



FOCUS ON

Bioenergie im Strom- und Wärmemarkt

Projektergebnisse 2021-2022





Wenn Sie das nächste Mal nach einer Projektidee suchen, schauen Sie doch vorher bei uns vorbei:

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



Bevor Sie das nächste Mal einen Projektantrag schreiben, schauen Sie doch vorher bei uns vorbei:

EDITORIAL

Die energetische Verwertung von Biomasse liefert einen wichtigen Beitrag zum Ausbau der erneuerbaren Energien. Das Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) fördert deshalb die Weiterentwicklung der energetischen Biomassenutzung und nimmt dabei die Nutzung von ohnehin anfallenden Rest- und Abfallstoffen immer mehr in den Blick. Vielversprechende Forschungsergebnisse sollen noch schneller in der Praxis umgesetzt werden und damit den Technologie- und Innovationstransfer für eine erfolgreiche Energiewende beschleunigen.

Im 7. Energieforschungsprogramm »Innovationen für die Energiewende« wird der Förderbereich »Energetische Nutzung biogener Rest- und Abfallstoffe« mit rund 10 Mio. Euro jährlich (2021) gefördert.

Dazu unterstützt das Ministerium vor allem praxisorientierte Lösungen mit Demonstrations- und Pilotcharakter, die Flexibilisierung der Strom- und Wärmeerzeugung aus Biomasse möglich machen. Systemintegration und Sektorkopplung sowie die erfolgreiche Kombination von Anlagen und Konzepten zur effizienten Nutzung von Biomasse sind weitere wesentliche Aspekte der Forschungsförderung. Damit werden wesentliche Möglichkeiten von Biomasse für eine schnelle Klimagasreduktion im Strom- und Wärmesektor erschlossen und die Versorgungssicherheit in zunehmend erneuerbaren Energiesystemen nachhaltig verbessert.

Hierfür wurden in den letzten Jahren neue Lösungen entwickelt, die im aktuellen Fokusheft »Bioenergie im Strom- und Wärmemarkt« vorgestellt werden:

Fortschritte gibt es bei der Effizienzsteigerung durch verbesserte Auswahl und Vorbehandlung der Rest- und Abfallstoffe, wie die Ergebnisse der Projekte BioAuto, Sieb-OPTI, BiotAB und BioRESt zeigen. Die stetige Optimierung von Biogasanlagen wurde beispielsweise in den Projekten ThermoFlexWave, FLEXSIGNAL und BioHy vorangetrieben. Neben der energetischen Nutzung ist auch die mögliche stoffliche Verwertung von Nebenprodukten ein Alleinstellungsmerkmal der Umwandlung von Biomasse. Die Projekte Klischga und BioBrick waren damit so erfolgreich, dass sie bereits in Folgeprojekten im Förderbereich weiterforschen.

Von kleinen dezentralen Anlagen wie bei NovoHTK bis hin zur kommunalen Entsorgungsdienstleistung von Grüngut wie in GreenSelect hat sich Bioenergie als wichtiger Bestandteil in einem erneuerbaren Energiesystem etabliert. Diesen Weg wollen wir mit neuen Ideen fortsetzen und wünschen Ihnen eine spannende Lektüre.

Wir bedanken uns bei allen Autor:innen sowie den Projektpartner:innen für Ihre interessanten Beiträge und beim BMWK für die Förderung einer intelligenten und passgenauen Energieform, der Bioenergie.

Ihre Begleitforschung



SYSTEMATISIERUNG

Reststoff-, Wärme und Stromnutzung

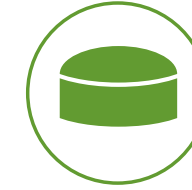
- 8 Marvin Scherzinger, Tim Kulbeik, Martin Kaltschmitt
BioAuto
Optimierung der thermischen Biomassenutzung durch Autoklavierung
- 16 Felix Richter, Axel Hüttner, Werner Sprick, Thomas Turk
GreenSelect
Optimierte Nutzung vergärbare Grüngutchargen durch selektive kommunale Erfassung und Konservierung
- 28 Björn Schwarz, Claudia Kirsten
KoSaTZ
Behandlung und kombinierter Einsatz von Stroh- und Getreideausputzmischungen für eine Biogas-Technologieketten mit Zukunft
- 42 Felix Richter, Axel Hüttner, Thomas Turk
Sieb-OPTI
Optimierte Verwertung von Siebresten aus Biogutvergärungs- und -kompostierungsanlagen
- 52 Ingolf Seick, Jürgen Wiese
ThermoFlexWave
Weiterentwicklung und Validierung einer Technologie zur internen Wärmespeicherung für eine effizientere Wärmenutzung von Biogasanlagen



BIOMASSEVERBRENNUNG & -VERGASUNG

Alternative Brennstoffe, dezentrale Vergasung und Flexibilisierung

- 62 Martin Meiller, Michael Meiler; Holger Burkhardt, Werner Klenk, Dominik Alt, Sebastian Ernst
BioBrick
Biomasse als Schlüssel für eine nachhaltige Produktion von Ziegeln – Energieversorgung, Erzeugung von Prozesswärme und stoffliche Verwertung von Vergaserrückständen
- 70 Ali Cemal Benim, Markus Heese
Biomassteg
Entwicklung und Erprobung der gekoppelten Strom- und Wärmeerzeugung durch Biomassenutzung mittels thermoelektrischer Generatoren
- 78 Jürgen Reichelt, Britta Bergfeldt, Gudrun Pfrang-Stotz, Markus Ricker, Edwin Karrer
BiotAB
Effizienzsteigerung bei der Energiegewinnung in Biomassekraftwerken durch die technische Anwendung eines Biobrennstoffkataloges
- 84 Johannes Rösler, Andreas Häusler; Stefan Eder
Klischga
Biochemisches »Klima-Schutz-Gas« aus hochfesten Industrie-Misch-Pellets zur Industriegas-Erzeugung
- 92 Andreas Ewald, Sebastian Fendt, Hartmut Spliethoff, Robert Völkl, Florian Henze
PyroGas
Dezentrale Verwertung von Abfall-/Reststoffen mittels Pyrolyse und anschließender Flugstromvergasung zur gasmotorischen Nutzung



BIOGAS

Emissionsminderung, Effizienzsteigerung, Flexibilisierung, optimierter Einsatz von Rest- & Abfallstoffen

- 104 Robert Manig
BioHy
Energetische und ökonomische Optimierung von Biogasanlagen durch die getrennte Erzeugung von Biowasserstoff und Biomethan
- 108 Marion Schomaker, Sören Kamphus, Elmar Brüggling
BioReSt
Regionale Vorbehandlungskonzepte zur nachhaltigen Reststoffnutzung in Biogasanlagen
- 118 Anne Deutschmann, Gregor Ganzer, Andreas Fastenau, Bernd Schmitz
FlexPump
Entwicklung und Demonstration eines pumpenbasierten Mischkonzeptes für den flexiblen, effizienzoptimierten und multifeedstockfähigen Betrieb von Biogasanlagen
- 124 Martin Dotzauer
FLEXSIGNAL
Konzepte für eine bedarfsorientierte, kosteneffiziente und klimaschonende Stromerzeugung aus Bioenergieanlagen
- 130 Franziska Schäfer, Leandro Janke, Jürgen Pröter, Alfons Himmelstoss, Benjamin Rocktäschel, Falko Niebling
NovoHTK
Neuartiges Verfahren zur Monovergärung von Hühnertrockenkot
- 142 Eike Janesch, Jens Zosel, Pierre Haider, Stefan Junne
ProPhaSep
Flexibilisierung der Biogasproduktion durch Prozessphasenseparation und Dünnschlammrezirkulation

EXKURS // WASSERSTOFF



- 154 Caroline Autenrieth, Robin Ghosh
RhoTech
Neue Strategie zur Wasserstoff-Produktion aus Frucht- und Molkerei-Abfällen mit Hilfe von Purpurbakterien

SYSTEMATISIERUNG

Reststoff-, Wärme und Stromnutzung



BioAuto

Marvin Scherzinger, Tim Kulbeik, Martin Kaltschmitt

Optimierung der thermischen Biomassenutzung durch Autoklavierung

Zusammenfassung

Die experimentellen Untersuchungen im Labor- und Technikumsmaßstab haben gezeigt, dass das Ziel der Herstellung eines höherwertigen biogenen Festbrennstoffs durch die Autoklavierung erreicht werden kann. Dabei konnte u. a. nachgewiesen werden, dass der Brennwert autoklavierter Abfallbiomasse um bis zu 12 % im Vergleich zum unbehandelten Ausgangsmaterial erhöht und auch eine signifikante Reduzierung des Wassergehalts um bis zu 25 % erzielt werden kann. Damit biogene Stoffströme jedoch autoklaviert werden können, müssen einige Anforderungen an den jeweiligen Stoffstrom bzw. an die Verfahrenstechnik berücksichtigt werden. So sollte die Ausgangsbiomasse u. a. einen Wassergehalt von mind. 50 Mas.-% aufweisen und eine kontinuierliche Durchmischung innerhalb des Autoklaven ist bei der Behandlung zu gewährleisten.

Themenschwerpunkte

- Nutzung biogener Rest- und Abfallstoffströme
- Thermochemische Verfahren (Autoklavierung)
- Verwertung organisch belasteter Abwässer (Nebenstoffstrom) mittels anaerober Fermentation
- Techno-ökonomische und ökologische Analyse von Gesamtprozessen zur Festbrennstoff-Herstellung unter Nutzung der Autoklavierung

Ziele

Im Rahmen des Projekts »BioAuto« sollte untersucht werden, inwiefern abfallstämmige Biomasse (z. B. Laub und Grünschnitt) mit Hilfe der Autoklavierung aufbereitet werden kann, um einen Festbrennstoff mit definierten Brennstoffeigenschaften herzustellen. Im Fokus der Untersuchungen stand neben einer Erhöhung des Brenn- und Heizwerts die Abtrennung von Schad- und Störstoffen (u. a. Sand) sowie die Verbesserung der Lagerfähigkeit (u. a. Veränderungen der Hydrophobizität). Zudem sollten auch die anfallenden Nebenströme des Verfahrens untersucht werden, wobei eine möglichst vollständige Nutzung der Ausgangsbiomasse realisiert werden sollte. Zuletzt sollte aufgezeigt werden, ob die Autoklavierung im Vergleich zu bestehenden Vorbehandlungstechniken Vorteile aufweist bzw. unter welchen Rahmenbedingungen die Autoklavierung sinnvoll zum Einsatz gebracht werden kann.

Martin Kaltschmitt: »Durch ein innovatives Verfahren auf Basis der Autoklavierung soll in zweierlei Hinsicht ein Mehrwert geschaffen werden. Zum einen wird durch die verbesserten Brennstoffeigenschaften der behandelten biogenen Rohstoffe deren thermische Nutzung kostengünstiger. Und zum anderen werden klimaschädliche Emissionen reduziert, da fossile Brennstoffe teilweise weitergehend substituiert werden können.«

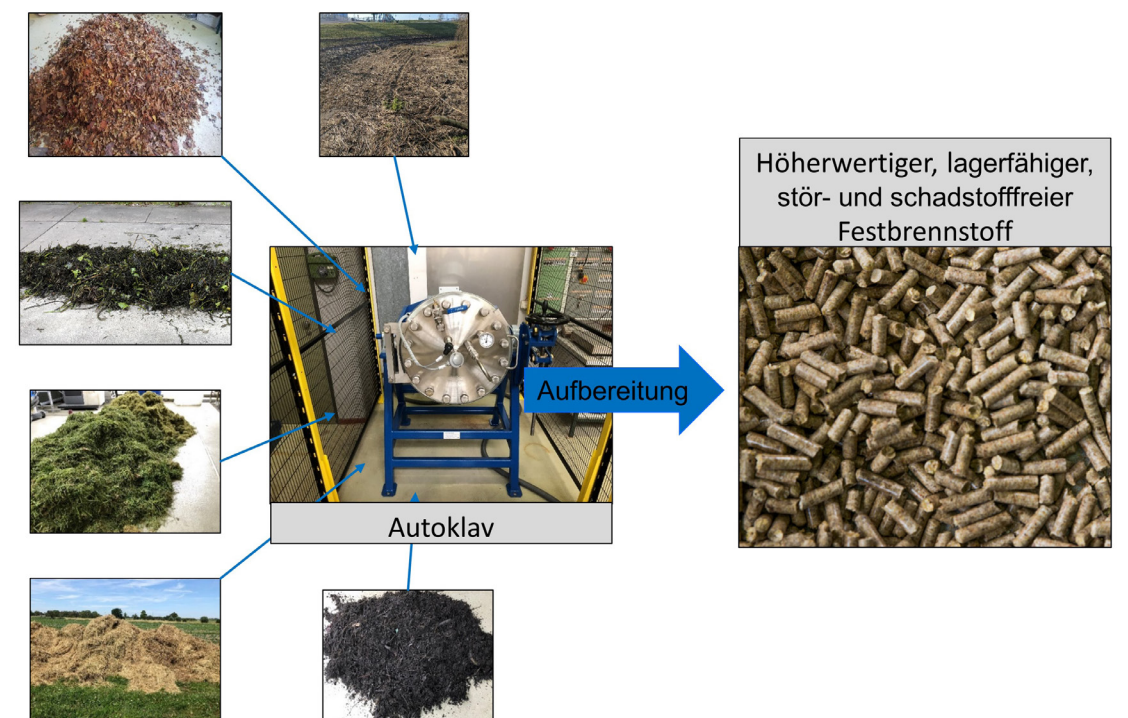


Abbildung 1:

Aufbereitung verschiedener biogener Reststoffströme zu höherwertigen Festbrennstoffen durch Autoklavierung. (© Marvin Scherzinger, Tim Kulbeik, Martin Kaltschmitt)

FKZ-Nr.: 03KB117
 Laufzeit: 01.02.2017 — 31.01.2021
 Zuwendungssumme: 320.280,69 €

KOORDINATION:
 Technische Universität Hamburg (TUHH)
 Institut für Umwelttechnik und Energiewirtschaft (IUE)
 Marvin Scherzinger
 21073 Hamburg
www.tuhh.de/iue/home.html

PROJEKTLEITUNG:
 Prof. Dr.-Ing. Martin Kaltschmitt

Direkte Ansprechperson
 Dr. techn. Marvin Scherzinger
 +49 (40) 42878 4829
marvin.scherzinger@tuhh.de

PARTNER:
 ETH Umweltservice GmbH
 Mattentwiete 5
 Tim Kulbeik
 20457 Hamburg
www.eth-umweltservice.de/

Stadtreinigung Hamburg
 Anstalt des öffentlichen Rechts
 Bullerdeich 15
 Martin Kaltschmitt
 20539 Hamburg
www.stadtreinigung.hamburg/
 Kontakt:

Kernbotschaften

- Die brennstofftechnischen Eigenschaften biogener Reststoffe (u. a. Brennwert und Lagerfähigkeit) können durch eine Autoklavierung merklich verbessert werden.
- Eine einfachere Abtrennbarkeit von Stör- und Schadstoffen durch die Autoklavierung konnte nicht nachgewiesen werden.
- Der Energiebedarf bei einer Vermahlung autoklavierter Biomasse ist im Vergleich zum Energiebedarf der Vermahlung der unbehandelten Ausgangsbiomasse geringer (dies ist u. a. ein Vorteil, wenn aus der Biomasse Brennstoffpellets hergestellt werden sollen).
- Die Autoklavierung sollte nicht als alleinstehendes Verfahren, sondern im Verbund mit anderen Aufbereitungsverfahren (u. a. Reinigung, mechanische Entwässerung und Verdichtung) angewendet werden.

summary (eng.)

Experimental investigations on a laboratory and pilot plant scale have shown that the goal of producing a high-quality biogenic solid fuel can be achieved through autoclaving. Among other things, it was demonstrated that the calorific value of autoclaved waste biomass can be increased by up to 12 % compared to the untreated feedstock and that a significant reduction of the water content by up to 25 % can also be achieved. However, to treat biogenic material streams within an autoclave, some requirements for the respective material stream or process technology must be taken into account. For example, the initial biomass should have a water content of at least 50 % by mass and continuous mixing within the autoclave must be ensured during treatment.

key messages (eng.)

- The fuel properties of biogenic residues (e.g., calorific value and storability) can be improved by a treatment within an autoclave.
- An improved separability of impurities and pollutants through autoclaving could not be proven.
- The energy requirement for grinding autoclaved biomass is lower than the energy requirement for grinding untreated biomass (this is an advantage, for example, if fuel pellets are to be produced from the biomass).
- Autoclaving should not be used as a stand-alone process, but in conjunction with other treatment processes (including cleaning, mechanical dewatering and compaction).

Methodik Maßnahmen

- Ermittlung der Biomassepotenziale (Im Rahmen der durchgeführten Ermittlung der Biomassepotenziale wurden verschiedene biogene Stoffströme, die in Hamburg in relevanten Mengen anfallen, quantifiziert. Anschließend wurden zudem ihre chemische Zusammensetzung sowie ausgewählte physikalisch-stoffliche Stoffgrößen ermittelt. Basierend auf diesen Erkenntnissen wurde eine Bewertungsmatrix erstellt, in der die prinzipielle Eignung als Ausgangsstoff zur Herstellung eines biogenen Festbrennstoffs vergleichend dargestellt wurde.)
- Vorversuche zur Autoklavierung (Die Vorversuche zur Autoklavierung erfolgten in einem nicht durchmischten Autoklav mit einem Volumen von 3 L. Es wurde ermittelt, wie und in welchem Maße die einzusetzenden biogenen Stoffströme konditioniert werden müssen, um einen störungsfreien Betrieb der Anlage zu gewährleisten.)

- Technikumsversuche zur Autoklavierung (Am Institut für Umwelttechnik und Energiewirtschaft der Technischen Universität Hamburg wurde ein Versuchsreaktor im Technikumsmaßstab mit einem Volumen von 65 L errichtet. Unter Verwendung der statistischen Versuchsplanung wurden in diesem Versuchsreaktor eine Vielzahl verschiedener Biomassestoffströme bei unterschiedlichen Prozessparametern autoklaviert. Dadurch konnten für verschiedene Stoffströme die jeweils am besten geeigneten Prozessparameter bezüglich der Verbesserung bestimmter brennstofftechnischer Eigenschaften ermittelt werden.)
- Vergleich mit alternativen Verfahren zur Herstellung von Festbrennstoffen (Innerhalb dieser Maßnahme wurden insbesondere artverwandte Verfahren (z. B. Torrefizierung und hydrothermale Carbonisierung), die ebenfalls wärmeinduziert ablaufen, mit der Autoklavierung verglichen. Dabei wurde speziell auf die Prozessparameter der Verfahren, die Anforderungen an die zu behandelnde Biomasse sowie die Produkteigenschaften eingegangen.)
- Ökonomischer und ökologischer Vergleich (Ein ökonomischer und ökologischer Vergleich erfolgte für ausgewählte Gesamtkonzepte, in denen eine Festbrennstoffherstellung aus verschiedenen biogenen Stoffströmen sowohl mit als auch ohne die Implementierung der Autoklavierung stattfindet. Kern dieses Vergleichs war die Ermittlung der Massen- und Energieströme sowie der anfallenden Kosten im jeweiligen Gesamtkonzept. Die ökonomische Bewertung erfolgte dann mit Hilfe der Annuitätenmethode durch Ermittlung der spezifischen Gestehungskosten der biogenen Festbrennstoffe nach VDI 2067 und VDI 6025. Für die ökologische Bewertung wurde eine Lebenszyklusanalyse nach DIN EN ISO 14044 durchgeführt.)

Ergebnisse auf einen Blick

PUBLIKATION:

- Scherzinger M, Kulbeik T, Grumbrecht R et al. (2019): Wärmeinduzierte Vorbehandlung lignocellulosehaltiger Biomassen – Prozesse, Verfahren und deren Einordnung. Chemie Ingenieur Technik 91(4): 403–419. doi: 10.1002/cite.201800075
- Scherzinger M, Kaltschmitt M (2019): Heat Induced Pre-Treatment Technologies for Lignocellulosic Biomass - A Comparison of Different Processes and Techniques. J. Ecol. Eng. 20(7): 134–146. doi: 10.12911/22998993/109876
- Scherzinger M, Kulbeik T, Kaltschmitt M (2020): Autoclave pre-treatment of green wastes – Effects of temperature, residence time and rotation speed on fuel properties. Fuel 273: 117796. doi: 10.1016/j.fuel.2020.117796
- Kulbeik T, Scherzinger M, Höfer I et al. (2021): Autoclave pre-treatment of foliage – Effects of temperature, residence time and water content on solid biofuel properties. Renewable Energy 171: 275–286. doi: 10.1016/j.renene.2021.02.090

WISSENSCHAFTLICHE VORTRÄGE:

- Scherzinger M, Kaltschmitt M (2020) Optimization of thermal biomass utilization by autoclave pre-treatment, 6. Mitteleuropäische Biomassekonferenz CEBC 2020

BUCHBEITRÄGE:

- Christ D, Scherzinger M, Neuling U, Kaltschmitt M (2017) Thermochemical conversion of solid biofuels: Processes and Techniques. In: Meyers RA (Ed.): Encyclopedia of Sustainability Science and Technology, Springer New York, New York, USA, pp 1–22
- Christ D, Scherzinger M, Neuling U, Kaltschmitt M (2019) Thermochemical conversion of solid biofuels: Processes and Techniques. In: Kaltschmitt M (Ed.): Energy from Organic Materials (Biomass), Springer New York, New York, USA, pp 393–413

ANLAGE:

- Technikumsanlage
- Laboranlage
- Verfahren

DATEN & METHODEN:

- Modell/Modellierung
- Szenarien
- Messreihe/-programm

MARKT:

- Marktprognosen

Tabelle 1:

Überblick über einige im Jahresverlauf anfallende biogene Stoffströme (blau ausgefüllte Bereiche kennzeichnen die Monate, in denen die Biomassen überwiegend anfallen)

Monate	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Stoffstrom												
Anfallzeitraum												
Menge in t												
Stoffstrom												
Anfallzeitraum												
Menge in t												
Stoffstrom												
Anfallzeitraum												
Menge in t												
Stoffstrom												
Anfallzeitraum												
Menge in t												
Stoffstrom												
Anfallzeitraum												
Menge in t												

Darstellung der Ergebnisse

BIOMASSE POTENZIALE

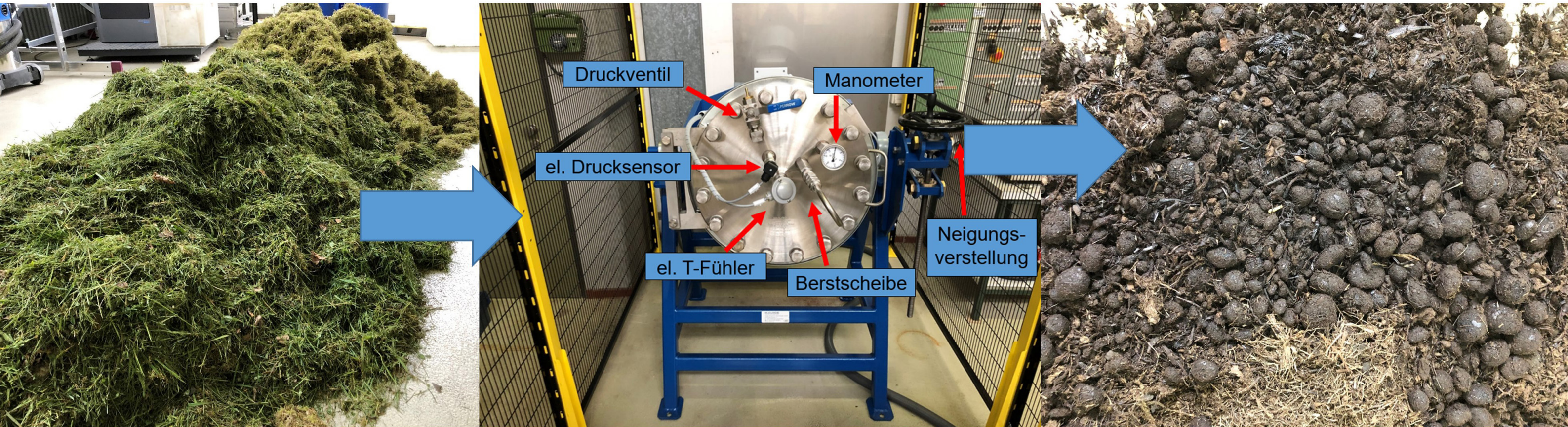
Im Gebiet der Freien und Hansestadt Hamburg fallen jedes Jahr große Mengen an Biomasse an, die derzeit noch nicht vollständig verwertet werden. Ein Überblick über einige ausgewählte biogene Stoffströme, die im Projekt untersucht wurden, wird in Tabelle 1 gegeben. Außerdem wird deren zeitlicher Anfall sowie die ungefähre Anfallmenge (bezogen auf die Frischmasse (FM)) abgebildet.

Abbildung 2:

Unbehandelter Grasschnitt (links), Technikumsautoklav (Mitte) und autoklavierter Grasschnitt (rechts) © Marvin Scherzinger, Tim Kulbeik, Martin Kaltschmitt

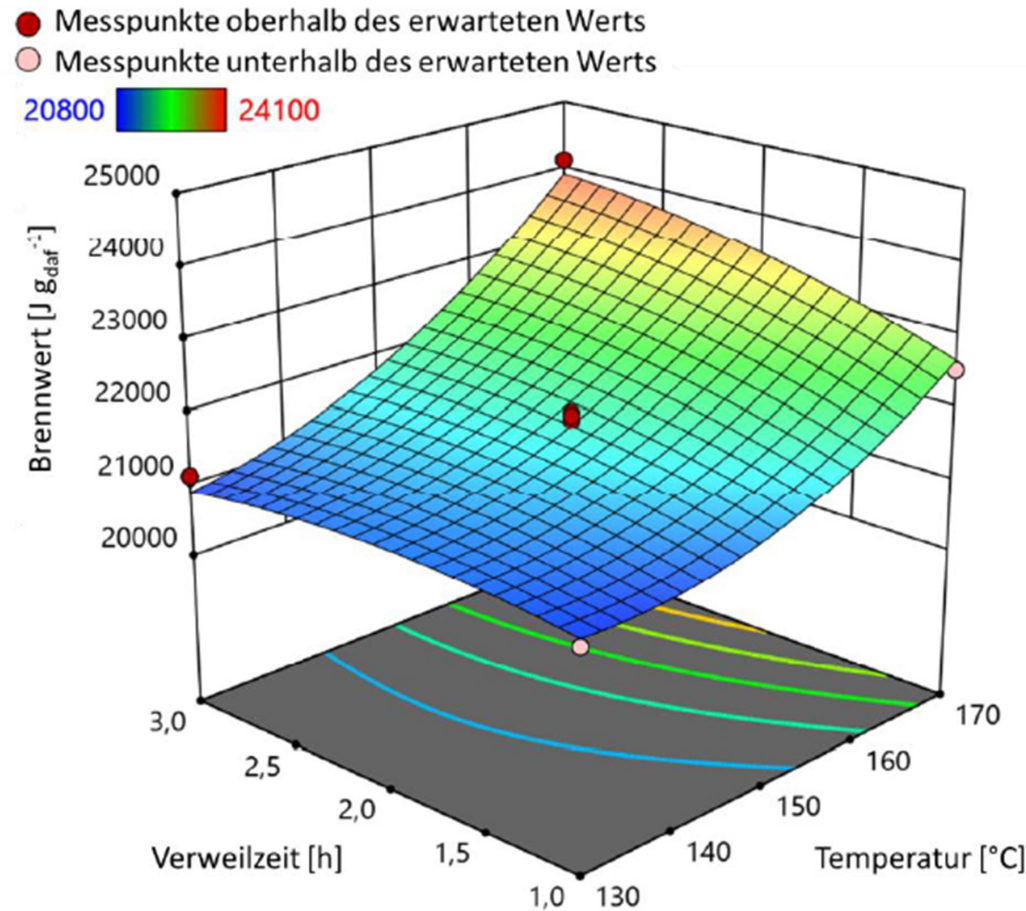
VERÄNDERUNG BRENNSTOFFTECHNISCHER EIGENSCHAFTEN DURCH DIE AUTOKLAVIERUNG AM BEISPIEL GRASSCHNITT

In Abbildung 2 wird am Beispiel von Grasschnitt die optische Veränderung, die durch eine zweistündige Autoklavierung bei einer Zieltemperatur von 170 °C ausgelöst wird, veranschaulicht. Dabei findet nicht nur eine deutliche Farbveränderung statt, sondern es wird auch eine Agglomeration der Grashalme bewirkt.



Positive Veränderungen durch die Autoklavierung waren im Fall von Grasschnitt eine Erhöhung des Brennwertes, der Mahlbarkeit, der Schüttdichte sowie eine Verringerung des Wassergehalts und eine erhöhte Hydrophobizität. Dabei hatte insbesondere die Behandlungstemperatur einen starken Einfluss auf die Effektstärke der Veränderungen. Dies wird am Beispiel des Brennwertes (bezogen auf trockene und aschefreie Bezugsbasis), dargestellt in Abbildung 3, deutlich.

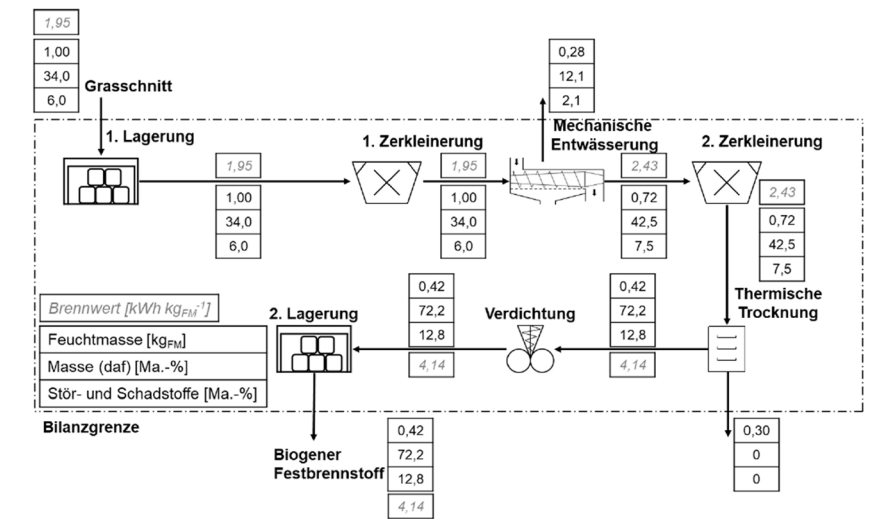
Abbildung 3:
Oberflächenmodell
zur Approximation des
Brennwertes (© Marvin
Scherzinger, Tim Kulbeik,
Martin Kaltschmitt)



BEISPIEL-KONZEPT ZUR EINBINDUNG DER AUTOKLAVIERUNG IN EIN BIOMASSEAUFBEREITUNGSVERFAHREN

Im Rahmen der durchgeführten Untersuchungen wurde festgestellt, dass die Autoklavierung nicht als alleinstehendes Verfahren zur Herstellung eines biogenen Festbrennstoffs eingesetzt werden kann. Jedoch kann diese Option einen wesentlichen Teil innerhalb einer Prozesskette mit diesem Ziel darstellen. Beispielhaft ist eine solche Prozesskette in Abbildung 4 dargestellt. Die einzelnen Prozesse sind dabei neben der Autoklavierung die Lagerung, Reinigung, Zerkleinerung, mechanischer Entwässerung, thermische Trocknung und Verdichtung der Biomasse.

Abbildung 4:
Exemplarische Prozesskette zur
Herstellung eines Festbrennstoffs
aus Grasschnitt unter Einbindung
der Autoklavierung
(© Marvin Scherzinger, Tim Kulbeik,
Martin Kaltschmitt)



ÖKONOMISCHE ERFOLGSAUSSICHTEN

Während des Projekts wurden verschiedene Möglichkeiten betrachtet, die Autoklavierung in einen Biomasse-Aufbereitungspfad zu integrieren, um einen höherwertigen Festbrennstoff zu erzeugen. Unter Berücksichtigung aller Kosten, die bei einer solchen Aufbereitung anfallen, wurden die spezifischen Gestehungskosten u. a. für Festbrennstoffe berechnet, die nach dem in Abbildung 3 gezeigten Verfahren hergestellt werden. Durch den teils erheblichen Aufwand bei der Reinigung, Entwässerung, Autoklavierung und Trocknung wurden für alle im Projekt untersuchten Szenarien höhere Brennstoff-Gestehungskosten ermittelt, als sie beispielsweise bei der Herstellung von Holzpellets anfallen. Daher sind die ökonomischen Erfolgsaussichten des Verfahrens zur Herstellung von Festbrennstoffen als eher gering einzuschätzen. Eine möglicherweise ökonomisch darstellbare Einbindung der Autoklavierung könnte jedoch z. B. bei Verfahren gegeben sein, bei denen Biomasse aufgeschlossen werden muss (z. B. in Bioraffinerieprozessen).

Ausblick

Die Herstellung eines höherwertigen biogenen Festbrennstoffs durch Autoklavierung konnte im Projekt »BioAuto« experimentell im Technikumsmaßstab nachgewiesen werden. Zum Zeitpunkt des Projektabschlusses (2021) konnten eine Wettbewerbsfähigkeit des Verfahrens auf Basis einer Kostenrechnung nicht nachgewiesen werden. Veränderte Rahmenbedingungen wie z. B. der gegenwärtig stark gestiegene Preis für Brennstoffe (Stand 2022) können aber dazu führen, dass das Verfahren u. U. in Zukunft wettbewerbsfähig werden könnte. Bevor eine industrielle Umsetzung erfolgen kann, müssen in diesem Fall aber noch einige Forschungsfragen geklärt werden. Insbesondere muss untersucht werden, wie stark verunreinigte biogene Stoffströme mit möglichst geringem energetischen und materiellen Aufwand gereinigt werden können. Zudem müssten die im Technikumsmaßstab erzielten Ergebnisse in einer Demonstrationsanlage verifiziert werden, um eine großtechnische Umsetzung besser bewerten zu können.

Weitere Informationen

- www.tuhh.de/iue/forschung/projekte/bioauto.html
- www.energetische-biomassenutzung.de/projekte-partner/details/project/show/Project/BioAuto-484

GreenSelect

Felix Richter, Axel Hüttner,
Werner Sprick, Thomas Turk

Optimierte Nutzung vergärbare Grünutchargen durch selektive kommunale Erfassung und Konservierung

Zusammenfassung

Hintergründe des Projekts GreenSelect waren die unzureichende separate Erfassung von krautigem Grünut über bestehende Systeme (ca. 45 % des Potenzi- als) sowie die nur marginale Verwertung von krautigem Grünut aus separater Grünuttsammlung im Sinne einer Kaskadennutzung (energetisch in einer Vergä- rungsanlage sowie stofflich über den nachkompostierten Gärrest) mit der damit verbundenen besseren Auslastung bestehender Biogutvergärungsanlagen, vor allem in den Wintermonaten. In Versuchen mit Praxispartnern zeigte sich, dass eine separate Erfassung von krautigem Grünut oder Rasenschnitt vor allem im Bringsystem praktikabel ist. Die Silierung von krautigem Grünut konnte in den Praxisversuchen sowohl in Form von Ballensilage als auch im Fahrsilo erfolgreich durchgeführt werden.

Die auf Grundlage der Praxisversuche entwickelte modellhafte Wertschöpfungs- kette in sechs Varianten zeigte, dass die energetisch-stoffliche Verwertung von gut vergärbaren und silierten Grünutfraktionen bei entsprechenden Rahmen- bedingungen Vorteile in Bezug auf die Wirtschaftlichkeit und die Einsparung von Treibhausgasen gegenüber der reinen Kompostierung bieten kann.

Ziele

- Detaillierte Betrachtung der für eine energetische Nutzung verfügbaren Potenziale und des Ist-Stands der Verwertung von krautigem Grünut
- Analyse der rechtlichen Rahmenbedingungen für die Erfassung und Verwertung von krautigem Grünut
- Erprobung verschiedener selektiver Sammelsysteme und verschiede- ner Silierungstechniken für krautiges Grünut in der Praxis
- Analyse der Verwertung des als Silage konservierten krautigen Grün- guts in Biogutvergärungsanlagen
- Entwicklung einer modellhaften Wertschöpfungskette für krautiges Grünut in unterschiedlichen Varianten und Analyse von Stoff- und Energieflüssen
- Ökonomische Bewertung der unterschiedlichen Varianten der modell- haften Wertschöpfungskette
- Bewertung der Klima- und Ressourcenrelevanz der unterschiedlichen Varianten der modellhaften Wertschöpfungskette
- Empfehlungen für die Praxis zu einer optimierten Erfassung und energe- tischen Verwertung von krautigem Grünut

Thomas Turk: »Eine Integration der Silierung von krautigem energiereichen Grünut in eine praxisorientierte Wertschöpfungskette, die mit einer selektiven kommu- nalen Erfassung beginnt und mit einer Mehrfachnutzung durch Vergärung mit anschließender Kompostierung des Gärrests endet, ist ein zusätzlicher Beitrag für eine optimierte Anlagenauslastung und Energiegewinnung aus Grünut.«



(© Witzenhausen-Institut)

FKZ-Nr.: 03KB155
Laufzeit: 01.10.2019 – 31.12.2021
Zuwendungssumme: 138.990 €

KOORDINATION:
**Witzenhausen-Institut für Abfall,
Umwelt und Energie GmbH**
Werner-Eisenberg-Weg 1
37213 Witzenhausen
www.witzenhausen-institut.de

PROJEKTLEITUNG:
Thomas Turk

Direkte Ansprechperson
Dr. Felix Richter
+49 (0)5542 9380 25
f.richter@witzenhausen-institut.de

Themen schwerpunkte

- Krautiges Grüngut
- Stofflich-energetische Verwertung
- Potenzialanalyse
- Silierung
- Vergärung
- Wertschöpfungsketten

Kernbotschaften

- Um die typische unzureichende Auslastung von Biogutvergärungsanlagen in den Wintermonaten ausgleichen zu können, eignen sich durch Silierung konserviertes krautiges Grüngut und Rasenschnitt als Substrate.
- Eine separate Erfassung dieser Stoffströme ist vor allem im Bringsystem (z. B. Wertstoffhöfe) praktikabel.
- Eine Silierung des krautigen Grünguts bzw. des Rasenschnitts funktioniert in der Praxis sowohl als Ballensilage als auch im Fahrsilo, die jeweiligen Vor- und Nachteile müssen individuell abgewogen werden.
- Die Vergärung des krautigen Grünguts bzw. des Rasenschnitts mit anschließender Kompostierung der Gärreste kann Vorteile in Bezug auf Wirtschaftlichkeit und Treibhausgaseinsparung gegenüber einer reinen Kompostierung bringen. Dies gilt vor allem, wenn ein optimales Energienutzungskonzept mit sinnvoller Wärmenutzung zur Verfügung steht.

summary (engl.)

The background of the GreenSelect project was the insufficient separate collection of herbaceous green waste via existing systems (approx. 45% of the potential) and the only marginal use of herbaceous green waste from separate green waste collection in the sense of a cascade use (energetically in a fermentation plant and materially via the post-composted digestate) with the associated better utilization of existing organic waste fermentation plants, especially in the winter months. Trials with practice partners showed that a separate collection of herbaceous green waste is practicable, especially in the bring system. The ensiling of herbaceous green material could be carried out successfully both in the form of bale silage and in a bunker silo. The model value chain in six variants developed on the basis of the practical tests showed that the energy-material utilization of easily fermentable and ensiled green waste fractions can offer advantages in terms of economic efficiency and the saving of greenhouse gases compared to pure composting under the right framework conditions.

key messages (engl.)

- In order to be able to compensate for the typical insufficient utilization of organic waste fermentation plants in the winter months, herbaceous green waste and lawn clippings preserved by ensiling are suitable as substrates.
- A separate recording of these material flows is practicable, especially in the bring-it-yourself system (e.g. recycling depots).
- Ensiling herbaceous green waste or lawn clippings works in practice both as bale silage and in a silo, the respective advantages and disadvantages must be weighed up individually.

Methodik Maßnahmen

- The fermentation of herbaceous green waste or lawn clippings with subsequent composting of the fermentation residues can bring advantages in terms of economic efficiency and greenhouse gas savings compared to sole composting. This applies above all if an optimal energy utilization concept with sensible use of heat is available.
- Ist-Standsbetrachtung und Potenzialanalyse der Verwertung von krautigem Grüngut
- Analyse von rechtlichen Rahmenbedingungen
- Praxisversuche mit Entsorgern/Verwertern von krautigem Grüngut zu verschiedenen Systemen der separaten Erfassung, verschiedenen Silierungstechniken und Einbringung der Silage in Vergärungsanlagen
- Laboranalyse von Ausgangsmaterialien und Silagen im Hinblick auf vergärungstechnisch relevante Parameter
- Entwicklung einer modellhaften Wertschöpfungskette in sechs Varianten und Modellierung von Stoff- und Energieflüssen
- Bewertung der sechs Varianten der modellhaften Wertschöpfungskette hinsichtlich Ökonomie und Ökologie (Treibhausgaseinsparung, Ressourcen)
- Formulierung von Empfehlungen für die Praxis

Ergebnisse auf einen Blick

PUBLIKATION:

- Artikel in Fachzeitschrift: Müll und Abfall, 11/2022, 626-634
- Kern M, Raussen T (Hrsg.) (2022): Steigende Wertschätzung für die Produkte der Bioabfallwirtschaft. Witzenhausen. In: Witzenhausen-Institut. Neues aus Forschung und Praxis, 122-142.

DATEN & METHODEN:

- Praxisversuche mit Abfallwirtschaftsbetrieben
- Modellierung einer Wertschöpfungskette in sechs Varianten
- Szenarien der zukünftigen Verwertung von krautigem Grüngut

Darstellung der Ergebnisse

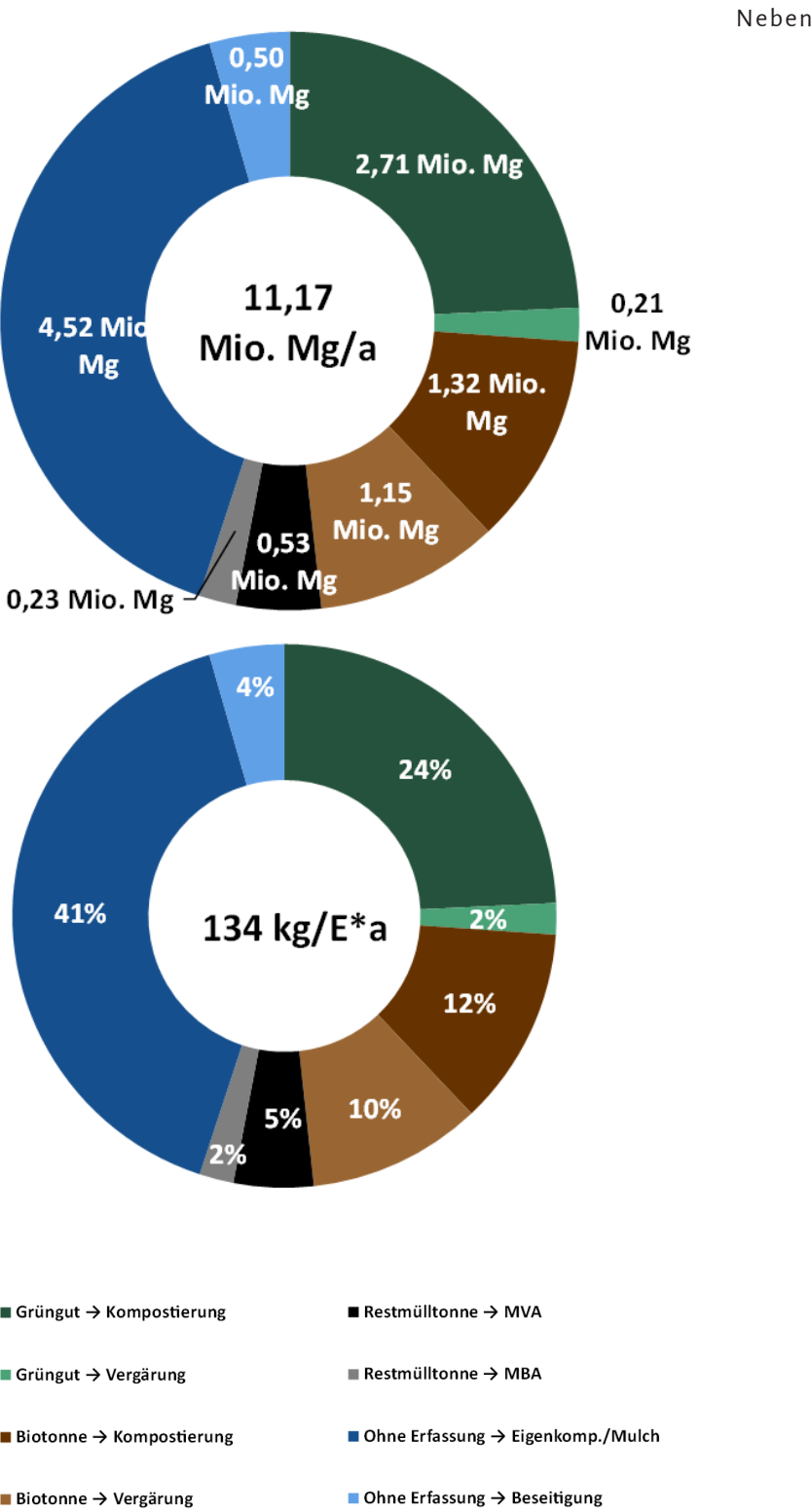
POTENZIALE UND IST-STAND DER VERWERTUNG VON KRAUTIGEM GRÜNGUT

Im Rahmen der Potenzial- und Ist-Standsbetrachtung wurde zunächst das theoretische Potenzial an krautigem Grüngut als flächenbezogenes Aufkommen von Garten- und Parkabfällen in Gärten von Privathaushalten sowie in Grünanlagen (Kleingärten, Parks, Grünflächen, etc.) im Siedlungsbereich abgeschätzt. Anschließend wurde der Ist-Stand der Grüngutentsorgung entsprechend den für das Jahr 2020 identifizierten Entsorgungs- und Verwertungswegen analysiert und daraus entsprechende Potenziale abgeleitet, die bereits genutzt oder derzeit noch ungenutzt bzw. nicht optimal genutzt werden.

Das theoretische Potenzial von krautigem Grüngut wurde über die Flächen von Privatgärten und von Grünanlagen in Deutschland, die durchschnittliche Grüngutmenge pro Fläche sowie einen durchschnittlichen krautigen Anteil von 50 % am gesamten Grüngut (Knappe et al., 2019) auf ca. 11 Mio. Mg/a bzw.

134 kg/E*a geschätzt. Im Jahr 2020 wurde dieses Potenzial zu einem Viertel im Rahmen der Grüngutsammlung und zu einem weiteren Viertel über die Biotonne erfasst (Abbildung 1). Vom krautigen Grüngut aus der Grüngutsammlung wurden nur etwa 7% einer Vergärung zugeführt, während dies bei der Biotonne ca. 46% waren.

Abbildung 1
Theoretisches Potenzial von
krautigem Grüngut mit dem
Ist-Stand der Entsorgung
im Jahr 2020
(© eigene Berechnung)



kleineren Mengen, die sich im Restmüll wiederfinden und entweder in Müllverbrennungsanlagen (MVA) oder mechanisch-biologischen Abfallbehandlungsanlagen (MBA) entsorgt werden, werden ca. 45% des theoretischen Potenzials nicht über bestehende Systeme erfasst. Der überwiegende Teil davon bleibt als Mulch auf den Flächen, wo dieses Grüngut anfällt (z. B. Laub oder Rasenschnitt), oder nimmt den Weg über die Eigenkompostierung in Privathaushalten. Grundsätzlich gehen hierbei wertvolle Reststoffpotenziale zur Bioenergieerzeugung verloren, weil Systeme der Erfassung und Konservierung nicht etabliert sind oder nicht genutzt werden.

ERPROBUNG SELEKTIVER SAMMELSYSTEME UND VERSCHIEDENER SILIERUNGSTECHNIKEN FÜR KRAUTIGES GRÜNGUT MIT PRAXISPARTNERN

Mit drei Praxispartnern, die jeder ein unterschiedliches Sammelsystem für krautiges Grüngut anwenden, wurden Versuche durchgeführt, die folgende Ziele hatten:

- 1) Erprobung und Dokumentation des praktischen Verfahrensablaufs des jeweiligen Sammelsystems
- 2) Vergleich der beiden Silierungsverfahren »Fahrsilo« und »Ballensilage« mit dem im jeweiligen Sammelsystem erfassten krautigen Grüngut im Hinblick auf Logistik und Kosten

Die drei Praxispartner und ihre jeweiligen Sammelsysteme waren:

- 1) Abfallwirtschaft Kreis Neuwied
 - Getrennterfassung von vergärbarem Grüngut aus Privathaushalten im Holsystem
- 2) Abfallwirtschaftsbetrieb Emsland
 - Getrennterfassung von krautigem Grüngut auf Wertstoffhöfen (Bringsystem)
- 3) Syndikat Minett-Kompost (Luxemburg)
 - Getrennterfassung von Rasenschnitt im Bringsystem

Die Versuche bei den Praxispartnern zeigten, dass eine separate Erfassung von krautigem Grüngut oder Rasenschnitt vor allem im Bringsystem praktikabel ist. Ein Holsystem ist dagegen logistisch deutlich aufwendiger und gerade im ländlichen Bereich mit hohen Fahrtkosten verbunden. Die Silierung von krautigem Grüngut konnte in den Praxisversuchen sowohl in Form von Ballensilage als auch im Fahrsilo erfolgreich durchgeführt werden, wobei sich bei der Ballensilage teilweise technische Probleme ergaben. Diese Technik funktionierte nur bei reinem Rasenschnitt störungsfrei. Vor- und Nachteile beider Verfahren sind in Tabelle 1 dargestellt. Tendenziell ist die Ballensilierung die teurere der beiden Varianten.

Tabelle 1
Gegenüberstellung der Vor- und Nachteile der Konservierung von Grüngut in einem Fahrsilo und als Rundballensilage
(© eigene Berechnung)

VORTEILE

FAHRSILO	RUNDBALLENSILAGE
■ Radlader zum Walzen des Materials auf Anlagen üblicherweise vorhanden ■ Silierung größerer Mengen auf kleinen Flächen bei Fahrsilos mit Seitenwänden möglich ■ abgedichtete Flächen mit Sickerwasserfassung auf Anlagen i. d. R. vorhanden ■ Entnahme größerer Materialmengen weniger aufwendig	■ Silierung kleiner Mengen möglich ■ Silierung angepasst an den Materialanfall möglich ■ geringerer Platzbedarf, da Rangierflächen geringer gehalten werden können ■ abgedichtete Flächen mit Sickerwasserfassung auf Anlagen i. d. R. vorhanden ■ Silageverwertung an Materialbedarf in der Vergärung einfach anzupassen

NACHTEILE

■ abgedichtete Fahrsilofläche mit Sickerwassererfassung erforderlich ■ Platzbedarf von Fahrsilos zur Einlagerung größerer Grüngutmengen und zunehmender Silohöhe durch Rangier- und Bewirtschaftungsflächen ■ Platzverhältnisse am Anlagenstandort müssen die Anlegung eines Fahrsilos in ausreichender Größe zulassen ■ Silierung geringer und über längere Zeiträume anfallender Materialmengen wegen ggf. mehrfachen Auf- und Abdeckens des Silos schwierig (Gefahr von Fehlsilierung) ■ erhöhter Arbeitsaufwand bei Unterbrechung der Entnahme (Abdecken des Anschnitts bei längeren Unterbrechungen erforderlich)	■ abgedichtete Lagerfläche mit Sickerwasserfassung erforderlich ■ Rundballen nur begrenzt stapelbar ■ Press-/Wickelkombination erforderlich ■ oder Durchführung der Rundballensilierung durch Lohnunternehmen ■ Aggregate zur Herstellung der Rundballen gegenüber Bestandteilen im Grüngut (langfaserige und spitze Materialien) störanfällig ■ spezielles Gerät für schnelle Öffnung und Auflockern der Rundballen erforderlich ■ Folienreste können u. U. beim Entpacken mit dem Silagegut in den Verwertungsprozess gelangen
--	--

VERWERTUNG VON SILIERTEM KRAUTIGEN GRÜNGUT IN BIOGUT-VERGÄRUNGSANLAGEN VON PRAXISPARTNERN

Die Einbringung der Silage in die Vergärungsanlagen der Praxispartner stellte weder bei der Boxenvergärung (Abfallwirtschaftsbetrieb Emsland) noch bei der Pfropfenstromvergärung (Syndikat Minett-Kompost) Probleme dar. Einfacher war die Einbringung jeweils aus dem Fahrsilo, da dort die Silage nicht noch entpackt werden muss und die Gefahr der Einbringung von Folienresten in den Verarbeitungsprozess geringer ist. Die im Versuch erzeugte Silage aus separat erfasstem Rasenschnitt zeigte mit einem Gasbildungspotenzial von ca. 110 bis 120 Normliter (NL)/kg Frischmasse (FM) ein ähnliches Gasbildungspotenzial wie Biogut und stellt damit als Substrat eine gute Ergänzung zur Verwertung in den anlieferungsschwachen Wintermonaten in einer Biogutvergärungsanlage dar. Das Gasbildungspotenzial der Silage aus krautigem Grüngut von der getrennten Anlieferung an Wertstoffhöfen war mit 50 bis 55 NL/kg FM deutlich niedriger. Dies lag an der Zusammensetzung des krautigen Grünguts, das neben gut vergärbarem energiereichen Rasenschnitt auch schlecht vergärbares bzw. hemmendes Material, wie Laub, kleine Zweige oder Erdanhaftungen enthielt.

ENTWICKLUNG EINER MODELLHAFTEN WERTSCHÖPFUNGSKETTE

Auf Grundlage der Praxisversuche wurde eine modellhafte Wertschöpfungskette entwickelt, bei der jeweils 20.000 Mg Biogut und Grüngut verwertet werden. Dafür sollten eine Grüngutkompostierungsanlage und entweder eine Pfropfenstromvergärungsanlage oder eine Boxenvergärungsanlage zur Verfügung stehen. Über die verschiedene Art der Grüngutverwertung, zum einen die vollständige Kompostierung (»Kontrolle«), zum anderen die Vergärung des krautigen Anteils (25 % des gesamten Grünguts, »Krautig«) und zum Dritten die Vergärung nur von Rasenschnitt (10 % des gesamten Grünguts, »Rasen«), jeweils in der Variation mit Pfropfenstromvergärung (PF) bzw. Boxenvergärung (Box) ergaben sich insgesamt sechs Varianten. Die Varianten mit vollständiger Grüngutkompostierung erzeugten im Modell die größte Menge an hochwertigen Grüngutkomposten (Abbildung 2), für die sich im Gegensatz zu Biogutkomposten zunehmend bessere Vermarktungsalternativen ergeben (torffreie Erden, Einsatz im Ökolandbau etc.). Allerdings waren die Energieerträge in diesen Varianten deutlich geringer (Abbildung 3). Die höchsten Energieerträge erzielten die Subvarianten mit Pfropfenstromvergärungsanlagen, bei denen allerdings zusätzlich zum Kompost ein flüssiger Gärrest anfällt. Dieser kann in vielen Regionen nur unter Zuzahlungen in die landwirtschaftliche Verwertung abgegeben werden.

Abbildung 2

Jährliche Mengen der Erzeugung von Grüngutkompost, Biogutkompost und flüssigem Gärrest in den sechs Varianten der modellhaften Wertschöpfungskette
(© eigene Berechnung)

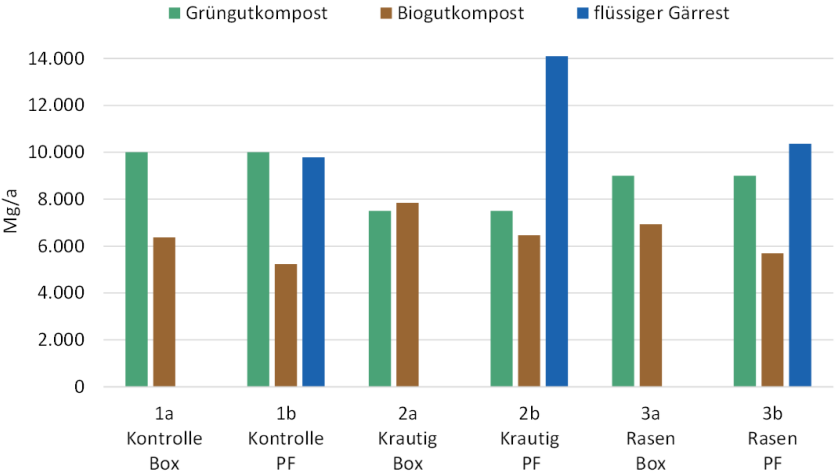
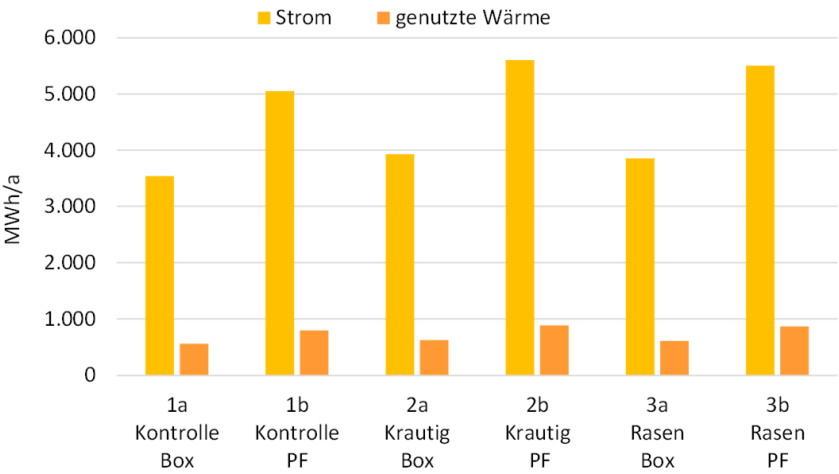


Abbildung 3

Jährliche Mengen der Erzeugung von Strom und genutzter Wärme aus Biogas in den sechs Varianten der modellhaften Wertschöpfungskette
(© eigene Berechnung)



FAZIT AUS PRAXISVERSUCHEN UND MODELLHAFTER WERTSCHÖPFUNGSKETTE

Folgendes Fazit kann aus der Bewertung der Praxisversuche und der Analyse der modellhaften Wertschöpfungskette in ihren sechs Varianten für die selektive Erfassung und Konservierung von krautigem Grüngut zur Mitvergärung in Biogutvergärungsanlagen gezogen werden:

- In den Praxisversuchen hat sich gezeigt, dass eine separate Erfassung von krautigem Grüngut oder Rasenschnitt vor allem im Bringsystem praktikabel ist.
- Die Silierung des Grünguts auf den Verarbeitungsanlagen muss den aus der landwirtschaftlichen Praxis bekannten Anforderungen entsprechen, um eine qualitativ hochwertige Silage zu erzeugen und damit eine weitgehende Konservierung des Energiegehalts des Grünguts zu erreichen. In den Praxisversuchen konnte die Silierung sowohl in Form von Ballensilage als auch im Fahrsilo erfolgreich durchgeführt werden, wobei die Ballensilage nur bei reinem Rasenschnitt störungsfrei funktionierte.

- Die Vergärung von gut vergärbaren und silierten Grüngutfraktionen mit Nachkompostierung der Gärreste kann wirtschaftliche Vorteile im Vergleich zur reinen Kompostierung bieten, insbesondere wenn größere Grüngutmengen zur Verfügung stehen und in den Wintermonaten die freien Vergärungs- und Rottekapazitäten der bestehenden Anlage sinnvoll genutzt werden können. Dies gilt allerdings nur für den Fall, dass für die Erfassung dieser vergärbaren Grüngutanteile keine zusätzlichen Kosten in Ansatz gebracht werden.
- Die mit der besseren Auslastung einer Vergärungsanlage gesteigerten Energiemengen sind nicht nur betriebswirtschaftlich wertvoll, vor allem dann, wenn ein optimales Energienutzungskonzept mit sinnvoller Wärmenutzung zur Verfügung steht, sondern gerade im Winter auch volkswirtschaftlich, wenn der generelle Wärmebedarf hoch und die Stromproduktion aus PV-Anlagen gering ist.
- Aus ökologischer Sicht gibt es in Bezug auf die Einsparung von Treibhausgasen und fossilen Energieträgern einen geringen Vorteil bei der Mitvergärung sowohl eines großen Anteils des krautigen Grünguts als auch des Rasenschnitts. In Bezug auf die Schonung der wertvollen Ressource Torf zeigt sich allerdings das größte Potenzial bei der ausschließlichen Kompostierung des Grünguts.

EMPFEHLUNGEN FÜR DIE PRAXIS

Die gesamte praktische Umsetzung der Logistikkette für die Erfassung, Silierung und Vergärung von krautigem Grüngut muss in individuell aufeinander abgestimmten Prozessschritten erfolgen, die zwar jeder für sich Stand der Technik sind, sich aber in ihrer Aufeinanderfolge erst in der Praxis vor Ort bewähren müssen.

Bei bestehenden Biogutvergärungsanlagen, auf denen bislang keine oder nur geringe Mengen an Grüngut mitverwertet werden, ist im Vorfeld der Entscheidung über eine Mitbehandlung von silierten Grüngutmengen in der Vergärung Folgendes zu ermitteln:

- Potenzialbewertung durch Auswertung der Unterauslastung in den anlieferungsschwachen Monaten
- Bewertung der möglichen Freiflächen für die Silagelagerung über mehrere Monate
- Entscheidung zur Silierungstechnik anhand des Mengenpotenzials, der Flächenverfügbarkeit und des möglichen Maschineneinsatzes
- ggf. Recherche von landwirtschaftlichen Dienstleistern für eine Externalisierung der Arbeiten
- Wirtschaftlichkeitsberechnung mit der Abwägung des Aufwands sowie der zusätzlichen Energie- und Produkterlöse gegenüber den Kosten einer alternativen Grüngutverwertung

Zu berücksichtigen sind hierbei auch die zunehmend besseren Vermarktungsalternativen von hochwertigen Grüngutkomposten (torffreie Erden, Einsatz im Ökolandbau, etc.). Denn eine Mitbehandlung von Grüngut in einer Biogutvergärungsanlage bedeutet auch eine entsprechende Mehrmenge an Biogutkomposten, welche sich ggf. regional schlechter verwerten lassen.

Ein wirtschaftliches Ergebnis der Mitbehandlung von silierten Grüngutmengen kann sich ergeben, wenn die Kosten der Mitbehandlung in der Biogutbehandlungsanlage weitgehend kostenneutral bewertet werden können, also die Investitionskosten und weitestgehend auch die Betriebskosten der Anlage wegen der Ausnutzung der Kapazitätslücke im Winter nicht auf die Mitbehandlung der zusätzlichen Grüngutmengen angerechnet werden müssen. Die Kosten der Silierung, der zusätzlichen Logistik auf der Anlage und ggf. der vermehrten Produktmengen sind natürlich zu berücksichtigen.

Herausforderungen

Herausforderungen ergaben sich in diesem Projekt vor allem durch die Einschränkungen im Zuge der Corona-Pandemie, die es erschwerten, mit den unterschiedlichen Praxispartnern alle Versuche in der geplanten Form und zur geplanten Zeit durchzuführen.

Ausblick

Die Projektergebnisse stehen sowohl der Politik in Form einer unabhängigen Expertise als auch öffentlich-rechtlichen Entsorgungsträgern, Abfallwirtschaftsbetrieben, Planern und Herstellern von Vergärungsanlagen sowie anderen Forschungsinstitutionen zur Verfügung.

Auf Grundlage der Projektergebnisse können die rechtlichen, technischen und ökonomischen Rahmenbedingungen für eine verstärkte Getrennterfassung und eine nachhaltige sowie effiziente energetisch-stoffliche Verwertung von krautigem Grüngut weiterentwickelt werden.

Weitere Informationen

- [Steckbrief und Informationen zum Projekt >>](#)
- [Endbericht GreenSelect >>](#)



KoSaTZ

Björn Schwarz, Claudia Kirsten

Behandlung und kombinierter Einsatz von Stroh- und Getreideausputzmischungen für eine Biogas-Technologieketten mit Zukunft

Zusammenfassung

Im Projekt KoSaTZ wurde eine Verfahrenskette für den Einsatz verschiedener Reststoffe der Getreideproduktion in Biogasanlagen optimiert und bewertet. Potenzielle Substrate wurden hinsichtlich stofflicher und physikalischer Eigenschaften analysiert und für weitere Behandlungsschritte ausgewählt. Ziel der ersten Aufbereitungsstufe war die Herstellung von stabilen, transportwürdigen Pellets mit hoher Saugkraft als Einstreumaterial und hohem Gasertrag als Input für Biogasanlagen. Mit der Variation von Wassergehalt, Pressverhältnis, Vorzerkleinerung und Dosierung von NaOH wurde auf optimale Prozessparameter hingearbeitet. Die Vorzugsvarianten aus Substratart und Aufbereitung wurden als Chargen von jeweils 20 t im praktischen Maßstab produziert und in der beteiligten Agrargenossenschaft sowohl in Liegeboxen als auch im Tiefstreustall eingesetzt. Dabei zeigten sich Vorteile hinsichtlich Arbeitseffizienz, Tierwohl und Stallhygiene im Vergleich zu herkömmlichem Kalk-Strohhäcksel. Der Einsatz von Gülle oder Festmist mit erhöhten Pelletanteilen in Biogasanlagen führt zu einer gesteigerten Gasproduktion. Für den Direkteinsatz von Reststoffpellets in Biogasfermentern konnten praktische Handlungsempfehlungen abgeleitet werden. Bezüglich der Ökobilanz (Fokus THG-Potenzial) und der Wirtschaftlichkeit konnte für das KoSaTZ-Verfahren ein Vorteil gegenüber den Referenzszenarien ermittelt werden.

Ziele

Die Versorgung von landwirtschaftlichen Biogasanlagen mit nachhaltigen und kostengünstigen Substraten ist Voraussetzung für den Erhalt von Wirtschaftlichkeit und Akzeptanz. Das Projekt KoSaTZ befasste sich mit der effizienten und wirtschaftlichen Erschließung von Reststoffen aus der Getreideproduktion für Biogasanlagen. Dabei stand neben Substratart und Aufbereitung der Einfluss einer Zwischennutzung als Einstreu im Fokus der Betrachtungen.

Themen schwerpunkte

Björn Schwarz: »Nach der Entwicklung und Bewertung von Strohpellets für Biogasanlagen in vorherigen Projekten schließt sich mit KoSaTZ der Kreis für die gemeinsame Vergärung von Wirtschaftsdüngern und Resten aus der Getreideproduktion. Der Schlüssel für Kosteneffizienz liegt in einer Mehrfachnutzung als Einstreu und anschließend als Biogassubstrat.«



FKZ-Nr.: **03EI5403**
 Laufzeit: **01.01.2020 – 31.12.2021**
 Zuwendungssumme: **695.248 €**

KOORDINATION:
**IKTS - Fraunhofer Institut für
 Keramische Technologien und
 Systeme**
 Winterbergstraße 28
 01277 Dresden
www.ikts.fraunhofer.de

PROJEKTLEITUNG:
Direkte Ansprechperson:
Björn Schwarz
+49 (0)351 2553 7745
bjoern.schwarz@ikts.fraunhofer.de

PARTNER:
**DBFZ – Deutsches Biomassefor-
 schungszentrum gGmbH**
Claudia Kirsten
 Torgauer Straße 116, 04347 Leipzig
www.dbfz.de

ATS - Agro Trading & Solutions
 GmbH
 Zementfabrik 4
 37181 Hardegsen
www.agro-trading.de

Ingenieurbüro Rückert GmbH
 Marktplatz 17,
 91207 Lauf/Pegnitz
www.ingenieurbuero-rueckert.de

Agrargenossenschaft »Bergland«
 Clausnitz e.G.
 Hauptstr. 13
 09623 Rechenberg-Bienenmühle
www.agrar-bergland-clausnitz.de

Themen schwerpunkte

- Analyse bekannter und neuer Stoffströme aus der Getreideproduktion
- Aufbereitung von Stroh und strohähnlichen Reststoffen zu Pellets und Briketts
- Einsatz und Bewertung als Einstreumaterial im Rinderstall
- Einmisch- und Quellverhalten der Reststoffpellets in Biogasfermentern
- Einsatz von Pellets vor und nach Einstreu in einer großtechnischen Biogasanlage
- Wirtschaftliche und ökobilanzielle Bewertung

Kernbotschaften

- Die Pelletierung von Stroh oder strohähnlichen Reststoffen aus der Getreideproduktion führt zu einer deutlichen Steigerung der Wasseraufnahme im Stall sowie zu erhöhter Tierhygiene.
- Das Biogas-Ertragspotenzial lag für die untersuchten Reststoffe in einem interessanten Bereich und konnte durch Pelletierung und Zugabe von Natronlauge gesteigert werden.
- Eine direkte Zugabe von Stroh- oder Reststoffpellets zu Gülle sollte in klassischen Anmischgruben ein Masseverhältnis von 1:25 nicht überschreiten, um die Durchmischung und Pumpfähigkeit zu erhalten.
- Eine längere Lagerung von Einstreu-Gülle gemischen sollte aufgrund von Energieverlusten vermieden werden

summary (engl.)

In the KoSaTZ project, a process chain for the use of various residues from grain production in biogas plants was optimised and evaluated. Potential substrates were analysed with regard to material and physical properties and selected for further treatment steps. The aim of the first treatment step was to produce transportable pellets with high absorption power as bedding material and high gas yield as input for biogas plants. Optimal process parameters were targeted by varying the water content, pressing ratio, pre-grinding and dosing of NaOH. The preferred variants of substrate type and preparation were produced as 20 t batches on a practical scale and used in the participating agricultural cooperative both in lying box and in deep litter barn. This showed several advantages in terms of labour efficiency, animal welfare and stable hygiene compared to conventional lime straw bedding. The use of slurry or solid manure with increased pellet content in biogas plants is associated with increased gas production. Practical recommendations for an application of residual material pellets in biogas fermenters could be derived. With regard to the life cycle assessment (focus on GHG potential) and the economic efficiency, an advantage could be determined for the KoSaTZ process compared to the reference scenarios.

key messages (engl.)

- Pelleting of straw or other residues from grain production lead to a significant increase in water absorption in the barn as well as to increased animal hygiene.
- The biogas yield potential for the investigated residues was in an interesting range and could be increased by pelleting and adding caustic soda.

Methodik Maßnahmen

- Direct addition of straw or residue pellets to liquid manure should not exceed a mass ratio of 1:25 in classic mixing pits in order to maintain mixing and pumpability.
- Longer storage of litter-slurry mixtures should be avoided due to energy losses.
- Probenscreening und Analyse der Ausgangsmaterialien
- Aufbereitung von Stroh und strohähnlichen Reststoffen zu Pellets oder Briketts (Zerkleinerung, Konditionierung, Pelletierung und Brikettierung)
- Vergleichende Pelletierung im Technikums- und praktischen Maßstab
- Messtechnische Bewertung der Kompaktate, insbesondere Wasser-saugvermögen und Biogaspotenzial
- Prozessstomographische Untersuchungen zur Einmischung von Pellets in viskosen Flüssigkeiten
- Praktische Einstreuversuche mit Stoffbilanzierung
- Praktische Vergärungsversuche in einer 75 kW- Biogasanlage
- Wirtschaftlichkeitsbetrachtung und Ökobilanzierung (THG)

Ergebnisse auf einen Blick

PUBLIKATION:

- [Endbericht KoSaTZ >>](#)

KONZEPT/MACHBARKEITSSTUDIE:

- Verfahrenskonzept
- Machbarkeitsstudie

ANLAGE:

- Verfahren
- Nachrüstung Bestandsanlage

DATEN & METHODEN:

- Versuchsdaten
- Analysedaten
- Prozessdaten
- Messreihe/-programm

MARKT:

- Planungs- und Beratungsleistungen
- Vermarktung Reststoffpellets (Stall + Biogas)

WEITERE WICHTIGE ERGEBNIS-TYPEN BZW. KONKRETISIERUNG, EXEMPLARISCH ZU:

- Best-Practice Lösung
- Evaluation
- Dienstleistungen

Darstellung der Ergebnisse

RESTSTOFFE AUS DER GETREIDEVERARBEITUNG

Folgende Stoffströme wurden im Projekt KoSaTZ als relevant identifiziert und näher betrachtet: Getreidereste aus Ölmühle+Mälzerei (ÖM), aus dem Landhandel (LH), aus Dinkelschälbetrieben (DS), aus der Bioethanolproduktion (BE), aus dem Mühlenbetrieb (MB) und aus der Züchtung von biologischem Pflanzenschutz (PfS) sowie Haferschalen (HS) und unbehandeltes Stroh (Su) (Abbildung 1).

Trotz zum Teil erheblichem Gaspotenzial wurden die Substrate aus der Ölmühle, der Bioethanolherstellung und dem Pflanzenschutz aufgrund des geringen Wasserhaltevermögens oder hygienischer Bedenken im Stall im Projekt nicht näher betrachtet.

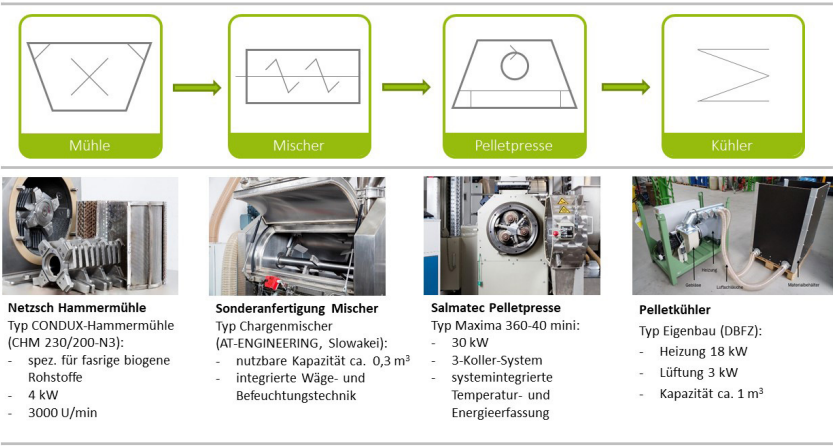
Abbildung 1
Reststoffe von oben links nach
unten rechts in Leserichtung:
ÖM, LH, DS, Pfs, BE, HS, MB
(©IKTS)



PELLETIERUNG

Die Pelletierung ausgewählter Stroh- und strohähnlicher Reststofffraktionen erfolgte zunächst in Kleinchargen im Technikumsmaßstab beim Projektpartner DBFZ. Dabei wurde stets die Prozessabfolge gemäß Abbildung 2 eingehalten. Während der Konditionierung im Mischer wurde einem Teil der Versuchschargen NaOH als Zuschlagsstoff hinzugegeben.

Abbildung 2
Pelletherstellungsprozess am DBFZ
(©DBFZ: 2018)



Zielwerte aus Sicht der Pelletierung sind möglichst hohe Abriebfestigkeiten (DIN EN ISO 17831) und Schüttdichten (DIN EN ISO 17828), um ausreichende Transportstabilität zu gewährleisten. Zusätzlich wurde der Wassergehalt der Pellets wurde nach der Ofenmethode DIN EN ISO 18134-1 bestimmt. Bei der Prozessführung wurden Rohstoff- (Wassergehalt Ausgangsmaterial, Korngröße, mit und ohne NaOH) und Prozessparameter (Matrizengeometrie, Materialzuförderung in den Pressenraum) variiert, sodass mehr als 15 Kleinchargen an Pellets hergestellt und analysiert wurden. Es wurden zwei Matrizen mit unterschiedlichen Bohrungen getestet: Durchmesser x Länge der Bohrung - 8 x 65 mm und 10 x 80 mm. Die zusammengefassten Ergebnisse sind in Tabelle 1 dargestellt.

Tabelle 1
Pelletherstellungsprozess am DBFZ
(©DBFZ: 2018)

P–Pellets
(mitentsprechendem
Wassergehalt)

Kurzbezeichnung	Ausgangs- wassergehalt	spezif. Energie- verbrauch	Massenstrom Outputmaterial	prod. Feinanteil	Schütt- dichte	Abrieb- festigkeit
	in Ma.-%	in kWh/kg P	in kg P/h	in Ma.-% P	In kg/m³	in Ma.-% P
8x65 mm Matrize	28,7	0,24	47,2	12,4	516	95,8
10x80 mm Matrize	30,8	0,51	32,5	12,9	535	95,4
Pelletierung mit NaOH	31,3	0,39	37,9	8,6	534	96,6
Pelletierung ohne NaOH	30,9	0,46	34,6	12,1	556	95,8

Folgendes lässt sich aus Tabelle 1 ableiten:

- **Höhere Energieverbräuche und geringere Durchsätze bei leicht erhöhten Wassergehalten im Ausgangsmaterial bei Nutzung der 10 x 80 mm Matrize**
- **Zugabe von NaOH als anorganisches Binde- und Schmiermittel hat einen positiven Effekt auf die Pelletierung hinsichtlich des spez. Energieverbrauchs sowie des Durchsatzes.**

Vergleichend dazu wurden die Pelleteigenschaften der vom Projektpartner ATS produzierten und beschafften Großchargen analysiert (Tabelle 2).

Tabelle 2
Pelletherstellungsprozess am DBFZ
(©DBFZ: 2018)

P–Pellets
(mitentsprechendem
Wassergehalt)

Beschreibung	Feinanteil	Schütt- dichte	Abriebfestigkeit	Pellet- wassergehalt
	in Ma.-% P	in kg/m³	in Ma.-% P	in Ma.-%
8 mm Pellets aus Dinkelpelzen, (ATS)	5,2	521	95,0	11,7
6 mm Pellets aus Haferschalen unzerkleinert (ATS)	28,8	578	89,2	11,8
6 mm Pellets 50% Stroh + 50% Getreideausputz (Landhandel)	12,7	601	92,0	13,5
6 mm Pellets 100% Getreideausputz (Landhandel)	1,6	703	97,6	10,4

Die beim Projektpartner ATS produzierten Pellets aus 100 % Getreideausputz, welche extern im Landhandel beschafft wurden, weisen mit 703 kg/m³ die höchste Schüttdichte und mit 97,6 Ma.-% die höchste Abriebfestigkeit bei geringstem Wassergehalt auf. Der Reststoff Haferschalen zeigte beim Praxisversuch einen hohen Feinanteil der 6 mm Pellets von 28,8 Ma.-%, was auf nicht optimierte Prozessparameter zurückzuführen war.

Durch optimale Rohstoff- und Prozessparameter erlangen die Reststoffe durch Pelletierung hohe Schüttdichten und hohe Abriebfestigkeiten bei geringem Feinanteil.

BRIKETTIERUNG

Als alternatives und verschleißärmeres Kompaktierungsverfahren sollte im Projektrahmen die Brikettierung getestet werden. Dafür stand der von ATNA Industrial Solutions GmbH entwickelte Prototyp mit einer Anschlussleistung von 30 kW und einem materialabhängigen Durchsatz von 50 – 80 kg/h zur Verfügung. Die Briketts sind min Durchmesser 50 mm. Abbildung 3 zeigt die Brikettieranlage und Abbildung 4 das entsprechende Verdichtungsprinzip.

Abbildung 3
Brikettieranlage
GreenLine S50 am DBFZ
(© Wolfgang Grote /
ATNA Industrial Solutions GmbH)



Abbildung 4
Verdichtungsprinzip der
Brikettieranlage (© DBFZ 2022)

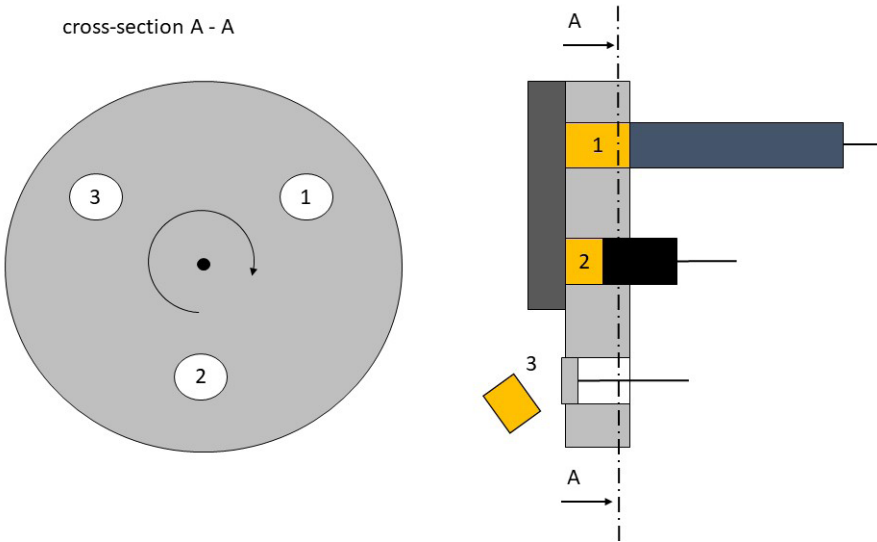


Tabelle 3
Brikettierparameter der
statistischen Versuchsreihen

SM – Schneidmühle
HM – Hammermühle

Über statistische Versuchsreihen wurden verschiedene Prozess- und Rohstoffparameter für ausgewählte Materialien kombiniert, um gute Kompaktateigenschaften (hohe Abriebfestigkeit in Anlehnung an die DIN EN ISO 17831-1 und hohe Rohdichten nach DIN EN ISO 18847) mit möglichst wenig Energieeintrag erzeugen zu können. Tabelle 3 zeigt die untersuchten Parameter.

Konstante		1. DoE	2. DoE	3. DoE
Ausgangsmaterial		Haferschalen	Haferschalen	Stroh zerkleinert
Zerkleinerung	-	keine	SM 6 mm-Sieb	HM 10 mm-Sieb
Wassergehalt	Ma.-%	11,3	10,5	9,2
Schüttdichte	kg/m³	198	231	98
Variierenden Faktoren:				
Vorpressdruck	MPa	20/30/40		
Hauptpressdruck	MPa	150/175/200		
Haltezeit	s	2/4/6		

SM – Schneidmühle, HM – Hammermühle

Folgendes lässt sich zusammenfassen:

1. UNZERKLEINERTE HAFERSCHALEN

- Die höchsten Rohdichten von 0,91g/cm3 konnten bei hohen Haltezeiten (6s), hohen Vorpressdruck und geringstem Hauptpressdruck (150 MPa) erzielt werden.
- Die höchsten Abriebfestigkeiten von 66 Ma.-% konnten bei hohen Haltezeiten (6 s), hohen Vorpressdruck und hohem Hauptpressdruck (200 MPa) erreicht werden.
- Der Haupteinflussfaktor für den spezifischen Energieeintrag ist die Haltezeit – geringe Haltezeiten resultieren in geringen Energieeinträgen.

2. ZERKLEINERTE HAFERSCHALEN

- Durch Zerkleinerung können die Partikel unter Druck näher zusammengebracht werden, sodass generell höhere Rohdichten und höhere Abriebfestigkeiten erreicht werden.
- Durch hohe Haltezeiten (6s) können auch hier die höchsten Rohdichten mit 0,98 g/cm³ und die höchsten Abriebfestigkeiten mit etwa 77 Ma.-% erzielt werden.
- Die Haltezeit der größte Einflussparameter auf den spezifischen Energieeintrag hat – hohe Haltezeiten benötigen die meiste Herstellungsenergie.

3. ZERKLEINERTES STROH

- Aufgrund von Brückenbildungen erfolgt die Materialförderung in den Verdichtungsraum teils nicht kontinuierlich.
- Auch hier ist Haltezeit der größte Einflussfaktor – hohe Haltezeiten erzielen hohe Rohdichten von 1g/cm³ und hohe Abriebfestigkeiten von 94 Ma.-%, benötigen aber auch die höchsten spezifischen Energieeinträge – mit 2 – 3 kWh/kg auch deutlich höher als bei der Brikettierung der Haferschalen (unabhängig vom Zerkleinerungsgrad).

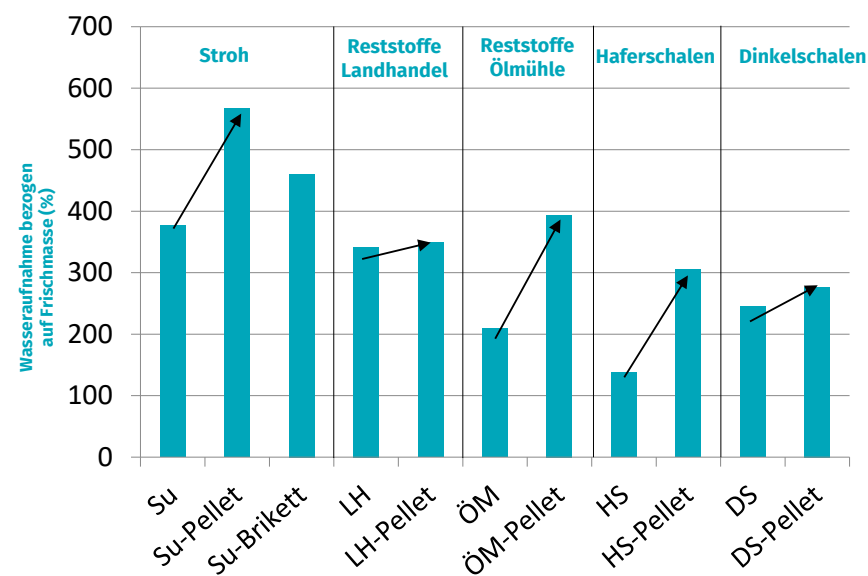
Die Brikettierung von Haferschalen stellt unabhängig vom Zerkleinerungsgrad keine besonderen Herausforderungen dar. Bei der Brikettierung von Stroh kommt es beim Fördern zu Brückenbildung, sodass die Schneckengeometrie und Förderrate angepasst werden muss.

WASSERSAUGVERMÖGEN UND GASERTRAG

Die Pelletierung und die damit einhergehende mechanische Beanspruchung führt zu einer Zerkleinerung der Partikel und Auflösung von Wachsschichten, was mit einer Verbesserung des Wasseraufnahmevermögens einhergeht

Abbildung 5

Maximale Wasseraufnahme
vor und nach Pelletierung
(©IKTS)



Außerdem konnte eine Steigerung des Gasertrages nachgewiesen werden. Der Zusatz von NaOH vor der Pelletierung mit einer Dosiermenge von mindestens 2,5 % führte:

- zu einer Steigerung des pH-Wertes
- zu keiner signifikanten Änderung des Auflösungsverhaltens in Wasser
- zu einer Steigerung des Gasertrages

EINSTREUVERSUCHE

Für die Untersuchungen zum Einstreuverhalten im Stall wurden zusätzlich zu kommerziellen Referenzpellets aus 100 % Stroh drei weitere Mischungen aus Reststoffen ausgewählt und getestet:

- Pellets aus einer Mischung von 50 % zerkleinertem Stroh und 50 % Reststoffen aus dem Landhandel
- Pellets aus 100 % Reststoffen aus dem Landhandel
- Pellets aus 100 % Dinkelspelzen

Abbildung 6

Pelletmatratze in der Liegebox
(oben und mitte)
(©Christoph Hänel)



Abbildung 7

Tiefstreustall
(©Christoph Hänel)



Die Ergebnisse der Einstreuversuche zeigen: Hohe Saugkraft aller Mischungen im Stall; Tierwohl und Hygiene werden verbessert.

Im Tiefstreustall mit längeren Liegezeiten des Einstreus finden aerobe Rotteprozesse statt, welche zu Masse und Energieverlusten führen (Abbildung 8). Dies ist für die Energiebilanz bei anschließender Nutzung in der Biogasanlage zu berücksichtigen.

Abbildung 8

Verlust an Masse und Methanertrag – Laborversuch
Tiefstreustall-Rotte
(©IKTS)

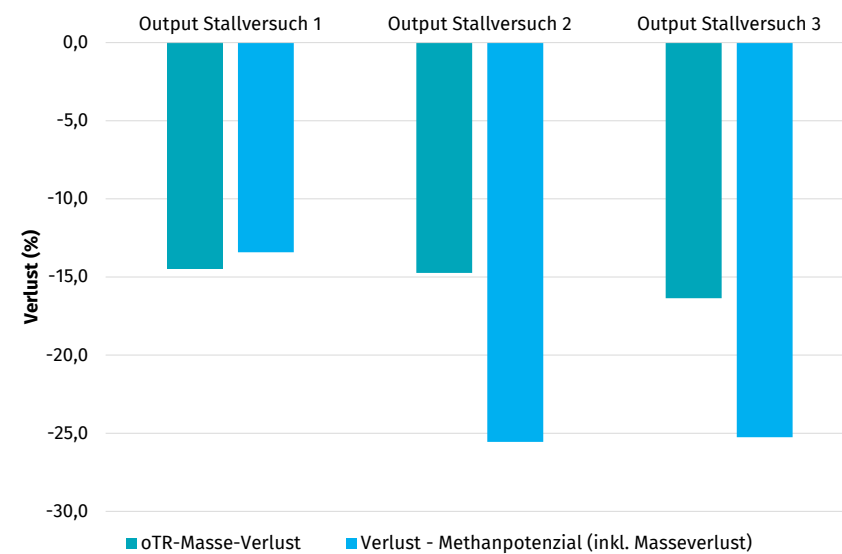
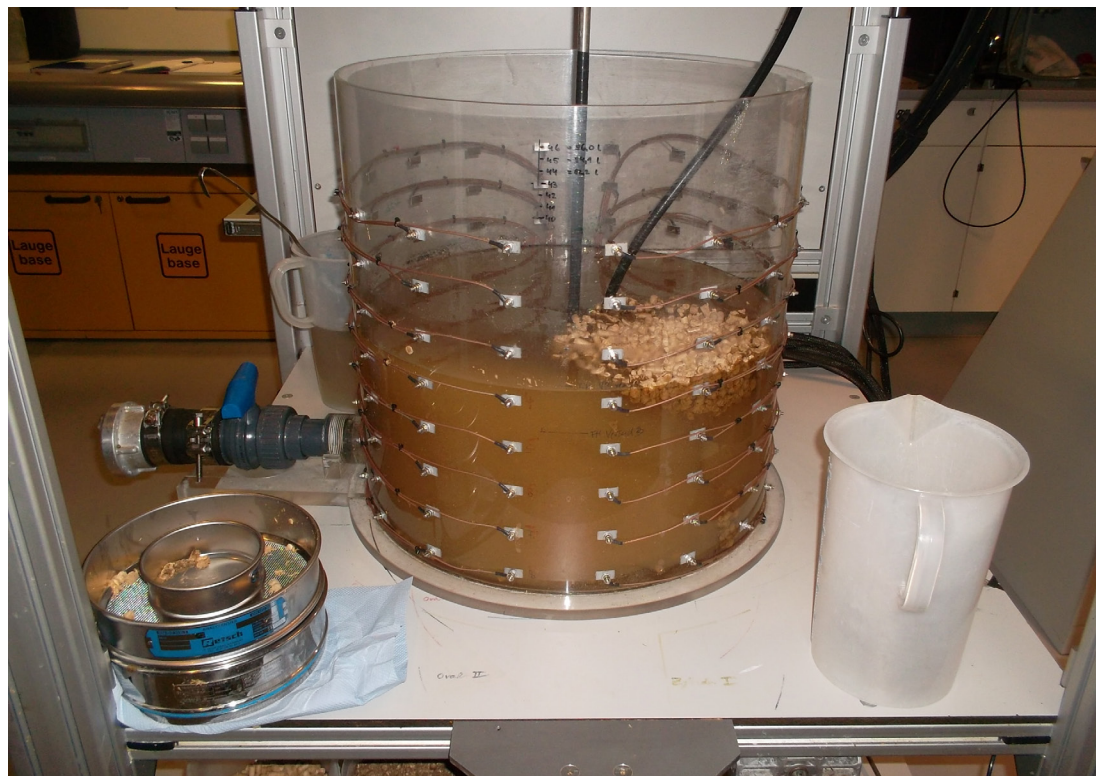


Abbildung 9

(unten) Prozessstomograph
(©IKTS)



EINMISCHUNG VON PELLETS IN FLÜSSIGFERMENTER

Die praktischen Verhältnisse der Vorgrube beim Projektpartner Agrar »Bergland« bzgl. Geometrie und Rührorganen wurden im Technikum des IKTS prozessstomographisch nachgestellt.

Aus den durchgeführten Versuchen zur Einmischung und Auflösung von Reststoffpellets in unterschiedlich viskosen Flüssigmedien konnten folgende Handlungsempfehlungen für die praktische Einmischung von Pellets abgeleitet werden:

- Quellzeiten der Pellets von 1 bis 5 Stunden → ausreichend lang einmischen, bevor in Rohrleitungen gepumpt wird
- Füllstand in Vorgruben absenken, um Durchmischung zu intensivieren; Alternativ: Rührwerk in oberen Bereich führen, um Schwimmdecken zu verhindern
- Für klassische Rührbehälter liegt die Einsatzgrenze von Pellets in Gülle bei 4 bis 5 % Masseanteil
- In Biogas-Fermentern kann in kleinen Chargen insgesamt etwas mehr dosiert werden, da der biologische Abbau zur Abnahme der Viskosität führt
- Für höhere Dosiermengen sind andere Rührkonzepte notwendig (z.B. Haspelrührwerk)

DIREKTER EINSATZ VON MISCHPELLETS IN DER PRAXIS-BGA

- Rührwerk in Anmischgrube wurde in der Höhe verstellt, um Pellets sicher einzumischen
- Maximale Einsatzmenge von 1,6t Pellets auf 40 m³ Gülle entsprach den Empfehlungen aus den Voruntersuchungen zur Einmischung (1:25)
 - Auf Dauer konnte dieses Mischverhältnis aber nicht aufrechterhalten werden (Befürchtung von Havarien durch zu dicke Mischung)

PRAKTISCHE VERGÄRUNG VON GÜLLE UND FESTMIST MIT PELLETANTEILEN

Beim Praxispartner Agrar »Bergland« konnten zwei baugleiche 75 kW-Biogasanlagen parallel genutzt werden. Verglichen wurde der Betrieb mit und ohne Pelletanteilen. Folgende Erkenntnisse konnten gewonnen werden:

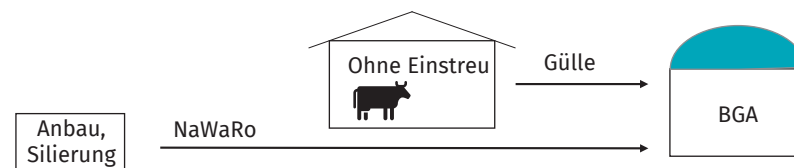
- Ein Fütterungsregime »nach Plan« konnte nicht umgesetzt werden. Es wurde in Abhängigkeit der Viskosität in der Anmischgrube geregelt. Ursache: starke Schwankungen im Pelletgehalt der Flüssiggülle.
- Keine Probleme hinsichtlich Biogasmenge oder Qualität. Kleiner Trend zu besserer Entschwefelung beim Einsatz von Pellets
- pH-Wert, el. Leitfähigkeit und Natriumgehalt im Gärrest zeigten keine signifikante Erhöhung für den Pelletreaktor trotz NaOH-Anteil in den Pellets
- Der Anteil der Pellets in der Inputmischung an der Gesamt-oTR-Fracht lag zwischen 10 und 20 %
- Mit zunehmender Versuchsdauer (Adaptationsprozesse) konnten im Pelletreaktor höhere spezifische Gasausbeuten als im Referenzreaktor erreicht werden. → Pelletanteil sehr gut verwertbar.
- Trotz relativ geringem Pelleteinsatz konnten 85 % der ursprünglich eingesetzten Silage und 20 % des ursprünglich eingesetzten Getreideschrots ersetzt werden.
- Prozess und Gasproduktion verlief sehr stabil

ÖKOLOGISCHE UND ÖKONOMISCHE BEWERTUNG DES GESAMTVERFAHRENS

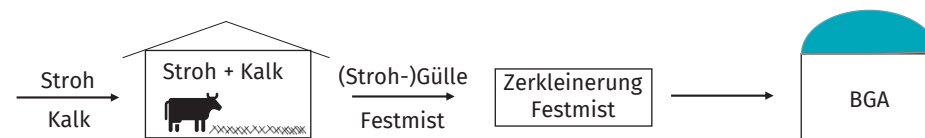
Für 2 Referenzszenarien und 2 KoSaTZ-Szenarien wurden Sachbilanzen und daraus abgeleitete THG-Emissionen mit Hilfe der Datenbank Ecoinvent® mit der Software Umberto LCA+® berechnet. Bezugsgröße für die THG-Emissionen ist die Erzeugung einer kWh_{el} aus dem BHKW der Biogasanlage.

■ Szenario 1: Gülle (ohne Einstreu) + NaWaRo

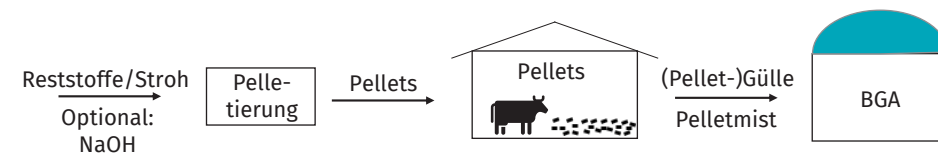
- Dominanz der Anbauaufwendungen für NaWaRo
- THG: 0,30 kg CO₂-äq/kWh_{el} (Nawaro=Getreideschrot)
- THG: 0,14 kg CO₂-äq/kWh_{el} (Nawaro=Maissilage)

**■ Szenario 2: Gülle/Festmist mit Einstreu Kalk/Stroh**

- Dominanz der Aufwendungen für Kalkherstellung
- THG: 0,21 kg CO₂-äq/kWh_{el}

**■ Szenario 3: Gülle/Festmist mit Einstreu Reststoffpellets**

- Leichte Dominanz der Eigenstromverbräuche (u.a. Pelletierung)
- THG: 0,16 kg CO₂-äq/kWh_{el}

**■ Szenario 4: Gülle (ohne Einstreu) + Direktnutzung Reststoffpellets**

- Leichte Dominanz der Eigenstromverbräuche (u.a. Pelletierung)
- THG: 0,14 kg CO₂-äq/kWh_{el}

**■ Verbesserung der Ökobilanz aller Szenarien durch Kalkulation mit Erneuerbarem Strom statt aktuellem dt. Strommix (Zukunftsmodell):**

- Referenzszenario 1 (Gülle + Maissilage): 0,10 kg CO₂-äq/kWh_{el}
- Szenario 4 (Gülle + Reststoffpellets): 0,07 kg CO₂-äq/kWh_{el}

Bei der Variante der vorherigen Nutzung der Pellets im Stall kann ein signifikanter Anteil der Substratkosten der Tierhaltung zugeordnet werden. Theoretisch wäre eine Kostenteilung zwischen Stall und BGA denkbar.

Somit ergäben sich für den Stall statt 130 EUR/t Pellets (Endverbraucherpreis) nur 65 EUR Substratkosten und damit statt 140 EUR pro Jahr und Liegeplatz nur 102 EUR, eine Ersparnis von 27 %.

Für das Substrat Reststoffpellet (in Gülle und Festmist) als Input zu Biogasanlage wären ebenfalls nur 65 statt 130 EUR/t anzusetzen. Dadurch ergibt sich ein Stromgestehungspreis (nur aus der Substratbereitstellung) von 6,6 ct/kWh_{el}, eine Einsparung um etwa 40 % gegenüber NaWaRo.

Herausforderungen

Für eine großflächige Übertragung der KoSaTZ-Ergebnisse in die Praxis stellen die Bezugskosten der einzelnen Inputsubstrate sowie die Energiekosten für deren Aufbereitung wichtige Herausforderungen dar. Darüber hinaus müssen beim Einsatz von pellethaltiger Gülle und Festmist die örtlichen Gegebenheiten zur Einmischung berücksichtigt werden, um Betriebsprobleme zu vermeiden. Als Hemmnis in praxisnahen Verbundprojekten kann festgehalten werden, dass für die Praxispartner auch während des Projektes die Sicherstellung des laufenden Geschäftes erwartungsgemäß oberste Priorität hat. Deshalb werden folgerichtig keine erhöhten technischen Risiken eingegangen, um die Grenzen von Verfahren oder Technologien auszuloten.

Ausblick

Auf Basis der Projektergebnisse können potenzielle Nachnutzer aus der Praxis eine Nutzung oder Vermarktung von strohähnlichen Reststoffen als kombinierte Einstreu- und Biogassubstrate realisieren. Der Projektpartner ATS wird diesbezüglich Pellets am Markt anbieten. Die am Projekt beteiligte Agrarnossenschaft wird den eingeschlagenen Weg der Pelletnutzung im Stall weiterverfolgen und dabei neben herkömmlichen Strohpellets auch Reststoffpellets nutzen. Für den direkten Einsatz von Stroh- oder Reststoffpellets in Biogasanlagen wird neben den Handlungsempfehlungen für bestehende Anlagen das Konzept eines robusten Spezialfermenters durch die Projektpartner Rückert und IKTS in einem Folgeprojekt (GülleHebel, FNR) weiterverfolgt.

Weitere Informationen

Informationen zum Projekt, inkl. Endbericht, Broschüren sowie weiteren Publikationen befinden sich auf dem [Steckbrief >>](#) von KoSaTZ.

Sieb-OPTI

Felix Richter, Axel Hüttner, Thomas Turk

Optimierte Verwertung von Siebresten aus Biogutvergärungs- und -kompostierungsanlagen

Zusammenfassung

Vor dem Hintergrund einer zunehmenden Fremdstoffproblematik auf Biogutbehandlungsanlagen mit steigenden Siebrestmengen sowie steigenden Kosten für die Entsorgung dieser Siebreste wurden 275 Anlagenbetreiber zu dieser Thematik befragt. Daneben wurden Sortieranalysen von Siebresten auf vier Biogutbehandlungsanlagen zu verschiedenen Jahreszeiten durchgeführt. Der größte Anteil der Fremdstoffe bestand bei allen vier Anlagen aus Mineralik. Die höchsten Fremdstoffgehalte traten dort auf, wo Siebreste in den Behandlungsprozess zurückgeführt wurden (Aufkonzentrierung). Dies verdeutlichte die Notwendigkeit einer zusätzlichen Aufbereitung der Siebreste und daher wurden verschiedene innovative Aufbereitungstechniken analysiert. Eine zusätzliche Aufbereitung mit Windsichter und Steinfaller sowie eine Rückführung des aufgereinigten Siebrests in den Behandlungsprozess einerseits oder eine Verwertung des aufgereinigten Siebrests in einem Biomasseheizkraftwerk andererseits können gegenüber der Entsorgung von Siebresten in einer Müllverbrennungsanlage wirtschaftliche Vorteile bieten. Weitere Vorteile bestehen in der Einsparung von Treibhausgasen und der Schonung von Ressourcen.

Ziele

- Ermittlung des Ist-Stands der Entsorgung/Verwertung von Biogut-Siebresten in Deutschland
- Analyse vorhandener Verwertungswege für Biogut-Siebreste in der Praxis
- Analyse und Dokumentation der rechtlichen Rahmenbedingungen für die Verwertung von Biogut-Siebresten in Deutschland
- Optimierung der Aufbereitung von Biogut-Siebresten in der Praxis
- Modellhafte Kostenberechnung und ökonomische Bewertung der Aufbereitung von Biogut-Siebresten
- Beurteilung der Klima- und Ressourcenrelevanz einer Aufbereitung von Biogut-Siebresten in Deutschland
- Empfehlungen für die Praxis zur Optimierung der Aufbereitung und Verwertung von Biogut-Siebresten

Thomas Turk: »Die stoffliche Verwertung der aus dem Biogut erzeugten Produkte ist eine wesentliche Grundlage für den Anlagenbetrieb im Sinne der Abfallhierarchie und der Kreislaufwirtschaft. Auch für den Teilstrom Siebreste ist entweder eine stoffliche Verwertung durch Rückführung als Strukturmaterial in den Kompostierungsprozess oder eine hochwertige energetische Verwertung in einem Biomasseheizkraftwerk anstelle einer reinen Entsorgung in einer Müllverbrennungsanlage anzustreben. Dafür ist aber zwangsläufig eine weitergehende technische Aufbereitung der Siebreste notwendig.«



FKZ-Nr.: 03KB140
 Laufzeit: 01.07.2018 – 31.12.2020
 Zuwendungssumme: 159.943 €

KOORDINATION:
**Witzenhausen-Institut für Abfall,
 Umwelt und Energie GmbH**
 Felix Richter, Axel Hüttner, Thomas Turk
 Werner-Eisenberg-Weg 1
 37213 Witzenhausen
www.witzenhausen-institut.de

PROJEKTLÉITUNG:
Thomas Turk

 Direkte Ansprechperson
Dr. Felix Richter
 +49 (0)5542 9380 25
f.richter@witzenhausen-institut.de

Themen schwerpunkte

- Biogut
- Siebreste
- Stofflich-energetische Verwertung
- Potenzialanalyse
- Festbrennstoff
- Kommunale Konzepte

Kernbotschaften

- Im Sinne der im Kreislaufwirtschaftsgesetz verankerten Abfallhierarchie ist für die Produkte aus der Biogutbehandlung eine stoffliche oder, wenn dies bei Teilströmen, wie Siebresten, nicht immer möglich ist, eine hochwertige energetische Verwertung anzustreben. Dazu bedarf es häufig einer Aufbereitung.
- Eine optimierte Aufbereitung von Siebresten mit einer Kombination aus biologischer Trocknung, erneuter Absiebung, Windsichter und Steinfälle ermöglicht eine Rückführung der Siebreste in den Kompostierungsprozess oder eine hochwertige energetische Verwertung in einem Biomasseheizkraftwerk.
- Dadurch können gegenüber einer Entsorgung der gesamten Siebreste in einer Müllverbrennungsanlage Kosten eingespart werden sowie entweder Treibhausgase vermieden oder Ressourcen geschont werden.
- Notwendige begleitende Maßnahmen sind ein deutlicher Ausbau der Öffentlichkeitsarbeit sowie Kontrollen und gegebenenfalls Sanktionen für eine getrennte und sortenreine Erfassung des Bioguts.

summary (engl.)

Against the background of increasing foreign matter problems in biowaste treatment plants with increasing amounts of sieve residues and rising costs for the disposal of these sieve residues 275 plant operators were asked about this topic. In addition, sorting analyses of sieve residues were carried out at four biowaste treatment plants at different times of the year. In all four plants, the largest proportion of foreign matter consisted of minerals. The highest levels of foreign matter occurred where sieve residues were fed back into the treatment process. This highlighted the need for additional processing and therefore various innovative processing techniques were analyzed. Additional processing with an air classifier and stone trap as well as returning the cleaned sieve residue to the treatment process on the one hand or recycling the cleaned sieve residue in a biomass cogeneration plant on the other hand can offer economic advantages compared to the disposal of sieve residue in a waste incineration plant. Further advantages are the saving of greenhouse gases and the conservation of resources.

key messages (engl.)

- In terms of waste hierarchy anchored in the Circular Economy Act, material recycling or, if this is not always possible in the case of partial flows such as sieve residues, high-quality energetic recycling, should be aimed for the products from the treatment of organic waste. This often requires processing.

Methodik Maßnahmen

- An optimized processing of sieve residues with a combination of biological drying, re-sieving, air classifier and stone trap enables the sieve residues to be returned to the composting process or a high-quality energetic utilization in a biomass cogeneration plant.
- As a result, costs can be saved compared to disposing of all the sieve residues in a waste incineration plant, and either greenhouse gases can be avoided or resources can be conserved.
- Necessary accompanying measures are a significant expansion of public relations work as well as controls and, if necessary, sanctions for a separate and pure collection of organic waste.
- Akteurskonferenzen zu Projektbeginn und -ende zur Diskussion der geplanten Arbeiten bzw. der Ergebnisse
- Befragung von 275 Kompostierungs- und Vergärungsanlagenbetreibern zu Siebrestmengen und zur Siebrestverwertung
- Analyse der rechtlichen Rahmenbedingungen, die derzeit in Deutschland für die Verwertung von Biogut-Siebresten entscheidend sind
- Ermittlung und Beschreibung verschiedener in der Praxis etablierter Verwertungswege für Biogut-Siebreste
- Siebrestanalysen von vier Biogutverwertungsanlagen zu verschiedenen Jahreszeiten und laboranalytische Untersuchung von Proben
- Analyse verschiedener technisch innovativer Aufbereitungsverfahren und Praxisversuche zu diesen Verfahren bei Biogutbehandlungsanlagen
- Modellhafte ökonomische Bewertung der technischen Aufbereitung von Siebresten inklusive anschließender Verwertung bzw. Rückführung
- Bewertung von in der Praxis etablierten und von technisch optimierten Verwertungswegen für Siebreste hinsichtlich der Einsparung von Treibhausgasen, fossilen Energien und Ressourcen in sechs Szenarien
- Empfehlungen von praktische Lösungsansätze zur optimierten Verwertung von Siebresten aus Biogutverwertungsanlagen

Ergebnisse auf einen Blick

PUBLIKATION:

- 2 Artikel in Fachzeitschriften
 - Müll und Abfall, 12/2018, S. 633-639
 - Müll und Abfall, 12/2021, S. 669-679
- 2 Beiträge in Tagungsbänden
 - Kern M, Raussen T (Hrsg.) (2018): Neue Perspektiven für die Bioabfallwirtschaft. . Witzenhausen (Witzenhausen-Institut. Neues aus Forschung und Praxis), S. 95-109.
 - Kern M, Raussen T (Hrg.) (2021): Bioabfall- und stoffspezifische Verwertung III. Witzenhausen (Witzenhausen-Institut. Neues aus Forschung und Praxis), 105-126.

Darstellung der Ergebnisse

IST-STAND-ANALYSE DER ENTSORGUNG/VERWERTUNG VON BIOGUT-SIEBRESTEN

Eine Befragung von 275 Anlagenbetreiber zu Projektbeginn diente dazu, den Ist-Stand der Aufbereitung und Entsorgung bzw. Verwertung von Biogut-Siebresten in Deutschland zu ermitteln. Bei mehr als der Hälfte der Anlagen wird ein Anteil von mindestens 10 % des Anlageninputs als Siebreste entsorgt, bei 43 % der Anlagen liegt der Anteil unterhalb von 10 % (Abbildung 1). Bei 60 % der Anlagen werden die Siebreste zu Teilen oder komplett in einer Müllverbrennungsanlage (MVA) entsorgt. Bei ca. 50 % der Anlagen wird zusätzlich oder komplett die energetische Verwertung im Biomasseheizkraftwerk (BMHKW) durchgeführt. Knapp 20 % der Anlagenbetreiber gaben an, die Siebreste an externe Aufbereitungsanlagen abzugeben. Sonstige Entsorgungswege umfassen die Abgabe an mechanisch-biologische Abfallbehandlungsanlagen oder Ersatzbrennstoffkraftwerke.

Abbildung 1 Anteil der zu entsorgenden Siebreste bezogen auf den Anlageninput (links) und Anteil der Anlagen, die anfallende Siebreste in einer Müllverbrennungsanlage (MVA) entsorgen, in einem Biomasseheizkraftwerk (BMHKW) verwerten, zu einer externen Aufbereitung abgeben oder sonstige Entsorgungswege nutzen (rechts). (Quelle: Umfrage bei 275 Anlagenbetreibern) (© Witzenhausen-Institut)

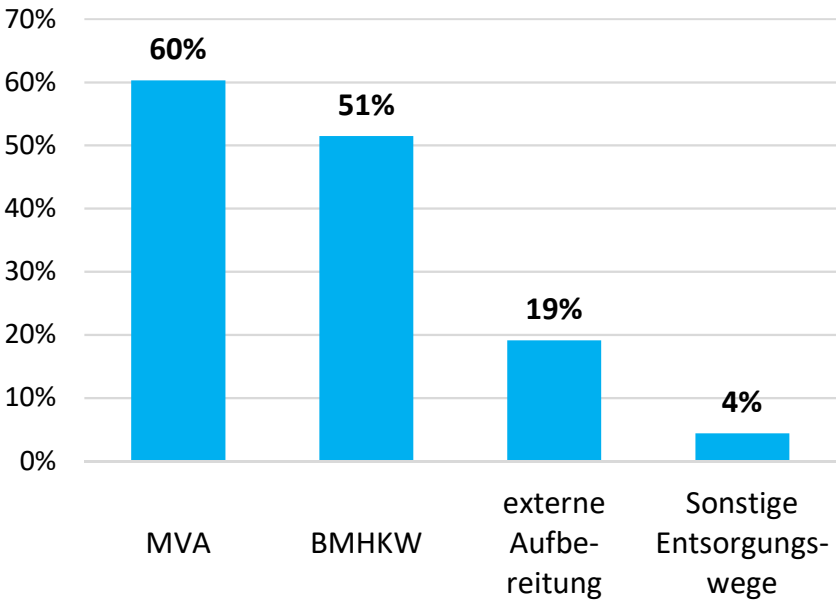
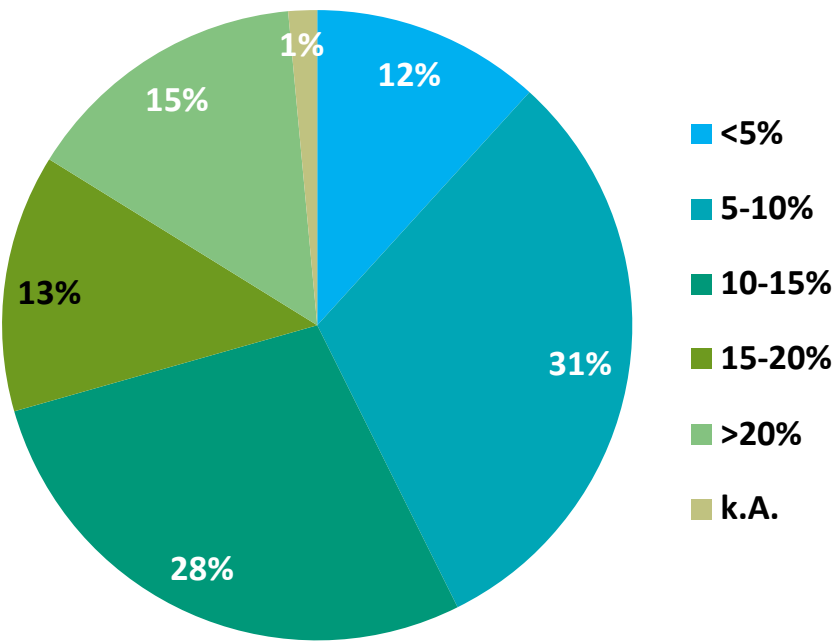


Abbildung 2 Anteil der Biogutbehandlungsanlagen je Preisspanne (netto, ohne Transport) für einen bestimmten Entsorgungsweg von Siebresten (Müllverbrennungsanlage (MVA), Biomasseheizkraftwerk (BMHKW), externe Aufbereitung oder sonstige Entsorgungswege). (Quelle: Umfrage bei 275 Anlagenbetreibern) (© Witzenhausen-Institut)

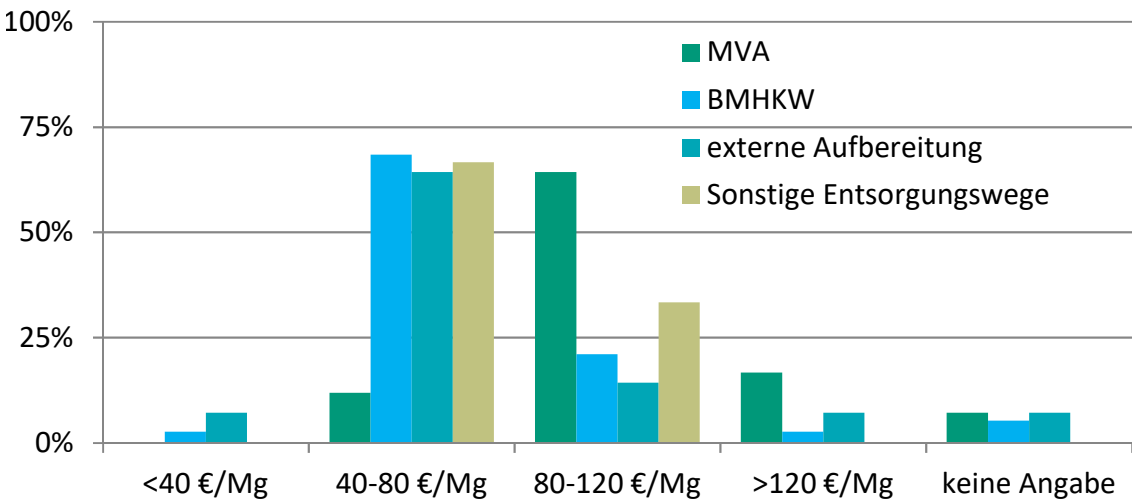


Tabelle 1 Beschreibung der vier Biogutbehandlungsanlagen, deren Siebreste analysiert wurden (© Witzenhausen-Institut)

SORTIERANALYSEN VON SIEBRESTEN Im Rahmen des Projekts wurden auf vier Biogutvergärungs- und kompostierungsanlagen Analysen der Siebreste durchgeführt. Diese Anlagen sind in Tabelle 1 beschrieben.

	Durchsatz	Biologische Behandlung	Kompost-Konfektionierung	Siebrestbehandlung
Anlage A	8.000 t/a	offene, überdachte Rotte	Trommelsieb (15 mm), Metallabscheider, Steinfalle	Keine
Anlage B	30.000 t/a	Boxenvergärung, Nachkompostierung in Boxen	Sternsieb (25 mm), Trommelsieb (12 mm), Windsichter	Keine
Anlage C	23.000 t/a	Pfropfenstrom vergärung Nachkompostierung in Tunneln	Trommelsieb (20 mm)	Windsichter
Anlage D	50.000 t/a	Tunnelrotte	Sternsieb (15 mm), Metallabscheider, Steinfalle	Windsichter, Steinfalle, NIR-Technik

Die Analysetermine erstreckten sich jeweils auf Frühjahr, Sommer und Winter um die jahreszeitlichen Schwankungen der Siebüberläufe mit zu erfassen. Die Fremdstoffgehalte in den Siebresten variieren deutlich zwischen den einzelnen Anlagen, aber weniger im Jahresverlauf mit Ausnahme der Anlage D, wo im Sommer deutlich höhere Gehalte auftraten als im Winter (Abbildung 3). In den Siebresten der Anlage B, wo ein Teilstrom aus Siebresten in die Nachrotte bzw. Rotte zurückgeführt wird, liegen die Fremdstoffgehalte deutlich höher als bei den anderen Anlagen. Der geringe Fremdstoffanteil in den Siebresten der Anlage C ist darauf zurückzuführen, dass ein Teilstrom bereits vor der biologischen Behandlung abgetrennt und in einer MVA entsorgt wird. Der größte Fremdstoffanteil entfiel bei allen Anlagen auf die Mineralikfraktion.

Hohe Fremdstoffgehalte, wie in den Anlagen A, B und D, führen bei einer Rückführung der Siebreste in den Kompostierungsprozess zu einer unerwünschten Aufkonzentrierung von Fremdstoffen.

Abbildung 3

Fremdstoffgehalte in den Siebresten der untersuchten Anlagen als Mittelwerte mit Spannweiten (Min./Max.) von Proben unterschiedlicher Jahreszeiten (Quelle: eigene Analysen),
(© Witzenhausen-Institut)

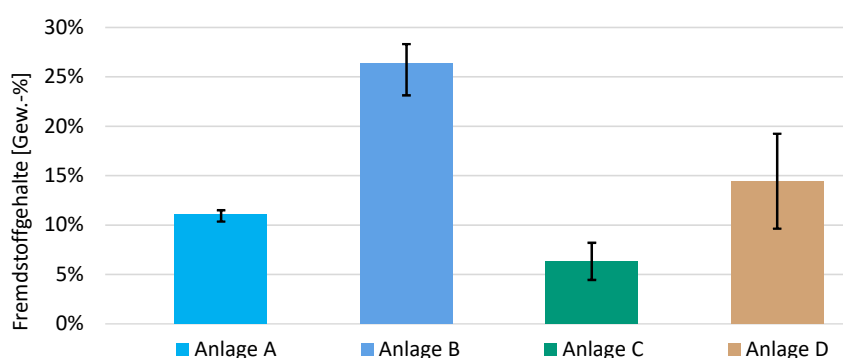
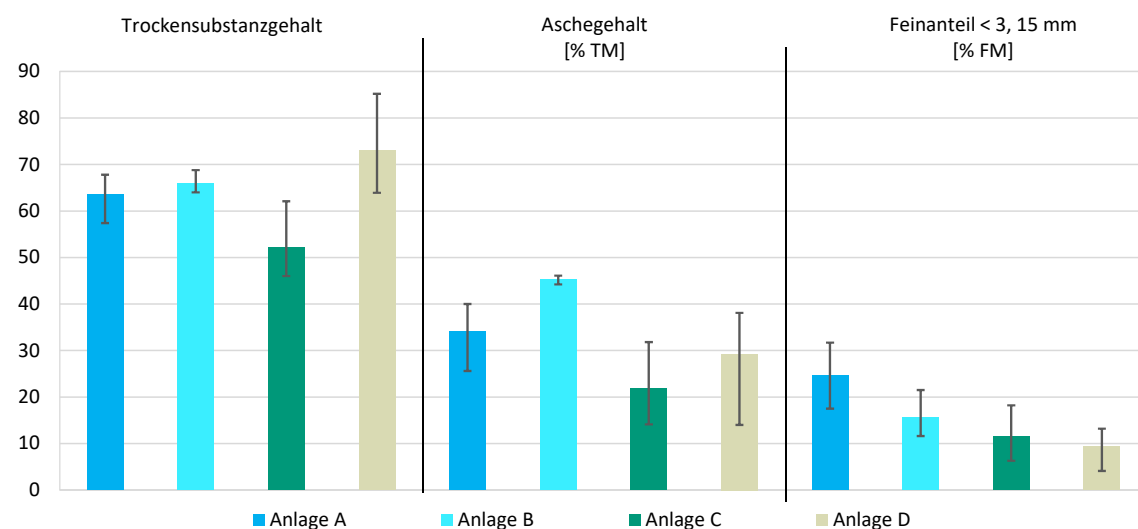


Abbildung 4

Trockensubstanzgehalte, Aschegehalte und Feinanteil (Sieblochgröße < 3,15 mm) der Siebreste der untersuchten Anlagen (Quelle: eigene Analysen),
(© Witzenhausen-Institut)

Der Aschegehalt der Siebreste bewegt sich im Mittel für die Anlagen in einem Bereich zwischen 20 und 45 % (Abbildung 4) und liegt damit deutlich über einem Wert von 15 %, den Biomasseheizkraftwerke in der Praxis in den Lieferbedingungen als Maximalgehalt für ihre Brennstoffe häufig fordern.

Die Feinanteile liegen auch deutlich über den in der Praxis häufig geforderten Maximalgehalten von 5 %.



Die Heizwerte der Siebreste liegen bei den Anlagen A, C und D im Mittel über 12 MJ/kg TS (trocken) bzw. 7 MJ/kg FM (Anlieferungszustand) und damit im erforderlichen Bereich für viele BMHKW in der Praxis (Abbildung 5).

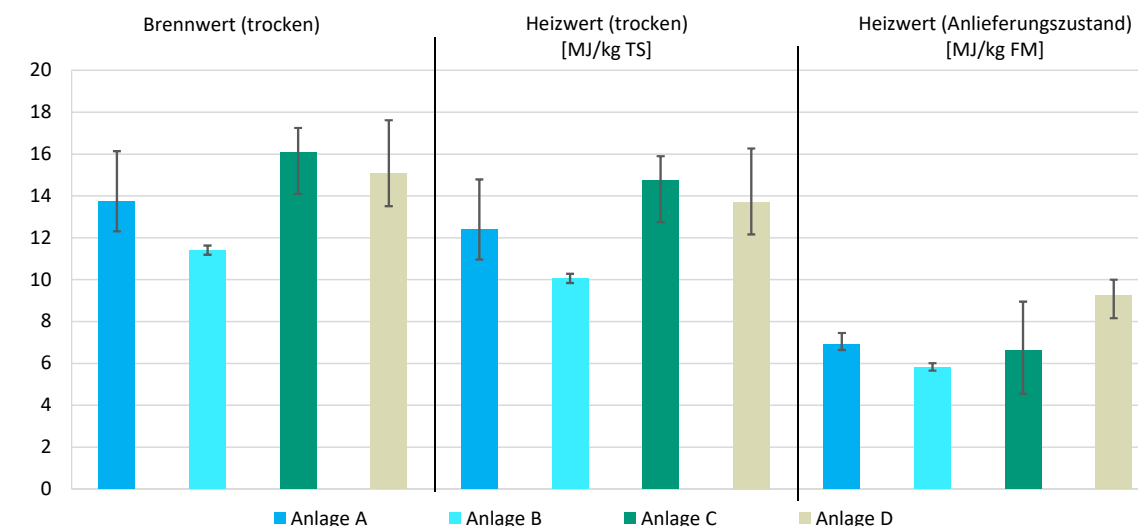


Abbildung 5

Brenn- und Heizwert der Siebreste der untersuchten Anlagen (Quelle: eigene Analysen),
(© Witzenhausen-Institut)

OPTIMIERUNGSOPTIONEN DURCH SIEBRESTAUFBEREITUNG

Um den Siebrest qualitativ zu verbessern, sodass er als Strukturmaterial in den Kompostierungsprozess zurückgeführt oder als Brennstoff in einem Biomasseheizkraftwerk eingesetzt werden kann, ist eine Aufbereitung erforderlich. Der Siebrest kann dazu nochmals zur Rotte aufgesetzt werden. Nach einer biologischen Trocknung wird dann erneut eine Fertigkompostfraktion (8–10 mm) abgesiebt und der verbleibende Siebrest wird mittels Windsichtung und Steinfalle gereinigt. Eine Rückführung des gereinigten Siebrests eröffnet für den Anlagenbetreiber die Möglichkeit, flexibel auf jahreszeitlich schwankende Inputqualitäten und Betriebszustände zu reagieren. In Phasen der mangelnden Verfügbarkeit anderer strukturgebender Inputstoffe (Grüngut) ergibt sich hieraus eine betriebsinterne Lösung.

ÖKONOMISCHE BEWERTUNG DER SIEBRESTAUFBEREITUNG

Ziel der Siebrestausbereitung ist, die Entsorgungskosten für die Siebreste gegenüber dem Ist-Zustand zu verringern. Die Abschätzung der Kosten der Siebrestverwertung bzw. entsorgung erfolgte anhand einer modellhaften Biogutbehandlungsanlage mit einem Input von 20.000 t/a und einer Siebrestmenge aus der Kompostkonfektionierung von 2.500 t/a für die folgenden Varianten:

- **Variante 1:** Der Siebrest wird vollständig in einer MVA entsorgt.
- **Variante 2:** Der Siebrest wird aufbereitet (biologische Trocknung, Absiebung von Feinmaterial, Abtrennung von Leichtstoffen mittels Windsichter und Schwerstoffen mittels Steinfalle) und der aufbereitete Siebrest wird vollständig als Strukturmaterial in den Prozess zurückgeführt. Die bei der Aufbereitung abgeschiedenen Leicht- und Schwerstoffe werden in einer MVA entsorgt.

- **Variante 3: Der Siebrest wird aufbereitet (siehe Variante 2) und der aufbereitete Siebrest wird vollständig in einem BMHKW verwertet. Die bei der Aufbereitung abgeschiedenen Leicht- und Schwerstoffe werden in einer MVA entsorgt.**

Für die spezifischen Verwertung- und Entsorgungskosten wurden für die Entsorgung in einer MVA 120 €/Mg und für die Verwertung in einem BMHKW 60 €/Mg angesetzt. Die Kostenansätze orientieren sich hierbei an den von den Anlagenbetreibern in der Umfrage genannten Entsorgungs- und Verwertungskosten für die Siebreste. In der Variante 1 ohne Siebrestaufbereitung entsprechen die spezifischen Behandlungskosten von ca. 15 €/t bezogen auf die Anlieferungs- menge von 20.000 t/a den Entsorgungskosten der Siebreste (Tabelle 2). Die spezifischen Behandlungskosten reduzieren sich bei einer Siebrestaufbereitung und einer Verwertung der aufbereiteten Siebreste in einem BMHKW um ca. 2 €/t, bei einer Rückführung der aufbereiteten Siebreste als Struktur in den Behandlungsprozess um ca. 5 €/t.

Tabelle 1
Spezifische Behandlungskosten
von drei Varianten der
Siebrestentsorgung bzw. Verwertung
(Quelle: eigene Berechnung)
(© Witzenhausen-Institut)

¹bezogen auf eine
Anlieferungs- menge von
20.000 t/a Biogut

	Kosten für Siebrestaufbereitung	Entsorgungs- bzw. Verwertungskosten	Spezifische ¹ Behandlungskosten
Variante 1	-	300.000 €/a	15 €/t
Variante 2	133.000 €/a	60.000 €/a	10 €/t
Variante 3	133.000 €/a	126.000 €/a	13 €/t

EMPFEHLUNGEN FÜR DIE PRAXIS

Im Sinne der Abfallhierarchie soll die technische Aufbereitung der Siebreste eine Wiederverwendung als Strukturmaterial oder die energetische Verwertung im BMHKW ermöglichen. Der angestrebte Verwertungsweg ist dabei von den spezifischen Anforderungen der Biogutbehandlungsanlage abhängig zu machen und dient als Grundlage zur Planung des Aufbereitungskonzepts. Die aufgezeigten Verwertungswege können in Verbindung mit der technischen Aufbereitung der Siebreste eine wirtschaftliche Alternative zur Entsorgung in einer MVA darstellen. Hinsichtlich der Wirtschaftlichkeit der Siebrestaufbereitung sollte der kleinstmögliche Stoffstrom aufbereitet werden. Aus technischer Perspektive ist für die effiziente Fremdstoffabtrennung die Eingrenzung der Korngröße durchzuführen und ein Stoffstrom mit möglichst hohem TS-Gehalt zu behandeln. Ein Materialstrom, welcher beiden Anforderungen gerecht wird, ist der Siebüberlauf aus der Kompostkonfektionierung.

Folglich sollten je nach Behandlungsverfahren des Bioguts Störstoffe vor dem biologischen Prozess abgetrennt werden, während die Fremdstoffentfrachtung aus dem Siebüberlauf der Kompostkonfektionierung sinnvoll ist. Wenn eine technische Aufbereitung des Bioguts nötig ist, so sollte auf eine materialschonende Aufbereitung (langsamlaufende Zerkleinerung, Sackaufreißer) zurückgegriffen

werden. Hierdurch wird eine zu starke Zerkleinerung der Fremdstoffe verhindert. Dies wirkt sich positiv auf die Fremdstoffentfrachtung bei der Kompostkonfektionierung aus.

Die Verjüngung des Stoffstroms bei der Kompostkonfektionierung bewirkt neben der Einengung der Korngröße auch die Anreicherung der Fremdstoffe im Siebüberlauf. Hierdurch wird eine gezielte Entfrachtung dieser mit technischen Verfahren ermöglicht. Der Auswahl der technischen Verfahren zur Siebrestaufbereitung sollte die Analyse der Zusammensetzung des Siebüberlaufs und die spezifischen Anforderungen der angestrebten Verwertung zugrunde gelegt werden.

Neben der Betrachtung der technischen Verfahren zur Ausschleusung von Fremdstoffen aus Siebresten sollten die Verursacher, die Abfallerzeuger, nicht außer Acht gelassen werden. Schlussendlich liegt es in der Hand dieser, Verunreinigungen zu vermeiden und den technischen Aufwand zur Stör- und Fremdstoffentfrachtung in der Prozesskette der Biogutbehandlung gering zu halten. Eine vollständige Abtrennung der eingebrachten Fremdstoffe ist mit technischen Verfahren schlichtweg nicht möglich, da der Wirkungsbereich von physikalischen Trennverfahren begrenzt ist. So gilt es, durch eine umfangreiche Öffentlichkeitsarbeit die Erzeuger hinsichtlich der Fremdstoffe im Biogut zu sensibilisieren. Bei Nichteinhaltung, welche durch Kontrollen und Detektion der Biotonneninhalte festgestellt werden können, sind entsprechende Sanktionen gegenüber den Erzeugern sinnvoll.

Herausforderungen

Herausforderungen ergaben sich in diesem Projekt vor allem durch die Einschränkungen im Zuge der Corona-Pandemie und damit verbundenen zeitlichen Verschiebungen von Praxisversuchen bei Anlagenbetreibern und von den darauffolgenden Laboranalysen.

Ausblick

Die Projektergebnisse stehen sowohl der Politik in Form einer unabhängigen Expertise als auch öffentlich-rechtlichen Entsorgungsträgern, Abfallwirtschaftsbetrieben, Planern und Herstellern von Biogutbehandlungsanlagen sowie anderen Forschungsinstitutionen zur Verfügung. Auf dieser Grundlage kann an dem insbesondere für die Praxis wichtigen Thema weitergearbeitet werden.

Weitere
Informationen

- [Projektwebseite >>](#)
- [Endbericht des Projektes >>](#)

Ingolf Seick, Jürgen Wiese

ThermoFlex-WAVE

Weiterentwicklung und Validierung einer Technologie zur internen Wärmespeicherung für eine effizientere Wärmenutzung von Biogasanlagen

Zusammenfassung

Gegenstand des Vorhabens ist ein Verfahren, welches durch Projektbeteiligte in einem vorangegangenen FuE-Projekt (ThermoFlex 2019) entwickelt wurde. Das „ThermoFlex-Verfahren“ ermöglicht die Flexibilisierung von Biogasanlagen bei hohem Wärmenutzungsgrad ohne Investition in zusätzliche Wärmespeicherbehälter. Es basiert auf dem Betrieb eines thermophilen Nachgärers mit gezielten Temperaturvariationen als Wärmespeicher nach einem mesophilen Fermenter. Im Vorfeld einer erfolgreichen Markteinführung waren umfassende FuE-Arbeiten zur Weiterentwicklung, Anpassung, Validierung und Erprobung des entwickelten Verfahrens erforderlich, die im Verbundprojekt ThermoFlex-WAVE durchgeführt wurden. Zu den wesentlichen Zielen dieses Projektes gehörten neben der Optimierung des ThermoFlex-Verfahrens und Planung von Verfahrensvarianten die Umrüstung einer landwirtschaftlichen Biogasanlage zur Referenzanlage und die großtechnische Erprobung.

Themen-schwerpunkte

- Flexibilisierung von Biogasanlagen
- effektive Wärmenutzung durch Wärmespeicherung in Gärbehältern
- Vermeidung Zubau Wärmespeicher senkt Kosten
- Anhebung und Variation der Gärtemperaturen
- Erprobung auf einer landwirtschaftlichen Biogasanlage

Ziele

Das entwickelte »ThermoFlex-Verfahren« ermöglicht die Flexibilisierung von Biogasanlagen bei hohem Wärmenutzungsgrad ohne zusätzlichen Wärmespeicher. Damit lassen sich die Investitionskosten deutlich verringern. Das Verfahren basiert auf einem geregelten Betrieb eines Nachgärers in thermophilen Temperaturbereichen als Wärmespeicher nach einem mesophilen Fermenter. Neben der Optimierung des Verfahrens und Planung von Varianten hat das Projekt die großtechnische Erprobung auf einer landwirtschaftlichen Biogasanlage (BGA) zum Ziel.

Kernbotschaften

- Die erfolgreiche großtechnische Erprobung zeigt, dass fallspezifisch angepasste ThermoFlex-Varianten gut umsetzbar sind.
- Das erprobte Konzept kann für Biogasanlagen als kostengünstige Lösung angewendet werden.
- Dynamische Simulationsmodelle zum Wärmemanagement und zur Prozessbiologie können die Verfahrensoptimierung effektiv unterstützen.

Ingolf Seick: »Die Energiewende ist bisher fast nur eine Stromwende! Mit ThermoFlex-WAVE wollen wir durch einen hochflexiblen Betrieb einen Beitrag leisten, Biogasanlagen nicht nur effizienter mit den fluktuierenden Wind- und PV-Anlagen zu verknüpfen, sondern vor allem das hohe Erneuerbare Wärme-potential von Biogasanlagen nachhaltiger als bisher zu erschließen.«

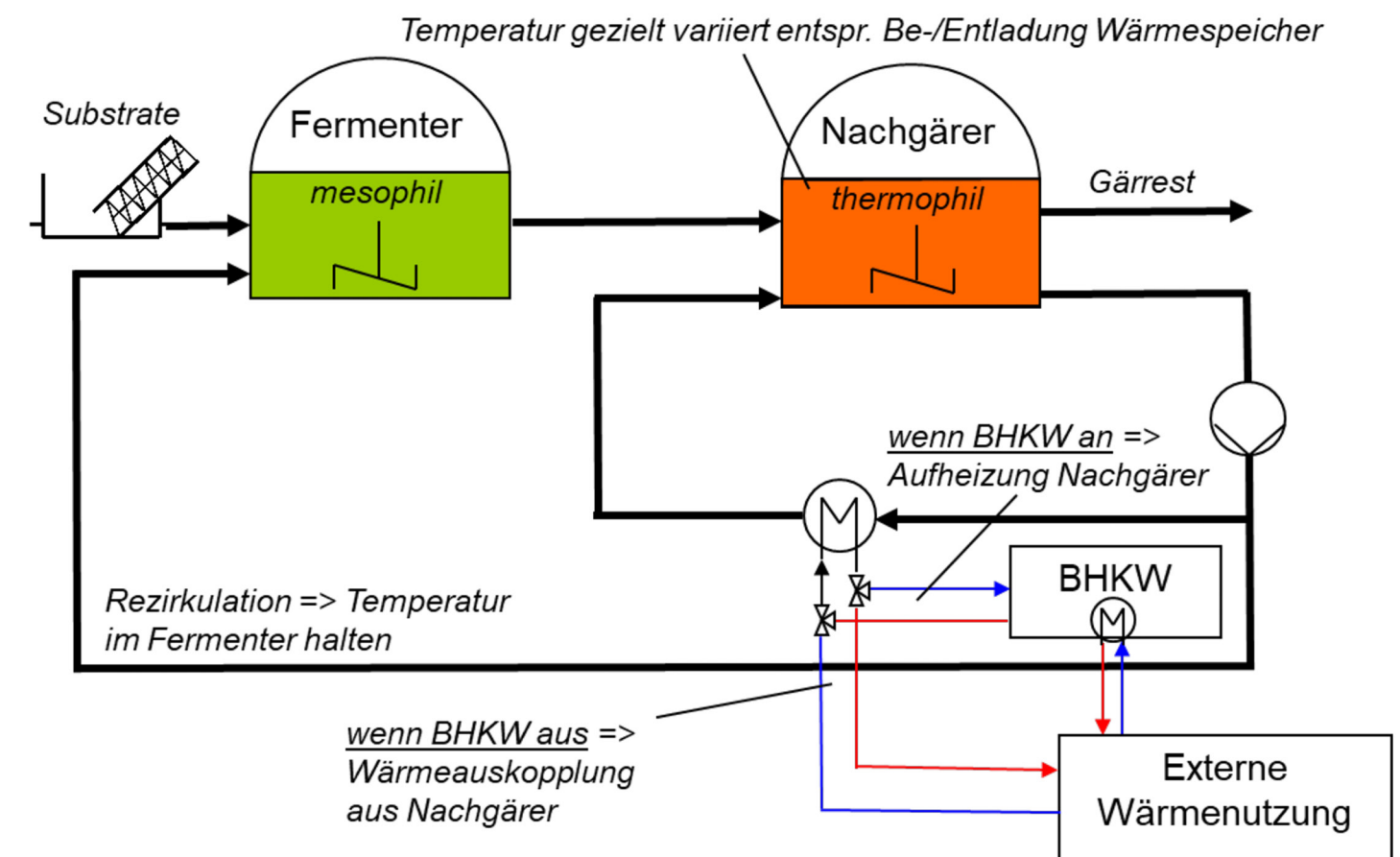
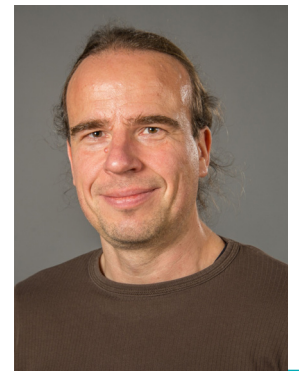


Abbildung 1

Exemplarisches Schema zum ThermoFlex-Verfahren (© Hochschule Magdeburg-Stendal)

FKZ-Nr.: 03KB142
 Laufzeit: 01.10.2018 — 30.09.2021
 Zuwendungssumme: 310.000 €

JSW Biogas, Inh. Jörg Schulze Wext
 Genthiner Str. 21, 39307 Bergzow

Hochschule Magdeburg-Stendal
 Breitscheidstraße 2, 39114 Magdeburg

KOORDINATION:
 bue Anlagentechnik GmbH
 Am Anger 11, 06249 Muehlen

PROJEKTLEITUNG:
 Prof. Dr.-Ing. Jürgen Wiese
 Direkte Ansprechperson:

PARTNER:
 Thorsis Technologies GmbH
 Oststraße 18, 39114 Magdeburg

Ingolf Seick
 +49 (0)391 886 4365
 ingolf.seick@h2.de

summary
(engl.)

The subject of the project is a process that was developed in a previous R&D project (ThermoFlex 2019). The "ThermoFlex process" enables the flexibilisation of biogas plants with a high utilisation of heat without investing in additional heat storage tanks. It is based on the operation of a thermophilic secondary digester with controlled temperature variations as heat storage after a mesophilic fermenter. In the preparation for a successful market launch, extensive R&D work was required to further development, adaption, validation and testing of the developed process, which was carried out in the ThermoFlex-WAVE joint project. In addition to optimising the ThermoFlex process and planning its variants, the main goals of this project included converting an agricultural biogas plant into a reference plant and testing it on a large scale.

key messages
(engl.)

- **Successful large-scale testing shows that ThermoFlex variants adapted to specific cases can be implemented well.**
- **The tested concept can be applied to biogas plants as a cost-effective solution.**
- **Dynamic simulation models for heat management and process biology can effectively support process optimisation.**

Methodik
Maßnahmen

- Weiterentwicklung ThermoFlex-Verfahren, dafür detaillierte FuE- und Planungsarbeiten am Beispiel der landwirtschaftlichen Biogasanlage Bergzow des Projektpartners JSW Biogas als „Referenzanlage“ (siehe Exkurs unten)
- Motivation für ThermoFlex-Anwendung auf Referenzanlage: Verfügbare Abwärme ist geringer als die Kapazität einer vor Ort betriebenen Anlage zur Trocknung von z. B. Mais, Getreide oder Luzerne
- Wärmespeicherung in den Gärbehältern vor den Trocknungs-Kampagnen ermöglicht effektivere Trocknung durch vollständige Nutzung der BHKW-Abwärme, weil Wärmebedarf der übrigen Verbraucher während der Trocknung aus den Gärbehältern gedeckt wird
- Kontinuierliche Labor-Gärversuche und Restgaspotenzialbestimmung für wesentliche Randbedingungen der Referenzanlage
- Analysen und Verfahrensoptimierungen mit dynamischen Simulationsmodellen (SIMBA 2021) zur Prozessbiologie und zum Wärmemanagement

Ergebnisse
auf einen Blick

PUBLIKATION:

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

- Seick I, Vergara-Araya M, Wiese J (2021): Flexible energy from biogas: Use of secondary digesters for heat storage - Results of fermentation tests. CLEAN – Soil, Air, Water, DOI: 10.1002/clen.202000373.
- Seick I, Vergara-Araya M, Wiese J (2022): Model-Based Analysis to Increase the

Substrate Efficiency of a Biogas Plant. Chem. Eng. Technol., DOI: 10.1002/ceat.202100370.

■ Vorträge / Tagungsbandbeitrag

- Seick I, Wiese J (2019): Wärmespeicherung im Nachgärer mit dem ThermoFlex-Verfahren für flexible Biogasanlagen. 12. Biogas-Innovationskongress 2019, 21.-22.05 2019 in Osnabrück, Tagungsband. ISBN 978-3-947777-03-7.

- 03KB142 ThermoFlex-WAVE. 8. Statuskonferenz „Energetische Biomassenutzung“ am 17. September 2019 in Leipzig, Reader: ISBN 978-3-946629-27-6.
- Seick I, Wiese J (2021): Model-based analysis to increase the efficiency of a biogas plant. Short presentation, CMP - Conference on Monitoring & Process Control of Anaerobic Digestion Processes March 23–24, 2021, Online, Reader: ISBN 978-3-946629-68-9.
- Sonstige Vorträge
 - Präsentation im Vortragsforum des Flexper-ten-Planernetzwerks am 15. November 2018 auf der energy decentral in Hannover.
 - Wärmespeicherung im Nachgärer mit »ThermoFlex«- Was gibt es Neues?. 8. Fachtagung Biogas, Merseburg, 24.10.2019.

KONZEPT/MACHBARKEITSSTUDIE:

■ Weiterentwickeltes ThermoFlex-Verfahren

ANLAGE:

■ Demonstrationsversuche auf großtechnischer Biogasanlage

DATEN & METHODEN:

■ Modellierung und Simulation Wärmemanagement

■ Übertragbare Ansätze zur Modellierung von landwirtschaftlichen Biogasanlagen (Seick et al. 2022)

■ Praxisnahe kontinuierliche Gärversuche (Seick et al. 2021)

MARKT:

■ Patent: DE102014016801B4

■ Basislösung als kostengünstige Alternative

Darstellung der
Ergebnisse

EINSATZMÖGLICHKEITEN DES THERMOFLEX-VERFAHRENS

Das ThermoFlex-Verfahren greift insbesondere dort, wo die Wärmenutzung im Niedertemperaturbereich angesiedelt ist und vermeidet den bautechnischen Aufwand von zusätzlichen Warmwasserspeicher-Behältern. Kombinationen mit vorhandenen Wärmespeichern verschiedener Art sowie auch mit intelligenten Möglichkeiten der Abwärmenutzung (z. B. aus dem Gärrestlager) sind möglich. Bei der damit verbundenen Absenkung der Temperaturen in Nahwärmenetzen zeigen sich weitere Vorteile: Die Wärmeverluste im Vergleich zu einem herkömmlichen Nahwärmenetz mit hohen Temperaturen (90/70°C) lassen sich nahezu halbieren und z. B. die Nutzungsdauer von Netzleitungen aus Kunststoff (PEX) von 15 auf 40-50 Jahre erhöhen. Falls höhere Temperaturen für bestimmte Anwendungen benötigt werden, lassen sich diese durch Einsatz von Wärmepumpen erreichen (vgl. Abschlussbericht).

PRAXISNAHE LABORVERSUCHE ZUR UMRÜSTUNG DER REFERENZANLAGE

In einem kontinuierlichen Gärversuch mit einer Laborbiogasanlage (»BTP2« mit Fermenter und Nachgärer je 20L) basierend auf den Betriebsbedingungen der Referenzanlage (vgl. Exkurs) wurde gezeigt, dass die Implementierung von ThermoFlex dort möglich ist, jedoch Modifikationen erfordert. In einem zweiten kontinuierlichen Gärversuch mit optimierten Randbedingungen wurden entsprechende Modifikationen erfolgreich getestet. Die Gärversuche und eine Recherche von relevanten Literaturquellen bestätigen, dass die Anpassungsfähigkeit an Temperaturänderungen stark von den Randbedingungen der jeweiligen Biogasanlage abhängt und fallspezifische Untersuchungen (Gärversuche) erfolgen sollten, bevor signifikante Änderungen am Temperaturmanagement von Vergärungsanlagen vorgenommen werden. Insbesondere bei der Umstellung auf thermophilen Betrieb muss behutsam vorgegangen und ausreichend Zeit sowie ein engmaschiges Monitoring des Bioprozesses eingeplant werden (Seick et al. 2021).

IM ERGEBNIS DER VERSUCHE KONNTE FÜR DIE REFERENZ-ANLAGE GEZEIGT WERDEN, DASS:

- durch Wärmespeicherung in den Gärbehältern mehr Wärme für die Trocknung verfügbar wird,
- sich die Trocknungskampagnen um mindestens einen Tag verkürzen,
- keine Beeinträchtigung der Prozessbiologie und des Methanertrages bzw. der Substrateffizienz durch die variablen Gärtemperaturen erfolgt,
- eine aufwandsarme Umstellung auf das Verfahren möglich ist.

Herausforderungen

Folgende potenzielle Markthemmnisse sind hervorzuheben:

- Generelle wirtschaftliche Situation von Biogasanlagen und politische Unsicherheiten senken Investitionsbereitschaft auch für Flexibilisierung
- Verschärfung verschiedener fachrechtlicher Anforderungen
- Fallspezifisch ggf. zu hoher Aufwand bei Anpassung der vorhandenen Wärminfrastruktur am Standort
- Aus prozesstechnischer Sicht sind hohe thermophile Temperaturen im Zusammenhang mit hoher Belastung und geringen hydraulischen Verweilzeiten in den Gärbehältern herausfordernd.

Ausblick

Diese Hemmnisse sind mit sorgfältiger Planung beherrschbar – insbesondere die im Projektverlauf entwickelte »ThermoFlex-Basislösung« bietet hierfür einen erfolgversprechenden - auf andere BGA übertragbaren - Ansatz.

Die Demonstrationsversuche zum Projektabschluss mit der modifizierten Verfahrensvariante auf der Referenzanlage liefern ein erstes Erfolgsbeispiel.

Weitere Informationen

Das erprobte Konzept kann auch für vergleichbare Biogasanlagen als kostengünstige Variante oder als Vorstufe zu einer vollumfänglichen Umrüstung auf ThermoFlex entwickelt werden. Die Einbeziehung des Fermenters in die Wärmespeicherung bietet hier zusätzliches Potenzial.

Die Basislösung lässt sich z. B. auch auf flexibilisierten Biogasanlagen mit Satelliten-BHKW anwenden, wenn auf der BGA noch ein BHKW zur Behälterheizung genutzt wird. Dieses BHKW kann durch die neue Lösung auch flexibel betrieben werden, wenn die in den BHKW-Betriebspausen weiterhin benötigte Prozesswärme zuvor in den Gärbehältern gespeichert wird.

■ [Endbericht des Projektes >>](#)

■ [Arbeitsgruppe Siedlungswasserwirtschaft/Abwasser](#)

EXKURS BIOGASANLAGE BERGZOW

Die landwirtschaftliche Biogasanlage Bergzow verfügt über zwei BHKW mit insgesamt 740 kW_{el} installierter Leistung. Die anfallende Wärme wird für den kompletten Betrieb sowie zur Beheizung von privaten Häusern genutzt. Die Anlage verfügt über einen Fermenter und einen Nachgärer mit jeweils 2.200 m³ Füllvolumen. Sie wird hauptsächlich mit Rindergülle (ca. 60 %) und Maissilage (ca. 25-30 %) sowie Grassilage, Hühner-trockenkot, Rinderfestmist und Restfutter beschickt.

Vom Nachgärer wird ein Volumenstrom der 3-4-fachen Menge des Substratinputs als Rezirkulat in eine mit ca. 100 m³ gefüllte Anmischgrube gepumpt. Die Belastung des Fermenters ist relativ hoch (bis zu 6 kg organische Trockenmasse je m³ und Tag). Der anfallende Gärrest wird aus dem Nachgärer in einen bis zum Projektende noch nicht abgedeckten Gärrestbehälter mit 5.900 m³ Lagervolumen überführt (vgl. >> [Endbericht](#)).

LITERATUR

- **ThermoFlex (2019): Schlussbericht zum Verbundvorhaben »Interne Wärmespeicherung für eine verbesserte Wärmenutzung und Effizienz bei der flexiblen Stromproduktion von Biogasanlagen (ThermoFlex)« an das BMBF (FKZ 01LY1509),** <https://doi.org/10.2314/KXP:1697722261>.
- Seick I, Vergara-Araya M, Wiese J (2021): Flexible energy from biogas: Use of secondary digesters for heat storage - Results of fermentation tests. CLEAN – Soil, Air, Water, DOI: 10.1002/clen.202000373.
- Seick I, Vergara-Araya M, Wiese J (2022): Model-Based Analysis to Increase the Substrate Efficiency of a Biogas Plant. Chem. Eng. Technol., DOI: 10.1002/ceat.202100370.
- SIMBA (2021): SIMBA#biogas 4.3 - Simulationssystem für Biogas. Institut für Automation und Kommunikation e.V. (ifak), Magdeburg, 2021.

Abbildung 4

Biogasanlage Bergzow mit Trocknungsanlage (links), (© Wilken)



BIOMASSEVERBRENNUNG & -VERGASUNG

Alternative Brennstoffe, dezentrale
Vergasung und Flexibilisierung



BioBrick

Martin Meiller, Michael Meiler, Holger Burkhardt,
Werner Klenk, Dominik Alt, Sebastian Ernst

Biomasse als Schlüssel für eine nachhaltige Produktion von Ziegeln – Energieversorgung, Erzeugung von Prozesswärme und stoffliche Verwertung von Vergaserrückständen

Zusammenfassung

Am Beispiel eines Ziegelwerks zeigt das Projekt »BioBrick«, wie Prozesswärme (500 – 1000 °C) und stoffliche Rückstände aus Biomasseanlagen für die industrielle Ziegel-Produktion genutzt werden können. Im Projekt-Setup stellt ein Holzvergaser die Wärme bereit, die kohlenstoffhaltigen Rückstände aus dem Vergaser werden als Porosierungsmaterial im Ziegel verwendet. Die Machbarkeit innovativer Ansätze, wie der Nutzung von Vergaserkoks in einem Produkt sowie der Weiterentwicklung von Feuerungstechnik durch praktische Untersuchungen wird gezeigt und dies mit der Entwicklung von optimierten Gesamtkonzepten, die eine vollständige Ausnutzung der eingesetzten Biomasse ermöglichen, verbunden. Durch die Porosierung mit Holzkohle konnten im Betrieb Einsparungen an Erdgas von bis zu 20 % gezeigt werden. Die Kaskadennutzung verringert die Entsorgungskosten, verbessert die Produkteigenschaften des Ziegels, spart fossile Energieträger ein und steigert gleichzeitig die Kosteneffizienz des Prozesses. Der wirtschaftliche Einsatz von Biomasse in energieintensiven Industrien wird damit exemplarisch nachgewiesen.

Themen-schwerpunkte

- Prozesswärmeerzeugung
- Erdgassubstitution
- Biomasse-Vergasung
- Verwertung von Vergaserrückständen

Abbildung 1:
Schemata des Projektes BioBrick
(© Fraunhofer Institut)



Martin Meiller: »Unser Ansatz war es eine optimale Ausnutzung des Einsatzstoffes zu erreichen. Durch die Porosierung mit Holzkohle konnten im Betrieb Einsparungen an Erdgas von bis zu 20 % erreicht werden. Diese Kaskadennutzung verringert Entsorgungskosten, verbessert die Produkteigenschaften des Ziegels, spart fossile Energieträger ein und steigert gleichzeitig die Kosteneffizienz des Prozesses.«



Ziele

Das Ziel des Vorhabens ist es den Einsatz von Biomasse vor allem im Bereich der industriellen Prozesswärmebereitstellung zu forcieren, auf diesem Weg fossile Energieträger zu verdrängen, die Abhängigkeit von Importen zu reduzieren und CO₂-Emissionen einzusparen.

Als Referenzsystem wird der Prozess zur Herstellung von Ziegeln gewählt. In diesem äußerst energieintensiven Prozess (31 PJ/a in Deutschland) bestehen vielfältige Möglichkeiten zur energetischen sowie stofflichen Nutzung von Biomasse in Verbindung mit dem Einsatz eines Holzvergasers:

- Direkte Nutzung von Synthesegas zur Erzeugung von Hochtemperaturprozesswärme
- Energetische Verwertung von kohlenstoffhaltigen Rückständen (Vergaserkoks) in Staubfeuerung
- Verwertung von Vergaserkoks als Porosierungsmaterial im Ziegel

Icon des Projektes BioBrick (© Joshua Röbisch, DBFZ)

FKZ-Nr.: 03EI5410
Laufzeit: 01.01.2020 – 31.12.2021
Zuwendungssumme: 435.644 €

KOORDINATION:
Fraunhofer-Institut für Umwelt-,
Sicherheits- und Energietechnik UMSICHT,
Institutsteil Sulzbach-Rosenberg
Martin Meiller, Michael Meiler
An der Maxhütte 1
92237 Sulzbach-Rosenberg
www.umsicht-suro.fraunhofer.de

PROJEKTL EITUNG:
Martin Meiller
+49 (0)9661 8155 421
martin.meiller@
umsicht.fraunhofer.de

PARTNER:
Burkhardt GmbH
Holger Burkhardt, Werner Klenk,
Dominik Alt
Kreutweg 2
92360 Mühlhausen
www.burkhardt-gmbh.de

Ziegelwerk Ernst GmbH & Co. KG
Sebastian Ernst
Ziegelei 2
85117 Eitensheim
www.ernst-ziegelwerk.de

Kernbotschaften

- Nutzung von Vergaserrückständen bzw. Holzkohle als Porosierungsmittel im Bereich der Ziegelproduktion technisch realisierbar und wirtschaftlich möglich.
- Zentrale Herausforderung ist bei der Porosierung die Dosierung und Fördertechnik.
- Verbrennung von Holzgas mit modifizierter Brennertechnik grundsätzlich machbar. Hier besteht jedoch Entwicklungsbedarf für effizientere Systeme.
- Wirtschaftlichkeit der Einbindung eines Holzvergaser(-BKHV) insbesondere abhängig von CO₂- und Brennstoffpreis. Holzvergaser als flexibles, technisches Element, um CO₂-neutrale Produktion zu implementieren.

summary (engl.)

Using a brick factory as an example, the »BioBrick« project shows how process heat (500 - 1000 °C) and material residues from biomass plants can be used for industrial brick production. In the project setup, a wood gasifier provides the heat and the carbonaceous residues from the gasifier are used as porosity material in the brick. The feasibility of innovative approaches, such as the use of gasifier coke in a product as well as the further development of firing technology through practical investigations is demonstrated and this is combined with the development of optimized overall concepts that enable the full utilization of the biomass used. Porosification with charcoal has shown savings of natural gas of up to 20 % in operation. Cascade utilization reduces disposal costs, improves the product properties of the brick, saves fossil energy sources and at the same time increases the cost efficiency of the process. The economic use of biomass in energy-intensive industries was demonstrated in this case.

key messages (eng.)

- Use of gasifier residues or charcoal as a porosification agent in brick production is technically feasible and economically viable.
- The main challenge in porosification is the dosing and conveying technology.
- Combustion of wood gas with modified burner technology is feasible in principle. However, there is a need for development of more efficient systems.
- The economic viability of integrating a wood gasifier (CHP) depends in particular on CO₂ and fuel prices. Wood gasifier as a flexible technical element to implement CO₂-neutral production.

Methodik Maßnahmen

Für das Projekt BioBrick arbeiteten die Burkhardt GmbH (Vergaserhersteller), Ernst Ziegelwerk (Anlagenbetreiber) und Fraunhofer UMSICHT eng abgestimmt zusammen. Es wurden folgende zentralen Maßnahmen umgesetzt:

- Energieverbrauchs- und Prozessdatenanalyse des Standortes der Ziegelei
- Konzeptionierung und Vorevaluation der Vergasungstechnologie in die Energieversorgung des Standorts zur Versorgung mit Strom und Wärme aus Biomasse über ein BHKW

Ergebnisse auf einen Blick

- Praktische Erprobung von Brennern mit Holzgas
- Technikumsversuche zur Nutzung von Vergaserkoks in einem Staub-brenner
- Untersuchungen zur Nutzung von Vergaserkoks als Porosierungsmittel im Ziegel im Ziegelwerk
- Technologische, ökonomische und ökologische Bewertung von Szenarien
- Prüfung der Übertragbarkeit auf andere Firmen/Branchen

PUBLIKATION:

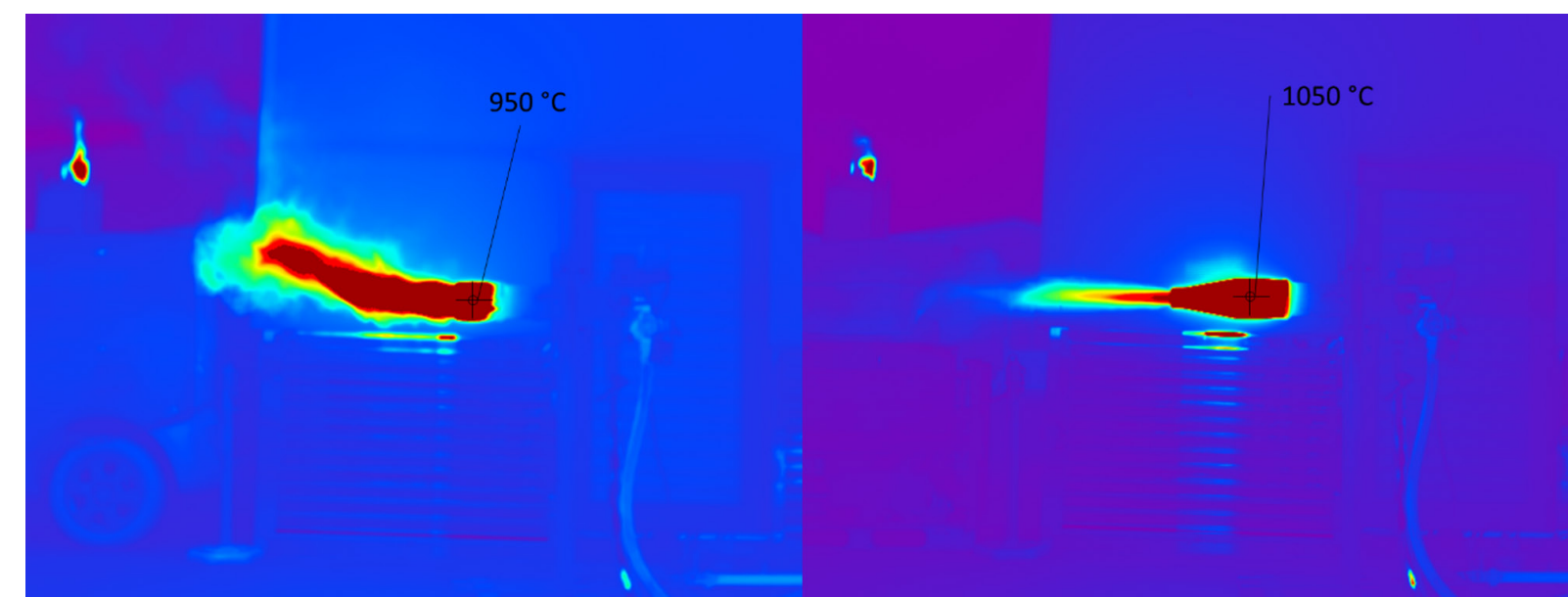
- [Endbericht >>](#)
- Zeitungsartikel/Pressemitteilungen:
 - Euwid – Neue Energie
 - VDI – Verlag
 - EURO Heat & Power
 - ZI Ziegelindustrie International
 - Bayerische Staatszeitung
 - Homepagemeldungen Fraunhofer UMSICHT

Konferenzbeiträge:

- Meiller M, Komogowski L (2020): Importance of biomass for the decarbonization of industrial process heat; Central European Biomass Conference (CEBC), Graz, Austria, 22.-24.01.2020.
- Walberer J, Meiller M, Burkhardt H, Klenk W, Alt D, Ernst S (2021): Biomass as the Key to a Sustainable Brick Production - Energy Supply, Generation of Process Heat and Recycling of Gasification Residues; European Biomass Conference (EUBCE), online, 28.04.2021.
- Walberer J, Meiller M, Burkhardt H, Klenk W, Alt D, Ernst S (2021): BioBrick - technische und wirtschaftliche Machbarkeit der betrachteten Szenarien, Verbrennungsversuche mit Holzgas und Nutzung von Vergaserrückständen im Ziegel; 10 Statuskonferenz, online, 30.11.2021

Abbildung 2:

(links) Flammenbild Holzgasgbrenner mit Standard Düse und Jet-Düse (rechts)
(© Fraunhofer Institut)



Darstellung der Ergebnisse

DATENERHEBUNG, KONZEPTENTWICKLUNG UND WIRTSCHAFTLICHKEITSBETRACHTUNG DER EINZELNEN SZENARIEN

Zunächst wurden verschiedene Einbindungsvarianten von Holzvergaser-(BHKW) im Ziegelwerk betrachtet. Eine konventionelle Einbindung ist in einem Ziegelwerk nicht sinnvoll, da die anfallende Niedertemperaturwärme nur begrenzt genutzt werden kann. Aus diesem Grund wurden Alternativen betrachtet wie die Abwärme aus dem Vergaser-(BHKW) mit einem möglichst hohen Temperaturniveau in den Ziegelprozess eingespeist werden kann. Hier stellen vor allem die Vorwärmung der Brennerwägen, die Einbindung in die Regenerative Nachverbrennung (RNV) oder die Vorwärmung der Verbundluft für den Trockner sinnvolle Möglichkeiten dar.

Die Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen zeigten, dass die betrachteten Varianten unter den Rahmenbedingungen zum Projektstart nicht wirtschaftlich waren. Während der Projektphase änderten sich jedoch die Energiepreise (vor allem Erdgas) drastisch. Dies führte dazu, dass die Integration eines Holzvergasers zu den Rahmenbedingungen (Stand Dezember 2021) in Verbindung mit einer ganzheitlichen Nutzung der Vergaserrückstände (Porosierungsanteil 0,5 Ma.-%) bereits jetzt wirtschaftlich ist. Allerdings muss an dieser Stelle erwähnt werden, dass die aktuellen Energiepreise erheblichen Schwankungen unterliegen und diese nur schwer zu kalkulieren sind. Jedoch ist davon auszugehen, dass die Strom- und Gaspreise auf einem hohen Niveau bleiben werden, weshalb die Wirtschaftlichkeit des Konzepts absehbar ist.

Abbildung 3:

Industrielle Ziegelproduktion
(© Fraunhofer Institut)



EINSATZ VON HOLZGAS UND VERGASERKOKS FÜR PROZESSWÄRMEEERZEUGUNG

Mit einem leicht modifizierten Gasbrenner konnte im Versuchsaufbau gezeigt werden, dass Abgastemperaturen bis zu einem Temperaturbereich von 600-680 °C erreicht werden konnten, was gut ins Temperaturprofil des betrachteten Ziegelofens passen würde. Allerdings muss dafür der Betrieb des Holzgasbrenners noch genauer untersucht werden.

Die Verbrennung von Vergaserkohle in einem Staubbrenner kann nur mit heißer Brennkammer realisiert werden. Aufgrund des hohen Kohlenstoffanteils und den fehlenden flüchtigen Bestandteilen war ein Kaltstart mit 100% Vergaserkohle nicht möglich. Mit einer heißen Brennkammer ist die selbstgängige Verbrennung allerdings möglich. Vor allem die Verbrennung von Mischungen mit Holzstaub funktionierte im Versuchsaufbau problemlos.

VERSUCHE IM ZIEGELWERK ZUR EINBRINGUNG VON VERGASERKOHLE AUS POROSIERUNGSMATERIAL

Bei der Einbringung der Vergaserkohle in den Ziegelprozess wurden verschiedene Dosieranlagen und Befüllsysteme getestet. Bei den getesteten Dosieranlagen konnte der Durchlaufmischer PFT HM 204 gute Ergebnisse erzielen und ist für eine dauerhafte Umsetzung geeignet.

Während der Versuchskampagne zur Porosierung mit Vergaserkohle konnte der Gasverbrauch im Ziegelwerk deutlich gesenkt werden. Bezogen auf den gesamten Gasverbrauch des Ziegelwerks konnte dieser bei einem Porosierungsanteil von 0,8 Ma.-% um über 20 % gesenkt werden. Bei einem Porosierungsanteil von 0,5 Ma.-% waren es immerhin noch 11,9 % des gesamten Gasverbrauchs im Ziegelwerk. Die Versuche haben gezeigt, dass die Vergaserkohle vollständig thermisch genutzt wird. Circa 85-90 % der Energie werden im Tunnelofen und weitere 10 % im Zusatzbrenner des Trockners genutzt. Die Temperaturmessungen des Temperaturprofils im Tunnelofen haben allerdings auch gezeigt, dass die bestehende, nicht optimale Temperaturverteilung des Tunnelofens, vor allem in den unteren Besatzreihen, durch zu hohe Porosierungsanteile verstärkt wird. Hier muss durch eine optimierte Strömungsführung die Temperaturverteilung noch verbessert werden. Jedoch muss erwähnt werden, dass die Porosierung mit Vergaserkohle immer mit den zusätzlichen Porosierungsstoff Papierfangstoff durchgeführt wurden, dessen Anteil auch nicht verringert wurde. Ein geringerer Anteil an Papierfangstoffe könnte demnach höhere Anteile an Vergaserkohle ermöglichen und umgekehrt genauso. Ein Optimum beider Porosierungsstoffe ist noch nicht gefunden und Bedarf weiterer Versuchsreihen. Allerdings kann festgehalten werden, dass sich beide Porosierungsstoffe aufgrund der unterschiedlichen Vergasungstemperaturen gut ergänzen.

Herausforderungen

Eine zentrale Herausforderung für die Zukunft ist es »Rezepturen« und Einstellungen zu finden, um einen optimalen Einsatz des Porosierungsmaterials zu ermöglichen. Durch zu hohe Porosierungsanteile kann die Temperaturverteilung im Tunnelofen negativ beeinflusst werden. Das veränderte Zündverhalten ist hier ausschlaggebend. Schäden am Produkt, insbesondere in den unteren

Besatzreihen können die Folge sein. Eine angepasste Strömungsführung kann hier Abhilfe schaffen. Brenntechnik ist spezialisiert für Erdgas als Einsatzstoff. Erdgas liegt im Netz mit vergleichbar hohem Druck vor, während Holzgas mit nur geringem Überdruck den Vergaser verlässt. Statt das Holzgas auf ein höheres Druckniveau zu bringen, ist es effizienter optimierte Brenner zu entwickeln, die mit deutlich geringeren Druckverlusten arbeiten können.

Ausblick

In BioBrick wurde ein Konzept zur Prozesswärmeerzeugung entwickelt, optimiert und bewertet, dass die Nutzung von Biomasse (Holzpellets in Holzvergaser der Fa. Burkhardt) fokussiert. Das Konzept weist ein hohes Übertragungspotenzial auf, da eine Verbreitung in der Ziegelindustrie, aber auch eine Übertragung auf andere Industriezweige denkbar ist und angestrebt wird.

Das Konzept fokussiert eine effiziente, versorgungssichere, wirtschaftliche und nachhaltige Bereitstellung von Energie und erreicht durch Einbindung der Rückstände in das Produkt im Sinne einer Kaskadennutzung eine Steigerung der Gesamt- sowie der Kosteneffizienz. Die Einsetzbarkeit bestehender Technologien wurde validiert und es erfolgte eine Weiterentwicklung systemflexibler Anlagenkonzepte.

Durch das Vorhaben konnte ein ganzheitlicher Ansatz entwickelt werden, welcher eine schrittweise Umstellung der Energieversorgung von fossilen Energieträgern hin zu erneuerbaren ermöglicht. Des Weiteren wurden die Strategie durch erste Praxistest, wie beispielsweise die Verbrennung von Holzgas oder Porosierung mittels Vergaserkohle validiert und optimiert. Dadurch lieferte das Projekt wesentliche Impulse zur Nutzung zur Bereitstellung von nachhaltigen Prozessenergie.

Aufgrund der positiven Projektergebnissen, den aber noch vorhanden Forschungs- und Entwicklungsbedarf und die zu zeigende Praxistauglichkeit gehen wir mit dem Folgeprojekt BioBrick2 (FKZ 03EI5461) den nächsten Schritt in Richtung einer CO₂-neutralen Produktion von Ziegeln! Mit BioBrick2 knüpfen wir daran an und schaffen verallgemeinerungsfähiges Wissen und Know-how im Hinblick auf die Integration von Bioenergie als Quelle für industrielle Hochtemperaturanwendungen. Das Demonstrationsvorhaben schlägt dabei eine Brücke von den erfolgreichen Labor- und Technikumsversuchen hin zu einem realen Praxistest im Ziegelwerk und ist die Basis für eine spätere Umrüstung des Ziegelwerks auf eine klimaneutrale Produktion. Dabei wird die Hochtemperatur-Prozesswärme im Klinkerwerk Schüttorf (ABC Klinker) aus dem Synthesegas eines Holzvergasers (Burkhardt GmbH) bereitgestellt.

Die Prozessintegration aller untersuchten Verfahrensschritte wird durch die technoökonomische und ökologische Bewertung für den nachfolgenden Realbetrieb ausgearbeitet. Das Projekt zeichnet sich durch großes Engagement der beteiligten Unternehmen und ein hohes Maß an Praxisnähe aus. Es wird koordiniert von Fraunhofer UMSICHT, die Fa. Burkhardt GmbH begleitet als Anlagenhersteller das Vorhaben und das Klinkerwerk Schüttorf dient als Referenzbetrieb für die Ziegelbranche.

Literatur

- Fendt et al. – Thermische Nutzung von Biomassen in Hochtemperatur-Prozessen, TU München, 05/2017
- Kadir AA (2012): »An Overview of Wastes Recycling in Fired Clay Bricks«, International Journal of Integrated Engineering. 4 (2). 53-69.
- Ahmad S, Ipbal Y, Muhammad R (2017): »Effects of coal and wheat husk additives on the physical, thermal and mechanical properties of clay bricks«, Elsevier, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.bsecv.2017.02.001>
- Phonphuak N (2013): »Effects of Additive on the Physical and Thermal Conductivity of Fired Clay Brick«, Journal of Chemical Science and Technology. 2 (2). 95-99.
- Chemani B, Chemani H (2014): »Effects of Coal on Engineering Properties in Building Materials: Opportunity to Manufacturing Insulating Bricks«, International Journal of Materials and Metallurgical Engineering
- Vodegel S: Regenerative Nachverbrennung: Verfahrensskizze der RNV-Anlage. Online Quelle; <https://www.cutec.de/fileadmin/Cutec/documents/Thermische-Prozesstechnik/Regenerative-Nachverbrennung.pdf> (letzter Abruf 23.06.2022).
- Bundesverband der Deutschen Ziegelindustrie e.V. 2021
- Geres et al. (2021): Roadmap für eine treibhausgasneutrale Ziegelindustrie in Deutschland – Ein Weg zur Klimaneutralität der Branche bis 2050: https://www.ziegel.de/sites/default/files/2021-03/Ziegel_24_110321_Web_200dpi_1.pdf, (letzter Abruf 17.01.2023).
- Freitag et al. (2011): »Leitfaden zur Integration von Blockheizkraftwerken in den Herstellungsprozess grobkeramischer Erzeugnisse«, <http://www.stz-energie.de/wp-content/uploads/Leitfaden-Ziegelei-BHKW.pdf>, (letzter Abruf 11.09.2019).

Biomassteg

Ali Cemal Benim,
Markus Heese

Entwicklung und Erprobung der gekoppelten Strom- und Wärmeerzeugung durch Biomassenutzung mittels thermoelektrischer Generatoren

Zusammenfassung

In holzverarbeitenden Betrieben gibt es Bedarf an Wärme und Strom. Der Bedarf an Wärme wird durch die Nutzung von dort anfallenden Biomasserest- und Abfallstoffen bereits gedeckt. Aufgrund der ganzjährigen Produktion ist aber ein deutlicher Überschuss an Brennstoffmaterial vorhanden und muss aufwendig, unökologisch und unökonomisch entsorgt werden. In diesem Vorhaben sollen zur zusätzlichen Deckung des Strombedarfs thermoelektrische Generatoren (TEG) in einen Biomassekessel integriert und ein Demonstrator konstruiert werden. Um ausreichend elektrische Energie mit TEG erzeugen zu können, muss der Großteil der thermischen Energie durch den TEG geleitet werden. Dies ist eine komplexe Aufgabenstellung, da die maximale, für TEG zulässige, Temperatur (230 °C-300 °C) nicht überschritten werden darf, die Temperatur des Abgases beim Verlassen des Biomassekessels nicht unter den Taupunkt sinken sollte und ein optimales Verhältnis zwischen der Anzahl von TEG und der Wärmestromdichte gefunden werden muss. Damit in diesem Temperaturfenster dem Abgas ausreichend Wärme entzogen wird, muss eine optimale Stoff- und Wärmestromverteilung entwickelt werden.

Themen-schwerpunkte

- Nutzung von biogenen Rest- und Abfallstoffen
- Energy Harvesting
- Holzverarbeitende Industrie
- Biomassekessel PTh ca. 200 kW
- Simulation, Entwicklung und Optimierung von Stoff- und Wärmetransporten
- Bau und Untersuchung einer Demonstrationsanlage

Ziele

Die Entwicklung, der Bau und die Erprobung eines neuartigen Wärmeübertragers für Biomassekessel der mittleren Leistungsklasse, wie sie z. B. in der Holzverarbeitenden Industrie vorkommen. Dieser Wärmeübertrager soll durch die Integration von thermoelektrischen Generatoren (TEG) nicht nur Wärme bereitstellen, sondern auch Strom produzieren.

Auf diese Weise wird es möglich, den ganzjährig entstehenden Holzabfall der Holzverarbeitenden Industrie ökologisch und ökonomisch sinnvoll zu verwerten und damit aktiv für den Klimaschutz einen Beitrag zu leisten.

Ali Cemal Benim: »Die Technologie der Thermoelektrischen Generatoren (TEG) ist bekannt aus der Raumfahrt, wosie das Mittel der Wahl ist, wenn es um die verlässliche und wartungsarme Produktion von Strom aus Wärme geht. In unserem Vorhaben haben wir erfolgreich diese Technologie auf die Nutzung zur Produktion von Strom aus der Biomassefeuerung angewendet und damit zur zukünftigen Applikation der Abwärmenutzung einen wichtigen Beitrag geleistet.«

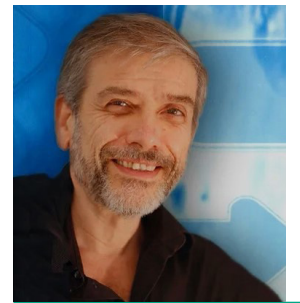


Abbildung 1:
(© Hochschule Düsseldorf)

FKZ-Nr.: 03KB141
Laufzeit: 01.08.2018 – 31.12.2021
Zuwendungssumme: 493.462,05 €

PROJEKTLEITUNG:
Prof. Dr.-Ing. habil. Ali Cemal Benim
+49 (0) 211 / 4351 3504
alicemal.benim@hs-duesseldorf.de

KOORDINATION:
Hochschule Düsseldorf, Fachbereich MV
Münsterstr. 156, 40476 Düsseldorf

Direkte Ansprechperson
Michael Diederich
+49 (0) 211 / 4351 3508
michael.diederich@hs-duesseldorf.de

PARTNER:
Endress Holzfeuerungsanlagen GmbH
Markus Heese
Industriestraße 18, 91593 Burgbernheim
markus.heese@endress-feuerungen.de
+49 (0) 9843 / 936 348-0

Kernbotschaften

- Die Integration von TEG zur Abwärmenutzung ist technisch und wirtschaftlich bereits möglich
- Eine weitere Verbesserung der Effizienz von TEG ist für eine breite industrielle Anwendung sinnvoll
- Die im Projekt entwickelten Simulationsmodelle zeigen eine sehr gute Prognosegüte und können für die Modellierung und die Optimierung von TEG-Systemen verwendet werden
- Auch weitere Anwendungsgebiete mit anfallender Restwärme können von der Integration von TEG profitieren

summary (engl.)

Wood processing industry needs heat and electricity. Heat is covered by use of residual biomass and waste materials. Due to all year production, however, there is much higher amount of combustible material which must be disposed of in complex, unecological and uneconomical way. In this project, thermoelectric generators (TEG) are to be integrated into a biomass boiler and a demonstrator is constructed, covering also the electricity requirement. In order to generate sufficient electrical energy with TEG, most of the thermal energy must be conducted through the TEG. This is a complex task, since the maximum permissible temperature for TEG (230°C-300°C) must not be exceeded, whereas exhaust gas temperature should not undershoot dew point, and optimal ratio of number of TEG and heat flux must be found. To ensure that sufficient heat is extracted from the exhaust gas in this temperature window, an optimal mass and heat flow distribution must be developed.

key messages (engl.)

- The integration of TEG for waste heat utilization is already technically and economically possible
- A further improvement in the efficiency of TEG makes sense for a broad industrial application
- The simulation models developed within the project shows a very good prognosis quality and can be used for modeling and optimization of TEG systems
- Other areas of application with residual heat can also benefit from the integration of TEG

Methodik Maßnahmen

- Numerische Strömungssimulation (CFD) und Strukturmechanische Simulation (FEM) der Wärmeströmung
- Python Code development
- Automatische Optimierung mit NOMAD
- Messtechnische Untersuchung mit Temperaturmessung innerhalb der Brennkammer sowie entlang des Abgasstranges und an unterschiedlichen Stellen des Biomassekessels
- Messtechnische Erfassung unterschiedlicher Masse- und Energieströme (Abgas, Primär- und Sekundärluft, sowie Heizwasser und -energie)
- Bau des Demonstrators und erneute Vermessung der Anlage inklusive der produzierten elektrischen Leistung

Ergebnisse auf einen Blick

PUBLIKATIONEN

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

- Pfeiffelmann B, Diederich M, Gül F, Benim A C, Heese M, Hamberger A, (2020): »Computational and Experimental Investigation of an Industrial Biomass Furnace«, Chemical Engineering & Technology 43 (8). 1538-1546.
- Pfeiffelmann B, Diederich M, Heese M, Hamberger A, Benim A C, »Development of a Heat Exchanger for Cogeneration via TEG«, XIII International Conference on Computational Heat, Mass and Momentum Transfer (ICCHMT 2021), Paris, France, May 18-21, 2021. E3S Web of Conferences 321 (2021) 02002.
- PhD-Thesis: Pfeiffelmann B, Efficient Cooling Concepts for Thermoelectric Generators for Waste Heat Recovery, (in co-operation with Helmut-Schmidt University, Supervisor: Prof. F. Joos). (in Vorbereitung)

■ Artikel in Fachzeitschrift (z. B. Euwid)

■ [Endbericht >>](#)

KONZEPT/MACHBARKEITSTUDIE:

- Anlagenkonzept
- Machbarkeitsstudie

ANLAGE:

- Demonstrationsanlage
- Pilot-Anlage
- Nachrüstung Bestandsanlage

DATEN & METHODEN:

- Modell/Modellierung
- Methode (z. B. analytisch, prozessbeschreibend)
- Messreihe/-programm

MARKT:

- Marktprognosen
- Identifikation nötiger Weiterentwicklungen zur Marktkonformität

Darstellung der Ergebnisse

VERGLEICH DER MESSTECHNISCHEN UNTERSUCHUNG DES BIOMASSEKESSELS MIT DER NUMERISCHEN SIMULATION

Zur Entwicklung eines neuartigen Wärmeübertragers für einen Biomassekessel ist es relevant, zunächst möglichst konkret die Vorgänge im Biomassekessel zu erfassen. Dies ist auch wichtig, um einerseits die Genauigkeit der Vorhersagen der Simulationsmodelle abschätzen zu können, zur Untersuchung ob Anpassungen in den Simulationsmodellen nötig sind, sowie um im Späteren beurteilen zu können, ob eine Verbesserung erreicht worden ist.

Aus diesem Grund hat unser Forschungsvorhaben mit einer umfangreichen Vermessung der vorhandenen Anlage der Firma Endress Holzfeuerungen GmbH begonnen. Hier wurden Temperaturen im Wärmeübertrager, im Brennraum, entlang des Abgasstranges und der Verbrennungsluft, aber auch im Heizkreis bei dem zugeführten und abgeleiteten Heizwasser aufgenommen. Neben diesen Temperaturmessungen wurden auch die Brennstoff- und die Abgaszusammensetzung bestimmt.

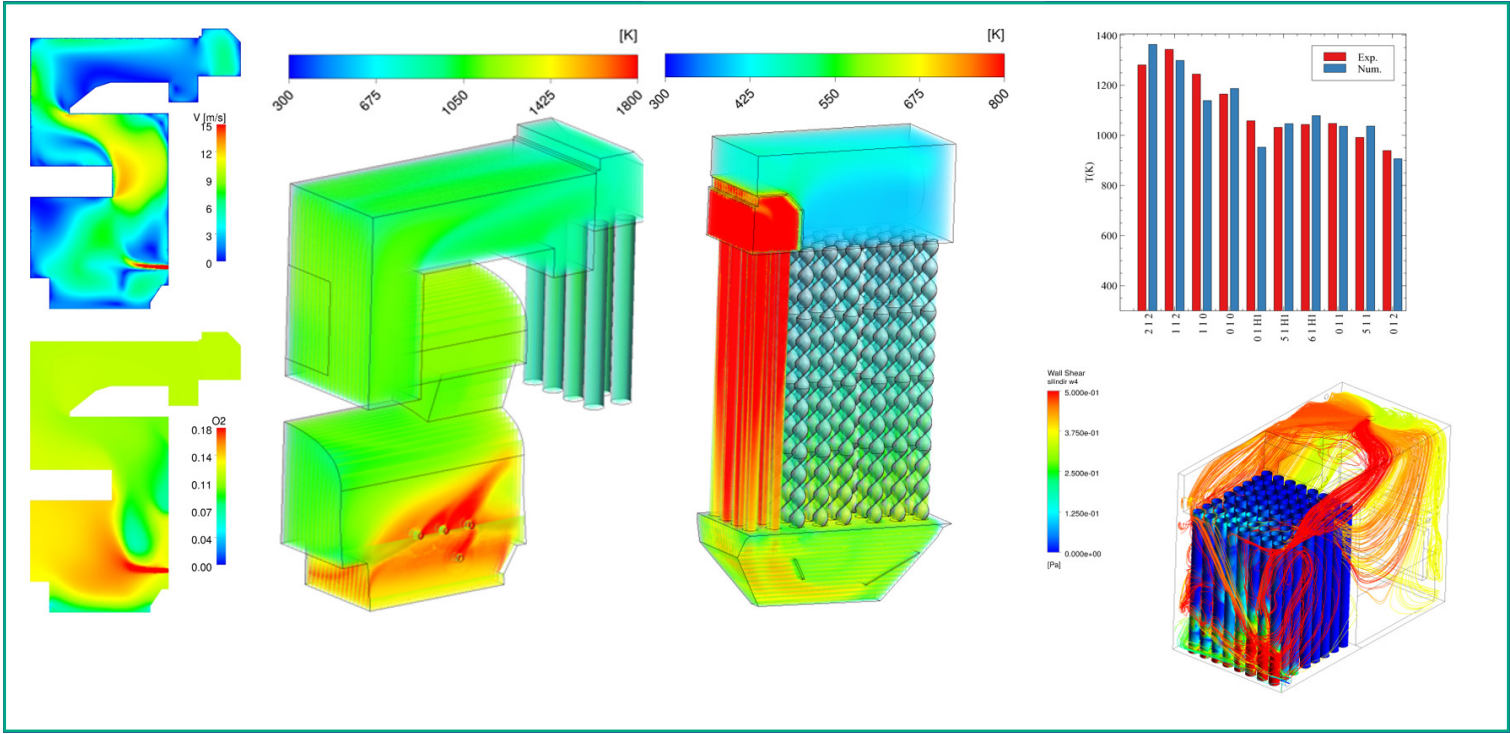
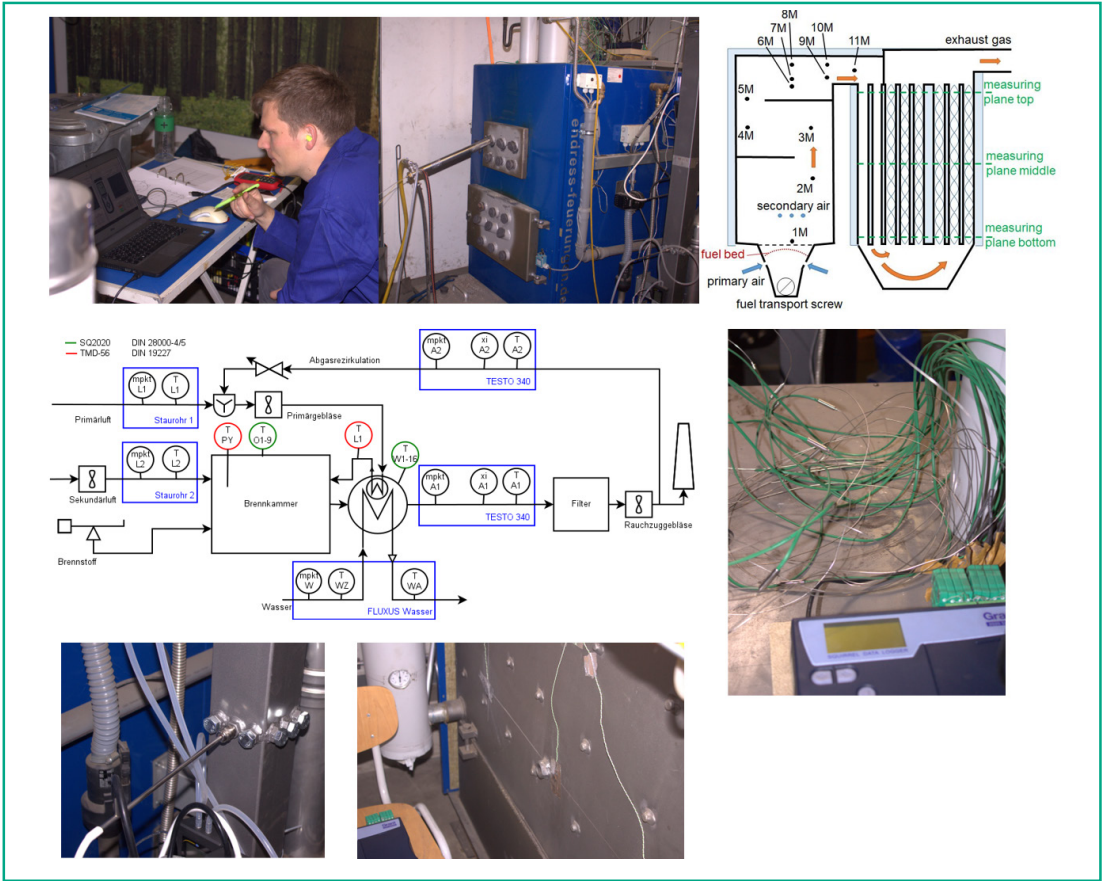


Abbildung 2:
Vermessung (© Hochschule Düsseldorf)

Abbildung 3:
Simulation (© Hochschule Düsseldorf)

Ebenso wurde die Strömung im gesamten Biomassekessel in unterschiedlichen miteinander verbundenen Simulationen modelliert. Hierbei wurde der Kessel in drei Teile aufgeteilt:

Brennkammer: Hier ist die chemische Reaktion mit der Verbrennung, sowie die Strömung und die Wärmeübertragung simuliert worden.

Wärmeübertrager Abgasseitig: Hier wurde die Strömung, wie auch die Wärmeübertragung vom Abgas auf die Wasserseite des Wärmeübertragers simuliert.

Wärmeübertrager Wasserkörper: Hier wurde der Wärmeeintrag aus den anderen beiden Simulationsteilen sowie die Strömung in den ummantelnden Wasserkörper simuliert.

Die drei einzelnen Simulationsabschnitte wurden über Interfaces so miteinander verbunden, dass Ergebnisse aus der einen Simulation als Randbedingung für die nächste Simulation genutzt werden können. So kann z. B. das austretende Rauchgas aus der Brennkammer als eintretendes Rauchgas in den Wärmeübertrager gesetzt werden. Bei der Simulation des Wärmeübergangs von der Brennkammer und dem Wärmeübertrager in den Wasserkörper gibt es die Schwierigkeit, dass die einzelnen Wärmeübergänge miteinander verbunden sind. Dies konnte gelöst werden, indem die Strömungssimulation der Wasserseite zunächst nur die Scherkräfte an den Wänden ermittelt hat. Diese sind direkt proportional zur Wärmeübertragung von der Brennkammerwand in das Heizwasser über die lokale Nußelt-Zahl. Auf diese Weise konnte die bidirektionale Verbindung der einzelnen Simulationsdomänen erfolgen.

PYTHON BASIERTES SIMULATIONSMODELL ZUR WÄRMEÜBERTRAGUNG UND OPTIMIERUNG

Der thermoelektrische Generator ist ein passives Halbleiter Bauteil, bei dem P- und N-dotierte Halbleiter miteinander elektronisch in Reihe und thermisch parallelgeschaltet sind. Diese Anordnung sorgt dafür, dass ausgehend vom Peltier- und Seebeck-Effekt ein elektrischer Strom aus einem Wärmestrom erzeugt werden kann. Entsprechend der jeweiligen Temperaturen und –unterschiede auf der Heiß- und Kaltseite des TEG lassen sich Umwandlungsraten von 2 % erreichen. Die Effizienz der TEG hängt jedoch nicht nur von den Temperaturniveaus, sondern auch von weiteren Faktoren, wie z.B. dem Anpressdruck bzw. Dem thermischen Kontakt zwischen dem TEG und dem Wärmeübertragungssystem ab.

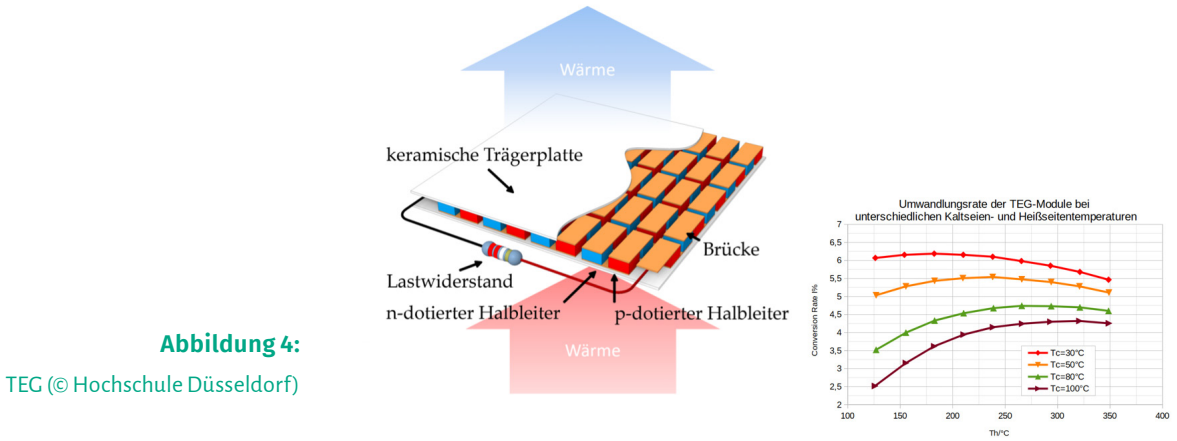


Abbildung 4:
TEG (© Hochschule Düsseldorf)

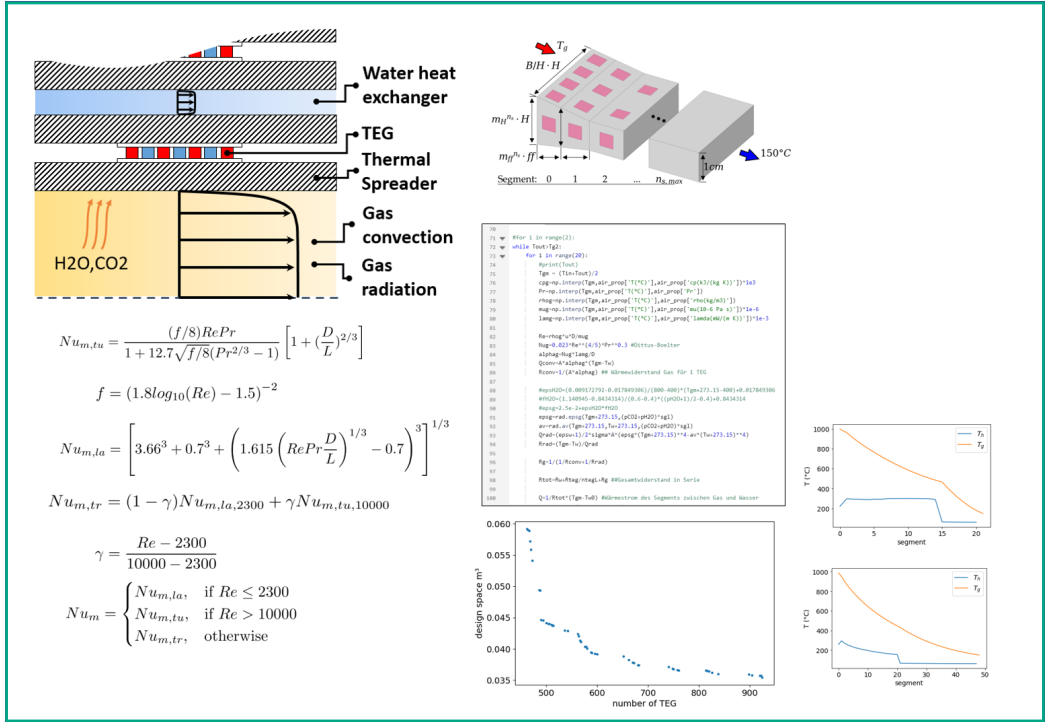


Abbildung 5:
Optimierung
(© Hochschule Düsseldorf)

Zur Einbindung dieser Charakteristik, einerseits der Leistungsentnahme, andererseits aber auch der Beeinflussung des Wärmestroms in Abhängigkeit von Temperatur und elektrischer Leistungsbereitstellung war ein neues Simulationsmodell notwendig, das in einer projektbegleitenden Promotion erfolgreich entwickelt und implementiert worden ist.

Dieser Satz an Gleichungen wurde unter anderem dazu verwendet, um im Zusammenspiel mit anderen analytischen Formeln eine geplante Bauform für den Wärmeübertrager im Vorfeld des Baus digital nachzubilden. Dies wurde mit der frei zugänglichen Programmiersprache Python entwickelt.

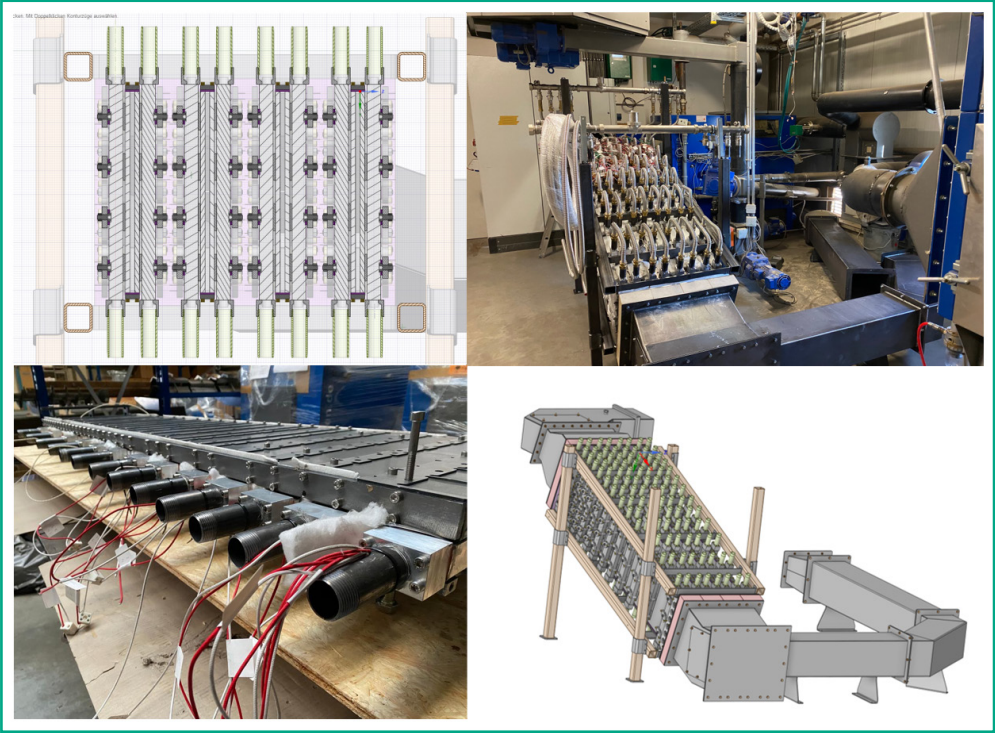
Bei der Bauform war geplant, dass das Abgas durch vier schmale Schlitz an acht Platten vorbeigeleitet wird, die auf der anderen Seite jeweils in bestimmtem Abstand TEG aufgebracht haben, welche ihrerseits durch wasserdurchflossene Alublöcke gekühlt werden.

Eine Optimierungsaufgabe war hier die richtige Menge und Verteilung der TEG auf der Fläche zu finden, was mithilfe des NOMAD Algorithmus erfolgte und für die beiden Extrema (jeweils Bauraum und Anzahl der TEG betreffend) sehr unterschiedliche Temperaturverläufe ergab.

PRODUKTION UND VERMESSUNG DES NEUEN WÄRMEÜBERTRAGERS

Ausgehend von den Optimierungen wurde sich für die Lösung mit den wenigsten TEG entschieden, da diese hauptsächlich für die Kosten verantwortlich sind und wir davon ausgegangen sind, dass im Zweifel in einer Werkstatt genug Platz vorhanden ist. Damit hat sich das gezeigte Design ergeben, das abschließend gebaut worden und dessen Wirkungsgrad nicht nur numerisch, sondern auch experimentell nachgewiesen worden ist.

Abbildung 6:
Prototyp
(© Hochschule Düsseldorf)



Herausforderungen

Ein sehr wesentlicher Lerneffekt, der sich im Laufe des Projektes ergeben hat, war der, dass die bereitgestellten technischen Daten von den wichtigsten Komponenten in den nächsten Projekten neben der eigentlichen Entwicklung immer in einem eigenen Prüfverfahren validiert werden müssen, da die Angaben auf den Datenblättern teilweise deutlich von der Realität abweichen können. Außerdem hat sich gezeigt, dass eine wirtschaftliche Betrachtung der aktuellen Marktsituation und eines möglichen Marketings bei Markteintritt schon frühestmöglich und kontinuierlich im Entwicklungsprozess mitbetrachtet werden sollte. Daraus leitet sich eine weitere Überlegung für folgende Projekte ab, wonach im Projektplan nach der Fertigstellung und Vermessung einer Variante, wenn möglich noch eine weitere Entwicklungsschleife geplant werden sollte, um die in der Fertigung und finalen Vermessung gewonnenen Erkenntnisse in einem weiteren Entwicklungsschritt auf ein optimiertes Produkt anwenden zu können. Die hier genannten Erkenntnisse stellen aktuelle Hemmnisse für eine zeitnahe direkte Vermarktung der Ergebnisse dar.

Ausblick

Die wichtigsten Ergebnisse aus dem geförderten Forschungsprojekt waren die, dass eine erfolgreiche Integration von TEG in einen Wärmeübertrager zur Erzeugung von Strom aus Abgaswärme möglich ist. Im Forschungsprojekt entwickelte Modelle zur Vorhersage der Leistung unterschiedlicher Wärmeübertrager-Konstellationen und auch projektbegleitende Promotionsvorhaben, bei denen ein neuartiges Open Source Modell zur multiphysikalischen dreidimensionalen Modellierung von TEG möglich ist, stellen wichtige Werkzeuge dar, die eine weitere Übertragung der Ergebnisse auf andere industrielle Prozesse möglich machen. In diesem Rahmen führen wir aktuell weitere Gespräch mit industriellen Anbietern und möglichen Kooperationspartnern.

BiotAB

Jürgen Reichelt, Britta Bergfeldt,
Gudrun Pfrang-Stotz, Markus Ricker, Edwin Karrer

Effizienzsteigerung bei der Energiegewinnung in Biomassekraftwerken durch die technische Anwendung eines Biobrennstoffkataloges

Zusammenfassung

Um einen Beitrag zur Steigerung der Energieeffizienz in Biomassekraftwerken zu leisten, wurde die technische Anwendung eines von den Antragstellern entwickelten Biobrennstoffkataloges (BBK) umgesetzt. Dieser soll künftig als allgemeingültiges Instrument herangezogen werden, um die Wirkung unterschiedlichster Biobrennstoffe auf die Bildung von Anbackungen im Verbrennungsraum und Belägen im Kesselbereich zu prognostizieren.

Die Vorgehensweise für die Erstellung des BBK wurde anhand von drei großtechnischen Versuchen während der regulären Laufzeit eines Biomassekraftwerkes erfolgreich für die Verbrennung von Althölzern validiert, wobei die Anbackungen und Beläge klassifiziert, Brennkammer- und Kesselprofile erarbeitet und die Daten im BBK dokumentiert wurden. Die Übertragbarkeit der Anwendung des BBK auf zwei altholzbetriebene Biomassekraftwerke, die mit unterschiedlichen Verfahrenstechniken ausgestattet sind, wurde im Rahmen von zwei Versuchen im Regelbetrieb nachgewiesen. Durch Sinterversuche im Labor- und Technikumsmaßstab an Altholz sowie an pflanzenbasierten und tierischen biogenen Reststoffen wurden chemisch-mineralogische Reaktionen zur Bildung von Anbackungen und Belägen bei Verwendung unterschiedlicher Biobrennstoffe simuliert.

Themen schwerpunkte

- Steigerung der Energieeffizienz in Biomassekraftwerken
- Charakterisierung von Biobrennstoffen und Rostaschen
- Klassifizierung von Anbackungen und Belägen
- Simulation der Entstehung von Anbackungen und Belägen durch Labor- und Technikumsversuche
- Erstellung, Validierung und Überprüfung der Übertragbarkeit der Vorgehensweise zur Erstellung des BBK

Jürgen Reichelt: »Bei der Verbrennung von Biomasse werden durch die Freisetzung von Partikeln und Gasen Verschmutzungsmechanismen induziert, die im Verbrennungsraum und im Kesselbereich zur Bildung von Anbackungen und Belägen führen. Damit wird die Wärmeübertragung und somit die Energieeffizienz während der Laufzeit der Anlage immer mehr reduziert. Durch die technische Anwendung des Biobrennstoffkataloges soll künftig die Wirkung verschiedenster Biobrennstoffe auf die Bildung von Anbackungen und Belägen prognostiziert werden. Dies bietet die Möglichkeit kritische Biobrennstoffe anlagenspezifisch effektiv zu behandeln und liefert Grundlagen für Brennstoff- und verfahrenstechnische Optimierungsmöglichkeiten zur Steigerung der Energieeffizienz von Biomassekraftwerken.«



(© Jürgen Reichelt)

(© DBFZ)



FKZ-Nr.: **03KB125**
Laufzeit: **01.09.2017 – 31.08.2020**
Zuwendungssumme: **340.000 €**

KOORDINATION:
Institut für angewandte Bau- und Reststoff-Forschung
Dr.-Ing. Jürgen Reichelt
Obergrombacher Str. 29
76646 Bruchsal
www.itc.kit.edu

PARTNER:
Karlsruher Institut für Technologie/ Institut für Technische Chemie
Britta Bergfeldt, Gudrun Pfrang-Stotz
Herrmann-von-Helmholtz-Platz,
76344 Eggenstein-Leopoldshafen
www.itc.edu

PROJEKTLEITUNG:
Dr.-Ing. Jürgen Reichelt
+49 (0)7257 924 555
ibr.reichelt@t-online.de

INTEC Engineering GmbH
Markus Ricker, Edwin Karrer
John-Deere-Str.43
76646 Bruchsal
www.intec-energy.de

Ziele

Mit dem Vorhaben sollte ein Beitrag zur Steigerung der Energieeffizienz in Biomassekraftwerken durch die technische Anwendung eines von den Antragstellern entwickelten Biobrennstoffkataloges (BBK) geleistet werden.

Der BBK wurde für den Einsatz von Althölzern in Biomassekraftwerken validiert und dokumentiert die Eigenschaften der Biobrennstoffe sowie der resultierenden Anbackungen und Beläge in Großanlagen.

Auf der Basis des BBK können Anbackungen und Beläge aus Biomassekraftwerken unterschiedlicher Verfahrenstechnik klassifiziert sowie Brennkammer- und Kesselprofile erarbeitet werden, die einen Bezug zwischen Anbackungen und dem Aufbau der Brennkammer sowie zwischen Belägen auf Wärmetauscherflächen und dem Aufbau des Kessels aufzeigen.

Kernbotschaften

- Chemisch-mineralogische Bildungsprozesse während der Verbrennung von biogenen Rest- und Abfallstoffen, die zu Anbackungen und Belägen führen, lassen sich durch Sinterversuche im Labor- und halbtechnischen Maßstab simulieren.
- Die technische Anwendung des Biobrennstoffkataloges im Regelbetrieb von Biomassekraftwerken bietet auf der Basis von anlagenspezifischen Brennkammer- und Kesselprofilen die Möglichkeit, durch brennstoff- und verfahrenstechnische Optimierungsmaßnahmen auch technisch schwierige biogene Brennstoffe effektiv zu verwerten.
- Durch eine gesteigerte Ressourceneffizienz bei der Energieumwandlung biogener Energieträger wird gleichzeitig einen Beitrag zum Klimaschutz durch die Schonung fossiler Brennstoffe und eine entsprechende kostengünstige Reduktion von CO₂-Emissionen geleistet.

summary (engl.)

In order to contribute to an increasing energy efficiency in biomass power plants, the technical application of a biofuel catalog developed by the applicants was implemented. In future, this should be used as a generally applicable instrument to predict effects of various biofuels on the formation of slags in the combustion chamber and deposits in the boiler area.

The creation procedure of the BFC was successfully validated on the basis of three large-scale experiments during real operating conditions of a biomass power plant for waste wood, whereby slags and deposits were classified, combustion chamber and boiler profiles are created and data were documented. Tests to check transferability of the BFC carried out in two biomass plants equipped with different process technologies were successful. Sintering tests on a laboratory and semi-technical scale on different biomasses to simulate chemical-mineralogical reactions show that the formation of slags and deposits can be simulated.

key messages (engl.)

- Chemical-mineralogical formation processes during the combustion of biogenic residues that lead to slags and deposits can be simulated by sinter tests on the laboratory and semi-technical scale.
- Technical application of the biofuel catalog in regular operation of biomass power plants offers the possibility to combust technically difficult biogenic fuels with help of fuel and procedural optimization measures.

Methodik Maßnahmen

- With increased resource efficiency in the energy conversion of biogenic energy sources, a contribution to climate protection is also made by protecting fossil fuels and the corresponding inexpensive reduction of CO₂ emissions.
- Systematische Beprobung und verbrennungstechnische sowie chemisch-mineralogische Charakterisierung von biogenen Rest- und Abfallstoffen, Anbackungen, Belägen und Rostaschen
- Validierung der Vorgehensweise für die Erstellung des BBK mittels drei Versuchen während der regulären Laufzeit eines Biomassekraftwerkes, wobei die Anbackungen und Beläge klassifiziert, Brennkammer- und Kesselprofile erarbeitet und Daten im BBK dokumentiert wurden.
- Überprüfung der Übertragbarkeit der technischen Anwendung des BBK auf Biomassekraftwerke unterschiedlicher Verfahrenstechnik
- Simulation von chemisch-mineralogischen Reaktionen zur Bildung von Anbackungen und Belägen durch Sinterversuche im Labor- und im Technikumsmaßstab an Altholz, an pflanzenbasierten und tierischen biogenen Reststoffen sowie an verschiedenen Brennstoffmischungen.

Ergebnisse auf einen Blick

PUBLIKATION:

- Tagungsbände (EUBCE / Venice)
- [Endbericht >>](#)

Anlage:

- Technikumsanlage der INTEC Engineering GmbH
- Laboranlage KLEAA sowie Sinterversuche in Laboröfen des KIT-ITC

Daten & Methoden:

- Datenbank
- Erstellung und Validierung des Biobrennstoffkataloges

Markt:

- Dienstleistungen zu Best Practice Lösung für die Optimierung von Brennstoffen sowie von Bestandsanlagen und Planung neuer Anlagen

Darstellung der Ergebnisse

ERGEBNIS A

Die Validierung der Vorgehensweise für die Erstellung des BBK erfolgte in einem Biomassekraftwerk (Wanderrost mit Wurfbeschickung, Feuerungswärmeleistung: 45 MW, Durchsatz: 105.000t/a Altholz I-IV) im Rahmen von drei Versuchen bei gleichem Brennstoffeinsatz im Regelbetrieb. Hierzu wurden die Biobrennstoffe während der Laufzeit von 5 bis 6 Monaten sowie die Anbackungen im Verbrennungsraum und die Beläge im konvektiven Kesselbereich während den Stillstandzeiten des Kraftwerkes beprobt und analysiert. Danach erfolgte eine Klassifikation der Anbackungen und Beläge, eine Erarbeitung von Brennkammer- und Kesselprofilen sowie eine Dokumentation der Daten in den BBK (Abb. 1).

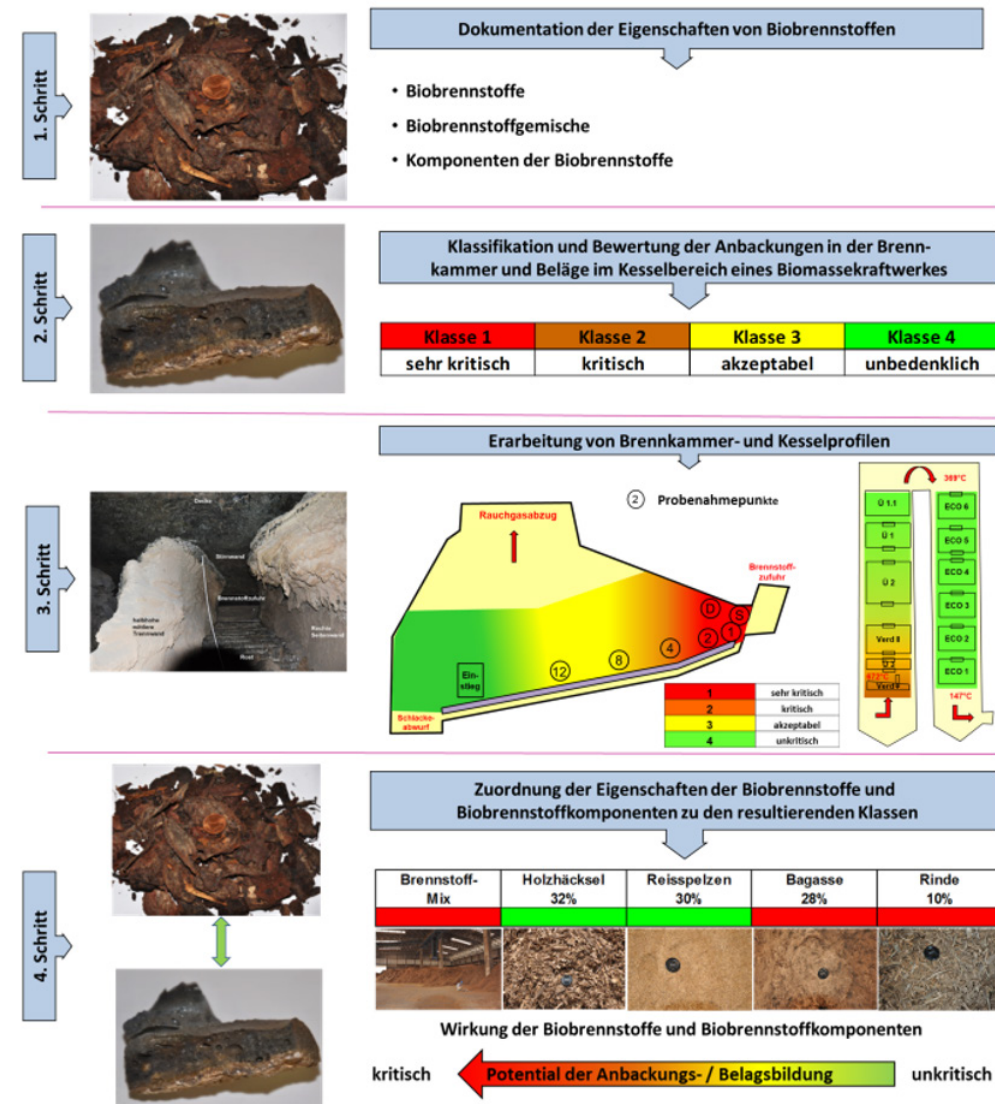


Abbildung 1:

Erstellung Biobrennstoff-katalog: Anbackungen in der Brennkammer
(© Institut für angewandte Bau- und Reststoff-Forschung, Jürgen Reichelt)

Die Versuche zeigen, dass mit Brennkammer- und Kesselprofilen unterschiedliche Verschlackungs- und Verschmutzungsszenarien dargestellt werden können, die auf den Einsatz von Brennstoffen mit unterschiedlichen Eigenschaften zurückgehen. Auf Basis der Ergebnisse kann von einer Praxistauglichkeit und einer erfolgreichen Validierung der Vorgehensweise zur Erstellung des BBK ausgegangen werden.

Durch großtechnische Versuche in einem Biomassekraftwerk wurde die Vorgehensweise zur Erstellung des Biobrennstoffkataloges validiert.

ERGEBNIS B

Die Versuche zur Überprüfung der Übertragbarkeit des BBK, die in zwei mit Altholz I-IV in einem vergleichbaren Leistungsbereich betriebenen Biomassekraftwerken unterschiedlicher Verfahrenstechnik (Rostfeuerung/ Wirbelschichtfeuerung) durchgeführt wurden, zeigen, dass sich Unterschiede in der Brennstoffqualität und der Verfahrenstechnik in differenzierten Brennkammer- und Kesselprofilen abbilden lassen.

Eine Übertragbarkeit der Anwendung des Biobrennstoffkataloges auf Biomassekraftwerke unterschiedlicher Verfahrenstechnik ist gegeben.

ERGEBNIS C

Sinterversuche im Labor- und halbtechnischen Maßstab zwischen 550°C und 950°C zur Simulation von chemisch-mineralogischen Reaktionen an holzbasierten Biobrennstoffaschen verdeutlichen, dass die Bildung von Anbackungen im Verbrennungsraum von der chemisch-mineralogischen Zusammensetzung der Brennstoffaschen sowie der Temperatur gesteuert wird. Weiterhin kann die initiale Belagsbildung auf Wärmetauschern simuliert sowie Hinweise auf die Verwertbarkeit von Rostaschen gezogen werden.

Durch Sinterversuche lassen sich temperaturabhängige Mineralreaktionen simulieren, die zu Anbackungen im Verbrennungsraum führen.

ERGEBNIS D

An frisch produzierten und 3 Monate gelagerten Rostaschen aus zwei Biomassekraftwerken wurden chemisch-mineralogische Untersuchungen durchgeführt. Es zeigt sich u.a., dass die Vorgaben für Eluatgehalte für eine Deponieklasse II auf Grund der erhöhten Blei- und Chromgehalte von einigen frisch produzierten Rostaschen nicht eingehalten werden. Während einer dreimonatigen Alterung im Labormaßstab wird jedoch eine deutliche Abnahme der Gehalte festgestellt.

Frisch produzierte und drei Monate abgelagerte Biomasse-schlacken aus der Altholzverbrennung zeigen ein deutlich unterschiedliches Elutionsverhalten.

Herausforderungen

Die Labor-, Technikums- bzw. Großversuche mussten mit den Erfordernissen des Regelbetriebes der Biomassekraftwerke abgestimmt werden. Hierzu war eine enge Abstimmung und intensive Zusammenarbeit aller Projektteilnehmer erforderlich. Der hohe Aufwand für die regelmäßigen Beprobungen der unterschiedlichen Biomassen sowie für die zahlreichen Beprobungen während der Stillstandsphasen der Anlagen beschränkten die Teilnahme auf drei Biomassekraftwerke an dem Versuchsprogramm.

Ausblick

Durch Optimierungsmaßnahmen, die auf einer technischen Anwendung des Biobrennstoffkataloges beruhen, kann das Verschlackungs- und Belagsbildungsverhalten der eingesetzten Althölzer in Biomassekraftwerken verbessert werden. Die Anwendung dieser Ergebnisse führt zwangsläufig zu einer Verbesserung des Anlagen-/Prozesswirkungsgrades und zu einer verkürzten Stillstandszeit mit geringerem Reinigungsaufwand, was einen wirtschaftlicheren Betrieb der Anlagen ermöglicht. Durch die erhöhte Laufzeit können entsprechend der Anlagengröße Treibhausgase (CO₂) eingespart werden. Ein stärkerer Beitrag zur Anlagenflexibilisierung würde sich mit der Einbeziehung zusätzlicher nicht altholzbasierter Reststoffe ergeben, wobei Biobrennstoffgemische auf Basis des Biobrennstoffkataloges optimiert werden könnten. Hierzu läuft seit 11/2022 das im Rahmen des Förderschwerpunktes »Energetische Nutzung biogener Rest- und Abfallstoffe« geförderte Forschungsvorhaben »ResOpt«.

Weitere Informationen

- Reichelt J, Pfrang-Stotz G, Bergfeldt B, Karrer E, Ricker M (2021): Effizienzsteigerung bei der Energiegewinnung in Biomassekraftwerken durch die technische Anwendung eines Biobrennstoffkataloges. BMWi-Förderprogramm: Energetische Biomassenutzung, Verbundvorhaben BiotAB (03KB125A-C), Abschlussbericht, S. 214.
- Veröffentlichungen aus dem Projekt sowie Literaturhinweise zum Thema finden sich im »BiotAB«- Abschlussbericht (s.o.)

Klischga

Johannes Rösler,
Andreas Häusler, Stefan Eder

Biochemisches »Klima-Schutz-Gas« aus hochfesten Industrie-Misch-Pellets zur Industriegas-Erzeugung

Zusammenfassung

Land- und forstwirtschaftliche sowie industrielle Reststoffe unterschiedlicher Beschaffenheit, die nicht zur Nahrungsmittelproduktion geeignet sind, wurden durch innovative techno-keramische Aufbereitung bei Rösler Ceraminno und am Fraunhofer IKTS Institutsteil Hermsdorf homogenisiert und im weiteren Verlauf strukturiert. Die in Mixern oder Knetern aufbereiteten Mischungen wurden durch Aufbau-Granulierung zu Kugeln bzw. durch Extrusion im Vakuumextruder zu Pellets verformt.

Diese mit Abwärme aus Industrieöfen getrocknet lagerfähigen Pellets sollen hochskaliert in der Porzellan- und Glasindustrie zur Erzeugung von »Klima-Schutz-Gas« eingesetzt werden. Dazu werden die hergestellten Pellets in einem Festbett-Gegenstromvergaser zu Synthesegas umgesetzt und über einen speziell ausgewählten Brenner thermisch verwertet, um die Wärme zum Beheizen der Hochtemperatur-Öfen bereitzustellen und damit zur Substitution von Erdgas führen.

Ziele

Ziel ist die Herstellung von hochfesten, lagerfähigen Formpellets aus Land- und forstwirtschaftlichen sowie industriellen Reststoffen unterschiedlicher Beschaffenheit, die nicht zur Nahrungsmittelproduktion geeignet sind. Die Charakterisierung der Formpellets durch den Einsatz in einem Gegenstrom-Vergasungs-Teststand als Ersatz für fossile Energieträger und Alternative zu Holzpellets. Die Möglichkeit des Einsatzes der Rezeptur-Pellets in der Porzellan- und Glasindustrie zum Beheizen von Hochtemperatur-Öfen mittels Klima-Schutz-Gas wird im Rahmen des Projektes geprüft.

- Erzeugung von Klima-Schutz-Gas zur Beheizung von Hochtemperatur-Öfen
- Substitution fossiler Energieträger in der Porzellan- und Glasindustrie
- Erzeugung von Pellets aus Reststoffen die nicht zur Nahrungsmittelproduktion geeignet sind



Johannes Rösler: »Durch die Nutzung der Ergebnisse aus diesem Forschungsprogramm/Förderprojekt und der konsequenten Weiterführung und Verschaltung der Technologien planen wir einen weiteren Schritt in Richtung einer biobasierten Bereitstellung von Prozesswärme für Hochtemperaturprozesse am Beispiel der Keramikindustrie. Gerade dem Thema der Prozesswärme im Rahmen der Energiewende wird mittlerweile ein großer Stellenwert zugeschrieben. Die Bioenergie wird für das Gelingen der Energiewende von großer Bedeutung sein.«



FKZ-Nr.: 03KB126 KOORDINATION:
 Laufzeit: 01.09.2017 – 28.02.2021 Rösler Ceraminno GmbH
 Zuwendungssumme: 317.190 € Johannes Rösler
 Langenauer Str. 2
 96355 Tettau-Schauberg
 www.roesler-ceraminno.de

PROJEKTLEITUNG:
 Direkte Ansprechperson:
 Johannes Rösler
 +49 9269 78-100
 roesler@roesler-ceraminno.de

PARTNER:
 Fraunhofer IKTS
 Andreas Häusler
 Michael-Faraday-Straße 1
 07629 Hermsdorf
 www.ikts.fraunhofer.de/de/
 kontakt.html

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

Kernbotschaften

- Alternative energetische Verwertung von Rest- und Abfallstoffen
- Substitution von Erdgas
- Herstellung von kompaktierten Misch- Pellets aus pflanzlichen, biogenen Rest- und Abfallstoffen und Umsetzung zur Synthesegaserzeugung für Hochtemperatur-Prozesswärme möglich
- Optimierung der Herstellung von kompaktierten Misch- Pellets aus biogenen Rest- und Abfallstoffen ist für kontinuierlichen Prozess erforderlich
- Zur Optimierung der energetischen Ausbeute ist ein geeignetes Verbrennungsregime notwendig sowohl auf Seiten des Brennstoffes (Gasreinigung), wie auch der Technik des verwendeten Brenners

summary (engl.)

Agricultural, forestry and industrial residues of different qualities, which are unsuitable for food production, were homogenised and subsequently structured by innovative techno-ceramic processing at Rösler CeramInno and at the Fraunhofer IKTS Hermsdorf institute branch. The mixtures were prepared in mixers or kneaders and then formed into balls by build-up granulation or into pellets by extrusion in a vacuum extruder.

The pellets are dried with waste heat from industrial furnaces and can be stored. These pellets are to be upscaled for the porcelain and glass industry to produce »climate protection gas«. For this purpose, the pellets produced are converted to synthesis gas in a fixed-bed updraft gasifier and thermally utilised via a specially selected burner to provide the heat for heating the high-temperature furnaces. This leads to the substitution of natural gas.

key messages (engl.)

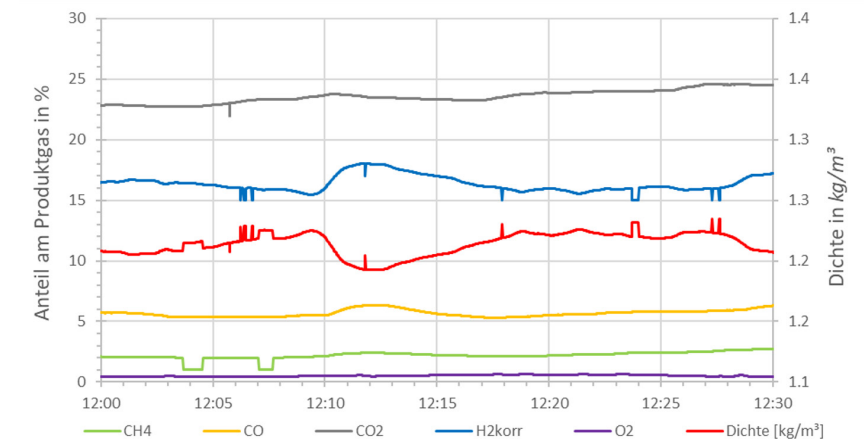
- Alternative energy recovery from residual and waste materials
- Substitution of natural gas
- Production of compacted mixed pellets from plant-based, biogenic residues and waste materials and conversion to synthetic gas production for high-temperature process heat is possible.
- Optimisation of the production of compacted mixed pellets from biogenic residues and waste is necessary for a continuous process
- To optimise the energy yield, a suitable combustion regime is necessary, both in terms of the fuel (gas purification) and the technology of the used burner.

Methodik Maßnahmen

Für das Projekt arbeiten die Firma Rösler CeramInno GmbH und die Fraunhofer Institute IKTS in Hermsdorf, sowie Umsicht in Sulzbach-Rosenberg zusammen:

- Optimierung der Kompaktierungstechnologie durch Versuche auf verschiedenen Mischungsaggregaten und Herstellung der biogenen Formpellets durch Formgebungsverfahren Granulieren, Pressen und Extrudieren
- Integration von Holzkohle bzw. Biokarbonisaten in Produkt zur Erhöhung des Brennwertes der Pellets
- Anpassung von Größe, Struktur und Form an Standardpelletstrukturen
- Nutzung des Methodenhandbuchs, Band 4, Kapitel 3 und 4

- Einsatzstoffanalyse hinsichtlich Ascheschmelzverhalten, Brennwertanalyse, sowie Wassergehalt und Glühverlust.
- Festbett-Gegenstromvergaser zur thermochemischen Konversion der Versatzrezepturen zu Synthesegas und Asche
- Gasanalyse des Synthesegases hinsichtlich Zusammensetzung, Dichte und Heizwert:



Ergebnisse auf einen Blick

PUBLIKATION

- Eder S (2020): Integrated tar-free thermochemical air/steam fixed-bed updraft gasification of TCR® biochar, Mitteleuropäische Biomassekonferenz (CEBC), 23.01.2020, Graz, Österreich.
- [Endbericht KliSchGa >>](#)
- [Website Rösler CeramInno >>](#) Roesler CeramInno | Bio-chemisches »Klima-Schutz-Gas« aus hochfesten Industrie-Misch-Pellets zur Industriegas- Erzeugung

Darstellung der Ergebnisse

ZUSAMMENFASSUNG

- Aufbereitung der Einsatzstoffe aus land- und forstwirtschaftlichen sowie industriellen Reststoffen, durch Zerkleinerung über Hammermühle und Zentrifugalmühle als Zutaten für verschiedene Versatzrezepturen
- Rezepturentwicklung für verschiedene hochfeste lagerfähige Pellets durch Mischungsherstellung mit Schnellmischer
- Pellet-Formgebung mittels kontinuierlicher Mischungsdosierung durch Stanzen, Walzenkompaktierung oder Aufbaugranulierung
- Verwertung der Pellets zu Synthesegas zum Einsatz in der Glas- und Keramikindustrie zur Erzeugung von Hochtemperatur-Prozesswärme

ENTWICKLUNG DES EINSATZSTOFFS

- Für die Erprobung verschiedener Versatzrezepturen erfolgte eine Geräteauswahl zur Mischung, Plastifizierung und Formgebung auf der Basis der im Technikums Maßstab des IKTS verfügbaren größten Geräte.
- Die Plastifizierung der Materialien fand in einem kühlbaren Doppelwellenknetter mit einem Nutzvolumen von 35 l statt. Zur Bindung der Materialien untereinander wurde ein Bindersystem auf der Basis von Zelluloseäthern verwendet, die keine Materialkostenanteile verursachen. In der 1. Versuchsreihe wurden vor allem Mittel- bis Hochviskose Binder eingesetzt. Sie zeichnen sich außerdem durch einen Aschegehalt aus, der vernachlässigbar niedrig ist. Hier wurde im Projektverlauf untersucht, welchen Einfluss die Binderviskosität auf die Stabilität der Formkörper hat. Es stellte sich heraus, dass mit zu niedrig viskosen Bindern keine ausreichende Bindung während der Formgebung erreicht werden konnte. Mit Bindern im Viskositätsbereich von 2000 bis 4000 mPa*s konnten sowohl gut extrusionsfähige Massen als auch im Endzustand sehr feste im Wesentlichen für den Einsatz abriebfreie Pelletstrukturen hergestellt werden. Das würde die Basis für die spätere Abfrage zur Verfügbarkeit billiger Bindersysteme, die eventuell bei verschiedenen Herstellern ebenfalls als Nebenprodukt anfallen, bilden.
- Die Extrusion der verschiedenen zylindrischen Strukturen wird mittels Vakuumextruder mit einem Zylinderdurchmesser von 100 mm, innen kühlbarer Pressschnecke und Mantelkühlung im Austragsbereich durchgeführt

OPTIMIERUNG DER PELLET REZEPTUR

- Nach den erfolgreichen Vorversuchen der nach dieser Methode der Aufbaugranulierung von Rösler Ceraminno bereitgestellten runden Pellets mit einem Außendurchmesser von 16-17mm wurde der Durchmesser von 17mm als Obergrenze für die Werkzeuggeometrie festgelegt.
- In den folgenden Versuchen wurde mit den favorisierten Einsatzstoffen sowohl am Fraunhofer IKTS Pellets extrudiert, als auch bei Rösler Ceraminno die Technologie zur Herstellung von Industriepellets durch Aufbaugranulierung erarbeitet.
- Die nicht in Pulverform anfallenden Reststoffe wurden in für kontinuierliche Vergasungsversuche ausreichenden Mengen in der Hammermühle mit enger Spalteinstellung zerkleinert. Lediglich die PP/ PE- Reste mussten so verwendet werden, wie sie anfallen, da hier keine geeignete Zerkleinerungsmöglichkeit verfügbar ist.
- Die Aufbereitung der feingemahlenen Pulver zu einem plastischen Pressgranulat erfolgte im Pemat- Mischer. Auf dieser Basis wurde bei der Firma Rösler Ceraminno mit der Fertigung von sphärischen Industrie- Misch- Pellets begonnen.

- Im Laufe zahlreicher Versuchsreihen stellte sich heraus, dass nach entfernen der Mischpaddel aus dem Rotationsmischer die Homogenität und Festigkeit der Industrie- Misch- Pellets bereits vor dem Trocknungsvorgang deutlich zunahm.
- Die Modifikation des Mixers brachte zudem eine deutliche Verbesserung bei der Einhaltung der Sollwerte der festgelegten Pelletdurchmesser.

VERWERTUNG DER ENTWICKELTEN PELLETS

- Die Auswahl sowie die Beschaffung eines geeigneten Synthesegasbrenners erfolgte über einen renommierten Hersteller von Industrieöfen auf Basis der Brennwertigenschaften mit einem größeren Querschnitt als bei herkömmlichen Erdgasbrennern.
- Der Brenner wurde incl. der erforderlichen Gasleitungen und weiterer Peripherie in einem Kammerofen zur Sinterung von Keramik verbaut.
- Die Integration der beiden Komponenten in den Vergasungsteststand Alpha-Suro wurde bei Fraunhofer Umsicht umgesetzt. Dazu wurde die Synthesegasleitung des Vergasers zur vorher angeschlossenen Brennkammer unterbrochen und das Synthesegas über den Synthesegasbrenner in den Keramikbrennofen geleitet und dort verbrannt. Das dabei entstehende Abgas wird wiederum aus dem Keramikofen gesaugt und in die bestehende Brennkammer geleitet.

Abbildung 1:

Alpha Suro Vergaser
(© Fraunhofer Umsicht)



Herausforderungen

HOMOGENITÄT DER EINSATZSTOFFCHARGEN

Für die Beschaffung der verschiedenen Einsatzstoffe sind Kriterien insbesondere zum Anteil von nichtbrennbaren Bestandteilen zu beachten, die zu einem erhöhten Ascheanteil führen. Deshalb wurde bei der Auswahl darauf geachtet, dass ein möglichst konstant unter 10% liegender Ascheanteil im anfallenden Stoff zu messen war. Aus diesem Grund sind die ursprünglich angedachten Anfallstoffe aus der Zuckerrübenverarbeitung und Straßen-pflegematerial aus der Auswahl ausgeschieden, da hier sehr hohe Ascheanteile von ca. 20% und mehr bestimmt wurden. In beiden Fällen wäre ein unvertretbar hoher Aufwand zur Beseitigung von anorganischen Anhaftungen (Sand, Lehm) notwendig gewesen. Für andere stückig anfallende Reststoffe (Waldrestholz) ist eine Vorzerkleinerung erfolgt, um eine für die Festigkeit der Pelletstruktur optimierte Faserstruktur zu erhalten. Generell muss für jeden Einsatzstoff eine Chargenbewertung hinsichtlich der Partikelgröße und -struktur und des Aschegehaltes erfolgen, um besonders letzteren durch Rezepturanpassung möglichst konstant niedrig zu halten.

FESTIGKEIT BZW. STABILITÄT DER PELLETS

Die Festigkeit der Pellets bemisst sich an den Anforderungen aus dem Transportprozessen nach der Herstellung und bei der Dosierung. Speziell bei der Dosierung wirkt sich ein durch Abrieb entstehender zu hoher Staubanteil negativ auf die Vergasungseigenschaften aus, weil dadurch eine Reduzierung der Vergasungsfläche bewirkt werden kann.

Bei den durch Extrusion hergestellten Pelletstrukturen wird durch den Binder und die Druckverdichtung im Extrusionswerkzeug eine ausreichende Abriebfestigkeit nach dem Trocknen der Pellets erreicht.

Für die granulierten Pellets wurde nach der oben beschriebenen Anpassung des Granulierprozesses eine ausreichende Festigkeit und eine homogene Pelletstruktur erreicht. Lediglich für die Druckfestigkeit gibt es Optimierungsbedarf bei anzustrebendem gesteigertem Durchsatz.

AUTOMATISIERTE PROZESSE ZUR KONTINUIERLICHEN FERTIGUNG VON PELLETS IN HOMOGENER GEOMETRIE

Zur Durchsatzsteigerung und zur weiteren Optimierung der Homogenität der Struktur im Bezug zur Struktur genormter Pellets wurde ein Folgeprojekt bewilligt, in dem speziell diese Aufgabenstellung im Zusammenhang mit der Vergasungstechnologie gelöst werden soll.

Während die Mischprozesse im Wesentlichen im Batchbetrieb erfolgen, ist für die Formgebung der Pellets die Entwicklung einer Stanz- oder Walzen-technologie vorgesehen. Dadurch wäre auch die direkte Förderung der geformten Pellets in den Trocknungsprozess möglich, so dass die fertigen Pellets in konstanter Form und mit ausreichender Festigkeit im Vorratsbehälter (Silo) für den Holzvergaser aufgefangen werden können.

GASZUSAMMENSETZUNG MIT AUSREICHENDEN BRENNWERT

Bei der Vergasung wird Luft als Vergasungsmedium hinzugefügt. Der Sauerstoffanteil der Luft dient bei der partiellen Oxidation der autothermen Vergasung zur Wärmezuführung für den eigentlichen Vergasungsprozess.

Der damit einhergehende Stickstoff aus der Luft verdünnt das entstehende Synthesegas, wodurch es schwieriger wird ein Gas mit ausreichend hohem Brennwert zu gewinnen, um daraus die Hochtemperatur-Prozesswärme für den gewünschten Einsatz in der Glas- und Keramikindustrie zu erzeugen.

NEIGUNG ZUR TEERBILDUNG

Zur Vergasung im Technikumsmaßstab wurde in KliSchGA ein Gegenstromvergaser für die Erzeugung von Synthesegas genutzt. Bei der Umsetzung von Biomasse neigen Gegenstromvergaser zur Bildung von Teeren. Für einen Dauerbetrieb ist eine Anpassung der Vergasungstechnologie notwendig, um Synthesegas mit einer ausreichenden Gasqualität und Reinheit zu erzeugen.

Ausblick

Durch den Einsatz von hochfesten, lagerfähigen Formpellets aus Land- und forstwirtschaftlichen sowie industriellen Reststoffen in thermochemischen Konversionsanlagen kann ein Synthesegas erzeugt werden, welches zukünftig als Ersatz für Erdgas in der Glas- und Keramikindustrie Verwendung finden kann.

Aus den Projektergebnissen resultiert weiterer Forschungs- und Entwicklungsbedarf im Hinblick auf die Auswahl eines geeigneten Synthesegabrenners, um den dauerhaften Einsatz von Klima-Schutzgas zu bewerkstelligen und das Potential der Klima-Schutzgas-Einsparung gegenüber dem bisher verwendeten fossilen Erdgas ermitteln zu können. Im Zuge dessen wurde im Rahmen des 7. Energieforschungsprogramms ein Folgeprojekt »KLISCHGA2.o« (FKZ: 03EI5449) beantragt.

Weitere Informationen

- **Homepage Fa. Rösler CeramInno: Roesler CeramInno | Biochemisches »Klima-Schutz-Gas« aus hochfesten Industrie-Misch-Pellets zur Industriegas- Erzeugung (roesler-ceraminno.de)**

Literatur

- Reil S, Karl J, Beer S (2014): Experimental study on the impact of gasification conditions on process stability and tar yield in stratified downdraft gasifiers, isga-4, TU Wien.
- Reil S, Karl J, Beer S (2014): Impact of Gasification Conditions on the Tar Yield of Stratified Downdraft Gasifiers. In: Papers of the 22nd European Biomass Conference, S. 585 – 590.
- Eder S (2020): Integrated tar-free thermochemical air/steam fixed-bed updraft gasification of TCR® biochar, Mitteleuropäische Biomassekonferenz (CEBC), 23.01.2020, Graz, Österreich
- Rösler J, Häusler A, Apfelbacher A (2021): Projekt Abschlussbericht KliSchGa,7.Energieforschungsprogramm, https://www.energetische-biomassennutzung.de/fileadmin/Steckbriefe/dokumente/03KB126_KliSchGa_Endbericht.pdf.

PyroGas

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

Dezentrale Verwertung von Abfall-/Reststoffen mittels Pyrolyse und anschließender Flugstromvergasung zur gasmotorischen Nutzung

Zusammenfassung

Eine dezentrale Strom- und Wärmeerzeugung aus biogenen Reststoffen, ist aufgrund von ungünstigen Brennstoffeigenschaften mit den derzeit am Markt befindlichen Konzepten nur bedingt möglich. In PyroGas wurde ein aussichtsreiches Konzept hierzu in einer Pilotanlage untersucht. Dabei wird thermisch vorbehandelter Klärschlamm in einem Flugstromvergaser zu einem Produktgas umgewandelt, welches anschließend in einem Gasmotor verstromt wird. Durch diese Kombination entsteht eine Anlage zur dezentralen Kraft-Wärme-Kopplung mit hoher Brennstoffflexibilität. Im Projekt wurde der Nachweis des technischen Betriebs eines Flugstromvergasers mit Pyrolysekoks und der folgenden Verbrennung des Produktgases im Gasmotor erbracht. Durch praktische Versuchsreihen und die Analyse von Messergebnissen wurde die thermische Vorbehandlung von Hühnertrockenkot und Klärschlamm für eine anschließende Vergasung optimiert. Die Vergasung und die motorische Nutzung des Produktgases wurden analog verbessert. Mit den Ergebnissen wurden die Systemberechnungen des Gesamtkonzeptes verfeinert. Schlussendlich wurden die Grundlagen für die technische Auslegung einer Demonstrationsanlage erarbeitet.



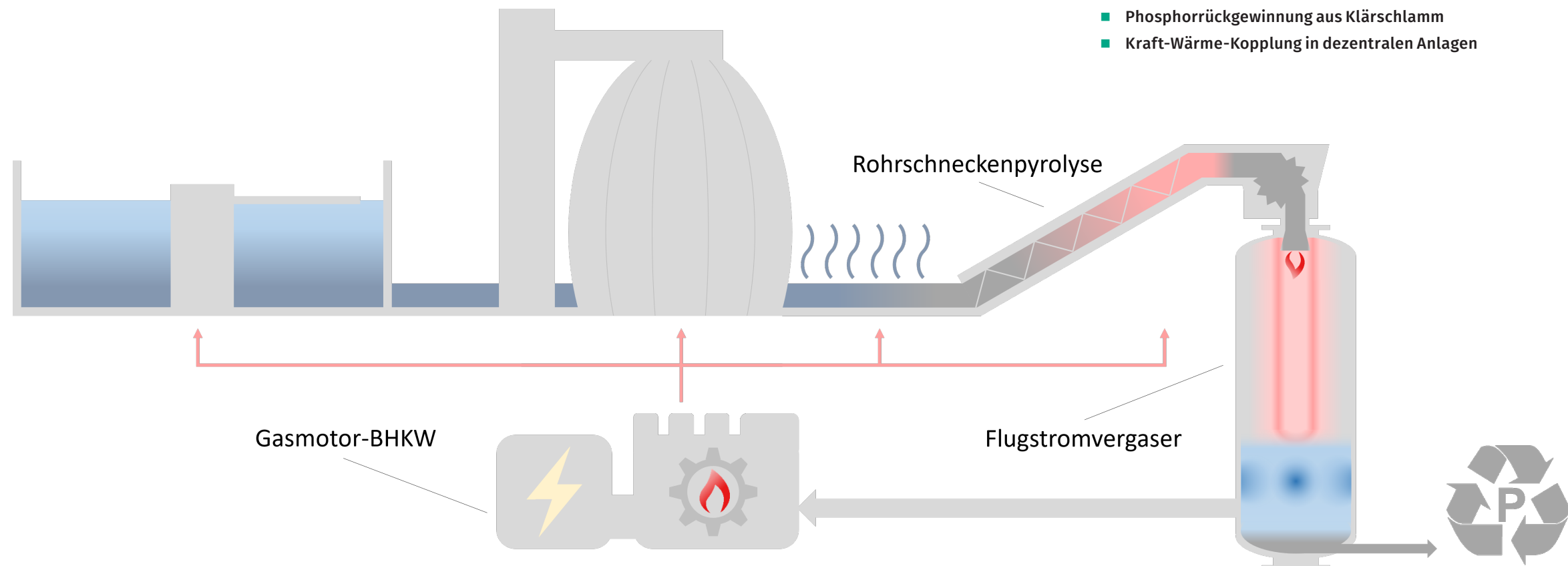
Andreas Ewald: »Die Vergasung ermöglicht es biogene Reststoffe in ein Brenngas zu überführen und so für die dezentrale Strom- und Wärmeerzeugung einzusetzen. In PyroGas wurde die Machbarkeit einer aussichtsreichen Technologiekette experimentell belegt. Dafür wurde mit Klärschlamm, einem inhomogenen Reststoff mit niedrigem Heizwert, eine besonders herausfordernde Verwertung gezeigt. Das Konzept kann in Kläranlagen in die etablierte Verwertungskette integriert werden und sogar bestehende Anlagenkomponenten mitnutzen.«

Ziele

Ziel von PyroGas war die praktische Demonstration einer Prozesskette zur dezentralen Strom- und Wärmeerzeugung aus inhomogenen Reststoffen anhand einer Pilotanlage. Eine thermische Vorbehandlung von Reststoffen sollte einen homogenen Brennstoff für die Flugstromvergasung bereitstellen. Mittels Flugstromvergasung sollte dieser Brennstoff in ein teearmes Brenngas für ein Gasmotor-BHKW konvertiert werden. Theoretische Prozessbetrachtungen sollen energetische Bilanzierungen und eine ökonomische Bewertung der Prozesskette ermöglichen.

Themen schwerpunkte

- Thermische Nutzung von inhomogenen Reststoffen mit niedrigem Heizwert
- Thermochemische Vorbehandlung zur Herstellung von homogenen Brennstoffen
- Flugstromvergasung zur Erzeugung von Brenngas für ein Gasmotor-BHKW
- Phosphorrückgewinnung aus Klärschlamm
- Kraft-Wärme-Kopplung in dezentralen Anlagen



Kernbotschaften

- Der Energieaufwand für die Zerkleinerung von inhomogenen Reststoffen reduziert sich bereits durch eine thermische Vorbehandlung bei vergleichsweise milden Prozessbedingungen erheblich.
- Die thermische Vorbehandlung verändert die Brennstoffeigenschaften der Reststoffe. Der Einfluss dieser Veränderung auf das Leistungsverhalten der Vergasung ist allerdings gering.
- Die Vergasung im Flugstrom von Brennstoffen mit geringem Heizwert kann trotz der Verwendung von Luft als Oxidationsmittel stabil betrieben werden.
- Produktgas aus der Vergasung eignet sich für die Strom- und Wärmezeugung im Gasmotor. Bei Brennstoffen mit geringem Heizwert muss allerdings der Heizwert des Produktgases mit geeigneten Maßnahmen angehoben werden.
- Das Produktgas muss vor der Verbrennung im Gasmotor gereinigt werden, da es unerwünschte Spurengase (HCN, HCl, etc.) und geringe Mengen an Teer beinhaltet.

summary (engl.)

A decentralized combined heat and power generation (CHP) from biogenic residues is not possible with the concepts currently on the market due to unfavorable fuel properties. PyroGas is a promising concept combining pyrolysis and entrained-flow gasification. A pilot plant converts thermally pretreated sewage sludge into a product gas by entrained-flow gasification, which is then combusted in a gas engine to generate electricity. This creates a system for CHP with a high fuel flexibility.

PyroGas provided proof of the technical operation of an entrained-flow gasifier with pyrolysis coke and the subsequent combustion of the product gas in the gas engine. The thermal pre-treatment of chicken manure and sewage sludge for subsequent gasification was optimized. The gasification and the engine use of the product gas were improved. The modeling of the overall concept were refined with the experimental results. Finally, PyroGas developed the basics for the technical design of a demonstration plant.

key messages (engl.)

- The energy required for grinding of inhomogeneous residues is already reduced considerably by thermal pretreatment under comparatively mild process conditions.
- The thermal pretreatment changes the fuel properties of the residues. However, the influence of this change on the performance of the gasification is small.

Methodik Maßnahmen

- The entrained-flow gasification of fuels with a low calorific value can be operated stably despite the use of air as the oxidizing agent.
- Product gas from gasification is suitable for power and heat generation in gas engines. Suitable measures increase the calorific value of the product gas for fuels with low calorific value if this is necessary.
- The product gas contains undesirable trace gases (HCN, HCl, etc.) and small amounts of tar. Gas purification must reduce these impurities before combustion in the gas engine.
- Brennstoffcharakterisierung: Aufbau einer Rohrschneckenpyrolyseanlage und thermische Vorbehandlung von unterschiedlichen biogenen Reststoffen unter verschiedenen Prozessbedingungen. Brennstoffanalyse nach gängigen Normen und Untersuchung der Zerkleinerung.
- Flugstromvergasung: Erstellung von Pyrolysekoks im Flugstrom mit Gasmessung und anschließender Brennstoffanalyse. Untersuchung der Reaktionskinetik des erhaltenen Pyrolysekoks zur Abschätzung von Deaktivierungseffekten.
- Verbrennung im Gasmotor: Flugstromvergasung eines vorbehandelten Reststoffs mit anschließender Verbrennung des Produktgases im Gasmotor zur Strom- und Wärmezeugung. Optimierung des Betriebsverhaltens beider Anlagenkomponenten, sowie Produktgas- und Abgasmessung zur Abschätzung des Reinigungsaufwands.
- Systembetrachtung - Gesamtprozess: Die Einzelprozesse wurden in AspenPlus® modelliert und zu einem Gesamtprozess zusammengefasst. Die Gesamtprozessbetrachtungen ermöglichten eine energetische Bilanzierung. Darauf basierend wurden Möglichkeiten der Wärme- und Prozessintegration abgeleitet und evaluiert.
- Systembetrachtung - Ökonomie: Die Gesamtprozessbetrachtung in AspenPlus® bildete die Grundlage für eine ökonomische Bewertung der Technologie mit resultierenden Strom-/Wärmegestehungskosten und einer Sensitivitätsanalyse.
- Systembetrachtung - Phosphorrückgewinnung: Über eine Literaturrecherche konnten geeignete Technologien für die Phosphorrückgewinnung eingegrenzt werden. Dabei ergaben sich zusätzlich Möglichkeiten zur Integration in den bestehenden Prozess, welche Teil von weiterführenden Untersuchungen sind.

Ergebnisse auf einen Blick

PUBLIKATION:

- [Endbericht Projekt PyroGas >>](#)
- Postervortrag: EWALD A, XIN L, ZHANG Z, FENDT S, SPLIETHOFF H (2022): PyroGas - Techno-economic Analysis of a Decentralized Disposal Concept for Sewage Sludge by Pyrolysis and Subsequent Entrained Flow Gasification for Gas Engine Use. In: 30th European Biomass Conference and Exhibition.

FKZ-Nr.: 03KB158
Laufzeit: 01.09.2019 – 28.02.2022
Zuwendungssumme: 330.023 €

KOORDINATION:
Lehrstuhl für Energiesysteme
Technische Universität München
Andreas Ewald, Sebastian Fendt,
Hartmut Spliethoff
Boltzmannstraße 15
85748 Garching bei München
www.epe.ed.tum.de/es

PROJEKTLEITUNG:
Dr.-Ing. Sebastian Fendt
+49 (0)89 289 16207
E-Mail: sebastian.fendt@tum.de

PARTNER:
Vökl Motorentechnik GmbH
Robert Vökl,
Florian Henze
Einsteinstraße 12
95643 Tirschenreuth
www.voelkl.net

- Postervortrag: EWALD A, FENDT S, SPLIET-HOFF H.(2021): PyroGas - Decentralized Exploitation of Biomass-Derived Waste and Residues by Pyrolysis and Subsequent Entrained Flow Gasification for Gas Engine Use. In: 29th European Biomass Conference and Exhibition.

AUSZEICHNUNGEN:

- Best Poster Award auf der 29. European Biomass Conference & Exhibition, 2021 innerhalb der Session

KONZEPT/MACHBARKEITSSTUDIE:

- Anlagenkonzept
- Technische Machbarkeitsstudie

ANLAGE:

- Neubau einer Pilotanlage zur Pyrolyse von Reststoffen
- KWK-Pilot-Anlage durch Kopplung von Flugstromvergaser und BHKW

DATEN & METHODEN:

- Modelle zu Einzelprozessen in AspenPlus® (Pyrolyse, BHKW)
- Modell zum Gesamtprozess in AspenPlus®
- Brennstoffdatenbank zur thermischen Vorbehandlung von Klärschlamm
- Brennstoffdatenbank zur thermischen Vorbehandlung von Hühnertrockenkot
- Messreihe zur Vergasung von Pyrolysekoksen im Labormaßstab
- Messreihe zur Vergasung von einem Pyrolysekoks im Pilotmaßstab
- Messreihe zum Betrieb eines Gasmotor-BHKWs mit Produktgas aus der Flugstromvergasung

MARKT:

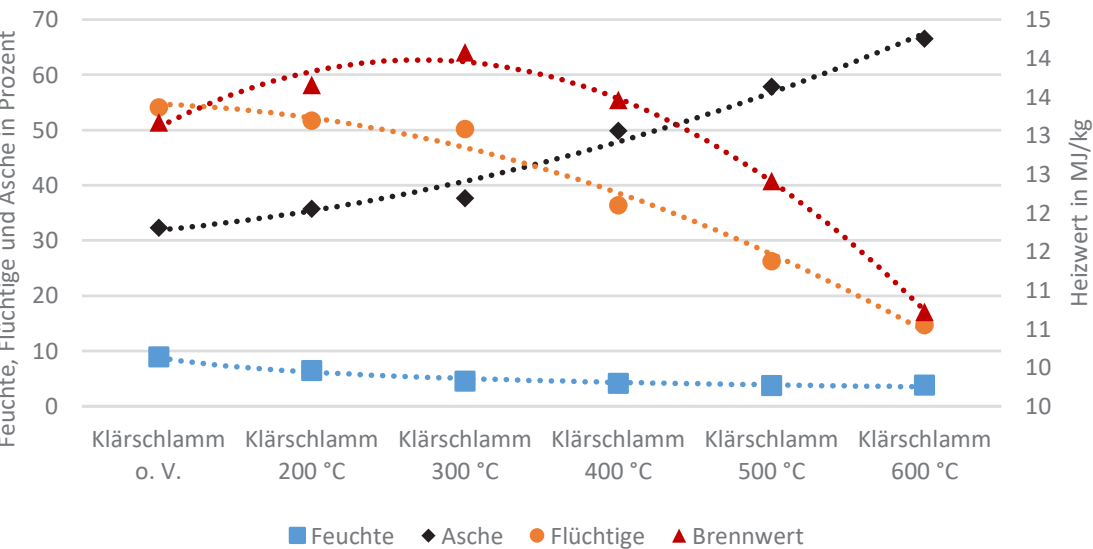
- Marktprognose anhand des Prozessmodells

Darstellung der Ergebnisse

THERMISCHE VORBEHANDLUNG ERZEUGT NUTZBAREN BRENNSTOFF

Bei Klärschlamm sinkt mit zunehmender Temperatur bei der thermischen Vorbehandlung die Hygroskopie. Gemessen wurde jeweils die Feuchte des Brennstoffs nachdem sich ein Gleichgewicht mit der Luftfeuchtigkeit eingestellt hat. Der Aschegehalt steigt bei allen gemessenen Brennstoffen mit steigender Vorbehandlungstemperatur. Der Gehalt an flüchtigen Verbindungen nimmt mit steigender Vorbehandlungstemperatur ab. Der Heizwert nimmt mit steigender Vorbehandlungstemperatur zunächst zu. Sobald ein Maximum erreicht ist, nimmt dieser wieder ab. Das Maximum liegt je nach Brennstoff zwischen 300 °C und 400 °C. Abbildung 1 veranschaulicht die Zusammenhänge exemplarisch für einen Klärschlamm aus dem Projekt.

Abbildung 1:
Ergebnisse der Brennstoffanalyse von Klärschlamm bei unterschiedlichen Vorbehandlungstemperaturen
(© TU München)



Die Zusammensetzung der Asche wird durch die thermische Vorbehandlung im Rahmen der Messgenauigkeit nicht beeinflusst. Auch Phosphor verbleibt in der Asche und wird nicht ausgetragen. Abbildung 2 gibt Aufschluss über die mittels Röntgenfluoreszenzanalyse gemessenen Verbindungen.

Abbildung 2:
Zusammensetzung der Asche von Klärschlamm bei unterschiedlichen Vorbehandlungstemperaturen
(© TU München)

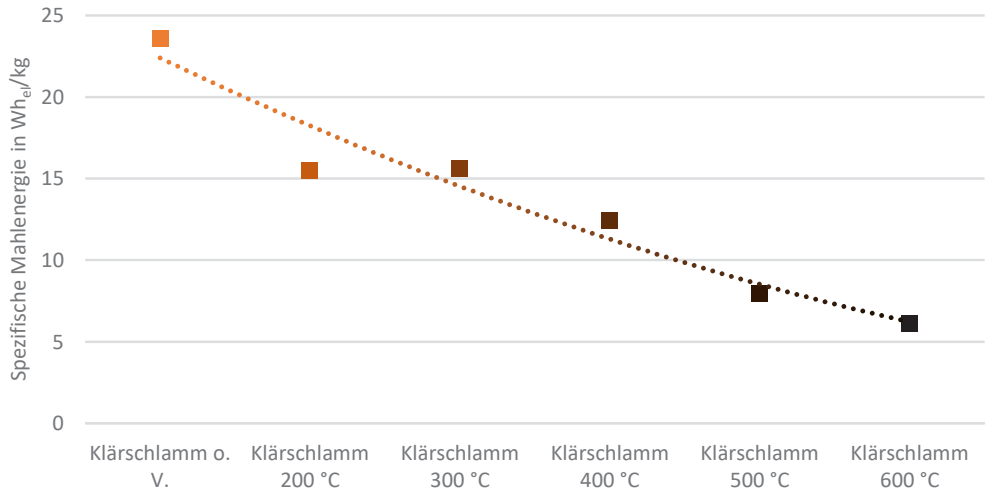
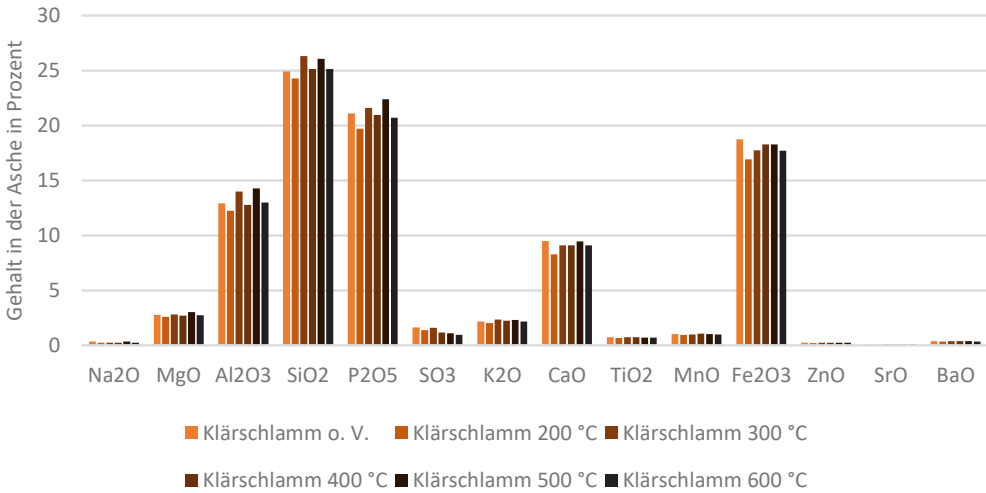


Abbildung 3:
(oben) Spezifische Mahlenenergie zur Zerkleinerung von Klärschlamm bei unterschiedlichen Vorbehandlungstemperaturen.
(links) Brennstoff ungemahlen vs. (rechts) Brennstoff gemahlen
(© TU München)



RESÜMEE AUS DER BRENNSTOFFANALYSE

Durch die Wahl einer geeigneten Vorbehandlungstemperatur wird die Brennstofffeuchte und der Energiebedarf für die mechanische Zerkleinerung reduziert. Der spezifische Heizwert des Brennstoffs wird hingegen gesteigert.

Die Vergasung der verschiedenen Brennstoffe in einem elektrisch beheizten Laborreaktor zeigt, dass hohe Vorbehandlungstemperaturen einen geringeren Umsatz und ein weniger energiereiches Produktgas zur Folge haben. Die durch thermogravimetrische Analyse gemessenen intrinsischen Reaktionsraten des Pyrolysekokes liegen hingegen für alle getesteten Vorbehandlungstemperaturen auf dem gleichen Niveau. Die Versuchsdurchführung erfolgte nach einem in vorangegangenen Projekten entwickelten Ablauf (Briesemeister 2018).

RESÜMEE AUS DER THERMISCHEN VORBEHANDLUNG

Hohe Vorbehandlungstemperaturen verschlechtern das Leistungsverhalten der Vergasung. Aus diesem Grund sollten milde Vorbehandlungstemperaturen gewählt werden. Ein ideale Wert ist vom Brennstoff abhängig, liegt aber ungefähr bei 300 °C.

VERGASUNGSBETRIEB MIT HERAUSFORDERNDEN BRENNSTOFFEN UNPROBLEMATISCH

Eine Messreihe zum Vergasungsbetrieb des Pilotvergasers mit bei 300 °C vorbehandeltem Klärschlamm zeigt, dass mit Luft als Vergasungsmittel ein stabiler Betrieb gewährleistet werden kann. Luft wird aufgrund des Preisvorteils gegenüber reinem Sauerstoff in PyroGas bevorzugt. Abbildung 4 zeigt den genutzten autothermen Flugstromvergaser inklusive einer Aufnahme der Flamme während des Betriebs mit vorbehandeltem Klärschlamm.

Die Flamme lässt sich ohne Schwierigkeiten zünden und brennt gleichmäßig, sodass ein stetiger Betrieb über mehrere Stunden aufrechterhalten wurde. Der niedrige Heizwert und der hohe Aschegehalt des Brennstoffs werden von der Anlage toleriert. Die Anlage wurde bisher nicht mit einem derartigen Brennstoff betrieben (Briesemeister 2018, Kremling 2018).

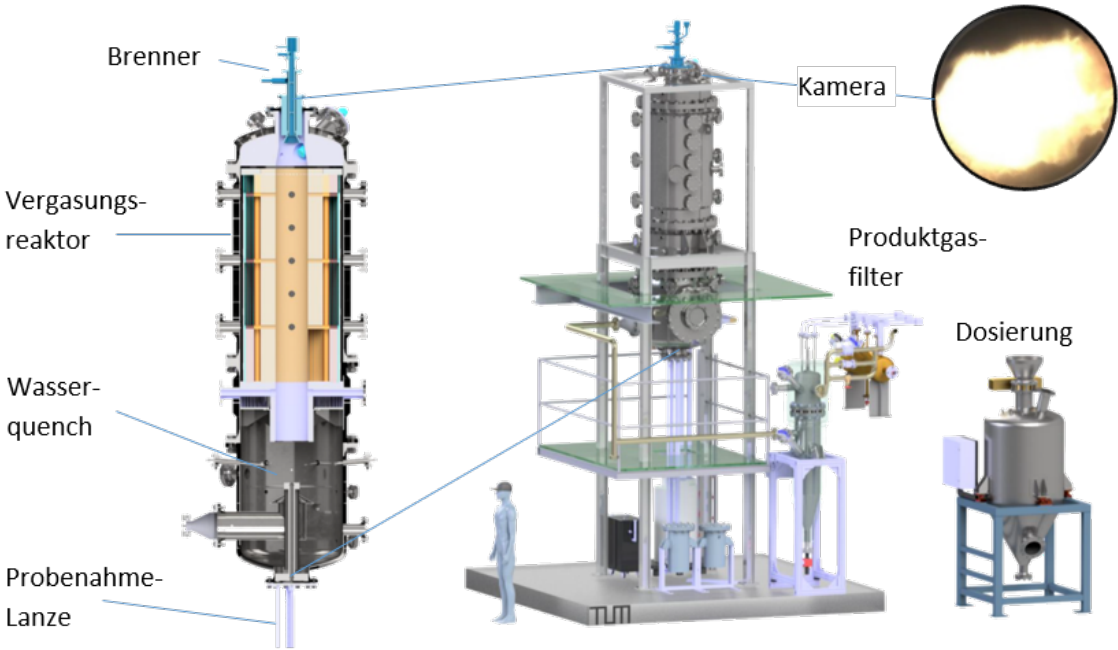


Abbildung 4: Schnittansicht (links) und Technikumsansicht (rechts) des Flugstromvergasers der Pilotanlage (Quelle: Leuter et. al 2021.)

RESÜMEE ZUM AUTOTHERMEN VERGASUNGSBETRIEB

Die Flugstromvergasung eignet sich zur Umsetzung von Brennstoffen mit niedrigem Heizwert und hohem Aschegehalt.

GASMOTOR-BHKW VERWERTET PRODUKTGAS

Eine weitere Messreihe des Pilotvergasers zeigt, dass mit dem erzeugten Produktgas ein Gasmotor-BHKW mit einer elektrischen Leistung von 20 kWel zur Wärme- und Stromerzeugung betrieben werden kann. Das Produktgas zündet im Gasmotor allerdings erst ab einem Heizwert von ungefähr 4,5 MJ/m3. Da dieser Wert mit Luft als Vergasungsmittel nicht erreicht wird, kann diese teilweise durch reinen Sauerstoff ersetzt werden. Wichtige Parameter aus einem erfolgreichen Betriebspunkt werden in Tabelle 1 aufgeführt. Die Messungen an Produktgas und Abgas zeigen, dass für den Betrieb einer solchen Anlage weitere Gasreinigungsschritte benötigt werden.

Tabelle 1: Betriebsparameter für einen BHKW-Betrieb mit pyrolysiertem Klärschlamm (© TU München)

PARAMETER	WERT	PARAMETER	WERT
Brennstoffleistung P_{soll}	120,0 kW	$H_{u,BS}$	13,54 MJ/m ³
Brennstoffleistung P_{ist}	122,7 kW	$H_{u,PG}$	5,46 MJ/m ³
Luftzahl λ_{soll}	0,45	Stickstoffzugabe	3,67 Nm ³ /h
Luftzahl λ_{ist}	0,41	Luftzugabe	13,88 Nm ³ /h
Dosierate $m_{BS,soll}$	34,05 kg/h	Sauerstoffzugabe	8,75 Nm ³ /h
Dosierate $m_{BS,ist}$	34,36 kg/h	Kohlenstoffumsatz	82,5 %
Temperatur T_{Flamme}	1318 °C	Gesamtumsatz	91,8 %
Temperatur $T_{Reaktionsraum}$	1230 °C	Kaltgaswirkungsgrad	47,4 %
El. Leistung BHKW	15 kW _{el}	El. Wirkungsgrad BHKW	25,8 %

RESÜMEE ZUM BETRIEB DES GASMOTOR-BHKWS

Das Gasmotor-BHKW kann mit Produktgas aus der Flugstromvergasung von Reststoffen betrieben werden. Bei zu geringem Heizwert muss dieser über geeignete Maßnahmen eingestellt werden.

SYSTEMBETRACHTUNG

Die techno-ökonomische Evaluierung des Gesamtprozesses wird durch in Aspen-Plus® aufgebaute Modelle zu den einzelnen Prozessschritten und der gesamten Prozesskette ermöglicht. Damit erfolgt eine Flexibilitätsuntersuchung des Gesamtsystems über die Variation der Eingabeparameter. Mithilfe des Gesamtmodells ist die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung nach VDI 2067 der Technologiekette und die Marktevaluierung durchgeführt worden. Investitionskosten werden aus der Literatur geschätzt und hochgerechnet.

RESÜMEE ZUR SYSTEMBETRACHTUNG

Die aufgebauten Modelle erlauben die Entwicklung von Markteinführungsstrategien und die Einbindung in entsprechende Normen, Richtlinien, Verordnungen und Gesetze.

PHOSPHORRÜCKGEWINNUNG KANN TEIL DES KONZEPTEES SEIN

Um der Verordnung über die Verwertung von Klärschlamm (AbfKlärV) gerecht zu werden, muss ein Phosphorrückgewinnungskonzept für die anfallende Asche vorliegen. Ein Screening aktueller Phosphorrückgewinnungstechnologien aus anorganischen Feststoffen erlaubt dessen Bewertung. Ein Kostenvergleich erfolgt auf der Basis von Prozesssimulationen in AspenPlus®. In Bezug auf die Verwertungskette in PyroGas wird demnach ein nachgeschaltetes, nasschemisches Verfahren als besonders kostengünstig und skalierbar angesehen. Zudem zeigen die experimentellen Messreihen, dass ein eigener Ansatz direkt in den Vergasungsvorgang integriert werden könnte. Diese Überlegung ist Teil von weiterführenden Untersuchungen und wird im Nachfolgeprojekt PyroGasII untersucht.

RESÜMEE ZUR PHOSPHORRÜCKGEWINNUNG

Gängige Rückgewinnungstechnologien aus Klärschlammasche sind prinzipiell geeignet. Für PyroGas wird ein nachgeschaltetes, nasschemisches Verfahren oder eine eigene, integrierte Lösung empfohlen.

Herausforderungen

Zunächst stellte die Brennstoffdosierung des Pilotvergasers eine Herausforderung dar. Durch technische Umbaumaßnahmen und einen neu konzipierten Sinterboden wird sie nun der Förderaufgabe gerecht. Zwar ist ein stabiler Vergasungsbetrieb trotz der Wahl von herauffordernden Brennstoffen möglich, jedoch reicht der Heizwert im Produktgas für eine Verbrennung im Gasmotor nicht aus. Hier kann das Vergasungsmittel Luft teilweise durch reinen Sauerstoff ersetzt werden. Auch andere Möglichkeiten zur Erhöhung des Heizwertes, wie die Zumischung von Pyrolysegas oder Faulgas, sind praktikabel. Der elektrische Wirkungsgrad der Prozesskette aus Vergasung und Verstromung liegt im Versuchsaufbau bei lediglich 12,2 %. Dieser Wert ist auch auf den Pilotcharakter der Anlage zurückzuführen.

Ausblick

PyroGas hat den Grundstein für die Planung einer Demonstrationsanlage des Gesamtkonzeptes zur Reststoffverwertung gelegt. Die Ergebnisse zur Flugstromvergasung des Pyrolysekokes fließen direkt in die Auslegung des Vergasers ein. Die Ergebnisse zur Synthesegaszusammensetzung im Hinblick auf Synthesegasverunreinigungen definieren die Notwendigkeit einer Gasreinigung für eine reibungslose Verbrennung im Gasmotor. Die Abgasmessungen definieren welche Abgasnachbehandlung im Hinblick auf Verordnungen zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes einzuplanen sind. Aus den Recherchen zum Phosphorrecycling entstand ein innovativer Ansatz

wie dieses in den Vergasungsprozess integriert werden kann. Dieser Ansatz soll den Prozess unabhängig von einer nachgeschalteten, externen Rückgewinnung machen. Insgesamt sollen die Ergebnisse aus dem Verbundvorhaben PyroGas mit dem Nachfolgeprojekt PyroGasII erweitert werden. Dabei ist stets die Planung einer Demonstrationsanlage im Fokus.

- [Endbericht Projekt PyroGas >>](#)
- [Website des Lehrstuhls für Energiesysteme](#)

Literaturverzeichnis

- **Kremling M B (2018): Experimentelle Untersuchungen zur sauerstoffgeblasenen Flugstromvergasung von staubförmiger Biomasse.** Verlag Dr. Hut. Dissertation. ISBN 978-3-8439-3551-7
- **Briesemeister L (2018): Flugstromvergasung hydrothermal karbonisierter Biomasse mit Luft.** Verlag Dr. Hut. Dissertation. ISBN 978-3-8439-3558-6
- **Leuter P, John 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.
- **AbfKlärV: Verordnung über die Verwertung von Klärschlamm, Klärschlammgemisch und Klärschlammkompost (Klärschlammverordnung - AbfKlärV).** BGBl. I.

BIOGAS
Emissionsminderung, Effizienzsteigerung, Flexibilisierung,
optimierter Einsatz von Rest- & Abfallstoffen



BioHy

Robert Manig

Energetische und ökonomische Optimierung von Biogasanlagen durch die getrennte Erzeugung von Biowasserstoff und Biomethan

Zusammenfassung

Im Verbundvorhaben »BioHy« wurde ein Verfahren entwickelt, welches den konventionellen einstufigen Biogasprozess um eine biologische Wasserstoffstufe erweitert. Das Funktionsprinzip dieses biotechnologischen Reaktors ist die biogen induzierte Versäuerung der eingesetzten Substrate mit gekoppelter Wasserstofffreisetzung. Verfahrenstechnisch werden dabei die Versäuerungsschritte des Biogasbildungsprozesses von der Methanbildung räumlich getrennt. Im Ergebnis werden zwei biogene Gase parallel und kontinuierlich produziert – ein wasserstoffhaltiges Biogas und ein methanhaltiges Biogas.

Leitfaden für die verfahrenstechnische Entwicklung war ein möglichst hoher Praxisbezug. Mittels Optimierung anwendungsnaher Betriebsparameter wie Reaktortemperatur, hydraulische Verweilzeit, Raumbelastung und das Verhältnis der Fermentervolumen konnte ein biologisch stabiles Prozessregime etabliert werden. Das Verfahren wurde an verschiedenen Substraten im Biogastechnikum am DBI getestet. Das Verfahren wurde während der Projektlaufzeit vom Labor- in den Pilotmaßstab gehoben. Abschließend konnte in einem 200-tägigen Langzeittestperiment unter wechselnden Versuchsbedingungen kontinuierlich wasserstoffhaltiges Biogas erzeugt werden.

Themen schwerpunkte

- Biogas, biogene Gase
- Biowasserstoff Wasserstoffstufe, , Hydrolyse
- zweistufiges Verfahren

Ziele

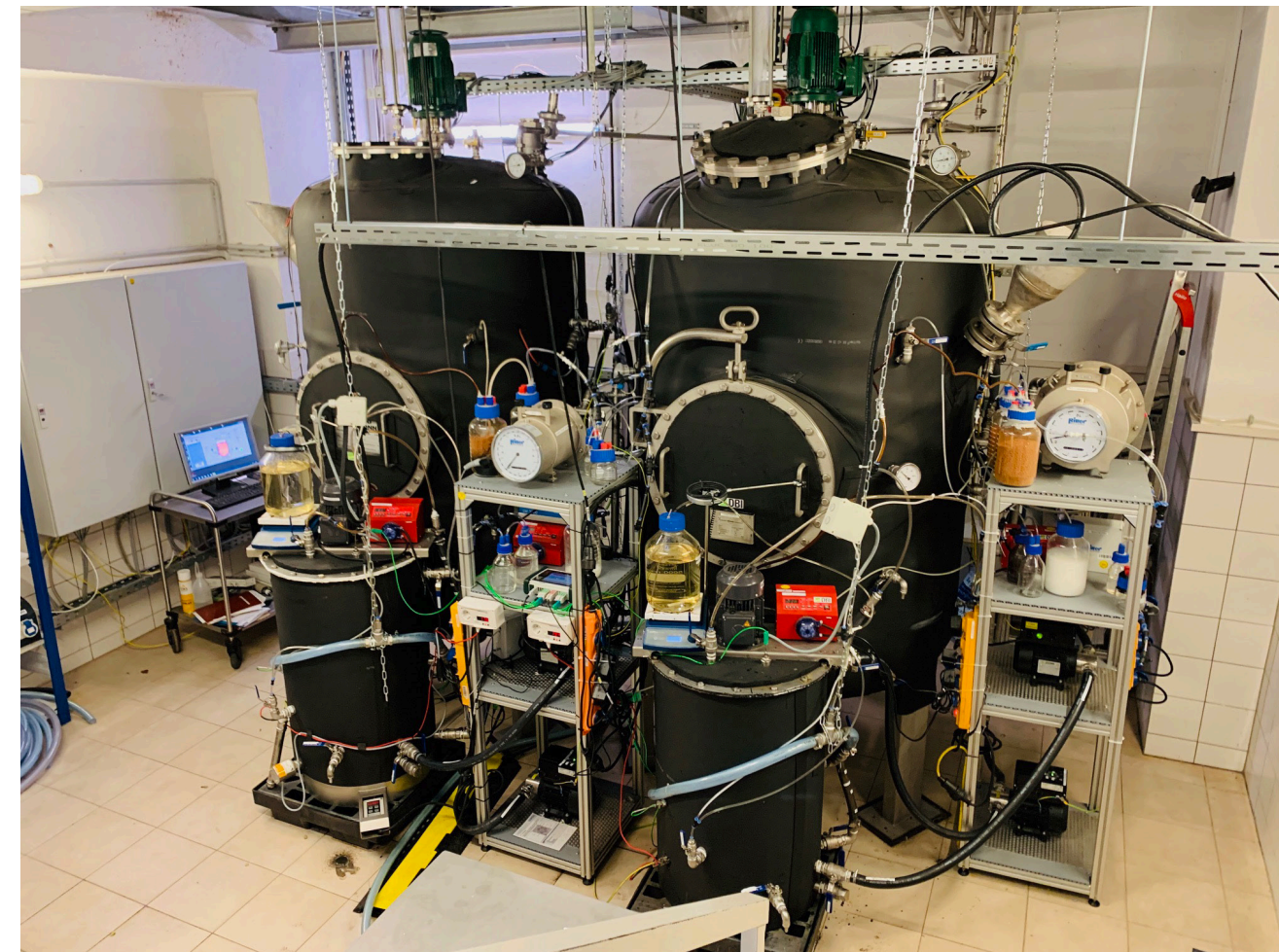
Ziel des Forschungsvorhabens »BioHy« war die verfahrenstechnische Erweiterung des konventionellen einstufigen Biogasprozesses um eine biologische Wasserstoffstufe. Der Fokus des Projektes lag auf einer stabilen und kontinuierlichen biogenen Wasserstoffproduktion. Das Verfahren sollte zudem vom Labor- in den Pilotmaßstab gehoben werden, um das Übertragungspotenzial in die Praxis aufzuzeigen. Hierfür war die Technikumsbiogasanlage vom DBI zu ertüchtigen. Zusätzlich wurden die Auswirkungen von Wasserstoff-Methan-Gemischen auf das Emissions- und Wirkungsgradverhalten am einem BHKW untersucht. Der Partner EnviTec brachte seine Expertise als Anlagenbauer im Sektor Biogas bei der Verfahrensentwicklung ein, insbesondere zu ingenieurtechnischen und kommerziellen Fragestellungen.

Kernbotschaften

- Biogener Wasserstoff erweitert das Anwendungsspektrum des Biogasprozesses.
- Biogener Wasserstoff ist an konventionelles Biogas gekoppelt.
- Biogener Wasserstoff sollte Anwendung in der stofflichen Nutzung finden.

Robert Manig: »Besonders spannend an dem Projekt »BioHy« war die Herausforderung die biogene Wasserstoffbildung in einen stabilen und kontinuierlichen Prozess zu überführen – eine Grundlage für die technische Anwendung dieses biologischen Phänomens. »BioHy« zeigt dabei, wie facettenreich Biogas sein kann.«

(© DBI-Gruppe 2020)



(© DBI)

FKZ-Nr.: 03KB123
 Laufzeit: 01.11.2017 – 31.01.2020
 Zuwendungssumme: 299.959 €

Direkter Ansprechpartner/Autor
Robert Manig
 49 (0) 3731 4195 337
 robert.manig@dbi-gruppe.de

PARTNER:
**EnviTec Anlagenbau
 GmbH & Co.KG**
 Boschstraße 2
 48369 Saerbeck
 www.envitec-biogas.de

KOORDINATION:
DBI Gas- und Umwelttechnik GmbH
 Karl-Heine-Straße 109/111
 04229 Leipzig
 www.dbi-gruppe.de

summary (engl.)

In the »BioHy« joint research project, a process was developed that upgrade the conventional single-stage biogas process by a biological hydrogen stage. The functional principle of this biotechnological reactor is the biogenically induced acidification of the substrates used with the coupled release of hydrogen. In terms of process technology, the acidification steps in the production of biogas are spatially separated from the formation of methane. As a result, two biogenic gases are produced in parallel and continuously – a biogas containing hydrogen and a biogas containing methane.

The guiding principle in the process engineering development was the greatest possible practical relevance. A biologically stable process control could be established by optimizing application-related operating parameters such as reactor temperature, hydraulic retention time, volumetric loading and ratio of the fermenter volumes. The process was tested on various substrates in the biogas technical center of the DBI. As part of the project, the process was scaled up from laboratory to pilot scale. Finally, in a 200-day long-term test, hydrogen-containing biogas was produced continuously.

key messages (engl.)

- Biogenic hydrogen expands the range of applications of the biogas process.
- Biogenic hydrogen is coupled to conventional biogas.
- Biogenic hydrogen should be used as a material

Methodik Maßnahmen

- Vorbetrachtungen anhand Fachliteratur und theoretischen Zusammenhängen
- Umfangreiches laborpraktisches Versuchsprogramm, d.h. systematische Parameteroptimierung mit dem Ziel biogener Wasserstoffproduktion und Prozessstabilität
- Upscaling des Verfahrens inklusiver Anpassung der Betriebsparameter
- Umfangreiche Nutzung div. analytischer Methoden (Flüssig- und Gasphase), um mittels vertieftem Prozessverständnis zielgerichtete bioverfahrenstechnische Optimierung zu betreiben

Ergebnisse auf einen Blick

BEITRÄGE UND PUBLIKATIONEN

- Projektvorstellung 7. DBFZ-Statuskonferenz, Leipzig 2017
- Posterpräsentation RegaTec, Toulouse 2018
- Fachartikel: Manig et al., Konversion von Biomasse zu Wasserstoff und Methan mittels eines zweistufigen Biogasprozesses, Biogasjournal 03_19, ISSN 1619-8913, 2019.
- Fachvortrag 8. DBFZ-Statuskonferenz, Leipzig 2019
- Beitrag im Tagungsband der 8. DBFZ-Statuskonferenz, Leipzig September 2019
- *Endbericht Projekt BioHy >>*

Darstellung der Ergebnisse

Die Ergebnisse des Vorhabens »BioHy« zielen auf die energetische und wirtschaftliche Optimierung der Biogaserzeugung durch die getrennte Biowasserstoff- und Methanproduktion ab. Hervorzuheben ist die Etablierung eines robusten Prozessregimes zur Produktion von biogenem »grünem« Wasserstoff. Mittels der verbesserten verbrennungstechnischen Eigenschaften des H₂-CH₄-Gemisches konnte eine signifikante Reduzierung der THG-Emission am BHKW erreicht werden. Durch die Kooperation von Know-How-Träger (DBI) und Anlagenbauer (EnviTec) wurde ein hoher Praxisbezug der Arbeit gesichert und das Innovationspotenzial der Partner gestärkt. Die im Ergebnis des Vorhabens entstandene Pilotanlage in Kombination mit dem robusten Prozessregime ermöglicht prinzipiell ein hohes Übertragungspotential der Projektergebnisse in die industrielle Praxis.

Durch diese Anwendung der neuen Technologie »BioHy« können, unter Beachtung der Wirtschaftlichkeit, aus dem verfügbaren begrenzten Biomassepotenzial neue Verwertungspfade für den Biogassektor erschlossen werden.

Herausforderungen

Aus biologischer Sicht waren die Induzierung der biogenen Wasserstoffbildung und die Etablierung eines stabilen Prozessregimes die Hauptherausforderungen.

Die ursprünglich avisierte Verwendung des H₂-CH₄-Gemisches im BHKW zur Reduzierung der THG-Emission durch die verbesserten verbrennungstechnischen Eigenschaften dieses Gasgemisches konnte gezeigt werden. Eine effizientere Stromerzeugung (Steigerung des effektiven Wirkungsgrades des Motors) konnte aufgrund der Einhaltung der NO_x-Emissionen nicht belegt werden. Zudem zeigte sich, dass aus wirtschaftlicher Sicht eine reine energetische Nutzung des Biowasserstoffs nicht zielführend ist.

Ausblick

Im Rahmen der techno-ökonomischen Bewertung des Verfahrens wurde erkannt, dass die Kosten für die Erzeugung des Biowasserstoffs im Vergleich zum Nutzen der Reduzierung der BHKW-Emissionen zu hoch sind. Somit kann auf Basis der Projektergebnisse entweder an der Verbesserung der Wasserstoffausbeuten gearbeitet werden, wodurch ein direkter positiver Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit zu erwarten ist oder es ist auf andere Verwertungspfade für die Nutzung des Biowasserstoffs zu zielen. Hier bieten sich aufgrund der Zusammensetzung des Biowasserstoffs, H₂ und CO₂, die stoffliche Nutzung an (Synthesereaktionen).

Auf Basis des erworbenen bioverfahrenstechnischen Wissens erhöhen sich die Erfolgsaussichten zur erfolgreichen Platzierung von nationalen und internationalen F&E-Projekten im Themenbereich „Biogener Wasserstoff“.

BioReSt

Marion Schomaker,
Sören Kamphus, Elmar Brüggling

Regionale Vorbehandlungskonzepte zur nachhaltigen Reststoffnutzung in Biogasanlagen

Zusammenfassung

Im Rahmen des Projektes »BioReSt – Regionale Vorbehandlungskonzepte zur nachhaltigen Reststoffnutzung in Biogasanlagen« wurden unterschiedliche Reststoffe mit einer Kombination aus drei verschiedenen Verfahren behandelt und der Effekt auf die Vergärung bzw. den Methanertrag untersucht. In Phase I fand eine systematische Untersuchung im Labormaßstab mit Batch-Versuchen statt. Im Anschluss an diese Versuche wurden die erfolgreichen Methoden in den kontinuierlichen Maßstab überführt. Dazu wurden in Phase II auf Basis der Batch-Ergebnisse aus dem Labormaßstab insgesamt drei Substrate mit je einer Vorbehandlungskombination ausgewählt und als ersten Schritt in Rühr-kesselreaktoren vergoren. Phase III war die Übertragung der Versuche in die Praxis.

Themen-schwerpunkte

- Vermehrter Einsatz von Reststoffen als Substrat für die Biogasproduktion und Erweiterung des Substratmixes
- Geeignete Vorbehandlungsmethoden für regionale Reststoffpotentiale, die die Effektivität der Vergärung steigern und zugleich ökonomisch und ökologisch sinnvoll sind
- BGA zukunftsfähig betreiben und die Wirtschaftlichkeit der BGA steigern

Ziele

- Entwicklung von effizienten Nutzungskonzepten von Reststoffen zur Biogasproduktion
- Bewertung verschiedener Vorbehandlungsmethoden für Reststoffe aus der Landwirtschaft zur Ertragssteigerung
- Erweiterung des Substrateinsatzspektrums für Biogasanlagen (BGA) und die Steigerung der Ressourceneffizienz durch Verbesserung der Aufbereitungstechnologien
- Weiterentwicklung der Aufbereitungstechnologien und -verfahren sowie die Neu- und Weiterentwicklung von tragfähigen Geschäftsmodellen

Elmar Brüggling: »Die Nutzung von Reststoffen als Substrat zur Biogaserzeugung ist ein wichtiger Bestandteil in Zukunftskonzepten für Biogasanlagen. Sie effizient zur Vergärung in Bestandsanlagen einzusetzen ist insbesondere vor dem Hintergrund der RED II von ökonomischer und ökologischer Bedeutung. Mit der Untersuchung von verschiedenen Vorbehandlungskombinationen möchten wir mit dem Projekt BioReSt dazu einen wichtigen Beitrag leisten.«



Dr.-Ing. Elmar Brüggling
(© FH Münster)



FKZ-Nr.: 03EI5406
Laufzeit: 01.01.2020 — 31.03.2023
Zuwendungssumme: 497.866,84 €

KOORDINATION:
FH Münster
Dr.-Ing. Elmar Brüggling
Stegerwaldstr. 39, 48565 Steinfurt
www.fh-muenster.de

KONTAKT
Direkte Ansprechperson
Dr.-Ing. Elmar Brüggling
+49 (0)25519-62420
bruegging@fh-muenster.de

PARTNER:
AGRAVIS Raiffeisen AG
Industrieweg 110, 48155 Münster
www.agravis.de

Kernbotschaften

- Es konnte gezeigt werden, dass eine Zerkleinerung des untersuchten Getreidestrohs und strohhaltigen Pferdemist ohne zusätzliche Behandlung mit Ammoniak oder Enzymen ausreichend ist.
- Die beste untersuchte Methode für die Substrate Rapsstroh, Gras und Rindermist im kontinuierlichen Maßstab zu vergären war die Substrat zu zerkleinern und mit Gülle zu mischen. Bei dem Substrat Rapsstroh wurde ein Methanmehrertrag von + 10 % durch Mischen und einen Tag wirken lassen erzielt. Die Substrate Rindermist und Gras war das Mischen mit Gülle und hinzufügen mit Enzymen erfolgreich.
- Das Aufkommen von Reststoffen ist im Jahresverlauf unterschiedlich und steht in Abhängigkeit zum Anbau von Hauptprodukten. Die Vorbehandlung sollte auf diese Veränderungen reagieren.
- Viele Biogasanlagenbetreiber haben Interesse am Einsatz von Reststoffen. Insbesondere genehmigungsrechtliche Gründe werden von Betreibern als Hemmnis für den Einsatz von Reststoffen angeführt. Diese gilt es anzupassen und zu vereinfachen.

summary (engl.)

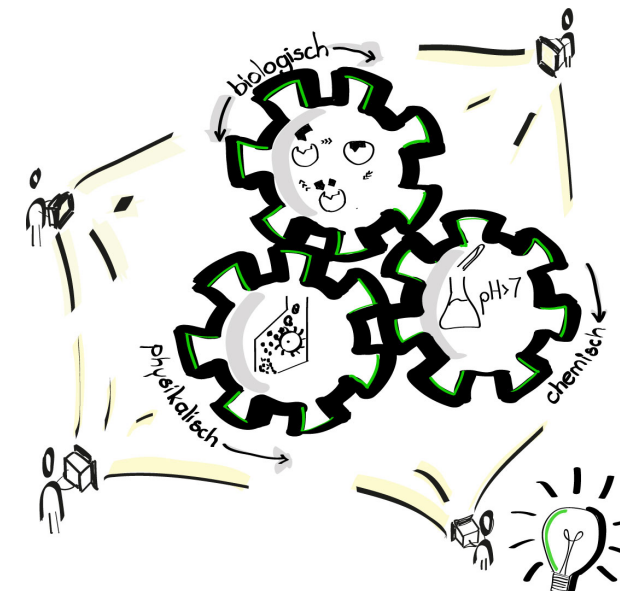
As part of the project »BioReSt - Regional Pretreatment Concepts for Sustainable Utilization of Residues in Biogas Plants«, different residues were treated with a combination of three different processes and the effect on fermentation and methane yield was investigated. In phase 1 a systematic laboratory scale investigation was carried out with batch tests. The successful method combinations were selected and optimized. For this purpose, in Phase II, a total of three substrates, each with a pretreatment combination were transferred to the continuous scale to conduct practical trials. For this purpose, a total of three substrates, each with a pretreatment combination, were selected on the basis of the batch results and fermented in stirred tank reactors. Phase III was the transfer of the trials into practice with the research facility at Münster University of Applied Sciences and with interested plant operators.

key messages (engl.)

- It was shown that comminution of the investigated cereal straw and strawcontaining horse manure can reach satisfying methane yields without additional treatment with ammonia or enzymes.
- The best investigated method for the substrates rapeseed straw, grass and cattle manure to be fermented on a continuous scale was to shred the substrates and mix them with manure. For the substrate rapeseed straw, a methane yield increase of +10 % was obtained by mixing and leaving it for one day. The substrates cattle manure and grass was successful pretreated by mixing it with separated manure and adding enzymes.
- The occurrence of residues varies during the year and depends on the cultivation of main products. Pretreatment should respond to these changes.
- Many biogas plant operators are interested in the use of residues. In particular, operators cite permit-related reasons as an obstacle to the use of residues. These need to be adapted and simplified.

Methodik Maßnahmen

- Systematische Untersuchung des Effektes der verschiedenen Vorbehandlungsmethoden auf die ausgewählten Reststoffe Pferde- und Rindermist, Kartoffelkraut, Gras, Getreide- und Rapsstroh
- Es wurden drei auf unterschiedliche Weise wirkende Methoden angewendet und deren Effekt auf die Steigerung des Gasertrages untersucht:
 - Mechanische Zerkleinerung mit einem Prallreaktor
 - Chemischer Aufschluss mit Ammoniak
 - Biologische Behandlung mit Enzymen
- Methodenentwicklung und der Transfer erfolgen in drei Schritten:
 1. Laborversuche (2020, 2021)
 2. Kontinuierlicher, halbtechnischer Maßstab (2021, 2022)
 3. Versuche an Praxisanlagen (2022,2023)



Ergebnisse auf einen Blick

PUBLIKATIONEN:

- Artikel:
 - Vom kleinen Versuch bis in die Praxis. AGRAVIS aktuell. (02.2020) Seite 11. (digital)
 - BENSAMNN M (2022): Lignocellulose aufspalten. IN: Biogasjournal. 03_2022, Seite 14 -20
- Poster:
 - SCHOMAKER M, WEIDE T, BRÜGGING E (2020): Vorbehandlung von Reststoffen für den Einsatz in Biogasanlagen. Fachkonferenz Forschungsnetzwerk Bioenergie und Energiewendebauen. (digital)
 - SCHOMAKER M, WEIDE T, BRÜGGING E (2021): BioReSt – Regionale Vorbehandlungskonzepte zur nachhaltigen Reststoffnutzung in Biogasanlagen. Poster. BIO-raffiniert – Bioökonomie: Baustein der zirkulären Wirtschaft – Chancen für Produkte und Prozesse. (digital)

□ SCHOMAKER M, WEIDE T, BRÜGGING E (2021): Reststoffverwertung zur Erzeugung von Biogas. Poster. Biogas in der Landwirtschaft – Stand und Perspektiven. 7. Kongress. (digital)

□ SCHOMAKER M, BRÜGGING E, WETTER C (2022): BioReSt – Regionale Vorbehandlungskonzepte zur nachhaltigen Reststoffnutzung in Biogasanlagen. Poster. Institutsverbund. Münster

■ **Vorträge:**

□ SCHOMAKER M (2021): Reststoffverwertung zur Biogaserzeugung. Kurzvortrag. 10. Statuskonferenz „Bioenergie – eine Partnerin für alle Fälle“. (digital)

□ SCHOMAKER M (2022): Regionale Vorbehandlungskonzepte zur nachhaltigen Reststoffnutzung in Biogasanlagen. Vortrag. 10.energiefrühstück. Steinfurt (digital)

□ BRÜGGING E (2022): BioReSt – Regionale Vorbehandlungskonzepte zur nachhaltigen Reststoffnutzung in Biogasanlagen. Vortrag. 6. Bayerische Biogasfachtagung. Dingolfing (digital)

□ SCHOMAKER M (2022): BioReSt – Regionale Vorbehandlungskonzepte zur nachhaltigen Reststoffnutzung in Biogasanlagen. Vortrag. Zukunft Biogas. Steinfurt (digital)

■ **Zeitungsartikel/Presse**

□ FH Münster (2020. 21. Februar): Mehr Biogas: BioReSt entwickelt regionale Vorbehandlungskonzepte für landwirtschaftliche Nebenprodukte. (Pressemitteilung) <https://www.fh-muenster.de/hochschule/aktuelles/news/index.php?newsId=1649>

□ gwf-Gas + Energie (2020. 24. Februar): Projekt BioReSt: aus Stroh und Gras mehr Biogas. (Pressemitteilung). <https://www.gwf-gas.de/aktuell/maerkte-und-unternehmen/24-02-2020-projekt-biorest-aus-stroh-und-gras-mehr-bio-gas/?type=98&cHash=b0e605%E2%80%A6>

□ Schweizerische Vereinigung für Sonnenenergie (2020. 25. Februar): Biogas aus Reststoffen aus der Landwirtschaft. (Pressemitteilung). <https://www.sses.ch/de/biogas-aus-reststoffen-aus-der-landwirtschaft/>

□ Neumann H. (2020, 24. Februar): Mehr Biogas aus Stroh und Gras. (Pressemeldung). <https://www.topagrar.com/energie/news/mehr-biogas-aus-stroh-und-gras-11984430.html>

Darstellung der Ergebnisse

VORBEHANDLUNG DER RESTSTOFFE – SCREENING UND OPTIMIERUNG IM BATCH-MAßSTAB

- Bei den Substraten Pferdemist und Gerstenstroh wurden mit dem zerkleinerten Material Methanerträge von 283 LN/kgOTR (strohhaltiger Pferdemist) und 278 LN/kgOTR (Gerstenstroh) erreicht. Die Ansätze, die mit Ammoniak und Enzymen behandelt wurden, erbrachten keine nennenswerten Methanmehrerträge.
- Die zusätzlich basische und enzymatische Behandlung erzielten bei dem zerkleinerten Rapsstroh, Kartoffelkraut, Rindermist und Gras eine Steigerung des Methanertrages von 8 – 26 %



- Nach der Methodenoptimierung im Labormaßstab erfolgen Untersuchungen im kontinuierlichen Maßstab mit substratspezifischen Vorbehandlungskombinationen:

Rindermist: Mischung mit Gülle, Vorbehandlung, Enzyme

Rapsstroh: Mischung mit Gülle, Vorbehandlung mit Ammoniak

Gras: Mischung mit Gülle, Vorbehandlung mit Ammoniak und Enzymen

Abbildung 1:

1 l-Batchtest zur Bestimmung von Biogaspotentialen nach VDI 4630
(© FH Münster)

METHODENTRANSFER IN DEN KONTINUIERLICHEN MASSSTAB MIT 15 LITER-RÜHRKESSELREAKTOREN

Überprüfen der Best Cases aus dem Praxismaßstab:

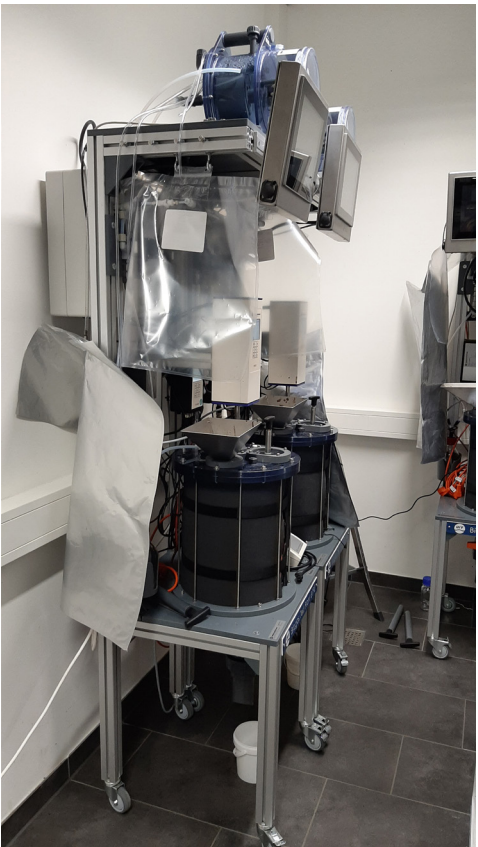
- Für alle Substrate hat eine Vorbehandlung zu einer Steigerung des Methanertrages geführt
- Nicht alle Methodenkombinationen der Batch-Tests erbrachten denselben Methanmehrertrag
- Die Ammoniak-Zugabe führte zu keiner zusätzlichen Steigerung des Methanmehrertrages

Erfolgreiche Vorbehandlungsvarianten:

- **Rapsstroh**
 - Methode: Zerkleinern + mischen mit Gülle
 - Effekt: 10 % Methanmehrertrag durch Vorbehandlung
- **Rindermist:**
 - Methode: Zerkleinern + mischen mit Gülle + Zugabe von Enzymen
 - Effekt: 11 % Methanmehrertrag durch Vorbehandlung
- **Gras:**
 - Methode: Zerkleinern + mischen mit Gülle + Zugabe von Enzymen
 - Effekt: 11 % Methanmehrertrag durch Vorbehandlung

Abbildung 2:

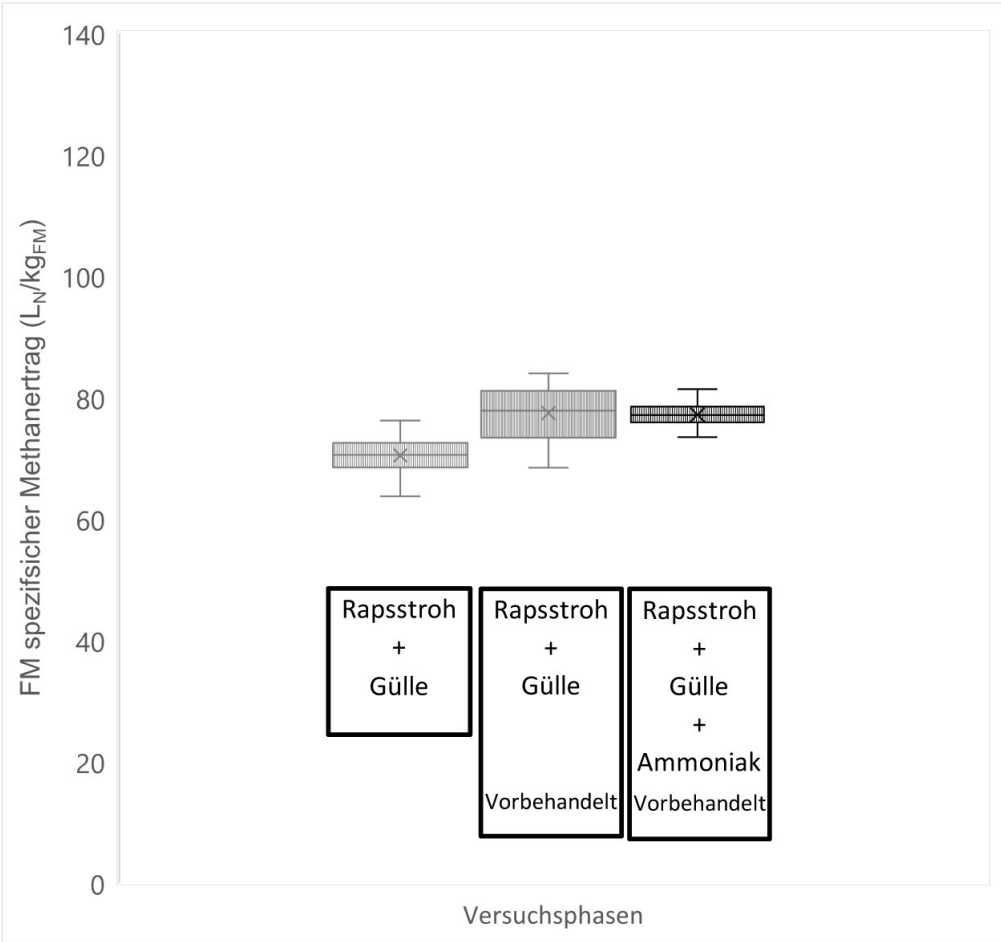
Rührkesselreaktoren mit kontinuierlicher Gaserfassung
(© FH Münster)



In Abbildung 3 sind beispielhaft für die kontinuierlichen Versuche die Methanerträge des Substrates Rapsstroh, Ernte Sommer 2020, dargestellt. Für die Versuche wurde zerkleinertes Rapsstroh mit separierter Rindergülle vermischt. Auf Basis der Batch-Versuche wurde das Mischungsverhältnis so gewählt, dass der Mischansatz einen Trockenrückstand von 40 Gew.-% aufwies. Dies entspricht im Fall der verwendeten Substrate etwa einem 1:1 Verhältnis bezogen auf die Frischmasse. Das Rapsstroh-Gülle-Gemisch wurde täglich in den Fermenter gegeben und in der ersten Phase direkt nach dem Ansatz in den Fermenter eingebracht. Für die zweite Versuchsphase wurde das zerkleinerte Rapsstroh mit der Gülle vermengt und einen Tag bei 20 °C ruhen gelassen. Der nächste Schritt beinhaltete die Zugabe von Ammoniak in den Vorbehandlungsansatz (2 Milliliter Ammoniak (25%-ig) auf 100 Gramm Trockenrückstand).

Der Vergleich der Frischmasse spezifischen Methanerträge zeigt, dass die Methanerträge in der zweiten Versuchsphase mit 77,4 LN/kgFM am höchsten waren. Die Vorbehandlung bewirkt einen prozentualen Methanmehrertrag von 10 %. Die Zugabe von Ammoniak bewirkt keine weiteren Methanmehrerträge. Für die praxisnahen Versuche wird daher das Rapsstroh mit Gülle vermengt und vor der Vergärung durch ruhen lassen vorbehandelt.

Abbildung 3
Darstellung der FM-spezifischen Methanerträge der Versuchsreihe mit zerkleinertem Rapsstroh
(© FH Münster)



PRAXISBEISPIEL

Im Laufe des Projektes BioReSt zeigte sich, dass der Einsatz von Reststoffen in Biogasanlagen auf großes Interesse bei Biogasanlagenbetreiber stößt. Im Rahmen des Praxisbeispiel 1 wurde eine Biogasanlage begleitet, die teilweise Rapsstroh geerntet und dieses in der Anlage eingesetzt hat. Im Folgenden werden Daten des Praxistests dargestellt, die Anlage selbst wird anonymisiert.

LANDWIRTSCHAFTLICHE BIOGASANLAGE

Leistung:	250 kW _{el}
Substratmix:	Pferdemist, Rindermist, Maissilage, Gülle
Versuchsziel:	Ernte und Vergärung von Rapsstroh

ERNTE-VORGANG:

Mähen mit Schwadzusammenführung, anschließend mit Feldhäcksler und Pickup auf 5 mm aufbereiten

EINSATZ ALS SUBSTRAT:

Menge:	300 kg/Tag
Zeitraum:	4 Wochen (begrenzt durch Erntemenge)
Einbringung:	Mischen im Futtermischwagen mit Wirtschaftsdünger

Abbildung 4:
Im Sommer 2022 geerntetes Rapsstroh gelagert an der Biogasanlage
(© FH Münster)



Herausforderungen



Ausblick

ERKENNTNISSE:

- Nach der Ernte wurde das Rapsstroh als Schüttung gelagert. Dabei konnte keine Temperaturerhöhung festgestellt werden.
- Der Anlagenbetrieb sowie der Biogasprozess lief weiter, wie vor der zusätzlichen Zugabe von Rapsstroh als Substrat
- Die Zusammensetzung des Fermenterinhaltel blieb unverändert.
- Reststoffen sind Nebenprodukte landwirtschaftlicher Produkte. Die Quantität unterliegt Jahresschwankungen in Abhängigkeit vom Hauptprodukt
- Die Qualität der Reststoff schwankt, der absolute Vergleich von Ergebnissen über den gesamten Projektzeitraum ist daher schwierig. Aus diesem Grund wurden im Rahmen des Projektes ausschließlich die Ergebnisse innerhalb einer Versuchsreihe miteinander verglichen.
- Umsetzung in die Praxis – Genehmigungsrechtliche Hemmnisse müssen abgebaut werden.

- Einsatz des Substrates Rapsstroh in Praxisversuchen in einer zweistraßigen 1 m³ - Versuchsbiogasanlage
- Einsatz von vorbehandeltem Rindermist in einer Praxisanlage
- Darstellung der Marktrelevanz zum Thema Einsatz von Reststoffen in Biogasanlagen auf Basis einer Betreiberbefragung
- Erstellen von Vorbehandlungskonzepten zur Anwendung an Biogasanlagen unter Berücksichtigung von ökologischen und ökonomischen Aspekten
- Zusammenstellen der Treibhausgasbilanzen für die Substrate Rapsstroh, Rindermist und Gras (4. Schnitt)

Weitere Informationen



FlexPump

Anne Deutschmann, Gregor Ganzer,
Andreas Fastenau, Bernd Schmitz

Entwicklung und Demonstration eines pumpenbasierten Mischkonzeptes für den flexiblen, effizienzoptimierten und multifeedstockfähigen Betrieb von Biogasanlagen

Zusammenfassung

Durch gezielte Kopplung der Substratvorbehandlung und der Rückführung interner Prozesswasserströme mit einem intelligenten Pumpensystem wurde im Rahmen des Verbundvorhabens FlexPump ein Gesamtsystem zur hydraulischen Durchmischung von Biogasreaktoren entwickelt und unter Praxisbedingungen überprüft und optimiert. Mit der zusätzlichen Erarbeitung und Erprobung eines multifeedstockfähigen Anlagenkonzeptes und der Steuerung der hydrodynamischen Prozessabläufe wurde eine praxistaugliche und nachhaltig rentable Systemlösung zur flexiblen und bedarfsgerechten Biogaserzeugung geschaffen.

Durch die Einbindung einer externen hydraulischen Durchmischung mit kombinierter Substratvorbehandlung, Aufbereitung und Einbringung am Hauptfermenter konnte innerhalb des Projektes das Fließverhalten im Fermenter, ohne wesentliche Änderung des Trockenrückstandes (TR), deutlich verbessert werden. Dadurch war es möglich den Betrieb der Rührtechnik deutlich zu reduzieren, was sich wiederum sehr positiv auf den Wartungsaufwand der Rührtechnik auswirkt. Weiterhin konnte der Anteil an biogenen Reststoffen ohne Betriebsstörungen deutlich gesteigert werden. Insgesamt konnte mit der Inbetriebnahme des Mischkonzeptes und durch die anschließende Optimierung der CO₂-Fußabdruck der Biogasanlage um 30 % reduziert werden.

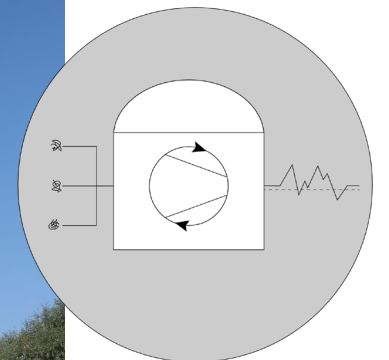
Themen schwerpunkte

- Auslegung und Optimierung des Mischkonzeptes mittels numerischer Strömungssimulation und Bewertung mittels Prozess-Tomographie
- Auswahl und Auslegung geeigneter Pumpensysteme für hochviskose und langfasrige Substrate
- Integration des Mischsystems im Bypass an Bestandsanlage
- Zerkleinerungs- und Aufbereitungstechnik für ein multifeedstockfähiges Anlagenkonzept
- Verfahrenstechnische und ökologische Bewertung des Gesamtsystems

Anne Deutschmann: »Der energetische und wartungsseitige Aufwand für den Betrieb von Rührtechnik in Biogasreaktoren ist immens. Gleichzeitig ist die Durchmischung aber ungenügend und es kommt zur Prozessstörungen. Dazu wollten wir eine praxistaugliche Alternative entwickeln.«



(© Anne Deutschmann)



FKZ-Nr.: 03KB152
Laufzeit: 01.01.2019 — 31.03.2022
Zuwendungssumme: 1.432.551€

KOORDINATION:
Fraunhofer Gesellschaft e. V.
Institut für Keramische Technologien
und Systeme
Anne Deutschmann, Gregor Ganzer
Winterbergstraße 28
01277 Dresden
www.ikts.fraunhofer.de

PROJEKTL EITUNG
Direkte Ansprechperson:
Anne Deutschmann
+49 (0)351 2553 7685
anne.deutschmann@ikts.fraunhofer.de

PARTNER:
Vogelsang GmbH & Co. KG
Andreas Fastenau
Holthoege 10 – 14
49632 Essen/Oldb.
www.vogelsang.info

A & U Service- und Vertriebs GmbH
Bernd Schmitz
Domplatz 48b
38820 Halberstadt
www.au-vertrieb.de

Ziele

Mit der gezielten Kopplung der Substratvorbehandlung und der Rückführung interner Prozesswasserströme mit einem Pump- und Mischsystem wurde im Rahmen des Verbundvorhabens ein Gesamtsystem zur externen hydraulischen Durchmischung von Biogasreaktoren entwickelt und unter Praxisbedingungen im Pilotmaßstab überprüft und optimiert. Mit der zusätzlichen Erarbeitung und Erprobung eines multifeedstockfähigen Anlagenkonzeptes steht eine praxistaugliche und nachhaltig rentable Systemlösung zur flexiblen und bedarfsgerechten Biogaserzeugung für einen breiten Anwenderkreis zur Verfügung.

Kernbotschaften

- **Erhöhung des Anteils an biogenen Reststoffen ohne Betriebsstörungen:** Gutes Einmischen der Substrate, kein Aufschwimmen bzw. Schichtbildung.
- **Besserer Aufschluss führt zu einer besseren Ausnutzung der Substrate,** das Biogas kann schneller freigesetzt werden.
- **Verringerter Wartungsaufwand der Rührtechnik und längere Standzeiten** durch reduzierten Betrieb der Rührtechnik.
- **Bessere Durchmischung des Fermenters** infolge der verbesserten Fließeigenschaften der Gärsubstrate.
- **Verringerung des CO₂-Fußabdrucks der Biogasanlage** um 30 %, hauptsächlich durch Erhöhung des Anteils an biogenen Reststoffen und den verringerten Energiebedarf zum Durchmischen der Anlage.

summary (engl.)

By specifically coupling substrate pretreatment and the recirculation of internal process fluids with an intelligent pump system, an overall system for the hydraulic mixing of biogas reactors was developed and optimized under practical conditions as part of the FlexPump joint project. With the additional development and testing of a multi-feedstock capable plant concept and the control of the hydrodynamic process flows, a practical and sustainably profitable system solution for flexible and demand-oriented biogas production was created.

By integrating an external hydraulic mixing system with combined substrate pretreatment, preparation and feeding at the main digester, it was possible within the project to significantly improve the flow behavior in the digester without significantly changing the dry matter (DM). This made it possible to significantly reduce the operation of the stirrers, which in turn had a very positive effect on the maintenance effort of the stirrer technology. Furthermore, it was possible to significantly increase the proportion of biogenic residual materials without any operational disturbances. Overall, the commissioning of the mixing concept and the subsequent optimization reduced the CO₂ footprint of the biogas plant by 30 %.

key messages (engl.)

- **Increase in the amount of biogenic residues without operational disturbances:** Good mixing of the substrates, no floating or floating layer formation.
- **Better desintegration** leads to better utilization of the substrates, the biogas can be released faster.

Methodik Maßnahmen

Darstellung der Ergebnisse

- **Reduced maintenance of the agitator technology and longer lifetime** due to reduced operation of the stirrers.
- **Better mixing of the digester** as a result of the improved flow properties of the digestate substrates.
- **Reduction of the CO₂ footprint of the biogas plant by 30%,** mainly due to an increase in the amount of biogenic residues and the reduced energy required to mix the plant.

- **Numerische Strömungssimulation und Prozess-Tomographie** zur Bewertung der Fluidodynamik im Fermenter für unterschiedliche Betriebspunkte
- **Analytik zur Bewertung der Substrate:**
 - Bestimmung Biogaspotential (Batch Gärtests)
 - Bestimmung Partikelgrößenverteilung (Faserlänge)
 - Messung rheologische Eigenschaften
 - Mikroskopische Bewertung (Oberflächeneigenschaften)
- **LCA-Analyse**

PUBLIKATION:

- [Endbericht Projekt FlexPump >>](#)
- Deutschmann A. et. al. (2023): Hydraulisches Mischkonzept für Biogasanlagen. Biogas Journal 1/2023, p110-113.
- Tagungsband Statuskonferenz DBFZ 2019 und 2021
- Zeitungsartikel/Presse
- Jahresbericht Fraunhofer IKTS 2020/21

KONZEPT/MACHBARKEITSSTUDIE:

- **Anlagenkonzept, Erweiterung von Bestandsanlagen und neu zu errichtender Biogasanlagen**

ANLAGE:

- **Demonstrationsanlage**
- **Nachrüstung Bestandsanlage**

WEITERE WICHTIGE ERGEBNISTYPEN BZW. KONKRETISIERUNG

- **Best-Practice Lösung**
- **Strategie**

Abbildung 1
Darstellung des Mischkonzeptes
(© Fraunhofer Institut)

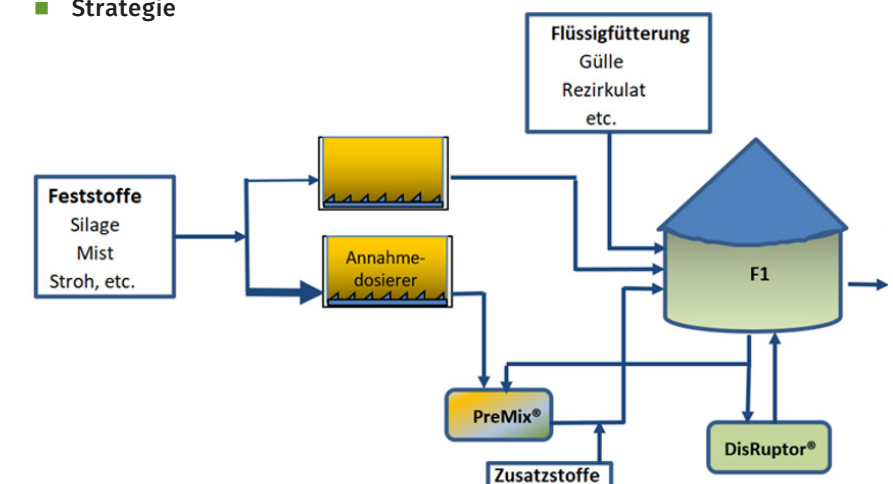
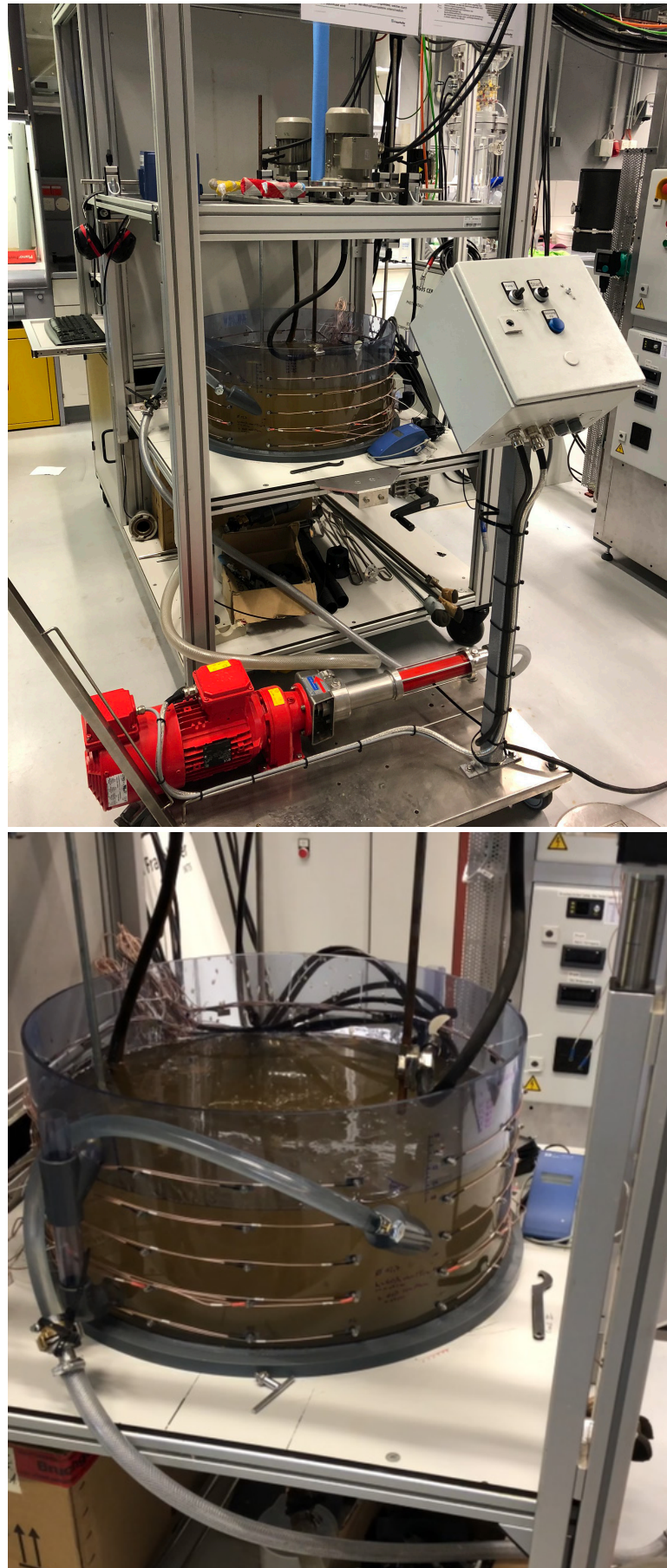


Abbildung 2

Versuchsstand zur prozess-
topographischen Bewertung der
Durchmischung in Fermenter 1 im
Labormaßstab
(© Fraunhofer Institut)



Ergebnisse auf einen Blick

ERGEBNIS A

Mit der Installation des Mischkonzeptes und der dazugehörigen Aufbereitungs- und Zerkleinerungstechnik konnte die erforderliche Rührenergie um über 60 % reduziert werden.

Perspektivisch reduziert sich dadurch auch der Verschleiß der Rührtechnik und die damit verbundenen Wartungsaufwendungen.

ERGEBNIS B

Erhöhung des Anteils an biogenen Reststoffen als Inputsubstrate. Mit der Inbetriebnahme des Mischkonzeptes konnte der Substratmix der Biogasanlage von 85 % Silagen, davon allein 60 % aus Maissilage und 15 % Mist im Jahr 2019 angepasst werden. Die Silagen, insbesondere Maissilage konnte zu einem Großteil durch Hähnchen-, Puten- und vor allem Rindermist von regionalen Betrieben ersetzt werden. Der Mistanteil wurde von 15 auf 70 % gesteigert.

ERGEBNIS C

Vergrößerung der Einsatzstoffdichte mit Erhöhen der Raumbelastung von weniger als 2,5 kg oTS/m³ Fermenterraum auf nahezu 4 kg oTS/m³ bei verbesserten spezifischen Gaserträgen der Einsatzstoffe.

Herausforderungen

Die Gärsubstrate in Biogasanlagen stellen aufgrund der Fließeigenschaften (hochviskos, hochkonzentriert und nicht-newtonsch) und der Partikelgrößenverteilung besondere Herausforderungen für Pump- und Mischsysteme dar. Entscheidend für die Pumpfähigkeit, besonders bei hohen Feststoffgehalten (TR 13-14 %) ist eine ausreichende Substratvorbehandlung sowie Gärsubstrataufbereitung, um das Fließverhalten günstig zu beeinflussen. Neben den praktischen Herausforderungen ist auch die numerische Strömungssimulation für solche Stoffsysteme aufgrund der hohen Partikelkonzentration nur bedingt geeignet.

Ausblick

Das entwickelte Mischkonzept und die dazugehörige Substratvorbehandlung, Einbringung und Aufbereitung lässt sich sowohl an Bestandsanlagen als auch für neu zu errichtende Biogasanlagen anwenden.

FLEXSIGNAL

Martin Dotzauer

Konzepte für eine bedarfsorientierte, kosteneffiziente und klimaschonende Stromerzeugung aus Bioenergieanlagen

Zusammenfassung

Die Ziele des Vorhabens FLEXSIGNAL lagen in der Entwicklung und Prüfung von Konzepten, die eine flexible Betriebsweise von Bioenergieanlagen anreizen, um das bereits vorhandene Flexibilitätspotenzial dieser Anlagen besser auszunutzen. Hierzu wurden zwei Bonus-Konzepte formuliert, welche durch eine gezielte Erhöhung bzw. Verringerung der Spotmarktpreise für Strom einen Anreiz zur bedarfsorientierten Stromproduktion bieten. Auf Einzelanlagen-Ebene sowie auf der Ebene des deutschen und europäischen Strom- und Wärmesystems wurden die Auswirkungen der flexiblen Anlagenfahrweise auf mögliche Zusatzerlöse, die Systemkosten und die Treibhausgasemissionen analysiert.

Themen schwerpunkte

- flexible Stromerzeugung
- Biogasanlagen
- Regulierungsrahmen

Ziele

Zum Zeitpunkt der Projektakquise sowie noch während der Projektbearbeitung wurden Anlagenbetreiber zwar über die Flexibilitätsprämie im EEG zum Kapazitätsausbau von Bestandsanlagen angereizt, es fehlten bis dahin auch ausreichend hohe Strompreissignale, um auch einen konsequent flexiblen Betrieb zu realisieren. Flexible Bioenergieanlagen sollen zukünftig eine wichtige Rolle zum Ausgleich schwankender Residuallasten spielen. Dazu wurde im Projekt FLEXSIGNAL untersucht, ob übergangsweise zusätzliche Instrumente zur Verstärkung der Preissignale, über ein Bonus-Malus-System die Anlagen, schon heute stärker zu einer flexiblen Fahrweise animieren. Auf Grund der Energiekrise und den damit stark gestiegenen Preisschwankungen hat sich der Bedarf in den Jahren 2021 und besonders 2022 für solche Instrumente bis auf weiteres aber erübrigt.

Martin Dotzauer: »Die Flexibilisierung von Biogasanlagen wurde seit 2012 zwar durch die Flexibilitätsprämie angereizt, bis 2020 fehlten aber ausreichend starke Strompreissignale. Das Projekt sollte prüfen, ob über ein Bonus-Malus-System die Anlagenbetreiber mit einem Strompreisverstärker früher dazu motivieren kann die Stromerzeugung stärker an den Strompreisspitzen und damit auch auf Hochlastzeiten auszurichten.«



Abbildung 1:

Biogasanlage (© Biogasanlage Freepik/KimSunHo)

FKZ-Nr.: **03KB150B** KOORDINATION:
Laufzeit: **01.01.2019 – 31.03.2021** **Helmholtz-Zentrum für Umwelt-**
Zuwendungssumme: **378.246,29€** **forschung GmbH – UFZ**
Permoserstr. 15, 04318 Leipzig
www.ufz.de

PROJEKTLEITUNG:
Michael Steubing (ehem. UFZ)

Direkte Ansprechperson:
Martin Dotzauer
+49 (0)30 2434 385
martin.dotzauer@dbfz.de

PARTNER:
DBFZ Deutsches Biomassefor-
schungszentrum gemeinnützige
GmbH
Martin Dotzauer
Torgauer Straße 116, 04347 Leipzig
www.dbfz.de

Universität Duisburg-Essen
Lehrstuhl für Energiewirtschaft
Berliner Platz 6-8, 45127 Essen
www.uni-due.de

Kernbotschaften

- Über ein Bonus-Malus-System das die Strompreissignale verstärk, wären die Anreize für einen Fahrplanbetrieb von Biogasanlagen erhöht worden
- Ein verstärkter Fahrplanbetrieb zeigte in einem Stromsystemmodell eine verbesserten Glättung der Residuallastschwankungen
- Ein verstärkter Fahrplanbetrieb würde als Nebeneffekt auch die Gesamtemissionen im Deutschen Kraftwerkspark durch eine Verdrängung emissionsintensiver Erzeugungsarten nach sich ziehen

summary (engl.)

The objectives of the FLEXSIGNAL project were to develop and test concepts that encourage flexible operation of bioenergy plants in order to better utilise the already existing flexibility potential of these plants. For this purpose, a bonus / malus concepts were formulated, which offer an incentive for demand-oriented electricity production through an additional increase or reduction of spot market prices for electricity. The effects of flexible plant operation on possible additional revenues, system costs and greenhouse gas emissions were analysed at the level of individual plants and at the level of the German and European electricity and heat systems.

key messages (engl.)

- A bonus-malus system that reinforces the electricity price signals would have increased the incentives for the scheduled operation of biogas plants.
- Increased scheduled operation showed improved smoothing of residual load fluctuations in an electricity system model.
- Increased scheduled operation would also have the side effect of reducing overall emissions in the German power plant fleet by displacing emission-sensitive types of generation.

Methodik Maßnahmen

- Das UFZ hat im Projekt vor allem qualitative Methoden zur konzeptionellen Entwicklung des Bonus-Malus-System genutzt
- Das DBFZ hat im Rahmen des Projekten einen empirischen Untersuchungsansatz zur Bewertung der systemischen Änderungen der THG-Emissionen durch einen flexiblen Betrieb von Biogasanlagen entwickelt und angewendet
- Die Uni Duesburg-Essen hat Bioenergieanlagen und die kurzfristige Kraftwerkseinsatzplanung im Joint Market Model (JMM) modelliert

Darstellung der Ergebnisse

PUBLIKATION:

- Martin Dotzauer, Katja Oehmichen, Daniela Thrän, Christoph Weber, (2022): Empirical greenhouse gas assessment for flexible bioenergy in interaction with the German power sector, doi: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.09.094>

- [Endbericht Projekt FLEXSIGNAL >>](#)

KONZEPTE:

- Day-Ahead-Bonus
- Intraday-Bonus

Ergebnisse auf einen Blick

DATEN & METHODEN:

- Joint Market Model (JMM) (außerhalb des Projektkontextes entwickelt) <https://www.ewl.wiwi.uni-due.de/en/team/chair-management/>
- GermanPowerMarket.database.toolbox (außerhalb des Projektkontextes entwickelt) https://gitlab.com/M.Dotzauer/gpm_dbtb

Das Gesamtvorhaben wurde in drei Teilvorhaben von den Partnern Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung – UFZ, DBFZ Deutsches Biomasseforschungszentrum gGmbH und Universität Duisburg Essen (Lehrstuhl für Energiewirtschaft) in fünf inhaltlichen und einem organisatorischen Arbeitspaket bearbeitet.

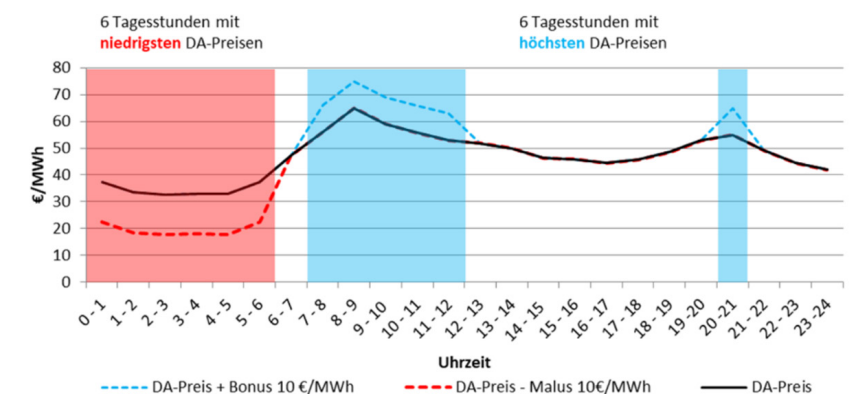
ERGEBNISSE AP 1:

In AP 1 wurde zunächst Fachliteratur recherchiert, welche sich mit einer flexiblen Fahrweise von Bioenergieanlagen befasst. Des Weiteren wurden Experteninterviews mit Vertretern von Direktvermarktern und Fachverbänden geführt. Im Ergebnis wurde der Day-Ahead-Markt als ausschlaggebend für die Anlagenfahrweise identifiziert.

ERGEBNISS AP 2

Die Aufgabe in AP 2 bestand in der Entwicklung und Ausformulierung der eingangs skizzierten Anreizkonzepte für die bedarfsorientierte Stromproduktion durch Bioenergieanlagen. Hierzu wurden die zwei Konzepte »Day-Ahead-Bonus« und »Intraday-Bonus« konzipiert. Die Konzepte basieren auf einem preis- und zeitsensitiven Bonus-/Malus-System, welches für den Day-Ahead- und den Intraday-Markt leicht unterschiedlich konzipiert wurde. Die Anreizwirkung zur bedarfsorientierten Stromproduktion entsteht durch die Zahlung eines Bonus (10 bzw. 15 € MWh) während der sechs Stunden mit den höchsten Preisen pro Tag und eines Malus in derselben Höhe während der sechs Stunden mit den tiefsten Preisen. Vereinfachte Rechnungen zum Erlöspotenzial an den Spotmärkten zeigen deutliche Zusatzerlöse die aus der flexiblen Anlagenfahrweise und der Anwendung der Konzepte entstehen. Weiterhin induziert die flexible Fahrweise eine höhere Bedarfsorientierung, da vermehrt in Stunden mit hoher Residuallast produziert wird.

Abbildung 2:
Schematische Darstellung der Funktionsweise
des Konzepts »Day-Ahead-Bonus«. Datengrundlage:
EPEX Spot SE; Day-Ahead-Preise, 16.04.2018
(© Katharina Schering)



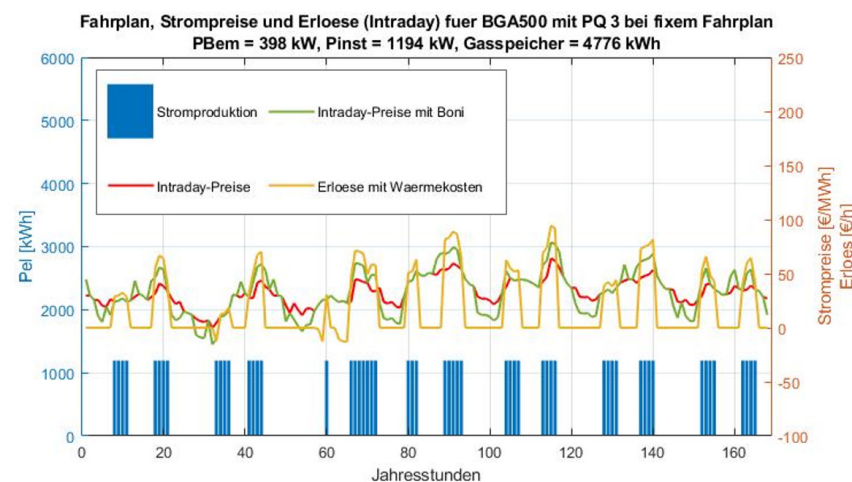
ERGEBNIS AP3

Die Zielstellung in AP3 war die Modellierung der sich einstellenden Fahrweise einzelner Bioenergieanlagen in Abhängigkeit der in AP2 entwickelten Konzepte sowie deren ökonomische, technologische und ökologische Bewertung. Hierfür wurde u.a. das Model FlexBED entwickelt, welches einen erlösoptimierten Anlagenfahrplan für die Technologiegruppen Biogasanlage, Biomethan-KWK-Anlage, Holzvergaser und Pflanzenöl-KWK-Anlage unter Berücksichtigung technischer Restriktionen ermittelt. Die Modellierung der Fahrpläne und der daraus resultierenden Erlöse wurde für das Jahr 2016 mit realen Marktdaten und für das Jahr 2025 mit Prognosedaten durchgeführt. Dabei zeigte sich, dass durch die flexible Anlagenfahrweise für

alle betrachteten Technologiegruppen Zusatzerlöse an den Spotmärkten zu Erlösen sind. Im Jahr 2016 bewegten sich diese zwischen 8,4 - 18,1 €/MWh am Day-Ahead-Markt und 7,8 - 16,9 €/MWh am Intraday-Markt. In dem im JMM modellierten Preiszeitreihen lagen für das Jahr 2025 diese Werte zwischen 13,4 - 26 €/MWh, bzw. 20,3 - 36,2 €/MWh. Die Bewertung der THG-Emissionen erfolgte über den neuartigen Ansatz der preisabhängigen Emissionsintensitäten. Hierbei wird anhand des Merit-Order-Modells geprüft, welche fossile Erzeugungsart durch den flexiblen Einsatz von Bioenergieanlagen verdrängt wird. Für eine Beispielbiogasanlage erreichen die geschätzten Treibhausgaseinsparungen zwischen 70 t CO₂äq und 125 t CO₂äq pro Jahr.

Abbildung 2:

Fahrplan, Strompreise und Erlöse für eine Beispiel-Biogasanlage mit 398 kW Bemessungsleistung, einem Leistungsquotienten (PQ) von 3 und der daraus resultierenden installierten Leistung von 1.194 kW
(© Katharina Schering)

**ERGEBNIS AP4**

Im AP 4 wurde die modellseitige Abbildung von Bioenergieanlagen im kurzfristigen Elektrizitätssystemmodell des Lehrstuhls für Energiewirtschaft der Universität Duisburg-Essen abgebildet. Der Vergleich der inflexiblen und der flexiblen Fahrweise der Biogasanlagen zeigte nur sehr geringe Effekte auf den Day-Ahead-Preis im Strommarktmodell, wobei in den Hochpreisstunden die flexible Fahrweise zur Reduktion der Preisspitzen führte. Die Emissionen im Gesamtsystem können durch die flexible Fahrweise der Biogasanlagen gesenkt werden.

Der Gesamteffekt in allen drei betrachteten CO₂-Preis-Szenarien liegt zwischen 0,2 Mio. t CO₂ und 0,3 Mio. t CO₂ pro Jahr.

ERGEBNIS AP5

In AP 5 wurden die Kernaussagen des Projektes gebündelt und bewertet, um daraus anschließend Handlungsempfehlungen für die relevanten Zielgruppen abzuleiten.

■ Kernaussagen:

- Die Anlagenflexibilisierung und eine preisgeführte Fahrweise führen auch unter Berücksichtigung verschiedener Restriktionen zu Mehrerlösen an den Spotmärkten.
- Das Mehrerlöspotential gegenüber der Bandeinspeisung steigt mit dem Überbaugrad und dem daraus resultierenden Flexibilitätspotential der Anlage.

- Die in FLEXSIGNAL entwickelten Konzepte erhöhen den Anreiz, in den systemdienlichen Stunden zu produzieren.
- Restriktionen wie Speichergröße und Wärmelieferverpflichtung erschweren die erlösoptimale Produktion und verlagern diese gegebenenfalls in weniger erlösreiche Stunden.

■ Handlungsempfehlungen:

- Die Konzepte bieten eine gute Möglichkeit zur Mobilisierung der Flexibilitätspotentiale von Bestandsbiogasanlagen, die die Flexibilitätprämie beziehen, ohne den EEG-Bestandsschutz anzutasten
- Die Konzepte sollten in den entsprechenden regulatorischen Rahmen (z.B. EEG) integriert werden.

Hier könnten sie z.B. an den Regelungen zur gleitenden Marktprämie ansetzen.

- Die hier gemachten Vorschläge für Bonus-Malus-Konzepte sollten in Abstimmung mit relevanten Marktteilnehmern weiter präzisiert werden, mit dem Ziel zu prüfen, wie so ein Instrument in die Geschäftsprozesse der Energievermarktung integriert werden kann und ob es die gewünschte Anreizwirkung entfalten wird.
- Anlagenbetreiber*innen, die bereits die Flexibilitätprämie beanspruchen, aber ihr Flexibilitätspotential nicht vollständig ausschöpfen, sollten unabhängig von einer möglichen Erweiterung der gleitenden Marktprämie prüfen, wie durch einen flexiblen Anlagenbetrieb Mehrerlöse erzielt werden können.

Herausforderungen

Haupt Herausforderungen in der Projektbearbeitung waren die auch über den Projektverlauf erfolgten Diskussionen über und auch umgesetzten Novellierungen der gesetzlichen Rahmenbedingungen, hier vor allem die EEG Novelle die zum 01.01.2021 in Kraft getreten ist.

Ausblick

Die Projektergebnisse haben sich wie bereits in der Zusammenfassung dargestellt, durch die inzwischen stark gestiegenen Strompreisschwankungen überholt. Gegenüber den potentiellen Mehrerlösen von ca. 5 bis 7 €/MWh für Biogasanlagen mit einem Leistungsquotienten von PQ=2 bis zum Ende des Jahres 2020, liegen diese inzwischen zwischen 15 bis 25 €/MWh. Flexible Biogasanlagen haben damit auch ohne ein zusätzliches Bonus-Malus-System einen sehr starken Anreiz ihre Stromproduktion am Bedarf zu orientieren.

Weitere Informationen

- **Zwischenbericht:** https://www.energetische-biomassenutzung.de/fileadmin/Steckbriefe/dokumente/03KB150_Flexsignal_Zwischenbericht_05-2020.pdf
- **Abschlussbericht:** https://www.energetische-biomassenutzung.de/fileadmin/Steckbriefe/dokumente/03KB150_Flexsignal_Schlussbericht_final.pdf

NovoHTK

**Franziska Schäfer; Leandro Janke;
Jürgen Pröter; Alfons Himmelstoss;
Benjamin Rocktäschel; Falko Niebling**

Neuartiges Verfahren zur Monovergärung von Hühnertrockenkot

Zusammenfassung

Für die Zielsetzung einer Monovergärung von Hühnertrockenkot (HTK) wurde ein zweistufiges Verfahrensprinzip gewählt. Zunächst erfolgte am DBFZ die Verfahrensentwicklung im Labormaßstab. In der ersten Prozessstufe wurde mittels Perkolation (Berieselung) eine Flüssigkeit mit hohem Organik-Anteil (Perkolat) gewonnen, die in der zweiten Stufe in einem Hochleistungsreaktor zu Methan umgesetzt wurde (Schema zum NovoHTK-Verfahren siehe Abbildung 1). Die Vermeidung toxischer Ammoniak-Konzentrationen (die bei dem stickstoffreichen HTK zu erwarten waren) erfolgte durch Verschiebung des Ammoniak-Ammonium-Gleichgewichtes in Richtung des weniger toxischen Ammoniums durch pH-Reduktion. Die zentrale Komponente zur pH-Regelung ist die Erhöhung des CO₂-Partialdrucks in der zweiten Prozessstufe. Im Ergebnis wurden wichtige Indikatoren zur Steuerung der Prozessbiologie unter hoher Stickstoff-Belastung ermittelt und Zielgrößen für die

Franziska Schäfer: »Das Innovative an der Verfahrensentwicklung ist die Nutzung von CO₂ zur pH-Regulation und zur Vermeidung toxischer Ammoniak-Konzentrationen. Durch die Übertragbarkeit dieses Ansatzes auf andere stickstoffreiche Substrate ergibt sich ein breites Anwendungsspektrum.«



weitere Prozessoptimierung (beispielsweise Temperatur oder pH-Wert) definiert. Das Upscaling für den Pilotmaßstab (GICON®, AEV) und apparatetechnische Anpassungen sowie die Erprobung des Prozesses im Versuchsaufbau einer Demonstrationsanlage erfolgten im GICON®-Biogastechnikum am Standort Cottbus. Im Rahmen dieser Arbeiten wurden Skalierungseffekte beobachtet und charakterisiert, wobei innerhalb des Bearbeitungszeitraumes technische Lösungen geschaffen wurden, die den dauerhaften Einsatz von HTK in der Monovergärung ermöglichen. Dazu gehörte u. a. die Entwicklung eines geeigneten Mehrphasenabscheiders durch AEV, der im Rahmen des Projektes an der Demonstrationsanlage getestet wurde. Für den Gesamtprozess liegen nun die Kennwerte zur Auslegung im technischen Maßstab sowie verschiedene Planungsvarianten vor. Diese bilden die Grundlage für wirtschaftliche und ökologische Bewertungen. Damit sind die Voraussetzungen für die Prozesserprobung in einer Einsatzumgebung.



(© Diana Pfeiffer, DBFZ)

FKZ-Nr.: **03KB117**
Laufzeit: **01.09.2018 — 30.11.2021**
Zuwendungssumme: **437.903 €**

KOORDINATION:
DBFZ – Deutsches Biomasseforschungs-
zentrum gGmbH, Bereich BK
Franziska Schäfer, Leandro Janke,
Jürgen Pröter
Torgauer Straße 116, 04347 Leipzig
www.dbfz.de

PROJEKTLEITUNG:
Dr rer. nat. Franziska Schäfer
+49 (0)341 2434 443

PARTNER:
AEV Energy GmbH
Alfons Himmelstoss,
Benjamin Rocktäschel
Hohendölzschener Str. 1a
01187 Dresden
www.aev-energy.de

Großmann Ingenieur Consult
GmbH
Falko Niebling
Tiergartenstraße 48
01219 Dresden
www.gicon.de

Themen schwerpunkte

- Reststoffnutzung zur Biogaserzeugung
- Lösungen für stickstoffreiche Substrate
- Nutzung von CO₂ zur pH-Regelung im Biogasprozess

Ziele

Die Entwicklung eines neuartigen, zweistufigen Verfahrens zur Monovergärung von HTK soll es ermöglichen, die bisher in Deutschland noch unvollständig genutzten Potenziale von HTK und anderen stickstoffreichen Substraten in Biogasanlagen zu verwerten.

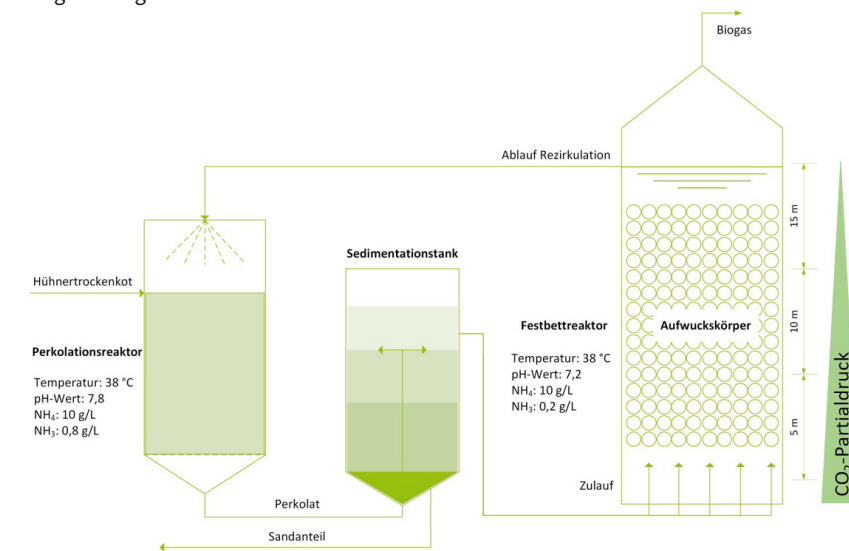


Abbildung 1:

Schematische Darstellung des
NovoHTK Verfahrens
(© Leandro Janke, DBFZ)

Kernbotschaften

- Zweistufige HTK-Monovergärung wurde im Labormaßstab (Perkolations) und Pilotmaßstab (Schlammbett) realisiert
- Lösungskonzepte für zwei wesentliche Problemstellungen wurden erstellt: Feststoffsedimentation und Prozesshemmung durch Ammoniak
- Kennwerte zur Auslegung im großtechnischen Maßstab liegen vor
- Wichtige Indikatoren zur Steuerung der Prozessbiologie (Temperatur, pH-Wert) wurden ermittelt
- pH-Regulation im Gärmedium über CO₂-Partialdruck ist möglich

summary (engl.)

A two-stage process principle was selected for the objective of mono-digestion of chicken manure (CM). Process development on a laboratory scale was implemented at DBFZ. In the first process stage, a liquid with a high organic content (leachate) was obtained by means of percolation (sprinkling), which was converted to methane in the second stage in a high-performance reactor (for a scheme of the NovoHTK process, see Figure 1). Prevention of toxic ammonia concentrations (which were to be expected with the nitrogen-rich CM) was achieved by shifting the ammonia-ammonium equilibrium toward the less toxic ammonium ions through pH reduction. The key component for pH regulation is the increase of CO₂ partial pressure in the second process stage. As a result, important indicators for controlling the process biology under high nitrogen loading were identified and target variables for further process optimization (for example, temperature or pH) were defined. Upscaling into pilot scale (GICON®, AEV) and technical adaptations of the equipment as well as the testing of the process in the experimental setup of

key messages (engl.)

a demonstration plant were carried out in the GICON® biogas technical center at the Cottbus site. Within the scope of this work, scaling effects were observed and characterized, and technical solutions were created within the processing period that enable the permanent use of CM in mono-digestion. This included, among other things, the development of a suitable multiphase separator by AEV, which was tested at the demonstration plant as part of the project. For the overall process, the characteristic values for the design on a technical scale as well as various planning variants are now available. These provide the basis for economic and ecological evaluations. The prerequisites for process testing in an operational environment have thus been created.

- Two-stage CM mono-digestion was realized at laboratory scale (leach bed) and pilot scale (sludge bed)
- Solution concepts for two main problems were developed: solids sedimentation and process inhibition by ammonia
- Characteristic process parameter for design on an industrial scale are available
- Important indicators for the control of the process biology (temperature, pH-value) were determined
- pH regulation in the fermentation medium via CO₂ partial pressure is possible

Methodik Maßnahmen

- Zur Charakterisierung der Zusammensetzung von HTK Proben unterschiedlicher Geflügelhaltungsformen (Abbildung 2) wurden Trockensubstanz (TS)- und organischer Trockensubstanz (oTS)-Gehalt, Säurespektrum, Ammoniumstickstoff-Gehalt und Gesamtstickstoff (TKN)-Gehalt ermittelt (Schumacher et al., 2019). Eine Futtermittelanalyse erfolgte nach Weender und van Soest (VDLUF, 2007).

Abbildung 2:

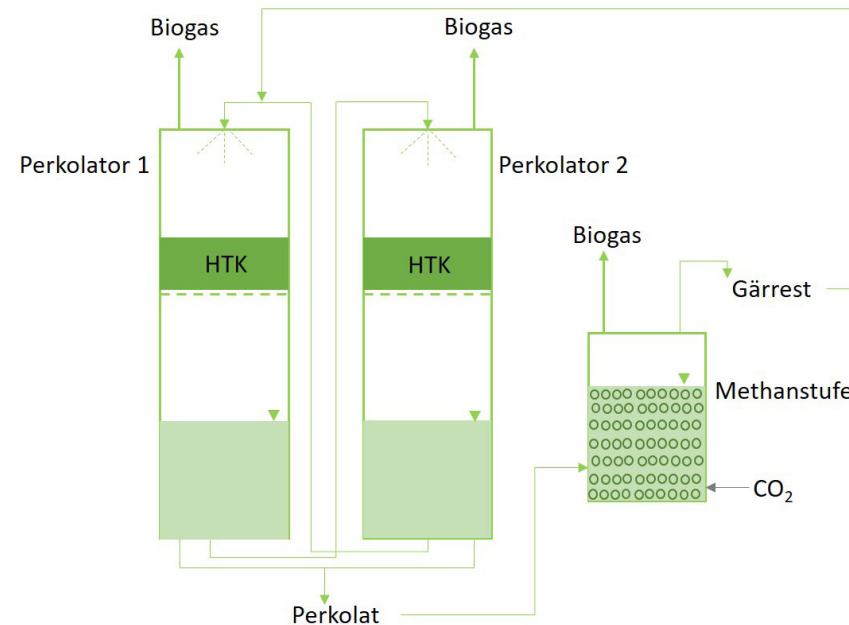
Auswahl untersuchter HTK
Proben aus unterschiedlichen
Haltungsverfahren
(© DBFZ)



- Zur Bewertung der Perkolierbarkeit der HTK-Proben wurde der kf-Wert (Durchlässigkeitsbeiwert) in Anlehnung an DIN 18130 (1998) mittels Oedometer bestimmt
- Die Prozessentwicklung der zweistufigen HTK Monovergärung erfolgte im Labormaßstab (Versuchsaufbau siehe Abbildung 3). Die Beaufschlagung der Perkulationsreaktoren mit frischem HTK erfolgte 14-tägig, wobei der Substratwechsel alternierend aller 7 Tage jeweils an einem der Reaktoren durchgeführt wurde. Raumbelastung und Verweilzeit der Methanstufe wurden auf $3,5 - 4 \text{ g OTS L}^{-1} \text{ d}^{-1}$ und 8 d eingestellt.

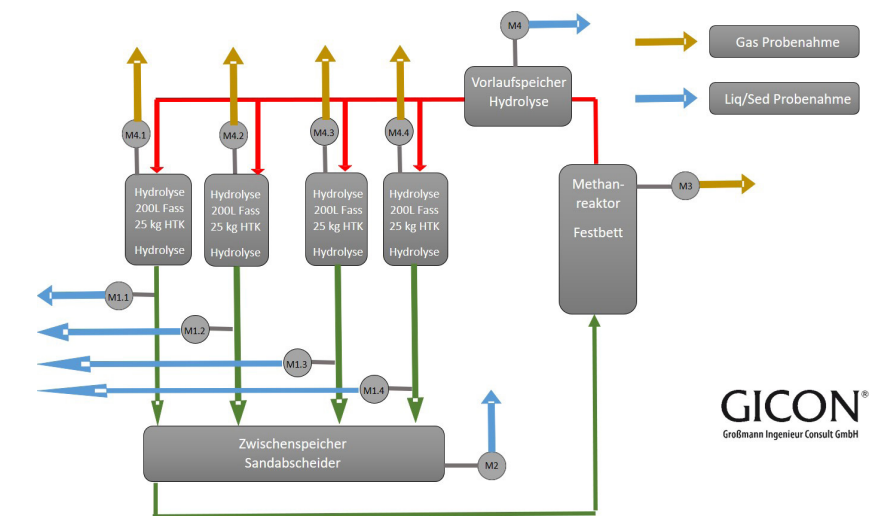
Abbildung 3:

Zweistufige HTK-Monovergärung im Labormaßstab (Prozessstufe 1: 2 Perkulatoren mit jeweils 2 kg HTK und 7,6 L Perkolat; Prozessstufe 2: 1 Festbettreaktor mit 5 L Arbeitsvolumen) (© DBFZ)



- Zur Prozesskontrolle wurden zweimal wöchentlich pH-Wert, Gehalt an flüchtigen organischen Säuren (FOS), FOS/TAC-Verhältnis (Pufferkapazität) und Ammoniumstickstoff-Gehalt analysiert wie in Schumacher et al. (2019) beschrieben. Das Biogasvolumen wurde mittels Trommelgaszähler (Ritter TG 05, Dr.-Ing. Ritter Apparatebau GmbH & Co KG, Bochum) erfasst. Die Messung der Gaszusammensetzung erfolgte unter Nutzung eines Gasanalyse-Systems (AwifLEX, AWITE Bioenergie GmbH, Langenbach).
- An der GICON® Demonstrationsanlage wurde die verfahrenstechnische Kombination der 1. und 2. Prozessstufe im Pilotmaßstab (ohne CO₂ gesteuerte pH-Wert-Anpassung) umgesetzt. Dazu kam ein Festbettreaktor mit 190 L Arbeitsvolumen mit 4 Perkulatoren (jeweils 110 L) zum Einsatz (Abbildung 4). Zielstellung war die Ermittlung des Betriebsverhalten der Anlage im Kreislaufverfahrens beim ausschließlichen Einsatz von HTK.
- Die verfahrenstechnische Konzeptentwicklung der Feinsandabscheidung im Pilotmaßstab erfolgte durch AEV. Ziel war die Entwicklung und der Bau eines Mehrphasenabscheiders für den Einsatz auf der Demonstrationsanlage der Firma GICON® in Cottbus.

- Prozessbewertung auf Basis einer Massenbilanz, die für die verwendeten Versuchsanlagen (Labormaßstab DBFZ und Demonstrationsanlage GICON®) zur zweistufigen Monovergärung von HTK angepasst wurde.

**Abbildung 4:**

Versuchsanordnung für das NovoHTK Verfahren an der GICON® Demonstrationsanlage (© GICON)

Ergebnisse auf einen Blick

PUBLIKATION:

- Wedwitschka H, Gallegos D, Schäfer F, Jenson E, Nelles M (2020): »Material Characterization and Substrate Suitability Assessment of Chicken Manure for Dry Batch Anaerobic Digestion Processes«. Bioengineering (ISSN: 2306-5354), Vol. 7, Nr. 3. DOI: 10.3390/bioengineering7030106
- Cai Y, Janke L, Zheng Z, Wang X, Pröter J, Schäfer F (2021): Enhancing anaerobic digestion of chicken manure leachate: Effects of trace elements supplementation on methane production. Bioresource Technology Reports, 14, 100662.
- Cai Y, Gallegos D, Zheng Z, Stinner W, Wang X, Pröter J, Schäfer F (2021): Exploring the combined effect of total ammonia nitrogen, pH and temperature on anaerobic digestion of chicken manure using response surface methodology and two kinetic models. Bioresource Technology, 337, 125328.
- Cai Y, Janke L, Meng X, Zheng Z, Zhao X, Pröter J, Schäfer F (2022): The absolute concentration and bioavailability of trace elements: two vital parameters affecting

anaerobic digestion performance of chicken manure leachate. Bioresource Technology, 126909.

TAGUNGSBAND – BEITRÄGE:

- Schäfer F, Janke L, Niebling F, Himmelstoss A, Pröter J (2020): NovoHTK – Ein neuartiges Verfahren zur Monovergärung von Hühnertrockenkot. Tagungsbeitrag (14. Rostocker Bioenergieforum, Juni 2020), Tagungsband
- Schäfer F, Janke L, Wedwitschka H, Niebling F, Himmelstoss A, Pröter J (2022): NovoHTK – Ein neuartiges Verfahren zur Monovergärung von Hühnertrockenkot. Tagungsbeitrag 15. Biogasinnovationskongress (Mai 2022), Präsentation und Tagungsband

POSTER-BEITRÄGE

- 8. Statuskonferenz Energetische Biomassenutzung (17./ 18. September 2019), F. Schäfer, L. Janke, DBFZ; D. Juncqueira, F. Niebling, GICON
- DBFZ Jahrestagung (16./ 17. September, 2020), L. Janke, F. Schäfer

- Progress in Biogas V (22. – 24. September, 2021), F. Schäfer
 - Messestände
 - Biogas Convention (10. – 12. Dezember 2019), A. Himmelstoss, R. Reiter, AEV
 - Biogas Convention (7. – 9. Dezember 2021), , A. Himmelstoss, R. Reiter, AEV
 - Energy Decentral (9. – 12. Februar 2021), A. Himmelstoss, R. Reiter, AEV
- KONZEPT/MACHBARKEITSSSTUDIE:**

 - Anlagenkonzept und Auslegung im großtechnischen Maßstab (AEV)
 - Wirtschaftlichkeitsbetrachtung der großtechnischen Anlage zur zweistufigen HTK-Monovergärung (AEV)

ANLAGE:

 - Konzipierung und Betrieb eines Druckreaktors als Methanstufe im Labormaßstab (DBFZ)
 - Demonstrationsanlage im GICON®-Biogastechnikum am Standort Cottbus
 - Konzipierung und Betrieb eines Mehrphasenabscheiders im Pilotmaßstab (AEV)

KONZEPT/MACHBARKEITSSSTUDIE:

 - Anlagenkonzept und Auslegung im großtechnischen Maßstab (AEV)
 - Wirtschaftlichkeitsbetrachtung der großtechnischen Anlage zur zweistufigen HTK-Monovergärung (AEV)

ANLAGE:

 - Konzipierung und Betrieb eines Druckreaktors als Methanstufe im Labormaßstab (DBFZ)
 - Demonstrationsanlage im GICON®-Biogastechnikum am Standort Cottbus
 - Konzipierung und Betrieb eines Mehrphasenabscheiders im Pilotmaßstab (AEV)

Darstellung der Ergebnisse

SUBSTRATBEWERTUNG UND KONDITIONIERUNG

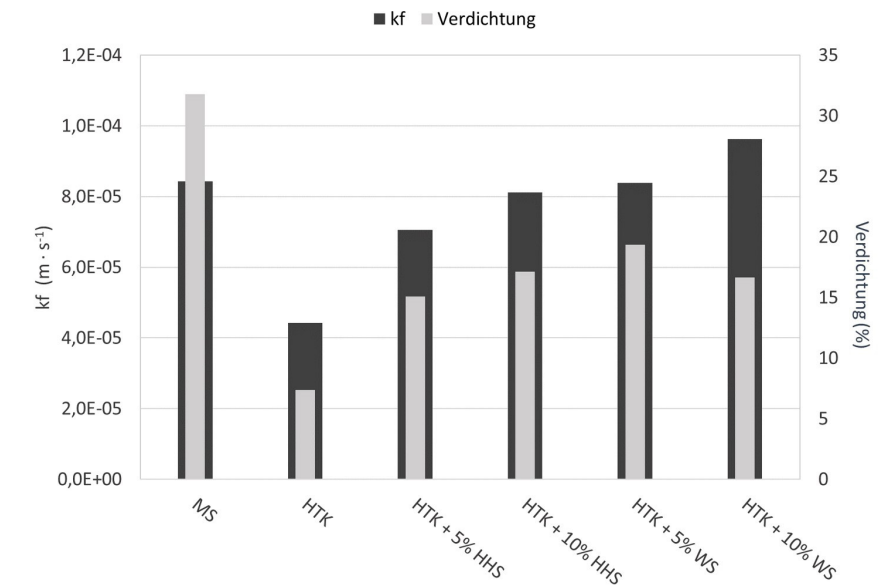
Die Zusammensetzung und Struktur des HTK wurde durch Haltungsverfahren, Verwendung und Art der Einstreu und die Lagerung des Kots beeinflusst. Der TS-Gehalt der untersuchten Proben stieg mit zunehmender Lagerungsdauer an (41 bis 77%). Die Proben aus der Hühnermast wiesen die höchsten oTS-Anteile (> 80% TS) und deutlich geringere Rohasche-Anteile (131 – 166 g kg TS⁻¹) auf als in den übrigen Proben nachgewiesen wurde (302 – 433 g kg TS⁻¹). Der TKN-Gehalt hatte eine Spannbreite von 33 bis 68 g kg TS⁻¹.

Die zum Teil großen Unterschiede in der Zusammensetzung in Bezug auf die Stickstofffracht können erheblichen Einfluss auf die Prozessführung haben und sind somit regelmäßig zu prüfen. Die durch TS-Gehalt und Einstreu bedingte unterschiedliche Struktur der Proben beeinflusste maßgeblich die Wasserdurchlässigkeit und damit die Eignung des HTK für den Einsatz im Perkolationssystem. Die unterschiedlichen HTK-Proben variierten sehr stark in ihrer Durchlässigkeit und waren zum Teil gar nicht durchlässig bzw. war Strukturmaterial notwendig, um eine Durchlässigkeit zu erzielen. Am Beispiel einer HTK-Probe wurde gezeigt, dass die Durchlässigkeit der Probe mit zunehmendem Anteil an Strukturmaterial anstieg. Unter Auflast von 3 bar (zur Simulation einer entsprechenden Haufwerks-höhe) wurde die Wasserdurchlässigkeit durch Zugabe von 10% (m/m) Holzhack-schnitzel von $4,4 \cdot 10^{-5}$ auf $8,1 \cdot 10^{-5} \text{ m s}^{-1}$, unter Verwendung von 10% (m/m) Weizen-stroh auf $9,6 \cdot 10^{-5} \text{ m s}^{-1}$ gesteigert (Abbildung 5). Durch die Mischung von HTK mit Strukturmaterial konnte somit eine zur Maissilage vergleichbare Wasserdurch-lässigkeit erzielt werden.

ZWEISTUFIGE HTK-MONOVERGÄRUNG IM LABORMASSSTAB

Der Anteil der Methanstufe an der Biogasproduktion der Gesamtanlage war relativ gering (Biogasproduktion Gesamtanlage: 88–285 L/Woche, Methanstufe: 5–23 L/Woche). Auf Grund der substrat-bedingten hohen pH-Werte (Ammonium-Ammoniak-Puffer), war bereits in der ersten Prozessstufe eine hohe Methano-genese Aktivität zu verzeichnen, was anhand des relativ hohen Methan-Gehaltes

Abbildung 5:
kf-Wert und Verdichtung der unter-suchten HTK Proben mit unterschied-lichen Anteilen an Strukturmaterial gemessen bei einer Auflast von 3 bar (MS, Maissilage; HHS, Holzhackschnitzel; WS, Weizenstroh) (© DBFZ)



ersichtlich wurde (Abbildung 6). Der Eintrag von Methanbildnern aus der zweiten Prozessstufe trug zusätzlich zur hohen Methanogenese Aktivität bei. Durch die Akkumulation von Ammoniumstickstoff, bedingt durch die Auswaschung aus dem HTK im Versuchsverlauf, von 5 auf 9 g L^{-1} in der Per-kolation (in der Methanstufe erfolgte keine weitere Erhöhung) wurden verstärkt durch die sehr hohen pH-Werte von > 8 Ammoniak-Konzentrationen über dem Hemmbereich $0,9 – 1 \text{ g L}^{-1}$ in beiden Prozessstufen gemessen (Abbil-dung 7). Als Folge einer Hemmung der Methanogenese ging die spezifische Methan-produktion in beiden Prozessstufen zurück (Perkolation: von 140 ± 7 auf $81 \pm 4 \text{ mL g oTS}^{-1}$; Methanstufe von 166 ± 24 auf $81 \pm 13 \text{ mL g oTS}^{-1}$) in Versuchs-phase II zurück (Abbildung 6).

Abbildung 6:
Spezifische Methanproduktion und Methangehalt der Perkolation-sreaktoren (Summe) und der Methanstufe bei der zweistufigen Monovergärung von HTK (© DBFZ)

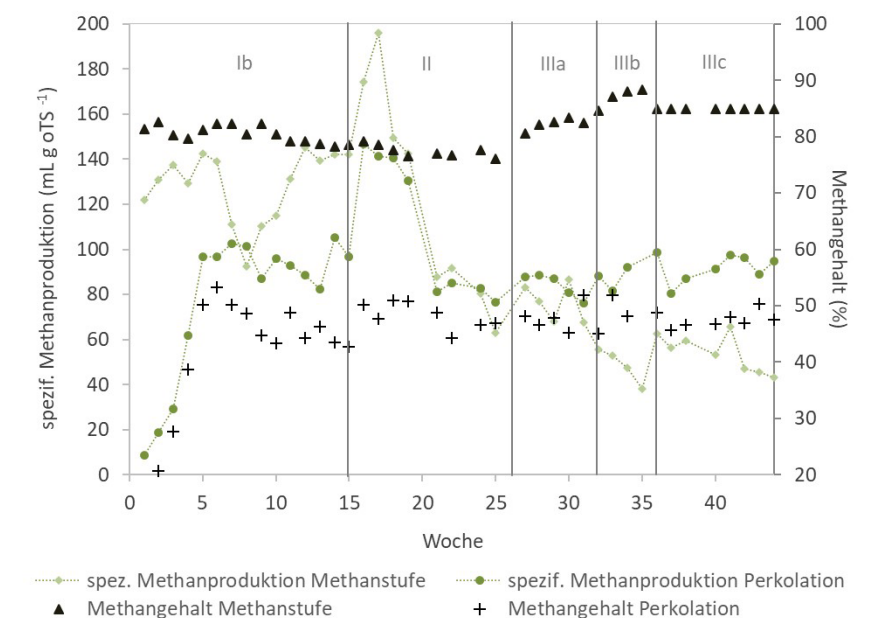
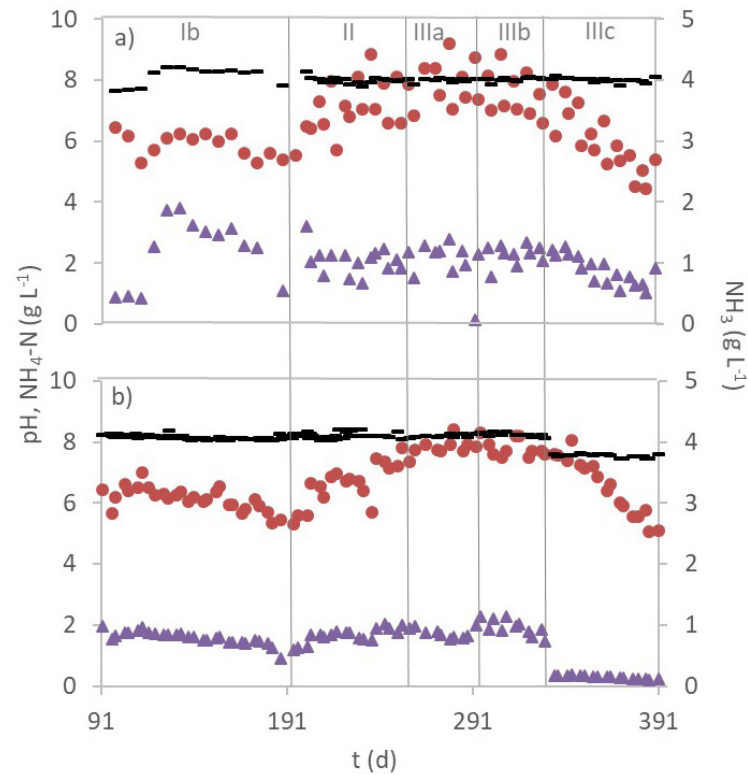


Abbildung 7:
pH-Wert, Ammoniumstickstoff
(NH₄-N)-Gehalt,
Ammoniak (NH₃)-Gehalt der a)
Perkolation und der b)
Methanstufe bei der zweistufigen
Monovergärung von HTK (© DBFZ)



Im Zuge der Prozessoptimierung wurden in Versuchsphase III zunächst die Reaktortemperatur eingestellt.

**PROZESSOPTIMIERUNG DURCH TEMPERATUR-VERRINGERUNG
(VON 38 AUF 30 °C):**

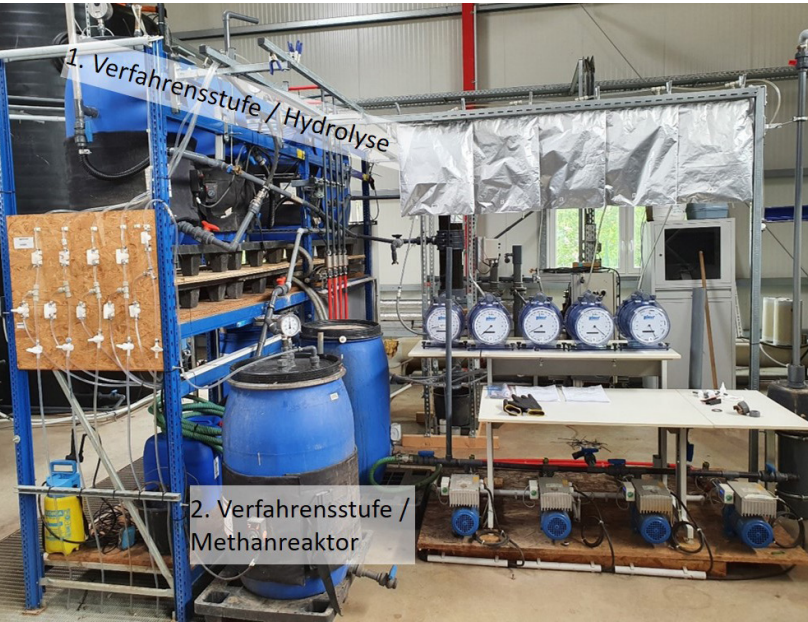
➔ Der Methangehalt der Methanstufe erhöhte sich von 76 auf 88 % (Abbildung 6, Phase IIIa und IIIb).

Als weiterer Schritt der Prozessoptimierung der Methanstufe sollte mittels CO₂-Begasung und Druckerhöhung der gelöste CO₂-Anteil im Gärrest erhöht und dadurch der pH-Wert verringert werden.

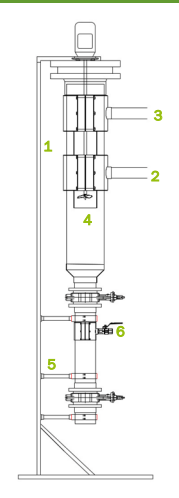
**PROZESSOPTIMIERUNG DURCH ERHÖHUNG DES
CO₂-PARTIALDRUCKS:**

- ➔ Eine Zufuhr von 8 -9 L d⁻¹ CO₂ bei einem leichten Überdruck von 700 mbar bewirkte die Reduzierung des pH-Wertes von 8,3 auf 7,5 (Abbildung, Phase IIIc).
- ➔ Dadurch verringerte sich die Ammoniak-Konzentration in der Methanstufe von 1 auf 0,1 g L⁻¹.
- ➔ Als Nebeneffekt der Begasung wurde das Ausstrippen von Ammoniak festgestellt, was zur Reduzierung des Ammoniumstickstoff-Gehalts von 8 auf 5 g L⁻¹ (in der Perkolation, durch Rezirkulation des Gärmediums) beitrug.
- ➔ Eine Verbesserung der spezifischen Methanproduktion bei der Perkolation von 80 auf 98 mL g oTS⁻¹ wurde ermittelt.
- ➔ Bei der Methanstufe hingegen konnte nur ein geringer Effekt der pH-Wert Verringerung auf die spezifische Methanproduktion festgestellt werden. Allerdings wurde hier zumindest eine Stabilisierung der spezifischen Methanproduktion bewirkt.

Abbildung 8:
Gesamtansicht Demonstrationsanlage
nach Umbau und Einbindung
des AEV-Mehrphasenabscheiders
(© GICON)



Im Steady State ergab sich eine spezifischer Methanertrag von 245 L kg oTS⁻¹. Bezogen auf das aktive Reaktorvolumen trugen beide Prozessstufen etwa 50 % zur Biogasproduktion bei. Dabei entstanden ca. 40 % des Methan in der 1. und 60 % in der 2. Prozessstufe. Bei der Demonstrationsanlage betrug das hydraulische Reaktionsvolumen der 1. Prozessstufe etwa das 2,5-fache der zweiten Stufe. Dementsprechend größere Gasmengen wurden in der 1. Prozessstufe produziert.



ENTWICKLUNG UND BETRIEB DER MEHRPHASENABSCHEIDUNG IM PILOTMAßSTAB (AEV):

➔ Abscheidung Mittels Sedimentation

➔ Eingebauter Rührer zur Behandlung von Schwimmschichten

➔ Rückhalt von festen Störstoffen (Sand und kleine Steine)

➔ Behandlung von ggf. auftretenden Schwimmschichten (bspw. durch Federn)

➔ Abgetrenntes Material sollte einen möglichst hohen TS-Gehalt aufweisen (Transportwürdigkeit)

1 Vertikales Rohr - Raum zur Sedimentation

2 Zulauf

3 Ablauf

4 Rührer im Strömungsrohr

5 Schleuse für Feststoffaustrag

6 Spülwasseranschluss

PROZESSBEWERTUNG

Aus Tabelle 1 geht hervor, dass in Labor- und Pilotmaßstab ein Großteil der Organik schon im Perkolations- bzw. Schlammbedtreaktor zu Biogas umgesetzt wurde (oTS-Umsatz). Auf Grund der substrat-bedingten hohen pH-Werte (Ammonium-Ammoniak-Puffer), war bereits in der ersten Prozessstufe eine hohe Methanogenese Aktivität zu verzeichnen, was anhand des relativ hohen Methan-Gehaltes ersichtlich wurde. Da der Großteil der Organik schon in der ersten Prozessstufe abgebaut wurde, blieben in der Methanstufe hauptsächlich schwer abbaubare Stoffe übrig. Hier war der oTS- Umsatz deutlich geringer. Der spezifische Biogasertrag im Pilotmaßstab (362 mL g oTS⁻¹) war insgesamt höher als im Labormaßstab (max. 300 mL g oTS⁻¹). Vergleichbare Werte wurden auch bei einstufiger HTK-Monovergärung im Labormaßstab ermittelt (Nie et al., 2015, Schäfer et al., 2017). Vergleicht man spezifischen Biogasertrag und Methan-Gehalt mit Literaturwerten (spezifischer Biogasertrag: 500 L kg oTS⁻¹, Methan-Gehalt: 55 %, KTBL, 2021), wird ersichtlich dass das Substratpotenzial noch nicht ausgeschöpft wird, was den spezifischen Biogasertrag betrifft. Die Reduzierung des Ammoniumstickstoff-Gehalts im Pilotmaßstab durch den Frischwasseraustausch wirkte sich vorteilhaft auf den Biogasprozess aus. Im Labormaßstab konnte die Ammoniak-Hemmung (Phase IIb) über eine Gleichgewichtsverschiebung (Ammonium-Ammoniak-Gleichgewicht) reduziert werden, was anhand der Steigerung im spezifischen Gasertrag von 186 auf 230 mL goTS⁻¹ (Phase IIIc) ersichtlich wurde. Bedingt durch vergleichsweise schlechtes Auswaschverhalten der Organik beim Perkolationsreaktor im Vergleich zum Schlammbedtreaktor stellen sich die spezifischen Gaserträge im Pilotmaßstab besser dar. Bei Betrachtung der Stickstoff-Bilanz wird deutlich, dass der TKN-Umsatz fast vollständig in der ersten Prozessstufe stattfand und in der Methanstufe kein weiterer TKN umgesetzt wurde.

Tabelle 1:

Vergleich der Umsätze für oTS und TKN, des Methangehalts und des spezifischen Gasertrags für beide Prozessstufen der HTK-Monovergärung im Labor- und Pilotmaßstab auf Basis der Massenbilanzierung (© DBFZ)

	Erste Prozessstufe			Zweite Prozessstufe			Gesamtanlage	
	Umsatz oTS %	Umsatz TKN %	Methan-Gehalt %	Umsatz oTS %	Umsatz TKN %	Methan-Gehalt %	Umsatz oTS %	spezif. Gasertrag mL goTS ⁻¹
Labormaßstab								
Phase Ib	31	37	45	2	0	80	34	219
Phase IIa	39	39	50	2	0	78	40	300
Phase IIb	26	33	47	2	0	77	27	188
Phase IIIa	26	35	48	2	0	82	26	186
Phase IIb	26	33	48	1	0	87	27	189
Phase IIIc	32	33	48	1	0	85	31	230
Pilotmaßstab	48	65	60	13	0	73	68	362

Herausforderungen

Die ursprünglich geplante Umsetzung der ersten Prozessstufe der zweistufigen HTK-Monovergärung als Perkolation hat sich als nicht geeignet für die Anwendung über den Labormaßstab hinaus (Pilotmaßstab und technischer Maßstab) erwiesen. Vor allem auf Grund der schlechten Wasserdurchlässigkeit des HTK, die größere Mengen von Strukturmaterial erfordern würde, um eine Trockenfermentation zu ermöglichen. Im Pilotmaßstab wurde daher von GICON® die erste Prozessstufe angepasst und als Schlammbett-Verfahren durchgeführt.

Ausblick

Die im Projekt gewonnenen Erkenntnisse sind von internationalem Forschungsinteresse auf den Gebieten der Vergärung stickstoffreicher Substrate und der Ammoniakhemmung. Damit bietet sich die Möglichkeit zur Förderung internationaler Vernetzungsmöglichkeiten und die Grundlage für Anschlussprojekte. Das entwickelte Verfahren ist auf Grund des breiten Anwendungspotenzials für HTK (weltweites Problem) und weitere stickstoffreiche Substrate (Reststoffverwertung) von internationalem Interesse. Die Vorhabenergebnisse bilden eine wichtige Basis für ein kürzlich begonnenes Forschungsvorhaben am DBFZ (FKZ 2221WD002A, »AntBioHK«), das die Konsequenzen eines vermehrten Einsatzes von Geflügelexkrementen in Biogasanlagen auf die Belastung der Gärprodukte mit Antibiotika- und Arzneimittelrückständen untersucht.

Weitere Informationen

- https://www.openagrar.de/receive/openagrar_mods_00083408
- [Steckbrief des Projektes >>](#)

Literatur

■ DIN 18130 (1998). Baugrund – Untersuchung von Bodenproben; Bestimmung des Wasserdurchlässigkeitsbeiwerts. Berlin: Beuth Verlag

■ Nie H, Jacobi H F, Strach K, Xu C, Zhou H, Liebetrau J (2015): Monofermentation of chicken manure: ammonia inhibition and recirculation of the digestate. Bioresource technology, 178, 238-246.

■ Schäfer F, Müller L, Reiter R, Himmelstoss A, Pröter J (2017): Mono-fermentation of chicken manure - competing with ammonia inhibition and a high content of inorganic solids, In Ek,

Ehrnrooth et al. (Hrsg.) 2017: Papers of the 25th European Biomass Conference, 516-520.

■ Schumacher B, Wedwitschka H, Weinrich S, Mühlenberg J, Gallegos D, Oehmichen K, Liebetrau J (2019): The influence of pressure swing conditioning pretreatment of chicken manure on nitrogen content and methane yield. Renewable Energy, 143, 1554-1565.

■ VDLUFA, 7-(2007). Ergänzung. Die chemische Untersuchung von Futtermitteln, Verband Deutscher Landwirtschaftlicher Untersuchungs- und Forschungsanstalten e.V.

ProPhaSep

Eike Janesch, Jens Zosel,
Pierre Haider, Stefan Junne

Flexibilisierung der Biogasproduktion durch Prozessphasenseparation und Dünnschlammrezirkulation

Zusammenfassung

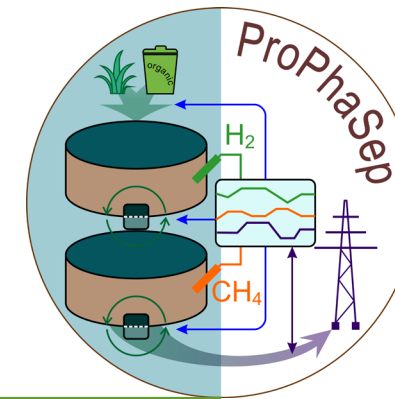
Energie aus Biomasse besitzt das Potential, die fluktuierende Energieproduktion aus Wind- und Solarquellen partiell auszugleichen, siehe u.a. (Peters et al., 2018). Um dieses Ziel zu erreichen, muss die Biogasbereitstellung auf der Prozessseite möglichst flexibel gestaltet werden. An der TU Berlin werden dazu Versuche in einem zweistufigen Biogasfermenter-System aus Rührkesseln im Labormaßstab durchgeführt. Durch die Separation der Prozessphasen in zwei Stufen lassen sich die Prozessbedingungen individuell auf die vorherrschenden Mikroorganismengruppen anpassen. In Kombination mit einer Dünnschlammrezirkulation, die die Stabilität des mikrobiellen Konsortiums in jeder der zwei Phasen erhöhen soll, wird ein robuster Prozess angestrebt, der den Einsatz von biogenen Reststoffen wie Stroh als Substrat und eine flexible Biogasproduktion erlaubt. Dazu wird als weitere Maßnahme eine neu entwickelte Messeinrichtung für gelösten Wasserstoff integriert. Mit Hilfe dieser Messeinrichtung sollen Aussagen über die optimierte externe Zugabe von Wasserstoff in die Methanstufe und den dafür notwendigen Leistungseintrag zur Steigerung der hydrogenotrophen Methanogenese getroffen werden.

Themen schwerpunkte

- Flexible Biogasproduktion
- Phasenseparation im Biogasprozess
- Dünnschlammrezirkulation
- Gelöstwasserstoffmessung
- Methanogene Stufe

Ziele

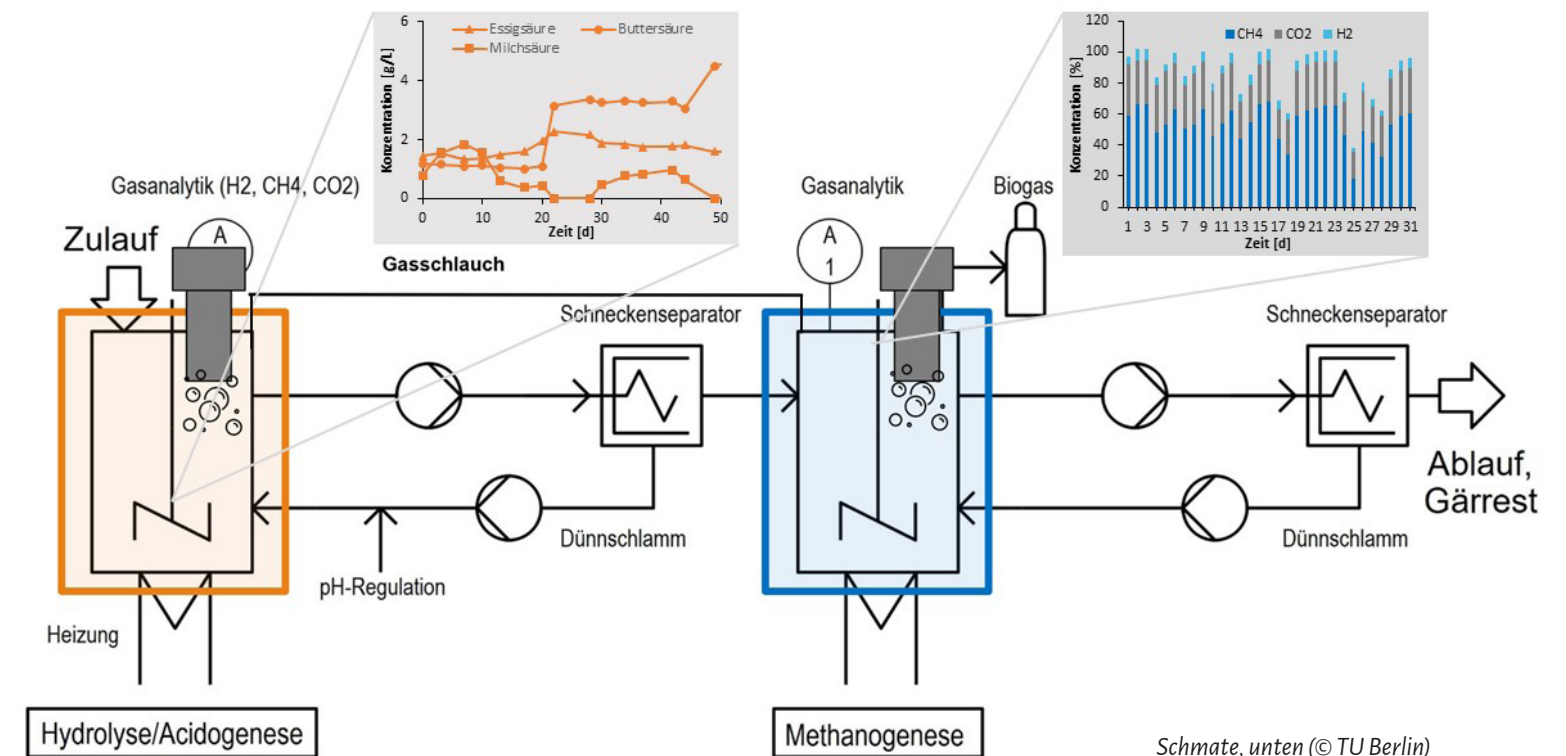
Das Ziel des vom BMWK geförderten Projekts "ProPhaSep" ist es, den Biogasprozess durch Separation der hydrolytischen und acidogenen Prozessphase auf der einen und der methanogenen Phase auf der anderen Seite zu flexibilisieren, sowohl hinsichtlich des Einsatzes von biogenen Reststoffen als auch der Biogasproduktion selbst. Darüber hinaus soll eine Methode zur Messung gelöster Gase in anaeroben Medien entwickelt und appliziert werden, um insbesondere den notwendigen Leistungseintrag sowie die Wasserstoffzufuhr in der zweiten, methanogenen Phase regeln zu können. Anhand der Ergebnisse sollen Empfehlungen zur Anpassung von Bestandsbiogasanlagen für einen flexiblen Betrieb erfolgen.



Stefan Junne: »Die Flexibilisierung der Substratnutzung auf der einen und der Biomasse-basierten Energiebereitstellung auf der anderen Seite steigert den Nutzen für das Versorgungssystem und damit die Nachhaltigkeit von Biogasanlagen. Die Motivation für das Projekt entstand aus dem Wunsch heraus, die Flexibilität der Biogasherstellung zu untersuchen und zu optimieren, und zwar mit einem Fokus auf den biologischen Prozess.«



Gruppenfoto (von links nach rechts): Jens Zosel (KSI), Stefan Junne (TUB), Pierre Haider, Karen Guerrero (FWE), Eike Janesch (TUB), Rodrigo Retamal Marín (KSI), vor der Pilotanlage zur Biogasherstellung beim Kurt-Schwabe-Institut (© Pierre Haider/FWE)



Schmate, unten (© TU Berlin)

FKZ-Nr.: 03EI5409
 Laufzeit: 01.01.2020 – 31.06.2022
 Zuwendungssumme: 450.000 €

KOORDINATION:
 Technische Universität Berlin, Institut
 für Biotechnologie, Fachgebiet
 Bioverfahrenstechnik
 Eike Janesch, Stefan Junne
 Ackerstr. 76, 13355 Berlin
 www.tu.berlin/bioprocess

PROJEKTL EITUNG:
 Peter Neubauer, Stefan Junne
 stefan.junne@tu-berlin.de

Direkte Ansprechperson
 Eike Janesch
 +49 (0)30/314-27576
 e.janesch@tu-berlin.de

PARTNER:
 Kurt-Schwabe-Institut für Mess-
 und Sensortechnik Meinsberg e.V.
 Jens Zosel
 Kurt-Schwabe-Str. 4
 04736 Waldheim
 www.ksi-meinsberg.de

FWE GmbH
 Pierre Haider
 Wölsauer Str. 20
 95615 Markredwitz
 www.fwe.energy

Kernbotschaften

- Auch bei hohen Strohanteilen im Substrat (bis zu 50 %) erzeugt das Reaktorsystem hohe Methanmengen und -konzentrationen (bis zu 200 mL CH₄/gCSB bei einem Methangehalt von 60 %)
- Im ersten Fermenter werden hauptsächlich Essig- und Buttersäure produziert (> 5 g/L), die sich besonders gut für eine zweistufige anaerobe Gärung eignen.
- Phasenseparation und Dünnschlammrezirkulation sorgen für eine hohe Robustheit und Flexibilität des Systems.
- Eine Messeinrichtung für gelösten Wasserstoff konnte erfolgreich implementiert werden. Sie ist durch hohe Sensitivität, Selektivität und Stabilität gekennzeichnet und weist eine vergleichsweise kurze Ansprechzeit auf.
- Prozessveränderung können mithilfe des Messsystems schneller und aussagekräftiger erkannt werden, als mit der konventionellen Abgasmessung.

summary (engl.)

Energy from biomass has the potential to partially balance the fluctuating energy production from wind and solar sources, e.g. (Peters et al., 2018). To achieve this goal, the provision of biogas has to be as flexible as possible on the process side. At TU Berlin, experiments are conducted in a two-stage biogas fermenter system on a laboratory scale. By separating the process phases into two stages, the process conditions can be adapted individually to the prevailing groups of microorganisms. In combination with a thin-sludge recirculation, this fermenter design ensures a particularly robust process that allows the use of biogenic residues such as straw as substrates and a flexible biogas production. A newly developed measuring device for dissolved hydrogen is integrated in the process. With the help of this measuring device, the power input and hydrogen provision to the methanogenic phase can be adjusted to increase hydrogenotrophic methanogenesis.

key messages (engl.)

- Even with a high proportion of straw in the substrate (up to 50 %), the reactor system produces high amounts and concentrations of methane (up to 200 mL CH₄/gCOD with a methane content of 60 %)
- Mainly acetic and butyric acid are produced in the first fermenter (> 5 g/L), which are particularly suitable for a two-stage anaerobic fermentation.
- Phase separation and thin-sludge recirculation ensure that the system is extremely robust and flexible.
- The measuring device for dissolved hydrogen was successfully implemented in the laboratory fermenters. It provides high sensitivity, selectivity and stability and offers a comparably low response time.
- Process changes can be detected faster and with stronger signals with the help of the measuring system than with conventional exhaust gas measurement.

Methodik Maßnahmen

- Als Biogasfermenter wurden zwei 2-L Laborreaktoren (Rührkessel) aus Plexiglas konzipiert und angefertigt, um die Phasenseparation zu ermöglichen. Die Deckel der Reaktoren wurden mithilfe eines 3D-CAD Programms entworfen, so dass individuelle Anschlussmöglichkeiten für Sonden etc. möglich waren und anschließend 3D-gedruckt. Zur Durchmischung kommen Paddelrührwerke mit speziell angepassten 3D-gedruckten Rührblättern zum Einsatz.
- Die Abtrennung des Dickschlammes für die Dünnschlammrezirkulation wird mithilfe einer 3D-gedruckten Pressschnecke erzielt. Die Entnahme der Fermentationsbrühe erfolgt am Boden der Reaktoren. Der Dünnschlamm wird nach der Abtrennung in beiden Fermentern jeweils über den Kopfraum zurückgeführt.
- Die Reaktoren zur Biogasproduktion wurden zunächst mit reiner Maissilage als Referenzsubstrat angefahren (Trockenmasse: 5-7 %). Anschließend wurde schrittweise ein Teil der Maissilage (bis zu 75%) durch Stroh ersetzt. Durch eine Erhöhung der Dünnschlammrezirkulation und einer angepassten Retentionszeit wurde versucht, die Methanproduktion trotz des schwer abbaubaren Substrats aufrecht zu erhalten.
- Die Trennung der hydrolytischen und der methanogenen Stufe erfolgt durch die Anpassung des pH-Wertes in beiden Fermentern. In der ersten Stufe wandeln hydrolytische Bakterien bei pH-Werten von 4,0 bis 5,5 unlösliches organisches Material in Biomasse, Carboxylsäuren, Zucker und Aminosäuren um. Dabei entstehen Kohlenstoffdioxid und Wasserstoff. In der zweiten Stufe nutzen methanogene Archaeen diese Zwischenprodukte bei einem pH-Wert von 6,5 bis 7,5, um Biogas (Methan) herzustellen (Van et al., 2020).
- Die Fermenter werden bei mesophilen Bedingungen (35-38 °C), einer Beladungsrate von 1-2 g/L d, einem Sauerstoffbedarf (chemisch) von 20-25 g/L (Hydrolyse) und einer Retentionszeit von 7-14 d betrieben.
- In beiden Fermentern werden die Temperatur, der pH-Wert, die Gaszusammensetzung und das Gasvolumen online erfasst. Zur Überwachung der Zellvitalität erfolgt eine offline-Messung der Polarisierbarkeit der Zellen. Hinzu kommen die offline-Messung der CSB- und FOS/TAC-Werte, sowie die Carbonsäurenanalyse mittels HPLC.
- Die Prozesse werden unter dynamischen Betriebsbedingungen, z.B. mit variierenden Substratzusammensetzungen, Beladungsraten und Retentionszeiten sowie unterschiedlichen Rührerintensitäten (Leistungseinträge) hinsichtlich ihrer Flexibilität und Robustheit anhand der Messungen der oben genannten Parameter analysiert.
- Die Messung des gelösten Wasserstoffs erfolgt in der Flüssigphase in beiden Fermentern mit einem vom KSI eigens entwickelten Messsystem. Das System besteht aus einer membranfreien Extraktionskammer und speziell angepassten Metalloxid-Gassensoren, deren Messwiderstand von der Wasserstoffkonzentration im extrahierten Gas abhängt. Zur Gewährleistung der Langzeitstabilität hat die Messeinrichtung eine integrierte Wasserstoffkalibrierung.

Ergebnisse auf einen Blick

PUBLIKATIONEN:

- Artikel in Fachzeitschrift: Janesch E, Pereira J, Neubauer P, Junne S (2021): Phase Separation in Anaerobic Digestion: A Potential for Easier Process Combination? Front. Chem. Eng. 3. doi: 10.3389/fceng.2021.711971 (Janesch et al., 2021)
- Tagungsband: BioProScale, 2022: <https://biotechnologie.ifgb.de/>; (Bio) Process Engineering - a Key to Sustainable Development (<https://dechema.de/en/JT2022.html>)
- Tagungsband: Arbeitskreis Prozessanalytik 16. Doktorandenseminar 2022 (<https://arbeitskreis-prozessanalytik.de/veranstaltungen/16-doktorandenseminar-2022/>)
- Artikel in Fachzeitschrift: Janesch E, Retamal Marin R, Oelßner W, Zosel J, Neubauer P, Junne S (2022): Flexibilization of Two-Phase Digestion under Dynamic Process Conditions through Monitoring of Dissolved Hydrogen. Chemie Ingenieur Technik 94, 1308. doi: 10.1002/cite.202255361 (Janesch et al., 2022)

AUSZEICHNUNGEN:

- Preise (z. B. Biogas-Innovationspreis, Gewinn Science-Slam): Vortragspreis Platz 1 beim 16. Doktorandenseminar 2022 des Arbeitskreis' Prozessanalytik, Titel: Messung von gelöstem Wasserstoff zur Flexibilisierung der Biogasproduktion, Autoren: Eike Janesch, Jens Zosel, Rodrigo Retamal Marin, Peter Neubauer, Stefan Junne

KONZEPT/MACHBARKEITSSTUDIE:

- Anlagenkonzept
- Informationskonzept
- Machbarkeitsstudie

ANLAGE:

- Technikumsanlage
- Laboranlage
- Anlagenteile / Systemkomponenten
- Verfahren
- Nachrüstung Bestandsanlage

DATEN & METHODEN:

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

MARKT:

- Patent
- Schutzrecht
- Markteinführung neuer Technologien (2 Zulassungen)
- Markteinführung neuer Komponenten (1 Zulassung)

WEITERE WICHTIGE ERGEBNISTYPEN

BZW. KONKRETISIERUNG

- Best-Practice Lösung
- Strategie
- Evaluation und/oder Validierung

Darstellung der Ergebnisse

ERGEBNIS A:

Das Reaktorsystem, bestehend aus einer getrennten hydrolytischen- und methanogenen Stufe, zeigt eine gute Robustheit und Flexibilität gegenüber dynamischen Prozessbedingungen. Im ersten Fermenter wurden bei pH-Werten von 4,0 bis 5,5 aus Maissilage und Stroh hohe Konzentrationen an Essig- (3 g/L) und Buttersäure (5 g/L) produziert. Diese Carboxylsäuren können einerseits als wertvolles Nebenprodukt extrahiert werden, oder andererseits als Substrat für den zweiten Fermenter genutzt werden. Fermentationen, in denen sowohl Butter- als auch Essigsäure akkumuliert, wird in der Literatur als besonders vorteilhaft für

REAKTORPERFORMANCE BEI DYNAMISCHEN BETRIEBSBEDINGUNGEN:

- Bis zu 10 g/L an kurzkettigen Carboxylsäuren im Ablauf des hydrolytischen Fermenters, hauptsächlich Essig- und Buttersäure
- Steigerung der Methanausbeuten um bis zu 50 % durch Dünnschlammrezirkulation
- Keine Verringerung der Methanausbeuten durch Substitution von bis zu 50 % der Maissilage durch Stroh als Reststoff-Substrat
- Methangehalte im Biogas von über 60 % bei einer Produktion von bis zu 200 mL CH₄/gCSB
- Verringerung der Retentionszeit von 14 auf 7 Tage möglich, dank separater Hydrolyse

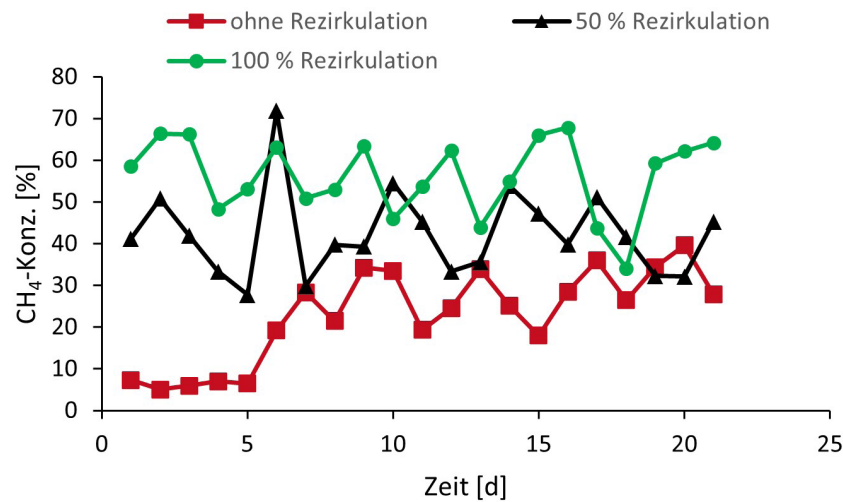
zweistufige anaerobe Prozesse angesehen, siehe u.a. (Menzel et al., 2020). Trotz der Buttersäureakkumulation im ersten Reaktor führt eine Zudosierung im zweiten nicht zu einer klassischen Inhibition durch Versäuerung.

Zur Steigerung der Methanausbeute im zweiten Fermenter wurde die Dünnschlammrezirkulationsmenge in beiden Rührkessel-Fermentern variiert, bei ansonsten identischen Versuchsbedingungen. Dazu wurden Experimente mit reiner Maissilage ohne, mit 50 und mit 100 % Rezirkulationsvolumen durchgeführt. 100 % Rezirkulationsvolumen heißt in diesem Fall: Das Entnahmenvolumen für die Rückführung entspricht dem Fütterungsvolumen des jeweiligen Reaktors mit neuer Substratsuspension (bei 50 % Rezirkulation werden dementsprechend 50 % des Fütterungsvolumens für die Rückführung entnommen). Anschließend wird der Dünn- vom Dickschlamm getrennt und der Dünnschlamm wird wieder in den Reaktor geführt. Da die zurückgeführte Menge (Dünnschlamm) dem jeweiligen Reaktor bei der Ernte zusätzlich entnommen wird, ändert sich die hydraulische Verweilzeit insgesamt nicht.

Der Dickschlamm wird zusammen mit der restlichen Ernte aus dem jeweiligen Reaktor in den zweiten Reaktor überführt (nach der ersten Stufe) bzw. dem Fermentersystem entnommen (nach der zweiten Stufe). Das Volumen entspricht dabei dem Fütterungsvolumen an neuer Substratsuspension, so dass sich die Füllstände in den Fermentern nicht ändern. Durch die Rezirkulation erhöht sich die Konzentration an Mikroorganismen im Zulauf des ersten Reaktors im Gegensatz zum Referenzzustand, da diese vermehrt im Dünnschlamm vorliegen, während sich im zweiten Reaktor gleichzeitig die Trockensubstanz etwas erhöht. Während ohne die installierte Dünnschlammrezirkulation Methangehalte von ca. 40 % erreicht wurden, konnte diese bei einem Rezirkulationsvolumen von 100 % auf über 60 % gesteigert werden, wie in Abbildung 1 zu sehen ist. Durch die Dünnschlammrezirkulation lässt sich in den Laborreaktoren demnach bis zu 50 % mehr Gesamtenergie aus dem Substrat gewinnen. Die in Abbildung 1 sichtbaren Schwankungen im Methangehalt sind fütterungsbedingt und gewünscht, um die flexible Methanproduktion im System zu zeigen. Nach der Einleitung des Carboxylsäurereichen Substrats steigt die Methanproduktion in der zweiten Stufe des Fermenter-Systems innerhalb einer Stunde um bis über 50% an. Dies lässt eine flexible Biogasbereitstellung zu.

VERSUCHSBEDINGUNGEN	
ZUR REZIRKULATION:	
■ Substrat: Maissilage	■ Fütterung/Ernte: mind. 2 mal pro Woche
■ Beladungsrate: 1,4 gCSB/(L d)	■ Trockenmassegehalt: 5 %
■ Retentionszeit: 14 d	■ Dünnschlammrezirkulation: variiert

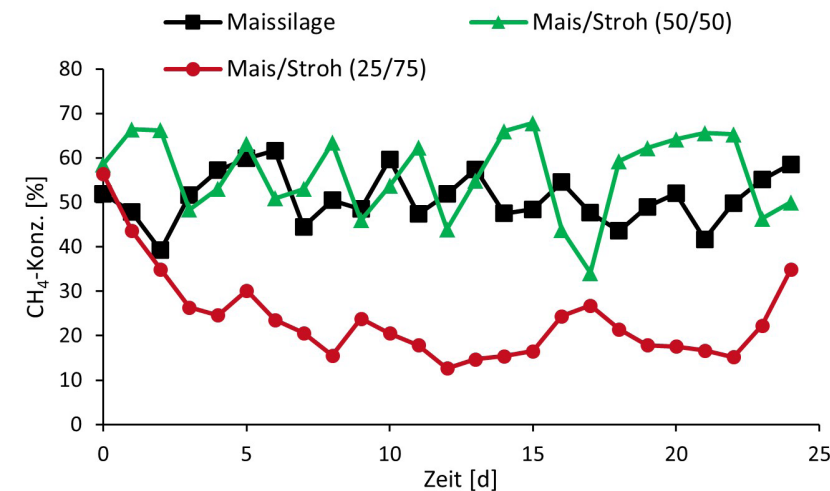
Abbildung 1:
Methangehalt im Biogas bei unterschiedlichen Dünnschlammrezirkulationsmengen in der methanogenen Prozessstufe
(© TU Berlin)



Weiterhin wurde ein dynamischer Primärsubstrateinsatz in der hydrolytischen Stufe und die Auswirkungen auf die Syntheseleistung untersucht. Dazu wurden Experimente mit unterschiedlichen Verhältnissen an Maissilage und Stroh durchgeführt und anhand der Methankonzentration im Biogas analysiert. Ausgangspunkt der Versuchsreihe war der Einsatz von 100 % Maissilage. Anschließend wurde ein Teil der Maissilage (bis zu 75 % (w/w)) schrittweise durch Stroh ersetzt. Die Robustheit der gewählten Prozessführung (u.a. die Dünnschlammrezirkulation) ermöglicht auch bei Strohgehalten von 50 % gleichbleibende Methangehalte im Biogas (siehe Abbildung 2). Auch das Produktionsvolumen an Biogas wurde nicht vermindert. Bei einem Strohanteil von 75 % (w/w) im Substrat ging die Methanproduktion um 50 % zurück.

VERSUCHSBEDINGUNGEN	
ZUR SUBSTRATVARIATION:	
■ Substrat: Maissilage/Stroh	■ Fütterung/Ernte: mind. 2 mal pro Woche
■ Beladungsrate: 1,2-1,5 gCSB/(L d)	■ Trockenmassegehalt: 7 %
■ Retentionszeit: 14 d	■ Dünnschlammrezirkulation: 100 %

Abbildung 2:
Methangehalt im Biogas bei unterschiedlicher Substratzusammensetzung
(© TU Berlin)



Die Methanausbeute aus dem Mais-Stroh-Gemisch (50/50) betrug bis zu 200 mL/gCSB und entspricht damit vergleichbaren Werten aus der Literatur (COLUSSI et al., 2013). In weiteren Experimenten konnten dank der zweistufigen Verfahrensführung ähnliche Methangehalte und -ausbeuten auch bei Retentionszeiten von 7 Tagen beobachtet werden (Werte nicht dargestellt).

ERGEBNIS B:

GELÖSTWASSERSTOFFMESSUNG IN DEN LABORFERMENTERN:

- Schnelle und präzise Antwort der Messeinrichtung auf Wasserstoff in wässrigen Lösungen
- Erster erfolgreicher Test der Messeinrichtung im anaeroben Prozess
- Rasche und starke Antwort auf Prozessänderungen
→ Vorteile gegenüber konventioneller Abgasmessung
- Verhinderung von biofilmbedingten Partialdruckgefällen in der Gasphase durch Wasserspülung
- Langzeitstabile Messung von Wasserstoff (> 4 Wochen) durch Verzicht auf Membran
- Interne Sensor-Kalibrierung mit Wasserstoffgas
- Messbereich und Ansprechzeit des Sensors: 0,1 – 10.000 ppmv; $t_{90} < 10$ s

Abbildung 3:
Fluidische Verbindungen für die Ansteuerung der Gelöstgassensoren GS1/2 mit integrierten Metalloxid-Gassensoren MOX1/2, MFC= Massendurchflussregler, H₂O=Gasbefuchtung, EK= Extraktionskammer, GM= Gärmedium, Vxx= Ventile für Gaseinlass, Gasauslass, Messgasdiffusion, Wasserspülung und Druckentlastung. (© KSI Meinsberg)

Die Partner TUB und KSI haben das Messsystem zur Gelöstwasserstoffmessung erfolgreich in der hydrolytischen und methanogenen Prozessstufe des Laborfermenter-Systems etabliert. Eine schematische Darstellung ist in Abbildung 3 zu sehen. Die Messtechnik wurde zur Einrichtung einer flexiblen Biogasproduktion im zweiten Fermenter optimiert und schließlich erfolgreich eingesetzt.

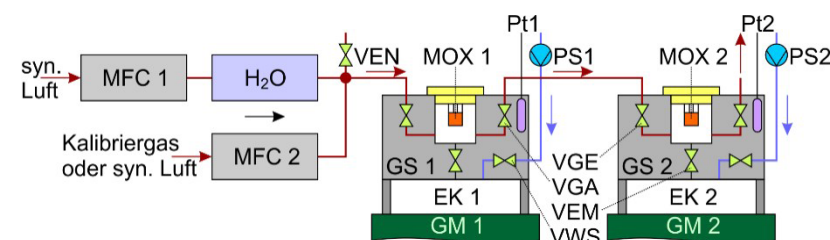
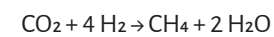
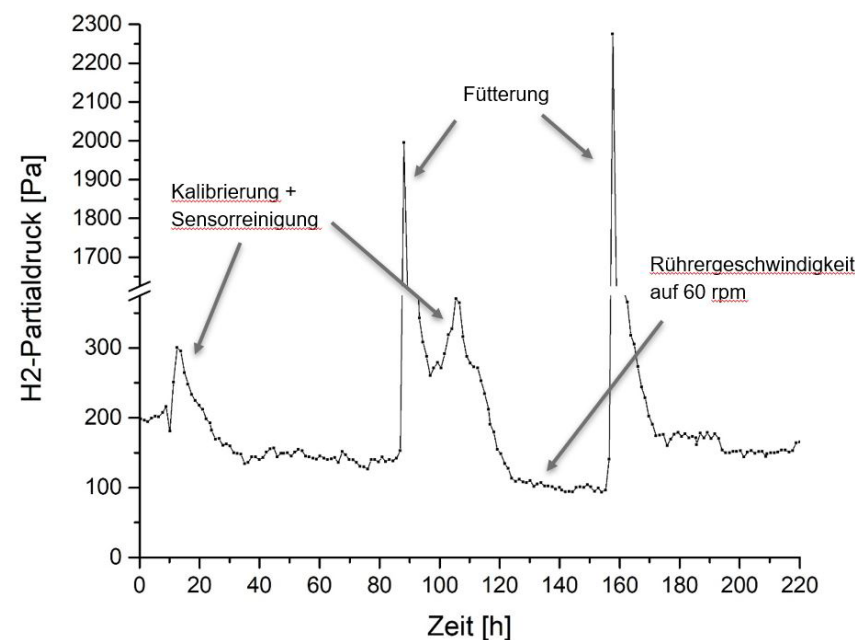


Abbildung 4 zeigt eine dynamische Wasserstoffmessung mit dem eigens entwickelten Messsystem in der methanogenen Stufe. Die Kalibrierung erfolgte jeweils mit 50 ppm Wasserstoffgas in befeuchteter synthetischer Luft. Bei der Fütterung wurde die wasserstoffreiche Ernte aus der Hydrolysestufe in den Methanreaktor dosiert, was zu einem starken Anstieg im gemessenen Wasserstoffpartialdruck führte. Der Wasserstoff wird in der methanogenen Stufe zusammen mit Kohlendioxid in Methan umgewandelt:



- (1) Die Messeinrichtung wurde in Kombination in den Rührkesselreaktoren bei unterschiedlichen TS-Gehalten erfolgreich betrieben.

Abbildung 4:
Von der Messeinrichtung
aufgezeichneter Wasserstoff-
partialdruck im methanogenen
Fermenter (© TU Berlin)



Herausforderungen

Eine große Herausforderung innerhalb des Projekts stellt der interspezies-Wasserstofftransfer zwischen den Produzenten (hydrolytische und acidogene Bakterien) und den Verbrauchern (methanogene Archaeen) dar. Wasserstoff weist eine sehr geringe Löslichkeit in Wasser auf (19,4 mL/LH₂O bzw. 1,6 mg/LH₂O bei 20 °C und 1 bar Umgebungsdruck) (GESTIS-Stoffdatenbank, 2022) und geht nach der Entstehung in flüssigen Medien rasch in die Gasphase über. Die Archaeen können allerdings nur den gelösten Wasserstoff für die Methanogenese verwenden. Bei der Reaktorinstallation wurde deshalb auf eine besonders hohe Dichtigkeit geachtet, damit der Verlust des flüchtigen Wasserstoffs aus dem System möglichst gering gehalten werden kann. Ein ausreichender Wasserstofftransfer von der ersten in die zweite Stufe ist darüber hinaus vorteilhaft, da die hydrolytischen und acidogenen Bakterien ihren eigenen Stoffwechsel (Propion- und Buttersäureoxidation) bei höheren Wasserstoffkonzentrationen (>10 Pa bzw. >100 Pa) partiell hemmen und es zu einer Versäuerung des Fermenters kommen kann (Thauer et al., 2008). Konzentrationen unterhalb von 10 Pa wirken andererseits limitierend

Nach der ersten Fütterung (90 h) wurde die Rührerintensität zur nächsten Fütterung (160 h) von 50 rpm auf 60 rpm erhöht. Aufgrund der unteren Messgrenze von weniger als 10 Pa lassen sich mit der Messeinrichtung extrem niedrige Wasserstoffkonzentrationen erfassen und dadurch eine Wasserstofflimitierung der hydrogentrophen Methanogenese voraussagen. Dies ist mit konventionellen Abgassensoren nicht möglich. Die interne Kalibrierung der Sensoren erlaubt eine langzeitstabile Wasserstoffmessung.

Ausblick

Das zweistufige Fermenter-System verfügt über eine große Flexibilität hinsichtlich der Gasproduktion und des Substrateinsatzes. Durch die Phasenseparation lassen sich auch schwerer zu hydrolysierende Substrate effizient verwerten. Die Dünnschlammrezirkulation zur Stabilisierung des mikrobiellen Konsortiums und zur Steigerung der Energieproduktion (in den Laborfermentern bis zu 50%) lässt sich mit begrenztem Aufwand auch in Bestandsanlagen implementieren.

Die entwickelte Messeinrichtung für Gelöstwasserstoff bietet ein breites Spektrum an Einsatzmöglichkeiten für zukünftige Anwendungen, bei

Die Messeinrichtung für gelöste Gase verfügt über eine automatische Wasserspülung, um Biofilme innerhalb der Extraktionseinheit zu verhindern. Diese kann aufgrund der geringen Größe der Laborreaktoren allerdings nicht eingesetzt werden, da es durch den zusätzlichen Wassereintrag zu Verdünnungseffekten kommen würde. Dadurch muss auf eine händische Reinigung der Sensoren (inklusive Ausbau) zurückgegriffen werden. Für den zukünftigen Einsatz in größeren Anlagen spielt dieses Problem keine Rolle.

denen grüner Wasserstoff zum Einsatz kommt, z.B. Power-to-Gas Applikationen. Ein Nachfolgeprojekt, das die Weiterentwicklung und weitere prozesstechnische Erprobung der Messeinrichtung in einem Zusatzmodul zur Verwertung von Wasserstoff miteinschließt, befindet sich in der Planung. Aufgrund der großen Marktrelevanz ist eine wirtschaftliche Vermarktung der Messeinrichtung geplant.

Weitere Informationen

■ [Steckbrief des Projekts >>](#)

Literatur

Colussi I, Cortesi A, Del Piccolo C, Gallo V, Rubesa Fernandez A S, Vitanza R (2013): Improvement of Methane Yield from Maize Silage by a Two-stage Anaerobic Process. In: ICheaP11- Special ISSUE 11th International Conference on Chemical and Process Engineering: 2-5 June 2013, Milan, Italy (Florence: Associazione italiana di ingegneria chimica), 151–156.

GESTIS-Stoffdatenbank (2022): Daten zu Wasserstoff. Accessed November 21, 2022, <https://gestis.dguv.de/data?name=007010>

Janesch E, Pereira J, Neubauer P, Junne S (2021): Phase Separation in Anaerobic Digestion: A Potential for Easier Process Combination? Front. Chem. Eng. 3. doi: 10.3389/fceng.2021.711971

Janesch E, Retamal Marin R, Oelßner W, Zosel J, Neubauer P, Junne S (2022): Flexibilization of Two-Phase Digestion under Dynamic Process Conditions through Monitoring of Dissolved Hydrogen. Chemie Ingenieur Technik 94, 1308. doi: 10.1002/cite.202255361

Menzel T, Neubauer P, Junne S (2020): Role of Microbial Hydrolysis in Anaerobic Digestion. Energies 13, 5555. doi: 10.3390/en13215555

Peters L, Uhlenhut F, Biernacki P, Steinigeweg S (2018): Current status of the flexibilization concepts of biogas plants to cover the residual load [in German]. Chem Eng Technol 90, 36–46. doi: 10.1002/cite.201700101

Stams A. J. (1994): Metabolic interactions between anaerobic bacteria in methanogenic environments. Antonie Van Leeuwenhoek 66, 271–294. doi: 10.1007/BF00871644

Thauer RK, Kaster A-K, Seedorf H, Buckel W, Hedderich R (2008): Methanogenic archaea: ecologically relevant differences in energy conservation. Nat Rev Microbiol 6, 579–591. doi: 10.1038/nrmicro1931

Van D P, Fujiwara T, Leu Tho B, Song Toan P P, Hoang Minh G (2020): A review of anaerobic digestion systems for biodegradable waste: Configurations, operating parameters, and current trends. Environ Eng Res 25, 1–17. doi: 10.4491/eer.2018.334

EXKURS // WASSERSTOFF

Strategie zur Wasserstoff-Produktion

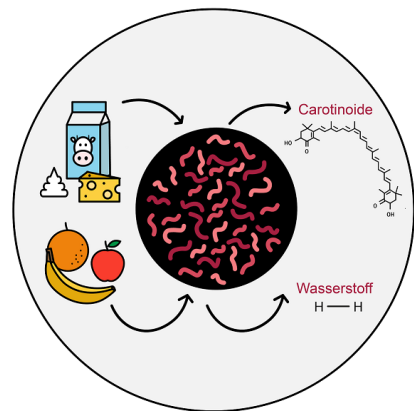


RhoTech

Caroline Autenrieth, Robin Ghosh

Neue Strategie zur Wasserstoff-Produktion aus Frucht- und Molkerei-Abfällen mit Hilfe von Purpurbakterien

Zusammenfassung

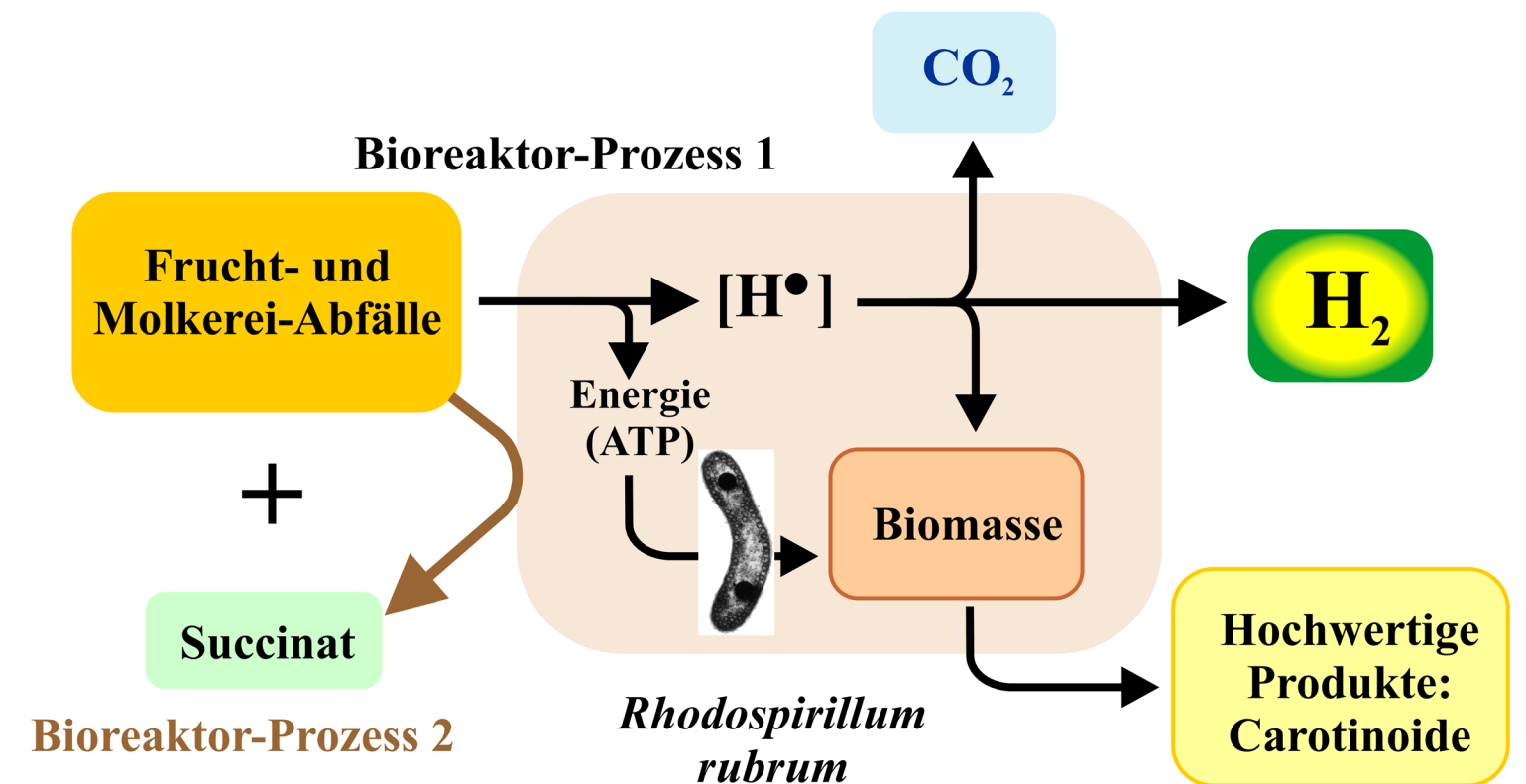


Alle photosynthetischen Mikroorganismen haben die Fähigkeit Wasserstoff zu produzieren. Die Wasserstoffproduktion dient dabei als »Sicherheitsventil« für überschüssige Elektronen, wenn bei zu hoher Lichteinstrahlung die photosynthetischen Membranen in einen über-reduzierten Zustand kommen. Mit Hilfe spezieller Enzyme werden die Elektronen auf Protonen übertragen und so in Form von Wasserstoff in die Umgebung abgegeben. Dieser eigentlich höchst effiziente Mechanismus konnte bislang allerdings nie für Biowasserstoffproduktion im industriellen Maßstab verwendet werden, da die Notwendigkeit von ausreichender Beleuchtung großskalig technisch nicht erreichbar ist. Somit ist ein Up-scaling von Bakterien- oder Algen-Kulturen in einen Kubikmeter-Maßstab nahezu unmöglich. Unser Ansatz umgeht dieses Problem: wenn das Purpurbakterium *Rhodospirillum rubrum* in einem speziellen Nährmedium, das eine hohe Konzentration an Fruktose enthält, im Dunkeln angezüchtet wird, häufen sich (wie beim photosynthetischen Wachstum) in seinen Membranen Elektronen an, was wiederum als Signal zur Wasserstoffproduktion dient. Diesen »Dunkel-Photosynthese«-Wasserstoffproduktionsmechanismus nutzen wir zum Up-scaling der Biowasserstoffproduktion in den industriellen Maßstab.

Ziele

In unserem RhoTech-Projekt wollen wir die Biowasserstoffproduktion mit Hilfe photosynthetischer Purpurbakterien aus der Laborumgebung in einen technischen Maßstab überführen. Dabei nutzen wir die besondere Fähigkeit des Purpurbakteriums *Rhodospirillum rubrum*, mit Hilfe eines speziellen Nährmediums auch im Dunkeln eine Produktivität zu erzielen, die sonst nur unter photosynthetischen Bedingungen mit Licht erreicht wird - ein Prozess, den wir (etwas Augenzwinkernd) »Dunkel-Photosynthese« nennen (Abbildung 1). Der Hauptbestandteil des Nährmediums ist Fruktose, die in großen Mengen aus Abfällen aus der Lebensmittelindustrie gewonnen werden kann. Im Gesamtkonsortium sollten sowohl die physiologischen, genetischen und verfahrenstechnischen als auch die wirtschaftlichen Gesichtspunkte des Gesamtprozesses beleuchtet werden.

Caroline Autenrieth: »Mit Hilfe der »Dunkel-Photosynthese« kann der Sprung aus dem »Elfenbeinturm« in eine industrielle Anwendung photosynthetischer Mikroorganismen vollbracht werden. Mit unserem »photosynthetischen« Biowasserstoff aus Frucht- und Molkereiabfällen möchten wir einen nachhaltigen Beitrag zur Bewältigung der Klima- und Energiekrise leisten.«



FKZ-Nr.: 03EI5407
 Laufzeit: 01.01.2020 — 30.06.2023
 Zuwendungssumme: 1.011.000 €

KOORDINATION:
 Universität Stuttgart, Institut für Biomaterialien und biomolekulare Systeme (IBBS), Abt. Bioenergetik
 Prof. Dr. Robin Ghosh, Dr. Caroline Autenrieth
 Pfaffenwaldring 57, 70569 Stuttgart
<https://www.bio.uni-stuttgart.de/bioenergetik>

PROJEKTL EITUNG:
 Prof. Dr. Robin Ghosh
 +49 (0)711 685 65040
robin.ghosh@bio.uni-stuttgart.de

Direkte Ansprechperson
 Dr. Caroline Autenrieth
 +49 (0)711 685 65048
caroline.autenrieth@bio.uni-stuttgart.de

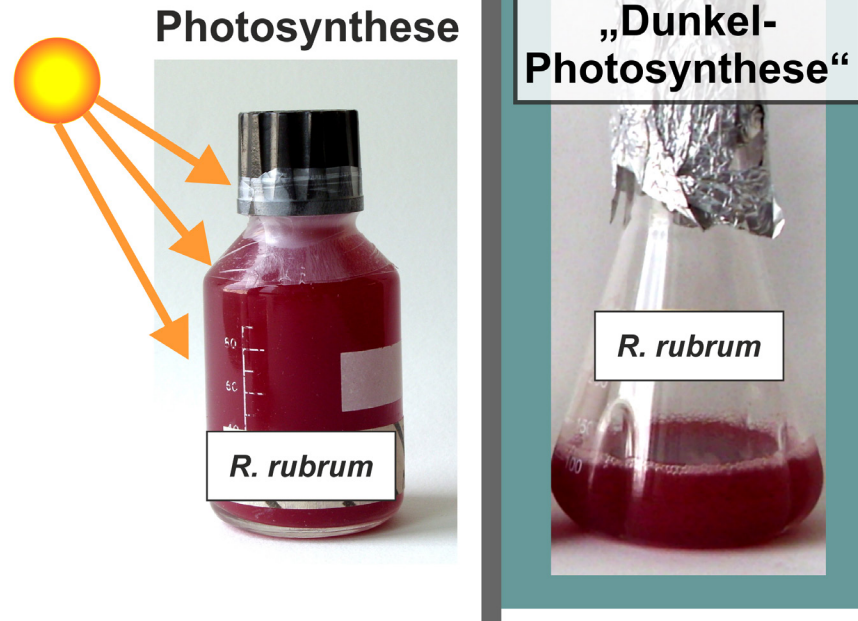
PARTNER:
 Hochschule Biberach (HBC)
 Institut für Angewandte Biotechnologie
 Prof. Dr. Hartmut Grammel
 Hubertus-Liebrecht-Str. 35
 88400 Biberach
<https://www.hochschule-biberach.de/institut-fuer-angewandte-biotechnologie>

Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung (IPA), Bereich Ressourceneffiziente Produktion
 Prof. Dr. Alexander Sauer
 Nobelstraße 12
 70569 Stuttgart
<https://www.ipa.fraunhofer.de/>

KE-Technologie GmbH
 Dr. Patrick Schäfer
 Pfaffenwaldring 31
 70569 Stuttgart
<https://ke-gmbh.de/>

Abbildung 1:

Bei der »Dunkel-Photosynthese« im M2SF-Nährmedium (Chosh et al. 1994) werden im Dunkeln alle Gene, die üblicherweise für photosynthetisches Wachstum erforderlich sind (darunter auch die Gene für die H₂-produzierenden Enzyme), eingeschaltet.
(© C. Autenrieth, R. Ghosh, IBBS.)



Themen schwerpunkte

- Stamm- und Medium-Optimierung
- Quantifizierung physiologischer Parameter, einschließlich H₂-Produktionskapazität
- Nutzung Fruktose-haltiger Rest- und Abfallstoffe
- Verfahrenstechnische Optimierungen (Fed Batch, Belüftung, Zusatzbeleuchtung mit Niedrigenergie-LEDs zur Steigerung der Gesamt-Effektivität)
- Wirtschaftliche Betrachtungen: Rohstoffpotentiale, Kosten, Nutzungsszenarien

Kernbotschaften

- Photosynthetische Purpurbakterien können biogene Rest- und Abfallstoffe als Nährsubstrat nützen und damit große Mengen an Wasserstoff produzieren.
- Problem: effektive Lichtdurchdringung im industriellen Maßstab technisch schwer umsetzbar.
- Lösung: »Dunkel-Photosynthese«: unser Purpurbakterium (*R. rubrum*) kann »ausgetrickst« werden, so dass es im Dunkeln »photosynthetische« Mengen an Wasserstoff produziert.
- Hauptbestandteil des »Dunkel-Photosynthese«-Nährmediums ist Fruktose, die aus Frucht- und Gemüsetrester aus der Fruchtsaftproduktion gewonnen wird.

summary (engl.)

All photosynthetic organisms can produce molecular hydrogen. In general, hydrogen production acts as a safety valve whereby high light intensities produce excess electrons, causing overreduction of the photosynthetic membranes and inhibiting their function. Overreduction is mitigated by special enzymes which combine elec-

key messages (engl.)

trons and protons to form hydrogen. Notably, for decades this highly efficient process has resisted realization for biohydrogen production, since it is impossible to efficiently illuminate technical-scale bacterial or algal cultures. We have developed an alternative strategy which eliminates the light requirement but still maintains the photosynthetic potential for hydrogen production. We have shown that when the photosynthetic bacterium *Rhodospirillum rubrum* is grown in the dark in a special high fructose medium, excess electrons are accumulated at »photosynthetic« levels. This reducing potential activates »photosynthetic« metabolic pathways, which then allow high levels of hydrogen production. This »dark photosynthesis«-mediated hydrogen production can be easily upscaled to technical levels required for industrialization.

- Photosynthetic purple bacteria can utilize wastes and residues arising from biological sources as substrates for large-scale biohydrogen production.
- Problem: efficient illumination of industrial-scale cultures difficult if not impossible to achieve.
- Solution: »Dark photosynthesis«: the purple bacterium *R. rubrum* can be metabolically »tricked« so that large amounts of »photosynthetic« hydrogen can be produced.
- The main component (and substrate) of the »dark photosynthesis« culture medium is fructose, which can be obtained in large amounts from waste products from fruit juice and milk production industries, respectively.

Methodik Maßnahmen

- **UNIVERSITÄT STUTTGART:** Genetische Optimierung der *R. rubrum* H₂-Produktionsstämme: Mutagenese und Screening. Ziel: erhöhte H₂-Produktion bei gleichzeitiger Minimierung der Ausscheidung unerwünschter Gärprodukte. Synthetisch biologische Steuerung von H₂-Produktions-Stoffwechselwegen. Optimierung der Nährmedienzusammensetzung unter Einbeziehung biogener Rest- und Abfallstoffe.
- **HOCHSCHULE BIBERACH:** Charakterisierung der H₂-Produktion und Stoffwechselprofile in mittel-skaligen Fermentationsanlagen. Prozessoptimierung (insbesondere Zufütterung Fruktose-haltiger Reststoffe aus der Lebensmittelindustrie).
- **FRAUNHOFER-INSTITUT IPA:** Abschätzung des verwertbaren Biomasseaufkommens und des damit einhergehenden Bioenergiepotenzials für den »Dunkel-Photosynthese« H₂-Produktionsprozess. Produktionstopologien und Nutzungsszenarien. CAPEX und OPEX-Kosten. Erstellung von Handlungsempfehlungen für eine erfolgreiche Markteinführung.
- **KE-TECHNOLOGIE GMBH:** Verfahrenstechnische Optimierung der Belüftung und Ergänzungsbeleuchtung. Etablierung eines Mess- und Regelsystems. Aufbau eines Anlagen-Prototyps.

Ergebnisse auf einen Blick

Darstellung der Ergebnisse

PUBLIKATIONEN:

- Autenrieth C, Shaw S, Ghosh R (2021): New approach for the construction and calibration of gas-tight setups for biohydrogen production at the small laboratory scale. In: *Metabolites* Bd. 11, S. 667. doi: 10.3390/metabo11100667.
- Full J, Merseburg S, Miehe R, Sauer A (2021): A new perspective for climate change mitigation - Introducing carbon-negative hydrogen production from biomass with carbon capture and storage (HyBECCS). In: *Sustainability* Bd. 13, S. 4026. doi: 10.3390/su13074026.
- Mitwirkung bei der Stellungnahme des BMWi-Forschungsnetzwerks Bioenergie (2021): Biomasse und Bioenergie als Teil der Wasserstoffwirtschaft. URL: <https://www.energetische-biomassenutzung.de/publikationen/stellungnahmen>

ETABLIERUNG VON MESSMETHODEN ZUR QUANTIFIZIERUNG REPRODUZIERBARER DATEN

Obwohl seit mehreren Jahrzehnten auf dem Gebiet »Biowasserstoff« geforscht wird, werden Wissenschaftler, die sich hier neu etablieren möchten, mit den Problemen konfrontiert, dass (1) innerhalb des akademischen »Elfenbeinturms«, keine einheitlichen Größen verwendet werden, um das H₂-Produktionspotential verschiedener Mikroorganismen zu beschreiben und somit verschiedene Ansätze miteinander vergleichen zu können, und dass (2) insbesondere beim photosynthetisch erzeugten BioH₂ der Bezug zur realen Anwendung fehlt, und eine konkrete technische und wirtschaftliche Umsetzung nicht einmal in Betracht gezogen wird. Das Arbeiten mit H₂ ist für kleinere, Grundlagenforschungs-orientierte Biolabore eine Herausforderung. Ein Hauptaugenmerk muss dabei darauf gelegt werden, dass die Kulturgefäße und die Schlauchverbindungen zur Gasprobenentnahme und -Analyse H₂-dicht sind. Desweiteren muss auf ausreichenden EX-Schutz geachtet werden. Zu Beginn der Projektlaufzeit haben wir daher ein modulares System etabliert, das diese Voraussetzungen erfüllt, und in einer Biolabor-Umgebung leicht einsetzbar ist. Im Experiment wurden 4 mmol H₂ pro Liter Kultur über einen Zeitraum von ca. drei Tagen produziert (vgl. Abbildung 2; siehe auch: Autenrieth & Ghosh 2021). Diese Ausbeute war der Ausgangspunkt für weitere Optimierungsschritte (siehe unten).

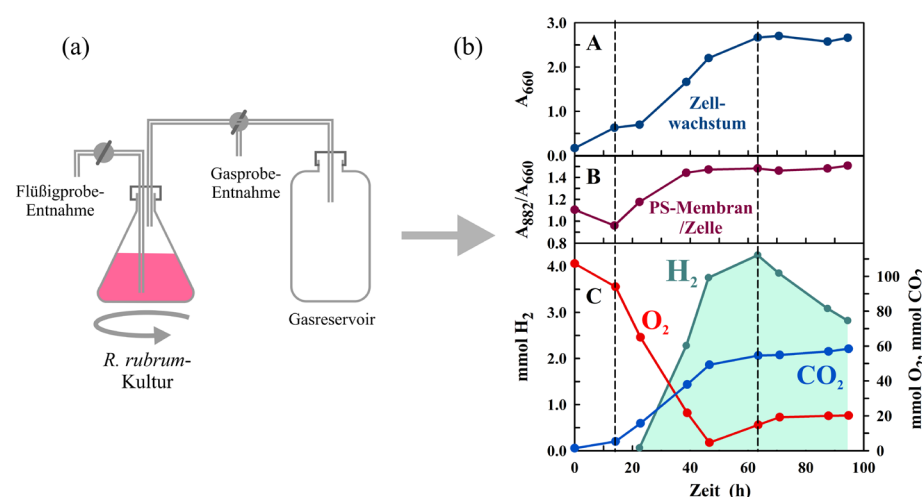


Abbildung 2:

a: Experimentelles Setup für H₂-Produktion im Biolabor.
b: Zellwachstum, Produktion photosynthetischer Membranen und Gasproduktion im Experiment
(© nach Autenrieth & Ghosh 2021)

VERFAHRENSTECHNISCHE OPTIMIERUNG FÜR DEN TECHNISCHEN MASSSTAB

Der »Dunkel-Photosynthese«-Wachstumsmodus ist insofern prozesstechnisch anspruchsvoller, dass es sich um einen semi-aeroben Prozess (pO₂ < 0,3 %) handelt, d.h. es muss belüftet werden. Zusammen mit unseren Partnern von der KE-Technologie GmbH wurde ein custom-built Fermenter mit einer Belüftungsplatte aus poröser Keramik gebaut, die den hohen Ansprüchen an die Belüftung der Kultur (d.h. sehr kleine Gasblasen für eine effiziente O₂-Aufnahme, so dass das Produktgas neben H₂ nahezu keinen O₂ mehr enthält) gerecht wird. Außerdem wurde von der KE-Technologie GmbH ein Niedrigenergie-LED-Beleuchtungssystem entwickelt. Diese Zusatzbeleuchtung dient nicht zur Energieversorgung der Kultur (wie im photosynthetischen System) sondern zur Aktivierung des Haupt-Enzyms für H₂-Produktion, der Nitrogenase, über spezielle Regulationsmechanismen.

GENETISCHE OPTIMIERUNG VON H2-PRODUKTIONSSTÄMMEN

Beim oben gezeigten Experiment war mit dem Wild-Typ gearbeitet worden, dessen Nitrogenase unter den angewendeten Wachstumsbedingungen noch nicht angeschaltet gewesen war (wegen zu hoher Ammoniumkonzentrationen im verwendeten M₂SF-Medium). Im Projekt haben wir begonnen, diesen Regulationsmechanismus genetisch auszuschalten, so dass die Art der Stickstoffquelle keinen Einfluss auf die H₂-Produktion mehr hat. Desweiteren wurde eine von uns entdeckte H₂-Überproduktionsmutante so modifiziert, dass sie patentierbar ist. Auch das aus organischen Rest- und Abfallstoffen verfügbare Substratspektrum wurde durch den Einbau eines Glucose-Transporters erweitert, und Stoffwechselwege, die zur unerwünschten Produktion von Gärprodukten führen, werden nach und nach eliminiert.

NUTZUNG VON FRUKTOSE-HALTIGEN REST- UND ABFALLSTOFFEN AUS DER LEBENSMITTELINDUSTRIE

In Zusammenarbeit mit der Arbeitsgruppe von Prof. Grammel wurden verschiedene Abfallströme aus der Frucht-, Gemüse- und Milchverarbeitung auf ihre Verwertbarkeit als Substrate für unseren »Dunkel-Photosynthese«-H₂-Produktionsprozess geprüft. Unsere Ergebnisse sind vielversprechend: insbesondere aus Frucht-Trester lassen sich große Mengen an Fruktose extrahieren, die im Prozess eingesetzt werden können (Abbildung 3), und auch Lactat-haltige Molkereiabfälle sind ein gutes Substrat für das Wachstum von *R. rubrum*.

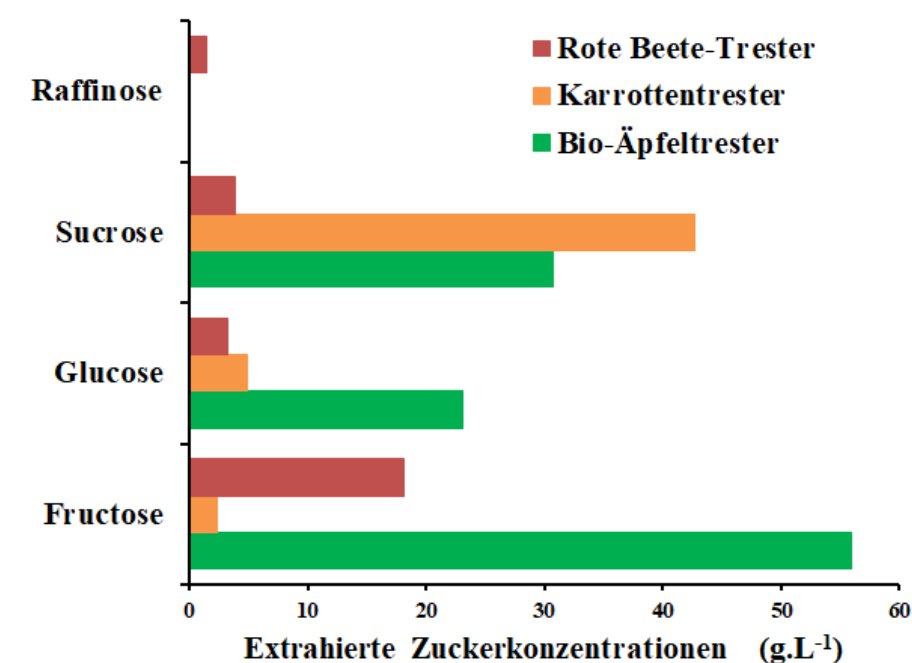


Abbildung 3:
Analyse des Zuckergehalts in wässrigen Extrakten aus Frucht- und Gemüse-Trester
(© R. Ghosh, IBBS)

Herausforderungen

WIRTSCHAFTLICHKEITSBETRACHTUNGEN

Das Fraunhofer IPA analysiert die Vermarktungs- und Nachhaltigkeitsperspektiven des beschriebenen Verfahrens durch die Entwicklung und Bewertung von systemischen Integrationsszenarien. Diese dienen als Basis für Folgeprojekte im industriellen Umfeld.

Mit unserem Projekt möchten wir eine völlig neue Strategie zur biologischen H₂-Erzeugung in der deutschen Bioenergielandschaft (und später weltweit) etablieren. Es ist immer schwierig einen neuen biotechnologischen Produktionsorganismus aus der akademischen Forschung in die industrielle Anwendung zu überführen – ein Problem, dem sich alle Gruppen, die mit Purpurbakterien arbeiten, stellen müssen. Üblicherweise haben Projekte mit Purpurbakterien zusätzlich noch die erwähnten Schwierigkeiten im Zusammenhang mit einer effizienten Beleuchtung, die wir allerdings mit unserer »Dunkel-Photosynthese« umgehen. Die fast alle Bioenergieprojekte betreffende »Teller oder Tank«-Problematik kann auch für RhoTech eine Herausforderung sein. Allerdings verwenden wir nur Rest- und Abfallstoffe aus der Lebensmittelindustrie, die sonst nur als Abfall entsorgt werden würden. Oft stellt sich dennoch die Frage, ob genug Biomassepotential vorhanden ist. Hier ist zu bemerken, dass der »Mangel« an Biomasse oft nur darin begründet ist, dass die Entsorgung biologischer Abfälle billiger ist als ihre Weiterverwertung (z.B. zur Energiegewinnung). Um dieses Problem zu beheben, müsste der Stellenwert einer nachhaltigen Kreislaufwirtschaft, in der es so gut wie keine Abfälle gibt, erhöht werden. Hier sind die Politik und Wirtschaft – aber auch die ganze Gesellschaft, die es einfordern muss – gefragt!

Ausblick

Mit RhoTech haben wir den ersten Schritt zur Etablierung eines neuen Biowasserstoffproduktionsprozesses gemacht: die Partner aus den Natur-, Ingenieurs- und Wirtschaftswissenschaften haben sich zusammengefunden und eine gemeinsame Sprache entwickelt. Gegen Ende der Förderzeit haben wir einen lokalen Frucht- und Gemüsesafthersteller für unser Projekt gewinnen können, und wir planen (in einem beantragten Folgeprojekt) unsere Erkenntnisse nun zum Aufbau einer H₂-Produktionsanlage direkt auf dem Betriebsgelände anzuwenden (Abbildung 4). Ziel ist es, ein Leuchtturmprojekt umzusetzen, bei dem demonstriert werden soll, dass ein Lebensmittel-Betrieb mit Hilfe eigener biogener Reststoffe seine Energieversorgung absichern kann.

Literatur

- Autenrieth C, Shaw S, Ghosh R (2021): New approach for the construction and calibration of gas-tight setups for biohydrogen production at the small laboratory scale. In: *Metabolites* Bd. 11, S. 667. doi: 10.3390/metabo11100667.
- Ghosh R, Hardmeyer A, Thoenen I, Bachofen R (1994): Optimization of Sistrom medium for the semi-aerobic growth of *Rhodospirillum rubrum* with the maximal yield of photosynthetic membranes. In: *Applied Environmental Microbiology* Bd. 60, S. 1698-1700.

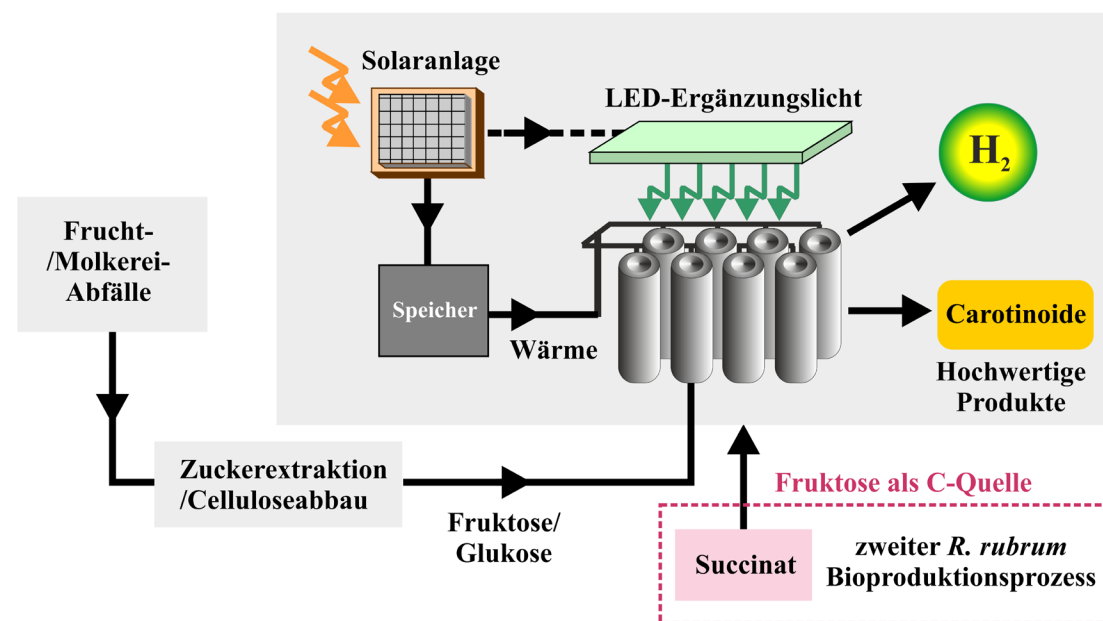


Abbildung 4:

Unsere Vision: Aufbau einer energieautarken
H₂-Produktionsanlage auf dem Betriebsgelände eines
lokalen Fruchtsaftherstellers (© R. Ghosh, IBBS)

Herausgebende

Daniela Thrän, Tina Händler

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 2021-2022,
Leipzig 2023.

Geschäftsführung

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

Redaktion

Tina Händler, Anna Flora Schade

Layout & Satz

Joshua Röbisch

Bilder

Titel: Joshua Röbisch, DBFZ; FH Münster; Witzenhausen-Institut
Diverse Bilder: sofern nicht am Bild vermerkt: © DBFZ.

Das DBFZ ist nicht verantwortlich für den Inhalt der eingereichten
Beiträge. Die Verantwortung für die Texte sowie der Bilder, Grafiken
und Tabellen liegen bei den Autoren.

Förderung

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

© 2023 DBFZ Deutsches Biomasseforschungszentrum
gemeinnützige GmbH

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

ISSN: 2701-1860 (online)
ISBN: 978-3-946629-94-8
DOI: 10.48480/hvyq-3t55

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Klimaschutz

Projektträger:



Begleitforschung:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages