Kohlenstoffmaterialien - Charakterisierung und Analyseverfahren« wurde mit der Entwicklung von Normen für diese Materialien begonnen und die Erweiterung auf internationale Ebene wurde vorbereitet.

KONTAKT

FKZ-NR.: 03KB157
 LAUFZEIT: 01.09.2019–31.12.2022
 ZUWENDUNGSSUMME: 602,372 €

Projektleitung: Dr. Annett Pollex
 Telefon: +49-(0)341 2434-484
 E-Mail: annett.pollex@dbfz.de

KOORDINATION

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

PARTNER

0Eurofins Umwelt Ost GmbH (Niederlassung Freiberg)
 Lindenstraße 11, 09627 Bobritzsch-Hilbersdorf
<https://www.eurofins.de/umwelt/standorte/eurofins-umwelt-ost/>

Ithaka Institut gemeinnützige GmbH
 Altmutterweg 21, 63773 Goldbach
<https://www.ithaka-institut.org/de>

SUMMARY

Within the project, analytical methods for the characterization of gasifier chars were evaluated, adapted and validated. A screening was performed covering a wide range of gasification technologies. In total, analysis data of 129 gasification char samples from plants of 17 different gasification plant manufacturers have been evaluated. The results indicate a wide range of the properties of gasification chars both with respect to ash and carbon content. Depending on the employed gasification and gas filtration technology, a wide range in the level of organic contaminants was also observed, and in several cases, thermal post-treatment would be a prerequisite to qualify these materials for material applications. Motivated by the widespread use of biochar from pyrolysis, several application options were studied in detail and promising strategies both for high quality gasification chars and those materials with medium to high levels of contaminants could be identified. Consequently, the basis was formed for a more flexible gasification plant operation and increased utilization of gasification chars for carbon sequestration. To enable sustainable utilization and commercialization options for gasification char, a DIN standardization committee was founded and expanding standardization to ISO level has been initialized.

KEY MESSAGES KERN BOTSCHAFTEN

- Gasification char has the potential to be employed as input material in various applications.
- Many of the potential applications can contribute to climate change mitigation by creating long-term carbon sinks, similar to biochar from pyrolysis.
- Gasification chars are often characterized by elevated content of organic pollutants. Consequently, post-treatment needs to be employed to enable ecologically feasible utilization reducing the economic viability of application options.
- Industrial post-treatment of gasification chars is hampered by the small scale and decentralized nature of biomass gasification plants.
- Overall, there is a rising interest among biomass gasification plant operators to increase gasification char quality and consequently enable utilization without post-treatment.
- Es existieren vielfältige Möglichkeiten, Vergaserkokse stofflich zu nutzen.
- Die stoffliche Verwertung ermöglicht einen Beitrag zum Klimaschutz durch die Generierung von Kohlenstoffsinken analog zur Pflanzenkohle.
- Der Gehalt an organischen Schadstoffen stellt das meist entscheidende Hemmnis für eine ökologisch und ökonomisch sinnvolle Verwertung dar.
- Die geringe Verfügbarkeit von Holzvergaserkoks und die kleinteilige, dezentrale Struktur der Holzvergaser in Deutschland erschweren eine industrielle Aufbereitung der Holzvergaserkokse.
- Insgesamt kann bei den Vergasungsanlagenherstellern und Betreibern ein zunehmendes Interesse an Vergaserkoksen mit einer Qualität, welche die Nutzung ohne Aufbereitung und damit die direkte Verwertung ermöglichen, festgestellt werden, nicht zuletzt getrieben durch den Bedeutungsgewinn der Kohlenstoffsinken / Negativemissionen.

METHODIK bzw. MASSNAHMEN

- Anpassung und Validierung der Analysemethode zur Bestimmung des PAK-Gehalts von Pflanzenkohlen auf die teils deutlich höheren Gehalte von Vergaserkoksen
- Entwicklung einer Methode zur Bestimmung der Leitfähigkeit im Feststoff von Holzvergaserkoksen und Pflanzenkohlen
- Screening der Vergaserkokseigenschaften durch Analyse und Bewertung von 129 Vergaserkoksproben von 17 verschiedenen Vergasungstechnologien
- Agglomeration (Granulierung und Pelletierung) von Vergaserkoks
- Durchführung von Versuchen zur Eignung als Brennstoff für Kleinstvergaser, zur Aktivierung und anschließender Verwendung als Aktivkohle in der Abwasseraufbereitung, als möglicher Zuschlagstoff für Polymere und bei der Biogaserzeugung, sowie zur Erhöhung der Kohleausbeute bei der Co-Pyrolyse im Technikumsmaßstab
- Produktnormentwicklung im Rahmen eines neu gegründeten DIN-Normungsausschusses

DARSTELLUNG DER ERGEBNISSE

Analysemethoden

Der Gehalt an organischen Schadstoffen, insbesondere von polyzyklischen aromatischen Kohlenwasserstoffen (PAK) ist ein zentraler Parameter zur Beurteilung der Qualität und zur Festlegung von Nutzungsoptionen von Vergaserkoksen. Die bislang angewandte Analysemethode zur Bestimmung des PAK-Gehalts in Pflanzenkohlen wurde für Proben mit in der Regel sehr geringen PAK-Gehalten von unter 100 mg/kg (bezogen auf die Trockensubstanz) entwickelt. In Vorversuchen zeigte sich, dass Vergaserkokse zum Teil deutlich höhere PAK-Gehalte von bis zu 10.000 mg/kg (aufweisen können. Daher musste die Analysemethode für diese Proben angepasst und validiert werden. Die Methodenentwicklung erfolgte bei Eurofins unter Verwendung von Vergaserkoksen sechs verschiedener Vergasungsanlagenhersteller. Bei der Methodenentwicklung wurden die Parameter Extraktionsdauer, Gesamtextraktion vs. sequentielle Extraktion sowie das Verhältnis Probe zu Lösung variiert.

ERGEBNISSE AUF EINEN BLICK

■ ISI-Publikation (SCI Science Citation Index etc.):

- Annett Pollex, Thomas Zeng, Sabine Bandemer, Axel Ulbricht, Kristina Herrmann, Dieter Bräköw »Characteristics of gasification chars – results from a screening campaign«, In: Biomass and Bioenergy 2023, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2023.106962>

■ Artikel in Fachzeitschrift:

- Nikolas Hagemann, Annett Pollex, Thomas Zeng und Hans-Peter Schmidt »Holzvergaserkoks: Abfall oder Rohstoff?«, In: Müll und Abfall 03/2024, DOI: [10.37307/j.1863-9763.2024.03](https://doi.org/10.37307/j.1863-9763.2024.03)

■ Beiträge im folgenden

Tagungsband:

- Pollex, A. (diverse Vorträge, Poster und Workshop). In: Tens, Vera; Thrän, Daniela, 2021, 10. Statuskonferenz Bioenergie: Eine Partnerin für alle Fälle, Leipzig. ISBN: 978-3-946629-78-8. DOI: [10.48480/3z9p-cy88](https://doi.org/10.48480/3z9p-cy88)

■ Vorträge:

- Pollex, A.: »Biochar - a key to climate change mitigation and bioeconomy« (Ithaka). 6. Central European Biomass Conference (22.-24.01.2020, in Graz, Österreich)
- Pollex, A.: »Characteristics of gasification chars – results from an analysis campaign in Germany« + »Densification of Char from the Gasification of Woody Biomass to High Quality Pellets for Further Energetic Use«. 27. European Biomass Conference and Exhibition EUBCE (9.-12.5.2022, Marseille, Frankreich). <http://www.etaflorence.it/proceedings/>
- Pollex, A.: »Vergaserkokseigenschaften – Ergebnisse aus einem Screening unter Beteiligung von Anlagen aus Deutschland, Österreich und der Schweiz«. 16. Rostocker Bioenergieforum, 16.6.2022, Rostock.

■ Daten & Methoden:

- Monitoring

■ Weitere Ergebnistypen:

- Einbringen in Richtlinien / Normen (Standardisierung)

■ Schlussbericht

Im Laufe der Methodenentwicklung haben sich folgende Prozessparameter als optimal und sinnvoll erwiesen, die sich im Vergleich mit der Prozedur für Pflanzenkohlen wie folgt unterscheiden:

- Einwaage von 1 g (statt 2,5 g),
- Extraktionsdauer von 4 Stunden (statt 2h),¹
- Wegfall des Einengens des Lösemittels Toluol nach der Extraktion von 100ml auf 10ml.

Mit diesen Anpassungen wird auch die Verschleppung von PAK-Verunreinigungen in Analysegeräten vermieden, die Wiederholpräzision der Analysen verbessert und

damit die Verlässlichkeit der Analyseergebnisse erhöht. Darüber hinaus wurde im Rahmen des Vorhabens eine Prüfvorrichtung zur Messung der Leitfähigkeit (Feststoff-Leitfähigkeit) von pyrogenen Kohlenstoffen entwickelt. Damit konnte eine einfache sowie günstige Analysenmethode zur schnellen Überprüfung der Qualität bereitgestellt werden. Die Methode wurde im Rahmen des Projektes so weit entwickelt, dass sie inzwischen in die Analysenvorgaben des European Biochar Certificates EBC (erstmalig in die Version 10.0E vom 01.01.2022) integriert werden konnte [2].

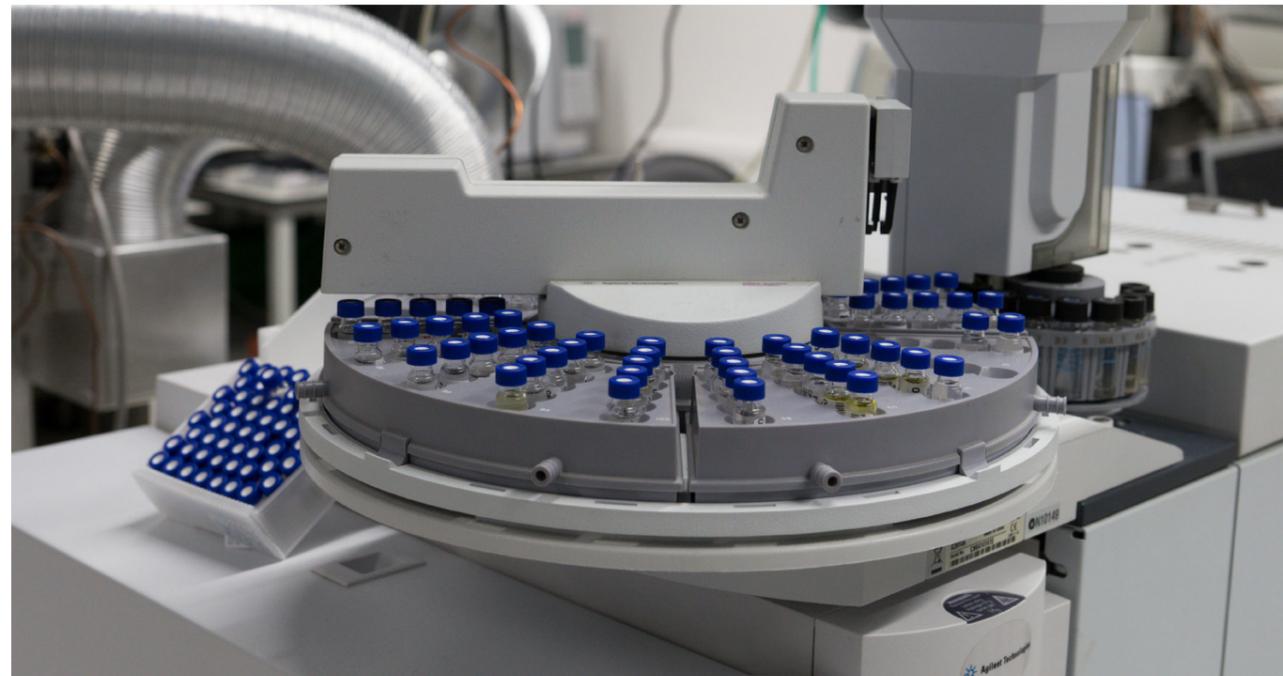


Abb. 2: Bestimmung des Gehalts an PAKs mittels GC-MS nach Toluol-Heißextraktion

Vergaserkoksscreening

Das im Projekt durchgeführte Screening zu Eigenschaften von Vergaserkoksen sollte einen Überblick zu verfügbaren Qualitäten und damit potentiellen Nutzungsmöglichkeiten bieten. Dabei wurde ein einheitliches Probenahmeverfahren in Anlehnung an die LAGA PN98 (Richtlinie für das Vorgehen bei physikalischen, chemischen und biologischen Untersuchungen im Zusammenhang mit der

Verwertung / Beseitigung von Abfällen) festgelegt und angewendet, um die Vergleichbarkeit der Ergebnisse sicherzustellen. Insgesamt wurden im Rahmen des Screening 129 Proben von 44 Anlagen untersucht, wobei 17 verschiedenen Anlagenherstellern einbezogen wurden. Damit beteiligten sich fast alle deutschsprachigen Verfahrensträger. Die Vergaserkokse stammten aus unterschiedlichen Vergasungsprinzipien (Festbett- und Bewegtbettvergasung) mit einer elektrischen Leistung zwischen 18 und 770 kW, wobei verschiedene Rohmaterialien (Holzpellet und Holzhackschnitzel sowie Stroh) zum Einsatz kamen und die Vergaserkokse an verschiedenen Stellen im Prozess anfielen (Staubabscheider, Filter, Rost). Unter den untersuchten Vergaserkoksen waren sowohl stückige als auch feinkörnige Materialien die zum überwiegenden Teil tiefschwarz waren und nur in Ausnahmefällen (komplette Veraschung) graubraun. Insgesamt ist festzuhalten, dass die Vergaserkokse weitaus diverser in ihren Eigenschaften sind als zu Projektbeantragung angenommen (Abbildung 3 und Abbildung 4).

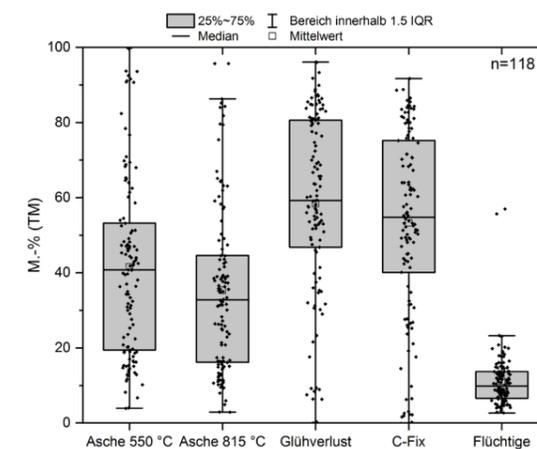


Abb. 3: Aschegehalt, Glühverlust, fixierter Kohlenstoff und Gehalt an flüchtigen Kohlenstoffverbindungen der Vergaserkokse im Screening. Es zeigt sich eine große Bandbreite der Eigenschaften der untersuchten Vergaserkokse. IQR: Interquartilsabstand.

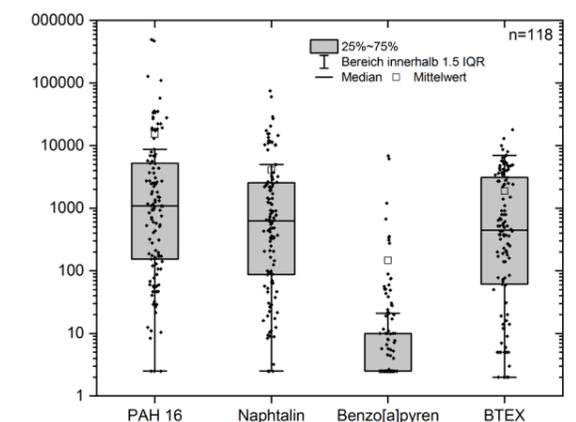


Abb. 4: Gehalt an organischen Schadstoffen (PAK; Summe von 16 Verbindungen; BTEX = Benzol, Toluol, Ethylbenzol und die Xylole) der im Screening untersuchten Vergaserkokse, IQR: Interquartilsabstand.

Verwertungsoptionen

Der in Holzvergasungsanlagen als Rückstand anfallende Vergaserkoks wird derzeit in fast allen Fällen als Abfall eingeordnet. Das im Projekt durchgeführte Screening hat gezeigt, dass ein Großteil der Vergaserkokse Eigenschaften aufweisen, auf deren Basis sie als ungefährliche Abfälle klassifiziert werden können. Allerdings muss ein Teil der Vergaserkokse und dabei insbesondere solche, die aus der Kaltgasfiltration stammen, aufgrund sehr hoher PAK- und BTEX-Gehalte als gefährlicher Abfall eingestuft werden. Die als gefährliche Abfälle einzustufenden Vergaserkokse sollten in der Regel der Beseitigung oder thermischen Verwertung zugeführt werden, da die geringe Verfügbarkeit von Holzvergaserkoks und die kleinteilige, dezentrale Struktur der Holzvergaser in Deutschland eine industrielle Aufbereitung der Holzvergaserkokse erschweren.

¹ In der Version 9.5 [1] wurde eine Extraktionsdauer von 2h gefordert. Seit der Version 10.3 der EBC-Richtlinien [2] liegt die Extraktionsdauer bei 6h.

Im Projekt wurden die folgenden Einsatzmöglichkeiten bewertet:

- (A) Einsatz als Pflanzenkohle in der Landwirtschaft: für Vergasungsrückstände mit mittleren bis hohen Glühverlusten und sehr geringen PAK-Gehalten
- (B) Stoffliche Nutzung in Materialien: Vergasungsrückstände mit mittlerem bis hohen Glühverlusten können sich je nach Kohlenstoff- und PAK-Gehalten für den Einsatz als Additiv in unterschiedlichen Materialien (z.B. in der Baustoff- und Asphaltherstellung oder als Füllstoff in Polymeren) qualifizieren
- (C) Einsatz als Holzasche/Düngemittel: Vergasungsrückstände mit sehr geringen Glühverlusten und sehr geringen PAK-Gehalten können als Holzasche einer Verwertung als (Bestandteil von) Düngemitteln, Bodenhilfsstoffen und Substraten zugeführt werden.

Für Vergaserkoks mit erhöhten PAK-Gehalten wurden die Optionen

- i) thermische Nachbehandlung zur Verringerung des PAK-Gehalts, ii) Co-Pyrolyse mit Biomasse zur Erzeugung hochqualitativer Pflanzenkohle und iii) Nutzung als Brennstoff näher untersucht.

Die thermisch nachbehandelten und aktivierten Vergaserkoks zeigten eine sehr gute Wirkung als Aktivkohle in der Abwasserbehandlung, die die Abreinigungsleistung von kommerzieller Aktivkohle z.T. übertreffen. Bei der Untersuchung der Co-Pyrolyse konnte durch Zugabe von 9 Ma.-% Asche/aschereichem Vergaserkoks die aschebereinigten Ausbeuten an Pflanzenkohle um 26% erhöht werden und dabei können gleichzeitig z.T. über 99% der enthaltenen PAKs eliminiert werden. Dafür waren jedoch Temperaturen von >600 °C erforderlich. Vergaserkoks in granulierter Form konnte erfolgreich in einem Festbett-Gegenstrom-Kleinstvergaser eingesetzt werden. Allerdings war die Einsatzfähigkeit stark von der thermischen und mechanischen Stabilität der Granulate abhängig, die wiederum durch die Wahl des Bindemittels während der Granulierung beeinflusst wurde. Während mit Stärke bzw. Melasse granuliert Vergaserkoks den Anforderungen nicht genügen konnten, erwies sich der mit Methylcellulose granuliert Vergaserkoks als guter, auch im Versuchsbetrieb stabiler Brennstoff, der eine gute Bettdurchlüftung erlaubte und zu sehr guter Gasqualität führte.

Vergaserkoks-Aufbereitung

Auch wenn die Agglomeration energieaufwändig ist, ist diese für bestimmte Anwendungen, wie z.B. für den Einsatz als Brennstoff in Kleinstvergäsern zwingend erforderlich oder zur Verbesserung der Transportwürdigkeit günstig. Zur Herstellung eines für Kleinstvergaser geeigneten Brennstoffs wurden vier verschiedene Verfahren getestet: Linsenbrikkettierung, 3D-Druck, Granulierung und Pelletierung. Die Linsenbrikkettierung lieferte auch unter Einsatz von verschiedenen Bindemitteln keine stabilen Brikketts. Auch die Linsen aus dem 3D-Druck waren äußerst fragil und nicht als Brennstoff geeignet. Die Granulierung konnte erfolgreich mit den Bindemitteln: Stärke, Melasse, Methylcellulose und Polyvinylalkohol realisiert werden, wobei sich die erzeugten Granulate in Form und Partikelgrößenverteilung erheblich unterschieden (Tabelle 1).

Für die Pelletierung mussten sehr hohe Wassergehalte von bis zu 50% angewandt werden, um überhaupt eine Pelletierbarkeit zu erreichen. Damit sank der Energieaufwand bei der Pelletierung, die dann eher einer Extrusion entspricht. Allerdings müssen die Pellets im

Anschluss getrocknet werden, um die notwendige Festigkeit zu erhalten und es ergeben sich dadurch niedrige Schüttdichten.

Produktnormentwicklung

Durch die Initialisierung des Normungsgremiums NA 062-02-85 AA »Pyrogene Kohlenstoffmaterialien – Charakterisierung und Analyseverfahren« wurde mit der Entwicklung von Normen für pyrogene Kohlenstoffmaterialien – zu denen auch Vergaserkoks zählt – begonnen. Gleichzeitig besteht auch auf europäischer (insbesondere aus Finnland, Österreich und der Schweiz) sowie internationaler Ebene ein großes Interesse, durch die Schaffung von Produkt- und Analysenormen die Anwendung dieser Materialien zu erleichtern.

Auf internationaler Ebene (ISO) wurde inzwischen der Scope des TC238 erweitert, so dass auch hier an der Normierung von pyrogenen Kohlenstoffmaterialien gearbeitet wird. Während der Projektlaufzeit wurde eine Anpassung der PAK-Grenzwerte in der Europäischen Pflanzenkohlezertifizierung (EBC) auf den Weg gebracht. Für alle Anwendungsklassen wurde ein ergänzender Grenzwert für die acht kanzerogenen PAK innerhalb der 16 EPA PAK, die von der Europäischen Behörde für Lebensmittelsicherheit EFSA zum Monitoring von PAK in Lebensmit-

Tab. 1: Ergebnisse der Granulierungsversuche mit Maximalwert der Partikelgröße

	Stärke	Melasse	Methyl-cellulose	Polyvinyl-alkohol
Ohne Pelletierteller	 26 mm	 9 mm	 18 mm	 17 mm
Mit Pelletierteller		 25 mm	 25 mm	

teln vorgeschlagen wurden (z.B. Benzo[a]pyren; 8 EFSA PAK) von 1 mg/kg für alle Anwendungen in Böden, Futtermittel- und Gegenstände des täglichen Gebrauchs eingeführt. Durch zusätzliche Grenzwerte für zwei weitere individuelle PAK Kongenere wurde die Konformität von EBC und der EU REACH Verordnung hergestellt. Um dem Interesse der Verwendung gerade der Vergaserkoks in Baumaterialien Rechnung zu tragen, wurde

eine neue Anwendungsklasse »EBC-BasicMaterials« geschaffen. Als erleichterte Grenzwerte werden für die Klasse die 8 EFSA PAK mit einer Summe von max. 4 mg/kg eingeführt, da durch die Einbindung in Beton oder Asphalt die mögliche Exposition geringer ist. Mit diesem Schritt wurde die Anwendung einer Reihe von Vergaserkoks in der Bauindustrie ermöglicht.

HERAUSFORDERUNGEN bzw. HEMMNISSE

Die Wissensbasis zu den Eigenschaften von Vergaserkoks war zu Projektbeginn sehr begrenzt und die Ergebnisse von durchgeführten Untersuchungen z.T. widersprüchlich. Ein grundsätzliches Verständnis zum Einfluss verschiedener Parameter wie Vergasungstechnologie, Prozessführung, Art der Abscheidung von Reststoffen oder eingesetzte Biomassebrennstoffe auf die Eigenschaften von Vergaserkoks waren nur in Ansätzen vorhanden. Eine systematische Untersuchung der Eigenschaften von verfügbaren Vergaserkoks fehlte. Diese fehlende Wissensbasis und die Unsicherheiten zu den tatsächlichen Eigenschaften von realen Vergaserkoks stellten ein großes Hemmnis für Nutzungsoptionen dar. Die Analyseverfahren für die Bestimmung der Schadstoffgehalte waren für Pflanzenkohlen mit sehr geringen PAK-Gehalten entwickelt worden. Daher führte deren Anwendung so wie die z.T. noch durchgeführte Analyse des PAK-Gehalts nach anderen Normen (z.B. zur

Bestimmung der PAK-Belastung in Böden) zu widersprüchlichen Ergebnissen und einer starken Verunsicherung.

Das Potential zur Nutzbarkeit wurde häufig falsch eingeschätzt. Dies führte teilweise zu einer erheblichen Zurückhaltung bei der Mitwirkung beim Screening und einer Skepsis gegenüber Nutzungsperspektiven. Durch die enge Beteiligung der Akteure, transparente Kommunikation der Ergebnisse und kontinuierliche Weitergabe der Erkenntnisse konnten Vorbehalte ausgeräumt und Perspektiven aufgezeigt, aber auch die Grenzen klar kommuniziert werden. Die Einbindung und aktive Beteiligung eines Branchenverbandes war von enormer Bedeutung für das Projekt.



Abb. 5: Beton als Kohlenstoffsенke



Abb. 6:
Die Firmenzentrale der Energiewerke Igg wurde unter Einsatz von klimaneutralem Beton errichtet.

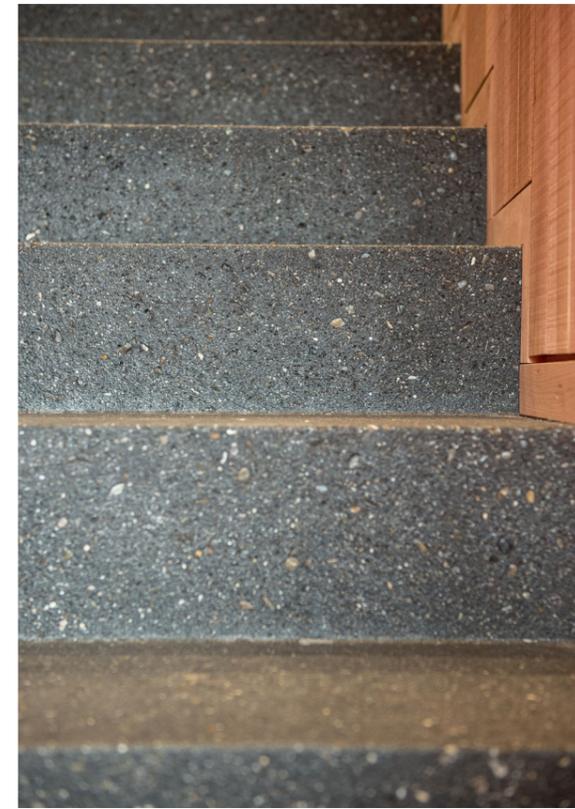
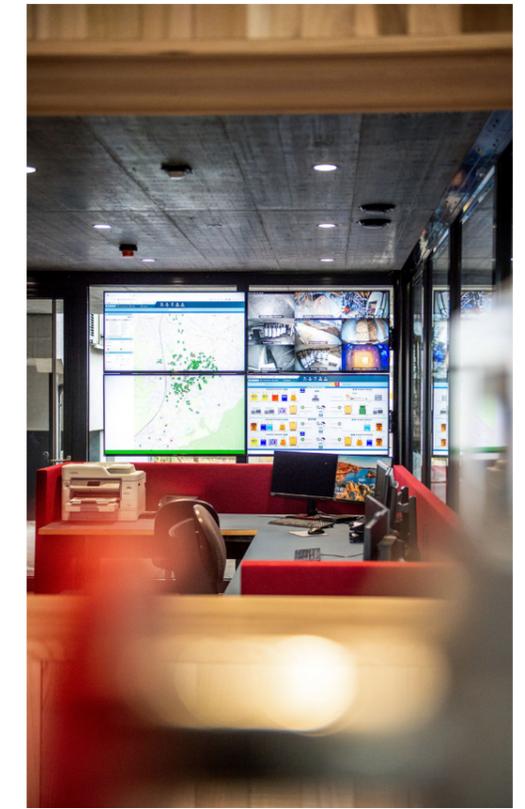


Abb. 7: Treppenstufen aus Klimabeton ▶

Abb. 8: Sichtbetondecke aus Klimabeton in Büroräumen ▶▶



AUSBLICK

Die Vermeidung von Abfällen und die vollständige Nutzung von Prozessrückständen wird bei der Nutzung der Biomasseressourcen zunehmend an Bedeutung gewinnen. Die gewonnenen Erkenntnisse zu Eigenschaften der Rückstände aus der Holzvergasung tragen wesentlich dazu bei, deren Verwertung zu ermöglichen und zu erleichtern. Gleichzeitig haben sie dazu beigetragen, das Interesse an lastflexiblen Holzvergasungsanlagen zu erhöhen, die je nach saisonalem Strom- und Wärmebedarf in der Lage sind, größere Mengen an hochqualitativem Vergaserkoks bzw. Pflanzenkohle auszuschleusen oder die Biomasse alternativ nahezu vollständig umzusetzen. Ein Projekt zur Vertiefung dieses Ansatzes einschließlich der Konkretisierung der Verwertung von anfallenden Vergaserkoks wurden durch das DBFZ im Rahmen des Förderprogramms beantragt. Die Thematik der Pflanzenkohleerzeugung und Nutzung wird in

verschiedenen nationalen und internationalen Projekten, die durch das DBFZ und das Ithaka-Institut beantragt wurden, weiter und vertieft bearbeitet (BCLookup (BLE: 2823HUM005), CarboFerro (Ptj: 03EI5453), ETH-Soil (BMZ: 2021.0119.4), NET-Fuels (EU Horizon Europe I01083780)). Durch die Leitung des Normungsgremiums für pyrogene Kohlenstoffmaterialien kann das DBFZ aktiv an der Gestaltung der zukünftigen Nutzungswege mitwirken. Auch hier sind für unterschiedliche Anwendungsfelder Entwicklungen notwendig, um die geeigneten Parameter zur Charakterisierung zu identifizieren bzw. entsprechende Analysemethoden zu entwickeln und zu standardisieren. Über das WIPANO-Programm (Wissens- und Technologietransfer durch Patente und Normen) wird zur Zeit ein entsprechender Antrag vorbereitet, wobei es dabei um den Einsatz von Pflanzenkohle als Füllkörper mit mikrobieller Besiedlung für biotechnologische Prozesse gehen wird.

EXKURS

Bei der Fa. Energiewerke Igg in Österreich wird Holz in einer Syncraft-Vergasungsanlage zur Erzeugung von Strom, Wärme und hochwertiger Pflanzenkohle eingesetzt. Mit dieser aus dem Vergasungsprozess gebildeten Pflanzenkohle kann der Beton nicht nur klimaneutral gestaltet, sondern sogar in eine Kohlenstoffsенke umgewandelt werden, wenn die Pflanzenkohle in Form des Zuschlagstoffes Clim@Add bei der Betonherstellung eingesetzt wird und dabei bis zu 15% Zement ersetzt (Abbildungen 5-8).

LITERATUR

[1] EBC (2012) 'European Biochar Certificate – Richtlinien für die Zertifizierung von Pflanzenkohle', Ithaka Institute, Arbaz, Switzerland. <http://www.european-biochar.org> Version 9.5G vom 1. August 2021, DOI: 10.13140/RG.2.1.4658.7043; Available from: https://www.european-biochar.org/media/doc/2/version_de_9_5.pdf.

[2] EBC (2012-2023) 'European Biochar Certificate – Richtlinien für die Zertifizierung von Pflanzenkohle', Ithaka Institute, Arbaz, Switzerland. <http://www.european-biochar.org> Version 10.3G vom 5. April 2023; Available from: https://www.european-biochar.org/media/doc/2/version_de_10_3.pdf.

Christian Wondra, Peter Treiber

IntenseMethane

Prozessintensivierung und –flexibilisierung einer mit Bioabfall betriebenen Trockenfermentationsanlage durch die biologische Methanisierung von wasserstoffreichen Synthesegasen

ZUSAMMENFASSUNG

Im Rahmen des Projekts IntenseMethane wurde die Kombination einer Holzvergasungsanlage mit einem Bioabfall-Trockenfermenter zur biologischen Methanisierung des erzeugten Holzgases demonstriert. Neben der Prozessoptimierung der Methanisierung im Rieselbett mit Perkolat aus dem kommerziellen Fermenter wurde der Vergasungsprozess zur Reduktion der Stickstofffracht adaptiert. Methanisierungsversuche im Technikum konnten sowohl die anteilige Umsetzung von Kohlenmonoxid als auch ausgewählter Teerbestandteile im Rieselbettreaktor darstellen. In Labor-Kopplungsversuchen mit stark teerhaltigem Synthesegas wurde zwar ein temporärer Abfall der Methanbildungsrate im Methanisierungsreaktor beobachtet, nach Rückkehr zur Zugabe synthetischer Gasgemische konnte aber die ursprüngliche Performanz wieder erreicht werden. Abschließend wurde der auf Stickstoff-Reduktion adaptierte Holzvergaser mit einem biologischen Fermenter in industriellem Umfeld gekoppelt und damit die Prozesskombination damit erfolgreich bewiesen.

ZIELE

Das Ziel dieses Projektes ist der realitätsnahe Test einer Kombination aus einer bestehenden, mit biologischen Abfällen betriebenen Trockenfermentationsanlage mit einer handelsüblichen Holzgas erzeugungsanlage zur Umsetzung von im Synthesegas enthaltenen H_2 und CO/CO_2 zu Methan. Die Besonderheit in diesem Projekt liegt darin, dass diese Kombination im praxisrelevanten Maßstab in einer Größenordnung für dezentrale Anlagen ausgetestet werden soll. Kern des Konzeptes ist es, vorhandene und bereits etablierte Anlagentechnik so anzupassen und zu verknüpfen, dass durch die gemeinsame Nutzung/Kopplung von Anlagenkomponenten Synergieeffekte entstehen, die eine dezentrale Biomassenutzung über den Pfad »Biogene Methanisierung« effektiver und wirtschaftlicher machen.

SUMMARY

As part of the IntenseMethane project, the combination of a wood gasification plant with a dry biowaste fermenter for the biological methanation of the wood gas was demonstrated. In addition to process optimization of the biological methanation in a trickle bed reactor with percolate from the commercial biowaste fermenter, the gasification process was adapted to reduce the nitrogen load in the product gas. Methanation tests in the lab scale proved the partial conversion of carbon monoxide as well as selected tar components by the microorganisms. In laboratory coupling tests with synthesis gas containing a lot of tar, a temporary drop in the methane production rate was observed in the trickle bed reactor, but after returning to the addition of synthetic gas mixtures, the original performance could be reached again. Finally, the wood gasifier adapted for nitrogen reduction was coupled with a biological fermenter in an industrial environment, thus successfully proving the process combination.

KOORDINATION

Friedrich-Alexander-Universität
Erlangen-Nürnberg, Department
Chemie- und Bioingenieurwesen,
Lehrstuhl für Energieverfahrenstechnik
Fürther Straße 244f, 90429 Nürnberg
www.evt.tf.fau.de

KONTAKT

Ansprechperson: Christian Wondra
Telefon: +49 (0)911 5302 99399
Email: christian.wondra@fau.de

FKZ-NR.: 03EI5405
LAUFZEIT: 01.01.2020–30.06.2023
ZUWENDUNGSSUMME: 985.297,28 €

PARTNER

LIPRO Energy GmbH & Co. KG
Schottweg 31, 27798 Wüstring (Hude)
http://www.lipro-energy.de

M. Eng. Frederik Köster
Telefon: +49 (0) 4484-2023640
telefon: +49 (0) 04407 300 96 -40
koester@lipro-energy.de

BEKON GmbH
FeringasträÙe 7, 85774 Unterföhring
Ansprechperson: Dipl.-Biol. Hans-Peter Erhard
Telefon: 089/907795916
Email: h.erhard@f-e.de

RWTH Aachen, Lehr- und Forschungsgebiet
Technologie der Energierohstoffe (TEER)
Wüllerstraße 2, 52062 Aachen

Ansprechpersonen:
Clemens Schmittmann
Telefon: +49-(0) 241 80 90714
Email: schmittmann@teer.rwth-aachen.de

Prof. Dr.-Ing. Peter Quicker
Telefon: +49-(0)241 80-95705
Email: info@teer.rwth-aachen.de

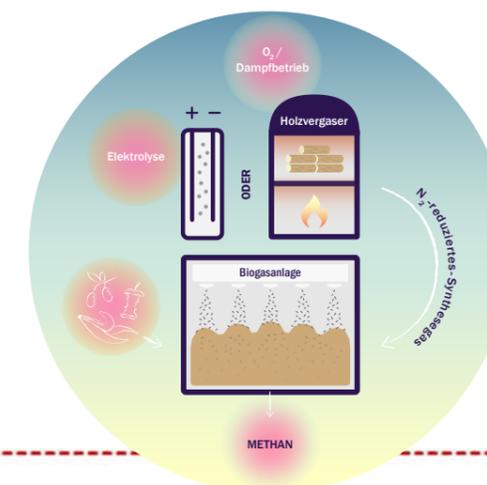
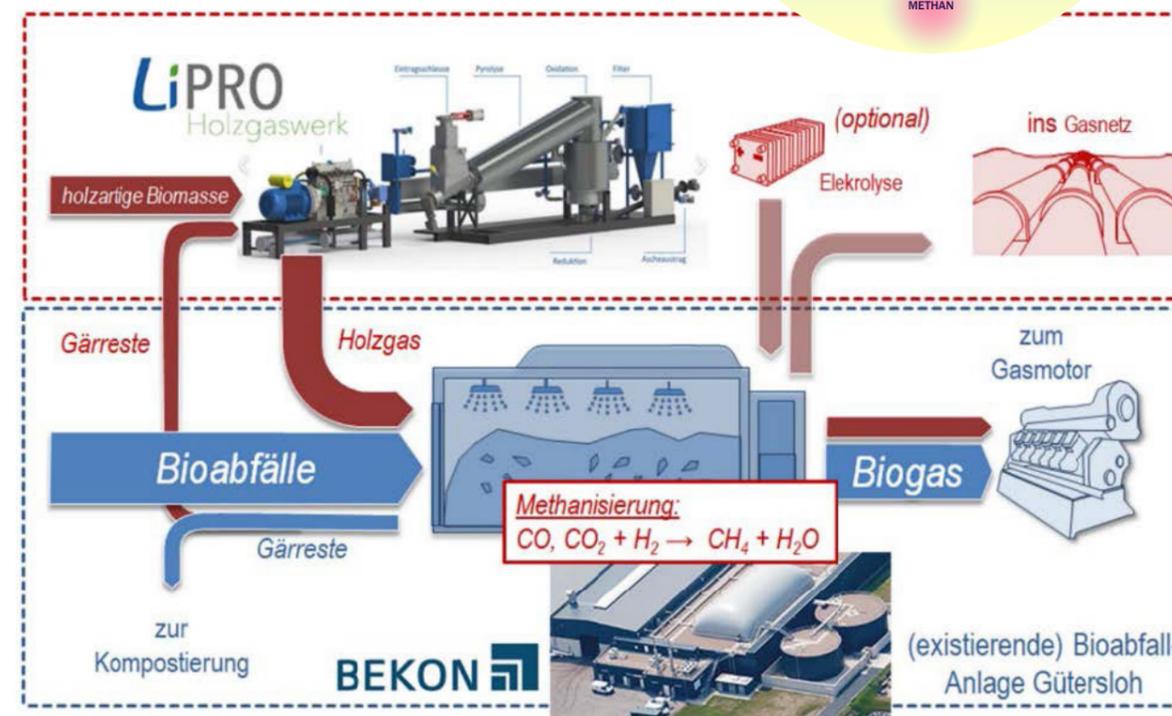


Abb. 1: AAnlagen Konzept des projektes IntenseMethane



METHODEN

- FAU: Labor-Rieselbettreaktor zur Untersuchung der biologischen Methanisierung mit Perkolat aus dem Bioabfall-Fermenter von
- BEKON Labor-Biomassevergasungsanlage zur Erzeugung von realem, verunreinigtem Produktgas und Kopplung mit dem Rieselbettreaktor
- BEKON: Trockenfermentationsanlage zur Untersuchung des Einflusses von Wasserstoff auf die Batch-Fermentation von Bioabfall
- LiPRO: Holzvergasungsanlage zur Demonstration der Reduktion der Stickstofffracht im Holzgas durch Zugabe von Sauerstoff und Dampf anstatt Luft
- TEER: Analyseequipment zur Untersuchung der Produktgasqualität des LiPRO-Vergasers

Im Rahmen des Projekts IntenseMethane wurden wesentliche Erkenntnisse zur Optimierung der Biogaserzeugung durch die Integration wasserstoffreicher Gase und thermochemischer Prozesse gewonnen. Die Ergebnisse zeigen, dass die Zugabe von reinem Wasserstoff (H_2) in Trockenfermentern die Methanproduktion signifikant steigern kann. Dies wurde durch die Erhöhung des Methananteils im Biogas von 55% auf bis zu 58% und eine gleichzeitige Reduktion des CO_2 -Gehalts belegt. Allerdings traten strukturelle Einschränkungen der Fermenter auf, da der dosierte Wasserstoff das Substrat nicht gleichmäßig durchströmen konnte, was die Effizienz der Methanisierung begrenzte.

Die Kopplung eines Biomasse-Vergasers mit einer Biogasanlage zeigte Potenziale, die Gasqualität durch die Kombination der beiden Technologien zu verbessern. Holzgas, das aus einem gestuften Biomassevergasers erzeugt wurde, konnte in einer Pilotanlage erfolgreich in die Biogasproduktion integriert werden. Rechtliche und genehmigungstechnische Hürden verhinderten jedoch eine großtechnische Umsetzung. Dennoch bestätigten Pilotversuche, dass sich Synthesegas stabil in Fermenter einleiten lässt und die Methanisierung von Kohlenstoffmonoxid (CO) und H_2 zu einer verbesserten Gasqualität führt.

Ein weiterer zentraler Aspekt war die Prozessintensivierung durch die Integration von biogenem Wasserstoff. Die Zugabe von H_2 führte nicht nur zu einem höheren Methananteil im Biogas, sondern reduzierte auch den CO_2 -Anteil so weit, dass eine aufwendige Nachbehandlung zur CO_2 -Abtrennung teilweise überflüssig wurde. Gleichzeitig wurde durch die Umstellung des Vergasers auf sauerstoffangereicherte Gasifizierungsmittel die Stickstofffracht im Holzgas erheblich reduziert. Dies verbesserte die Methanisierungsfähigkeit des Gases und erhöhte dessen Eignung für die Einspeisung in das Erdgasnetz.

DARSTELLUNG DER ERGEBNISSE

Abb. 2: Befüllen des Fermenters mit Substrat



Eine wirtschaftliche und potenzialorientierte Analyse zeigte, dass die Kombination von thermochemischer Gasproduktion und biologischer Methanisierung für dezentrale Anlagen vielversprechend ist.

Kosteneinsparungen und Effizienzsteigerungen könnten insbesondere durch die Integration von Power-to-Gas-Systemen erzielt werden, bei denen überschüssiger erneuerbarer Strom für die Wasserstoffproduktion genutzt wird. Insgesamt bele-

gen die Ergebnisse des Projekts die technischen und wirtschaftlichen Vorteile der Verknüpfung etablierter Biogasverfahren mit innovativen Ansätzen zur Methanisierung, auch wenn Herausforderungen in der Umsetzung und Genehmigungspraxis bestehen bleiben.

HERAUSFORDERUNGEN UND HEMMNISSE

Im Projekt IntenseMethane traten mehrere Herausforderungen auf, die die Umsetzung der geplanten Maßnahmen erschwerten.

Eine der größten Schwierigkeiten lag in den rechtlichen und genehmigungstechnischen Hürden. Insbesondere die geplante Kopplung eines Holzgasvergasers mit einer bestehenden Biogasanlage wurde durch umfangreiche Anforderungen nach dem Bundes-Immissionsschutzgesetz (BImSchG) sowie durch Unsicherheiten hinsichtlich des EEG-Status der Anlagen behindert. Diese bürokratischen und regulatorischen Hürden führten dazu, dass die Versuche nicht wie geplant an großtechnischen Anlagen durchgeführt werden konnten. Stattdessen mussten die Tests auf kleinere Pilotanlagen mit weniger restriktiven Genehmigungsanforderungen verlagert werden, was jedoch zu Verzögerungen und erhöhtem Aufwand führte.

Ein weiterer wesentlicher Punkt war die technische Herausforderung, die bestehende Infrastruktur an die Anforderungen der Methanisierung und Synthesegas-Nutzung anzupassen. Die Fermenter in den eingesetzten Trockenfermentationsanlagen erwiesen sich als nur bedingt geeignet, da der zugeführte Wasserstoff das Substrat nicht vollständig durchströmen konnte. Dies führte zu einer ineffizienten Methanisierung, da die mikrobiellen Prozesse innerhalb des Fermenters nicht optimal ablaufen konnten. Zusätzlich trugen strukturelle Probleme, wie die Verdichtung des Substrats und die Bauweise der Fermenter mit Lochblechen, dazu bei, dass der Wasserstoff nur an der Oberfläche umgesetzt wurde. ►

AUSBLICK

Das Projekt IntenseMethane liefert einen vielversprechenden Ausblick auf die Weiterentwicklung und Integration von innovativen Technologien zur Methanisierung in dezentralen Biogasanlagen. Die erzielten Ergebnisse belegen, dass die Kombination von thermochemischer Gasproduktion und biologischer Methanisierung eine bedeutende Effizienzsteigerung und Verbesserung der Gasqualität ermöglichen kann. Besonders die Integration von biogenem Wasserstoff und Synthesegas in bestehende Biogasanlagen zeigt das Potenzial, die Methanproduktion signifikant zu erhöhen und gleichzeitig CO₂-Emissionen zu reduzieren. Dies könnte nicht nur die Wirtschaftlichkeit dezentraler Biomasseanlagen verbessern, sondern auch zur Dekarbonisierung des Energiesektors beitragen, indem Methan als speicherbare und flexible Energiequelle genutzt wird.

Die Anschlussfähigkeit des Projekts an bestehende und zukünftige Technologiebereiche ist vielversprechend. Besonders im Bereich Power-to-Gas bieten sich durch die Nutzung von überschüssigem erneuerbarem Strom zur Wasserstoffproduktion neue wirtschaftliche Potenziale. Die Kombination von Methanisierung und Power-to-Gas-Anwendungen könnte

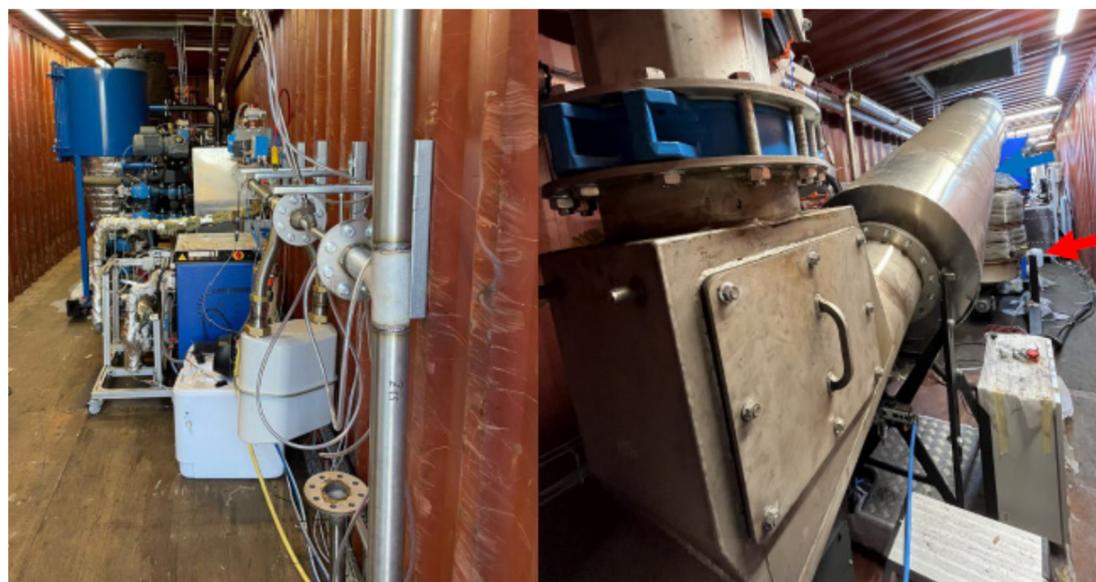
eine Schlüsseltechnologie für die saisonale Speicherung von Energie und die Integration erneuerbarer Energien in das bestehende Gasnetz darstellen. Die gewonnenen Erkenntnisse aus der Kopplung von Vergasungsanlagen und Biogasanlagen sind auch für die Weiterentwicklung und Optimierung bestehender Systeme von Bedeutung.

Für die Industrie und Wirtschaft eröffnet das Projekt auch Chancen zur Weiterentwicklung von Retrofit-Technologien, die bestehende Biogasanlagen mit moderner Synthesegasnutzung und Wasserstoffintegration ausstatten. Dies könnte die Skalierung der Technologie für größere Anlagen sowie die Integration in bestehende Versorgungsstrukturen erleichtern. Ebenso bietet das Projekt Perspektiven für die Erschließung neuer Märkte im Bereich der dezentralen Energieversorgung und der nachhaltigen Biomassenutzung, da die Technologie flexibel und anpassbar an unterschiedliche Standortanforderungen ist.

Insgesamt zeigt das Projekt, dass die Kombination von bestehenden Technologien mit innovativen Konzepten zur Methanisierung eine vielversprechende Lösung für die Zukunft der Biomassenutzung und Energieproduktion darstellt, wobei die technischen und wirtschaftlichen Ansätze durch weitere Forschung und Entwicklung weiter optimiert werden können.

■ **Schlussbericht**

Abb. 3: LIPRO Holzvergaseranlage im Versuchscontainer



SyntheseReady

Christian Wondra

Entwicklung flexibler
Biomasseheizkraftwerke zur Sektorkopplung

KOORDINATION

Friedrich-Alexander-Universität
Erlangen-Nürnberg, Department
Chemie- und Bioingenieurwesen,
Lehrstuhl für Energieverfahrens-
technik
Fürther Str. 244f, 90429 Nürnberg
<https://www.evt.tf.fau.de/>

FKZ-NR.: 03E15437
LAUFZEIT: 01.01.2022–31.12.2024
ZUWENDUNGSSUMME: 388.672,30 €

KONTAKT

Projektleitung:
Prof. Dr.-Ing. Jürgen Karl
Telefon: +49-(0)911 5302-9021
Telefon: +49-(0)9115302-99021
Mail: juergen.karl@fau.de

Weitere Ansprechpersonen:
Christian Wondra
Telefon: +49 911 5302 99399
Email: christian.wondra@fau.de

PARTNER

ReGaWatt GmbH
An den Sandwellen 114, 93326 Abensberg
M.Sc. Julian Moffitt
Telefon: +49 (0)9443 929 254 // Mail: j.moffitt@regawatt.de

prosio engineering GmbH
Bergstraße 6, 91207 Lauf an der Pegnitz
Dr.-Ing. Thomas Plankenbühler
Telefon: +49-(0)170 190 6372
Email: tp@prosio-engineering.de

ZIEL DES PROJEKTES

Ziel von SyntheseREADY ist es, Maßnahmen zu erforschen, um Biomasseheizkraftwerke auf Basis der thermischen Vergasung um das Produkt »grünes Erdgas« zu erweitern. Dazu wird die Prozessführung der Festbettvergasung von Biomasse so adaptiert, dass ein für Syntheseprozesse nutzbares Gas entsteht. Die zugrundeliegenden Prozesse werden dabei im Sinne eines Oxyfuel-Verfahrens angepasst. Gleichzeitig wird für das Konzept in flexibles, intelligentes, bedarfs- und marktgerechtes Regelungssystem entwickelt.

Zitat Christian Wondra:

» KWK-Anlagen laufen insbesondere im Sommer Gefahr durch niedrige Strompreise sowie geringe Wärmeabnahme wirtschaftlich unrentabel zu werden. Hier ist eine Flexibilisierung der Anlage ein weiterer wichtiger Schritt, um einen Hochlauf biomassebasierten Anlagen als CO₂-freier Energielieferant zu fördern. «

ZUSAMMENFASSUNG

Die Notwendigkeit einer Energiewende erfordert innovative Ansätze zur flexiblen und nachhaltigen Energieproduktion. Power-to-Gas-Konzepte, die auf Biomasse zielen, bieten Vorteile in der Handhabung und Kompatibilität mit der bestehenden Infrastruktur. Die Nutzung von Biomasse als Kohlenstoffquelle für die Erzeugung von SNG könnte bedeutende wirtschaftliche und ökologische Vorteile bringen und einen kurzfristigen Markteintritt ermöglichen.

Das Projekt thematisiert die thermische Festbettvergasung in KWK-Anlagen, um mit diesen bedarfsweise durch eine Oxyfuel-Umrüstung auch Synthesegas zu produzieren. Dieses Gas kann anschließend für die Gewinnung grünen Erdgases oder weitererm regenerativ erzeugter alternativer Kohlenwasserstoffe genutzt werden. Die Basis dafür sind die prozesstechnische Adaption des Vergasungsprozesses selbst, ergänzt durch eine intelligente und optimierte Regelungsstrategie.

METHODEN

FAU:

- Thermodynamisches Prozessdesign und Gasaufbereitung

ReGaWatt:

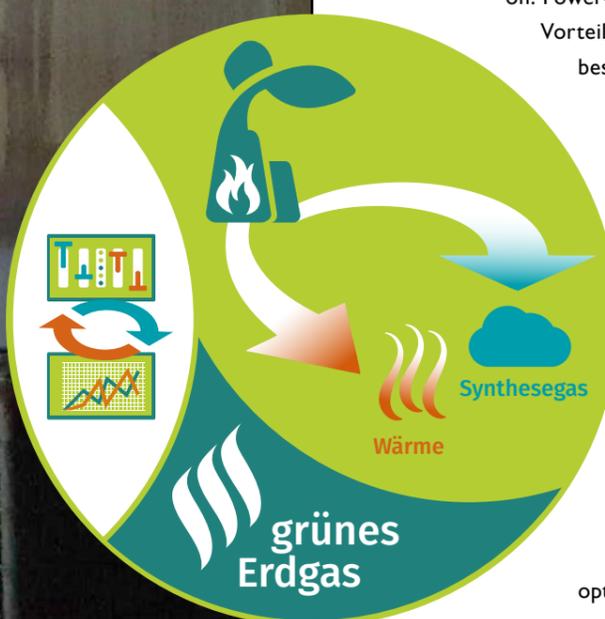
- Entwicklung und Demonstration der Oxyfuel Gegenstromvergasung

Prosio:

- Prozessoptimierung, Flexibilisierung und intelligente Regelungstechnik, Machine Learning

WEITERE INFORMATIONEN

- [Schlussbericht](#)



DARSTELLUNG DER ERGEBNISS

Die Ergebnisse des Projekts zeigen, dass die Wirtschaftlichkeit von Konzepten wie der Oxyfuel-Vergasung stark von einer intelligenten Steuerung und Flexibilität im Betrieb abhängt. Zwei entscheidende Faktoren sind dabei die Strompreise und der Wärmebedarf. Im Winter, wenn sowohl Strompreise als auch der Bedarf an Wärme hoch sind, ist der Betrieb als Kraft-Wärme-Kopplungs-(KWK)-Anlage wirtschaftlicher als der Oxyfuel-Betrieb. In einer Modellrechnung für eine Referenzwoche im Winter wurde gezeigt, dass die Oxyfuel-Vergasung nur in 9 % der Zeit wirtschaftlich sinnvoll wäre.

Im Sommer hingegen, wenn der Wärmebedarf geringer und die Strompreise günstiger sind, kehrt sich das Verhältnis um. Das Modell berechnete, dass in einer Referenzwoche im Sommer die Oxyfuel-Vergasung mit anschließender Konditionierung zu Bio-SNG (Synthetic Natural Gas) in 73 % der Zeit wirtschaftlicher wäre als der KWK-Betrieb. Diese Ergebnisse unterstreichen die Notwendigkeit eines flexiblen Anlagenbetriebs, der saisonale und wirtschaftliche Gegebenheiten berücksichtigt, um eine maximale Wirtschaftlichkeit zu gewährleisten.

Ein weiterer Erfolg des Projekts war die praktische Umstellung einer KWK-Anlage auf Oxyfuel-Betrieb im Feldtest. Hierbei wurden unterschiedliche Betriebsmodi getestet, indem Dampf- und Sauerstoffkonzentrationen im Vergasungsmedium variiert wurden, um die optimalen Betriebspunkte für die Synthesegasproduktion zu ermitteln. Parallel dazu wurde eine Teer-Cracking-Unit erfolgreich entwickelt und getestet. Diese Einheit kann das Kondensat des Vergasers energetisch verwerten und so zusätzlichen Energiegewinn ermöglichen.

SUMMARY

The necessity of an energy transition demands innovative approaches for flexible and sustainable energy production. Power-to-Gas concepts that focus on biomass offer advantages in handling and compatibility with existing infrastructure. The utilization of biomass as a carbon source for the production of synthetic natural gas (SNG) could provide significant economic and ecological benefits, facilitating a rapid market entry. This project addresses thermal fixed-bed gasification in combined heat and power (CHP) plants, enabling the production of syngas through a conversion to an oxy-fuel process as needed. This gas can subsequently be used for the generation of green natural gas or other renewably produced alternative hydrocarbons. The foundation for this is the process engineering adaptation of the gasification process itself, complemented by an intelligent and optimized control strategy.

Das Modell wird bis zum Abschluss der Projektlaufzeit im Juni 2025 weiter verfeinert. Insbesondere Sensitivitätsanalysen sollen durchgeführt werden, um die Auswirkungen von Variablen wie Marktpreisen, Substratzusammensetzungen und Prozessbedingungen noch genauer zu berücksichtigen und die Praxistauglichkeit und Effizienz solcher Konzepte weiter zu verbessern.

HERAUSFORDERUNGEN UND HEMNISSE

Das Betreiben einer Feldtestanlage bei un stetigen Witterungsbedingungen ist eine Herausforderung, da höhere Wärmeverluste sowie ein höherer Wassergehalt im Brennstoff auftreten können. Dies sollte man schon bei der Planung berücksichtigen, da es sonst zu Verzögerungen im Projekt kommen kann. Ein weiterer Punkt ist die Teer-Cracking-Unit, da das Kondensat sehr schwierig zu dosieren und fördern ist. Insbesondere Naphthalin kondensiert aus und verstopft die Rohre und Düsen. Eine stetige Begleitbeheizung ist hier von elementarer Bedeutung

AUSBLICK

Die bisherigen Ergebnisse zeigen durch die Flexibilisierung einer KWK-Anlage zur Biomethanherzeugung einen deutlichen wirtschaftlichen Vorteil. Die anstehenden Sensitivitätsanalysen sollen den Nutzen dieses Anlagenkonzeptes weiter verdeutlichen.

Diese Technik kann für Industrien interessant werden, welche einen fluktuierenden Wärmebedarf über das Jahr haben. Durch die Erzeugung von Biomethan, welches auch sehr einfach zu speichern ist, kann diese Anlagenlösung ein Schritt zur Dekarbonisierung in der Industrie sein. Weiter soll es in den nächsten Jahren immer mehr Wärmenetze geben, welche im ländlichen Raum oft auf Biomasse KWK Lösungen beruhen. Hier kann die Flexibilisierung eine weitere wirtschaftliche Einnahmequelle garantieren, was die Investitionshürden minimiert und des Ausbau solcher Anlagen fördert.

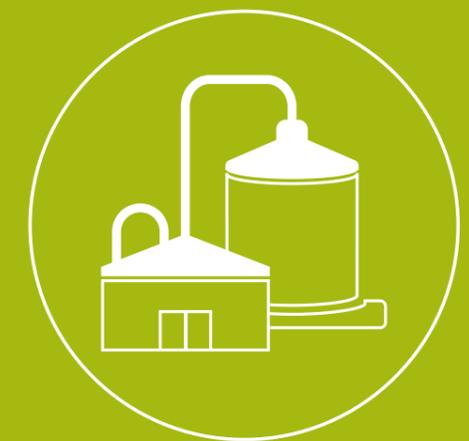
ERGEBNISSE AUF EINEN BLICK

- **Publikationen:**
 - ISI-Publikation (SCI Science Citation Index etc.):
 - Artikel in Fachzeitschrift (z.B. Euwid, CET)
 - Tagungsband
 - Jahresbericht
- **Konzepte/Machbarkeitsstudien:**
 - Anlagenkonzept
- **Anlagen:**
 - Demonstrationsanlage
 - Pilot-Anlage
 - Technikumsanlage
 - Laboranlage
 - Anlagenteile / Systemkomponenten
- **Daten & Methoden:**
 - Modell
 - Datenbank
 - Szenario
 - Methode
 - Monitoring
- **Markt:**
 - Marktprognose
 - Businessplan



Abb. 1: Feldtest am Standort in Senden.
 a) Feldtestanlage in Senden
 b) Gasanalytik sowie SPS Steuerung
 c) Sauerstoffdosierung für Oxyfuel Vergasung
 d) Dampferzeuger

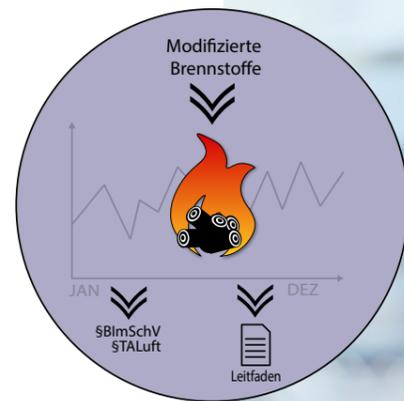
ANLAGENEFFIZIENZ



Lisa Röver, Roman Adam, Philipp Schneider, Hans Werner

MoBiFuels

Analyse und Beseitigung
von Markthemmnissen von
technisch modifizierten
Bioenergieträgern



KOORDINATION

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

KONTAKT

Projektleitung: Lisa Röver
Telefon: +49 (0)341 2434-429
E-Mail: lisa.roever@dbfz.de

FKZ-NR.: 03KB136
LAUFZEIT: 01.11.2018–30.04.2024
ZUWENDUNGSSUMME: 459.229,00 €

PARTNER

A. P. Bioenergietechnik GmbH
Träglhof 6, 92242 Hirschau
www.oeko-therm.net

Florafuel GmbH
Stahlgruberring 7a,
81825 München
www.florafuel.de

Autor:innen des Beitrages:

Lisa Röver, Roman Adam, DBFZ;
Philipp Schneider, P. Bioenergietechnik GmbH;
Hans Werner, Florafuel GmbH



Zitat der Projektleitung: Lisa Röver

Während im deutschen Stromsektor 2022 durch erneuerbare Energie ein Anteil von etwa 46,2%¹ bereitgestellt wurde, fällt der Anteil an erneuerbarer Wärme mit 17,4%¹ noch verhältnismäßig gering aus. Beim Ausbau der erneuerbaren Wärmeenergie fehlen unter anderem alternative Brennstoffe, die es ermöglichen fossile Energieträger kostengünstig zu ersetzen. Holz als Festbrennstoff wird in Zukunft weniger verfügbar sein, sodass bei der Herstellung von Brennstoffen verstärkt auf Rest- oder Abfallstoffe, wie beispielsweise Parklaub, Grüngut oder Grasschnitt zurückgegriffen werden muss.



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

ZUSAMMENFASSUNG

Mit der Veröffentlichung der Vollzugsempfehlung durch den Bund-/Länder Arbeitskreis für Immissionsschutz (LAI) aus dem Jahr 2017 wurde für den Anwendungsbereich der I. BImSchV ein einjähriges Messprogramm für sogenannte »sonstige nachwachsende Rohstoffe« gemäß § 3 (1) Nr. 13 vorgegeben. Das umfasst insbesondere die von der ISO 17225 6:2021 erfassten nicht-holzartige Brennstoffe. Unsicherheiten bezüglich des emissions- und verbrennungstechnischen Verhaltens dieser Brennstoffe sowie der mit den Anforderungen verbundene organisatorische und finanzielle Aufwand verhinderten jedoch bislang deren Zulassung in Deutschland. Es wird daher exemplarisch der Prozess der Herstellung von Laub-Holz-Pellets beschrieben und das einjährige Messprogramm für die beschriebene Brennstoffkategorie an einem Kesseltyp durchgeführt. Im Ergebnis konnte unter Prüf- und Praxisbedingungen demonstriert werden, dass die Emissionsgrenzwerte der I. BImSchV sowie die genehmigungsrechtlichen Vorgaben des LAI für Laub-Holz-Pellets mit der eingesetzten Feuerungsanlage unter 100 kW Feuerungswärmeleistung in Kombination mit einem geeigneten Gewebefilter im Volllastbetrieb eingehalten werden können.

KERN BOTSCHAFTEN KEY MESSAGES

- Brennstoffherstellung
- Modifizierte Festbrennstoffe
- Laub-Holz-Pellets
- I. BImSchV
- Einjähriges Messprogramm
- Brennstoffherstellung
- Modifizierte Festbrennstoffe
- Laub-Holz-Pellets
- I. BImSchV
- Einjähriges Messprogramm

SUMMARY

The 1st ordinance of the German emission control act (1st BImSchV) regulates the approval of fuels from other renewable raw materials according to § 3 (1) No. 13 and the used type of boiler. Other renewable raw materials within the meaning of § 3 (1) No. 13 are in particular the non-woody fuels covered by ISO 17225 6:2021. However, uncertainties regarding their performance during field testing as well as financial and organizational efforts, have so far prevented the approval of non-woody fuels in Germany. This is an example for the production of foliage-wood-pellets and the one-year measurement program for the described fuel category on one boiler type. As a result, it was possible to demonstrate under practical conditions that the emission thresholds of the 1st BImSchV as well as the recommendation of the LAI can be met with a boiler type with a combustion heat output below 100 kW in full-load operation for foliage-wood-pellets.

METHODEN bzw. MASSNAHMEN

■ Rohmaterial

- Als Rohmaterial wurde unbehandeltes Parklaub und Sägemehl verwendet, um eine Brennstoffcharge in ausreichender Menge für eine Typprüfung und das einjährige Messprogramm zu erzeugen.
- Das unbehandelte Parklaub wurde im Rahmen der Bewirtschaftung von öffentlichen Flächen und der kommunalen Grünpflege in Süddeutschland (in und um München) im Herbst und Winter 2020 gesammelt und bis zur Weiterverarbeitung im Haufwerk siliert. Insgesamt wurden circa 80 t unbehandeltes Parklaub für die Brennstoffherstellung verwendet.
- Außerdem wurden 25 t Sägespäne, die sowohl Kiefern- als auch Fichtenholz enthielten, zum Mischen zugekauft.
- Das Laub ist nach ISO 17225 1:2021 (ISO International Organization for Standardization, 2021a) in die Kategorie 2.1.7 und das Holz, welches zugemischt wird, in die Kategorie 1.1.3.4 klassifizierbar.

■ Brennstoffherstellung und -analyse

- Der gesamte Brennstoffherstellungsprozess sowie dessen Analytik wurde bereits beschrieben und veröffentlicht (Adam et al., 2023). Es kann wie folgt zusammengefasst werden: Zur Gewinnung des gewaschenen Parklaubs wurde das florafuel-Verfahren (Patent EP2274406 (Hans Werner, 2009)) eingesetzt. Das Verfahren umfasste das Zerkleinern, Waschen, Mahlen und mechanische Entwässern sowie das anschließende technische Trocknen. Nach vollständigem Durchlauf des florafuel-Aufbereitungsverfahrens verliert das Rohmaterial (Garten- und Parkabfall) seine Abfalleigenschaft. Um die Grenzwerte der Brennstoffnorm insbesondere hinsichtlich des Aschegehaltes einzuhalten, wird dem aufbereiteten, gewaschenen Parklaub im anschließenden Brennstoffherstellungsprozess Sägemehl in einem Verhältnis von 55 Gew. % gewaschenen Parklaub und 45 Gew. % Sägemehl zugemischt. Es wurden Pellets nach der Brennstoffnorm ISO 17225 6:2021, Klasse B (ISO International Organization for Standardization, 2021b) hergestellt. Die Produktion von insgesamt 51 t Laub-Holz-Pellets im industriellen Maßstab erfolgte ohne Bindemittel.
- Für die Analyse des Rohmaterials wurden 30 Einzelproben aus dem Rohmaterial sowie 40 Einzelproben aus dem Brennstoffprodukt (Laub-Holz-Pellets) gemäß ISO 21945:2020 (ISO International Organization for Standardization, 2020) entnommen. Im Anschluss erfolgt eine Probenentteilung, worauf aus einem Probenteil des Brennstoffprodukts 30 zufällig ausgewählt wurden und zur Analyse von Schlüsselparametern (Asche-Stickstoff-, Chlor- und Kaliumgehalt) zur Ermittlung der Schwankungsbreiten des Brennstoffes verwendet wurden. Aus dem anderen Probenteil wurden jeweils drei Mischproben für unbehandeltes Parklaub und fünf Mischproben für Laub-Holz-Pellets erstellt. Alle zusammengefassten Proben wurden auf ihren Wasser- und Aschegehalt sowie auf den unteren Heizwert und die chemische Zusammensetzung untersucht. Die Mischprobe der Laub-Holz-Pellets wurde zusätzlich auf die mechanischen Eigenschaften (d. h. mechanische Festigkeit, Feinanteil, Schüttdichte) und das Ascheschmelzverhalten (SST, DT, HT, FT) untersucht. Alle Analysen des Brennstoffes erfolgten durch das ISO 17025:2018 (ISO International Organization for Standardization, 2018) akkreditierte Prüflabor Eurofins Umwelt Ost GmbH. Weiterführende Informationen zur Probenahme und Analytik finden sich in der dazugehörigen Veröffentlichung (Adam et al., 2023).

■ Verbrennungsversuche und Emissionsmessungen unter Typprüfungs- und Praxisbedingungen

- Für die Typprüfung als auch das anschließende einjährige Messprogramm unter Praxisbedingungen ist der Aufbau der Kessel- und Abscheidetechnik identisch. Verwendet wurde ein Kessel der Firma A.P. Bioenergietechnik GmbH, Typ ÖkoTherm Compact CIL mit einer Nennwärmeleistung von 80 kW im Volllastbetrieb für den Versuchsbrennstoff Laub-Holz-Pellets (siehe Abbildung 1). Abgasseitig im Anschluss an den Kessel ist ein bauaufsichtlich zugelassener Gewebe-Feinstaubabscheider der Firma Hellmich GmbH, Typ HET-B 500-10 mit automatischer, pneumatischer Abreinigung nachgeschaltet. Dieser ist mit einer Filterfläche von 10 m² für einen Abgasstrom von 465 m³/h ausgelegt. Während des Anlagenbetriebes erfolgte vor dem Abscheider die Dosierung von Weißkalkhydrat (Fa. Rygol) in den Abgaskanal als Precoatmaterial. Nach der Rauchgasreinigung im Gewebe-Feinstaubabscheider werden die Gase über den Schornstein abgegeben.
- Die Typprüfung erfolgte nach DIN EN 303 5:2021 (European Committee for Standardization, 2021) durch die akkreditierte Messstelle Institut für Luft- und Kältetechnik (ILK) Dresden. Weiterhin wurden durch das ILK Dresden gas- und partikelförmige Emissionen in der Abgasstrecke, die dem Gewebefilter nachgeschaltet wurde, gemessen. Die Anforderungen für die Abgasstrecke entsprachen der DIN EN 15259:2008 (Deutsches Institut für Normung, 2008). Die Probenahmestelle der Prüfanlage erlaubte die repräsentative Erfassung der Emissionen, wobei von einer konstanten Verteilung der Schadstoffkomponenten im Messquerschnitt ausgegangen wurde. Es wurden folgende Emissionen entsprechend der DIN Normen untersucht: Stickoxid (NO_x), CO, Gesamt C, Gesamtstaub, Dioxin, Furan und dioxinähnliche polychlorierte Biphenyl-Konzentrationen (PCDD/F + dl-PCB), TEQ Wert, Benzo[a]pyren-Konzentration (B(a)P) und polyzyklische Kohlenwasserstoffe (PAK) sowie die Feuerungswärmeleistung/Nennwärmeleistung/Wirkungsgrad.

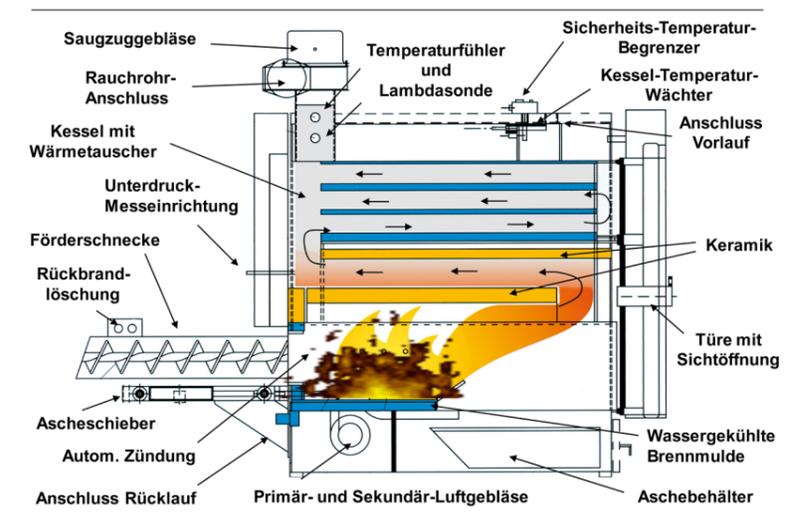


Abb. 1: Schema der eingesetzten Feuerungsanlage ÖkoTherm Compact CIL-80; Erstellt von A.P. Bioenergietechnik GmbH

- Das darauffolgende einjährige Messprogramm beinhaltete vier Messkampagnen in denen die CO-Emissionen sowie die Gesamtstaub-, PCDD/F-, und B(a)P-Konzentrationen im Rauchgas entsprechend der o.g. Typprüfbedingungen ermittelt wurden. Die Messkampagnen erfolgten im Februar 2022 (1. Messkampagne), April 2022 (2. Messkampagne), November 2022 (3. Messkampagne), und im Februar 2023 (4. Messkampagne). Alle Prüfkampagnen gliedern sich jeweils in drei aufeinander folgende Volllastversuche. Über das einjährige Messprogramm wurde eine Betriebsdauer von insgesamt 3791 Volllaststunden an der Praxisanlage erzielt. Im Zeitraum April bis September 2022 befand sich die Praxisanlage planmäßig außer Betrieb. Im Vorfeld jeder Prüfkampagne wurden die Einstellungen der Kesselparametrierung durch die Firma A.P. Bioenergietechnik GmbH überprüft. Während der jeweiligen Prüfkampagne wurde die Kesselanlage dann ohne weiteren Eingriff betrieben. Störungen, Reparaturen und besondere Vorkommnisse während des einjährigen Messprogramms wurden mit Hilfe einer datumsgenauen Dokumentation in einem Anlagenhandbuch festgehalten.

DARSTELLUNG DER ERGEBNISSE

Die Eigenschaften der hergestellten Laub-Holz-Pellets wurden mit den normativen Anforderungen der ISO 17225 6:2021 der Klasse B verglichen. Es wurden alle Grenzwerte eingehalten. Die Angaben für die physikalischen/mechanischen Eigenschaften erfolgten in Ma.-% der Frischmasse. Die Messwerte lagen bei Wassergehalt = 11 %, Aschegehalt = 8,6 %, Mechanische Festigkeit = 97 %, der Feinanteil = 1,0 %, die Schüttdichte = 730 % und der untere Heizwert von 16 MJ/kg FM. Die chemische Zusammensetzung wurde in MA.-% der Trockenmasse angegeben und zeigte sich wie folgt: C = 49 %, H = 5,4 %, N = 0,77 %, S = 0,10 %, Cl = 0,02 %, K = 1700 %, As = 0,86 %, Cd = <0,2 %, Cr = 7,4 %, Cu = 20 %, Pb = 3,4 %,

Hg = <0,05 %, Ni = 2,8 %, Zn = 77 %. Das Ascheschmelzverhalten wurde analysiert und ergab folgende Werte: SST = 980 °C, DT = 1260 °C, HT = 1280 °C, FT = 1290 °C, wobei SST für die shrinkage starting temperature, DT für die deformation temperature, die hemisphere temperature und FT für flow temperature steht. Eine übersichtliche Darstellung in Tabellenform im direkten Vergleich mit den Grenzwerten der ISO 17225 6:2021 der Klassen A und B, sowie relative Standardabweichungen finden sich in Tabelle 2 der dazugehörigen Veröffentlichung (Adam et al., 2023).

Die Ergebnisse der Typprüfung sind in Tabelle 1 dargestellt. Die Messergebnisse des einjährigen Messprogramms sind in Tabelle 2 dargestellt.

Tab. 1: Typprüfung - Mittelwerte der CO-, NOx- und Gesamtstaubemissionen sowie die maximale PCDD/F + dl-PCB-Konzentration

Emissionsparameter	Grenzwert [g/mN ₃]	Volllast 1 [g/mN ₃ i. tr. Abg., 13 Vol.-% O ₂]	Volllast 2 [g/mN ₃ i. tr. Abg., 13 Vol.-% O ₂]	Volllast 3 [g/mN ₃ i. tr. Abg., 13 Vol.-% O ₂]
Kohlenstoffmonoxid (CO)	0,25	0,02	0,02	0,02
Stickoxide (NOx)	0,5	0,2	0,2	0,2
Gesamtstaub	0,02	0,002	0,001	0,001
	[ng WHO-TEQ / mN ₃ i. tr. Abg., 13 Vol.-% O ₂]			
PCDD/F + dl-PCB	0,1	0,002	0,002	0,001

Weiterführende Informationen zu den Ergebnissen finden sich in den dazugehörigen Veröffentlichungen (Adam et al., 2023; Adam et al., 2024). Zusammenfassend konnte demonstriert werden, dass der Versuchsbrennstoff Laub-Holz-Pellets die Anforderungen gemäß ISO 17225 6:2021 (ISO International Organization for Standardization, 2021b) einhält und damit die Vorgaben des § 3 Abs. 5 Nr. 1 der I. BImSchV erfüllt. Die Emissionsgrenzwerte bei der Verbren-

nung des Versuchsbrennstoffes nach Anlage 4 Nummer 2 der I. BImSchV wurden wie unter § 3 Abs. 5 Nr. 2 gefordert zuerst unter Typprüfbedingungen eingehalten. Im Anschluss erfolgte die Demonstration des einjährigen Messprogramms unter Praxisbedingungen (> 3700 Volllaststunden) mit dem Versuchsbrennstoff. Dabei konnte auch in den vier Messkampagnen des einjährigen Messprogramms aufgezeigt werden, dass keine höheren Emissionen an PCDD/F + dl PCB sowie B(a)P auftreten. Die Vorgaben nach § 3 Abs. 5 Nr. 3 der I. BImSchV sind damit

Tab. 2: Zusammenstellung der Messergebnisse der PCDD/F-, und B(a)P-Konzentrationen (6 Stunden-Mittelwerte) aller Messkampagnen (Volllast) des einjährigen Messprogramms

Emissionsparameter	Grenzwert	Messkampagne	Volllast 1	Volllast 2	Volllast 3
PCDD/F + dl-PCB* [ng WHO-TEQ/mN ₃ i. tr. Abg., 13 Vol.-% O ₂]	0,1	1	0,02	0,01	0,005
		2	0,01	0,01	0,01
		3	0,01	0,01	0,01
		4	0,01	0,004	0,004
Benzo[a]pyren [mg/mN ₃ i. tr. Abg., 13 Vol.-% O ₂]	0,01	1	4*10 ⁻⁶	3*10 ⁻⁶	<3*10 ⁻⁶ (BG*)
		2	2*10 ⁻⁵	5*10 ⁻⁶	<3*10 ⁻⁶ (BG*)
		3	1*10 ⁻⁵	1*10 ⁻⁵	<1*10 ⁻⁵ (BG*)
		4	<5*10 ⁻⁶ (BG*)	<1*10 ⁻⁵ (BG*)	<4*10 ⁻⁶ (BG*)

ERGEBNISSE AUF EINEN BLICK

Publikationen:

ISI-Publikation (SCI Science Citation Index etc.):

- Adam, R., Pollex, A., Zeng, T., Kirsten, C., Röver, L., Berger, F., Lenz, V. & Werner, H. (2023). Systematic homogenization of heterogeneous biomass batches – Industrial-scale production of solid biofuels in two case studies. Biomass and Bioenergy, 173, 106808. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2023.106808>
- Adam, R.; Zeng, T.; Röver, L.; Schneider, P.; Werner, H.; Birnbaum, T.; Lenz, V. Long-term emission demonstration using pretreated urban non-woody biomass residues as fuel for small scale boilers. Renew. Energy 2024, 237, 121815. DOI: 10.1016/j.renene.2024.121815

Artikel in Fachzeitschrift (z.B. Euwid, CET):

- Adam, R., Zeng, T., Röver, L., Schneider, P., Werner, H., Birnbaum, T. & Lenz, V. (2024). Erfolgreiche Demonstration des Einsatzes von Laub-Holz-Mischpellets als »sonstiger nachwachsender Rohstoff« gemäß § 3 (1) Nr. 13 der I. BImSchV. MÜLL und ABFALL. <https://doi.org/10.37307/j.1863-9763.2024.01.05>
- Leitfaden (Handlungsempfehlungen/Guidelines):
- Poster [Leitfaden für Brennstoffhersteller:innen](#)
- Poster [Leitfaden für Genehmigungsbehörden](#)
- Formular: Ein Messkonzept für die Zulassung eines Brennstoffes gemäß § 3 Abs. 1 Nr. 13 der I. BImSchV als »sonstiger nachwachsender Rohstoff«

Beiträge in Tagungsbänden:

- 10. Statuskonferenz Bioenergie, 29.-30.11.2021, online, Lisa Röver, Roman Adam, Florian Berger, Philipp Schneider, Thomas Zeng, Hans Werner, Volker Lenz: [Einsatz von Parklaub als »sonstiger nachwachsender Rohstoff«](#) gemäß § 3 (1) Nr. 13 der I. BImSchV
- Statuskonferenz Bioenergie, 20.-22.09.2023, Leipzig, Roman Adam, Lisa Röver, Philipp Schneider, Thomas Zeng, Hans Werner, Volker Lenz: [Einsatz von Parklaub als »sonstiger nachwachsender Rohstoff«](#) gemäß § 3 (1) Nr. 13 der I. BImSchV
- Akteursworkshop BioRestBrennstoff, 28.09.2023, Kassel, Thomas Zeng, Roman Adam, Lisa Röver: [Einsatz von Parklaub als »sonstiger nachwachsender Rohstoff«](#) gemäß § 3 (1) Nr. 13 der I. BImSchV
- 13. DGAW-Wissenschaftskongress Abfall- und Ressourcenwirtschaft, 15.02.2024, Wien, Roman Adam, Thomas Zeng, Lisa Röver, Philipp Schneider, Volker Lenz: [Erfolgreiche Demonstration des einjährigen Messprogramms gemäß § 3 \(5\) der I. BImSchV mit Laub-Holz-Pellets als »sonstiger nachwachsender Rohstoff«](#)

Weitere:

- [Endbericht](#)

Anlagen:

- Demonstrationsanlage
 - Technikumsanlage
 - Nachrüstung Bestandsanlage
- ### Daten & Methoden:
- Methode (z. B. analytisch, prozessbeschreibend)
 - Messreihe oder Messprogramm

Markt:

- Markteinführung neuer Technologien (eine Zulassung)

Weitere Ergebnistypen:

- Best-Practice Lösung
- Einbringen in Richtlinien / Normen (Standardisierung): Nach erfolgter Genehmigung erfolgt Vorstellung beim Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Immissionschutz (LAI)
- [Projekt auf enargus](#)

eingehalten. Weiterhin konnte die Unterschreitung der Grenzwerte der CO- und Gesamtstaub-Emissionen für jede Volllastmessung aller Messkampagnen des einjährigen Messprogramms demonstriert werden und die Einhaltung des § 3 Abs. 5 Nr. 4 mit Verweis auf § 5 Abs. 1 der I. BImSchV konnte belegt werden. Alle Voraussetzungen des § 3 Abs. 5 der I. BImSchV sind damit erfüllt. Das einjährige Messprogramm wurde für den Versuchsbrennstoff Laub-Holz-Pellets erfolgreich demonstriert.

Der Einsatz des Brennstoffes Laub-Holz-Pellets in Kombination mit Verwendung eines geeigneten Kessels mit effizienter Feinstaubabscheidung auf Basis des § 3 Abs. 1 Nr. 13 der I. BImSchV ist damit erstmalig belegt. Auf Basis dieses Beleges erfolgt im Anschluss eine behördliche Zulassung. Diese Kombination aus Brennstoff und beschriebener Verbrennungstechnik ist nach erfolgreicher behördlicher Zulassung ohne zusätzliche Prüfung einer Immissionsschutzbehörde bundesweit im Rahmen der I. BImSchV einsetzbar. Im Projekt wurden neben der Durchführung des Genehmigungsprozesses ebenfalls Rohdaten zur Erzeugung einer Datenbank und Literaturdatensätze mit ca. 1.000 Einträgen gesammelt sowie die Schnittstellen definiert und ausgestaltet. Für die Kategorisierung der Literaturdatensätze ist eine Eingliederung in folgende Systematik durchgeführt wurden:

- Eingruppierung nach ISO 17225-1:2021 (ISO International Organization for Standardization, 2021a) (Ausgangsstoff, Kategorisierung der Biomasse, Behandlungsverfahren)
- Wahl des Vorbehandlungsverfahrens (mechanisch/thermisch/chemisch)
- Details zu den Brennstoffparametern (Bezeichnung der Biomasseart & Herkunft, Brennstoffform)
- Details zur Umwandlungsform (Art der Umwandlungsform und Anlagenmaßstab mit Durchsatzraten)
- Karbonisierungsparameter (sofern durchgeführt: Reaktortyp, und -abmessung, Temperaturführung)
- Brennstoffeigenschaften (Wasser- und Aschgehalt, Anteil an flüchtigen Stoffen, Heiz- und Brennwert, Anteil an Cellulose, Hemizellulose und Lignin sowie die Ascheerweichungskennwerte)
- Verbrennungsrelevante, chemische Zusammensetzung (C, H, N, O, Cl, S, Al, Pb, Cd, Ca, Cr, Fe, K, Cu, Mg, Mn, Na, Ni, Si, Ti, Zn, P, As, Hg)
- Verbrennungsparameter (Art der Verbrennung mit Lastzustand, Nennwärmeleistung und Kesselwirkungsgrad sowie Emissionsparameter O₂, CO, NO_x, SO₂, HCl, Gesamtstaub, gesamter organischer Kohlenstoff, PCDD/F, PAK, etc.)
- Vergasungsparameter (Reaktortyp, und -abmessung, Temperaturführung und Brennstoffmengen-zufuhr)
- Tieferegehende Informationen zur Veröffentlichung (Zeitschrift, Ausgabe, Jahr der Veröffentlichung, Seite und Verlinkung)

Abschluss der Datensammlung bildete ein Datenrepositorium in Form einer Excel-Datei.

Den [Schlussbericht](#) steht zum Download bereit.

HERAUSFORDERUNGEN bzw. HEMMNISSE

- Veröffentlichung der Datensammlung
- Die Datensammlung und Literaturrecherche benutzer:innen-freundlich umzusetzen konnte im Projekt nicht realisiert werden und wurde als internes Projekt am DBFZ weitergeführt. Dies soll voraussichtlich Ende 2024 abgeschlossen und veröffentlicht werden.
- Im Rahmen des Projektes wurde als ein Arbeitspaket die Hemmnisanalyse und Leitfadenerstellung mit Bewertungsmatrix durchgeführt. Hierfür wurde ein Treffen mit dem Projektbeirat ausgewertet, das Marktpotential erörtert, eine SWOT-Analyse durchgeführt und die Hemmnisanalyse, die zuvor als Stellungnahme von der AG Normierung & Standardisierung (Feinstaub) des BMWi-Forschungsnetzwerks BIO-ENERGIE | BMWi-Förderbereich 3.7 »Energetische Nutzung biogener Rest- und Abfallstoffe« im 7. Energieforschungsprogramm (Bundesministerium für Wirtschaft und Energie [BMWi], 2018) erarbeitet wurde, ausgewertet.
- Für den Hemmnisabbau wurde ein praxisnaher Leitfaden für zwei Interessensgruppen ausgearbeitet. Dies sind zum einen die Brennstoffhersteller:innen, die einen Genehmigungsprozess durchführen möchten als auch die Genehmigungsbehörden, an die ein solches Vorhaben bisher selten herangetragen wurde und somit die Vorgehensweise in diesem Projekt als Beispiel dienen soll. Generell wurde der Prozess der Genehmigung anhand der im Projekt gewonnenen Erfahrungen beschrieben.
- Bei beiden Leitfäden wurden zusätzlich nützliche Verlinkungen zu den Normen und Gesetzen, mitgeltenden Dokumenten und Begrifflichkeiten hinterlegt.

- Die Vorlage für das Messkonzept, das in Form eines ausfüllbaren PDF-Formulars erstellt wurde, basierte auf der im Projekt erstellten Messkonzept und wurde auf die letzten Änderungen im März 2022 der LAI Vollzugsempfehlung² angepasst. Die gesamten Anforderungen aus dem LAI Dokument wurden größtenteils tabellarisch gelistet. Diese Dokumente sind [hier](#) und [hier](#) zu finden.

AUSBLICK

Branchenweite Bedeutung kann das Projekt für die Hersteller:innen modifizierter Biobrennstoffe und von Anlagen zur Biobrennstoffmodifikation erlangen. Diesen ist durch die bisher unklare Rechts- und Genehmigungslage der Zugang zu dem potenziell wichtigsten Absatzmarkt, der Verbrennung, versperrt. Dadurch sind selbst wirtschaftlich aussichtsreiche Projekte nicht umsetzbar und es besteht ein bedeutendes Hindernis für die Etablierung eines Marktes. Indem durch dieses Projekt der Leitfaden und ein Formular für die Beantragung des einjährigen Messprogramms über die Einzelfallentscheidung hinaus aufgezeigt wurde, welche derartigen Brennstoffe auf welchem Weg formal korrekt für die Nutzung in Feuerungsanlagen nach der I., 4. und 13. BImSchV etabliert werden können, wird den Unternehmen auf diesem Gebiet überhaupt eine langfristige Existenzmöglichkeit außerhalb kleiner Nischen geschaffen. Weiterhin besteht für Feuerungsanlagenherstellende die Möglichkeit sich ein Alleinstellungsmerkmal zu schaffen, indem man sich den Markt der modifizierten Biobrennstoffe erschließt. Dabei sind zukünftige, eventuell patentfähige, technische Weiterentwicklungen zur Verbesserung der Nutzung nicht ausgeschlossen. Dies war aber weder Gegenstand noch Ziel dieses Vorhabens, das ganz auf die Breitenwirkung abzielte. Betreiber:innen von Feuerungsanlagen erhalten eine Brennstoffalternative, die fossilen Brennstoffen ökologisch überlegen ist und biogenen Brennstoffen ökologisch, ökonomisch und in den Anwendungseigenschaften überlegen sein kann. Von besonderer Bedeutung ist die Umsetzung der Projektergebnisse nicht zuletzt für die Entsorger oder Wirtschaftsbetriebe, bei denen die Ausgangsstoffe anfallen. Sie erhalten die Möglichkeit einer ökonomisch wie ökologisch sinnvollen Nutzung.

LITERATUR

Adam, R., Pollex, A., Zeng, T., Kirsten, C., Röver, L., Berger, F., Lenz, V. & Werner, H. (2023). Systematic homogenization of heterogenous biomass batches – Industrial-scale production of solid biofuels in two case studies. *Biomass and Bioenergy*, 173, 106808. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2023.106808>

Adam, R., Zeng, T., Röver, L., Schneider, P., Werner, H., Birnbaum, T. & Lenz, V. (2024). Erfolgreiche Demonstration des

Einsatzes von Laub-Holz-Mischpellets als »sonstiger nachwachsender Rohstoff« gemäß § 3 (1) Nr. 13 der I. BImSchV. MÜLL und ABFALL. Vorab-Onlinepublikation. <https://doi.org/10.37307/j.1863-9763.2024.01.05> Bundesministerium für Wirtschaft und Energie. (September 2018). 7. Energieforschungsprogramm: Innovationen für die Energiewende. Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi). https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Publikationen/Energie/7-energieforschungsprogramm-der-bundesregierung.pdf?__blob=publicationFile&v=14 Deutsches Institut für Normung (2008). DIN EN 15259: Luftbeschaffenheit - Messung von Emissionen aus stationären Quellen - Anforderungen an Messstrecken und Messplätze und an die Messaufgabe, den Messplan und den Messbericht. Beuth Verlag.

European Committee for Standardization (2021). DIN EN 303-5: Heating boilers - Part 5: Heating boilers for solid fuels, manually and automatically stoked, nominal heat output of up to 500 kW - Terminology, requirements, testing and marking (DIN EN). Beuth Verlag.

Hans Werner. (2009). Method and apparatus for producing fuel from moist biomass / Verfahren und Vorrichtung zur Herstellung von Brennstoff aus feuchter Biomasse (EP 2274406).

ISO International Organization for Standardization (2018). DIN EN ISO 17025: General requirements for the competence of testing and calibration laboratories (DIN EN ISO/IEC). Beuth Verlag.

ISO International Organization for Standardization (2020). DIN EN ISO 21945: Solid biofuels - Simplified sampling method for small scale applications (DIN EN ISO). Beuth Verlag.

ISO International Organization for Standardization (2021a). ISO 17225-1: Solid biofuels — Fuel specifications and classes — Part 1: General requirements (ISO). Beuth Verlag.

ISO International Organization for Standardization (2021b). ISO 17225-6: Solid biofuels — Fuel specifications and classes — Part 6: Graded non-woody pellets (ISO). Beuth Verlag.

² https://www.lai-immissionsschutz.de/documents/220317-auslegungsfragen-vollzugs-i-bimsv_1647526344.pdf

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

OpToKNuS

Entwicklung einer „Toolbox“ basierend auf numerischen Modellen und Praxismessungen zur Auslegung bzw. Optimierung von thermochemischen Anlagen zur Energiebereitstellung aus alternativen Brennstoffen

ZIELE DES PROJEKTES

Im Projekt OpToKNuS sollte zum besseren Verständnis der komplexen chemischen Reaktionen in einem thermochemischen Vergasungsreaktor ein am Institut für Wasserstoff- und Energietechnik der Hochschule Hof (iwe) bestehendes Simulationsmodell weiterentwickelt werden, um Marktakteuren ein Werkzeug in Form einer »Toolbox« zur Entwicklung neuer und Optimierung bestehender Vergasungsanlagen an die Hand geben zu können. Diese »Toolbox« soll lizenzfrei und für die Öffentlichkeit frei verfügbar sein. Grundlage für die Weiterentwicklung des Simulationsmodells sollen kinetische Untersuchungen mit verschiedenen Brennstoffen (Weich- / Hartholz und Stroh) an verschiedenen Versuchsanlagen unterschiedlicher Maßstäbe (Labor: TGA, Technikum: Festbett-Laborvergaser, Markt: 75 kW_{el} Holzvergaser Spanner Re²) sein.

THEMEN SCHWERPUNKTE

- Weiterentwicklung und Validierung eines Simulationsmodells des iwe zur Biomassevergasung, basierend auf experimentellen Daten einer TGA, eines Festbett-Laborvergaser und einer 75 kW_{el}-Holzvergasungsanlage generiert mit unterschiedlichen Brennstoffen, mit anschließender Überführung in eine öffentlich verfügbare »Toolbox«
- Grundlagenuntersuchungen zum Vergasungsverhalten am Partikel in einer TGA mit verschiedenen Brennstoffen
- Untersuchungen zu Festbettprozessen im Technikumsmaßstab am Festbett-Laborvergaser des DBFZ mit verschiedenen Brennstoffen
- Untersuchungen an einer realer Markanlage (75 kW_{el}-Vergaser der Firma Spanner Re²) mit messtechnischer Begleitung des iwe und des DBFZ.

ZUSAMMENFASSUNG

- Weiterentwicklung eines bestehenden Simulationsmodells des iwe zur Biomassevergasung
- Erhebung und Bereitstellung von kinetischen Daten zur Modellvalidierung an einer TGA im Labor (Partikelbetrachtung), Technikumsanlage (Festbett-Laborvergaser DBFZ) und einer Markanlage (Spanner Re² 75 kW_{el}-Vergaser) für verschiedene Brennstoffe
- Modellvalidierung mit den kinetischen Daten der drei Anlagen
- Entwicklung einer für die Öffentlichkeit frei zugänglichen »Toolbox« auf Basis des validierten Simulationsmodells zur Simulation von Vergasungsanlagen Dritter

FKZ-NR.: 03KB163
LAUFZEIT: 01.01.2020–30.06.2023
ZUWENDUNGSSUMME: 490.219,00 €

KOORDINATION

Hochschule Hof, Institut für Wasserstoff- und Energietechnik (iwe)
Alfons-Goppel-Platz 1, 95028 Hof
www.hof-university.de

PARTNER

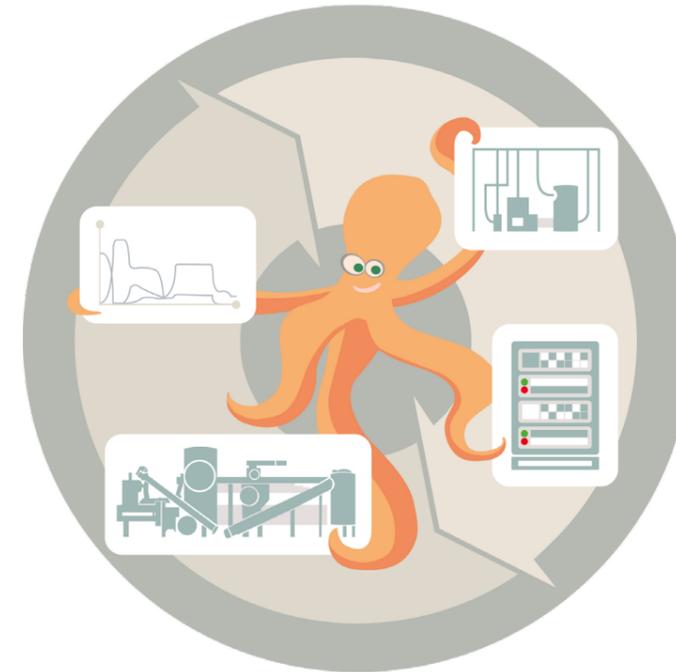
DBFZ - Deutsches Biomasseforschungszentrum gemeinnützige GmbH
Torgauer Str. 116, 04347 Leipzig
www.dbfz.de

Spanner Re+ GmbH
Niederfeldstr. 38, 84088 Neufahrn i. NB
www.re2.energy/de/kwk-anlagen/uebersicht-kwk-anlagen

KONTAKT

Projektleitung:
Prof. Dr.-Ing. Tobias Plessing
Telefon: +49 9281 409 - 4720
E-Mail: tobias.plessing@hof-university.de

Autor:innen des Beitrages:
André Herrmann, Dr.-Ing. Marco Klemm, Maximilian Heinrich,
Prof. Dr.-Ing. Tobias Plessing,
Georg Kuffer



Das am iwe verfügbare und matlabbasierte Simulationsmodell wurde mit Literaturdaten weiterentwickelt und für die verschiedenen gleichzeitig im Vergasungsreaktor ablaufenden Reaktionen detailliert. Das so entstandene Simulationsprogramm wurde anschließend mit den kinetischen Daten der drei Untersuchungsschwerpunkte Einzelpartikel (TGA), definierte Festbettprozesse (Festbett-Laborvergaser) und reale Festbettvergasung (75 kW_{el} Spanner-Anlage) validiert. Die dafür notwendigen kinetischen Daten wurden an den drei Versuchsanlagen Labor-TGA des iwe, Festbett-Laborvergaser am DBFZ und HKA 75 bei der Firma Spanner Re² aufgenommen und aufbereitet. Aus den Daten des Festbett-Laborvergaser und der HKA 75 wurden entsprechende Massenbilanzen erstellt, die dann zur Validierung des Simulationsmodells genutzt wurden. Um das validierte Simulationsmodell der Öffentlichkeit frei und ohne Lizenzprogramme oder ähnliches zur Verfügung zu stellen, wurde dieses in Python übertragen. Verfügbar ist dieses Python-Modell in einer Cloud auf der Homepage der Hochschule Hof unter dem Link: <https://nextcloud.hof-university.de/s/F7RGZsWb3QDQsam>

METHODIK bzw. MASSNAHMEN

- Validierung von Simulationsmodellen mit dieser Tiefe bzw. diesem Detaillierungsgrad bedarf vollständiger, belastbarer und genauer Datensätze von Versuchsanlagen.
- Bisher betrachtete Daten in der Literatur reichen nicht aus. Es braucht mehr Daten zur Koksbeschaffenheit und Bettbeschaffenheit, um ein Festbettverhalten ausreichend gut bzw. genau zu beschreiben.
- Messungen in verschiedenen Maßstäben (Labor: TGA, Technikum: Festbett-Laborvergaser, Marktgröße: 75 kW_{el}-Vergaser) sind notwendig zur Weiterentwicklung eines solchen Simulationsmodells.

KERNBOTSCHAFTEN

SUMMARY

- Further development of an existing simulation model of iwe for biomass gasification
- Collection and provision of kinetic data for model validation at a TGA in the laboratory (particle analysis), a technical center plant (fixed-bed laboratory gasifier DBFZ) and a market plant (Spanner Re² 75 kW_{el} gasifier) for various fuels
- Model validation with the kinetic data of the TGA and the two fix bed systems
- Development of a »toolbox« freely accessible to the public based on the validated simulation model for the simulation of third-party gasification systems

DARSTELLUNG DER ERGEBNISSE

Das zum Projektanfang am iwe bestehende Simulationsmodell ist ein eindimensionales detailreiches, transientes (zeitabhängiges) Modell. Hier gingen die Bereiche der Pyrolyse, Oxidation (Luftzugabe) und Reduktion ohne klare Trennung ineinander über (siehe Abbildung 1). Da es jedoch eine lange unpraktikable Rechenzeit hatte, wurde eine Erweiterung auf ein 2D-radial-symmetrisches Modell nicht verfolgt, sondern nach Möglichkeiten gesucht, das Modell deutlich zu beschleunigen. Dies konnte durch Betrachtung eines insgesamt stationären Prozesses mit der Annahme, dass die Pyrolyse vor der Oxidations- und Reduktionszone komplett abgeschlossen ist, erreicht werden.

Für den Abgleich mit dem Labor-Batch-Reaktor am DBFZ (Festbett-Laborvergaser) wurde das Modell weiterentwickelt. Damit sollten Reaktionslimitierungen und Festbetteffekte detailliert untersucht bzw. dargestellt werden. Darüber hinaus kommen im Modell Limitierungsfunktionen zum Einsatz, welche die Partikelgröße und strukturelle Unterschiede des Pyrolysekokes berücksichtigen. Abbildung 2 veranschaulicht hierzu die verschiedenen Limitierungen. In Abbildung 3 sind diese nochmal anhand eines Arrhenius-Diagramms verdeutlicht.

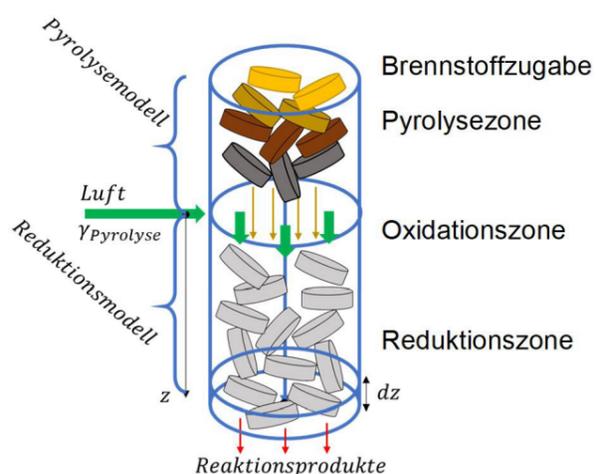


Abb. 1: Teilbereiche der Gleichstrom-Festbettvergasung schematisch dargestellt

- Validation of simulation models with this depth or degree of detail requires complete, resilient and accurate data sets from test facilities.
- Data viewed so far in the literature are insufficient. It requires more data on the char and bed condition in order to describe a fixed-bed behavior sufficiently well or precisely.
- Measurements in different scales (laboratory: TGA, technical center: fixed-bed laboratory gasifier, market size: 75 kW_{el} gasifier) are necessary for the further development of such a simulation model.

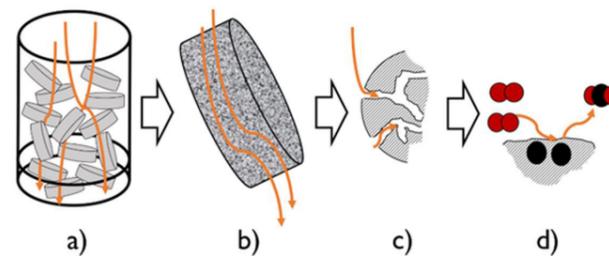


Abb. 2: Darstellung des Gasweges. Bett- und Partikelströmungseffekte a) und b), Porendiffusion c) sowie die intrinsische Reaktion d) an der Koksoberfläche ergeben brennstoffspezifische limitierende Faktoren für die Reaktionen im Vergasungsreaktor. (Heinrich et. Al., 2022)

Der erste Abgleich des weiterentwickelten Simulationsmodells mit den Messungen vom Festbett-Laborvergaser des DBFZ zeigte deutliche Differenzen. Die Koksabbaurate aus den Vergasungsversuchen am DBFZ wurde verglichen und zeigte eine zusätzliche Limitierung um ca. 25% gegenüber den Partikelmessungen in der thermogravimetrischen Analyse (TGA) am iwe, die ebenso zur Validierung des Simulationsmodells mit herangezogen wurde. (Heinrich et. al. 2023)

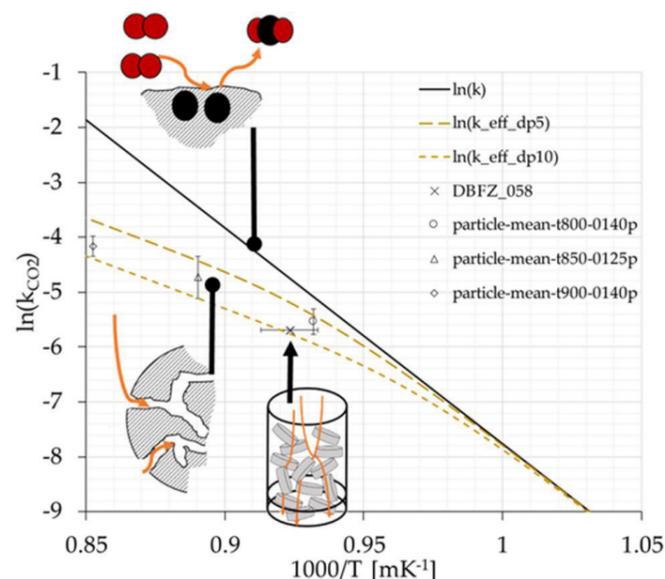


Abb. 3: Auswirkung der Limitierungen und der Einfluss von Partikeldurchmesser auf diese.

KEY MESSAGES

ERGEBNISSE AUF EINEN BLICK

- Weiterentwicklung Simulationsmodell erfolgt mit relativ guter Übereinstimmung mit Versuchen an den beiden untersuchten Festbettanlagen
- Untersuchung von brennstoffspezifischen Eigenschaften an der TGA des iwe zur Weiterentwicklung und Validierung des Simulationsmodells
- Untersuchungsmethode am Festbett-Laborvergaser wurde weiterentwickelt zur Minimierung der Messfehler (< 5%) und zur Vervollständigung des messtechnischen Datensatzes (messtechnische Erfassung aller Massenbilanzgrößen bei Gasphasenreaktionen mit Fehler < 5%)
- Erstellung einer lizenzfreien und freizugänglichen Toolbox basierend auf dem Simulationsmodell mit Veröffentlichung auf der iwe-cloud <https://nextcloud.hof-university.de/s/F7RGZsWb3QDQsam>

■ ISI-Publikation:

- Heinrich M R, I, Herrmann A, Gradel A, Klemm M, Plessing T (2023): Extensive Experimental Characterization with Kinetic Data for the Gasification Simulation of Solid Biofuels. In: Energies, 16(6), 2888. DOI: 10.3390/en16062888

■ Beiträge im folgenden Tagungsbänden:

- Heinrich M, Plessing T, Herrmann A, Gradel A(2021): OpToKNuS – Brennstoffeigenschaften, das Kernelement einer Holzgassimulation. In: Tens, Vera; Thrän, Daniela, 2021, 10. Statuskonferenz Bioenergie: Eine Partnerin für alle Fälle, Leipzig. 138-139. DOI: 10.48480/3z9p-cy88
- Heinrich M, Plessing T, Herrmann A, Klemm M, Kuffer G (2023): Brennstoffspezifische Simulation thermochemischer Biomassevergasung. In: Statuskonferenz Bioenergie 2023. Konferenzreader, Leipzig. 138-139. DOI: 10.48480/x66nev26

■ Vorträge:

- »Optimierung der thermochemischen Vergasung von Biomasse durch brennstoffspezifische Prozesssimulation«; Online-Konferenz: Biomass to Power and Heat 2020
- »Umfangreiche Charakterisierung von biogenen Brennstoffen zur Simulation von Vergasungs- und Verbrennungsprozessen« bei der RET. Con2022 in Nordhausen.
- »Brennstoffspezifische Simulation thermochemischer Biomassevergasung«. Projekt OpToKNuS, 23. Fachkongress Holzenergie 2023

■ Konzepte/Machbarkeitsstudien:

- Simulationsmodell

■ Anlagen:

- Demonstrationsanlage
- Pilot-Anlage
- Technikumsanlage
- Laboranlage

■ Daten & Methoden:

- Modell
- Methode
- Messreihe oder Messprogramm
- Simulationsmodell »Toolbox«

■ Markt:

- Bereitstellung »Toolbox« für die Praxisanwendung

■ Weitere Ergebnistypen:

- Evaluation oder Validierung
- Simulationsmodell »Toolbox«

■ Schlussbericht

Mit der TGA des iwe (Abbildung 4) konnten direkt die chemischen Reaktivitäten der Brennstoffe (Partikelbetrachtung) sehr genau und effizient bestimmt werden.

Ziel dabei war es die Reaktivität der Pyrolysekohle zu analysieren, um damit die Reduktionszone im Reformier der Spanner Re²-Anlage bzw. im Reaktor des DBFZ-Festbett-Laborvergaser brennstoffspezifisch beschreiben zu können. Die intrinsische maximale Massenabnahme des Pyrolysekokes wird im Modell auf Basis des folgenden Ansatzes beschrieben:

Die mit den Messungen zu bestimmenden Werten sind dabei die Ordnung $\nu_{j,Koks}$, der präexponentielle Faktor $A_{0,j,Koks}$ und die Aktivierungsenergie $E_{A,j,Koks}$. Diese Werte unterscheiden sich nach Art der Biomasse,

aus welcher der Koks gebildet wurde und des Reaktivgases j . Für jede Biomasse wurde die Reaktionsrate gegenüber den drei Reaktivgasen (Sauerstoff, Wasserdampf und Kohlendioxid) analysiert.

Nach einer notwendigen Anpassung der Temperaturbereiche bei den TGA-Versuchen konnte die chemische Limitierung dann erreicht werden. Für das Modell bedeutet das noch schnellere Reaktionsraten. Die Diskrepanzen zwischen Modell und Laborvergaser des DBFZ konnten dann jedoch darauf zurückgeführt werden, dass der Knudsen-Diffusionskoeffizient in der Modellierung einen größeren Einfluss hat als bisher angenommen (Abbildung 5). Genauer sind diese Zusammenhänge in einer Projektveröffentlichung (Heinrich et. al., 2023 sowie [Link](#) zur Website) und dem Projektendbericht dargestellt.



Abb. 4: Messgerät im Labor mit Feuchtegenerator für H₂O-Atmosphäre (links) und Messprinzip (rechts)

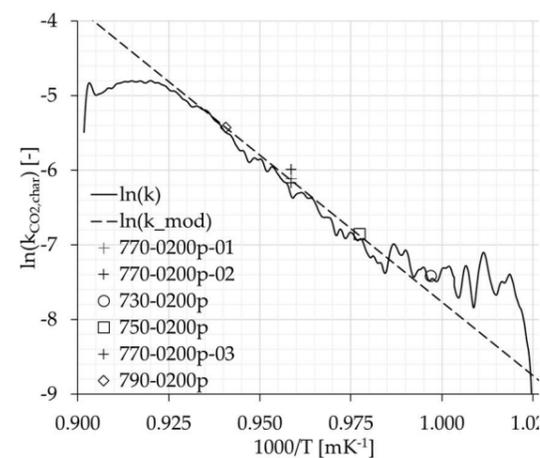
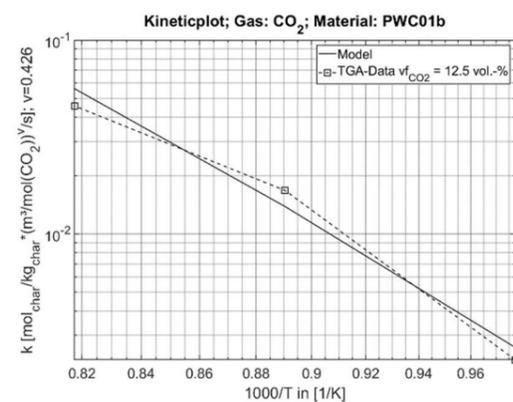
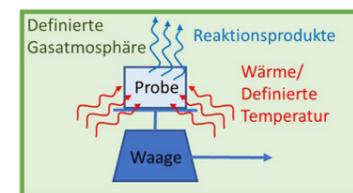


Abb. 5: Vergleich Modellfittings aus den TGA-Auswertungen vor (links) und nach (rechts (Heinrich et. al., 2023)) der Temperaturanpassung

Die Nutzung des entwickelten Simulationsmodells in Form eines rohen Programmcodes ist im Einsatz bei Industriepartnern oder anderen Forschungseinrichtungen nicht praktikabel. Ziel war es, eine übersichtliche und einfach zu nutzende Bedienoberfläche frei verfügbar anbieten zu können. Hiermit soll der Nutzer möglichst einfach Berechnungen starten und anpassen können, um Parameterstudien durchzuführen. Dazu wurde die Python-Bibliothek »tkinter« zur Erstellung eines GUI (Graphical User Interface) verwendet.

Derzeit in der Oberfläche veränderbare Werte sind:

- Höhe der Reduktionszone
- Durchmesser der Reduktionszone
- Dem Prozess zugeführte Luftmenge
- Umgebungstemperatur und Luftfeuchte
- Temperatur mit der die Luft in der Oxidationszone ankommt (Luft-Vorwärmung)
- Massenfluss der trockenen Biomasse
- Schüttdichte (aktuell ungenutztes Artefakt)
- Feuchte der Biomasse
- Äquivalenter/durchschnittlicher Partikeldurchmesser

Die zur Modellweiterentwicklung und -validierung notwendigen Versuche am Festbett-Laborvergaser des DBFZ und der Marktanlage der Firma Spanner Re² sind im Folgenden genauer beschreiben.

Um für die Versuche am Festbett-Laborvergaser des DBFZ repräsentativen Brennstoff einsetzen zu können, wurde für die festgelegten Referenz- und Testbrennstoffe in einer Voruntersuchung die Brennstoffmenge einer vollständigen Reaktorfüllung des Festbettlaborvergaser bestimmt (siehe Tabelle 1), da sich die Stückigkeit und damit auch die Schüttdichte der Brennstoffe unterscheiden.

Tab. 1: Übersicht der Brennstoffmengen einer vollen Reaktorfüllung des Festbett-Laborvergaser DBFZ

Brennstoffart		Menge für volle Reaktorfüllung
Referenzbrennstoff	Präzisionshackgut PI2–PI6 (Fichte)	ca. 480 g
Referenzbrennstoff	Spannerbrennstoff G30 (Weichholz)	ca. 550 g
Testbrennstoff	Strohpellets 6 mm	ca. 1.100 g
Testbrennstoff	Hackschnitzel Buche (Reststoff Furnierherstellung)	ca. 980 g

Basierend darauf wurde die großen Mengen der Referenz- und Testbrennstoffe mittels Riffelteiler gleichmäßig in die jeweiligen Reaktorfüllmengen geteilt. Die so generierten Brennstoffproben wurden dann im Festbett-Laborvergaser bei Pyrolyseversuchen mit Stickstoff (400 L h⁻¹ (i. N.), Aufheizrate Festbett 12 K min⁻¹, Festbetttemperatur 1. Stufe: 850 °C -> 2. Stufe 900 °C) eingesetzt. Ein Ergebnisauszug ist in Tabelle 2 dargestellt.

Trotz der ähnlichen chemischen Zusammensetzung und Partikelgrößen der beiden Fichte-Referenzbrennstoffe ist durchaus ein Unterschied in der Aufteilung des Brennstoffs in seine Reaktionsprodukte bei der Pyrolyse feststellbar. So entstehen aus dem Präzisionshackgut M7 PI2 PI6 im Mittel 14,6% (13,6–15,2%) der Einsatzmasse Pyrolysegas und aus dem Präzisionshackgut M14 PI2 PI6 19,0% (17,9–20,7%). Beim im Reaktor verbleibenden Pyrolysekoks ist die Tendenz genau andersherum. Hier verbleiben vom Präzisionshackgut M7 PI2 PI6 25,9% (25,0–26,9%) der Einsatzmasse als Pyrolysekoks und aus dem Präzisionshackgut M14 PI2 PI6 nur 21,7% (21,0–22,0%). Dies zeigt, dass ähnliche Brennstoffe doch jeweils etwas anders reagieren und eine

einfache Brennstoffanalyse nicht ausreichend ist, um deren Reaktionsverhalten mittels Simulationsmodell voraussagen zu können.

Da sich die Testbrennstoffe (Stroh, Buche) wesentlich mehr unterscheiden als die Referenzbrennstoffe, konnte bei der Pyrolyseuntersuchung der beiden Testbrennstoffe auch sehr unterschiedliche Verhalten festgestellt werden. So gehen im Mittel 46,9% (der Strohstoffmasse in Kondensate (Wasser und Teere) während der Reaktion über. 26,5% der Strohstoffmasse werden zu Pyrolysegas und

Tab. 2: Massenbilanz Pyrolyseuntersuchungen am Festbett-Laborvergaser DBFZ

BR-Versuchsnummer	Massebilanz										
	Input		Output							Differenz	Out-In
	Brennstoff im Reaktor	Koks im Reaktor	Gas (trocken, i.N.)	Kondensate gesamt	Wasser im Gas	Teer/Öl im Gas					
Masse	Schüttdichte	Masse	Schüttdichte	Volümen	Masse	berechnet	berechnet	berechnet			
Referenzbrennstoff (Präzisionshackschnitzel M7 P12 P16; Fichte)											
2021-00078	470,3 g	- kg/m³	120,7 g 25,7%	- kg/m³	578 L	71,5 g 15,2%	278,0 g 59,1%	174,0 g 37%	104,0 g	22%	
2021-00079	490,1 g	- kg/m³	126,6 g 25,8%	- kg/m³	581 L	74,5 g 15,2%	289,1 g 59,0%	181,3 g 37%	107,8 g	22%	
2021-00084	458,8 g	- kg/m³	118,3 g 25,8%	- kg/m³	259 L	65,9 g 14,4%	274,6 g 59,9%	168,0 g 37%	106,6 g	23%	
2021-00108	480,5 g	- kg/m³	124,2 g 25,8%	- kg/m³	435 L	65,2 g 13,6%	291,1 g 60,6%	178,8 g 37%	112,3 g	23%	
2021-00122	485,6 g	- kg/m³	127,5 g 26,3%	- kg/m³	309 L	70,2 g 14,4%	288,0 g 59,3%	177,9 g 37%	110,1 g	23%	
2021-00210	490,2 g	- kg/m³	122,6 g 25,0%	- kg/m³	672 L	71,3 g 14,5%	296,3 g 60,4%	180,8 g 37%	115,4 g	24%	
2021-00213	476,9 g	- kg/m³	124,7 g 26,1%	- kg/m³	353 L	67,4 g 14,1%	284,8 g 59,7%	176,2 g 37%	108,5 g	23%	
2022-00030	463,9 g	- kg/m³	124,6 g 26,9%	- kg/m³	667 L	69,4 g 15,0%	269,9 g 58,2%	168,2 g 36%	101,7 g	22%	
Referenzbrennstoff (Präzisionshackschnitzel M14 P12 P16; Fichte)											
2022-00027	481,3 g	- kg/m³	105,4 g 21,9%	- kg/m³	1510 L	93,6 g 19,4%	282,3 g 58,6%	169,0 g 35%	113,23 g	24%	
2022-00028	463,5 g	- kg/m³	101,2 g 21,8%	- kg/m³	1511 L	89,8 g 19,4%	272,6 g 58,8%	162,9 g 35%	109,64 g	24%	
2022-00040	461,1 g	- kg/m³	101,3 g 22,0%	- kg/m³	1530 L	93,0 g 20,2%	266,8 g 57,9%	160,4 g 35%	106,46 g	23%	
2022-00041	475,2 g	- kg/m³	104,6 g 22,0%	- kg/m³	1527 L	98,3 g 20,7%	272,3 g 57,3%	163,3 g 34%	109,09 g	23%	
2022-00057	481,2 g	- kg/m³	101,6 g 21,1%	- kg/m³	1990 L	88,0 g 18,3%	291,6 g 60,6%	174,4 g 36%	117,20 g	24%	
2022-00065	470,1 g	- kg/m³	101,9 g 21,7%	- kg/m³	1866 L	84,0 g 17,9%	284,2 g 60,5%	170,9 g 36%	113,31 g	24%	
2022-00134	466,7 g	- kg/m³	98,1 g 21,0%	- kg/m³	1764 L	84,1 g 18,0%	284,5 g 61,0%	169,2 g 36%	115,28 g	25%	
2022-00138	463,3 g	- kg/m³	101,4 g 21,9%	- kg/m³	1779 L	85,0 g 18,3%	276,9 g 59,8%	166,4 g 36%	110,54 g	24%	
Referenzbrennstoff (Spanner Re² Brennstoff)											
2023-00016	514,92 g	- kg/m³	114,2 g 22,2%	- kg/m³	1797 L	117,3 g 22,8%	283,5 g 55%	167,6 g 33%	115,8 g	22%	
2023-00065	501,84 g	128,8 kg/m³	125,0 g 24,9%	60,1 kg/m³	1821 L	136,8 g 27,3%	240,0 g 48%	148,5 g 30%	91,5 g	18%	
2023-00069	559,34 g	137,4 kg/m³	123,7 g 22,1%	59,5 kg/m³	1713 L	- g -	414,6 g 74%	252,4 g 45%	162,2 g	29%	
2023-00072	559,11 g	135,9 kg/m³	126,2 g 22,6%	58,3 kg/m³	1774 L	130,3 g 23,3%	302,6 g 54,1%	177,9 g 32%	124,7 g	22%	
2023-00077	545,62 g	140,0 kg/m³	127,6 g 23,4%	n.b. kg/m³	1770 L	121,5 g 22,3%	296,5 g 54,3%	177,8 g 33%	118,7 g	22%	
Testbrennstoff (Strohpellets)											
2023-00070	1101,7 g	578,3 kg/m³	289,4 g 26,3%	303,8 kg/m³	2923 L	294,2 g 26,7%	518,1 g 47,0%	320,2 g 29%	197,9 g	18%	
2023-00071	1114,51 g	612,9 kg/m³	299,6 g 26,9%	314,5 kg/m³	2218 L	293,8 g 26,4%	521,1 g 46,8%	325,4 g 29%	195,7 g	18%	
Testbrennstoff (Buchenhackschnitzel)											
2023-00074	988,35 g	242,9 kg/m³	235,2 g 23,8%	129,3 kg/m³	2395 L	886,1 g 89,7%	- g -	- g -	- g	-	
2023-00075	963,26 g	236,7 kg/m³	228,1 g 23,7%	138,6 kg/m³	2308 L	470,3 g 48,8%	264,9 g 27%	125,2 g 13%	139,65 g	14%	

26,6% verbleiben als Pyrolysekoks im Reaktor. Der Buchentestbrennstoff hingegen reagiert bei der Pyrolyse zu 27,5% Kondensate (Teere und Wasser), 48,4% Pyrolysegas und 23,7% Pyrolysekoks im Reaktor. Der hohe Anteil an Flüchtigen des Strohpellets kommt im Vergleich zum Buchentestbrennstoff nicht wie erwartet zum Tragen bei der Pyrolysegasbildung, stattdessen verschiebt sich das Produktverhältnis für Stroh zu den kondensierbaren Bestandteilen.

Der so erzeugte Pyrolysekoks wurde dann zur Untersuchung der CO₂-Vergasung an Pyrolysekoks in weiteren Versuchen am Festbett-Laborvergaser eingesetzt. Dabei wurde die Versuchsbedingungen 800 °C Festbetttemperatur, 905 L h⁻¹ N₂ mit 95 L h⁻¹ CO₂, 90 min Reaktionszeit eingestellt. Eine Auswahl der Ergebnisse ist für die Referenz- und Testbrennstoffe in Tabelle 3 dargestellt.

Wie bei der Pyrolyse unterscheiden sich die beiden Testbrennstoffe Strohpellets und Buchenhackschnitzel auch bei der Vergasung mit Kohlendioxid. Beim Strohpellets verbleiben nach der Reaktion mit Kohlendioxid im Mittel 76,8% der ursprünglichen Pyrolysekoks im Reaktor und beim Buchenbrennstoff nach identischer Reaktionszeit 65,9%. Im Verhältnis zur eingesetzten Pyrolysekoksmasse entsteht auch bei der Reaktion mit CO₂ mehr Gas beim Buche- als beim Strohpellets mit 685 g Produktgas aus 236,7 g Pyrolysekoks bei der Buche und 719,8 g Produktgas aus 316,1 g Pyrolysekoks aus Strohpellets.

Tab. 3: Massenbilanz Pyrolyseuntersuchungen am Festbett-Laborvergaser DBFZ

BR-Versuchsnummer	Koks aus Versuch	Massebilanz								
		Input		Output				Differenz: Out-In		
		Koks im Reaktor	Vergasungsmittel (CO ₂)	Koks im Reaktor	Pyrolysegas (tr., i.N.) bis 800°C	Gas CO ₂ -Vergasung (tr., i.N.) 850°C	Kondensat			
Masse	Masse	Masse	Masse	Masse	Masse	Masse	Masse	Masse	Masse	
Referenzbrennstoff (Präzisionshackgut M7 P12 P16; Fichte)										
2021-00215	2021-00213	123,1 g	445,5 g	60,2 g 49%	28,6 g	512,8 g	0,0 g	32,9 g	6%	
2021-00217	2021-00210	125,6 g	445,5 g	67,1 g 53%	23,1 g	512,8 g	0,0 g	31,9 g	6%	
Referenzbrennstoff (Präzisionshackgut M14 P12 P16; Fichte)										
2022-00047	2022-00041	102,6 g	431,2 g	66,4 g 65%	0,0 g	463,2 g	0,0 g	-4,3 g	-0,8%	
2022-00048	2022-00040	99,4 g	419,1 g	67,2 g 68%	0,0 g	446,1 g	0,0 g	-5,2 g	-1,0%	
2022-00058	2022-00057	101,1 g	428,8 g	72,0 g 71,2%	0,0 g	457,9 g	0,0 g	0,0 g	0,0%	
2022-00126	2022-00065	99,0 g	446,1 g	70,9 g 71,6%	0,0 g	471,9 g	0,0 g	-2,3 g	-0,4%	
Referenzbrennstoff (Spanner Re² Brennstoff, Holzhackschnitzel)										
2023-00079	2023-00072	129,3 g	646,3 g	94,8 g 73,3%	0,0 g	679,8 g	0,0 g	-1,0 g	-0,13%	
2023-00102	2023-00069	128,2 g	715,8 g	93,4 g 72,8%	0,0 g	758,0 g	0,0 g	7,4 g	0,87%	
Testbrennstoff (Strohpellets)										
2023-00103	2023-00070	305,0 g	622,2 g	235,1 g 77,1%	0,0 g	690,2 g	0,0 g	-1,9 g	-0,2%	
2023-00105	2023-00071	316,1 g	641,5 g	242,1 g 76,6%	0,0 g	719,8 g	0,0 g	4,3 g	0,4%	
Testbrennstoff (Buchenhackschnitzel)										
2023-00046	2023-00043	206,8 g	599,5 g	133,42 g 64,5%	0,0 g	667,5 g	0,0 g	-5,4 g	-0,7%	
2023-00055	2023-00050	236,7 g	616,2 g	159,41 g 67,3%	0,0 g	685,2 g	0,0 g	-8,3 g	-1,0%	

Im Projektverlauf konnte die messtechnische Genauigkeit der Reaktormassenbilanzen am Festbettvergaser, insbesondere bei der CO₂-Vergasung von Pyrolysekoks, gesteigert werden. Ergaben sich zum Anfang der Versuchsreihen noch Bilanzfehler von 32 g bei einer Inputmassen (Pyrolysekoks und Reaktionsgas) von 568 – 570 g was bezogen auf die Inputmasse 6% darstellt, so konnten diese Bilanzfehler sicher in den Bereich 5 g oder weniger geführt werden, was bezogen auf die Inputmasse weniger als 1% Abweichung darstellen. Neben der reinen Massenbilanz des Reaktors wurde in der Versuchsauswertung der Vergasung mit Kohlendioxid auch die chemische Reaktion von einem Mol Kohlenstoff (C) mit einem Mol Kohlendioxid (CO₂) zu 2 Mol Kohlenmonoxid (CO) betrachtet. Für den Versuch 2022-00058 stellen sich die Messwerte wie folgt dar:

29,12 g C (Kohlenstoff bzw. Pyrolysekoks) + 93,32 g CO₂ (CO₂-Zugabe mittels MFC, abzüglich der CO₂-Menge im Produktgas) reagieren zu 122,33 g CO (CO-Menge aus dem Produktgas)

Wasseranteil & Gasgeschwindigkeit Produktgaszusammensetzung

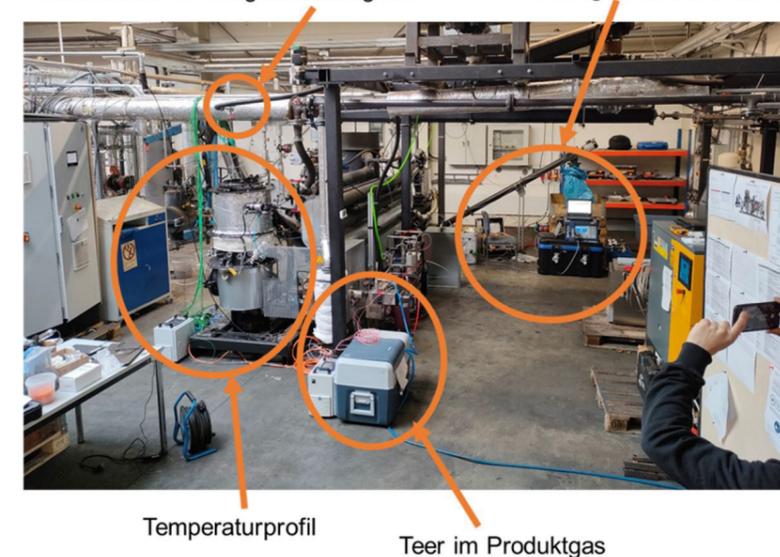
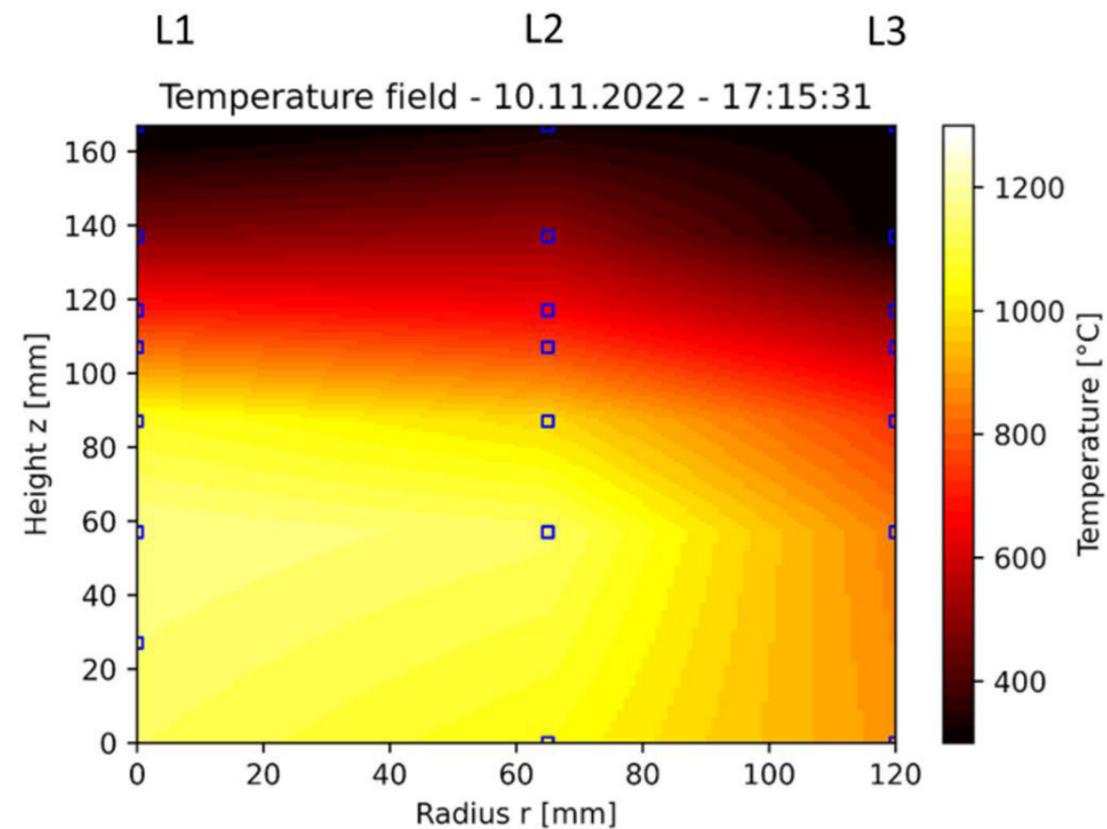


Abb. 6: Messtechnikaufbau bei einer Messkampagne an der HKA 75 Marktanlage der Spanner Re²



HERAUSFORDERUNGEN bzw. HEMMNISSE

- Für eine gute Modellgenauigkeit (durch die Modelltiefe) braucht es eine Vielzahl von belastbaren, genauen und vollständigen Datensätzen aus dem Technikum und der Marktanlage. Nur so können die Effekte der Realität allgemeingültig abgebildet werden.
- Die Genauigkeit der Messergebnisse spielt bei der Validierung eines Simulationsmodell eine sehr wichtige Rolle. Dabei sollten möglichst alle Daten per Messung ohne Annahmen und Differenzbestimmung ermittelt werden. Der Messfehler und die damit verbundene Sensitivität der Messergebnisse muss mit in die Validierung einfließen.

LITERATUR

Heinrich Et. Al, (2022): M. R. Heinrich, A. Gradel, A. Herrmann, M. Klemm, G. Kuffer Und T. Plessing, »Umfangreiche Charakterisierung von Biogenen Brennstoffen. Zur Simulation von Vergasungs- und Verbrennungsprozessen«. In: Tagungsband 5. Regenerative Energietechnik Konferenz in Nordhausen 10. - 11. Februar 2022, Nordhausen, 2022.

Heinrich et. al. (2023): M. R. Heinrich, A. Herrmann, A. Gradel, M. Klemm Und T. Plessing, »Extensive Experimental Characterization With Kinetic Data for the Gasification Simulation of Solid Biofuels«, *Energies*, Bd. 16, Nr. 6, P. 2888, 2023.

DARSTELLUNG DER ERGEBNISSE

Mit dem Projekt OpToKNuS konnte das bestehende Simulationsmodell signifikant detailliert und weiterentwickelt werden, was zu einer guten Übereinstimmung für die beiden untersuchten Festbettvergasungsanlagen geführt hat.

Zum Projektende hat das validierte Simulationsmodell für die beiden untersuchten Festbettvergaser und alle untersuchten Brennstoffe jedoch noch nicht die gewünschte und benötigte Genauigkeit, um Optimierungen an anderen bestehenden Vergasungsanlagen vornehmen oder bei der Entwicklung neuer Vergasungsanlagen unterstützen zu können. Aufbauend auf die OpToKNuS-Projektergebnisse müssen mit Blick auf andere Reaktorgeometrien und andere Brennstoffe im Vergleich zu denen aus dem Projekt noch weitere kinetische Untersuchungen durchgeführt werden, um das Simulationsmodell flexibel nutzbar zu machen und damit eine echte Unterstützung der Marktakteure und Forschungseinrichtungen im Bereich Biomassevergasung bereitzustellen.

Diese Reaktionsgleichung ist für die anderen Versuche (CO_2 -Vergasung des Pyrolysekokes) ebenso mit Messfehlern bzw. Abweichungen im mg-Bereich bis 1 g darstellbar, so dass eine genaue Reaktionsbeschreibung mit den Versuchen am Festbett-Laborvergaser möglich ist.

Die Versuche an der Marktanlage der Spanner Re² wurden mit messtechnischer Unterstützung des iwe und des DBFZ durchgeführt. Weiterhin hat die Firma Spanner Re² die Marktanlage für die Validierungsversuche messtechnisch erweitert, um das Reaktortemperaturprofil und die Gaszusammensetzung (Permanentgase, Wasserdampf, leichte Kohlenwasserstoffe und Teere) und Menge an verschiedenen Stellen der Anlage messen zu können. Abbildung 6 zeigt den Versuchsaufbau bei einer der Messkampagnen an der 75 kW_{el}-Marktanlage. Aus den Temperaturmessungen im Vergasungsreaktor (sog. Reformer) konnte das in Abbildung 7 dargestellte

Abb. 7: Darstellung Temperaturquerschnitts im Reformer während der ersten Messkampagne. Werte sind über einen Zeitraum mit kontinuierlichem Betrieb (ca. 4 h gemittelt. Die Fläche zwischen den Messpunkten ist linear interpoliert.

gemittelte Temperaturfeld generiert werden. Hier als gemittelte Darstellung abgebildet, konnten das Feld auch als Video dynamisch betrachtet werden. Die Temperaturen wurden in Abständen von 30 s aufgezeichnet. Wegen der z. T. starken Temperaturschwankungen innerhalb der Zeitschritte wurde für die darauffolgende Messkampagne ein Intervall von 1 s ausgewählt.

Neben dem Temperaturprofil konnten die Produktgaszusammensetzung und -menge bestimmt werden, um diese in die Modellvalidierung einfließen lassen zu können. Im Projekt wurden zwei Messkampagnen durchgeführt.

Christian Hubert, Bettina Steiniger, Christian Schaum, Jörg Kretzschmar,
Manuel Winkler, Eric Mauky, Konstantinos Athanasiadis, Jens Henker,
Stefan Einsiedel, Johannes Wallacher, Markus Heinrich

FLXsynErgy

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

ZUSAMMEN FASSUNG

FKZ-NR.: 03EI5421

LAUFZEIT: 01.10.2020–31.03.2024

ZUWENDUNGSSUMME: 677.361,31€

Im Projekt FLXsynErgy wurde neben der bedarfsgerechten Erzeugung und Verstromung von Faulgas auf Kläranlagen auch eine effiziente Nutzung der anfallenden Wärmeenergie untersucht. Die betrachteten Konzepte fokussierten dabei auf eine bedarfsgerechte Substratzugabe und Faulgaserzeugung, sowie die Nutzung der Faulung als Wärmespeicher. Darüber hinaus wurde untersucht, wie die Eigenstromnutzung auf Kläranlagen erhöht werden kann, welche Auswirkungen eine Partizipation am Regelenergiemarkt auf den Gasspeicher und die erforderlichen Gasmengen hat und welches Potential für Kläranlagen bezüglich einer Teilnahme am Day-Ahead-Markt besteht. Umrahmt wurde das Projekt von einer sozio-ökologischen Untersuchung, in der mögliche Hemmnisse einer technologischen Umsetzung in der Praxis bewertet wurden. Neben den wissenschaftlichen Fragestellungen, wurden im Rahmen von Workshops Unterschiede und Gemeinsamkeiten von Biogas- und Faulungsanlagen erarbeitet. Das Projekt gliederte sich in 6 Arbeitspakete (AP). Im ersten AP wurden Definitionen und Begrifflichkeiten harmonisiert. In AP 2 erfolgte ein Wissenstransfer zwischen Faulungs- und Biogasanlagen. In AP 3 erfolgten die labortechnischen Untersuchungen zur bedarfsgerechten Faulgaserzeugung. Es wurden verschiedene Beschickungsstrategien unter Anwendung verschiedener Co-Substrate untersucht. Im Rahmen des AP 3 konnte die Möglichkeit zur bedarfsgerechten Faulung anhand von Betriebsparametern eingegrenzt sowie die Auswirkungen der Beschickung auf die Entwässerungseigenschaften des Faulschlammes bewertet werden. Zudem wurde die Lagerungsfähigkeit verschiedener Substrate untersucht und Hinwei-

se zur Lagerung gegeben. Versuche zum Betrieb der Faulung bei unterschiedlichen Temperaturen erfolgten in AP 4. Ergänzt wurden die Untersuchungen um die Auswertung großtechnischer Anlagen. Es konnten Hinweise zu tolerierbaren Temperaturänderungsraten gegeben sowie der Mehrwert einer saisonalen Anpassung der Faulraumtemperatur dargestellt werden. Die Untersuchungen zur Erhöhung der Eigenstromnutzung, den Auswirkungen einer Teilnahme am Regelenergiemarkt sowie Untersuchungen zum Potential einer Day-Ahead-Vermarktung erfolgte in AP 5. Es zeigte sich, dass eine Teilnahme am Regelenergiemarkt (Einspeisung oder Abnahme) auf Grund der verfügbaren Kapazitäten der Gasverwertung begrenzt aber der Einfluss auf den Anlagenbetrieb von untergeordneter Rolle ist. Für den gegebenen Untersuchungsrahmen war die Deckung des Eigenstrombedarfes höherwertiger als die Teilnahme am Day-Ahead-Markt. Ab Marktpreisen > 400 €/MWh gewann in den untersuchten Szenarien der Day-Ahead-Markt zunehmend an Bedeutung. Zudem konnte aufgezeigt werden, wie PV und Windkraftanlagen durch eine Optimierung des BHKW-Betriebes sinnvoll integriert und den Eigenstromversorgungsgrad von Kläranlagen gezielt erhöhen können.

ZIELE

Die übergeordnete Zielstellung von FLXsynErgy war die Entwicklung von praxisorientierten Empfehlungen für eine flexible vollenergetische Nutzung biogener Rest- und Abfallstoffe auf Kläranlagen. Im Einzelnen wurde der Fokus auf folgende Aspekte gelegt:

- Wissenstransfer zwischen Faulung (Kläranlage) und Biogasanlage
- Bedarfsgerechte Faulgaserzeugung
- Flexibilisierung im Kontext der Energiewirtschaft einschließlich der rechtlichen Rahmenbedingungen
- Nutzung der Faulung als Wärmespeicher
- Akzeptanz einer energetischen Nutzung von Rest- und Abfallstoffen

KONTAKT

Projektleitung: Univ.-Prof.
Dr.-Ing. habil. Christian Schaum
Telefon: +49 89 6004-2061
Email: christian.schaum@unibw.de

KOORDINATION

Universität der Bundeswehr
München Professur für
Siedlungswasserwirtschaft
und Abfalltechnik
Werner-Heisenberg-Weg 39,
85579 Neubiberg



SUMMARY

The project flexible and full energetic use of biogenic residues and waste materials: Digestion and biogas plants as energy consumers, storage and producers (FLXsynErgy) aimed to provide information for a holistic energetic use of biogenic residues. In addition to the electrical conversion of the produced biogas, the efficient use of the generated thermal energy was investigated. The core concepts being explored include demand-driven gas production and the use of the digester as a heat storage. Furthermore, the project investigated how the use of self-generated electricity at wastewater treatment plants can be increased. It also examined the effects of participation in the balancing energy market on gas storage and required volumes. Additionally, the potential for wastewater treatment plants to participate in the day-ahead market was explored. The project was accompanied by a socio-ecological study in which possible obstacles to technological implementation in practice were assessed. In addition to the scientific questions, workshops were held to explore the differences and similarities between biogas plants and digestion plants. The project was divided into 6 work packages (WP). In the first WP, definitions and terminology were harmonized. In WP 2, knowledge was transferred between digester gas plants and biogas plants. In WP 3, laboratory tests were conducted on demand-oriented digester gas production.

Various feeding strategies using different co-substrates were investigated. As part of WP 3, the possibility of demand-driven digestion was evaluated on the basis of operating parameters

and the effects of feeding on the dewatering properties of the digested sludge were evaluated. In addition, the storage capability of various substrates was investigated and information on storage was provided. Tests on the operation of the digestion process at different temperatures were carried out in WP 4, supplemented by the evaluation of large-scale plants. Information was provided on tolerable temperature change rates and the added value of seasonal adjustment of the digester temperature was demonstrated. The investigations into increasing the use of self-generated electricity, the effects of participation in the balancing energy market and investigations into the potential of day-ahead marketing were carried out in WP 5. It was shown that participation in the balancing energy market is limited due to the available capacities of gas utilization, but that the influence on plant operation is of secondary importance. For the given scope of the study, covering electricity demand was more important than participating in the day-ahead market. For market prices > 400 €/MWh, the day-ahead market became increasingly important in the scenarios examined. The project also demonstrated how PV and wind power systems can be meaningfully integrated by optimizing CHP operation and specifically increasing the degree of self-sufficiency of wastewater treatment plants.

PARTNER

Deutsches Biomasseforschungszentrum gGmbH, Abteilung Biochemische Konversion
Torgauer Straße 116, 04347 Leipzig
Prof. Dr. Jörg Kretzschmar
joerg.kretzschmar@dbfz.de

Hochschule für Philosophie,
Zentrum für Globale Fragen
Prof. Dr. Dr. Johannes Wallacher
Dr. Stefan Einsiedel

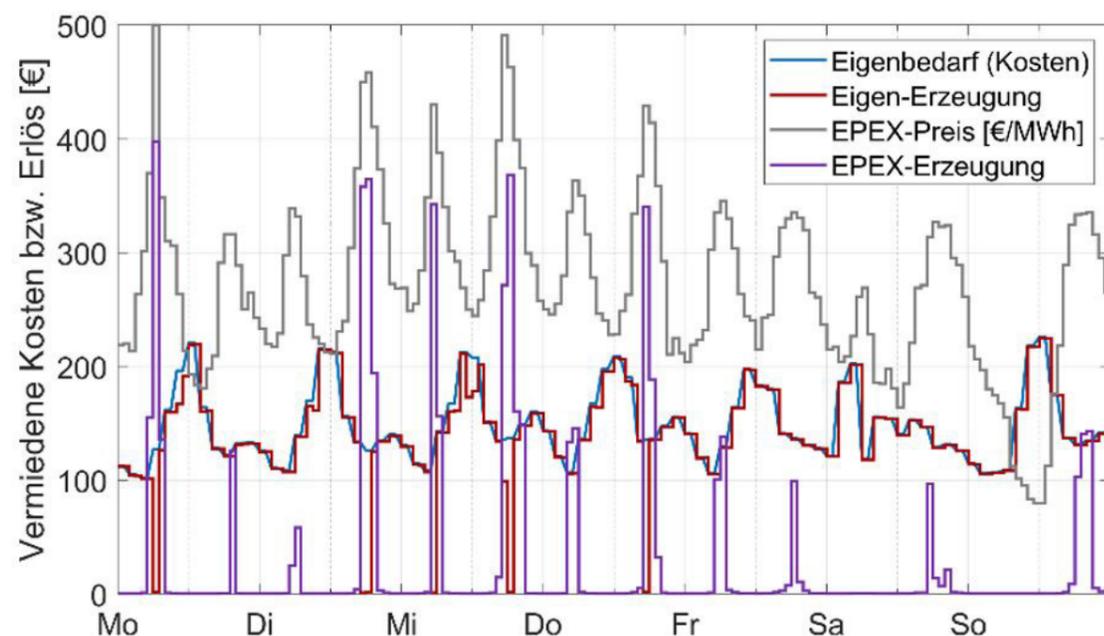
Dr.-Ing. Steinle Ingenieurgesellschaft für Abwassertechnik mbH
Dr.-Ing. Kostas Athanasiadis

Wolter Hoppenberg
Rechtsanwälte
Partnerschaft mbB
Markus Heinrich

METHODIK bzw. MASSNAHMEN

- Versuche im Labormaßstab (15 – 25L) durchgeführt,
- Daten großtechnischer Anlagen ausgewertet,
- bestehende Modelle aus dem Bereich der Biogasanlagen auf die Rahmenbedingungen von Faulungsanlagen angepasst und entsprechende Simulationen durchgeführt;
- Workshops unter Einbeziehung von Experten abgehalten.

Abb. 1: Optimierungsergebnis mit dynamischem Eigenbedarf während der EPEX-Hochpreiswoche. Nettogewinn: 4.167,44 € (Hubert et. al. 2024)



DARSTELLUNG DER ERGEBNISSE

Wissenstransfer zwischen Faulungen (Kläranlage) und Biogasanlage

Es wurden Biogasanlagen und Faulungen von Kläranlagen miteinander verglichen. Dabei wurde auf die Direktvermarktung des im Rahmen der Faulgasverstromung anfallenden Stromes fokussiert. Ist die Direktvermarktung auf Biogasanlagen ein bereits bekanntes Werkzeug zur Erlösoptimierung finden sich auf Seiten von Kläranlagen keine Beispiele für eine direkte Vermarktung. So wurde unter anderem untersucht, welche Erkenntnisse aus dem Bereich der Biogasanlagen auf Kläranlagen übertragbar sind. Zudem bestand die Intention im Rahmen einer Aktualisierung der Messmethodensammlung Biogas (Liebtrau, Pfeiffer, und Thrän 2015) die jeweils praktizierten Analyseverfahren für Biogas- und Faulungsanlagen zusammenzuführen. Die geplante Veröffentlichung ist im April 2025.

In FLXsynErgy wurden vereinfachte Modelle, welche ursprünglich für Biogasanlagen entwickelt wurden, für die Anwendung auf Kläranlagen angepasst. In Abhängigkeit von Preissignalen am Day-Ahead-Markt wurde die erforderliche Faulgasproduktion und Substratzugabe ermittelt und optimiert.

Zitat der Projektkoordinationen:

Christian Schaum und Christian Hubert

Die Ergebnisse von FLXsynErgy geben einen Impuls für die Flexibilisierung der Faulung als Beitrag für die Energiewende.

Bedarfsgerechte Faulgaserzeugung

Konventionell erfolgt die Substratzugabe in die Faulung meist kontinuierlich. Für Biogasanlagen konnte gezeigt werden, dass die gezielte Zugabe von Co-Substraten zu einem Lastmanagement und zu einer Optimierung der Day-Ahead-Vermarktung beitragen kann (Mauky u. a. 2017). Dies impliziert allerdings auch eine stärkere Schwankung der Raumbelastung über kurze Zeithorizonte. In Laborversuchen wurde untersucht, in welchem Umfang eine bedarfsgerechte Substratzugabe auch für Faulungsanlagen möglich ist und wie sich diese auf die Prozesse sowie den Entwässerungseigenschaften des Faulschlammes auswirkt. Grundsätzlich ist eine bedarfsgerechte Substratzugabe und Faulgaserzeugung über einen größeren Schwankungsbereich möglich, ohne dass es zu einem signifikanten Verlust der Methanausbeute kommt. Allerdings konnte festgestellt werden, dass die Beschickungsstrategie einen Einfluss auf die Entwässerungseigenschaften nehmen. Der erzielte Trockenrückstand im Faulschlamm nach Filterpressversuchen unterschied sich um bis zu 2%-Punkte. Dabei waren die Ergebnisse in der Tendenz schlechter, je diskontinuierlicher die Substratzugabe erfolgte. Zudem

führen hohe Stoßbeschickungen zu einer kurzzeitigen Erhöhung der organischen Säure. Die Menge der akkumulierten Säuren ist neben der organischen Fracht auch vom vorliegenden Substrat abhängig. Sofern der Verlauf der Konzentration der organischen Säuren beachtet wird ergeben sich hinsichtlich der Prozessstabilität keine Unterschiede zwischen den Varianten.

Im Hinblick auf eine bedarfsgerechte Faulgaserzeugung fällt dem Co-Substrat und dessen Lagerfähigkeit eine besondere Rolle zu. In aller Regel versäuern Substrate während der Lagerung was nachfolgend zu einem verlangsamten Abbau des Substrates und einer Umsetzung zu CO₂ führt. Substrate mit hoher Alkalinität können während einer Lagerung, auch unter Freisetzung von Methan abgebaut werden, was die Lagerzeit deutlich reduziert. Für ein alkalisches Co-Substrat wird eine Lagerzeit von <3d empfohlen.

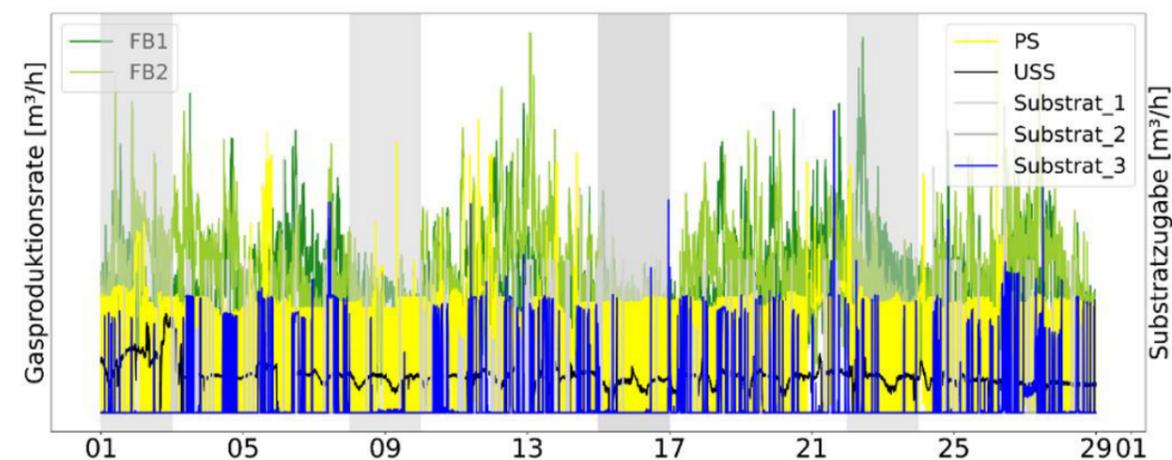


Abb. 2: Gasproduktionsraten bei schwankender Raumbelastung (Hubert und Schaum 2023)

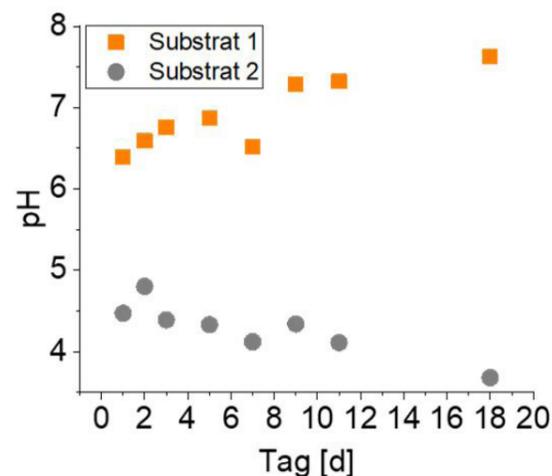


Abb. 3: Verlauf des pH-Wertes während der Lagerung zweier untersuchter Co-Substrate (Hubert et. al. 2024)

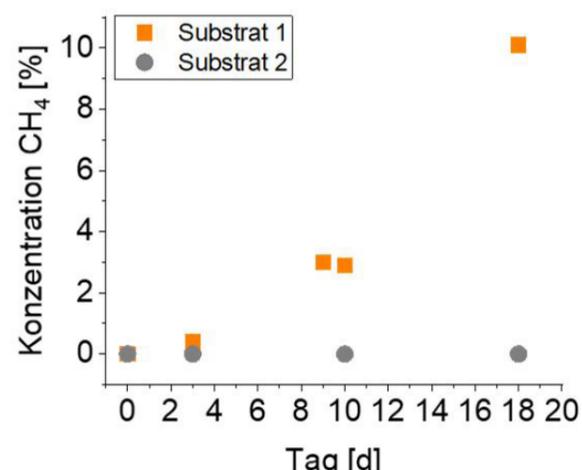


Abb. 1: Konzentration von CH_4 während der Lagerung zweier Co-Substrate (Hubert et. al. 2024)

Flexibilisierung im Kontext der Energiewirtschaft

Die Kläranlage steht in Interaktion mit dem Stromnetz und hat das Potential netzdienlich zu agieren; d. h. am Day-Ahead Markt oder dem Regelenergiemarkt teilzunehmen. Im Gegensatz zu Biogasanlagen, können Kläranlagen Leistungskapazitäten gut am negativen Sekundärregelmarkt platzieren. Kläranlagen weisen eine hohe Grundlast auf, die in aller Regel über ein BHKW abgedeckt wird. Diese Grundlast kann vermarktet werden. Die Zeiten der Abrufe sind in aller Regel sehr kurz und wirken sich nicht auf das Gasdargebot aus. Aus diesem Grund ergibt eine bedarfsgerechte Substratzugabe für die Regelenergievermarktung keinen Mehrwert.

Die Erlöse am Day-Ahead-Markt sind volatil und liegen in aller Regel unter den Strombezugskosten. Erstes Ziel ist somit die Maximierung der Eigenstromnutzung. Je mehr Stromüberschüsse eine Anlage aufweist desto interessanter wird eine Beteiligung am Day-Ahead-Markt. Erneuerbare Energien, d. h. Photovoltaik und Windenergie, können die Stromerzeugung auf der Kläranlage sinnvoll ergänzen. Die Größe und Ausrichtung ist allerdings an den Lastgang der Kläranlage anzupassen, auch im Zusammenspiel einer bedarfsgerechten Faulgaserzeugung, um die Quote der Eigenstromversorgung zu maximieren.

Wärmespeicher Faulung

In der Praxis werden Faulungsanlagen konstant auf einem Temperaturniveau von rund 37°C betrieben. Eine Veränderung der Temperatur im saisonalen Verlauf verspricht eine höhere Nutzung der ther-

mischen Energie auf Kläranlagen. In diesem Zusammenhang wurde in labortechnischen Versuchen untersucht, inwiefern und mit welcher Veränderungsrate variable Temperaturniveaus in Faulungen umgesetzt werden können. Dabei wurden die Temperaturen in den Versuchsreaktoren in einem Bereich von 33 bis 53°C variiert.

Es zeigte sich, dass für Aufenthaltszeiten > 20 d eine variable Temperaturveränderung im benannten Spektrum ohne Veränderung der spez. Faulgasmengen möglich ist. Dabei sind Veränderungsrate von < 1 K/d einzuhalten. Auch wenn sich die Wärmebilanz bei einer saisonalen Veränderung der Faulraumtemperatur verbessert, muss vor allem bei höheren Temperaturen mit einer Verschlechterung der Entwässerungseigenschaften gerechnet werden. Auch steigt mit Zunahme der Temperatur der Anteil des gelösten CSB sowie des Ammoniumstickstoffs welcher zu einer höheren Rückbelastung der Anlage führt.

Akzeptanz einer energetischen Nutzung von Rest- und Abfallstoffen

In einer Reihe von Expertenworkshops, Dialogveranstaltungen und Lehrveranstaltungen wurde der Frage nachgegangen, welche unterschiedlichen Motive dafür verantwortlich sind, dass sich die verschiedenen Stakeholdergruppen entweder aktiv für eine flexiblere Nutzung einsetzen oder dieser neutral bis skeptisch gegenüberstehen. Dabei zeigte sich das Potential einer zielgruppenspezifischen Wissenschaftskommunikation, die möglichst viele gesellschaftliche Akteure einbindet und das Leitbild einer »gemeinwohlorientierten Flexibilisierung von Kläranlagen« vertritt. Projektbegleitend wurde dafür die Diskussionsplattform DigiLog genutzt, einige der Ergebnisse werden dort weiterhin präsentiert (<https://www.digilog-transformation.com/flxsynergy>).



AUSBLICK

Die Ergebnisse des Projektes wurden in einem Impulspapier zusammengefasst und entsprechend in Fachkreisen verteilt.

Das **Impulspapier** ist unter folgendem Link frei verfügbar: https://www.unibw.de/wasserwesen/swa/aktuelle-nachrichten/flxsynergy_impulspapier_rz-online-version.pdf

LITERATUR

Hubert, Christian, und Christian Schaum. 2023. „Von der flexiblen Klärschlammbehandlung zur Regelenergie“. DWA Energie Tag, Fulda, 6. Dezember 2023.

Liebatrau, Jan, Diana Pfeiffer, und Daniela Thrän. 2015. „Messmethodensammlung Biogas - Methoden zur Bestimmung von analytischen und prozessbeschreibenden Parametern im Biogasbereich“. Energetische Biomasse. ISSN: 2192-1806.

Mauky, Eric, Sören Weinrich, Hans-Fabian Jacobi, Hans-Joachim Nägele, Jan Liebetrau, und Michael Nelles. 2017. „Demand-Driven Biogas Production by Flexible Feeding in Full-Scale – Process Stability and Flexibility Potentials“. Anaerobe 46 (August):86–95. <https://doi.org/10.1016/j.anaerobe.2017.03.010>.

Christian Hubert, Christian Schaum, Bettina Steiniger, Jörg Kretzschmar, Eric Mauky, Manuel Winkler, Konstantinos Athanasiadis, u. a. 2024. »Flexible und vollenergetische Nutzung biogener Rest- und Abfallstoffe: Faulungen und Biogasanlagen als Energieverbraucher, -speicher und -erzeuger«. Abschlussbericht 03E15420. Energetische Biomasse. Neubiberg. 10.18726/2024_2. <https://athene-forschung.unibw.de/150121>

PUBLIKATIONEN AUF EINEN BLICK

Die Inhalte, Erkenntnisse und Ergebnisse des Forschungsvorhabens wurden in diversen Veranstaltungen und Publikationen während der Projektlaufzeit veröffentlicht bzw. diskutiert.

■ Publikationen

- Steiniger, B.; Hubert, C.; Schaum, C. (2023): Digesters as Heat Storage: Effects of the Digester Temperature on the Process Stability, Sludge Liquor Quality and the Dewaterability. Water Environment Research. Vol. 95, No. 9.
- Steiniger, B., Hubert, C., Schaum, C. (2021): Digesters as Heat Storage – Energetic Assessment of Flexible Variation of Digester Temperature. Chemical Engineering & Technology. Vol. 45, Nr. 1. 144-151.
- Steiniger, B., Hubert, C., Spallek, M., Michel, M., Stanzel, J., Schaum, C. (2022): Die Faulung als Wärmespeicher: Ganzheitliche Wärmenutzung durch saisonale Anpassung der Faulraumtemperatur. KA Korrespondenz Abwasser, Abfall. Vol. 69, Nr. 12
- Steiniger, B., Blattenberger, J., Hubert, C., Kretzschmar, J., Einsiedel, S., Heinrich, M., Athanasiadis, K., Schaum, C. (2022): Flexibilisierung von Faulungs- und Biogasanlagen – Identifikation von Gemeinsamkeiten und Unterschieden. KA Korrespondenz Abwasser, Abfall. Vol. 69, Nr. 10

■ Schlussbericht

Andreas Ewald, Sebastian Fendt, Hartmut Spliethoff,
Florian Henze, Robert Völkl

PyroGas II

FKZ-NR.: 03E15457
LAUFZEIT: 01.01.2023–31.12.2023
ZUWENDUNGSSUMME: 90.727,25 €

Dezentrale Verwertung von Klärschlamm mittels Pyrolyse und anschließender Flugstromvergasung zur gasmotorischen Nutzung; Teilvorhaben: Untersuchung der Flugstromvergasung von Klärschlamm bezüglich Prozessstabilität und Emissionen

KOORDINATION

Lehrstuhl für Energiesysteme
Technische Universität München
Boltzmannstraße 15
85748 Garching bei München
www.epe.ed.tum.de/es

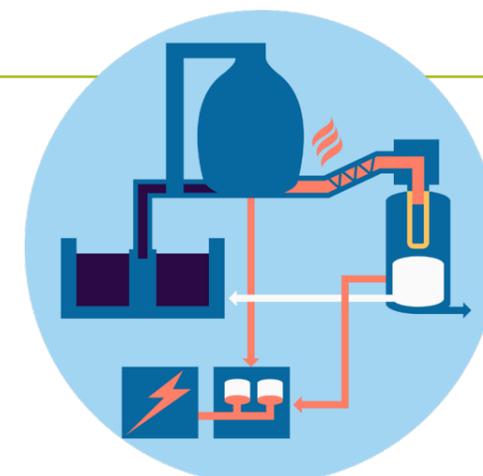
PARTNER

Völkl Motorentechnik GmbH
Einsteinstraße 12
95643 Tirschenreuth
www.voelkl.net

KONTAKT

Projektkoordination:
Dr.-Ing. Sebastian Fendt
Telefon: +49 89 289 16207
E-Mail: sebastian.fendt@tum.de

Autor:innen des Beitrages: Andreas Ewald, Sebastian Fendt & Hartmut Spliethoff, Technische Universität München;
Florian Henze & Robert Völkl, Völkl Motorentechnik GmbH



Die thermische Vorbehandlung verbessert die Eigenschaften von Klärschlamm als Brennstoff für die Flugstromvergasung. Allerdings steht die Verbesserung einer steigenden Komplexität und der hinzukommenden Verwertungsproblematik von Nebenprodukten entgegen.

Der erfolgreiche Betrieb eines Flugstromvergasers mit torrefiziertem Klärschlamm liefert Produktgas für einen Gasmotor. Dabei stellen wir keine problematische Auswaschung der Asche fest. Auch der Phosphor aus dem Klärschlamm wird in der Vergasungsasche konzentriert, welche anschließend als Rohstoff für die Düngemittelproduktion zur Verfügung steht. Die Prozessbedingungen oder unterschiedliche Additive ermöglichen eine Reduktion von kritischen Spurenstoffen in der Asche.

Das Produktgas aus der Vergasung von Klärschlamm eignet sich für die Strom- und Wärmeerzeugung im Gasmotor. Untersuchte Abgasemissionen nach der 44. BImSchV liegen nahe oder unterhalb der Grenzwerte. Wir gehen davon aus, dass markverfügbare Nachbehandlungsverfahren zur Einhaltung ausreichen werden. Eine Ausnahme stellt der Gehalt an Schwefeldioxid dar. Das Produktgas muss vor der Verwendung im Gasmotor entschwefelt werden, auch um Korrosion vorzubeugen.

ZUSAMMENFASSUNG

Abb. 1: BHKW auf dem Dach des Technikums

SUMMARY

Pretreatment improves sewage sludge as a fuel for entrained-flow gasification. However, this improvement does not compensate the increasing complexity of the concept and the additional obstacle of recycling by-products.

When operating the entrained-flow gasifier with torrefied sewage sludge, we do not notice any problematic leaching of the ash. The phosphorus from the sewage sludge remains in the gasification ash, which is then available for fertilizer production. Process conditions or different additives enable a reduction of critical trace elements in the ash.

The product gas from gasification is suitable for combined heat and power generation in the gas engine. The exhaust gas emissions examined are close to or below the limit values of the 44th BImSchV. We assume that market-available exhaust gas treatment will be sufficient for compliance. An exception is the sulfur content. The product gas must be desulfurized before combustion in the gas engine, also to prevent corrosion.

METHODIK bzw. MASSNAHMEN

Vorbehandlung von Klärschlamm:

- Betrieb einer Pyrolyseanlage zur Aufbereitung von Klärschlamm zu einem geeigneten Brennstoff
- Messung von Volumen und Teergehalt des Pyrolysegasstroms
- Probenahme von Pyrolyseöl und Pyrolyseabwasser

Vergasung von torrefiziertem Klärschlamm:

- Betrieb eines Flugstromvergasungsreaktors im Pilotmaßstab zur Bereitstellung von Synthesegas
- Messung von Hauptgaskomponenten (CH_4 , CO , CO_2 , H_2 , N_2 , O_2)
- Messung von Spurengaskomponenten (HCN , NH_3 , H_2S , HCl)
- Analyse von Abwasserproben mittels ICP-OES
- Analyse von Feststoffproben durch Feuchtebestimmung nach DIN EN ISO 18134, Ascheanalyse nach DIN EN ISO 18122 und ICP OES

Abgasmessung am Gasmotor-BHKW:

- Betrieb eines Gasmotor-BHKWs mit Erdgas, Faulgassubstitut (Erdgas + Kohlenstoffdioxid) und Synthesegas (aus der Flugstromvergasung von torrefiziertem Klärschlamm) bei Variation des Verbrennungsluftverhältnisses und der elektrischen Leistung
- Abgasmessung mittels MGAprime und VarioLuxx der MRU Messgeräte für Rauchgase und Umweltschutz GmbH

Schwermetallreduktion zur Phosphorrückgewinnung:

- Erzeugung von Asche durch Vergasung von Klärschlamm am Technikumsreaktor unter Variation der Temperatur, Reaktionsatmosphäre und Zugabe von Additiven
- Feuchteanalyse nach DIN EN ISO 18134 und Ascheanalyse nach DIN EN ISO 18122 zur Bestimmung des Brennstoffumsatzes
- Schadstoffanalyse nach DIN EN ISO 17294 für Arsen (As), Blei (Pb), Cadmium (Cd), Chrom (Cr), Kupfer (Cu), Nickel (Ni), Thallium (Tl), Zink (Zn) und nach DIN 22022-4 für Quecksilber (Hg)

KEY MESSAGES

- The implementation of a thermal pretreatment must be checked with regard to the specific sewage sludge on site.
- Entrained-flow gasification is suitable for providing fuel gas for a gas engine CHP.
- Sulfur must be removed immediately after the gasifier.
- The gas engine CHP should be equipped with an oxidation catalytic converter and a selective catalytic reduction.

KERNBOTSCHAFTEN

- Die Umsetzung der thermischen Vorbehandlung muss bezüglich des Klärschlammes am Standort abgewogen werden.
- Die Flugstromvergasung eignet sich für die Bereitstellung von Brenngas für ein Gasmotor-BHKW.
- Nach dem Vergaser muss eine Entschwefelung des Produktgases durchgeführt werden.
- Das Gasmotor-BHKW sollte mit einem Oxidationskatalysator und einer selektiv katalytischen Reduktion ausgestattet werden.

THEMEN SCHWERPUNKTE

- Thermochemische Nutzung von Klärschlamm am Entstehungsort zur Vermeidung eines Abtransports inkl. der anfallenden Entsorgungsgebühren.
- Flugstromvergasung zur Erzeugung von teerarmen Brenngas für die dezentrale Kraft-Wärme-Kopplung mittels Gasmotor-BHKW
- Steigerung der Auslastung von BHKWs an Kläranlagen zur Erhöhung der Energieeigenversorgung.
- Reduktion von Spurenstoffen in Klärschlamm-Asche um eine nachfolgende Phosphorrückgewinnung zu erleichtern.

ERGEBNISSE AUF EINEN BLICK

- **Konzepte/Machbarkeitsstudien:**
 - Anlagenkonzept
- **Anlagen:**
 - Pilot-Anlage
- **Daten & Methoden:**
 - Modell
 - Messreihe oder Messprogramm
- **Schlussbericht**

DARSTELLUNG DER ERGEBNISSE

Vorbehandlung von Klärschlamm:

Im Vorgängervorhaben wurden Pyrolyseöl- und Pyrolysegas als Nebenprodukte bei einer hohen Pyrolysetemperatur auf ihre Zusammensetzung hin untersucht. Gleichzeitig stellt eine niedrige Pyrolysetemperatur den besten Kompromiss zwischen Verbesserung der Brennstoffeigenschaften und dem notwendigen Energieeinsatz dar. In PyroGasII konzentrieren sich die Untersuchungen daher auf den Umgang mit Nebenprodukten aus einer niedrigen Pyrolysetemperatur. Im Allgemeinen wird eine langsame Pyrolyse bei niedriger Temperatur als Torrefizierung bezeichnet, weshalb nachfolgend zur Abgrenzung dieser Begriff genutzt wird.

Die flüssige Phase aus der Torrefizierung besteht auch bei niedriger Prozesstemperatur hauptsächlich aus Wasser. Dieses stammt maßgeblich aus der Reduktion der mittleren Feuchte von 12,4% auf 2,7%. Da keine sinnvolle Integration oder Verwendung für das verunreinigte Wasser ersichtlich ist, muss die Entsorgung mitbedacht werden.

Bei der Torrefizierung von einem Kilogramm Klärschlamm messen wir ein entstehendes Gasvolumen von 2,1 L. Aufgrund dieses geringen Wertes erwarten wir eine Leckage über das Eintrags- und Austragsystem der Anlage. Die gemessene Teerkonzentration im Produktgas liegt bei 3,64 g/Nm³. Da das Gas aus der Torrefizierung insgesamt nicht brennbar ist, ist auch keine sinnvolle Integration in den Prozess ersichtlich. Die ungünstigen Eigenschaften der Nebenprodukte führen zu einer Verwertungsproblematik, welche dem im Vorgängervorhaben ermittelten Nutzen entgegensteht.



Abb. 2: Flugstromvergaser der Pilotanlage, Quelle: Leuter et. al 2021.

Vergasung von torrefiziertem Klärschlamm:

Die Flugstromvergasung im Pilotmaßstab erfolgt bei 90 kW (~27 kg/h) mit einem Verbrennungsluftverhältnis von $\lambda = 0,4$. In PyroGasII setzen wir im Pilotvergaser aus Abbildung 2 ausschließlich torrefizierten Klärschlamm ein. Dabei zeigen wir den Einfluss von unterschiedlichen Vergasungskonzepten.

Die Luftvergasung von Klärschlamm stellt den Vergleichspunkt dar. Die Luftvergasung von Klärschlamm mit einer Zugabe von 4% KCl als Additiv soll Spurenstoffe in der Asche reduzieren. Bei der Luftvergasung kommt zunächst N₂ als Spülgas für die Sensorik zum Einsatz. CO₂ als Substitut soll den Heizwert des Produktgases erhöhen, da es an der Vergasungsreaktion teilnehmen kann. Produktgas aus der Sauerstoffvergasung ermöglicht schlussendlich einen stabilen Gasmotorbetrieb. Tabelle 1 zeigt die Hauptgaskomponenten und den sich daraus ergebenden Heizwert bei den unterschiedlichen Vergasungskonzepten.

Tab. 1: Hauptgaskomponenten nach Betriebsbedingungen

Betriebspunkt	CH ₄ in %	CO in %	CO ₂ in %	H ₂ in %	N ₂ in %	O ₂ in %	H _u in kJ/m ³
Luftvergasung	1,4	13,7	11,2	10,5	62,9	0,3	3448
Luftvergasung mit KCl als Additiv	0,7	16,3	9,6	9,9	63,1	0,3	3348
Luftvergasung mit CO ₂ als Spülgas	1,5	14,3	11,7	10,6	61,6	0,3	3600
Sauerstoffvergasung	3,2	33,9	24,9	28,0	9,7	0,3	8131

Die Analyse der Abwasserproben mittels ICP-OES soll die Auswaschung der Asche bewerten. Die eingebrachte Masse im Brennstoff steht dabei der ausgewaschenen Masse im Abwasser gegenüber. Phosphor wird zu weniger als 1% ausgewaschen, wobei eine Abwasserrückführung selbst diesen Verlust verhindert. Phosphor und Elemente mit erhöhten Konzentrationen sind in Tabelle 2 aufgeführt. Die Zugabe von KCl zum Brennstoff erhöht die Konzentration an Kalium im Abwasser.

Die Asche aus der Luftvergasung beinhaltet im Vergleich zum Einsatzstoff noch 90% Ni, 78% As, 72% Cu, 67% Zn, 60% Cd, 59% Cr, 55% Pb, 48% Tl und weniger als 13% Hg. Die erhoffte Verstärkung des reduzierenden Effektes durch das Additiv KCl zeigt sich im Pilotvergaser nicht.

Tab. 2: Austrag an chemischen Elementen über das Abwasser des Wasserquench

Betriebspunkt	Ca in g/h	K in g/h	Mg in g/h	Na in g/h	P in g/h	S in g/h
Luftvergasung	1.4	7.2	4.3	0.2	65.7	8.7
Luftvergasung mit KCl als Additiv	0.7	4.0	6.1	0.1	36.1	3.9
Luftvergasung mit CO ₂ als Spülgas	2.2	23.3	6.4	0.2	7.3	13.4
Sauerstoffvergasung	5.5	9.0	22.1	0.3	51.1	0.7

Tab. 3: Grenzwerte nach 44. BImSchV und ermittelte Abgaswerte in mg/Nm³

Komponente	CO	NO _x	N ₂ O	CH ₄	C ₃ H ₈	SO ₂
Grenzwert	500	500	-	-	-	100
Erdgas	166	595	10	1006	120	-
Faulgassubstitut	109	220	15	2250	242	-
Synthesegas	907	2887	40	71	20	3524
Mischgas	403	1060	22	248	38	1967

Abgasmessung am Gasmotor-BHKW:

Das im Projekt verwendete Gasmotor-BHKW befindet sich auf dem Dach des Technikums über dem Pilotvergaser. Abbildung 1 zeigt die Seitenansicht der geschlossenen Anlage während einer Abgasmessung. Das Gasmotor-BHKW besitzt keine gesonderte Ausstattung zur Abgasreinigung. Die ermittelten Abgaswerte können also durch marktverfügbare Abgasnachbehandlungsmaßnahmen weiter verbessert werden. Um einen Vergleich zu ermöglichen verbrennen wir im Gasmotor Erdgas, Faulgassubstitut (Erdgas + CO₂), Synthesegas und Mischgas (Faulgassubstitut + Synthesegas). Das Mischgas entspricht dem Anwendungsfall am Standort nach Abbildung 3. Die Abgaswerte A werden nach Formel (1) auf den Bezugssauerstoff von 5% umgerechnet und dem gültigen Grenzwert der 44. BImSchV für Verbrennungsmotoranlagen in Tabelle 3 gegenübergestellt. Diesem Auszug der Ergebnisse liegt ein einheitliches Verbrennungsluftverhältnis ($\lambda = 1,45$) im Gasmotor zugrunde. Je nach Brenngas betrachten wir im Projekt einen Bereich von $\lambda = 1,00$ bis $\lambda = 1,90$, woraus sich stellenweise sinnvollere Betriebspunkte ergeben.

$$A_{\text{Bezug}} = \frac{0,21 - 0,05}{0,21 - 0,05} \cdot A_{\text{Messung}} \quad (1)$$

Bei Kohlenstoffmonoxid findet im Betrieb mit Mischgas ein Schlupf statt. Der Grenzwert kann bei richtiger Einstellung des Motors dennoch eingehalten werden. Methan- und Propanemissionen werden im Betrieb mit Vergasungsgas reduziert. Als verstärkend nehmen wir die Senkung der Explosionsgrenze in diesen Gasgemischen an. Der Grenzwert für den Gesamtkohlenstoff liegt bei 1300 mg/Nm³, sodass wir für Mischgas von keiner Erreichung ausgehen. Dennoch könnte ein Oxidationskatalysator (Zwei-Wege-Katalysator) bei diesen beiden Emissionen eine besondere Sicherheit schaffen.

Die Emissionen für Stickoxid sind durch die Zugabe von Vergasungsgas erhöht. Der hohe Stickstoffgehalt im Klärschlamm stellt eine Ursache für Brennstoff-NO_x dar. Mit weiterer Erhöhung des Verbrennungsluftverhältnisses wird der Grenzwert zwar knapp erreicht, dennoch empfehlen wir die Aufrüstung einer selektiv katalytischen Reduktion. Aufgrund der erwarteten Verschärfung des Grenzwertes in 2029 auf 100 mg/Nm³ wird dieser Schritt zukünftig auch für den Einsatz gängiger Brenngase notwendig.

Die Schwefelemissionen liegen ohne eine installierte Entschwefelung entsprechend weit über geltenden Grenzwerten. Eine Entschwefelung noch vor dem Gasmotor sehen wir für den Prozess als obligatorisch an, da auch der Gasmotor vor Korrosion geschützt werden muss.

Spurestoffreduktion zur Phosphorrückgewinnung:

Die Reduktion von bedenklichen Spurenstoffen in der Vergasungsgasche zeigen wir mit Klärschlamm (~0,3 kg/h) im Technikumsmaßstab. Als Vergleichswert dient Asche aus dem Muffelofen bei einer Verbrennungstemperatur von 850 °C. Ausgehend von Kennzeichnungsschwellen und Grenzwerten in der DüMV nehmen wir Pb, Cd, Cr, Cu, Ni, Hg, As, Tl und Zn in die Betrachtung mit auf.

Allgemein können wir im Muffelofen eine Reduktion von Hg und Tl zeigen. Einen moderaten Einfluss sehen wir auf As, Cr. Für Pb, Cd, Cu, Ni, Zn können wir keine Reduktion feststellen.

Allgemein können wir in der Flugstromvergasung ($\lambda = 0,4$) eine Reduktion von Tl, Hg und Cd zeigen. Einen moderaten Einfluss sehen wir auf Pb, Cr, As und Zn. Lediglich für Cu, Ni können wir keine Reduktion feststellen.

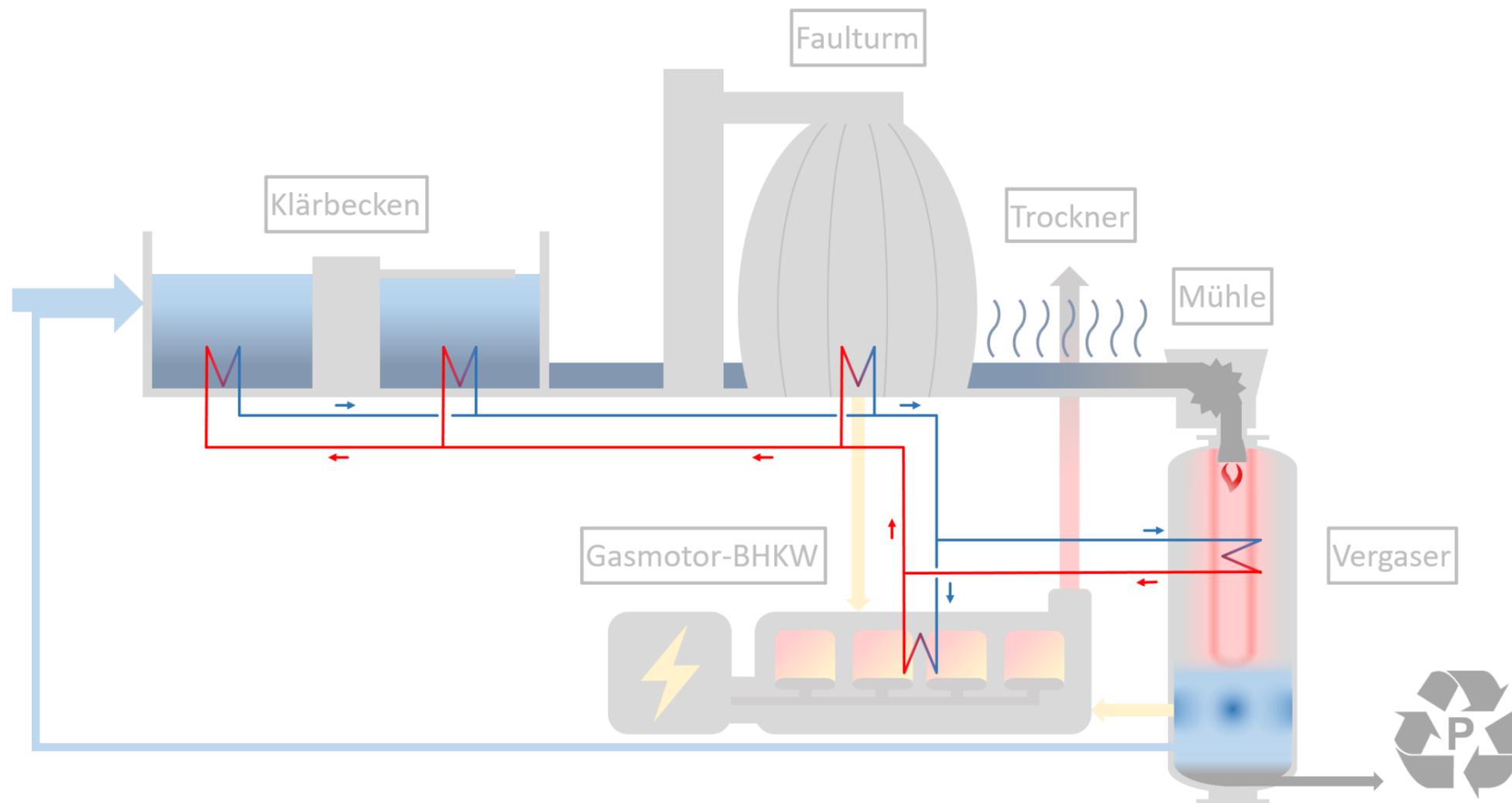
Als Auszug stellen wir Anhand von Pb die expliziten Einflüsse dar. Die Erhöhung der Reaktionstemperatur von 800 °C auf 1200 °C reduziert den Anteil an in der Asche verbleibenden Pb von 76% auf 11%. Die Zugabe von jeweils einem von 18 unterschiedlichen Additiven bei 850 °C zeigt, dass bei dieser Temperatur eine Reduktion von Pb auf bis zu 15% möglich ist. Bei 850 °C und dem Verbrennungsluftverhältnis von $\lambda = 0,0$ verbleiben 85% an Pb in der Asche. Dieser Wert sinkt schrittweise bis $\lambda = 1,0$ auf 59% ab.

Zusammenfassend sehen wir in der Temperatur die deutlichste Möglichkeit zur Reduktion von Spurenstoffen. Additive haben einen merklichen Einfluss, sind aber aufgrund anderer Hemmnisse nicht unbedingt umsetzbar. Das Verbrennungsluftverhältnis bietet nur einen untergeordneten Einfluss.

HERAUSFORDERUNGEN bzw. HEMMNISSE

Die Vergasung mit Luft als Vergasungsmittel liefert bei Klärschlamm einen stabilen Vergasungsbetrieb. Im verfügbaren Gasmotor ist das erzeugte Brenngas allerdings nicht zündfähig. Je nach Verfügbarkeit an Faulgas könnte eine Zumischung dieses Problem lösen. In den durchgeführten Versuchen wurde der Gasmotor stattdessen mit Gas aus der Sauerstoffvergasung von Klärschlamm betrieben, was die wirtschaftlichen Erfolgsaussichten am Standort Kläranlage mindert.

Der Schwefelgehalt des Klärschlammes führte im Versuchsbetrieb zu erheblichen Emissionen. Um den Gasmotor vor Verschleiß zu schützen und die Grenzwerte der 44. BImSchV einzuhalten, ist eine Entschwefelung des Produktgases der Vergasung obligatorisch. Die Gasreinigung am Pilotvergaser kann den notwendigen Volumenstrom nicht reinigen, sodass der experimentelle Beleg ausbleibt.



AUSBLICK

Vor dem Hintergrund der gesetzlichen Vorgaben und den Entwicklungen der letzten Jahre werden in Deutschland neue Kapazitäten für die Monoverbrennung geschaffen. Die stationäre Wirbelschicht hat sich weltweit als am meisten eingesetztes Verfahren profiliert und wird großtechnisch umgesetzt. (Schnell et al. 2018)

Im Vergleich zur zentralen Wirbelschichtverbrennung von Klärschlamm sehen wir im untersuchten Konzept einige Vorteile, die hauptsächlich auf dem dezentralen Charakter des Ansatzes beruhen.

Einen funktionalen und wirtschaftlichen Vorteil bietet die doppelte Ausnutzung des BHKWs am Standort Kläranlage. Insgesamt kommt zu der mittels Faulgas zugänglichen chemischen Energie noch die chemische Energie des ausgefaulten Klärschlammes hinzu. Daher steigt die Eigenversorgungsquote mit elektrischer Energie am Standort an. Zudem erlaubt der Prozess eine Wärmeintegration. Im BHKW bereitgestellte Wärme unterstützt die energieintensive Trocknung des Klärschlammes vor der Vergasung.

Klärschlamm besteht im entwässertem Zustand ungefähr zur Hälfte aus Wasser. Im getrockneten Zustand stellt der hohe Aschegehalt von ungefähr einem Drittel einen Grund für den vergleichsweise niedrigen Heizwert als Brennstoff dar. (Schaum 2020) Damit vermeidet die dezentrale Verwertung am Standort den Transport von niedrig-energetischem Substrat.

Bei ausreichendem Interesse möglicher Partner (v.a. Kläranlagen) an den Ergebnissen des Vorhabens wollen wir mit der klein-skaligen Umsetzung des Konzeptes in einer Demonstrationsanlage beginnen. Hierbei stellt eine Kläranlage mit Klärschlammfaulung und Gasmotor-BHKW den optimalen Standort dar, da der Prozess nach Abbildung 3 hier bestehende Infrastruktur miteinbezieht. Sollte bereits eine Klärschlamm-trocknung vorhanden sein, muss diese mit der Abwärme des BHKWs und dessen Abgas gekoppelt werden können. Neben dem Vergaser muss für die Demonstration am Standort eine Mühle und eine Gasreinigung errichtet werden.

Abb. 3: PyroGas-Gesamtprozess

Für den Bau einer genehmigungsfähigen Demonstrationsanlage nach gültigen Immissionsschutzvorgaben sind nach den Erkenntnissen aus PyroGasII einzelne Aspekte der Prozesskette abzuwandeln.

Einerseits schlagen wir vor auf die Vorbehandlung des Brennstoffs zu verzichten, da die damit einhergehenden Vorteile dem damit verbundenen Aufwand nicht gerecht werden. Diese Umstellung wirkt sich positiv auf die Wirtschaftlichkeit aus.

Die wirtschaftliche Anschlussfähigkeit ist maßgeblich von den Kosten der notwendigen Gasreinigung in der Prozesskette abhängig. Basierend auf Erkenntnissen des Vorhabens PyroGasII wird eine Gasreinigung, bestehend aus Entschwefelung und Aktivkohlefilter, notwendig. Für die Abgasnachbehandlung am Gasmotor kann nach Auswertung der Ergebnisse auf gängige, am Markt verfügbare Technologien zurückgegriffen werden. Ein Oxidationskatalysator und eine selektiv katalytische Reduktion bieten hohes Potential die Immissionsschutzvorgaben wirtschaftlich einzuhalten.

Zusammenfassend stellt der experimentelle Beleg der zur Verwendung vorgeschlagenen Gasreinigung im Gesamtkonzept den nächsten innovatorischen Schritt dar. Diese Untersuchung kann direkt an einer Demonstrationsanlage am Standort erfolgen.

LITERATUR

44. BIMSCHV: Vierundvierzigste Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (Verordnung über mittelgroße Feuerungs-, Gasturbinen- und Verbrennungsmotoranlagen – 44. BImSchV). BGBl. I.

ABFKLÄRV: Verordnung über die Verwertung von Klärschlamm, Klärschlammgemisch und Klärschlammkompost (Klärschlammverordnung – AbfKlärV). BGBl. I.

DIN EN ISO 18134 (2024): Biogene Festbrennstoffe - Bestimmung des Wassergehaltes. Aufl. Berlin : DIN Deutsches Institut für Normung e.V..

DIN EN ISO 18122 (2023): Biogene Festbrennstoffe - Bestimmung des Aschegehaltes. Deutsche Fassung. Aufl. Berlin : DIN Deutsches Institut für Normung e.V..

DIN EN ISO 17294 (2007): Wasserbeschaffenheit - Anwendung der induktiv gekoppelten Plasma-Massenspektrometrie (ICP-MS). Deutsche Fassung. Aufl. Berlin : DIN Deutsches Institut für Normung e.V..

DÜMV: Verordnung über das Inverkehrbringen von Düngemitteln, Bodenhilfsstoffen, Kultursubstraten und Pflanzenhilfsmitteln (Düngemittelverordnung – DüMV). BGBl. I.

DIN 22022-4 (2001): Feste Brennstoffe - Bestimmung der Gehalte an Spurenelementen - Teil 4: Atomabsorptionsspektroskopie unter Anwendung der Hydrid- bzw. Kaltdampftechnik. Aufl. Berlin : DIN Deutsches Institut für Normung e.V..

LEUTER, P.; JOHNE, P.; FENDT, S.; SPLIETHOFF, H. (2021): Flexible Synthesis Gas Purification from the Entrained Flow Gasification of Biogenic Residues for Fermentation Purposes. In: 29th European Biomass Conference and Exhibition

SCHAUM C. (2020): Phosphorrückgewinnung bei der Abwasserbehandlung, Abschlussbericht im Auftrag des Bayerischen Landesamtes für Umwelt (LfU), Universität der Bundeswehr München Institut für Wasserwesen. ISBN 978-3-943207-45-3

SCHNELL, M.; HORST, T.; QUICKER, P. (2020): Thermal treatment of sewage sludge in Germany: A review In: Journal of Environmental Management Bd. 263, S. 110367. doi: 10.1016/j.jenvman.2020.110367.



Esther Stahl, Andreas Huft, Lasse Harloff,
Florian Schanz, Karsten Töpel, Frank Schweppe

LaubCycle

Etablierung eines nachhaltigen Stoff- und
Energiekreislaufs für den biogenen Reststoff
Laub auf kommunaler Ebene

KOORDINATION

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

KONTAKT

Projektleitung: Andreas Huft
Telefon: +49 (0)208-8598-1170
E-Mail: andreas.huft@umsicht.fraunhofer.de

PARTNER

Franz-Josef Kipp GmbH & Co. KG
Lise-Meitner-Straße 3
46569 Hünxe
http://www.kipp-dve.de/

Stadt Schortens
Oldenburger Straße 29
26419 Schortens
https://www.schortens.de/

FKZ-NR.: 03EI5418
LAUFZEIT: 01.04.2021–31.03.2024
ZUWENDUNGSSUMME: 560.500 €

Autor:innen des Beitrages: Esther
Stahl, Andreas Huft, Lasse Harloff,
Fraunhofer UMSICHT; Florian
Schanz, Franz-Josef, Kipp GmbH
& Co. KG; Karsten Töpel, Frank
Schweppe, Stadt Schortens

ZIELE Ziel des Projekts »LaubCycle« ist die Untersuchung der Etablierung eines geschlossenen Kreislaufsystems für Laub in Kommunen. Durch die Verbrennung von vorbehandeltem Laub soll klimaneutrale Energie (Wärme und ggf. Strom) gewonnen werden. Gleichzeitig sollen die im Laub enthaltenen Nährstoffe rückgeführt werden. Das Projekt zielt auf eine effiziente, umweltfreundliche und nachhaltige Lösung zur Laubverwertung und auf dezentrale Energieversorgung ab, insbesondere unter Berücksichtigung der inhomogenen Zusammensetzung und saisonalen Verfügbarkeit von Laub.

ZUSAMMENFASSUNG

Im Rahmen des Projekts wurden Laubfraktionen aus verschiedenen Sammelorten, hauptsächlich in Straßennähe und aus Parkanlagen, untersucht. Zur Aufbereitung des Laubs wurden drei Sieb-systeme (Trommelsieb, Sternsieb, Spannwellensieb) mit unterschiedlichen Maschenweiten getestet. Es zeigte sich, dass eine recht einfache Siebtechnik wie ein Trommelsieb wirkungsvoll Steine und Verunreinigungen aus feuchtem Laub entfernen konnte, wenngleich der (Fein-)Ascheanteil nur um wenige Prozentpunkte reduzierbar war. Die Untersuchungen haben ebenso verdeutlicht, dass die Laubbeschaffenheit (Trockengehalt, Sammelort, Lagerort) entscheidend für die Aufbereitung ist. Eine Verbrennung des Laubs ist nur in einer entsprechend zugelassenen und geeigneten Verbrennungsanlage möglich. Die Untersuchung der erzeugten Verbrennungsaschen zeigte, dass die Verwertung als Düngemittel oder zusammen mit Kompost aufgrund der Zusammensetzung der Aschen vertiefter zu untersuchen ist.

KERNBOTSCHAFTEN

- Laub zeichnet sich durch relevante Heizwerte aus und ist daher ein potenzieller biogener Brennstoff.
- Die Laubqualität ist allerdings stark vom Herkunftsort abhängig. Teilweise ist Laub deutlich (bis zu 50%) durch Erdanhaftungen verunreinigt. Auch sind je nach Herkunft andere Verschmutzungen wie Abfälle (Masken, Trinkpäckchen) enthalten.
- Mittels Siebaufbereitung lassen sich Aschegehalte und Schwermetallbelastungen reduzieren sowie gröbere Verunreinigungen wie Steine entfernen. Insgesamt konnten bei feuchtem Laub jedoch eher geringe Aschegehaltreduktionen um wenige Prozentpunkte in den Grobfraktionen festgestellt werden. Empfehlenswert ist die Siebung in Kombination mit einer möglichst sauberen Laubfraktion, zum Beispiel aus Parkanlagen und Laubsammelkörben.

- Getrocknete Laubbriketts können nur in einer geeigneten Biomassefeuerung verbrannt werden. In der Praxis bedeutet dies, dass eine Einstellung der Anlage auf den Brennstoff möglich und eine passende Rauchgasreinigung vorhanden sein muss. Die Anlage muss zudem auch genehmigungsseitig Laub einsetzen dürfen (kein Regelbrennstoff in I. BlmSchV-Anlagen). Eine Mischung mit Holzbrennstoffen könnte sinnvoll sein.
- Als mögliche Verwertungspfade für Aschen aus der Verbrennung von Laub kommen potenziell die Nutzung als Düngemittel bzw. als Einsatzstoff für Düngemittel sowie die Beimischung zu Kompost in Frage. Bei einzelnen der untersuchten Aschen zeigte sich eine leichte Überschreitung je eines Schadstoffwertes, die weiter zu untersuchen sind.

THEMEN SCHWERPUNKTE

- Erschließung eines biogenen Reststoffs als Brennstoff
- Erprobung von Aufbereitungstechnik zur Qualitätsverbesserung
- Ökonomische Bewertung
- Rückführung von Nährstoffen



SUMMARY

As part of the project, leaf fractions collected at various locations were examined, in particular leaves from roadside areas and parks. Three screening systems (drum screen, star screen, flip-flow screen) with different mesh sizes were tested. It was shown that a quite simple screening technique (drum screen) could effectively remove stones and impurities from moist leaves, even though the (fine) ash content could only be reduced by a few percentage points. The tests also made it clear that the properties of the leaves (dry content, collection location, storage location) are decisive for processing. The leaves can only be incinerated in an appropriately approved and suitable incineration plant. Examination of the incineration ash showed that recycling as fertilizer or together with compost needs to be investigated in more detail due to the composition of the ashes.

KEY MESSAGES

- Foliage is characterized by relevant calorific values and is therefore a potential biogenic fuel.
- However, the quality of the leaves is heavily dependent on the place of origin. In some cases, leaves are significantly (up to 50%) contaminated with soil. Depending on the origin, other contaminants such as waste (faces masks, beverage packaging) are also present.
- Ash content and contamination with heavy metals can be reduced with screen processing and larger stones can be removed. Overall, however, only slight reductions in ash content of a few percentage points were found in the coarse fractions of moist leaves. Screening in combination with a leaf fraction that is as clean as possible, such as from parks and leaf collection containers, is recommended.
- Combustion of briquettes from dry leaves is only possible in a suitable biomass furnace. In practice, this means that the plant must allow adjustment to this type of fuel, and a suitable flue gas cleaning system must be in place. Moreover, the plant needs to hold a permit for using leaves as fuel (leaves not being standard fuel in 1st BImSchV plants). A mixture with wood fuels could be useful.

METHODIK bzw. MASSNAHMEN

- Bestandsaufnahme der Lauberfassungsmethoden in Deutschland sowie Auswahl geeigneter Technologien zur Laubaufbereitung
- Planung und Durchführung einer Beprobungskampagne an verschiedenen Standorten und Analyse der Laubqualitäten
- Durchführung von Siebversuchen und Ableitung einer optimierten Laubaufbereitung
- Analyse der Bereitstellungskosten
- Herstellung von Testbrennstoffen und Durchführung von Verbrennungsversuchen in einer Praxisanlage
- Analyse der Verbrennungaschen hinsichtlich ihres Einsatzpotenzials als Düngemittel

DARSTELLUNG DER ERGEBNISSE

Zunächst wurde ein umfassender Beprobungskonzept erarbeitet. Anhand der dort festgelegten Analysen können sowohl Rückschlüsse zu den äußeren Einflüssen auf die Laubqualität wie Fremdstoffe, Anhaftungen, Schwermetalle oder Aschebildner gezogen als auch die Qualität der einzelnen Aufbereitungsmethoden quantifiziert werden. Die nachfolgende Darstellung bildet die Stoffströme und Qualitätseinflüsse des untersuchten Laubs ab, auf dessen Grundlage das Beprobungskonzept entwickelt wurde.

Insgesamt wurden 22 Laubfraktionen analysiert. Die Proben wurden zwei Sammelkampagnen im Herbst 2021 sowie im Herbst 2022 entnommen. Zudem wurden Proben aus zwei Siebkampagnen sowie aus zwei Verbrennungskampagnen untersucht.

ERGEBNISSE AUF EINEN BLICK

- Beiträge in Tagungsbände:
 - Huft, A.; Stahl, E.; Harloff, L.: Utilization of foliage - closed loop recycling and energetic potential on municipal level; in: 31. European Biomass Conference and Exhibition EUBCE. Poster. Marseille, 05.-08.06.2023
 - Huft, A.; Stahl, E.; Harloff, L.: Laub- eine Biomasse im Fokus der Kreislaufwirtschaft. In: Thrän, Daniela; Händler, Tina (Hrsg). *Statuskonferenz Bionenergie*. DBFZ Deutsches Biomasseforschungszentrum gGmbH, Leipzig, Deutschland, ISBN: 978-3-946629-98-6, ISSN: 2698-6809, DOI: 10.48480/x66n-ev26

WEITERE INFORMATIONEN

- Projekt auf Website: [Energetische Biomassenutzung.de](https://www.energetischebiomassenutzung.de)
- [Schlussbericht](#)

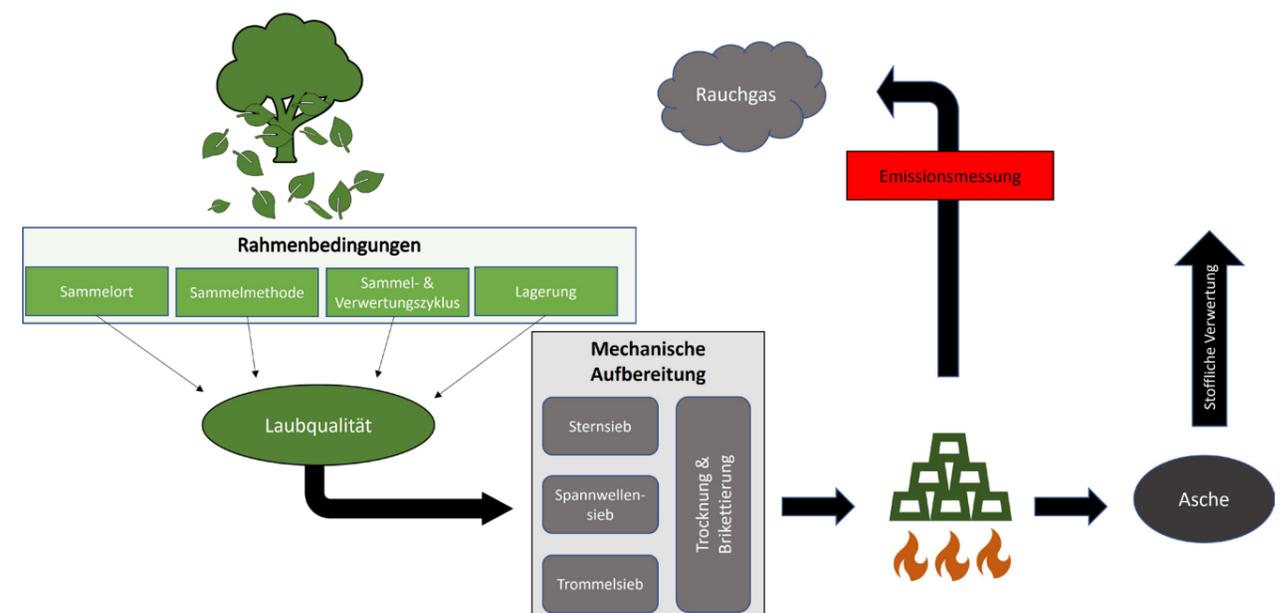


Abb. 1: Konzeptionelle Darstellung der untersuchten Stoffströme und Qualitätseinflüsse

Untersuchung der Laubfraktionen

Im Hinblick auf die Ausgangsfraktionen wurde ein Einfluss des Sammelorts auf die Zusammensetzung der einzelnen Fraktionen festgestellt (s. Abbildung 2). Hierbei wird zwischen Laub aus Sammelorten in Straßennähe und Laub aus Parkanlagen unterschieden. Es zeigte sich, dass Laub in Straßennähe höhere Aschegehalte (47% TS) sowie höhere Gehalte an Schwermetallen aufwies im Vergleich zu z. B. Parklaub (12% TS). Eine mögliche Begründung für die hohen Aschegehalte ist die Art der Sammelmethode mittels Kehrmaschine. Allerdings hängt der Grad der Verunreinigung nicht nur vom spezifischen Sammelort und der Sammelmethode ab, sondern in hohem Maße auch von den Wetterbedingungen (Feuchtanhaftungen), den Sammelintervallen (längere Akkumulationszeit) etc.

Abb.2: Einfluss der Sammelorte auf den Aschegehalt sowie den Heizwert unterschiedlicher Laubfraktionen

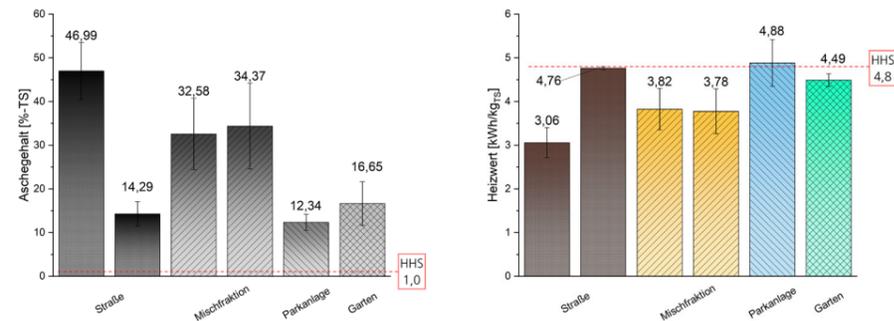


Abb. 3: Eingesetzte Siebtechniken: Sternsieb (links unten), Spannwellensieb (links), Trommelsieb (rechts)

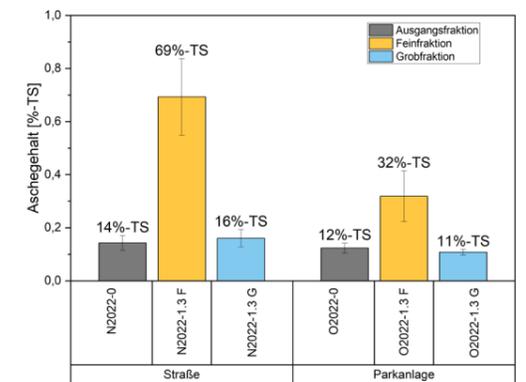


Siebekampagnen

Die Siebekampagnen bestanden aus der Untersuchung von drei verschiedenen Siebssystemen (Trommelsieb, Sternsieb, Spannwellensieb) mit unterschiedlichen Siebmaschenweiten, die auch jeweils miteinander kombiniert wurden.

Die entstehenden Fraktionen wurden bilanziert und charakterisiert. Hier zeigte sich, dass eine Aufbereitung mit allen drei untersuchten Siebtechniken wirkungsvoll Steine und Verunreinigungen aus feuchtem Laub entfernen konnte. Es konnte eine Reduzierung des Ascheanteils sowie eine Abreinigung von Schwermetallen (im Einzelfall) erreicht werden. Abbildung 4 zeigt beispielhaft den Aschegehalt in den erzielten Siebfraktionen (Feinfraktion und Grobfraktion) sowie in der Ausgangsfraktion für das Trommelsieb. In den untersuchten Proben konnte eine Anreicherung von inertem Material in der Feinfraktion festgestellt werden. In der Zielfraktion (Grobfraktion) konnte eine leichte Reduzierung des Aschegehalts ermittelt werden. Insgesamt lag die Reduktion bei allen untersuchten Siebtechniken im einstelligen Prozentbereich. Für weitere Versuche wurde die Nutzung eines Trommelsiebs aufgrund eines hohen Durchsatzes bei einfacher Prozessführung priorisiert. Die Versuche zeigten insgesamt, dass für eine erfolgreiche Aufbereitung die Beschaffenheit des Laubs entscheidend ist (u. a. Wassergehalt, Sammelort, Lagerort) und es sich hierbei um ein komplexes Zusammenspiel verschiedener Einflussfaktoren handelt, weshalb der Vorbehandlung eine erhöhte Aufmerksamkeit zukommen muss.

Abb. 4: Ergebnisse des Einsatzes eines Trommelsiebs bei zwei Laubfraktionen. Hinweis: Es handelt sich hier um Einzelergebnisse



Kompaktierung und Verbrennung

Für die anschließenden Verbrennungskampagnen wurden aus ausgewählten Laubfraktionen Rundbriketts mit 100% Laubanteil (1. Kampagne) sowie Mischbriketts aus dem Regelbrennstoff Holzhackschnittel und Laub bis zu einem Anteil von 25%, 50% und 75% hergestellt (2. Kampagne, s. Abbildung 5). Für die vorherige Trocknung des Laubs wurde ein Schubwendetrockner genutzt. Zudem wurden für die Verbrennungsversuche Holzhackschnittel (HHS) als Regelbrennstoff eingesetzt. Die Verbrennungsversuche wurden in einer Praxisfeuerung mit

320kW Feuerungswärmeleistung der Stadt Schortens durchgeführt. Eine erste Verbrennungskampagne konnte aufgrund geringer Wärmeabnahme und geringen Laubqualitäten nicht durchgeführt werden. In einer zweiten Kampagne lag erneut kein optimaler Anlagenbetrieb vor. Eine Fehlfunktion der Rauchgasreinigungseinrichtung konnte im Nachgang behoben werden. Auch wurde die Anlagensteuerung weiter angepasst. Entsprechend konnten keine repräsentativen Emissionswerte ermittelt werden.

Abb. 5: Hergestellte Laubbriketts für die zweite Verbrennungskampagne mit 25% Laubanteil (links), 50% Laubanteil (Mitte) und 75% Laubanteil (rechts)



Verwertungsoptionen Laubaschen

Potenziell mögliche stoffliche Verwertungspfade von Pflanzenaschen sind die Nutzung als Düngemittel oder als Ausgangsstoff für Düngemittel oder die Beimischung zu Kompost.

Zur Beurteilung der Verwertungsoptionen wurden Ascheproben aus der 2. Verbrennungskampagne (Mischbriketts) auf die entsprechenden Anforderungen gemäß Düngemittelverordnung [DüMV] und Bioabfallverordnung [BioAbfV] analysiert. Bei den drei Proben konnten die Mindestanforderungen an Kalkdünger bezüglich der Gehalte an CaO eingehalten werden (siehe Abbildung 6). Die Schadstoffgehalte der DüMV wurden bis auf einen Wert für Chrom VI eingehalten (Wert 2,6 mg/kg anstatt 2 mg/kg für eine untersuchte Probe mit einem Laubanteil von 50%). Bei einer Mischung mit Kompost wäre zudem die Bioabfallverordnung zu berücksichtigen. Hier wurden die Schadstoffgrenzwerte bis auf eine leichte Überschreitung von Kupfer in einer der untersuchten Aschen eingehalten.

Es ist davon auszugehen, dass aufgrund der inhomogenen Zusammensetzung von Laub auch die Verbrennungaschen schwankende Zusammensetzungen aufweisen werden. Eine Analyse größerer Probenmengen weiterer Verbrennungaschen sind für eine weitere Einordnung erforderlich. Auch ist Laub nicht explizit als Einsatzstoff gemäß Düngemittelverordnung aufgeführt. Die Einstufbarkeit von Laub als zulässiger Einsatzstoff ist daher zu klären.

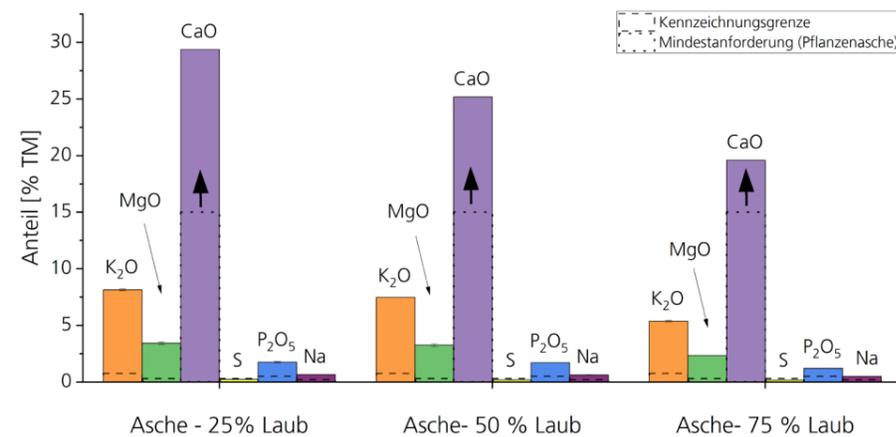


Abb. 6: Analyseergebnisse von Mischbrikettsaschen und Einordnung in die DüMV
(Hinweis: es handelt sich um je eine Ascheprobe)

HERAUSFORDERUNGEN bzw. HEMMNISSE

Die Durchführung der umfangreichen Siebkampagnen im laufenden Betrieb eines Biomasseaufbereitungsbetriebs war eine recht hohe logistische Herausforderung, die jedoch mit Hilfe des Partners Kipp erfolgreich gestaltet werden konnten. Weiterhin zeigte sich, dass aufgrund der Inhomogenität des Stoffstroms Laub hohe Schwankungsbreiten in den analysierten Werten bestanden. Trotz bereits durchgeführter dreifacher Beprobung und doppelter Analyse der jeweiligen Probe waren Massenbilanzen der Siebversuche teilweise nicht schlüssig ermittelbar. Große Herausforderungen bestanden zudem in der

Durchführung von repräsentativen Verbrennungsversuchen in einer Praxisanlage. Auch wenn in einem vorherigen Projekt Verbrennungsversuche in einer Forschungsanlage mit 100% Laub als Einsatzstoff erfolgreich durchgeführt werden konnten [vgl. Stahl-2019], wird an diesem Beispiel die Bedeutung einer kontinuierlichen Prozessführung und -überwachung sowie Homogenisierung des Brennstoffs deutlich.

Nicht zuletzt ist der Einsatz von Laub insbesondere bei sehr nassem Laub nur getrocknet empfehlenswert. Zudem sollte auch eine Kompaktierung zur Reduzierung des Volumens erfolgen. Diese Prozessschritte sind ökonomisch nur abbildbar, wenn die Anlagentechnik mit hoher Auslastung genutzt werden kann und Entsorgungskosten für das Laub sowie die Einsparung von alternativen Brennstoffkosten in einem passenden Verhältnis sind [vgl. Stahl-2019].

AUSBLICK

Die Nutzung eigener biogener Ressourcen zur Erzeugung von klimaneutralem Strom und Wärme ist für viele Kommunen von Bedeutung. Eine Rolle spielt dabei neben dem Einsparen von Energiekosten auch eine mögliche Senkung von Entsorgungs- oder Verwertungskosten durch eine alternative Verwendung von Laub.

Im Rahmen des Projekts konnte die Datenbasis für unterschiedliche Laubfraktionen sowie für verschiedene Laubaufbereitungstechniken deutlich erweitert werden. Es zeigte sich beispielsweise, dass bereits eine recht einfache Siebtechnik mittels Trommelsieb wirkungsvoll Steine und Verunreinigungen aus Laub entfernen konnte, wenngleich der (Fein-)Ascheanteil nur leicht reduzierbar war. Daraus lässt sich schließen, dass möglichst saubere Laubfraktionen für eine weitere energetische Verwertung genutzt werden sollten. Dies ist vor allem bei Parklaub und Laub aus Gartensammlung und Laubsammelkörben der Fall.

Für eine energetische Verwertung in einer Biomassefeuerung sollte eine Homogenisierung des Brennstoffs erfolgen, z. B. durch Mischung mit Holz. Der Einfluss auf dabei entstehende Emissionen sollte an einem Biomassekraftwerk mit entsprechender Rauchgasreinigungseinrichtung sowie einer kontinuierlichen Überwachung getestet werden.

LITERATUR

[BioAbfV]: Bioabfallverordnung (BioAbfV) vom 4. April 2013 (BGBl. I S. 658), zuletzt geändert durch Artikel I der Verordnung vom 28. April 2022 (BGBl. I S. 700; 2023 I Nr. 153)

[DüMV]: Düngemittelverordnung (DüMV) V. v. 05.12.2012 BGBl. I S. 2482; zuletzt geändert durch Artikel I V. v. 02.10.2019 BGBl. I S. 1414

[Stahl-2019]: 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.

HERAUSGEBENDE Tina Händler, Joshua Röbisch

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 2023-2024: Flexibilisierung &
alternative Brennstoffe, Leipzig 2025.

GESCHÄFTSFÜHRUNG Prof. Dr. mont. Michael Nelles
(wiss. Geschäftsführer)
Dr. Christoph Krukenkamp
(admin. Geschäftsführer)

REDAKTION/V.I.S.D.P. Tina Händler

LAYOUT & SATZ Joshua Röbisch

BILDER Diverse Bilder, sofern nicht am Bild vermerkt:
© DBFZ.
Titelgestaltung: Joshua Röbisch

Das DBFZ ist nicht verantwortlich für den Inhalt
der eingereichten Beiträge. Die Verantwortung
für die Texte sowie der Bilder/Grafiken liegt bei
den Autor:innen.

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

© 2025 Deutsches Biomasseforschungszentrum
gemeinnützige GmbH

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

ISSN: 2701-1860 (online)

ISBN: 978-3-949807-13-8

DOI: 10.48480/mraf-xv75

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Klimaschutz

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Projektträger:



projektträger
jülich

Begleitvorhaben:

