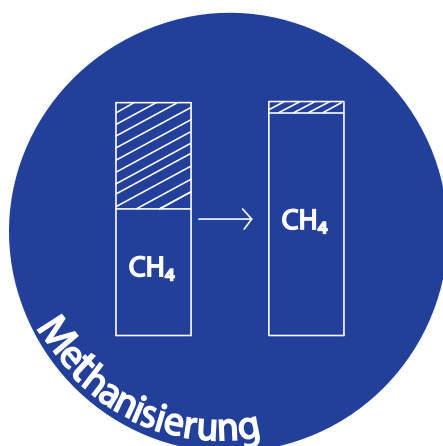




.....

Hochlastvergärung

Grünschnitt

Methanisierung

.....

3 Teilprojekte der Grünen Kaskade

Impressum

Herausgeber

FH Münster
Stegerwaldstraße 39
48565 Steinfurt



FH MÜNSTER
University of Applied Sciences

.....
Das Projekt Grüne Kaskade wird gefördert durch:



Ministerie van Economische Zaken
en Klimaat



Niedersächsisches Ministerium
für Bundes- und Europaangelegenheiten
und Regionale Entwicklung

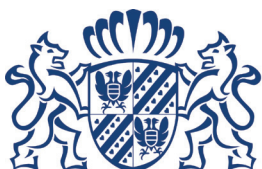
Ministerium für Wirtschaft, Innovation,
Digitalisierung und Energie
des Landes Nordrhein-Westfalen



provincie Drenthe

provinsje fryslân
provincie fryslân

provincie Overijssel



provincie
 groningen

Projektpartner

Lead:

FH Münster
Prof. Dr.-Ing. Christof Wetter
Stegerwaldstraße 39
48565 Steinfurt
Tel: +49 (0)2551/962-725
Mail: wetter@fh-muenster.de

Hochlastvergärung:

PlanET Biogastechnik GmbH
Up de Hacke 26
48691 Vreden
Deutschland
Tel: +49 (0) 25 64/39 50 - 0
Fax: +49 (0) 25 64/39 50 - 50
Mail: info@planet-biogas.com



Bio-energiecluster Oost-Nederland
Postbus 835
7500 AV Enschede
Niederlande
Tel: +31 (0) 53/4861195
Mail: coordinator@bioenergieclusterootsnederland.nl

bio-energie cluster
Oost-Nederland

Grünschnitt und Methanisierung:

WESSLING GmbH
Oststraße 7
48341 Altenberge
Deutschland
Tel: +49 (0) 2505/89 - 0
Mail: biogas@wessling.de



WESSLING
Quality of Life

HoSt
Themen 10
7521 PS Enschede
Niederlande
Tel: +31 (0) 53/460 9080
Mail: info@host-bioenergie.de



Inhalt | Übersicht

02 Impressum

03 Inhalt

04 Grüne Kaskade

06 Teilprojekte

08 Hochlastvergärung

18 Grünschnitt

26 Methanisierung

38 Kennzahlen

Die Grüne Kaskade

Das Ziel dieses Projektes war in der deutsch-niederländischen Projektregion den Ausbau der Bioökonomie durch die Verbesserung der Biomassenutzung entlang der gesamten Wertschöpfungskette voran zu bringen. Mit über 20 Projektpartnern hat sich das Projektkonsortium in insgesamt 12 Teilprojekten mit dem Thema Bioökonomie und unterschiedlichen Schritten der Biomassenutzung auseinandergesetzt. Neben niederländischen und deutschen Betrieben unterstützten Forschungseinrichtungen der Grenzregion den Kooperationsverbund. Einige der Teilprojekte setzten sich mit der Verbesserung und Weiterentwicklung von bestehenden Konzepten zur Vergärung von verschiedenen Biomassen auseinander. In diesem Kontext wurde ein Ringvergärer in Betrieb genommen und sich Regelenergie sowie mit modularen Optionen zum Refitting älterer Anlagen auseinandergesetzt. Die Gewinnung von Wertstoffen aus Reststoffen war ebenfalls ein Schwerpunktthema. In diesem Zusammenhang wurde die Erzeugung von porösen Kohlen aus verschiedenen Biomassen, die Anwendung der hydrothermalen Carbonisierung (HTC) sowie die Produktion von Wasserstoff aus kohlenhydrathaltigen Reststoffströmen untersucht. Darüber hinaus wurden auch die verschiedenen Nutzungspfade von Biogas betrachtet. Dies umfasst die Biogaserzeugung je nach Strombedarf, die Aufwertung von Biogas zu Biomethan, sowie die Nutzung in Form von Compressed Natural Gas (CNG) als Treibstoff für Fahrzeuge.

Die angestrebten Ziele und Ergebnisse des Projektes Grüne Kaskade können wie folgt zusammengefasst werden:

- Entwicklung innovativer und wirtschaftlich wertvoller Anwendungen für Biogas (z.B. on-demand Stromlieferung)
- Technologische Verbesserung der Biogastechnik durch Nach- und Umrüstung mit dem Ziel, die Rentabilität der Biogasanlagen zu erhöhen und die Produktionskosten zu reduzieren
- Behandlung von Gärresten mit dem Ziel, wertvolle Nährstoffe aus dem Gärrest zu gewinnen

- Behandlung von organischen Restströmen mit Mikroalgen, um wertvolle Nähr- und Inhaltsstoffe zu gewinnen (Feed und Food, Kosmetik, Energie)
- Nutzung von Reststoffströmen zur Produktion von Wertstoffen, so dass möglichst ein wirtschaftlich wertvolles Produkt erzeugt wird
- Vorbehandlungskonzepte für Inputströme wie zum Beispiel Gülle durch Abtrennung von Fraktionen und Behandlung mit alternativen Verfahrenskonzepten
- Erhöhung des Biogasertrages durch Anwendung von Vorbehandlungstechniken

Durch die interdisziplinäre Kooperation von deutsch-niederländischen Projektpartnern mit unterschiedlichen Kompetenzen und verschiedenen Arbeitsschwerpunkten hat sich ein Projektkonsortium zusammengefunden, dass sich ideal ergänzt hat. Durch die grenzüberschreitende Zusammenarbeit zwischen den Projektpartnern konnten wertvolle Erkenntnisse über Verwertungsmöglichkeiten von Reststoffen sowie der Optimierung von Anlagenkonzepten der Biogasanlagen gewonnen werden.

Die Teilprojekte „Methanisierung“, „Hochlastvergärung“ und „Grünschnitt“ wurden von den Projektpartnern HoSt, WESSLING GmbH, dem Bio-energiecluster Oost-Niederlande (BEON), der Firma PlanET Biogastechnik GmbH sowie der FH Münster (Federführer) bearbeitet. Die Ergebnisse, die im Rahmen dieser drei Teilprojekte gemeinsam von den Projektpartnern erarbeitet wurden, sind in dieser Broschüre mit einzelnen Artikel präsentiert.

GRÜNE KASKADE GROENE KASKADE



1. Regelenergie	Entwicklung von Datenregeln, Berechnungsregeln, neuen Spielregeln sowie die Organisation des Netzwerks aus Wissensträgern und Stakeholdern.
2. Ringvergärung	Entwicklung und Inbetriebnahme eines Ringvergärers: Eine Kombination von Pfropfströmungs- und Rührtank-Vergärer für Gülle und Mist.
3. Refitting	Entwicklung modularer Optionen für Refitting älterer Anlagen
4. Methanisierung	Aufwertung von Biogas zu Biomethan mittels biologischer Methanisierung  WESSLING Quality of Life  HOST BIO-ENERGY INSTALLATIONS  FH MÜNSTER University of Applied Sciences
5. Hochlastvergärung	Integration von Hochlastreaktoren in den Prozess der Biogaserzeugung zur Verbesserung der Vergärung von Substraten mit einem hohen Wasseranteil  bio-energie cluster Oost-Nederland  PlanET  FH MÜNSTER University of Applied Sciences
6. Tanken auf dem Hof	Nutzung von Biogas auf Hofebene als Kraftstoff, um den Transport nachhaltig zu gestalten.
7. Grünschnitt	Stoffliche Nutzung von Rest- und Abfallstoffen  WESSLING Quality of Life  HOST BIO-ENERGY INSTALLATIONS  FH MÜNSTER University of Applied Sciences
8. Poröse Kohlen	Für Wasserpflanzenmaterial, Schweinedung und Gärrest wird anhand der Herstellung von Biokohle ein Verwertungsweg aufgezeigt.
9. HTC	Eine HTC-ähnliche Prozessstufe wird hinsichtlich der Bedingungen und Vorteile gegenüber Hydrolyse bei erhöhten Temperaturen untersucht.
10. Fermentationstechnik	Prüfung eines Biogasverfahrens, das in einem vielstufigen System mit optimierter Bakterienkultur einen sehr hohen Umsatz schafft.
11. Valorisation	Biologische Prozesse und Techniken werden weiterentwickelt, die eine Valorisation und neue Wertschöpfung aus Reststoffen ermöglichen.
12. Projektmanagement & PR	Koordinierung liegt bei der Provincie Groningen; Fortschrittsüberwachung, Datenaustausch, Rückkopplung der Ergebnisse.

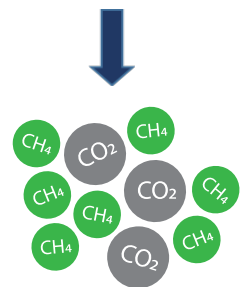
Die Teilprojekte



Hochlastvergärung

Mit hoher Auslastung Biogas aus Gülle erzeugen, das ist für konventionelle Biogasanlagen eine Herausforderung. Mit den Hochlast-Reaktoren konnte die Vergärung von Gülle deutlich effizienter betrieben werden. Das Ergebnis: Mehr Energie aus Gülle mit einem Methananteil von bis zu 70 Vol.-% im Produktgas.

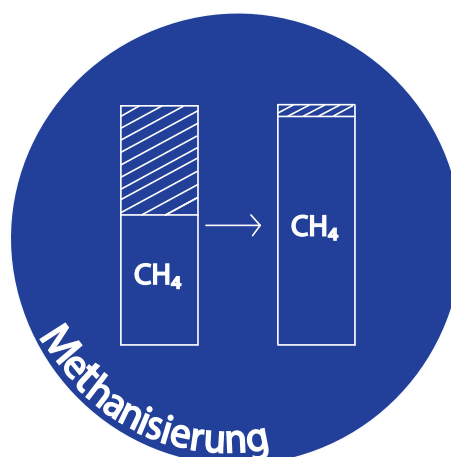
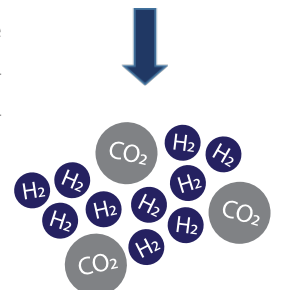
separierte
Gülle



Grünschnitt

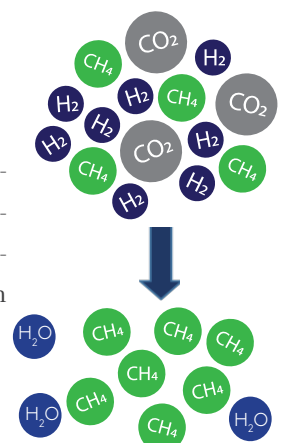
Namensgebend für dieses Teilprojekt waren frisch geschnittene Pflanzenreste symbolisch für eine ganze Reihe an biologischen Reststoffen. Aus diesen Reststoffen Wertstoffe zu gewinnen, das war das Ziel. Das Ergebnis: Grüner Wasserstoff erzeugt durch Mikroorganismen.

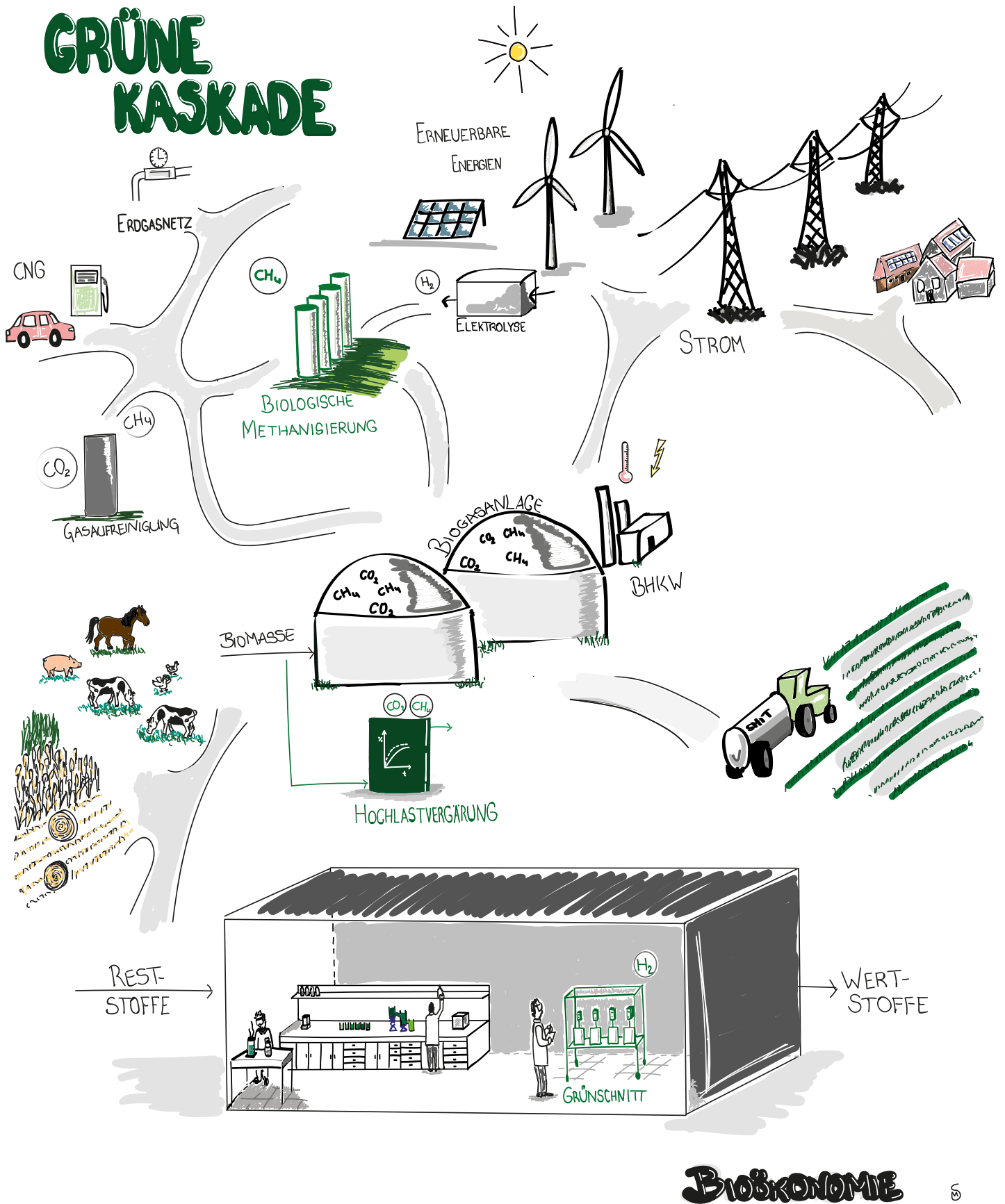
Rest- und
Abfallstoffe



Methanisierung

Aufwerten von Biogas zu einem Erdgassubstituenten - das war der Fokus dieses Teilprojektes. Biogas und Wasserstoff wird von Mikroorganismen zu Methan metabolisiert. Auf diese Weise kann ein Produktgas mit einem Methananteil über 90 Vol.-% erzeugt werden.





Hochlastvergärung



**12 Das Konzept:
Hochlastvergärung**

**14 Separierte Schweinegülle - Ein
Substrat mit hohem Potential**

**16 Business Case:
Hochlastvergärung
von Gülle**

Hochlastvergärung

In dem Teilprojekt Hochlastvergärung wurden die Etablierungsmöglichkeiten neuer Reaktorkonzepte für die Vergärung flüssiger Reststoffe aus der Landwirtschaft untersucht. Durch ein innovatives Reaktordesign wurde die Effizienz des gesamten Verfahrens erhöht. Dazu wurden sogenannte Hochlastreaktoren aus der industriellen Abwassertechnik eingesetzt.

Die aktuellen Novellierungen des Erneuerbaren Energien Gesetzes (EEG, Deutschland) sowie des Stimulation of Sustainable Energy Production (SDE+, Niederlande) stellt die Biogasbranche vor neuen Herausforderungen. Dies betrifft insbesondere den wirtschaftlichen Betrieb von Biogasanlagen und gleichzeitig den vermehrten Einsatz von Reststoffen. Dabei ist insbesondere die effiziente Vergärung von Substraten mit einem hohen Wasseranteil, wie zum Beispiel Gülle, aus wirtschaftlicher Sicht für eine Biogasanlage nicht praktikabel.

Mit dem Teilprojekt Hochlastvergärung wurden aus der industriellen Abwasserreinigung bekannte Techniken, die sogenannten Hochlastreaktoren, als neues Konzept und Lösungsstrategie zur Verbesserung der Vergärung flüssiger Substrate von Biogasanlagen entwickelt. Die Anwendung dieser Reaktoren für die Vergärung speziell von Substraten mit einem niedrigen Trockensubstanz-Gehalt (TS) führt zu einer Effizienzsteigerung des Gesamtkonzeptes einer Biogasanlage. Ein wesentliches Merkmal dieser Reaktoren ist der Rückhalt der zur Fermentation benötigten Mikroorganismen. Mit diesem Mikroorganismenrückhalt wird die Mikroorganismendichte im Reaktor erhöht und die Abbaugeschwindigkeit der untersuchten Substrate beschleunigt. Das untersuchte Hochlast-Verfahren eignet sich zur Implementierung an bestehenden Biogasanlagen.

Um die Einsatzmöglichkeiten zu identifizieren und das Verfahren genauer zu untersuchen, haben sich die deutsch-niederländischen Projektpartner PlanET Biogastechnik GmbH, Bio-energiecluster Oost-Nederland (BEON) sowie das Forschungsteam der FH Münster gemeinsam mit dem Betrieb der Hochlastreaktoren auseinandergesetzt und diese untersucht. Die Erfahrungen von PlanET im Bereich Biogastechnik und das deutsch-niederländische Netzwerk von BEON mit Kenntnissen über die aktuelle Situation der Biogasbranche sowohl in den Niederlanden und in Deutschland haben maßgeblich zum Erfolg beigetragen. Ergänzt wurde das Know-how der beiden Projektpartner durch die wissenschaftliche Arbeit der FH Münster im Bereich Abwasser- und Umwelttechnik, wodurch der Wissenstransfer über Hochlastreaktoren aus der industriellen Abwassertechnik zum Einsatz für die Biogastechnik gelungen ist.

Das Konzept der Hochlastreaktoren ist ein fundamentaler Bestandteil dieses Teilprojektes und wird in „Das Konzept: Hochlastvergärung“ beschrieben. Die wichtigsten Erkenntnisse und Ergebnisse aus den Versuchsreihen insbesondere mit Schweinegülle gefolgt von den wirtschaftlichen Betrachtungen des Hochlastkonzeptes werden anschließend dargestellt.

Die Projektpartner in dem Teilprojekt Hochlastvergärung

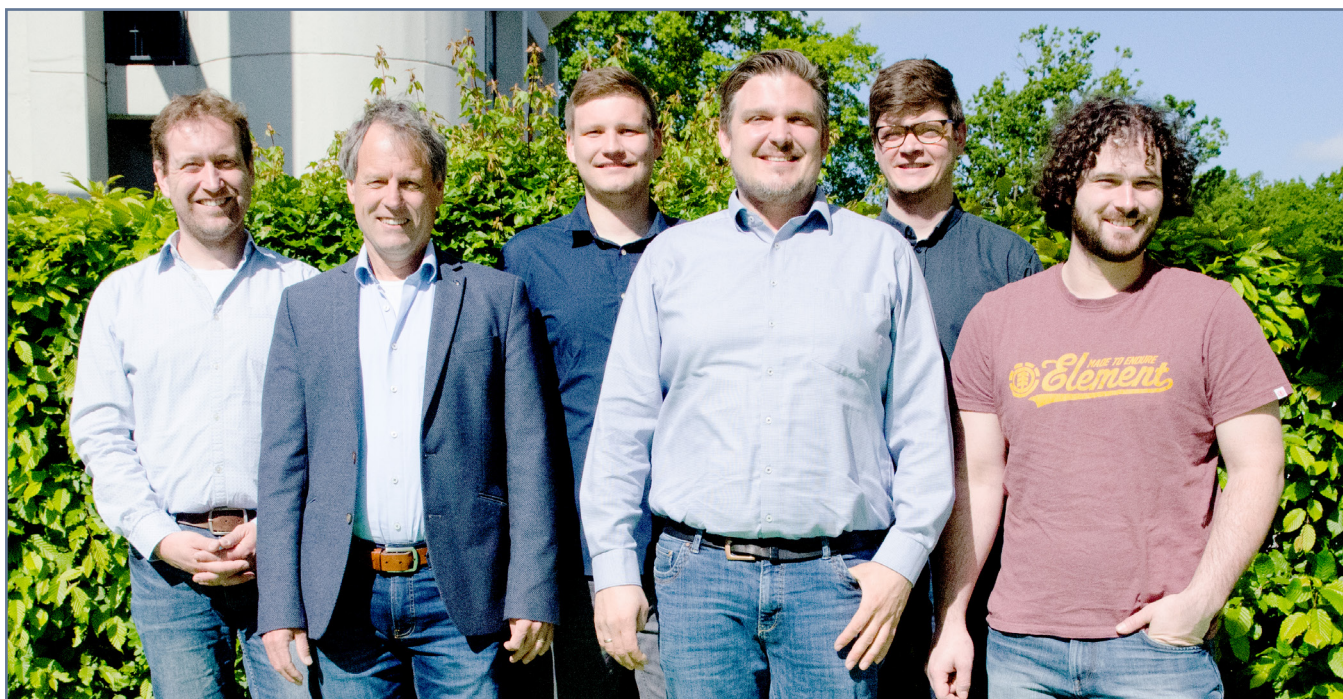


Abbildung 1: Von links nach rechts: Andreas Thesseling (PlanET Biogastechnik GmbH), Frans Feil (Bio-energiecluster Oost-Niederlande), Alexander Naßmacher (FH Münster), Dr.-Ing. Elmar Brüggling (FH Münster), Tobias Weide (FH Münster), Jeroen Terwort (PlanET Biogastechnik GmbH)



PlanET Biogastechnik GmbH

Als Anbieter und Konstrukteur von Biogasanlagen betrachtet PlanET die Biogastechnik in ihrer Gesamtheit. Das optimale Zusammenwirken einzelner Prozesse entscheidet über den wirtschaftlichen Erfolg einer Biogasanlage. Durch die Kompetenz für Planung, Genehmigung, Anlagenbau und ein eigenes Labor für den biologischen Service wuchs PlanET zu einem der führenden Unternehmen der Biogasbranche heran. Dies bestätigen auch die bereits 500 gebauten Komplettanlagen weltweit.

Aufgaben in der Grünen Kaskade

Das Projekt Hochlastvergärung der Grünen Kaskade

wurde von PlanET mit biologischem und technischem Knowhow unterstützt. Neben der Beratung bei der Planung der Reaktoren, sowie der Erstellung der technischen Zeichnungen für die Prototypen und Unterstützung beim Bau, bestand unser Beitrag auch in einer beratenden Tätigkeit beim Betrieb der Hochlastsysteme. Ein weiterer Punkt ist die Erstellung einer Wirtschaftlichkeitsbetrachtung für das neue Reaktorkonzept, basierend auf den durch die Fachhochschule gewonnenen Daten. Zudem wirkte PlanET bei der Substratbewertung und Beschaffung für den neuen Reaktortyp mit.

Bio-energiecluster Oost-Nederland

Das Bio-energiecluster Oost-Nederland (BEON) ist eine Partnerschaft von 25 Unternehmen und Institutionen in den Ost-Niederlanden. BEON engagiert sich für die Anwendung der Bioenergie und die Technologieentwicklungen in diesem Bereich. Die Vergärung ist ein wichtiges Thema in den Aktivitäten von BEON mit dem Ziel die Förderungen der Vergärung von Biomasse zu steigern. Dabei sind Anlagenbauer, landwirtschaftliche Organisationen (LTO-Noord), Energie- und Entsorgungsunternehmen, Wissensinstitute und Technologieentwicklungsunternehmen aktiv an der Umsetzung beteiligt. In dem Zusammenhang ist im Jahr 2019 ein Aktionsplan erstellt worden, der die technologische Weiterentwicklung entlang der gesamten Kette der Biogasproduktion, der Gas- und Gärrestauffbereitung sowie der Gasnetzerweiterung vorsieht. Darüber



hinaus engagiert sich BEON in der Zusammenarbeit mit Deutschland, um auf diese Weise umfangreich Erfahrungen über die Erzeugung von Biogas aus zu tauschen und gleichzeitig grenzübergreifend innovative Dienstleistungen und Produkte zu nutzen.

Aufgaben in der Grünen Kaskade

Mit diesem Netzwerk aus verschiedenen Kontakten und Akteuren im Bereich Bioenergie sowie den Kenntnissen über aktuellen Entwicklungen der Vergärungstechniken in den Niederlanden und in Deutschland hat BEON einen entscheidenden Beitrag zur Hochlastvergärung beigetragen. Zusätzlich kann durch die Nutzung des Netzwerkes und der zahlreichen Kontakte das Verfahrenskonzept Hochlastvergärung allen interessierten Betreibern vorgestellt werden.

Forschungsteam der FH Münster

Die FH Münster ist eine der größten Fachhochschulen in Deutschland. Insgesamt werden über 14.500 Studierende in 12 Fachbereichen und drei zentralen wissenschaftlichen Einrichtungen betreut. Das Forschungsteam von Prof. Wetter und Dr.-Ing. Elmar Brüggling ist Teil des Fachbereiches Energie-Gebäude-Umwelt (EGU) und umfasst gegenwärtig 35 Mitarbeiter/innen, davon 23 Projekttechniker/innen aus unterschiedlichen Fachdisziplinen. Das Team ist nunmehr über 18 Jahre im Bereich Biogasforschung aktiv und hat diverse regionale, nationale und internationale Projekte erfolgreich abschließen können. Mit den gewonnenen Erkenntnissen in den verschiedenen Projekten kann das Forschungsteam auf umfassende Erfahrungen bei der Bearbeitung von Projekten zurückgreifen. Darüber hinaus verfügt das Team über ein großes Netzwerk aus Akteure der Biogasbranche, für die die Weiterentwicklung der Biomassenutzung von großem Interesse ist.



FH MÜNSTER
University of Applied Sciences

Aufgaben in der Grünen Kaskade

Im Rahmen der Grünen Kaskade übernahm die FH Münster für die Teilprojekte Methanisierung, Grünschnitt und Hochlastvergärung die Federführung. Dies betrifft insbesondere die Projektkoordination der drei Teilprojekte sowie den Wissenstransfer durch Veröffentlichungen der Projektergebnisse in Form von Posterbeiträgen, Artikeln und Konferenzbeiträgen. Darüber hinaus hat das Forschungsteam der FH Münster die verschiedenen Versuchsreihen im Rahmen von Hochlastvergärung begleitet und koordiniert. Dies umfasst sowohl Versuche im Labormaßstab als auch die Untersuchung der entwickelten Verfahren im halbertechnischen Maßstab im Technikum der FH Münster. Das Konzept der Hochlastvergärung zur Vergärung von separierter Schweinegülle wurde mit Reaktoren aus der Abwassertechnik im Technikum der FH Münster getestet und analysiert.

Das Konzept: Hochlastvergärung

Die energetische Nutzung von Biomasse ist gegenwärtig und auch zukünftig ein wichtiger Bestandteil zum Ausbau der erneuerbaren Energien. Voraussetzung für den Ausbau der Bioenergie ist die Verfügbarkeit geeigneter Biomasse. Die intensive Nutzung von Rest- und Abfallstoffen spielt eine immer größer werdende Rolle. Dabei ist Gülle ein landwirtschaftlicher Reststoff dessen Potential noch nicht voll ausgeschöpft ist. Derzeit werden in Deutschland etwa 30 % der erzeugten Gülle für die Vergärung in Biogasanlagen genutzt. In den Niederlanden werden bisher 15 % der anfallenden Schweinegülle sowie 2 % der Rindergülle zur Vergärung verwendet. Der zum Teil niedrige Trockensubstanzgehalt und die damit verbundene niedrige Energiedichte pro m^3 der Gülle erschwert die Monovergärung in konventionellen Biogasanlagen, z.B. $75 \text{ kW}_{\text{el}}$ und größer, und erfordert somit oft den Zusatz von Co-Substraten.

Die Integration anaerober Hochlast-Reaktoren in konventionellen Biogasprozessen beschreibt hierbei ein Verfahren für die Vergärung von separierter Gülle. Ziel war es durch innovative Reaktorkonzepte die Effizienz der bestehenden Biogasanlagen zu steigern und dadurch die Gesamtwirtschaftlichkeit der Biogasgewinnung zu erhöhen. Gleichzeitig können bisher nicht ausgeschöpfte, biogene Reststoff-Potentiale nutzbar gemacht werden, wodurch sich das Anwendungsfeld der Biogastechnik erweitert.

Das Konzept

Die Hochlastreaktoren werden bereits in der industriellen Abwassertechnik für die anaerobe Vergärung organisch belasteter Abwässer eingesetzt. Da diese Hochlastreaktoren Substrate mit einem niedrigen Trockensubstanzgehalt benötigen ($\text{TS} < 2 \%$), ist für die Vergärung von Gülle ein vorgelagerter Separationsschritt notwendig. In diesem werden flüssige und feste Bestandteile der Gülle aufgetrennt. Die feste Phase wird weiterhin in bestehender und konventioneller Biogasanlagentechnik und die flüssige Phase wird in Hochlastreaktoren vergoren. Durch die Ergänzung konventioneller Biogasanlage durch die Hochlastvergärung wird bestenfalls die Verweilzeit für die Vergärung von Gülle verkürzt und die Effizienz der Bioga-

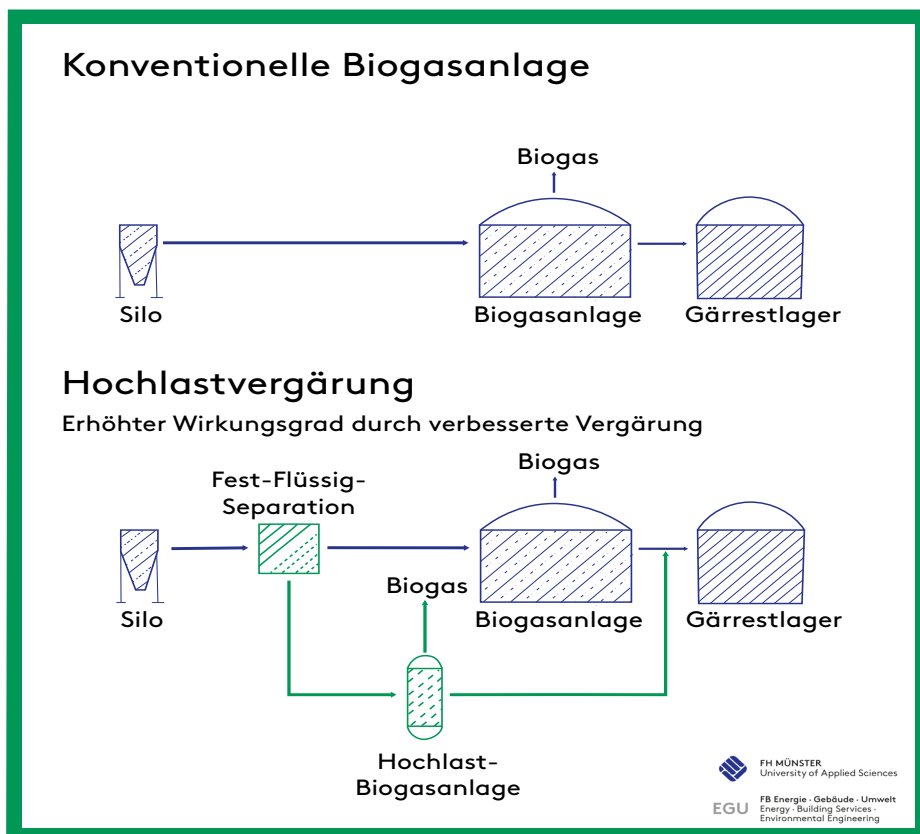


Abbildung 2: Das Verfahrenskonzept der Hochlastvergärung

serzeugung gesteigert (Abbildung 2).

Die Vorteile

Das Konzept bietet dabei folgende Vorteile und Verfahrensentwicklungen:

- Die Mikroorganismendichte wird durch einen im Reaktor konstruierten Biomasserückhalt erhöht und damit die Abbaugeschwindigkeit sowie die Abbaueffizienz gesteigert
- Die Verweilzeit der Substrate wird gegenüber konventioneller Biogasanlagentechnik drastisch verkleinert
- Das Biogaspotential der Substrate wird trotz geringerer Verweilzeiten komplett ausgeschöpft. Durch Synergieeffekte können sogar höhere Biogaspotentiale erzielt werden
- Die Hochlastvergärung kann als zusätzliches Modul in bestehende Biogasanlagen integriert und damit der Gesamtwirkungsgrad der Anlage erhöht werden

Bei der Konzeptionierung wurden die beiden Bereiche Abwasserreinigung sowie die landwirtschaftliche Biogasanlagentechnik vereint. Beide Branchen ähneln sich sehr, da in beiden Bereichen anaerobe Prozesse verwendet werden und Biogas erzeugt wird. Jedoch sind die Herangehensweisen sowie die Zielsetzung verschieden:

Industrielle Abwassertechnik

- Verwertung flüssiger Substrate
- Ziel: Kohlenstoffelimination aus Abwässern
- Biogaserzeugung meist von geringerer Bedeutung, eher positiver Nebeneffekt

- Reaktortechnik: Kurze Verweilzeiten, hohe Raumbelastungen, geringes Fermenter-Volumen
- Geringe Aufstellflächen erforderlich
- Hoher Automatisierungsgrad

Landwirtschaftliche Biogastechnik

- Verwertung vorwiegend fester Biomassen und Substrate
- Ziel: Erzeugung maximaler Biogaserträge
- Reinigungsleistung und Nährstoffrückgewinnung meist von geringerer Bedeutung
- Reaktortechnik: Hohe Verweilzeiten, hohe Raumbelastungen, hohes Fermenter-Volumen

Um die Eignung des Hochlastkonzeptes zu prüfen, wurde im Rahmen des Teilprojektes ein Versuchsprogramm entwickelt. Dazu wurden zusammen mit der Firma PlanET drei halbtechnische Reaktoren (ein Expanded Granular Sludge Bed Reaktor (EGSB) und zwei Festbett-Reaktoren) ausgelegt, gebaut und betrieben. Auf Basis der Versuchsergebnisse mit unterschiedlichen Gülle wurden schließlich Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen erstellt.

Separierte Schweinegülle Ein Substrat mit hohem Potential

Zur Erweiterung der energetischen Nutzungsmöglichkeiten von Schweinegülle wurden für die Untersuchungen zur Monovergärung in den Hochlastreaktoren Mastschweinegülle und Ferkelgülle ausgewählt.

Drei halbtechnische Reaktoren betrieben

Die Hochlast-Reaktoren, das sind zwei Festbettreaktoren (Abbildung 3-1) und ein EGSB-Reaktor (Abbildung 3-2). Mit diesen 3 Reaktoren wurden in dem Projektzeitraum die Vergärungsversuche durchgeführt.

Diese drei Reaktoren unterscheiden sich insbesondere in Bezug auf die Art und Weise die Mikroorganismendichte im System zu erhöhen. In dem EGSB-Reaktor ($V = 30 \text{ l}$) sind die anaeroben Mikroorganismen auf sogenannten Pellets zusammengeschlossen (Abbildung 3-5). Die Pellets werden durch die Strömungen und Gasbildung im Reaktor bewegt. Eine geeignete Trennvorrichtung im Reaktorkopf trennt die Pellets von dem Gas- und Abflussstrom. Im Unterschied dazu sind in den beiden Festbettreaktoren

($V = 50 \text{ l}$) mit keramischen Füllkörper gefüllt, die als Trägermaterial und somit als Aufwuchsfläche dienen. Dabei wurden für den einen Reaktor Hi-Flow (Abbildung 3-3) und für den anderen Reaktor Sattel-Füllkörper (Abbildung 3-4) verwendet, die sich in Form und Struktur unterscheiden. Die Füllkörper sind eng im Reaktor gepackt, sodass diese ein festes Bett bilden und nicht durch die Strömung verwirbelt werden. Der Aufwuchs an diesen Oberflächen führt zu einer Fixierung der Mikroorganismen, weshalb keine zusätzliche Trennvorrichtung am Reaktorausgang notwendig ist.

Ziel der Versuchsreihen war es, Auslegungsdaten für ein Scale-Up im Pilotmaßstab zu ermitteln sowie genügend Prozessdaten für eine anschließende wirtschaftliche Betrachtung zu sammeln.

Versuche im kontinuierlichen Betrieb

Für die Durchführung der Versuche wurde die Schweinegülle an der FH Münster mit einem Feinfilter separiert.



Abbildung 3: Zwei Hochlastreaktoren (1), EGSB-Reaktor (2), Hi-Flow Füllkörper (3), Sattel-Füllkörper (4), Pellets (5)

Dabei wurden Feststoffe bis zu einer Größe von $> 100 \mu\text{m}$ aus der flüssigen Phase abgetrennt. Die Lagerung der separierten Schweinegülle erfolgte in kühlbaren Lagercontainern, die zusätzlich unter einer Stickstoff-Atmosphäre gehalten wurden. Die gekühlte Lagerung der Gülle war notwendig, um eine lagerbedingte Gärung der Schweinegülle zu unterbinden und damit die Reproduzierbarkeit der Versuchsergebnisse über einen langen Zeitraum zu gewährleisten.

Die drei Reaktoren wurden für die Versuchsreihen kontinuierlich bei $\vartheta = 40^\circ\text{C}$ und mit separierter Schweinegülle (Trockenrückstand = 2 Gew.-%, organischer Trockenrückstand = 50 Gew.-%) durchgeführt. Für die Bilanzierung wurden die Reaktoren bei verschiedenen Verweilzeiten jeweils bis zum stationären Zustand betrieben. Für die Bewertung des Verfahrens wurden die Biogaspotentiale, die Abbaubauraten, die Raumbelastungen sowie die hydraulischen Verweilzeiten ermittelt.

Ergebnisse der Verweilzeitoptimierung

In Abbildung 4 sind die Ergebnisse der Versuchsreihen mit separierter Schweinegülle und in Abbildung 5 für separierte Ferkelgülle dargestellt. Im Durchschnitt wurde bei der Vergärung der flüssigen Schweinegülle ein Methangehalt von 70 Vol.-% im Biogas sowie ein Abbaugrad

über 70 % in Bezug auf den CSB-Wert erreicht. Die Darstellung der einzelnen Betriebspunkte ergab schließlich eine Verweilzeit abhängige Abbaukurve. Zusätzlich konnte anhand der dargestellten Ergebnisse ein Zusammenhang zwischen dem Biogasertrag und der Verweilzeit festgestellt werden.

Die Ergebnisse zeigen, dass separierte Ferkelgülle am effizientesten mit einer hydraulischen Verweilzeit von 4 d abgebaut werden konnte. Bei den Versuchsreihen war der Biogasertrag und der Abbaugrad am höchsten und die Substratverweilzeit gering. Bei der Vergärung von separierter Mastschweinegülle hat sich eine Verweilzeit von 11 d als optimal erwiesen. Weitere Untersuchungen mit kürzeren Verweilzeiten zeigten hier, dass sich ein Großteil des Biogaspotentials zwar erreichen lässt, jedoch die Abbauraten abnahmen. Darüber hinaus wurde bei den Versuchsreihen festgestellt, dass sich Gülle von unterschiedlichen landwirtschaftlichen Betrieben in Bezug auf die Vergärung unterschiedliche Gaserträge und Abbauraten gibt. Mögliche Faktoren sind die Herkunft der Gülle sowie das Alter und Fütterungsweise der erzeugenden Tiere.

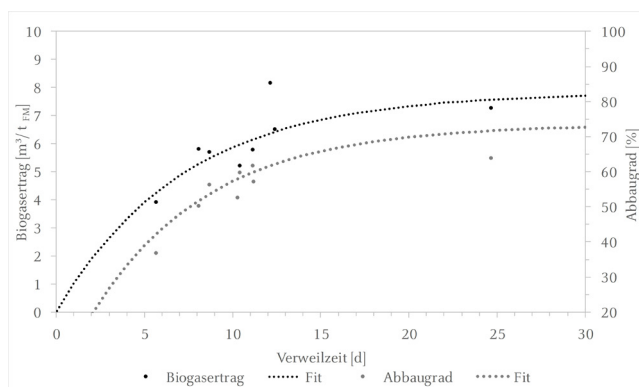


Abbildung 4: Darstellung der Ergebnisse für Mastschweinegülle

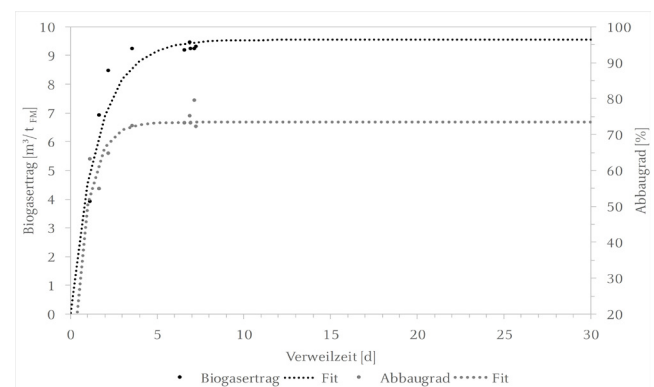


Abbildung 5: Darstellung der Ergebnisse für Ferkelgülle

Business Case: Hochlastvergärung von Gülle

Die Wirtschaftlichkeit eines Verfahrens ist ein entscheidendes Kriterium für die Betrachtung der Einsatzmöglichkeiten und der Umsetzung in die Praxis. Anhand des Zusammenhangs zwischen Verweilzeit und Abbaugrad sowie des Biogasertrags und der Bilanzierung der Separation eine erste ökonomische Betrachtung des Systems von PlanET und der FH Münster erstellt.

Wirtschaftlichkeit der Hochlastvergärung

Bei der ökonomischen Betrachtung der Hochlastfermentation von separierter Schweinegülle wurden die Gasgestehungskosten des Verfahrens bestimmt. Diese Gasgestehungskosten des Hochlastverfahrens wurden denen einer konventionellen 75 kW_{el} Biogasanlage gegenübergestellt. Bei einer konventionellen landwirtschaftlichen 75 kW_{el} Biogasanlage betragen diese Kosten 4,7 Cent/kWh.

Für die Auslegung der Hochlastfermenter und der darauf aufbauenden Berechnung der Gasgestehungskosten wurde ebenfalls die Vergärung von 26.250 m³ Gülle pro Jahr angenommen. Nach der Separation dieser Güllemenge mit einem Abtrenngrad von 40 Vol.-% würde eine Menge von 15.750 t/a flüssige Phase und 10.500 t/a feste Phase ergeben. Aus der Vergärung der flüssigen Phase resultiert bei einer Verweilzeit von 4 Tagen und einem Biogasertrag von 9,2 m³/t_{FM} (70 Vol.-% Methan) eine jährliche Methanmenge von 101.951 m³_{Methan}/a.

Um 15.750 t/a separierte, flüssige Gülle mit einem Hochlastreaktor zu vergären, müsste dieser ein Volumen von 173 m³ haben. In Tabelle 1 sind die Daten für die Reaktorauslegung, sowie die Kostenpositionen zur Berechnung der Gasgestehungskosten dargestellt.

Ergebnisse der Betrachtungen

Über einen Finanzierungszeitraum von 12 Jahren wurden für die untersuchte Ferkelgülle Gasgestehungskosten von 4,6 Cent/kWh ermittelt. Für die untersuchte Mastschweinegülle mit der optimalen Verweilzeit von 11 Tagen betrugen die berechneten Gasgestehungskosten 11 Cent/kWh. Dem

Tabelle 1: Entwicklung der Kosten in Abhängigkeit vom Fermentervolumen.

	Einheit	Festbett	EGSB
Reaktorauslegung			
Volumen	m ³	173	
Jährliche Betriebsstunden	h/a	8.544	
Menge Ferkelgülle flüssig	m ³ /a	15.750	
Verweilzeit	d	4	
Biogasertrag der flüssigen	m ³ /t _{FM}	9,2	
Phase			
Investitions- und Betriebskosten			
Reaktorkosten + Peripherie	€	333.202	328.873
Finanzierungszeitraum	a	12	12
Zins	%	2,5	2,5
Variable Betriebskosten	€	19.951	19.623
Gesamtkosten	€	52.434	51.684
Gasgestehungskosten			
Methananteil	%	70	
Gesamtmenge Biogas	m ³	145.644	
Energiemenge aus Biogas	kWh	1.124.519	
Gestehungskosten	Ct/kWh	4,7	4,6

gegenüber stehen die Gasgestehungskosten der konventionellen Biogasanlage von 4,7 Cent/kWh. Somit ließe sich der Prozess mit Ferkelgülle nach ersten Abschätzungen wirtschaftlich betreiben. Für den Betrieb der Reaktoren mit Mastschweinegülle müssen die Gasgestehungskosten jedoch noch gesenkt werden. Dies ließe sich bspw. durch die Zugabe von flüssigen Co-Substraten, wie z.B. Press- oder Sickersäften aus Mais- oder Grassilage, deutlich steigern.

Bei der Kostenfeststellung für das Verfahren der Hochlastfermentation konnte außerdem festgestellt werden, dass zwischen dem Fermentervolumen und den Investitions- und Betriebskosten ein linearer Zusammenhang besteht (Abbildung 6). Daraus lässt sich ableiten, dass sich durch den Bau größerer Fermenter keine Vorteile hinsichtlich der Investitions- und Betriebskosten ergeben.

Um die Kosten der Hochlastreaktoren zu reduzieren und dieses Verfahren somit wirtschaftlich attraktiver zu gestalten, müsste daher eine Effizienzsteigerung der Vergärung durch z.B. niedrigere Verweilzeit erreicht werden.

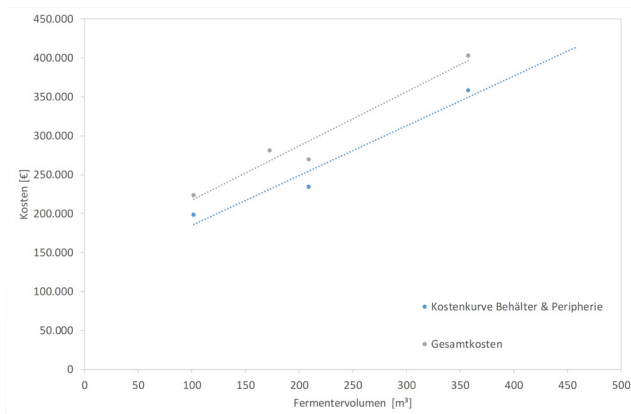


Abbildung 6: Entwicklung der Kosten in Abhängigkeit vom Fermentervolumen am Beispiel von Mastschweinegülle.

Ausblick

PlanET Biogastechnik GmbH

Für die Anwendung des neuen Reaktorkonzeptes bieten sich vor allem flüssige, leicht vergärbare Reststoffe aus der Landwirtschaft und Industrie an. Ein gutes Beispiel hierfür ist Schweinegülle. Diese ist aufgrund des hohen Flüssigkeitsanteils derzeit in Biogasanlagen meist nicht wirtschaftlich einsetzbar. Durch die kürzere Verweilzeit im neuen Hochlastfermenterkonzept wird bei einem deutlich geringeren Reaktorvolumen eine vergleichbare Biogasausbeute erzielt, als bei herkömmlichen Anlagen. Dies sorgt dafür, dass die Gasgestehungskosten gesenkt werden, was die Wirtschaftlichkeit der Schweinegüllevergärung deutlich verbessert.

BEON

Die Niederlande stehen vor großen Herausforderungen im Bereich Klima und Energie. Besonders wichtig ist die Reduzierung des Erdgasverbrauches. Grünes Gas könnte ein Teil des Erdgases ersetzen. Dafür müssen jedoch alle Quellen vollständig genutzt werden. Eine wichtige, potenzielle Quelle sind die mehr als 70 Millionen Tonnen Gülle die jährlich von Rinder, Kälbern und Schweine produziert wird. Mit der Entwicklung von Fermentern, die in kurzer Zeit große Mengen an Gülle (flüssige Phase nach Separation) verarbeiten können, könnte der Anteil an vergorener Gülle stark ansteigen. In der Regionalen Energiestrategie (RES) von Twente und Achterhoek basieren die explorativen Berechnungen u.a. auf der Vergärung der Hälfte der anfallenden Rindergülle und der Hälfte der Schweinegülle.

FH Münster

Nach Abschluss des Projekts wurde ein Verfahrenskonzept vorgestellt und wissenschaftlich untersucht werden, welches der Biogasbranche in Deutschland und den Niederlanden neue Perspektiven bietet. Das öffentliche Interesse ist bereits groß, eine marktreife Etablierung des Konzepts wurde bereits vielfach angefragt. Dennoch bleiben einige Fragen offen.

- Wie wirtschaftlich lässt sich das Konzept mit Biogasanlagen >75 kW etablieren?
- Welche Reststoffe eignen sich neben separierter, flüssiger Schweinegülle ebenfalls zur Vergärung im Hochlastkonzept?
- Wie verhält sich der Prozess im Pilotmaßstab?

Diese und weitere Fragen wird im Nachfolgeprojekt: BioSmart „Biogasproduktion in Hochlastfermentern zur intelligenten Energiebereitstellung“ (FKZ: 22031318) gefördert durch die Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. untersucht.

Grünschnitt



22 Wertstoffe aus Reststoffen

24 Biogene Wasserstoffproduktion im kontinuierlichen Maßstab

Grünschnitt

Die Verwertung ungenutzter Biomasse Reststoffpotentiale zur Produktion von wertvollen Produkten ist das Ziel des Teilprojektes „Grünschnitt“. Mit einem umfassenden Versuchsprogramm wurden geeignete Reststoff- und Abwasserströme identifiziert und charakterisiert. Diese wurden mit dem Verfahren der dunklen Fermentation schließlich in Wasserstoff umgewandelt.

In Zeiten knapper werdender Rohstoffe ist die Nutzung alternativer Rohstoffquellen von hoher Bedeutung. Ebenso ist das Schließen von Stoffkreisläufen ein Thema, das auch dem Willen der europäischen Politik und Wirtschaft entspricht. Ein Reststoff, der überwiegend beim Mähen von Wiesen, Grünstreifen und Rasenflächen anfällt, ist zum Beispiel Grünschnitt. Je nach Herkunft wird er entweder als Tierfutter weiterverwertet oder muss als Reststoff entsorgt werden. Bislang ungenutzte Reststoff- und Abwasserströme, für die Gewinnung von Wertstoffen zu verwerten oder energetisch zu nutzen ist eine aussichtsreiche Möglichkeit Stoffkreisläufe zu schließen. Das weltweite Bevölkerungswachstum und die Notwendigkeit, den Einsatz fossiler Brennstoffe zu reduzieren, führen zu vermehrten Entwicklungsaktivitäten im Bereich alternativer Energiequellen. Ein Rohstoff, der im Rahmen der Bioökonomie eine Schlüsselposition einnimmt, ist Wasserstoff. Die Produktion von Biowasserstoff gilt als vielversprechender Ansatz zur nachhaltigen Energieerzeugung, da die Technologie im Vergleich zur konventionellen Wasserstoff-Produktion, z.B. der Dampfreformierung aus Erdgas, über ein hohes CO₂-Minderungspotential verfügt. Die Etablierung einer nachhaltigen Wasserstoffwirtschaft entspricht sowohl aus energetischer als auch aus stofflicher Perspektive den europäischen Klimaschutzzielen.

Das Teilprojekt „Grünschnitt“ der Grünen Kaskade untersuchte die stofflichen Nutzungsmöglichkeiten verschiedener Reststoff- und Abfallstoffe. Hierbei wurden in dem Teilprojekt nicht nur Grün- und Wiesenschnitt untersucht

und charakterisiert. Aufbauend auf den erfassten Daten der Reststoff- und Abwasserströme wurden die geeigneten ausgewählt und die Möglichkeiten der Wertstoffherzeugung untersucht. Dies betrifft insbesondere die Untersuchung der Eignung verschiedener Abwässer für die biogene Wasserstoffherzeugung. Aufbauend auf den Ergebnissen wurden vielversprechende Reststoffströme ausgewählt und Versuche im halbertechnischen Maßstab durchgeführt. Dies umfasst auch die Prozessstabilisierung und Vorbereitung der Anwendung im technischen Maßstab.

Die Projektpartner WESSLING GmbH, HoSt und das Forschungsteam der FH Münster haben im Rahmen des Projektes gemeinsam Optionen zur Reststoffverwertung erarbeitet. Dabei unterstützte die Fa. WESSLING bei der Methodenentwicklung sowie der Durchführung der erforderlichen Analytik. Die Fa. HoSt unterstützte das Konsortium vor allem im Bereich des Reaktorbaus und bei der Übertragung der Ergebnisse in die Großtechnik. So konnten die Projektpartner die wissenschaftliche Begleitung durch die FH Münster ideal ergänzen.

Die wichtigsten Erkenntnisse und Ergebnisse sind auf den nachfolgenden Seiten beschrieben. Die Gewinnung von Wertstoffen aus Reststoffen sowie die biogene Wasserstoffherzeugung im kontinuierlichen Maßstab sind zentrale Themen, die von den Projektpartnern gemeinsam bearbeitet wurden. Darüber hinaus haben sich aus den Projekt zahlreiche Ideen und Fragestellungen für die Weiterentwicklung der biogenen Wasserstoffherzeugung ergeben.

Die Projektpartner in dem Teilprojekt Grünschnitt



Abbildung 7: Von links nach rechts: Dr.-Ing. Elmar Brüggig (FH Münster), Tobias Weide (FH Münster), Marion Schomaker (FH Münster), Roy Kleizen (HoSt), Carsten Lammers (WESSLING GmbH)



WESSLING GmbH

WESSLING ist als internationales und unabhängiges Analytik-, Prüf- und Beratungsunternehmen an 26 Standorten in Europa und China vertreten. Das Familienunternehmen genießt seit 1983 einen exzellenten Ruf bei national und international tätigen Kunden. 1.400 Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter setzen vielfältige Expertise für die kontinuierliche Verbesserung von Qualität und Sicherheit, von Umwelt- und Gesundheitsschutz ein. Wir prüfen, analysieren, begutachten, planen Projekte und setzen sie um – für die nachhaltige Verbesserung der Lebensqualität.

Aufgaben in der Grünen Kaskade

In dem Projekt „Grüne Kaskade“ zählte u.a. die exakte Bestimmung einzelner Spurenelemente in der komple-

xen und schwierigen Matrix Fermentermaterial sowie die Beschleunigung der Bestimmungsdauer der Gasausbeute zu den besonderen Aufgaben. Beim Thema Spurenelemente konnten die Experten von WESSLING dabei auf Ihre Kompetenz und umfangreiches Know-how im Bereich Biogasanalytik zurückgreifen.

Bei der Ermittlung der Gasausbeute wurde das patentierte Verfahren BagFerm eingesetzt. Das Ziel war es, die genaue Gasausbeute von Reststoffen, wie zum Beispiel Laub, unter realen Bedingungen zu ermitteln sowie die Bestimmungsdauer, die bisher 60 Tage umfasste, durch den Einsatz der Nahinfrarotspektroskopie (NIRS) deutlich zu verringern.

HoSt

HoSt ist ein unabhängiges Unternehmen, dessen Aktivitäten sich auf die technologische Entwicklung von Waste-to-Energy-Systemen zu Verarbeitung von Biomasse und Abfallströmen und die Lieferung von Systemen zur nachhaltigen Energieerzeugung aus Biomasse und Abfall konzentrieren. HoSt verfügt über umfangreiche Erfahrungen in der Verarbeitung verschiedener Abfallströme aus der Lebensmittelindustrie und landwirtschaftlicher Nebenprodukte wie Stroh, Spreu und Grasschnitt. Des Weiteren verfügt das Unternehmen über 27 Jahre Erfahrung, einem großen Serviceteam in ganz Europa und einem Team von mehr als 120 Ingenieuren/-innen, die die fortschrittlichen Bioenergiesysteme entwickeln, bauen und installieren.

Die Biomasse-Energieanlagen von HoSt tragen zum Erfolg einer Kreislaufwirtschaft bei, indem sie erneuerbare Energien erzeugen, abfallwirtschaftliche Herausforderungen lösen und wertvolle Endprodukte aus organischen Abfällen erzeugen.



Aufgaben in der Grünen Kaskade

Mit der Expertise im Bereich Biogasanlagentechnik war HoSt an den Arbeitspaketen Grünschnitt und Methanisierung beteiligt.

Mit den praktischen Erfahrungen bei der Planung, Auslegung und Nutzung von Bioenergieanlagen hat das Unternehmen einen wesentlichen Beitrag bei der Entwicklung geeigneter Reaktorkonzepte geliefert.

Durch die Erfahrung von HoSt im Anlagenbau hat das Unternehmen einen guten Einblick in die Betriebs- und Investitionskosten und konnte Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen für die Anlagenkonzepte. Dies betrifft konkret die Erzeugung von Biomethan aus Biogas, die im Rahmen von Methanisierung untersucht wurde, sowie die biologische Wasserstoffherzeugung (Grünschnitt).

Forschungsteam der FH Münster

Die FH Münster ist eine der größten Fachhochschulen in Deutschland. Das Forschungsteam von Prof. Wetter und Dr.-Ing. Elmar Brüggling ist Teil des Fachbereiches Energie-Gebäude-Umwelt (EGU) und umfasst gegenwärtig 35 Mitarbeiter/-innen, davon 23 Projekttechniker/-innen aus unterschiedlichen Fachdisziplinen. Das Team ist nunmehr über 18 Jahre im Bereich Biogasforschung aktiv und hat diverse regionale, nationale und internationale Projekte erfolgreich abschließen können. Mit den gewonnenen Erkenntnissen in den verschiedenen Projekten kann das Forschungsteam auf umfassende Erfahrung bei der Bearbeitung von Projekten zurückgreifen. Darüber hinaus verfügt das Forschungsteam über ein großes Netzwerk aus Akteure der Biogasbranche, für die die Weiterentwicklung der Biomassennutzung von großem Interesse ist.



FH MÜNSTER
University of Applied Sciences

Aufgaben in der Grünen Kaskade

Im Rahmen der Grünen Kaskade übernahm die FH Münster für die Teilprojekte Methanisierung, Grünschnitt und Hochlastvergärung die Federführung. Dies betrifft insbesondere die Projektkoordination der drei Teilprojekte sowie den Wissenstransfer durch Veröffentlichungen der Projektergebnisse in Form von Posterbeiträgen, Artikeln und Konferenzbeiträgen. Darüber hinaus hat das Forschungsteam der FH Münster die verschiedenen Versuchsreihen begleitet und koordiniert. Dies umfasst sowohl Versuche im Labormaßstab als auch die Untersuchung der entwickelten Verfahren im halbtechnischen Maßstab im Technikum der FH Münster.

Wertstoffe aus Reststoffen

Namensgebend für das Teilprojekt Grünschnitt war eben dieser Reststoff exemplarisch für zahlreiche Reststoffe, die in der deutsch-niederländischen Projektregion anfallen und bislang nicht effizient verwertet wurden. Diese mussten zum Teil sogar kostenintensiv entsorgt werden. Deswegen haben die Projektpartner WESSLING GmbH, HoSt und FH Münster in diesem Teilprojekt verschiedene Reststoffströme identifiziert sowie hierzu passende Verfahren zur Gewinnung von Wertstoffen bestimmt. Hierbei wurden u.a. Verfahren wie die Aufbereitung von Stroh mit einem basischen Aufschluss zur Zuckererzeugung betrachtet. Zucker werden neben dem Einsatz als Süßungsmittel, als Grundstoff in der Aroma-Produktion oder in der chemischen Industrie eingesetzt. Als lignocellulosehaltige Reststoffe eignen sich im deutsch-niederländischen Projektgebiet u.a. diverse Arten von Stroh, Astschnitt und Laub. Die WESSLING GmbH unterstützte hier durch die Analytik der erzeugten Zucker der Aufschlussprodukte und ermöglichte dadurch die Bewertung der Verwertungsmöglichkeiten.

Methodenentwicklung: Gaspotential-Bestimmung mit Nahinfrarot-Spektroskopie

Darüber hinaus wurde im Rahmen des Projektes eine Methode zur schnelleren Bestimmung des Biogaspotentials von Reststoffen entwickelt, indem die Anwendung der Nahinfrarot-Spektroskopie (NIRS) von WESSLING untersucht wurde. Das Biogaspotential von Inputstoffen wird oft nach theoretischen Modellen aus Messergebnissen verschiedener Futtermittelparameter ermittelt. Diese liefern aber nicht immer zuverlässige Ergebnisse. Mit dem patentierten Verfahren BagFerm untersuchte WESSLING das Potential unter realen Gärbedingungen. Dabei wurden alle Prozesse einer Biogasanlage nachgestellt und so aussagekräftige Ergebnisse erzielt. Für die Entwicklung der Messung des Biogaspotentials mittels NIRS wurden hunderte BagFerm-Ergebnisse mit den entsprechenden NIRS-Spektren abgeglichen. Anschließend wurden die Datensätze mit einem komplexen statistischen Modellierungsverfahren ausgewertet. Gelingt es, ein geeignetes Modell zu entwickeln, dann kann zukünftig auf Basis der

NIRS-Messung nach wenigen Minuten eine erste Einschätzung des Gaspotentials vorgenommen werden.

Dunkle Fermentation

Im Projektverlauf erwies sich die zu Beginn untersuchten Verfahren zur Gewinnung von Zucker als grundsätzlich möglich, jedoch als energetischen aufwändig und daher nicht wirtschaftlich darstellbar. Deshalb wurden zusätzlich zu den Versuchen der Zuckergewinnung alternative stoffliche Nutzungspfade erschlossen. Einer dieser Nutzungspfade war die Erzeugung von Wasserstoff mittels anaerober Mikroorganismen durch die Verwendung von biogenen Rest- und Abwasserströme. Dieser Prozess wird als dunkle Fermentation bezeichnet. Neben Wasserstoff werden hier zusätzlich flüchtige organische Säuren erzeugt, die entweder stofflich und damit zur Erzeugung von Grundchemikalien genutzt oder in einem nachgeschalteten Biogasprozess sehr effizient zu Methan umgewandelt werden können.

Die Prozessbedingungen der dunklen Fermentation sind vergleichbar mit denen der anaeroben Vergärung im Biogasprozess. Insgesamt besteht dieser Prozess der Biogaserzeugung aus 4 Reaktionsschritten: der Hydrolyse, der Acidogenese, der Acetogenese sowie der Methanogenese. Während der Hydrolyse (Verflüssigungsphase) werden langkettige organische Verbindungen gespalten und in einfache organische Verbindungen, wie z.B. Aminosäuren, zerlegt. Anschließend werden in der Versäuerungsphase aus den Produkten der Hydrolysephase organische Säuren gebildet. Dabei entsteht Acetat, Wasserstoff und Kohlenstoffdioxid, die Ausgangsstoffe für die Methanbildung sind. Während der Acetogenese werden Alkohole und organische Säuren ebenfalls zu Essigsäure, Wasserstoff und Kohlenstoffdioxid reduziert. Schließlich erfolgt die Methanbildung (Methanogenese) durch die Umsetzung der vorherigen Produkte zu Methan und Kohlenstoffdioxid. Unterbindet man den Vorgang der Methanbildung so erhält man als Produktgas ein Gasgemisch aus Wasserstoff und Kohlenstoffdioxid sowie organische Säuren in der flüssigen Phase. Im Unterschied zum Biogasprozess, der aus vier Prozessschritten besteht, wird für die Erzeugung von Biowasserstoff der Prozess nach dem dritten Prozessschritt gestoppt.

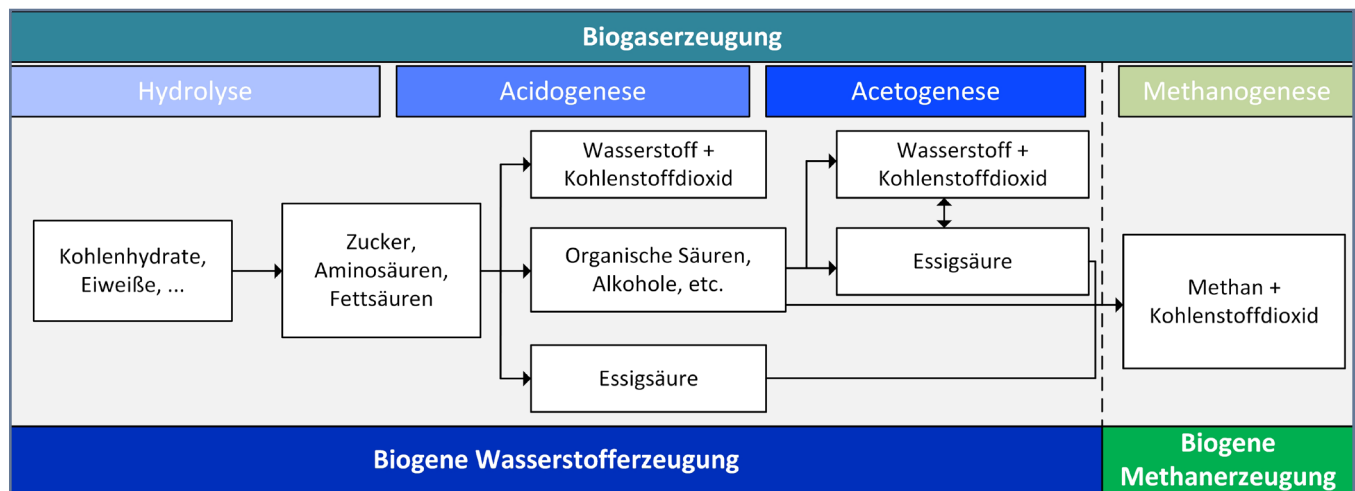


Abbildung 8: Schema des Biogasprozesses

Bestimmung der Wasserstoffpotentiale

Im Rahmen des Projektes wurden insgesamt über 40 Abwasser- und Reststoffströme erfasst, charakterisiert und inventarisiert. Basierend auf den Ergebnissen dieser Inventarisierung wurden 12 der energiereichsten Abwässer auf ihre Eignung zur Wasserstoffherzeugung im Batch-Verfahren geprüft. Dabei wurden in einem umfangreichen Versuchsprogramm verschiedene Prozessparameter, wie verschiedene Prozesstemperaturen, Substratkonzentrationen und Impfkulturen untersucht, mit dem Ziel die optimalen Betriebsparameter zu bestimmen.



Abbildung 9: Versuchsstand zur Untersuchung des Gaspotentials mit Batch-Gärtests

Ergebnisse

Die Auswertung der Versuche ergab folgende Ergebnisse:

- 6 der 12 untersuchten organischen Reststoffe und Abwässer sind für die Wasserstoffproduktion besser geeignet, als für die konventionelle Erzeugung von Biogas
- Thermophile Bedingungen (50 – 60 °C) führen zu höheren Wasserstoffausbeuten als die Vergärung im mesophilen Temperaturbereich (37 – 42 °C)
- Es wurden Wasserstoffträge von 90 bis 160 l_N/kg_{oTR} (Mittelwert) aus stärkehaltigen und zuckerhaltigen Abwässern gewonnen
- Es wurden Maximalerträge von 199 und 291 l_N/kg_{oTR} erreicht
- Es wurde eine maximale Konzentration von 9,5 - 26 g/l an flüchtigen organischen Säuren erzielt

Wasserstoff ist ein chemischer Grundstoff, der vielfältige eingesetzt wird, unter anderem in der Stickstoffdüngereproduktion. Für die Erzeugung größerer Menge Wasserstoff ist die kontinuierliche Produktion von Wasserstoff erforderlich. Neben der Bestimmung der Wasserstoffpotential verschiedener zucker- und stärkehaltiger Reststoffströme aus der Zucker und Stärke produzierende Industrie sowie Betrieben der Textil- und Papierproduktion wurden daher Versuchsreihen im kontinuierlichen Maßstab durchgeführt.

Biogene Wasserstoffherzeugung im kontinuierlichen Maßstab

Eine Herausforderung bei der Prozessführung der dunklen Fermentation ist nach aktuellem Stand der Technik die Gewährleistung der Prozessstabilität bei gleichzeitiger Reduzierung des Natronlauge-Verbrauches (NaOH). Natronlauge wird verwendet um den pH-Wert auf einem konstanten Wert von etwa 5,0 bis 5,5 zu halten. In diesem Bereich werden die methanbildenden Mikroorganismen gehemmt und der Prozess lässt sich zuverlässig zur Erzeugung von Wasserstoff betreiben.

Für die Versuche wurden 3 Rührkesselreaktoren (Continuous stirred-tank reactor, CSTR) im halbtechnischen Maßstab ($V = 23,5 \text{ l}$) betrieben (Abbildung 10). Dazu wurden die Reaktoren mit 3 unterschiedlichen Impfschlämmen (Gärprodukt einer Biogasanlage, Faulschlamm einer Kläranlage und Pelletschlamm eines Industriebetriebs mit anaerober Abwasserreinigung) angeimpft. Zur Eliminierung methanbildender Mikroorganismen wurde der Impfschlamm thermisch vorbehandelt ($t = 2 \text{ h}$, $\theta = 80 \text{ °C}$). Als Feed wurde separierte Schweinegülle verwendet, die ebenfalls thermisch vorbehandelt und zur Co-Vergärung mit einem Glucose-Wasser-Gemisch versetzt wurde. In Abhängigkeit vom pH-Wert wurde die Raumbelastung der Reaktoren angepasst und unterschiedliche Verweilzeiten ($t = 22; 15; 9 \text{ d}$) untersucht.

Ergebnisse der Versuche

Die Ergebnisse der Versuchsreihen sind in Abbildung 11 dargestellt.

Zusammengefasst ließ sich hier feststellen:

- Alle drei Impfschlämme waren für die Erzeugung von Biowasserstoff mittels dunkler Fermentation geeignet

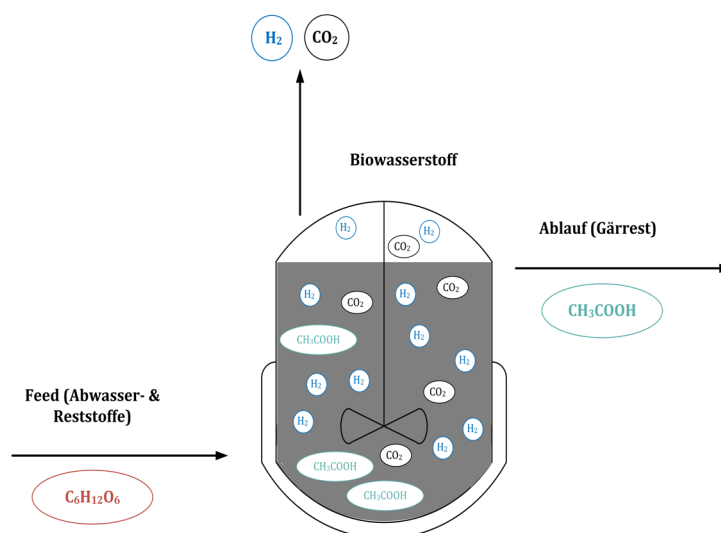


Abbildung 10: Versuchsaufbau der kontinuierlichen Wasserstoffversuche im halbtechnischen Maßstab

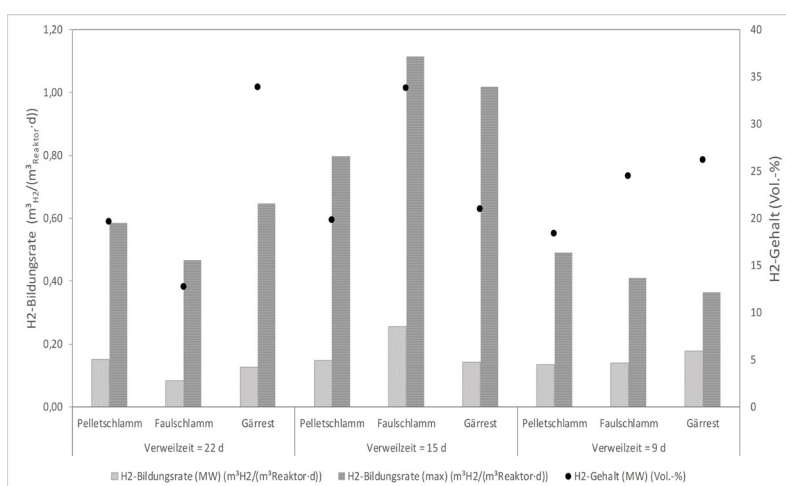


Abbildung 11: Wasserstoffbildungsrate und Wasserstoffgehalt der kontinuierlichen Biowasserstoffversuche

- Durch den Einsatz separierter Schweinegülle (flüssige Phase) konnte der Prozess stabil betrieben werden, ohne dass der pH-Wert durch das Einbringen von Natronlauge reguliert werden muss
- Es wurden Wasserstoffbildungsraten von 0,30 bis $1,12 \text{ m}^3_{\text{H}_2}/(\text{m}^3_{\text{Reaktor}} \cdot \text{d})$ und maximale Wasserstoffgehalte von 35 Vol.-% erzielt
- Der optimale Betriebspunkt lag bei einer Verweilzeit von 15 Tagen
- Die effizienteste Betriebsweise wurde mit den Impfschlämmen Faulschlamm aus einer kommunalen Kläranlage und mit Gärprodukt aus einer Biogasanlage erzielt

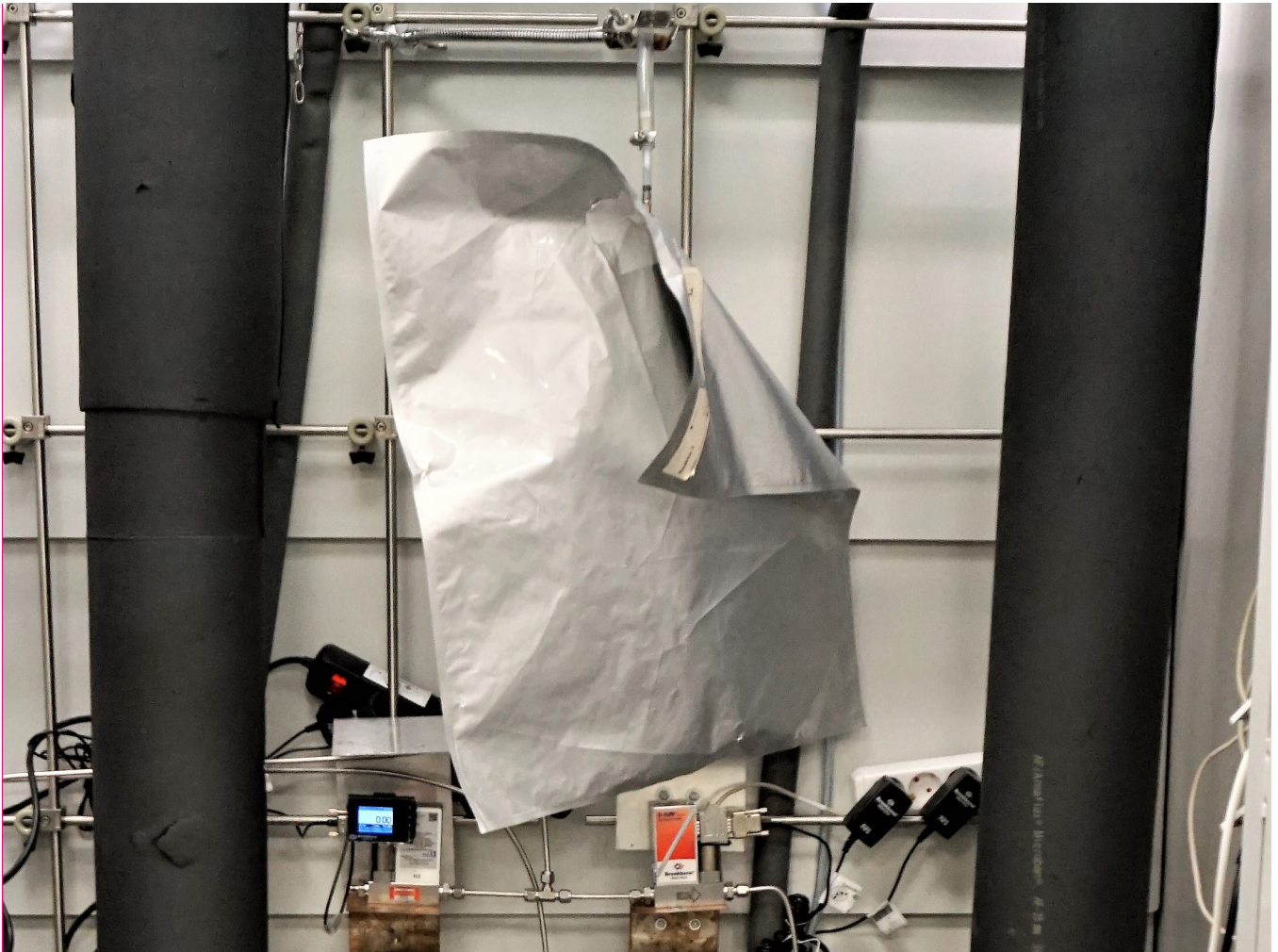
Durch den Verzicht von Natronlauge und der Verwendung von Schweinegülle konnte der Prozess stabil betrieben werden, dennoch fiel die Prozesseffizienz gegenüber einem mit NaOH geregelten Verfahren geringer aus. Somit führte die Verwendung von Schweinegülle zu einer Einsparung an NaOH, dennoch sollte eine pH-Wert Regulierung für

einen effizienten und stabilen Betrieb vorgesehen werden. Mit den Erkenntnissen aus diesem Teilprojekt wurde ein wesentlicher Schritt in Richtung großtechnischer Implementierung der dunklen Fermentation zur Wasserstoffherzeugung erreicht. Die vom pH-Wert abhängige Anpassung der Raumbelastung bei paralleler Zugabe von Schweinegülle zur Erhöhung der Pufferkapazität gilt in dieser Kombination bisher als neuartiger Lösungsansatz. Dennoch müssen zukünftige Versuche zeigen inwieweit das Verfahren hinsichtlich der Maximierung des Wasserstofftrags optimiert werden kann. Lösungsansätze sind hier z.B. die Verwendung anaeroben Hochlastsystemen, die einen kontrollierten Biomasserückhalt ermöglichen. Eine weitere Möglichkeit ist die energetische (Methanherzeugung) und stoffliche (Flüchtige organischer Säuren) Nutzung des Gärrestes aus der dunklen Fermentation in einem weiteren Prozessschritt.

..... Ausblick und offene Fragen:

- Die Unterbrechung des Biogasprozesses nach dem dritten Reaktionsschritt durch Unterbindung der Methanogenese konnte erfolgreich durchgeführt werden. Dennoch zeigte sich in den Versuchen mit den kontinuierlichen Reaktoren, dass sich methanbildende Mikroorganismen bei geringen Prozessänderungen schnell durchsetzen. Mit weiteren Untersuchungen sollte die Entwicklung der Mikroorganismenkultur zusätzlich betrachtet werden
 - Das Abtrennen von CO_2 aus dem Produktgas und identifizieren weiterer Nutzungsmöglichkeiten sind nächste Schritte. Denkbar wäre zum Beispiel die Einspeisung in das Erdgasnetz
 - Steigerung der Effizienz des Prozesses durch die Erzeugung eines Produktgases mit einem Wasserstoffanteil bis zu 60 Vol.-%
 - Ein nächster Schritt wäre ein Scale-Up der kontinuierlichen Versuche in den nächst größeren Maßstab
 - Untersuchen von weiteren Abwasser- und Reststoffströme im kontinuierlichen Maßstab, die bei den Batch-Gärtests bereits hohe Wasserstoffpotenziale erzielt haben. Hier kommen zum Beispiel Molkereiabwässer, der stärkeverarbeitenden Industrie oder der Lebensmittelindustrie in Frage
-

Methanisierung



30 Von Biogas zu Biomethan

**34 Einsatzmöglichkeiten und
Wirtschaftlichkeit**

32 Das Reaktorkonzept

Methanisierung

Nachhaltig Biomethan als Erdgassubstitut zu erzeugen, dass ist das Ziel der Methanisierung. Dabei sind es Mikroorganismen, die in der Lage sind Kohlenstoffdioxid zu Methan zu verstoffwechseln. Dies gelingt indem die vierte Stufe des Biogasprozesses, die Methanogenese, separat in einem Bioreaktor betrieben wird. Auf diese Weise wird aus Biogas ein Erdgassubstitut zu erzeugen.

Aufgrund von veränderten Förderbedingungen für die Erzeugung von Biogas auch Biomasse stellt sich vielen Anlagenbetreibern die Frage, wie sich zukünftig Biogasanlagen wirtschaftlich betreiben lassen. Gleichzeitig ist die Erzeugung von Energie aus regenerativen Energiequellen ein wichtiger Bestandteil der Energiewende. Eine Möglichkeit ist, das erzeugte Biogas nicht direkt durch die Verbrennung in einem Blockheizkraftwerk für die Stromerzeugung zu nutzen, sondern nach Aufbereitung als Biomethan (CH_4) in das Erdgasnetz einzuspeisen. Eine Variante der Aufbereitung ist zum Beispiel die Methanisierung des im Biogas enthaltenen Kohlenstoffdioxids (CO_2).

Mit der Weiterentwicklung einer biologischen Verfahrensvariante der Methanisierung hat sich das Projektkonsortium dieses Teilprojektes beschäftigt. Das Besondere an diesem Verfahren: Es sind keine aufwendigen Prozessschritte nötig. Die Konversion erfolgt durch die Verstoffwechselung von Mikroorganismen, die somit als Biokatalysator fungieren. Damit der Umsatz von Biogas zu Biomethan gelingt wird Wasserstoff (H_2) benötigt. Bestenfalls wird das Verfahren mit H_2 aus Power-to-Gas Technologien betrieben und durch die biogenen Methanisierung in speicherfähiges, erneuerbares CH_4 umgewandelt. Das Erdgasnetz verfügt über eine hohe Speicherkapazität, die hier genutzt werden kann. Das CH_4 würde somit vollständig aus regenerativen Quellen erzeugt werden.

Zur Weiterentwicklung der biologischen Methanisierung hat sich das deutsch-niederländische Projektkonsortium bestehend aus HoSt, WESSLING GmbH und dem Forschungsteam der FH Münster zusammengefunden. In

dem grenzübergreifenden Team ergänzen sich die Projektpartner mit der Expertise von HoSt im Bereich Biogastechnik und Anlagenbau, dem Know-how der WESSLING GmbH bei der Analytik und Methodenentwicklung sowie der Erfahrung der Wissenschaftler der FH Münster im Bereich Abwasser- und Umwelttechnik. Auf diese Weise wurde über Ländergrenzen hinweg gemeinsam die biologische Methanisierung weiterentwickelt und Einsatzmöglichkeiten insbesondere zur Aufwertung von Biogas untersucht.

Die wichtigsten Ergebnisse und Erkenntnisse sind in nachfolgenden Artikeln zusammengefasst. Ein wesentlicher Bestandteil der Projektarbeit war die Recherche der aktuellen Marktsituation und die möglichen Konkurrenztechnologien für die biologische Methanisierung. Zusammen mit der Funktionsweise der biologischen Methanisierung und Untersuchungsergebnisse der Spurenelementgehalte sind diese in dem Artikel „Von Biogas zu Biomethan“ dargelegt. Das entwickelte Reaktorsystem sowie die durchgeführten Untersuchungen werden in dem Artikel „Das Reaktorkonzept“ erläutert. Anschließend erfolgt die Betrachtung von „Einsatzmöglichkeiten und Wirtschaftlichkeit“ der biologischen Methanisierung.

Die Projektpartner in dem Teilprojekt Methanisierung

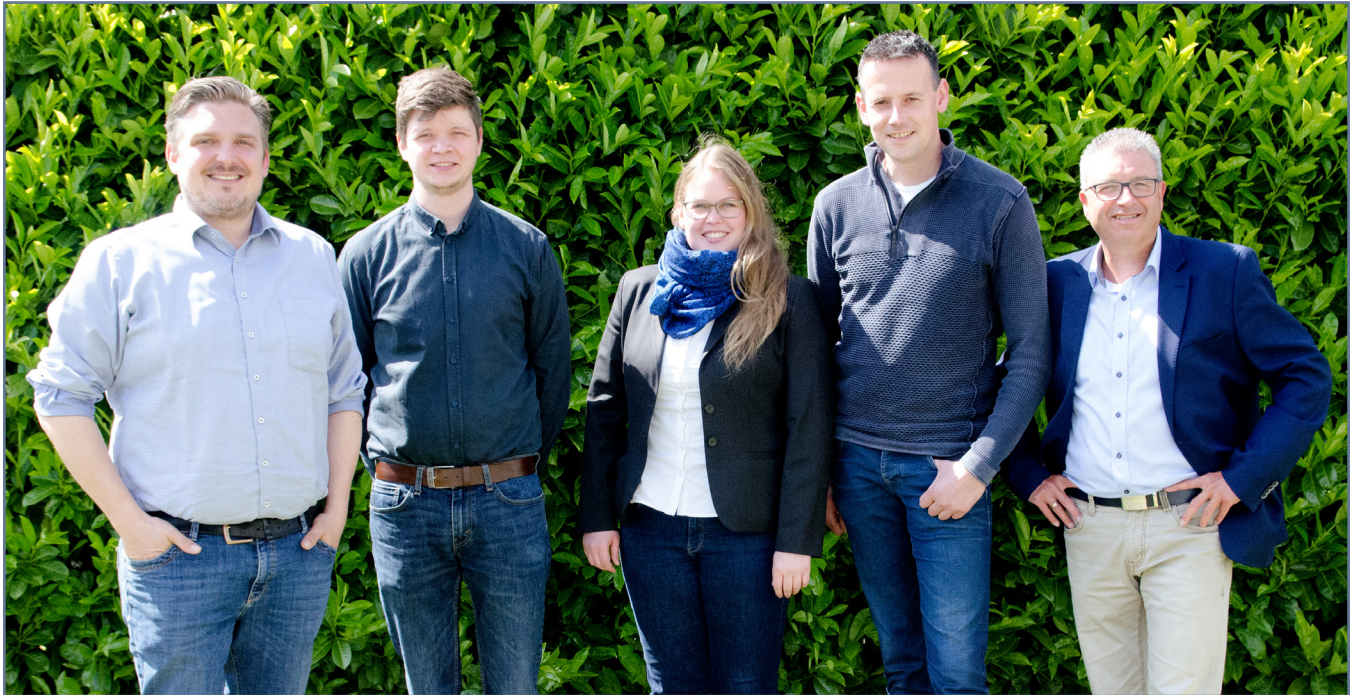


Abbildung 12: Von links nach rechts: Dr.-Ing. Elmar Brüggling (FH Münster), Tobias Weide (FH Münster), Marion Schomaker (FH Münster), Roy Kleizen (HoSt), Carsten Lammers (WESSLING GmbH)



WESSLING GmbH

WESSLING ist als internationales und unabhängiges Analytik-, Prüf- und Beratungsunternehmen an 26 Standorten in Europa und China vertreten. Das Familienunternehmen genießt seit 1983 einen exzellenten Ruf bei national und international tätigen Kunden. 1.400 Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter setzen vielfältige Expertise für die kontinuierliche Verbesserung von Qualität und Sicherheit, von Umwelt- und Gesundheitsschutz ein. Wir prüfen, analysieren, begutachten, planen Projekte und setzen sie um – für die nachhaltige Verbesserung der Lebensqualität.

Aufgaben in der Grünen Kaskade

In dem Projekt „Grüne Kaskade“ zählte u.a. die exakte Bestimmung einzelner Spurenelemente in der komple-

xen und schwierigen Matrix Fermentermaterial sowie die Beschleunigung der Bestimmungsdauer der Gasausbeute zu den besonderen Aufgaben. Beim Thema Spurenelemente konnten die Experten von WESSLING dabei auf Ihre Kompetenz und umfangreiches Know-how im Bereich Biogasanalytik zurückgreifen.

Bei der Ermittlung der Gasausbeute wurde das patentierte Verfahren BagFerm eingesetzt. Das Ziel war es, die genaue Gasausbeute von Reststoffen, wie zum Beispiel Laub, unter realen Bedingungen zu ermitteln sowie die Bestimmungsdauer, die bisher 60 Tage umfasste, durch den Einsatz der Nahinfrarotspektroskopie (NIRS) deutlich zu verringern.



HoSt

HoSt ist ein unabhängiges Unternehmen, dessen Aktivitäten sich auf die technologische Entwicklung von Waste-to-Energy-Systemen zu Verarbeitung von Biomasse und Abfallströmen und die Lieferung von Systemen zur nachhaltigen Energieerzeugung aus Biomasse und Abfall konzentrieren. HoSt verfügt über umfangreiche Erfahrungen in der Verarbeitung verschiedener Abfallströme aus der Lebensmittelindustrie und landwirtschaftlicher Nebenprodukte wie Stroh, Spreu und Grasschnitt. Des Weiteren verfügt das Unternehmen über 27 Jahre Erfahrung, einem großen Serviceteam in ganz Europa und einem Team von mehr als 120 Ingenieuren/-innen, die die fortschrittlichen Bioenergiesysteme entwickeln, bauen und installieren.

Die Biomasse-Energieanlagen von HoSt tragen zum Erfolg einer Kreislaufwirtschaft bei, indem sie erneuerbare Energien erzeugen, abfallwirtschaftliche Herausforderungen lösen und wertvolle Endprodukte aus organischen Abfällen erzeugen.

Aufgaben in der Grünen Kaskade

Mit der Expertise im Bereich Biogasanlagentechnik war HoSt an den Arbeitspaketen Grünschnitt und Methanisierung beteiligt.

Mit den praktischen Erfahrungen bei der Planung, Auslegung und Nutzung von Bioenergieanlagen hat das Unternehmen einen wesentlichen Beitrag bei der Entwicklung geeigneter Reaktorkonzepte geliefert.

Durch die Erfahrung von HoSt im Anlagenbau hat das Unternehmen einen guten Einblick in die Betriebs- und Investitionskosten und konnte Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen für die Anlagenkonzepte. Dies betrifft konkret die Erzeugung von Biomethan aus Biogas, die im Rahmen von Methanisierung untersucht wurde, sowie die biologische Wasserstoffherzeugung (Grünschnitt).



FH MÜNSTER
University of Applied Sciences

Forschungsteam der FH Münster

Die FH Münster ist eine der größten Fachhochschulen in Deutschland. Insgesamt werden über 14.500 Studierende in 12 Fachbereichen und drei zentralen wissenschaftlichen Einrichtungen betreut. Das Forschungsteam von Prof. Wetter und Dr.-Ing. Elmar Brüggling ist Teil des Fachbereiches Energie-Gebäude-Umwelt (EGU) und umfasst gegenwärtig 35 Mitarbeiter/innen, davon 23 Projekttechniker/innen aus unterschiedlichen Fachdisziplinen. Das Team ist nunmehr über 18 Jahre im Bereich Biogasforschung aktiv und hat diverse regionale, nationale und internationale Projekte erfolgreich abschließen können. Mit den gewonnenen Erkenntnissen in den verschiedenen Projekten kann das Forschungsteam auf umfassende Erfahrungen bei der Bearbeitung von Projekten zurückgreifen. Darüber hinaus verfügt das Team über ein großes Netzwerk aus Akteuren der Biogasbranche, für die die Weiterentwicklung der Biomassenutzung von großem Interesse ist.

Aufgaben in der Grünen Kaskade

Im Rahmen der Grünen Kaskade übernahm die FH Münster für die Teilprojekte Methanisierung, Grünschnitt und Hochlastvergärung die Federführung. Dies betrifft insbesondere die Projektkoordination der drei Teilprojekte sowie den Wissenstransfer durch Veröffentlichungen der Projektergebnisse in Form von Posterbeiträgen, Artikeln und Konferenzbeiträgen. Darüber hinaus hat das Forschungsteam der FH Münster die verschiedenen Versuchsreihen begleitet und koordiniert. Dies umfasst sowohl Versuche im Labormaßstab als auch die Untersuchung der entwickelten Verfahren im halbertechnischen Maßstab im Technikum der FH Münster.

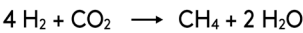
Von Biogas zu Biomethan

Biogas ist ein Produktgas der anaeroben Vergärung und enthält zwischen 50–70 Vol.-% Methan (CH₄) und 30–50 Vol.-% Kohlenstoffdioxid (CO₂). Um aus Biogas in das Erdgasnetz einspeisefähiges Biomethan zu erzeugen, muss der Anteil an Biomethan auf mindestens 89,9 Vol.-% (Niederlande) bzw. 90 Vol.-% (L-Gas, Deutschland) oder 95 Vol.-% (H-Gas, Deutschland) erhöht werden.

Aufwertung von Biogas

Eine Möglichkeit der Erzeugung von Biomethan aus Biogas ist die sogenannte Gasreinigung. Durch das Abtrennen anderer Gaskomponenten erhält man ein Produktgas mit hohem Methananteil und zusätzlich ein Gasgemisch mit hohem Kohlenstoffdioxidanteil. Verfahren die zur Gasreinigung angewendet werden sind das Membranverfahren, kryogene Verfahren, die Druckwasserwäsche oder Druckwechseladsorption.

„Methanisierung“ hingegen bezeichnet allgemein einen Prozess bei dem aus einem CO₂-haltigen Eduktgas ein Produktgas erzeugt wird, welches Methan enthält. Dies wird erreicht, indem das CO₂ zusammen mit H₂ zu CH₄ umgesetzt wird. Verschiedenste Verfahren kommen dazu in Frage, wobei diese sich im Wesentlichen in katalytische und biologische Methanisierung unterteilen lassen. Der Sabatier-Prozess zum Beispiel ist ein katalytisches Verfahren mit dem CO₂ zu CH₄ umgesetzt wird. Dieser Prozess arbeitet bei Temperaturen von 550 °C, Drücken 200 bar und mit Katalysatoren, wie zum Beispiel Nickel. Das Sabatier-Verfahren arbeitet nach folgender Reaktionsgleichung:



Die biologische Methanisierung

Verfahren, die auf der Verstoffwechselung von CO₂ und H₂ zu CH₄ durch anaerobe Mikroorganismen basieren, werden als biologische Methanisierung bezeichnet. In der Mikrobiologie ist diese Form der Methanbildung als Methanogenese bekannt und ist ein Teilschritt des Biogasprozesses. Diese Mikroorganismen sind Archaeen, die CO₂ zu CH₄ umsetzen können, wobei die Reaktionsgleichung stöchiometrisch dem Sabatier-Prozess entspricht.

Abgesehen von CO₂ benötigen die Mikroorganismen für die Verstoffwechselung verschiedene Spurenelemente und Nährstoffe, wie Stickstoff und Schwefel. In Biogas sind letztere bereits in Form von Ammoniak und Schwefelwasserstoff enthalten. Daher sind die Mikroorganismen gegenüber den Verunreinigungen im Biogas der konventionellen Biogasproduktion unempfindlich. Dies ist ein Vorteil gegenüber der katalytischen Methanisierung, deren Katalysatoren durch Verunreinigungen wie zum Beispiel Schwefel und Nebenreaktion deaktiviert werden können. Wesentliche Unterschiede zwischen der katalytischen und biologischen Methanisierung sind in Tabelle 2 dargestellt.

In-situ und Ex-situ Verfahren

Es gibt grundsätzlich zwei Varianten der biologischen Methanisierung, die unterschieden werden: das in-situ und das ex-situ Verfahren. Bei dem in-situ Verfahren findet die Methanisierung parallel zur Vergärung im Fermenter statt. Durch Zugabe von H₂ in den Fermenterinhalt nutzt

Tabelle 2: Vergleich der biologischen und katalytischen Methanisierung

Parameter	Biologische Methanisierung	Katalytische Methanisierung
Druck	≥ 1 bar	5 - 200 bar
Temperatur	35 - 65 °C	280 – 550 °C
Funktionsprinzip	Mikroorganismen	Katalysator
Toleranz gegenüber Schwefelwasserstoff	Hoch	Sehr gering
Limitierung	Stofftransport Gas-Flüssigkeit	Gleichgewicht
Technologie Reife Level (TRL)	4-6	8-9
Reaktorkonzepte	Continuous stirred tank reactor, Membran, Rieseltbett, Festbett	Festbett, Wirbelbett, 3-Phasen, Strukturiert (Waben, Mikrokanal,...)

dieses Prinzip die Anwesenheit von methanbildende Mikroorganismen im Biogasprozess aus. Bei optimaler Wasserstoffzufuhr könnte auf diese Weise der Methananteil des entstehenden Biogases erhöht werden.

Die ex-situ Variante sieht einen separaten Bioreaktor vor. In diesem Bioreaktor findet ausschließlich der vierte Schritt des Biogasprozesses statt. Somit können sich die Mikroorganismen, die in der Lage sind mithilfe von H_2 und CO_2 , CH_4 zu metabolisieren, im Reaktorinhalt vermehren ohne in Konkurrenz zu anderen Mikroorganismen mit höherer Verdopplungsrate zu stehen. Ein weiterer Vorteil ist, dass diese Mikroorganismen auch ohne die Zufuhr einer Kohlenstoffquelle problemlos einige Zeit überleben können. Dadurch ist die Anwendung dieses Verfahrens mit schwankender Gaszufuhr, sogenannten Lastgängen, möglich. Das deutsch-niederländische Projektkonsortium hat sich auf die Entwicklung einer ex-situ Variante fokussiert.

Spurenelementbedarf

Zu Beginn des Teilprojektes wurde der Spurenelementbedarf der methanbildenden Mikroorganismen mit mehreren Vergleichsanalysen untersucht. Die optimale Konzentration von Spurenelementen ist eine wichtige Voraussetzung für die Methanbildung von Mikroorganismen: Ist sie zu gering, werden u. a. nicht genug Enzyme gebildet. Ist sie zu hoch, wirken die Spurenelemente hemmend auf den Prozess. WESSLING hat daher Methoden entwickelt, um den Anteil an gelösten Spurenelementen in dem Reaktorinhalt der Methanisierung zu erfassen. Durch mehrere Messungen mit etwas Zeitabstand konnte auf diese Weise festgestellt werden, wie sich die Zusammensetzung der gelösten Spurenelemente beim Betrieb des Prozesses verändert. Da es sich um einen geschlossenen Prozess handelt kann sich die Zusammensetzung der gelösten Spurenelemente verändern, indem sie von den Mikroorganismen aufgenommen werden. Die Ergebnisse der Vergleichsmessung der umgesetzten Nährstoffe und Spurenelemente sind in Abbildung 13 dargestellt.

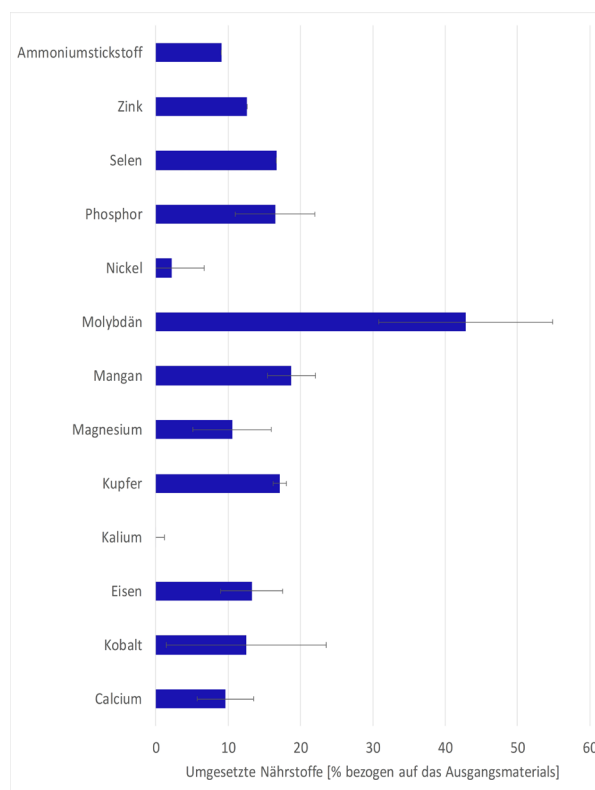


Abbildung 13: Darstellung der umgesetzten gelösten Nährstoffe

Auf Basis der Messungen von WESSLING konnte im Rahmen des Projektes eine „Rezeptur“ für eine Mischung an Spurenelementen entwickelt werden. Diese Mischung an Spurenelementen wurde bei den nachfolgenden Versuchen zur Untersuchung der biologischen Methanisierung mit zwei Festbettreaktoren eingesetzt, um die Konzentration der gelösten Spurenelemente in dem Reaktorinhalt der Reaktoren anzuheben. Zeigte sich bei einer Laufzeit des Reaktorsystems über mehrere Wochen eine Verringerung des Methananteils im Produktgas, dann hatte die Zugabe der Spurenelementmischung in den Reaktorinhalt in mehreren Fällen zu einer Erhöhung des Methananteils zur Folge.

Das Reaktorkonzept

Für den Einsatz der biologischen Methanisierung werden verschiedenen Reaktorkonzepten, wie Continuous Stirred Tank Reaktor, Rieselbett-, Membran- oder Festbettreaktoren in unterschiedlichen Forschungsarbeiten beschrieben. Im Rahmen des Projektes Grüne Kaskade wurde von dem Projektkonsortium das ex-situ Verfahrensprinzip mit zwei nacheinander geschalteten Festbettreaktoren weiterentwickelt und untersucht.

Die Herausforderung

Bei der Entwicklung eines geeigneten Reaktorkonzeptes gibt es verschiedene Herausforderungen zu berücksichtigen. Für die erfolgreiche Methanisierung von Biogas sind maßgeblich die Mikroorganismen entscheidend. Damit diese das eingespeiste Kohlenstoffdioxid (CO_2) zu Methan (CH_4) umsetzen können ist die Einstellung der optimalen Prozessbedingungen erforderlich. Das Löslichkeitsverhalten von Gasen in einer Flüssigkeit bzw. im Reaktorinhalt spielt dabei eine wichtige Rolle. Das Henry-Gesetz besagt, dass die Konzentration eines Gases in einer Flüssigkeit direkt proportional ist zu dem Partialdruck eines Gases über einer Flüssigkeit. Diese Proportionalität wird durch die temperaturabhängige Henry-Konstante beschrieben. Je größer die Henry-Konstante ist, desto besser löslich ist ein Gas. Vergleicht man die Henry-Konstante von CO_2 ($k_{\text{H}_{\text{c,p}}} = 3,4 \times 10^{-2} \text{ mol}_{\text{gas}}/\text{l}/\text{atm}$) und H_2 ($k_{\text{H}_{\text{c,p}}} = 7,8 \times 10^{-4} \text{ mol}_{\text{gas}}/\text{l}/\text{atm}$) bei 20°C miteinander, dann wird deutlich, dass Wasserstoff wesentlich schlechter in Wasser löslich ist. Aufgrund der unterschiedlichen Löslichkeit ist der Massentransfer von H_2 eine limitierende Größe für den Umsatz des CO_2 zu CH_4 . Im Zusammenhang mit dem limitierenden Massentransfer sind Temperatur und Druck weitere wichtige Prozessgrößen, die zur Steigerung der Umsatzraten betrachtet werden müssen. Im Anwendungsfall der biologischen Methanisierung kommt noch dazu, dass es sich um einen

biologischen Prozess handelt, bei dem Gaskomponenten verbraucht und erzeugt werden und auf diese Weise die Konzentrationen der Gase im Reaktorinhalt zusätzlich beeinflusst werden. Derzeit betriebene Verfahren bevorzugen in Bezug auf die Betriebstemperatur überwiegend thermophile Bedingungen, da sich unter diesen Voraussetzungen die höheren Methanbildungsraten ergeben. Der Druck kann zur Verbesserung der Löslichkeit der Gase in dem Reaktorinhalt und damit der Leistung des Prozesses beitragen.

Biologische Methanisierung mit Festbettreaktoren

Unter Berücksichtigung der Herausforderungen des Prozesses wurden im Rahmen des Projektes von den deutsch-niederländischen Projektpartnern zwei schmale, lange Reaktoren konzipiert. Diese beiden Reaktoren wurden nach den ersten Versuchen zu einer Kaskade umgebaut und auf diese Weise die Gasqualität des Produktgases gesteigert. Die Reaktoren sind mit einer unregelmäßigen Schüttung aus Keramikfüllkörpern gefüllt, die als Aufwuchsfläche für die Mikroorganismen dienen. Gleichzeitig verlängern sie den Weg der Gasbläschen durch das Reaktorsystem. Um die Diffusion von Wasserstoff aus dem Reaktorsystem zu verhindern bestehen diese beiden Festbettreaktoren (Abbildung 14) nahezu alle Bauteile aus Edelstahl. Die Reaktoren wurden zu Beginn mit einer Mischung von Gärresten unterschiedlicher Herkunft gefüllt und somit eine Mischkultur an Mikroorganismen bereit gestellt mit dem Ziel, dass sich ausschließlich Mikroorganismen vermehren, die mit den Prozessbedingungen zurechtkommen und in der Lage sind CO_2 und H_2 zu CH_4 zu verstoffwechseln.

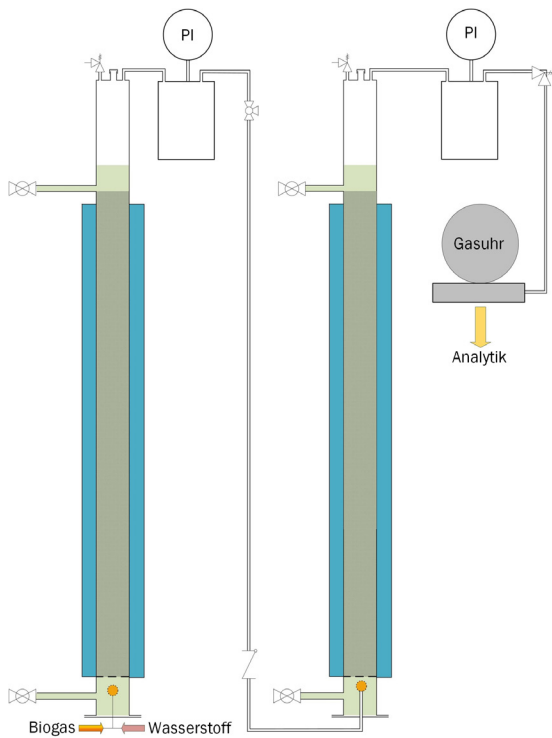


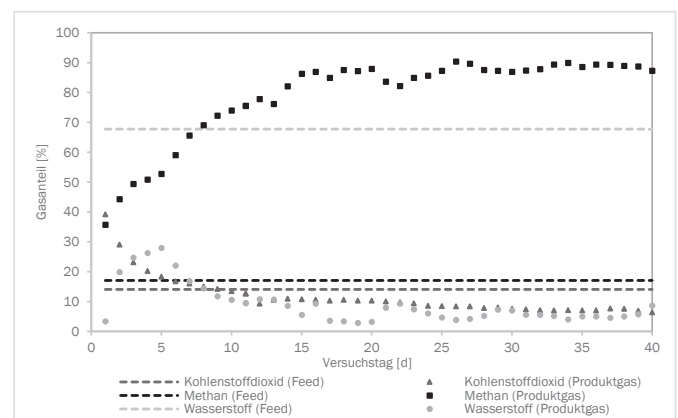
Abbildung 14: Schema der Reaktorkaskade

Für die Bewertung des Prozesses wird täglich die erzeugte Menge an Gas quantitativ und qualitativ erfasst. Anhand der Zusammensetzung des Produktgases, das zum Großteil aus CH_4 , CO_2 und H_2 besteht, wurde die Effizienz des entwickelten Reaktorkonzeptes analysiert.

Im Anschluss an die Bestimmung des Spurenelement- und Nährstoffbedarfs der Mikroorganismen wurde die maximal erreichbare Reinheit des Produktgases mit dem Reaktorsystem bestimmt. Hierzu wurde zunächst die Gaszugabe auf ein Minimum reduziert und anschließend gesteigert.

Bei einer Temperierung von 52°C und unter Atmosphärendruck wurde mit der Reaktorkaskade ein Produktgas

mit einem Methananteil über 90 Vol.-% erreicht werden (Abbildung 15). In Bezug auf den Methananteil des Produktgases wurde damit der erforderliche Gehalt für die Einspeisung in das deutsche L-Gas Netz gemäß der Arbeitsblätter G 260 und G 262 des Deutschen Verbandes des Gas- und Wasserfaches (DVGW) und das niederländische Erdgasnetz erreicht.

Abbildung 15: Ergebnisse der Versuche bei 52°C und Atmosphärendruck

Neben der Gasqualität des Produktgases ist die maximal erreichbare Methanbildungsrate eine entscheidende Größe für die Bewertung des Prozesses. Die Auslegung von Reaktoren im größeren Maßstab basieren unter anderem auf der Methanbildungsrate. Je größere die Methanbildungsrate, desto kleiner kann der erforderliche Reaktor für die biologische Methanisierung einer bestimmten Gasmenge sein. Daher wurde nach der Durchführung von Versuchen unter Atmosphärendruck zusätzlich Versuche mit Variation des Drucks durchgeführt. Die Ergebnisse dieser Versuche belegen, dass durch einen Überdruck von 2,5 bar die Methanbildungsrate von $0,3 \frac{\text{l}_{\text{Methan}}}{\text{l}_{\text{Reaktorvolumen}} \text{ pro Tag}}$ auf $0,5 \frac{\text{l}_{\text{Methan}}}{\text{l}_{\text{Reaktorvolumen}} \text{ pro Tag}}$ gesteigert werden konnte.

Einsatzmöglichkeiten und Wirtschaftlichkeit

Basierend auf den Daten der Versuche mit der Reaktorkaskade aus zwei Festbettreaktoren hat HoSt wirtschaftliche Betrachtungen von zwei Anwendungsfällen der biologischen Methanisierung für ein Scale-Up in den Praxismaßstab erstellt. Die Gasgestehungskosten der beiden Fälle 1 und 2 wurden mit der Erzeugung von Biogas mit einer konventionellen anaeroben Vergärung als Referenzfall verglichen. Nachfolgend wird zunächst der Referenzfall als Ausgangssituation beschrieben. Darauf aufbauend erfolgt die Betrachtung der beiden Fälle:

Fall 1: Die Gaskomponenten des Biogases werden zunächst in einer Gasaufreinigung voneinander getrennt. Der kohlenstoffdioxidhaltige Gasstrom wird anschließend mit Wasserstoff mit einer biologischen Methanisierung aufbereitet.

Fall 2: Die Aufwertung von Biogas zu Biomethan erfolgt in einem Schritt zunächst mit der biologischen Methanisierung und anschließend durch Trennen von Restgasen mit einer Gasaufreinigung.

Referenzfall

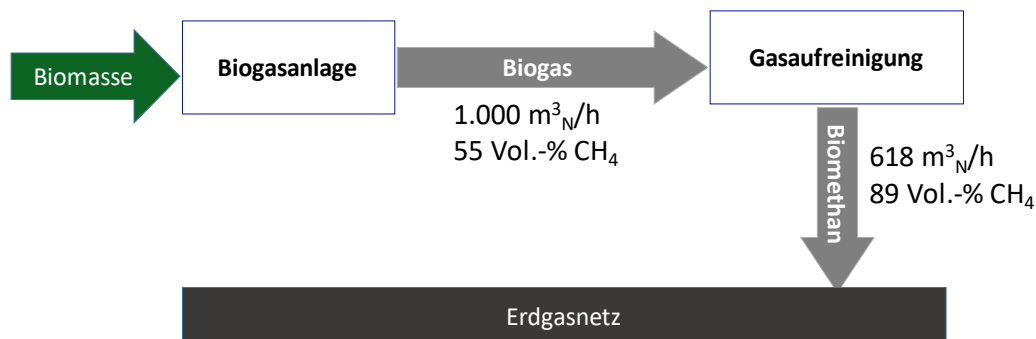


Abbildung 16: Referenzfall

Bei der betrachteten Referenzanlage handelt es sich um eine anaerobe Vergärungsanlage mit einer Kapazität von 1.000 m³_N/h Biogas. Das Biogas wird aus allen Arten von Rohstoffen erzeugt. Die Anlage wird ergänzt durch eine Gasaufreinigung, die aus dem Eduktgas mit einem Methananteil von 55 Vol.-% (Biogas) ein Produktgas mit einem Gehalt von mindestens 89 Vol.-% Methan erzeugt. Dies entspricht der erforderlichen Gasqualität für das niederländische Erdgasnetz. Aus 1.000 m³_N/h Biogas werden somit 618 m³_N/h Biomet-

han produziert. Betrachtet man die niederländische Gasqualität mit 89 Vol.-%, so ergibt sich ein Anteil von 618 m³_N/h Biomethan, die in das Erdgasnetz eingespeichert werden können. Der Gaspreis wird auf 1,00 €/m³_N festgelegt, was derzeit ein realistischer Marktwert ist.

Fall 1: Gasaufreinigung mit zusätzlicher Methanisierung

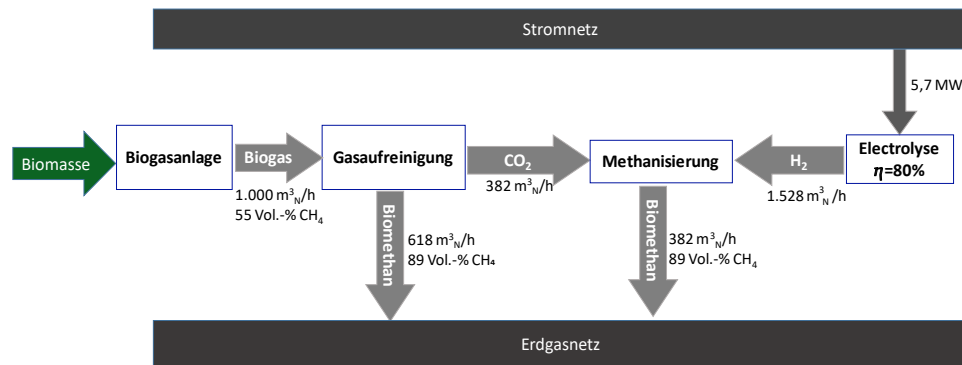


Abbildung 17: Biogas und Methanisierung mit Elektrolyse

In der Biogasanlage wird organisches Material (Biomasse) vergoren und Biogas erzeugt, das einen Gehalt von 55 Vol.-% CH_4 und 45 Vol.-% CO_2 aufweist. In der Anlage zur Gasaufreinigung wird das Biogas verdichtet und die Gaskomponenten mit Membranen voneinander getrennt. Dadurch wird Biomethan erzeugt, dass für die Einspeisung in das Erdgasnetz genutzt werden kann, sowie ein kohlenstoffdioxidhaltiges Gasmisch. Im Unterschied zu dem Referenzfall wird das Kohlenstoffdioxid in eine biologische Methanisierung eingespeist. Damit das Kohlenstoffdioxid von Mikroorganismen zu Methan umgewandelt werden kann, wird Wasserstoff benötigt. In diesem Fall wird dieser mit einer Elektrolyse erzeugt, die einen Wirkungsgrad von 80 % besitzt. Für die Umsetzung von ein Mol CO_2 sind vier Mol H_2 notwendig. Da $1 \text{ m}^3_{\text{N}} \text{H}_2$ einen Energiegehalt von 10,8 MJ oder 3 kWh entspricht werden für $1 \text{ m}^3_{\text{N}} \text{H}_2$ 3,7535 kWh Strom benötigt. Daraus folgt, dass in diesem Fall für die Erzeugung des benötigten Wasserstoffes für die Methanisierung eine 5,7 MW Anlage als Elektrolyse eingeplant werden muss.

Der Vorteil dieses Verfahrenskonzeptes ist, dass die Methanisierung in Abhängigkeit vom Strompreis mit Wasserstoff gespeist werden kann. Das bedeutet: bei niedrigen Strompreisen wird Wasserstoff erzeugt und zur Methanisierung des Kohlenstoffdioxids verwendet. Wenn die Strompreise jedoch zu hoch sind, gibt es auch die Möglichkeit, den Verfahrensschritt der biologische Methanisierung nicht zu betreiben, da der Prozess der

biologischen Methanisierung flexibel betrieben werden kann.

Die Kenndaten der einzelnen Komponenten dieses Verfahrenskonzeptes sind folgende:

Biogasanlage:

- $1.000 \text{ m}^3_{\text{N}}/\text{h}$ Biogas
- Flüssigkeitszufuhrspeicher und Flüssigkeitszufuhrsystem
- 2 Hauptfaulbehälter $\varnothing 28 \times 6 \text{ m}$
- 1 Nachgärer $\varnothing 28 \times 6 \text{ m}$
- Nachlager
- Fackel

Gasaufreinigung:

- Biogas-Verdichter, $1.400 \text{ m}^3_{\text{N}}/\text{h}$, 16 bar
- Membrantrennsystem
- Gasanalyse und -injektion

Elektrolyse:

- 5,7 MW
- Wirkungsgrad $\eta = 80 \%$
- $1.528 \text{ m}^3_{\text{N}}/\text{h} \text{H}_2$

Methanreaktor:

- 4 Reaktoren, $\varnothing 3,5 \times 11 \text{ m}$, 100 m^3
- Verdichter, $400 \text{ m}^3_{\text{N}}/\text{h}$
- Gasanalyse und -zufuhr

Fall 2: Kombination von Gasaufreinigung und Methanisierung

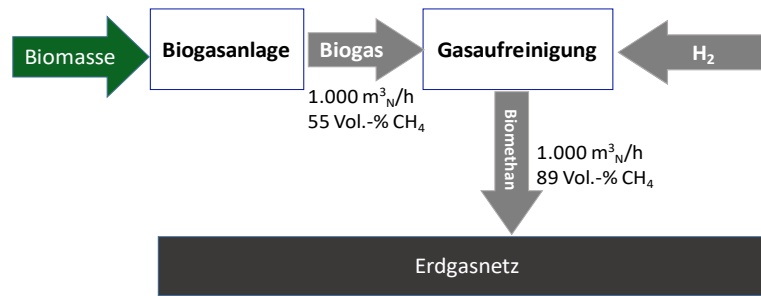


Abbildung 18: Fall 2 Biogasanlage mit Methanisierungsreaktor

In diesem Verfahrenskonzept wird die Kombination von Methanisierung und Gasaufreinigung in einem Schritt angenommen. Das im Fermenter erzeugte Biogas wird der Methanisierung zugeführt, um Biomethan mit 89 Vol.-% CH_4 -Gehalt zu bilden. Der Wasserstoff wird in diesem Fall durch Gasreformierung erzeugt, komprimiert sowie in dieser Form zur Methanisierung transportiert und dort eingesetzt. Ein Verdichter erhöht den Gasdruck, um das Gas mit wenigen Membranen zu reinigen und um kleine Schwankungen der Gasqualität auszugleichen und in das nationale/regionale Gasnetz einzuspeisen. Der Vorteil dieses Verfahrenskonzeptes ist, dass das Gas nach der Methanisierung bereits rund 89 Vol.-% CH_4 enthält. Deshalb wird eine geringere Anzahl an Membranen als im Referenzfall benötigt. Dies würde geringere Kapitalkosten bedeuten. Durch die direkte Kombination der Methanisierung mit der Gasreinigung wird allerdings kontinuierlich Wasserstoff benötigt.

Dieses Szenario besteht aus:

Biogasanlage:

- 1.000 m^3_{N} Biogas:
- Flüssigkeitszufuhrspeicher und Flüssigkeitszufuhrsystem
- 2 Hauptfaulbehälter $\varnothing 28 \times 6 \text{ m}$
- 1 Nachgärer $\varnothing 28 \times 6 \text{ m}$
- Nachlager
- Fackel

Methanisierung:

- 4 Reaktoren, $\varnothing 3,5 \times 11 \text{ m}$, 100 m^3 pro Reaktor

Gasaufreinigung:

- Verdichter 2.300 $\text{m}^3_{\text{N}}/\text{h}$, 16 bar
- Mit der Wasserstoffzufuhr benötigt der Kompressor eine größere Kapazität
- Membranseparation, 40 Membranen weniger als in Fall 1
- Gasanalyse und -zufuhr

Ökonomischer Vergleich

Für den Vergleich der Wirtschaftlichkeit des Referenzfalles mit den Kosten für die Verfahrenskonzepte Fall 1 und Fall 2 sind in Tabelle 3 zunächst die Investitionskosten für die Anlagenkomponenten aufgelistet. Den Zahlen liegen Erfahrungswerte von HoSt BV zugrunde. Für die Methanisierung wurden ein Scale-Up der Versuchsanlage durchgeführt. Die Investitionskosten für die Elektrolyse liegen bei 1.200 €/kWh, demnach betragen die Kosten für eine 5,7 MW Anlage 6.876.000 €.

Für den Vergleich der drei Fälle wurde jeweils der Gesam-

Tabelle 3: Vergleich der Investitionskosten

		Referenzfall	Fall 1	Fall 2
Verdichter (Biogas/Biomethan)	€	1.500.000	2.250.000	2.010.000
Methanisierung	€	-	320.000	320.000
Biogasanlage	€	2.434.000	2.434.000	2.434.000
Elektrolyse	€	-	6.876.000	-
Total	€	3.934.000	11.880.000	4.764.000

tertrag pro Jahr berechnet. In Bezug auf die Gesamtkosten wurde eine jährliche Betriebsstundenzahl von 8.300 Stunden und einer Betriebsdauer von 10 Jahren angenommen. Die beiden Fälle 1 und 2 unterscheiden sich im Wesentlichen in der Betriebsweise der biologischen Methanisierung und in der Wasserstofferzeugung, was sich auch bei der Kostenkalkulation zu berücksichtigen ist. In Fall 1 wird der flexible Betrieb der Methanisierung in Abhängigkeit vom Strompreis angenommen. Der Strom wird für die Erzeugung des Wasserstoffs mit einem Elektrolyseur benötigt. Währenddessen wird in Fall 2 die biologische Methanisierung kontinuierlich betrieben. In diesem Fall wird daher kontinuierlich Wasserstoff benötigt, der von dem Anlagenbetreiber in dieser Fallbetrachtung gekauft werden muss. Für die Kalkulation der Wasserstoffkosten wird angenommen, dass der Wasserstoff durch Dampfreformierung erzeugt wird. Die Kosten für den Wasserstoff aus diesem Verfahren betragen 2 €/kg (Shell, 2017). Damit dieser Wasserstoff für die biologische Methanisierung verwendet werden kann, muss der Wasserstoff zunächst komprimiert und schließlich zur Anlage transportiert werden. Dafür müssen zusätzlich 2,35 €/kg einkalkuliert werden (ETASP, 2014). Daher werden in Fall 2 für den Wasserstoff Kosten von 4,35 €/kg oder 0,39 €/m³_N berechnet. In Tabelle 4 sind alle Kostenpositionen für Fall 1 und Fall 2 in Vergleich zum Referenzfall dargestellt.

Der Gesamtertrag fällt mit 5.129.400 € pro Jahr einspeisefähiges Biomethan im Referenzfall am höchsten aus. In Fall 1 werden unter Berücksichtigung der aufgelisteten Kostenpositionen 4.602.048 € pro Jahr erwirtschaftet und der Ertrag in Fall 2 liegt bei 3.004.160 € pro Jahr und

ist damit am niedrigsten. Fall 1 liegt in Bezug auf den jährlichen Ertrag sehr nah an der Summe des Referenzfalls. Dies ist darin begründet, dass der Ertrag pro m³_N Methan sich mit 0,53 € pro m³_N in Fall 1 zwar von den 0,95 € pro m³_N im Referenzfall unterscheidet, jedoch wird in Fall 1 mehr Biomethan erzeugt als im Referenzfall.

Schlussfolgerung

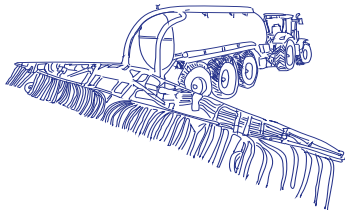
Für einen kontinuierlichen Betrieb der biologischen Methanisierung sind derzeit die Kosten für den Wasserstoff zu hoch (Fall 2), um eine attraktive Alternative zum Referenzfall darzustellen. Dies zeigt sich auch bei den Betrachtungen von Fall 1, bei dem die Kosten für die Wasserstofferzeugung mittels Elektrolyse vor allem von dem Strompreis abhängig sind. In den Kalkulationen wurde ein Strompreis von 50 €/MWh angenommen. Würde man anders als die in Tabelle 2 getroffene Annahme lediglich 20 €/MWh für den Strom zahlen müssen, dann würde der jährliche Ertrag des Verfahrenskonzeptes Fall 1 bei 6.107.981 € liegen und somit eine sehr attraktive Alternative für den betrachteten Referenzfall (5.129.400 €) bieten.

Basierend auf den dargestellten Einsatzmöglichkeiten der biologischen Methanisierung sowie deren ökonomischen Betrachtung ist vor allem der Betrieb solch einer Anlage als Ergänzung an einer Biogasanlage mit Gasaufreinigung eine aussichtsreiche Option aus Biogas nachhaltig Biomethan zu erzeugen.

Tabelle 4: Vergleich der Investitionskosten

		Referenzfall	Fall 1	Fall 2
Erzeugtes Biomethan	m ³ _N	618	1.000	1.000
Investitionskosten (10 Jahre)	€	-	-794.692	-83.092
Zinsen (1,5 %)	€	-	-11.920	-1.246
Stromkosten (50 €/MWh)	€	-	-2.509.888	-
Wasserstoffkosten	€	-	-	-5.171.618
Biomethanertrag	€	5.129.400	8.300.000	8.300.000
Wartung (4 % der Investitionskosten)	€	-	-381.452	-39.884
Gesamtertrag	€ pro Jahr	5.129.400	4.602.048	3.004.160
Gesamtertrag	€ pro m ³ _N	0,95	0,53	0,34

Kennzahlen



70 Millionen Tonnen Gülle fallen jährlich in den Niederlanden an.

200 Millionen Tonnen Gülle sind es in Deutschland.

Davon werden in Deutschland
43 Millionen Tonnen
 Rindergülle und
6 Millionen Tonnen
 Schweinegülle zur Biogaserzeugung
 genutzt.

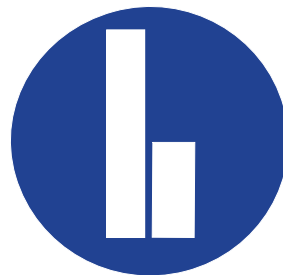


Davon werden in den Niederlanden
1,2 Millionen Tonnen
 Rindergülle und
1,5 Millionen Tonnen
 Schweinegülle zur Biogaserzeugung
 genutzt.

Würde die Hälfte der bislang ungenutzten Güllemenge erschlossen werden, dann könnten in Deutschland zusätzlich jährlich

75 Millionen Tonnen
 und in den Niederlanden
34 Millionen Tonnen

Gülle zur Biogaserzeugung eingesetzt werden.



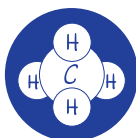
35 Vol.-%

Wasserstoffgehalt bei der Erzeugung von Wasserstoff aus industriellen Abwasser,



70 Vol.-%

Methangehalt nach der Hochlastvergärung von Schweinegülle erreicht,



> 90 Vol.-%

Methangehalt nach der biologischen Methanisierung von Biogas erzielt.

Kennzahlen

9,47 Millionen

Haushalte werden in Deutschland mit Biogasstrom versorgt.



In den Niederlanden werden

90.000

Haushalte mit Grüngas versorgt.

Erhöhung des Methangehaltes von Biogas
von
55 Vol.-% auf **> 90 Vol.-%**
ist mittels biologischer Methanisierung möglich.



20 % des Stroms aus erneuerbaren Energien entstehen in Deutschland und den Niederlanden aus Biomasse.

Wasserstoffbildungsraten von
0,3 bis 1,2 m³/m³/d
wurden kontinuierlich erzeugt.



Es dauert nur
4 Tage
Ferkelgülle mit Hochlastreaktoren zu vergären.

Methanbildungsraten von
0,5 m³/m³/d
wurden mit der biologischen Methanisierung erreicht.

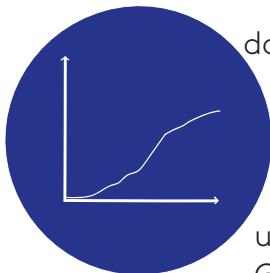


9.523 Biogasanlagen in Deutschland

davon **200** Biomethananlagen

250 Biogasanlagen in den Niederlanden

und **25** Anlagen zur Gasaufreinigung



Gasgestehungskosten der Hochlastvergärung von Ferkelgülle betragen

4,6 Cent/kWh

