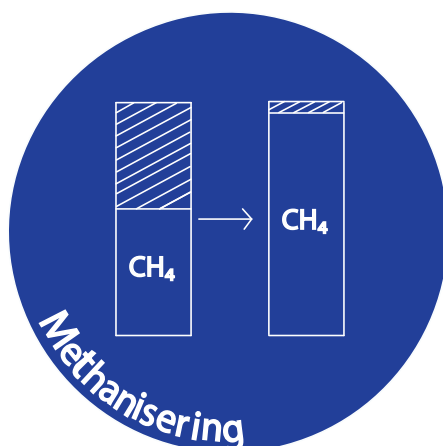




Hooglastvergisting

Groensnede

Methanisering

3 deelprojecte in Groene Kaskade

Colofon

Uitgever:

FH Münster
Stegerwaldstraße 39
48565 Steinfurt



FH MÜNSTER
University of Applied Sciences

Het project Groene Kaskade werd ondersteund door:



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**



Projectpartners

Lead:

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

Hooglastvergisting:

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@bioenergieclusterootnederland.nl

bio-energie cluster
Oost-Nederland

Groensnede en methanisering:

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



Inhoud | Overzicht

02 Colofon

03 Inhoud

04 Groene Kaskade

06 Deelprojecten

08 Hooglastvergisting

18 Groensnede

26 Methanisering

38 Kengetallen

Groene Kaskade

Het doel van dit project was om de bio-economie in de Duits-Nederlandse projectregio te bevorderen door het gebruik van biomassa in de gehele waardeketen te verbeteren. Met meer dan 20 projectpartners heeft het projectconsortium zich in 12 deelprojecten beziggehouden met het thema bio-economie en de verschillende stappen in het gebruik van biomassa. Naast Nederlandse en Duitse bedrijven ondersteunden onderzoeksinstituten in het grensgebied het samenwerkingsverband. Sommige deelprojecten hadden betrekking op de verbetering en verdere ontwikkeling van bestaande concepten voor de vergisting van uiteenlopende biomassa. In dit kader werd een ringvergistingsinstallatie in gebruik genomen en werd nagedacht over modulaire mogelijkheden om oudere systemen te verbeteren. Ook de winning van materialen uit restmaterialen stond centraal. In deze context werden de productie van poreuze kolen uit verschillende biomassa, de toepassing van hydrothermische carbonisatie (HTC) en de productie van waterstof uit koolhydraathoudende afvalstromen onderzocht. Daarnaast werden ook de verschillende gebruikswegen van biogas onderzocht. Dit omvat de productie van biogas op basis van de elektriciteitsvraag, de opwaardering van biogas tot biomethaan en het gebruik in de vorm van Compressed Natural Gas (CNG) als brandstof voor voertuigen.

De doelstellingen en resultaten van het project Groene Kaskade kunnen als volgt worden samengevat:

- Ontwikkeling van innovatieve en economisch waardevolle toepassingen voor biogas (bijv. on-demand stroomvoorziening)
- Technologische verbetering van de biogastechnologie door middel van aanpassing en omschakeling met als doel de rentabiliteit van biogasinstallaties te verhogen en de productiekosten te verlagen.
- Behandeling van digestaat met als doel waardevolle voedingsstoffen uit het digestaat te winnen.
- Behandeling van organische reststromen met microalgen om waardevolle voedingsstoffen en ingrediënten (Feed en Food, cosmetica, energie) te verkrijgen.
- Gebruik van restmateriaalstromen voor de productie van recyclebare materialen, zodat er zoveel mogelijk een economisch waardevol product wordt geproduceerd.
- Voorbehandelingsconcepten voor inputstromen zoals drijfmest door scheiding van fracties en behandeling met alternatieve procesconcepten.
- Verhoging van de biogasopbrengst door het gebruik van voorbehandelingstechnieken.

Door de interdisciplinaire samenwerking van Duits-Nederlandse projectpartners met verschillende competenties en verschillende werkaandachtspunten is een projectconsortium ontstaan dat elkaar optimaal aanvult. De grensoverschrijdende samenwerking tussen de projectpartners heeft waardevolle inzichten opgeleverd in de recycling van restmaterialen en de optimalisatie van de concepten van biogasinstallaties.

De deelprojecten „Methanisering“, „Hooglastvergisting“ en „Groensnede“ werden uitgevoerd door de projectpartners HoSt, WESSLING GmbH, het bio-energiecluster Oost-Nederland (BEON), PlanET Biogastechnik GmbH en de FH Münster (leadpartner). De resultaten, die in het kader van deze drie deelprojecten samen met de projectpartners zijn samengesteld, worden in deze brochure in afzonderlijke artikelen gepresenteerd.

GRÜNE KASKADE GROENE KASKADE



1. Regelenergie	Ontwikkeling van dataregels, rekenregels, nieuwe spelregels en de organisatie van het netwerk van kennisdragers en stakeholders.
2. Ringvergisting	Ontwikkeling en ingebruikname van een ringfermentor: Een combinatie van plug flow en geroerde tankfermentor voor vloeibare mest en mest.
3. Refitting	Ontwikkeling van modulaire opties voor het ombouwen van oudere systemen
4. Methanisering	Verbetering van biogas tot biomethaan door middel van biologische methanisering  WESSLING Quality of Life  HOST BIO-ENERGY INSTALLATIONS  FH MÜNSTER University of Applied Sciences
5. Hooglastvergisting	Integratie van hogedrukreactoren in het proces van biogasproductie om de vergisting van substraten met een hoog watergehalte te verbeteren  bio-energie cluster Oost-Nederland  PlanET  FH MÜNSTER University of Applied Sciences
6. Tanken bij de boer	Gebruik van biogas op bedrijfsniveau als brandstof om het transport te verduurzamen.
7. Groensnede	Materiaalgebruik van rest- en afvalstoffen  WESSLING Quality of Life  HOST BIO-ENERGY INSTALLATIONS  FH MÜNSTER University of Applied Sciences
8. Poreuze kolen	Für Wasserpflanzenmaterial, Schweinedung und Gärrest wird anhand der Herstellung von Biokohle ein Verwertungsweg aufgezeigt.
9. HTC	Voor waterplantenmateriaal, varkensmest en vergistingsresidu's wordt een recyclingpad getoond door middel van de productie van biochar.
10. Fermentatietechniek	Prüfung eines Biogasverfahrens, das in einem vielstufigen System mit optimierter Bakterienkultur einen sehr hohen Umsatz schafft.
11. Valorisatie	Het testen van een biogasproces dat een zeer hoge omzet genereert in een meerfasensysteem met geoptimaliseerde bacteriecultuur.
12. Projectmanagement & PR	Gecoördineerd door de Provincie Groningen; voortgangsbewaking, gegevensuitwisseling, terugkoppeling van resultaten.

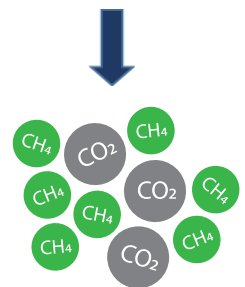
De deelprojecten



Hooglastvergisting

De uitdaging voor conventionele biogasinstallaties is om biogas te produceren uit drijfmest met een hoge capaciteit. Met de hooglastreactoren kan de vergisting van drijfmest veel efficiënter worden uitgevoerd. Het resultaat: meer energie uit drijfmest met een methaangehalte tot 70 Vol.-% in het geproduceerde biogas.

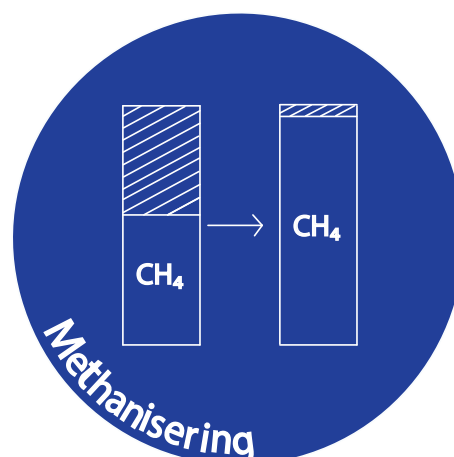
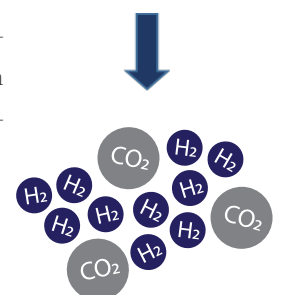
vloeibare
mest



Groensnede

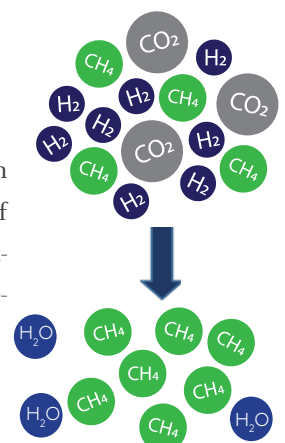
Dit deelproject is vernoemd naar vers gesneden plantenresten, die symbool staan voor een hele reeks biomassa-reststoffen. Het doel was om waardevolle materialen uit deze reststoffen te halen. Het resultaat: groene waterstof geproduceerd door micro-organismen.

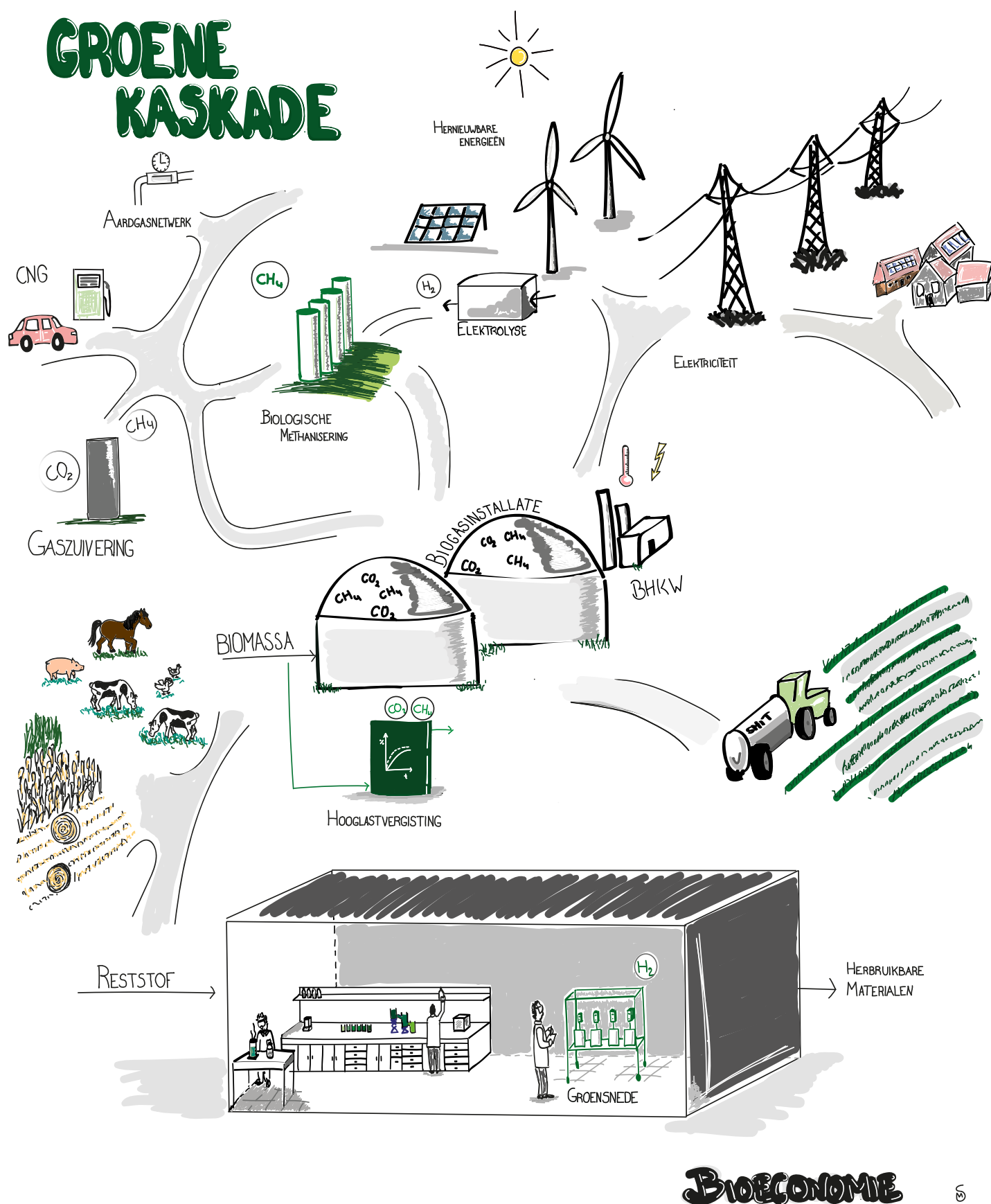
Rest- en
afvalstoffen



Methanisering

De focus van dit deelproject was het opwaarderen van biogas tot een aardgas-substituut. Biogas en waterstof worden door micro-organismen gemetaboliseerd tot methaan. Op deze manier kan een gas met een methaangehalte van meer dan 90 Vol.-% worden gerealiseerd.





Hooglastvergisting



**12 Het concept:
Hooglastvergisting**

**14 Gescheiden varkensmest - een
substraat met hoog potentieel**

**16 Business Case:
Hooglastvergisting
van drijfmest**

Hooglastvergisting

In het deelproject hooglastvergisting werden de mogelijkheden voor het opzetten van nieuwe reactorconcepten voor de vergisting van vloeibare reststoffen uit de landbouw onderzocht. Een innovatief reactorontwerp verhoogde de efficiëntie van het hele proces. Hiervoor werden zogeheten hooglastreactoren uit de industriële afvalwatertechnologie gebruikt.

De huidige wijzigingen in regelgeving voor hernieuwbare energiebronnen (EEG in Duitsland, SDE+ in Nederland) stellen de biogasindustrie voor nieuwe uitdagingen. Dit betreft met name de economische exploitatie van biogasinstallaties en tegelijkertijd het toegenomen gebruik van reststoffen. Met name de efficiënte vergisting van substraten met een hoog watergehalte, zoals bijvoorbeeld drijfmest, is in economisch opzicht voor een biogasinstallatie niet haalbaar.

Met het deelproject hooglastvergisting zijn technieken ontwikkeld die bekend zijn van de industriële afvalwaterzuivering, de zogenaamde hooglastreactoren, als een nieuw concept en een nieuwe oplossingsstrategie voor het verbeteren van de vergisting van vloeibare substraten van biogasinstallaties. De toepassing van deze reactoren voor de vergisting van substraten met een laag drogestofgehalte leidt tot een verhoging van de efficiëntie van het totale concept van een biogasinstallatie. Een essentieel kenmerk van deze reactoren is het behoud van micro-organismen die nodig zijn voor de fermentatie. Door behoud van micro-organismen wordt de dichtheid van de micro-organismen in de reactor verhoogd en de afbraaksnelheid van de onderzochte substraten versneld. Het onderzochte hooglastproces is geschikt voor toepassing in bestaande biogasinstallaties.

Om de mogelijke toepassingen te identificeren en het proces nader te onderzoeken, hebben de Duitse en Nederlandse projectpartners PlanET Biogastechnik GmbH, Bio-energiecluster Oost-Nederland (BEON) en het onderzoeksteam van de FH Münster gezamenlijk de werking van de hooglastreactoren onderzocht. De ervaring van PlanET op het gebied van biogastechnologie en het Duits-Nederlandse netwerk van BEON met haar kennis van de huidige stand van zaken in de biogasindustrie in zowel Nederland als Duitsland hebben aanzienlijk bijgedragen aan het succes. De knowhow van beide projectpartners werd aangevuld door het wetenschappelijk werk van de Hogeschool Münster op het gebied van afvalwater- en milieutechniek, waarbij de kennisoverdracht op het gebied van hooglastreactoren van de industriële afvalwatertechniek naar de biogastechniek succesvol was.

Het concept van hooglastreactoren is een fundamenteel onderdeel van dit deelproject en wordt beschreven in „Het concept: hooglastvergisting“. Vervolgens worden de belangrijkste bevindingen en resultaten van de reeks proeven van het hooglastconcept gepresenteerd, in het bijzonder met varkensdrijfmest gevolgd door de economische berekeningen.

De projectpartners in het deelproject Hooglastvergisting

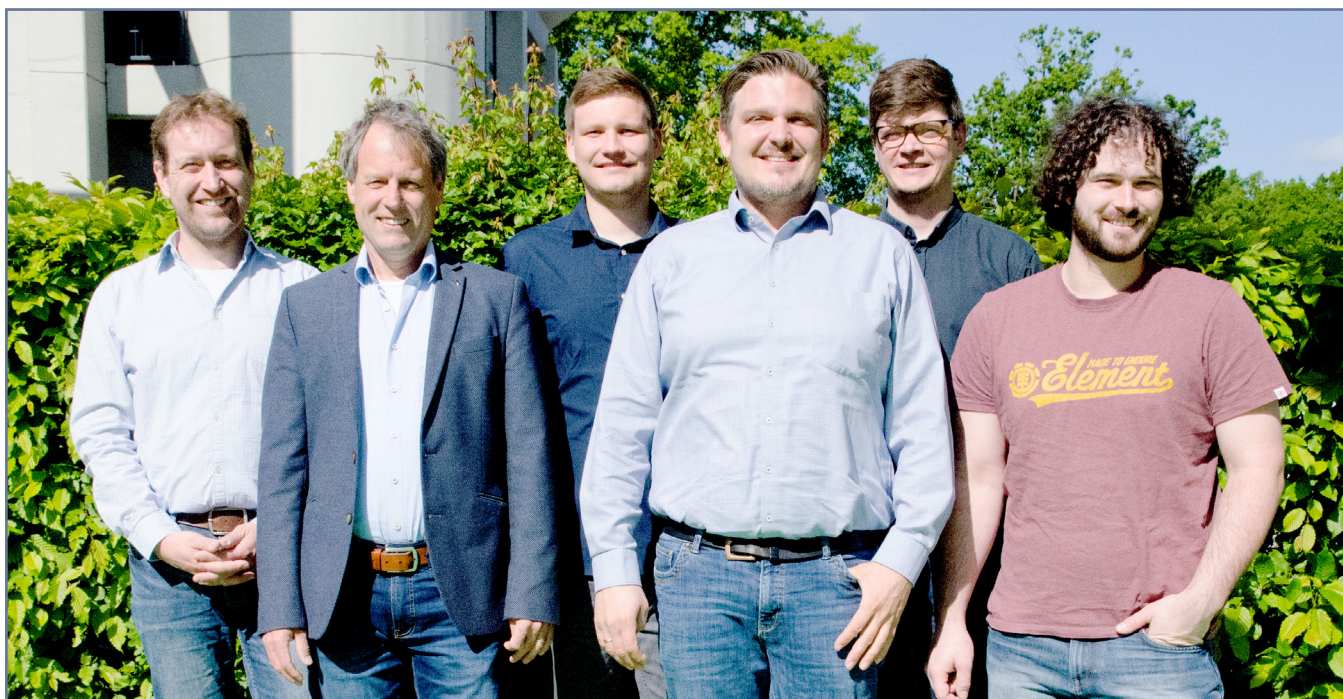


Abbildung 1: Von links naar rechts: Andreas Thesseling (PlanET Biogastechnik GmbH), Frans Feil (Bio-energiecluster Oost-Nederland), Alexander Naßmacher (FH Münster), Dr.-Ing. Elmar Brüggling (FH Münster), Tobias Weide (FH Münster), Jeroen Terwort (PlanET Biogastechnik GmbH)



PlanET Biogastechnik GmbH

Als leverancier en ontwerper van biogasinstallaties beschouwt PlanET de biogastechnologie in haar geheel. De optimale interactie van individuele processen bepaalt het economische succes van een biogasinstallatie. PlanET is uitgegroeid tot één van de toonaangevende bedrijven in de biogassector dankzij haar expertise op het gebied van planning, goedkeuring, installatiebouw en een eigen laboratorium voor biologische dienstverlening. Dit wordt ook bevestigd door de 500 installaties die al wereldwijd zijn gebouwd.

Taken in Groene Kaskade

Het project hooglastvergisting van Groene Kaskade werd door PlanET ondersteund met biologische en technische kennis. Naast het adviseren over het ontwerp van de reactoren, het opstellen van de technische tekeningen voor de prototypes en het ondersteunen van de bouw, bestond onze bijdrage ook uit het adviseren over de werking van de hooglastsystemen. Een ander punt is de voorbereiding van een economische haalbaarheidsstudie voor het nieuwe reactorconcept, gebaseerd op de gegevens van de hogeschool. Daarnaast was PlanET betrokken bij de substraatevaluatie en de aanschaf van het nieuwe reactortype.

Bio-energiecluster Oost-Nederland

Het Bio-energiecluster Oost-Nederland (BEON) is een samenwerkingsverband van 25 bedrijven en instellingen in het oosten van Nederland. BEON zet zich in voor de toepassing van bio-energie en technologische ontwikkelingen op dit gebied. Vergisting is een belangrijk thema in de activiteiten van BEON met als doel de meerwaarde door de vergisting van biomassa te verhogen. Fabrikanten van installaties, agrarische organisaties (LTO-Noord), energie- en afvalverwerkingsbedrijven, kennisinstellingen en technologie-ontwikkelings-bedrijven zijn actief betrokken bij de implementatie. In dit kader werd in 2019 een actieplan opgesteld dat voorziet in een verdere technologische ontwikkeling in de hele keten van biogasproductie, verwerking van gas en digestaat en uitbreiding van het gasnet. Daarnaast werkt BEON samen met Duitsland om uitge-



breide ervaring op te doen op het gebied van biogasproductie en tegelijkertijd gebruik te maken van innovatieve grensoverschrijdende diensten en producten.

Taken in Groene Kaskade

Met dit netwerk van verschillende contacten en actoren op het gebied van bio-energie en de kennis van de huidige ontwikkelingen op het gebied van vergistingstechnieken in Nederland en Duitsland heeft BEON een doorslaggevende bijdrage geleverd aan de hooglastvergisting. Bovendien kan door het gebruik van het netwerk en de vele contacten het concept van de hooglastvergisting aan alle geïnteresseerde partijen worden gepresenteerd.

Forschungsteam der FH Münster

De FH Münster is een van de grootste hogescholen in Duitsland. In totaal zijn meer dan 14.500 studenten ingeschreven in 12 faculteiten en drie centrale wetenschappelijke instellingen. Het onderzoeksteam van Prof. Wetter en Dr.-Ing. Elmar Brüggling maakt deel uit van de afdeling Energie-Gebäude-Umwelt (EGU) en telt momenteel 35 medewerkers, waarvan 23 projectingenieurs uit verschillende disciplines. Het team is al meer dan 18 jaar actief op het gebied van biogasonderzoek en heeft diverse regionale, nationale en internationale projecten met succes kunnen realiseren. Met de verworven kennis in de verschillende projecten kan het onderzoeksteam terugvallen op uitgebreide ervaringen met de uitvoering van projecten. Daarnaast heeft het team een groot netwerk van actoren uit de biogasindustrie, wat voor de doorontwikkeling van het gebruik van biomassa van groot belang is.



FH MÜNSTER
University of Applied Sciences

Taken in Groene Kaskade

In het kader van Groene Kaskade nam de Hogeschool Münster het voortouw voor de deelprojecten methaniseren, groensnede en hooglastvergisting. Dit betreft met name de projectcoördinatie van de drie deelprojecten en de kennisoverdracht door middel van publicaties van de projectresultaten in de vorm van posterbijdragen, artikelen en conferentiebijdragen. Daarnaast begeleidde en coördineerde het onderzoeksteam van de FH Münster de verschillende testreeksen in het kader van de hooglastvergisting. Dit omvat zowel laboratoriumexperimenten als het onderzoek van de ontwikkelde processen op semi-technische schaal in het technisch centrum van de FH Münster. In het technisch centrum van de FH Münster werd het concept van hooglastvergisting voor de vergisting van gescheiden varkensmest getest en geanalyseerd met reactoren uit de afvalwatertechnologie.

Het concept: hooglastvergisting

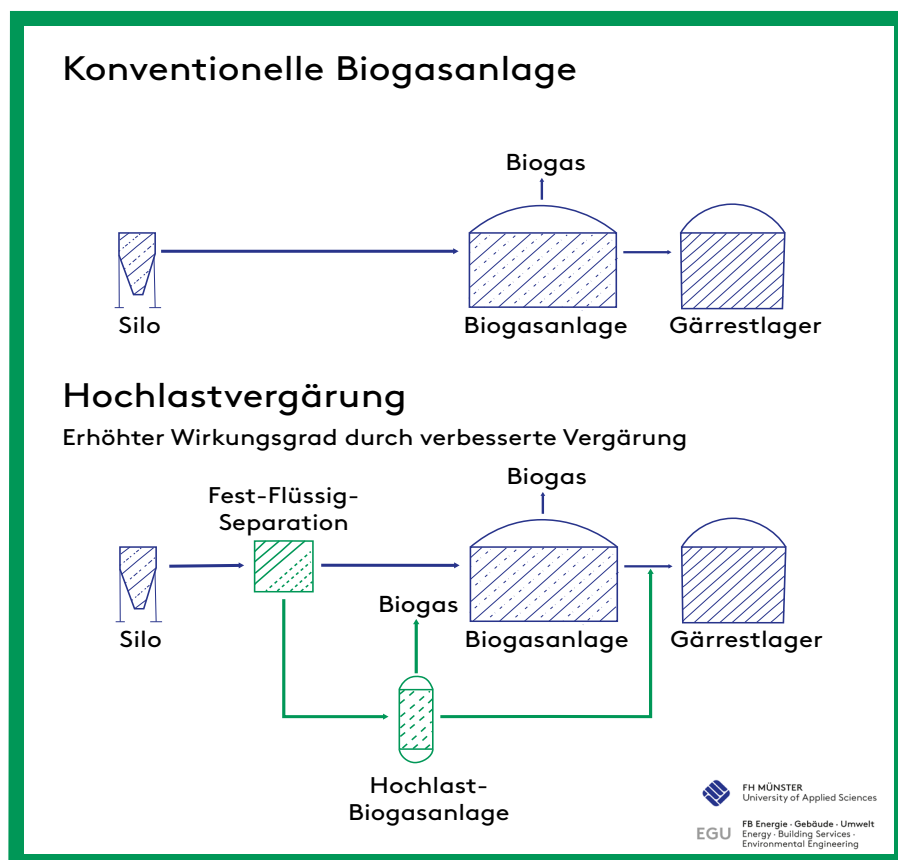
Het energetisch gebruik van biomassa is vandaag en ook in de toekomst een belangrijke component voor de ontwikkeling van hernieuwbare energieën. Een voorwaarde voor de ontwikkeling van de bio-energie is de beschikbaarheid van geschikte biomassa. Het intensievere gebruik van rest- en afvalstoffen speelt een steeds grotere rol. Daarbij is drijfmest een agrarisch restmateriaal waarvan het potentieel nog niet volledig is benut. Momenteel wordt ongeveer 30 % van de in Duitsland geproduceerde mest gebruikt voor vergisting in biogasinstallaties. In Nederland wordt 15 % van de geproduceerde varkensmest en 2 % van de rundermest gebruikt voor vergisting. Het deels lage drogestofgehalte en de daarmee gepaard gaande lage energiedichtheid per m³ van de drijfmest maakt monovergisting in conventionele biogasinstallaties, bijvoorbeeld 75 kW moeilijker en vereist daarom vaak de toevoeging van co-substraten.

De integratie van anaerobe hooglastreactoren in conventionele biogasprocessen beschrijft een proces voor de vergisting van gescheiden drijfmest. Doel was om door innovatieve reactorconcepten het rendement van de bestaande biogasinstallaties te verhogen en daarmee de totale efficiency van de biogasproductie te verhogen. Tegelijkertijd kunnen tot nu toe nog niet volledig benutte biogene restmateriaal-potentiëlen bruikbaar worden gemaakt, waardoor het toepassingsgebied van de biogastechnologie

wordt uitgebreid.

Het concept

De hooglastreactoren worden reeds gebruikt in de industriële afvalwatertechnologie voor de anaerobe vergisting van organisch verontreinigd afvalwater. Aangezien deze hooglastreactoren substraten nodig hebben met een laag drogestofgehalte ($DS < 2\%$), is een voorafgaande scheidingsstap nodig voor de vergisting van drijfmest. In deze stap worden vloeibare en vaste componenten van de mest gescheiden. De vaste fase wordt nog steeds vergist in bestaande en conventionele biogasinstallaties en de vloeibare fase wordt vergist in hooglastreactoren. Door con-



Figuur 2: Het procesconcept van hooglastvergisting

ventionele biogasinstallaties aan te vullen met hooglastvergisting wordt in het beste geval de verblijftijd voor de vergisting van drijfmest verkort en de efficiëntie van de biogasproductie verhoogd (figuur 2).

De voordelen

Het concept biedt de volgende voordelen en procesontwikkelingen:

- De dichtheid van micro-organismen wordt verhoogd door een in de reactor geconstrueerd biomassa-retentiesysteem, waardoor de snelheid en efficiëntie van de afbraak toeneemt
- De verblijftijd van de substraten is drastisch verkort in vergelijking met conventionele
- Het biogaspotentieel van de substraten wordt volledig benut, ondanks de kortere verblijftijden. Een nog hoger biogaspotentieel kan worden bereikt door synergie-effecten
- De hooglastvergisting kan als extra module in bestaande biogasinstallaties worden geïntegreerd, waardoor de totale efficiëntie van de installatie wordt verhoogd

Tijdens het conceptueel ontwerp zijn de twee gebieden afvalwaterzuivering en de technologie van agrarische biogasinstallaties verenigd. Beide sectoren lijken sterk op elkaar, aangezien in beide gebieden anaerobe processen worden toegepast en er biogas wordt geproduceerd. De benaderingen en doelstellingen zijn echter verschillend:

Industriële afvalwatertechnologie:

- Gebruik van vloeibare substraten
- Doel: verwijdering van koolstof uit afvalwater

- De biogasproductie is meestal van minder belang, eerder positief neveneffect
- Reactortechnologie: korte verblijftijden, hoge ruimtedruk, laag vergistingsvolume
- Kleine vloeroppervlakte vereist
- Hoge mate van automatisering

Biogastechnologie voor de landbouw:

- Hergebruik van overwegend vaste biomassa en substraten
- Doel: productie van maximale biogasopbrengsten
- Reinigingsprestaties en terugwinning van voedingsstoffen, meestal van ondergeschikt belang.
- Reactortechnologie: lange verblijftijden, hoge ruimtevereisten, hoog fermentorvolume

Om de geschiktheid van het hooglastconcept te testen, is als onderdeel van het deelproject een testprogramma ontwikkeld. Samen met PlanET werden drie semi-technische reactoren (een Expanded Granular Sludge Bed (EGSB) en twee reactoren met een vast bed) ontworpen, gebouwd en geëxploiteerd. Op basis van testresultaten met verschillende mest werden uiteindelijk economische overwegingen opgesteld.

Gescheiden varkensmet - een substraat met een hoog potentieel

Om de energetische mogelijkheden van varkensmest uit te breiden, werd voor het onderzoek naar monovergisting in de hooglastreactoren gekozen voor mest van mestvarkens en mest van biggen.

Drie semi-technische reactoren die worden gebruikt

De hooglastreactoren zijn twee reactoren met een vast bed (figuur 3-1) en een EGSB-reactor (figuur 3-2). Met deze 3 reactoren werden de vergistingsexperimenten uitgevoerd tijdens de projectperiode.

Deze drie reactoren verschillen met name in de manier waarop ze de dichtheid van de micro-organismen in het systeem verhogen. In de EGSB-reactor ($V=30$ l) worden de anaerobe micro-organismen samengevoegd op zogenaamde pellets (figuur 3-5). De pellets worden bewogen door de stromingen en gasvorming in de reactor. Een geschikte scheidingsinrichting in de reactorkop scheidt de pellets van de gas- en afvoerstroom. De reactoren met een vast bed ($V = 50$ l) zijn daarentegen gevuld met keramische

vulstoffen, die als draagmateriaal en dus als groeioppervlak dienen. Hi-flow (figuur 3-3) werd gebruikt voor de ene reactor en zadel- vulmateriaal (figuur 3-4) voor de andere, die verschillen in vorm en structuur. De vulmaterialen liggen dicht aanéén in de reactor, zodat ze een vast bed vormen en niet door de stroming worden opgewerveld. De groei op deze oppervlakken leidt tot een fixatie van de micro-organismen, waardoor er geen extra scheidingsinrichting aan de reactoruitgang nodig is.

Het doel van de testseries was het bepalen van ontwerpparameters voor een schaalvergroting op proefbasis en het verzamelen van voldoende procesgegevens voor latere economische afwegingen.

Tests in continubedrijf

Voor de uitvoering van de experimenten werd de varkensmest op de FH Münster met behulp van een fijn filter gescheiden. Vaste stoffen tot een grootte van $> 100 \mu\text{m}$ werden gescheiden van de vloeibare fase. De gescheiden var-



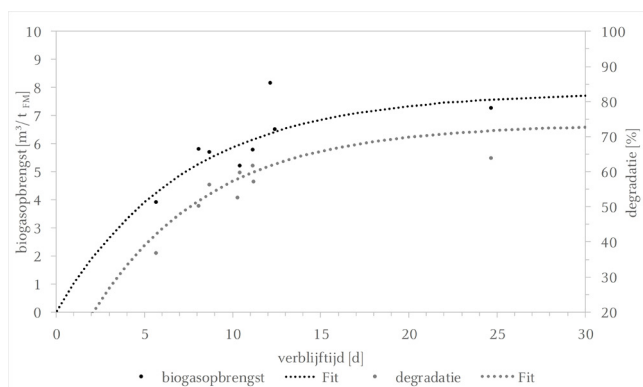
Figuur 3: Twee Hooglastreactoren (1), EGSB-reactor (2), Hi-Flow (3), zadel-vulmateriaal (4), Pellets (5)

kensmest werd opgeslagen in afkoelbare opslagcontainers, die ook onder een stikstofatmosfeer werden bewaard. De gekoelde opslag van de mest was noodzakelijk om opslag gebonden vergisting van de varkensmest te voorkomen en zo de reproduceerbaarheid van de testresultaten over een lange periode te garanderen.

De drie reactoren werden continu gebruikt voor de testruns bij $\vartheta = 40\text{ }^{\circ}\text{C}$ en met afzonderlijke varkensmest (droog residu = 2 gew.-%, organisch droog residu = 50 gew.-%). Voor de balans werden de reactoren met verschillende verblijftijden gebruikt, tot aan een stationaire situatie. Voor de evaluatie van de procedure werden de biogasopbrengsten, de degradatiesnelheden, de ruimtebelasting en de hydraulische verblijftijden bepaald.

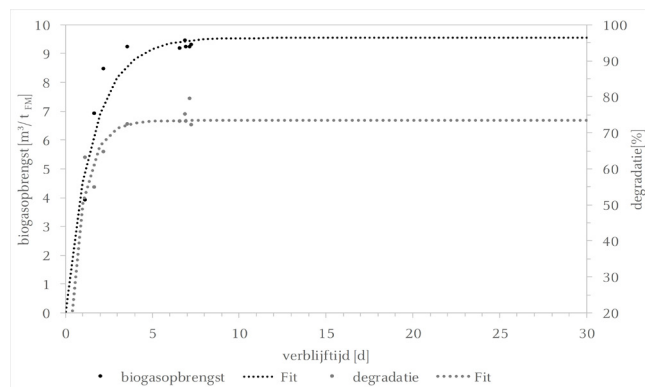
Resultaten van het optimaliseren van de verblijftijd

Figuur 4 toont de resultaten van de proefreeksen met gescheiden varkensmest en figuur 5 voor gescheiden biggenmest. Gemiddeld heeft de vergisting van vloeibare varkensmest geresulteerd in een methaangehalte van 70 vol.-% in het biogas. De presentatie van de individuele punten resulteerde uiteindelijk in een verblijftijd-afhankelijke degradatiecurve. Bovendien kan op basis van de gepresenteerde resultaten een correlatie tussen de biogasopbrengst en de verblijftijd worden vastgesteld.



Figuur 4: Weergave van de resultaten voor mest van mestvarkens

De resultaten tonen aan dat gescheiden biggenmest het meest efficiënt werd afgebroken met een hydraulische verblijftijd van 4 d. In de testreeks waren de biogasopbrengst en de mate van afbraak het hoogst en de verblijftijd van het substraat laag. Tijdens de vergisting van gescheiden mest van mestvarkens bleek een verblijftijd van 11 d optimaal te zijn. Verder onderzoek met kortere verblijftijden toonde aan dat een groot deel van het biogaspotentieel kan worden gerealiseerd, maar dat de afbraaksnelheid is afgenomen. Bovendien bleek uit de testreeks dat mest van verschillende landbouwbedrijven verschillende gasopbrengsten en afbraaksnelheden met betrekking tot de vergisting oplevert. Mogelijke factoren zijn de oorsprong van de mest, de leeftijd en het voedingspatroon van de producerende dieren.



Figuur 5: Weergave van de resultaten voor biggenmest

Business Case: Hooglastvergisting van mest

De economische efficiëntie van een proces is een doorslaggevend criterium voor de afweging van de toepassingsmogelijkheden en de implementatie in de praktijk. Op basis van de relatie tussen de verblijftijd en de mate van degradatie, alsmede de biogasopbrengst en de balans van de scheiding, werd een eerste economische afweging van het systeem gemaakt door PlanET en de FH Münster.

Economische voordelen van hooglastvergisting

De gasproductiekosten van het proces zijn bepaald in de economische analyse van de hooglastvergisting van gescheiden varkensmest. Deze gasproductiekosten van het hooglastproces werden vergeleken met die van een conventionele 75 kW_{el} biogasinstallatie. Met een conventionele landbouwbiogasinstallatie van 75 kW_{el} bedragen deze kosten 4,7 cent/kWh.

Voor het ontwerp van de hooglastvergisters en de op basis hiervan berekende gasproductiekosten is ook uitgegaan van de vergisting van 26.250 m³ mest per jaar. Na de scheiding van deze hoeveelheid mest met een scheidingspercentage van 40 vol.-% zou een hoeveelheid van 15 750 t/jaar vloeibare fase en 10 500 t/jaar vaste fase ontstaan. De vergisting van de vloeibare fase resulteert in een jaarlijkse hoeveelheid methaan van 101.951 m³ methaan met een verblijftijd van 4 dagen en een biogasopbrengst van 9,2 m³/t_{vaste massa} (70 vol.-% methaan).

Om 15.750 t/a gescheiden drijfmest met een hooglastreactor te kunnen vergisten, zou het een volume van 173 m³ moeten hebben. Tabel 1 toont de gegevens voor het reactorontwerp en de kostenposten voor de berekening van de gasproductiekosten.

Resultaten van de waarnemingen

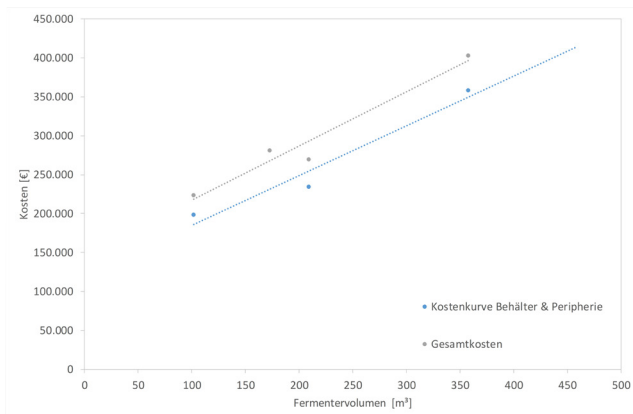
Over een financieringsperiode van 12 jaar zijn voor de onderzochte biggenmest gasproductiekosten van 4,6 cent/kWh berekend. Voor de onderzochte mest van mestvarkens met een optimale verblijftijd van 11 dagen bedroegen de berekende gasproductiekosten 11 cent/kWh. Daartegen-

Tabel 1: Overzicht van ontwerp- en kostengegevens voor de vergisting van de vloeibare fase in hooglastreactoren

	Eenheid	Vastbed	EGSB
Reactorontwerp			
Volume	m ³	173	173
Jaarlijkse productie-uren	h/jaar	8.544	8.544
Hoeveelheid biggenmest vloeibaar	m ³ /jaar	15.750	15.750
Verblijftijd	d	4	4
Biogasopbrengst vloeibare fase	m ³ /t _{FM}	9,2	9,2
Investerings- en exploitatiekosten			
Reactorkosten + periferie	€	333.202	328.873
Financieringsperiode	jaar	12	12
Rente	%	2,5	2,5
Variabele exploitatiekosten	€	19.951	19.623
Totale kosten	€	52.434	51.684
Gasproductiekosten			
Methaanaandeel	%	70	70
Totale hoeveelheid biogas	m ³	145.644	145.644
	kWh	1.124.519	1.124.519
Productiekosten	Ct/kWh	4,7	4,6

nover staan de gasproductiekosten van de conventionele biogasinstallatie van 4,7 Cent/kWh. Het proces met biggenmest kan dus volgens eerste schattingen economisch worden uitgevoerd. Voor de werking van de reactoren met mest van mestvarkens moeten de gasproductiekosten echter nog steeds worden verlaagd. Dit kan aanzienlijk worden verhoogd, bijvoorbeeld door toevoeging van vloeibare co-substraten, zoals geperste of perssap uit maïs- of kuilgras. Uit de kostenraming voor het hooglastvergistingsproces is ook gebleken dat er een lineair verband bestaat tussen het volume van de vergister en de investerings- en exploitatiekosten (figuur 1). Hieruit kan worden afgeleid dat de bouw van grotere vergisters geen voordelen oplevert in termen van investerings- en exploitatiekosten. Om de kosten van de hooglastreactoren te verlagen en dit

proces zo economisch aantrekkelijker te maken, zou het daarom noodzakelijk zijn om de efficiëntie van het vergistingsproces te verhogen, bijvoorbeeld door de verblijftijd te verkorten.



Figuur 6: Ontwikkeling van de kosten afhankelijk van het vergistingsvolume

Verwachting

PlanET Biogastechnik GmbH

Voor de toepassing van het nieuwe reactorconcept zijn vooral vloeibare, gemakkelijk vergistbare reststoffen uit de landbouw en industrie geschikt. Een goed voorbeeld hiervan is varkensmest. Vanwege het hoge vloeistofgehalte is dit op dit moment in biogasinstallaties meestal niet rendabel te vergisten. Door de kortere verblijftijd in het nieuwe hooglastvergisterconcept met een duidelijk kleiner reactorvolume wordt een vergelijkbaar biogasrendement verkregen, zoals bij conventionele installaties. Dit houdt in dat de gasproductiekosten worden verlaagd, wat de rentabiliteit van de vergisting van varkensmest duidelijk verbetert.

Bio-energiecluster Oost-Nederland

Nederland staat voor grote klimaat- en energie-uitdagingen. Het verminderen van het aardgasverbruik is bijzonder belangrijk. Groen gas kan een deel van het aardgas vervangen. Om dit te doen, moeten echter alle bronnen ten volle worden benut. Een belangrijke potentiële bron is de meer dan 70 miljoen ton mest die jaarlijks door runderen, kalveren en varkens wordt geproduceerd. Met de ontwikkeling van vergistingsinstallaties die grote hoeveelheden mest (vloeibare fase na scheiding) in korte tijd kunnen verwerken, kan het aandeel vergiste mest sterk toenemen. In de Twentse en Achterhoekse Regionale Energiestrategie (RES) zijn de verkennende berekeningen onder andere gebaseerd op de vergisting van de helft van de rundveedrijfmest en alle geproduceerde varkensdrijfmest.

FH Münster

Na afloop van het project is een procesconcept gepresenteerd en wetenschappelijk onderzocht, dat nieuwe perspectieven biedt voor de biogasindustrie in Duitsland en Nederland. De publieke belangstelling is groot, er is al vele malen gevraagd om een marktconforme invoering van het concept. Toch blijven sommige vragen onbeantwoord.

- Hoe rendabel kan het concept worden gerealiseerd met biogasinstallaties >75 kW?
- Welke reststoffen zijn naast gescheiden, varkensdrijfmest ook geschikt voor vergisting in het hooglastconcept?
- Hoe ziet het proces eruit op pilotschaal?

Deze en andere vragen worden onderzocht in het vervolgproject: BioSmart „Biogasproductie in hooglastvergisters voor een intelligente energievoorziening“ (FKZ: 22031318), gesubsidieerd door Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V.

Groensnede



**22 Herbruikbare materialen uit
reststof**

**24 Continue biogene waterstof-
productie**

Groensnede

Het doel van het deelproject „Groensnede“ is het gebruik van onbenutte biomassa voor productie van waardevolle producten. Met een uitgebreid testprogramma werden geschikte reststoffen en afvalwaterstromen geïdentificeerd en gekarakteriseerd. Deze werden uiteindelijk omgezet in waterstof door middel van het donkere vergistingsproces.

In tijden van steeds schaarser wordende grondstoffen is het gebruik van alternatieve grondstoffen van groot belang. Het sluiten van materiaalkringlopen is ook een onderwerp dat overeenkomt met het beleid van de EU en van het bedrijfsleven. Een restmateriaal dat vooral bij het maaien van weiden, groene stroken en buitengebieden wordt geproduceerd, is bijvoorbeeld groenafval. Afhankelijk van de herkomst wordt het hergebruikt als diervoeder of moet het als restmateriaal worden afgevoerd. Een veelbelovende manier om materiaalkringlopen te sluiten is het hergebruiken van eerder ongebruikte reststoffen en afvalwaterstromen voor de productie van materialen of het energetisch gebruik ervan. De wereldwijde bevolkingsgroei en de noodzaak om het gebruik van fossiele brandstoffen terug te dringen, leiden tot meer ontwikkelingsactiviteiten op het gebied van alternatieve energiebronnen. Waterstof is een belangrijke grondstof in de bio-economie. De productie van biowaterstof wordt beschouwd als een veelbelovende benadering van duurzame energieproductie, aangezien de technologie een hoog CO₂-reductiepotentieel heeft in vergelijking met de conventionele waterstofproductie, zoals bijvoorbeeld stoomreforming uit aardgas. De totstandkoming van een duurzame waterstofeconomie komt overeen met de Europese klimaatdoelstellingen, zowel vanuit energetisch als vanuit materieel oogpunt.

In het deelproject „Groensnede“ van Groene Kaskade is onderzoek gedaan naar de materiaaltoepassingen van diverse rest- en afvalstoffen. In dit deelproject werden niet alleen groen- en weidesneden onderzocht en gekarakteriseerd. Op basis van de verzamelde gegevens van het

restmateriaal en de afvalwaterstromen werden de meest geschikte geselecteerd en werden de mogelijkheden voor de productie van grondstoffen onderzocht.

Dit betreft met name het onderzoek naar de geschiktheid van verschillende soorten afvalwater voor de productie van biogene waterstof. Op basis van de resultaten zijn veelbelovende restmateriaalstromen geselecteerd en zijn op semi-technische schaal tests uitgevoerd. Dit omvat ook de processtabilisatie en de voorbereiding van de toepassing op technische schaal.

De projectpartners WESSLING GmbH, HoSt en het onderzoeksteam van de Hogeschool Münster hebben in het kader van het project samen opties ontwikkeld voor het hergebruik van restmaterialen. Het bedrijf WESSLING ondersteunde zowel de methodeontwikkeling als de uitvoering van de vereiste analyse. HoSt BV ondersteunde het consortium met name op het gebied van reactorbouw en de overdracht van de resultaten naar grootschalige technologie. Zo konden de projectpartners de wetenschappelijke ondersteuning van de Hogeschool Münster optimaal aanvullen.

De belangrijkste bevindingen en resultaten worden op de volgende pagina's beschreven. Het terugwinnen van waardevolle materialen uit restmaterialen en de biogene productie van waterstof op continue schaal zijn centrale thema's die door de projectpartners gezamenlijk zijn uitgewerkt. Daarnaast zijn er tal van ideeën en vragen over de vooruitgang van de biogene waterstofproductie uit het project voortgekomen.

De projectpartners in het deelproject Groensnede



Figuur 7: Von links naar 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 is als internationaal en onafhankelijk analyse-, test- en adviesbureau actief op 26 locaties in Europa en China. Het familiebedrijf geniet sinds 1983 een uitstekende reputatie bij nationale en internationale klanten. 1.400 medewerkers zetten een breed scala aan expertise in voor de continue verbetering van kwaliteit en veiligheid, milieu- en gezondheidsbescherming. We onderzoeken, analyseren, plannen en implementeren projecten - voor de duurzame verbetering van de levenskwaliteit.

Taken in Groene Kaskade

In het project „Groene Kaskade“ omvatten de speciale taken de exacte bepaling van individuele sporenelementen in de complexe matrix van vergistingsmateriaal en de

versnelling van de bepalingstijd van de gasopbrengst. De experts van WESSLING hebben bij het opsporen van elementen gebruik kunnen maken van hun expertise en uitgebreide kennis op het gebied van biogasanalyse.

Het gepatenteerde BagFerm proces werd gebruikt om het gasrendement te bepalen. Het doel was om de exacte gasopbrengst van restmaterialen, zoals bladeren, onder reële omstandigheden te bepalen en om de bepalingstijd, die voorheen 60 dagen duurde, aanzienlijk te verkorten door het gebruik van near-infraroodspectroscopie (NIRS).



HoSt

HoSt is een onafhankelijk bedrijf dat zich richt op de technologische ontwikkeling van waste-to-energy systemen voor de verwerking van biomassa en afvalstromen en de levering van systemen voor duurzame energieopwekking uit biomassa en afval. HoSt heeft ruime ervaring met de verwerking van diverse afvalstromen uit de voedingsmiddelenindustrie en agrarische bijproducten zoals stro, kaf en grasafval. Het bedrijf heeft 27 jaar ervaring, een groot serviceteam in heel Europa en een team van meer dan 120 ingenieurs die geavanceerde bio-energiesystemen ontwerpen, bouwen en installeren.

HoSt biomassacentrales dragen bij aan het succes van een gesloten kringloopeconomie door het opwekken van hernieuwbare energie, het oplossen van uitdagingen op het gebied van afvalbeheer en het produceren van waardevolle eindproducten uit organisch afval.

Taken in Groene Kaskade

HoSt was met haar expertise op het gebied van biogasinstallatietechnologie betrokken bij de werkpakketten Groensnede en Methanisering.

Met zijn praktische ervaring in de planning, het ontwerp en het gebruik van bio-energiecentrales heeft het bedrijf een belangrijke bijdrage geleverd aan de ontwikkeling van geschikte reactorconcepten.

Dankzij de ervaring van HoSt op het gebied van installatiebouw heeft het bedrijf een goed inzicht in de bedrijfs- en investeringskosten en heeft het bedrijf economische afwegingen kunnen maken voor de installatieconcepten. Dit betreft concreet de productie van biomethaan uit biogas, dat onderzocht werd in het kader van methanisering, alsook de biologische waterstofproductie (Groensnede).



FH MÜNSTER
University of Applied Sciences

Forschungsteam der FH Münster

De FH Münster is een van de grootste hogescholen in Duitsland. Het onderzoeksteam van Prof. Wetter en Dr.-Ing. Elmar Brüggling maakt deel uit van de afdeling Energie-Gebäude-Umwelt (EGU) en telt momenteel 35 medewerkers, waarvan 23 projectingenieurs uit verschillende disciplines. Het team is al meer dan 18 jaar actief in biogasonderzoek en heeft met succes vele regionale, nationale en internationale projecten afgerond. Met de kennis die in de verschillende projecten is opgedaan, kan het onderzoeksteam putten uit een uitgebreide ervaring in projecten. Daarnaast beschikt het onderzoeksteam over een groot netwerk van actoren in de biogasindustrie voor wie de verdere ontwikkeling van het gebruik van biomassa van groot belang is.

Taken in Groene Kaskade

In het kader van Groene Kaskade nam de FH Münster het voortouw bij de deelprojecten methanisering, groensnede en hooglastvergistings. Dit betreft met name de projectcoördinatie van de drie deelprojecten en de kennisoverdracht door de publicatie van de projectresultaten in de vorm van posterbijdragen, artikelen en conferentiebijdragen. Daarnaast begeleidde en coördineerde het onderzoeksteam van de FH Münster de verschillende testreeksen. Dit omvat zowel laboratoriumexperimenten als het onderzoek van de ontwikkelde processen op semi-technische schaal in het techniekcentrum van de FH Münster.

Herbruikbaar materiaal uit reststof

De naam voor het deelproject Groensnede is afgeleid van dit restmateriaal, dat exemplarisch is voor tal van restmaterialen die in de Duits-Nederlandse projectregio zijn geproduceerd en nog niet efficiënt zijn hergebruikt. In sommige gevallen moeten deze zelfs tegen hoge kosten worden afgevoerd. Daarom hebben de projectpartners WESSLING GmbH, HoSt en de Hogeschool Münster in dit deelproject verschillende restmateriaalstromen geïdentificeerd en geschikte processen voor de terugwinning van herbruikbare materialen bepaald. Er werd onder andere gedacht aan processen als verwerking van stro met een basis vergisting voor de suikerproductie. Naast het gebruik als zoetstof wordt suiker ook gebruikt als basisingrediënt bij de productie van aroma's of in de chemische industrie. Verschillende lignocellulosehoudende residuen in het Duits-Nederlandse projectgebied, als stro, takken en bladeren, zijn onder andere geschikt als grondstof. WESSLING GmbH ondersteunde het project door de suiker te analyseren die in de vergistingsproducten wordt geproduceerd en vergemakkelijkte zo de evaluatie van de mogelijkheden voor hergebruik.

Methode-ontwikkeling: Bepaling van het gaspotentieel met near-infraroodspectroscopie

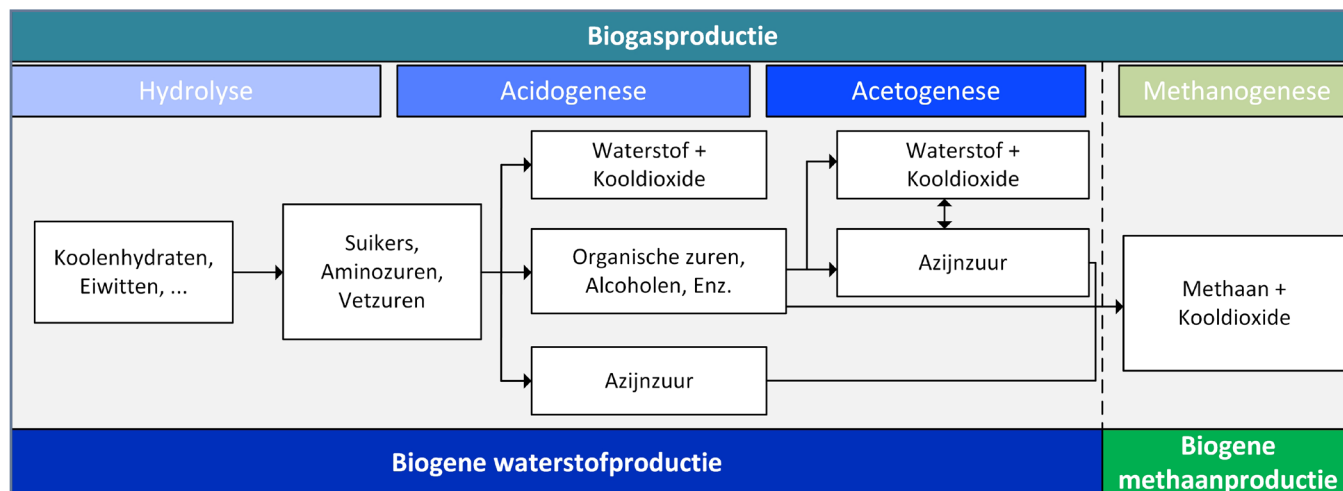
Daarnaast werd in het kader van het project een methode ontwikkeld om het biogaspotentieel van restmaterialen sneller te bepalen waarbij de toepassing van near-infraroodspectroscopie (NIRS) door WESSLING werd onderzocht. Het biogaspotentieel van inputmaterialen wordt vaak bepaald aan de hand van theoretische modellen op basis van meetresultaten van verschillende voederparameters. Deze leveren echter niet altijd betrouwbare resultaten op. Met het gepatenteerde BagFerm-proces heeft WESSLING het potentieel onder reële vergistingsomstandigheden aangetoond. Alle processen van een biogasinstallatie werden gesimuleerd en zo werden betrouwbare resultaten bereikt. Voor de ontwikkeling van de meting van het biogaspotentieel met behulp van NIRS werden honderden BagFerm resultaten vergeleken met de overeenkomstige NIRS spectra. De datasets werden vervolgens geëvalueerd met behulp van een complexe statistische modellerings-

methode. Als een geschikt model succesvol kan worden ontwikkeld, kan in de toekomst al na enkele minuten een eerste beoordeling van het gaspotentieel van het inputmateriaal worden gemaakt op basis van de NIRS-meting.

Donkere vergisting

In de loop van het project bleken de in het begin onderzochte processen voor de suikerproductie in principe mogelijk, maar ze waren energetisch intensief en dus niet economisch haalbaar. Daarom werden naast de experimenten met betrekking tot de suikerproductie alternatieve verwerkingen ontwikkeld. Een van deze gebruikswegen was de productie van waterstof door middel van anaerobe micro-organismen met behulp van biogene rest- en afvalwaterstromen. Dit proces wordt donkere vergisting genoemd. Naast waterstof worden ook vluchtige organische zuren geproduceerd, die gebruikt kunnen worden voor de productie van basischemicaliën of via een biogasproces zeer efficiënt kunnen worden omgezet in methaan.

De procescondities van donkere vergisting zijn vergelijkbaar met die van anaerobe vergisting in het biogasproces. In totaal bestaat dit biogasproductieproces uit 4 reactiestappen: hydrolyse, acidogenese, acetogenese en methanogenese. Bij de hydrolyse worden organische verbindingen met lange ketens afgebroken tot eenvoudige organische verbindingen zoals aminozuren. Vervolgens worden organische zuren gevormd uit de producten van de hydrolysefase in de verzuringsfase. Dit levert acetaat, waterstof en koolstofdioxide op, de basismaterialen voor methaanvorming. Tijdens de acetogenese worden alcoholen en organische zuren ook gereduceerd tot azijnzuur, waterstof en koolstofdioxide. Ten slotte vindt de methaanvorming (methanogenese) plaats door de omzetting van de vorige producten in methaan en koolstofdioxide. Als het methaanvormingsproces wordt geremd, is het verkregen productgas een gasmengsel van waterstof en koolstofdioxide en organische zuren in de vloeibare fase. In tegenstelling tot het biogasproces, dat bestaat uit vier processtappen, wordt het proces voor de productie van biowaterstof na de derde processtap gestopt. Dit wordt bereikt door een thermische voorbehandeling van het entingslib, aangezien dit de methaanvormende micro-organismen zo veel mogelijk doodt. Bovendien wordt de pH-waarde geregeld op 5-6 en op deze manier wor-



Figuur 8: Schematische weergave van het biogasproces

den de methaanvormende micro-organismen permanent geremd. In plaats van groen materiaal te verwerken, werd de focus van het project gelegd op de productie van groene waterstof uit suikerhoudende grondstoffen.

Bepaling van het waterstofpotentieel

In het kader van het project zijn in totaal meer dan 40 afvalwater- en reststoffenstromen geregistreerd, gekarakteriseerd en geïnventariseerd. Op basis van de resultaten van deze inventarisatie zijn 12 van de meest energierijke afvalwaters getest op hun geschiktheid voor waterstofproductie in een batchproces. In een uitgebreid testprogramma werden verschillende procesparameters zoals verschillende procestemperaturen, substraatconcentraties en entculturen onderzocht met als



Figuur 9: Proefopstelling voor het onderzoeken van het gaspotentieel met batchgewijze vergistingstests

doel de optimale bedrijfsparameters te bepalen.

Resultaten

De beoordeling van de experimenten leverde de volgende resultaten op:

- 6 van de 12 onderzochte organische reststoffen en afvalwaters zijn beter geschikt voor de productie van waterstof dan voor de conventionele biogasproductie
- Thermofiele omstandigheden (50 - 60 °C) leiden tot een hogere waterstofopbrengst dan vergisting in het mesofiele temperatuurbereik (37 - 42 °C)
- Uit afvalwater dat zetmeel en suiker bevat, werd een waterstofopbrengst van 90 tot 160 l_N/kg_{ods} (gemiddelde waarde) verkregen.
- Maximale opbrengsten van 199 en 291 l_N/kg_{ods} werden bereikt
- Er werd een maximale concentratie van 9,5 - 26 g/l vluchtige organische zuren bereikt

Waterstof is een chemische grondstof die op veel verschillende manieren wordt gebruikt, onder andere bij de productie van stikstofkunstmest. Om grote hoeveelheden te produceren is een continue productie van waterstof nodig. Naast het bepalen van het waterstofpotentieel van verschillende suiker- en zetmeelhoudende reststromen uit de suiker- en zetmeelproducerende industrie en textiel- en papierfabrieken, werden daarom continu testreeksen uitgevoerd.

Biogene waterstofproductie op continue basis

Een uitdaging in de procescontrole van donkere vergisting volgens de huidige stand van de techniek is het waarborgen van processtabiliteit bij gelijktijdige vermindering van het verbruik van natriumhydroxide (NaOH). Natriumhydroxide wordt gebruikt om de pH-waarde op een constant niveau van ongeveer 5,0 tot 5,5 te houden. Binnen dit bereik worden de methaanvormende micro-organismen geremd en kan het proces betrouwbaar worden gebruikt voor de productie van waterstof.

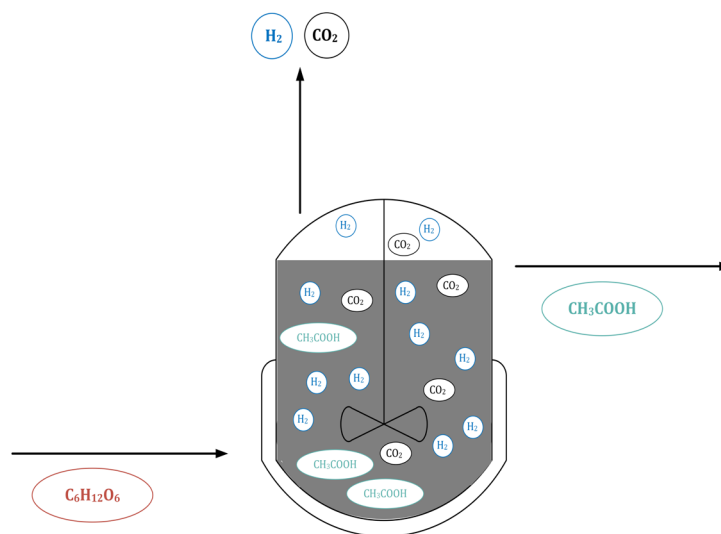
Voor de experimenten werden 3 roertankreactoren (continuous stirred-tank reactor, CSTR) op een semi-technische schaal ($V = 23,5$ l) gebruikt (Fig. 1). Hiertoe werden de reactoren geïnoculeerd met 3 verschillende entingslibs (vergistingsproduct van een biogasinstallatie, gecast slijb van een rioolwaterzuiveringsinstallatie en pelletslib van een industriële installatie met anaerobe afvalwaterzuivering). Voor de verwijdering van methaanvormende micro-organismen werd het inentingsslib thermisch voorbehandeld ($t = 2$ uur, $\vartheta = 80$ °C). Als voeding werd gescheiden varkensmest gebruikt die ook thermisch werd voorbehandeld en gemengd met een mengsel van glucose en water voor co-vergisting. Afhankelijk van de pH-waarde werd de ruimtebelasting van de reactoren aangepast en werden verschillende verblijftijden onderzocht ($t = 22$; 15; 9 d).

Testresultaten

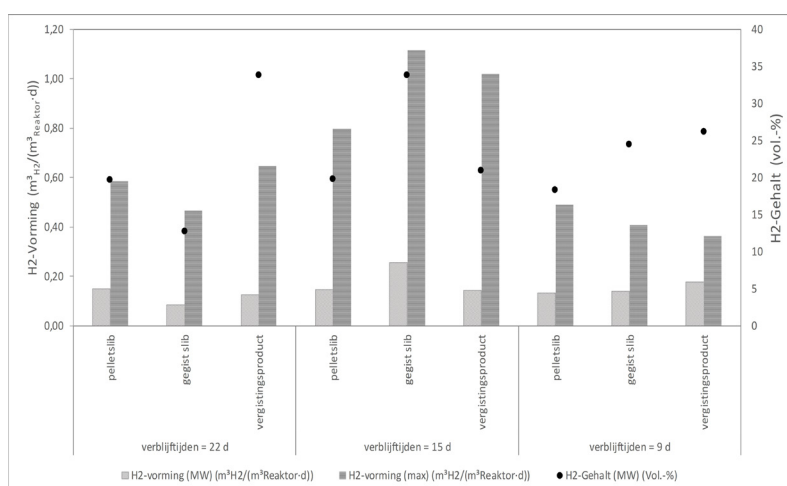
De resultaten van de testreeksen zijn in figuur 2 weergegeven.

Samenvattend kan het volgende worden vermeld:

- Alle drie de entingslibs waren geschikt voor de productie van biowaterstof door middel



Figuur 10: Testopstelling van de continue waterstoftests op een semi-technische schaal



Figuur 11: Waterstofvorming en waterstofgehalte bij continue biowaterstofexperimenten

van donkere vergisting

- Door gebruik te maken van gescheiden varkensmest (vloeibare fase) kon het proces stabiel worden uitgevoerd zonder dat de pH-waarde moest worden geregeld door toevoeging van natriumhydroxide
- De vorming van $0,30$ tot $1,12 \text{ m}^3 \text{ H}_2 / (\text{m}^3_{\text{reactor}} \text{ d})$ en een maximaal waterstofgehalte van 35 vol.-% werden bereikt
- Het optimale uitgangspunt was een verblijftijd van 15 dagen
- De meest efficiënte werkwijze werd bereikt met het ingeënte slib van een gemeentelijke rioolwaterzuiveringsinstallatie en met het vergistingsproduct van een biogasinstallatie

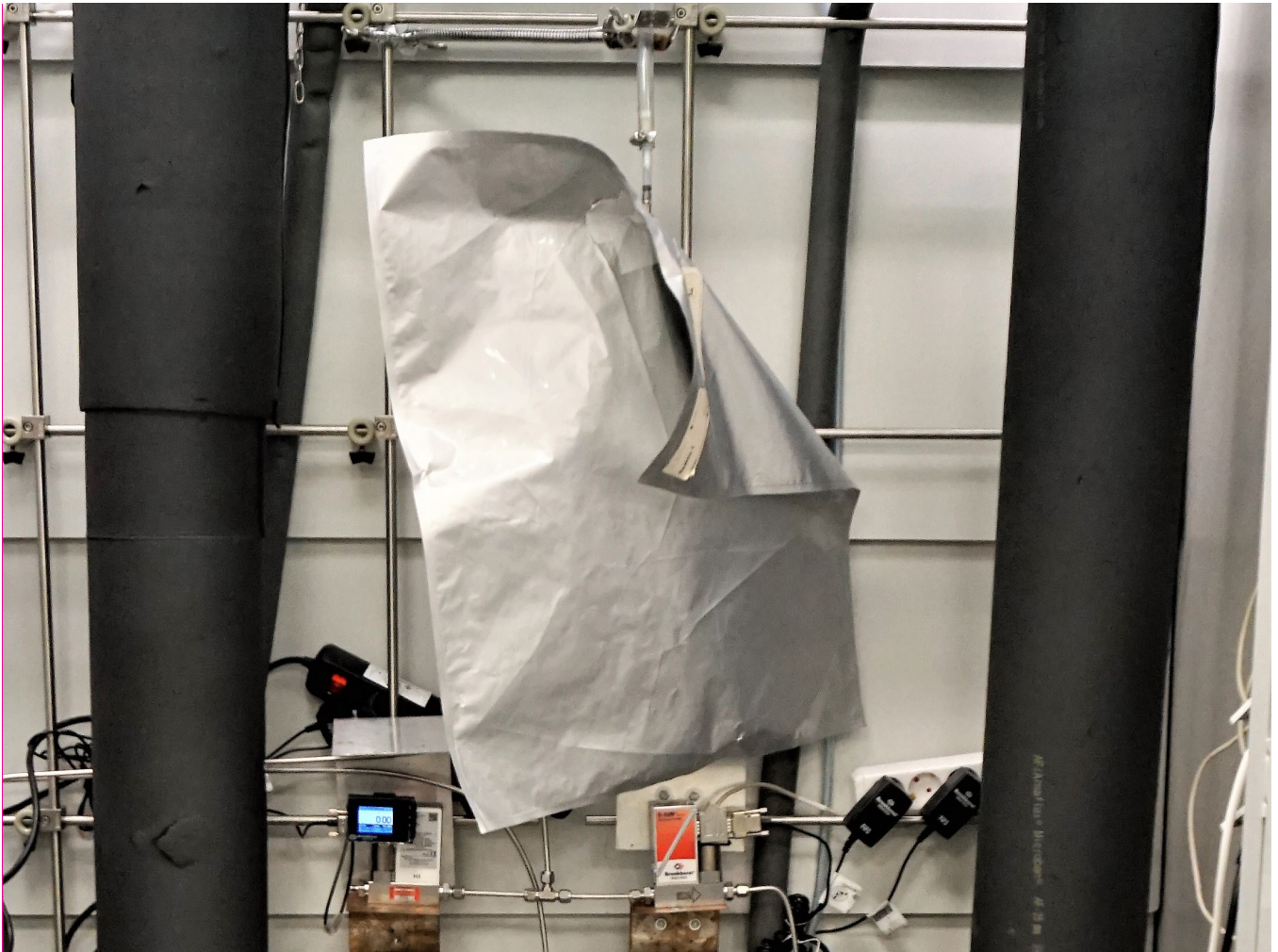
Door het afzien van natriumhydroxide en het gebruik van varkensmest kon het proces stabiel worden uitgevoerd, maar de procesefficiëntie was lager in vergelijking met een proces dat met NaOH werd geregeld. Het gebruik van varkensmest heeft dus geleid tot een besparing van

NaOH, maar voor een efficiënte en stabiele werking is een pH-regeling nodig. Met de kennis uit dit deelproject is een belangrijke stap gezet naar de grootschalige implementatie van donkere vergisting voor de waterstofproductie. De pH-waarde-afhankelijke aanpassing van de ruimte met parallelle toevoeging van varkensmest om de buffercapaciteit te verhogen, werd tot nu toe als een nieuwe oplossing in deze combinatie beschouwd. Toch moeten toekomstige experimenten aantonen in hoeverre het proces kan worden geoptimaliseerd met betrekking tot het maximaliseren van de waterstofopbrengst. Oplossingen hiervoor zijn bijvoorbeeld het gebruik van anaerobe hooglastsystemen die een gecontroleerde biomassa-retentie mogelijk maken. Een andere mogelijkheid is het energetische (methaanproductie) en materiële (vluchtige organische zuren) gebruik van het digestaat van de donkere vergisting in een verdere processtap.

Vooruitzichten en open vragen:

- De onderbreking van het biogasproces na de derde reactiestap door het voorkomen van methanogenese werd met succes uitgevoerd. De experimenten met de continue reactoren toonden echter aan dat methaanvormende micro-organismen al bij kleine wijzigingen in het proces snel de overhand krijgen. De ontwikkeling van de micro-organismencultuur moet ook in overweging worden genomen bij nader onderzoek
- Het scheiden van CO_2 uit het productgas en het identificeren van verdere mogelijke toepassingen zijn de volgende stappen. Een mogelijke optie zou bijvoorbeeld zijn om het aan het aardgasnet te leveren
- Verhoging van de efficiëntie van het proces door de productie van een productgas met een waterstofgehalte tot 60 vol.-%
- Verhoging van de efficiëntie van het proces door de productie van een productgas met een waterstofgehalte tot 60 vol.-%
- Onderzoek naar verdere afvalwater- en reststofstromen op continue schaal die in de batch vergistingstesten al een hoog waterstofpotentieel hebben bereikt. Hierbij kan bijvoorbeeld worden gedacht aan afvalwater van melkveebedrijven, de zetmeelverwerkende industrie of de levensmiddelenindustrie

Methanisering



30 Van biogas naar biomethaan

**34 Mogelijke toepassingen en
economische efficiëntie**

32 Het reactorconcept

Methanisering

Het doel van methanisering is de productie van duurzaam biomethaan als aardgas-substituut. Het zijn micro-organismen die in staat zijn om koolstofdioxide om te zetten in methaan. Dit wordt bereikt door de vierde fase van het biogasproces, methanogenese, afzonderlijk in een bioreactor te laten werken. Op deze manier is het mogelijk om uit biogas een aardgas-substituut te vervaardigen.

Door de gewijzigde financieringsvoorwaarden voor de productie van biogas uit biomassa, worden veel exploitanten van installaties geconfronteerd met de vraag hoe biogasinstallaties in de toekomst rendabel kunnen worden geëxploiteerd. Tegelijkertijd is de opwekking van energie uit hernieuwbare energiebronnen een belangrijk onderdeel van de energietransitie. Een mogelijkheid is om het geproduceerde biogas niet direct te gebruiken door het te verbranden in een warmtekrachtcentrale om elektriciteit op te wekken, maar om het na verwerking als biomethaan (CH_4) aan het aardgasnet te leveren. Een variant van de behandeling is bijvoorbeeld de methanisering van de koolstofdioxide (CO_2) die in biogas zit.

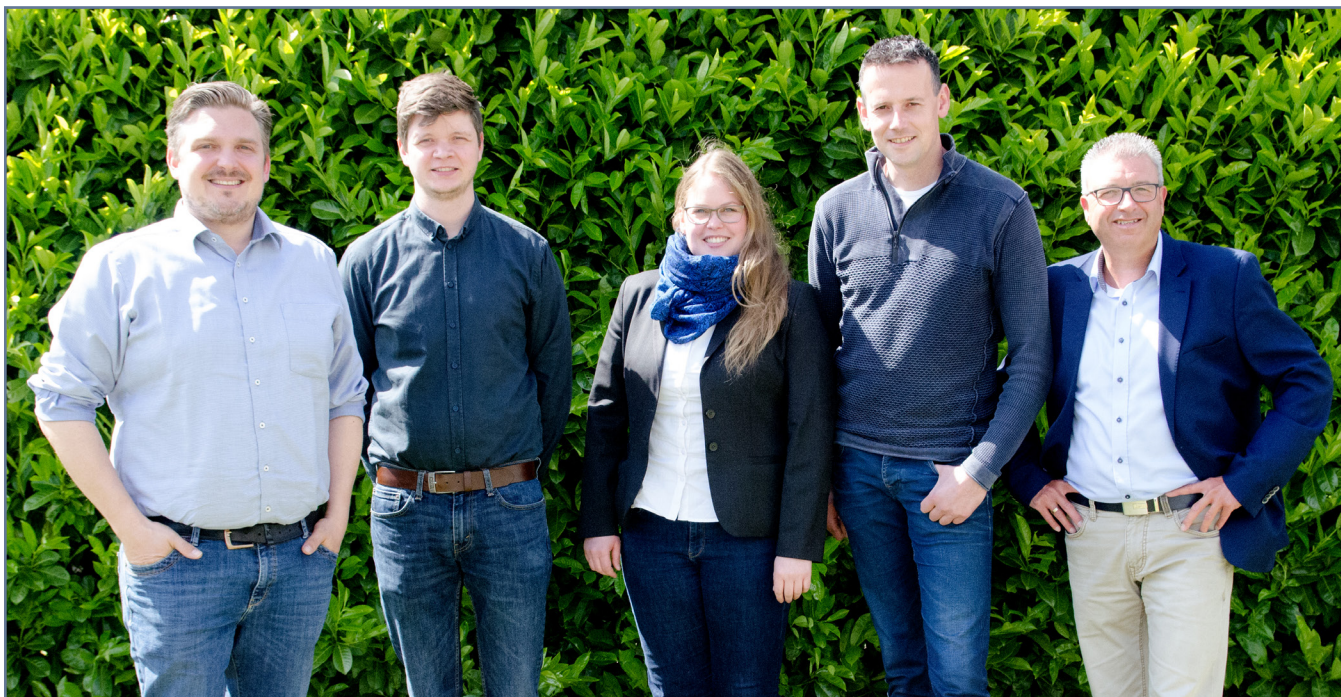
Het projectconsortium van dit deelproject heeft zich beziggehouden met de verdere ontwikkeling van een variant van een biologisch methaniseringsproces. Het bijzondere aan dit proces: Er zijn geen complexe processtappen nodig. De omzetting vindt plaats door het metabolisme van micro-organismen, die dus functioneren als biokatalysatoren. Waterstof (H_2) is nodig om biogas om te zetten in biomethaan. In het beste geval wordt het proces gebruikt met H_2 van power-to-gas technologieën en wordt het door middel van biologische methanisering omgezet in een op te slaan, hernieuwbare CH_4 . Het aardgasnet heeft een hoge opslagcapaciteit die hier gebruikt kan worden. De CH_4 zou dus volledig uit hernieuwbare bronnen worden geproduceerd.

Het Duits-Nederlandse projectconsortium bestaande uit HoSt, WESSLING GmbH en het onderzoeksteam van de Hogeschool Münster heeft de krachten gebundeld om

biologische methanisering verder te ontwikkelen. In het grensoverschrijdende team vullen de projectpartners elkaar aan met de expertise van HoSt op het gebied van biogastechnologie en installatiebouw, de knowhow van WESSLING GmbH op het gebied van analyse en methodeontwikkeling en de ervaring van de wetenschappers van de Hogeschool Münster op het gebied van afvalwater- en milieutechnologie. Op deze manier werd de biologische methanisering over de landsgrenzen heen verder ontwikkeld en werden mogelijke toepassingen, met name voor het opwaarderen van biogas, onderzocht.

De belangrijkste resultaten en bevindingen zijn samengevat in de volgende artikelen. Een essentieel onderdeel van het projectwerk was het onderzoek naar de huidige marktsituatie en de mogelijke concurrerende technologieën voor biologische methanisering. Samen met de functioneringswijze van de biologische methanisering en de onderzoeksresultaten van de sporenelementen worden deze gepresenteerd in het artikel 'Van biogas tot biomethaan'. Het ontwikkelde reactorsysteem en de uitgevoerde onderzoeken worden beschreven in het artikel 'Het reactorconcept'. Daarna vindt de afweging plaats van 'toepassingsmogelijkheden en rendabiliteit' van de biologische methanisering.

De projectpartners in het deelproject Methanisering



Figuur 12: Von links naar 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 is als internationaal en onafhankelijk analyse-, test- en adviesbureau actief op 26 locaties in Europa en China. Het familiebedrijf geniet sinds 1983 een uitstekende reputatie bij nationale en internationale klanten. 1.400 medewerkers zetten een breed scala aan expertise in voor de continue verbetering van kwaliteit en veiligheid, milieu- en gezondheidsbescherming. We onderzoeken, analyseren, plannen en implementeren projecten - voor de duurzame verbetering van de kwaliteit van leven.

Taken in Groene Kaskade

In het project „Groene Kaskade“ omvatten de speciale taken de exacte bepaling van individuele sporenelementen in de complexe matrix van vergistingsmateriaal en de

versnelling van de bepalingstijd van de gasopbrengst. De experts van WESSLING hebben bij het opsporen van elementen gebruik kunnen maken van hun expertise en uitgebreide kennis op het gebied van biogasanalyse.

Het gepatenteerde BagFerm proces werd gebruikt om het gasrendement te bepalen. Het doel was om de exacte gasopbrengst van restmaterialen, zoals bladeren, onder reële omstandigheden te bepalen en om de bepalingstijd, die voorheen 60 dagen duurde, aanzienlijk te verkorten door het gebruik van near-infraroodspectroscopie (NIRS).



HoSt

HoSt is een onafhankelijk bedrijf dat zich richt op de technologische ontwikkeling van waste-to-energy systemen voor de verwerking van biomassa en afvalstromen en de levering van systemen voor duurzame energieopwekking uit biomassa en afval. HoSt heeft ruime ervaring met de verwerking van diverse afvalstromen uit de voedingsmiddelen-industrie en agrarische bijproducten zoals stro, kaf en grasafval. Het bedrijf heeft 27 jaar ervaring, een groot serviceteam in heel Europa en een team van meer dan 120 ingenieurs die geavanceerde bio-energiesystemen ontwerpen, bouwen en installeren.

HoSt biomassacentrales dragen bij aan het succes van een gesloten kringlooeconomie door het opwekken van hernieuwbare energie, het oplossen van uitdagingen op het gebied van afvalbeheer en het produceren van waardevolle eindproducten uit organisch afval.

Taken in Groene Kaskade

HoSt was met haar expertise op het gebied van biogasinstallatietechnologie betrokken bij de werkpakketten Groensnede en Methanisering.

Met zijn praktische ervaring in de planning, het ontwerp en het gebruik van bio-energiecentrales heeft het bedrijf een belangrijke bijdrage geleverd aan de ontwikkeling van geschikte reactorconcepten.

Dankzij de ervaring van HoSt op het gebied van installatiebouw heeft het bedrijf een goed inzicht in de bedrijfs- en investeringskosten en heeft het bedrijf economische afwegingen kunnen maken voor de installatieconcepten. Dit betreft concreet de productie van biomethaan uit biogas, dat onderzocht werd in het kader van methanisering, alsook de biologische waterstofproductie (Groensnede).



FH MÜNSTER
University of Applied Sciences

Forschungsteam der FH Münster

De FH Münster is een van de grootste hogescholen in Duitsland. Het onderzoeksteam van Prof. Wetter en Dr.-Ing. Elmar Brüggling maakt deel uit van de afdeling Energie-Gebäude-Umwelt (EGU) en telt momenteel 35 medewerkers, waarvan 23 projectingenieurs uit verschillende disciplines. Het team is al meer dan 18 jaar actief in biogasonderzoek en heeft met succes vele regionale, nationale en internationale projecten afgerond. Met de kennis die in de verschillende projecten is opgedaan, kan het onderzoeksteam putten uit een uitgebreide ervaring in het werken aan projecten. Daarnaast beschikt het onderzoeksteam over een groot netwerk van actoren in de biogasindustrie voor wie de verdere ontwikkeling van het gebruik van biomassa van groot belang is.

Taken in Groene Kaskade

In het kader van Groene Kaskade nam de Hogeschool Münster het voortouw bij de deelprojecten methanisering, groensnede en hooglastvergisting. Dit betreft met name de projectcoördinatie van de drie deelprojecten en de kennisoverdracht door de publicatie van de projectresultaten in de vorm van posterbijdragen, artikelen en conferentiebijdragen. Daarnaast begeleidde en coördineerde het onderzoeksteam van de FH Münster de verschillende testreeksen. Dit omvat zowel laboratorium-experimenten als het onderzoek van de ontwikkelde processen op semi-technische schaal in het techniekcentrum van de FH Münster.

Van biogas naar biomethaan

Biogas is een productgas van anaerobe vergisting en bevat tussen 50 - 70 vol.-% methaan (CH_4) en 30 - 50 vol.-% koolstofdioxide (CO_2). Om biomethaan te produceren uit biogas dat aan het aardgasnet kan worden geleverd, moet het aandeel biomethaan worden verhoogd tot ten minste 89,9 vol.-% (Nederland) of 90 vol.-% (L-gas, Duitsland) of 95 vol.-% (H-gas, Duitsland).

Opwaardering van biogas

Een mogelijkheid voor de productie van bio-me-thaan uit biogas is de zogenaamde gaszuivering. De scheiding van andere gascomponenten levert een productgas met een hoog methaangehalte en als tweede een gasmengsel met een hoog koolstof-dioxidegehalte op. Processen die worden gebruikt voor gaszuivering zijn het mem-braanproces, cryogene processen, het wassen van water onder druk of drukschommelingsadsorptie.

„Methanisering“ daarentegen is over het alge-meen een proces waarbij een product dat me-thaan bevat, wordt geproduceerd uit een CO_2 -houdend gas dat in de vorm van een eductgas wordt geproduceerd. Dit wordt bereikt door de CO_2 samen met H_2 om te zetten in CH_4 . Hiervoor kunnen verschillende processen worden gebruikt, waarbij deze in wezen kunnen worden onderverdeeld in katalytische en biologische methanisering. Het Sabatierproces is bijvoorbeeld een katalytisch proces waarbij CO_2 wordt omgezet in CH_4 . Dit proces werkt bij temperaturen van 50 °C, een druk van 200 bar en met katalysatoren zoals nikkel. Het Sabatierproces werkt volgens de volgende reactiemethode:



De biologische methanisering

Processen op basis van het metabolisme van CO_2 en H_2 tot CH_4 door anaerobe micro-organismen worden biologische methaanvorming genoemd. In de microbiologie staat deze vorm van methaanvorming bekend als methanogenese en maakt deel uit van het biogasproces. Deze micro-organismen zijn archaea, die CO_2 kunnen omzetten in CH_4 , waarbij de reactievergelijking stoichiometrisch overeenkomt met het Sabatierproces. Tijdens de reactie wordt CO_2 gere-

duceerd tot methaan met behulp van H_2 door middel van co-enzymen, zodat er energie vrijkomt. Naast CO_2 hebben de micro-organismen voor de stofwisseling verschillende sporenelementen en voedingsstoffen nodig, zoals stikstof en zwavel. Deze laatste zitten al in biogas in de vorm van ammoniak en zwavelwaterstof. Daarom zijn de micro-organismen ongevoelig voor de onzuiverheden in biogas van conventionele biogasproductie. Dit is een voordeel ten opzichte van de katalytische methanisering, waarvan de katalysatoren kunnen worden gedeactiveerd door onzuiverheden zoals zwavel en nevenreacties. De belangrijkste verschillen tussen katalytische en biologische methanisering zijn weergegeven in tabel 2.

In-situ- en ex-situ-methoden

Er zijn in principe twee varianten van biologische methanisering, die worden onderscheiden: het in-situ en het ex-situ proces. In het in-situ proces vindt de methanisering parallel aan de vergisting in de vergister plaats. Door H_2

Tabel 2: Vergelijking van biologische en katalytische methanisering

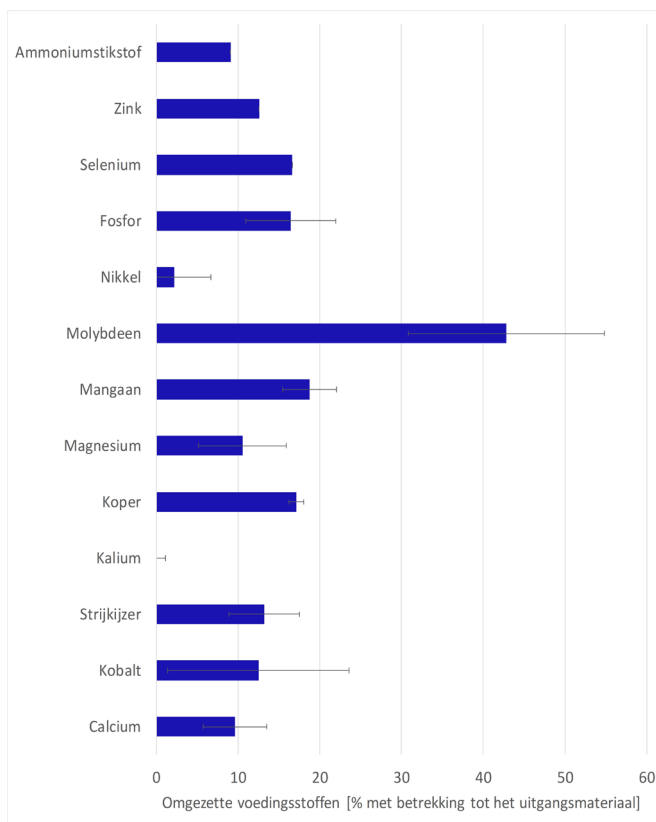
Parameter	Biologische methanisering	Katalytische methanisering
Druk	≥ 1 bar	5 - 200 bar
Temperatuur	35 - 65 °C	280 - 550 °C
Werkingsprincipe	Microorganismen	Katalysator
Tolerantie voor zwavelwaterstof	Hoog	Zeer gering
Limiet	Massa-overdracht Gas-vloeistof	Evenwicht
Technologisch level (TRL)	4-6	8-9
Reactorconcepten	Continuous stirred tank reactor, Membraan, Sijpelbed, Vastbed	Vastbed, Wereld, 3-fasen, Gestructureerd (Slieren, microkanaal,...)

toe te voegen aan de inhoud van de vergister, maakt het principe gebruik van de aanwezigheid van methaanvormende micro-organismen in het biogasproces. Met een optimale waterstofvoorziening kan het methaangehalte van het resulterende biogas op deze manier worden verhoogd.

De ex-situ variant voorziet in een aparte bioreactor. In deze bioreactor vindt enkel de vierde stap van het biogasproces plaats. Zo kunnen de micro-organismen, die met behulp van H_2 en CO_2 in staat zijn om CH_4 te metaboliseren, zichzelf in de reactorinhoud verhogen zonder te concurreren met andere micro-organismen met een hoger verdubbelingspercentage. Een ander voordeel is dat deze micro-organismen ook zonder de toevoer van een koolstofbron probleemloos enige tijd kunnen overleven. De toepassing van deze procedure is dus mogelijk bij een wisselende gastoevoer, de zogenaamde beladingstrajecten. Het Duits-Nederlandse projectconsortium heeft zich gericht op de ontwikkeling van een ex-situ variant.

Vereiste van sporenelementen

Aan het begin van het deelproject werd de behoefte aan sporenelementen van de methaanvormende micro-organismen onderzocht aan de hand van verschillende vergelijkingsanalyses. De optimale concentratie aan sporenelementen is een belangrijke voorwaarde voor de methaanvorming van micro-organismen: als het te gering is, worden er onder andere te weinig enzymen gevormd. Als het te veel is, hebben de sporenelementen een remmend effect op het proces. WESSLING heeft daarom methoden ontwikkeld om het aandeel van opgeloste sporenelementen in de reactorinhoud van de methanisering te meten. Door middel van verschillende metingen met een tijdsinterval was het mogelijk om te bepalen hoe de samenstelling van de opgeloste sporenelementen verandert tijdens de werking van het proces. Aangezien dit een gesloten proces is, kan de samenstelling van de opgeloste sporenelementen veranderen als ze door de micro-organismen worden geabsorbeerd. De resultaten van de vergelijkings-



Figuur 13: Weergave van de omgezette opgeloste voedingsstoffen

meting van de omgezette voedingsstoffen en sporenelementen zijn weergegeven in figuur 13.

Op basis van de metingen van WESSLING kan in het kader van het project een „recept“ voor een mengsel van sporenelementen worden ontwikkeld. Dit mengsel van sporenelementen werd gebruikt in de daaropvolgende experimenten om de biologische methanisering met twee vastbedreactoren te onderzoeken om de concentratie opgeloste sporenelementen in de reactorinhoud van de reactoren te verhogen. Als gedurende een aantal weken een vermindering van het methaangehalte van het productgas werd waargenomen terwijl het reactorsysteem draaide, dan resulteerde de toevoeging van het sporenelementenmengsel aan de reactorinhoud in meerdere gevallen in een verhoging van het methaangehalte.

Het reactorconcept

Verskillende reactorconcepten, zoals continuous stirred tankreactoren, sijpelbedreactoren, membraanreactoren of vastbedreactoren, worden beschreven in verschillende onderzoeksprojecten voor het gebruik van biologische methanisering. In het kader van het project Groene Kaskade heeft het projectconsortium het ex-situ procesprincipe verder ontwikkeld en onderzocht met twee naast elkaar geschakelde vastbedreactoren.

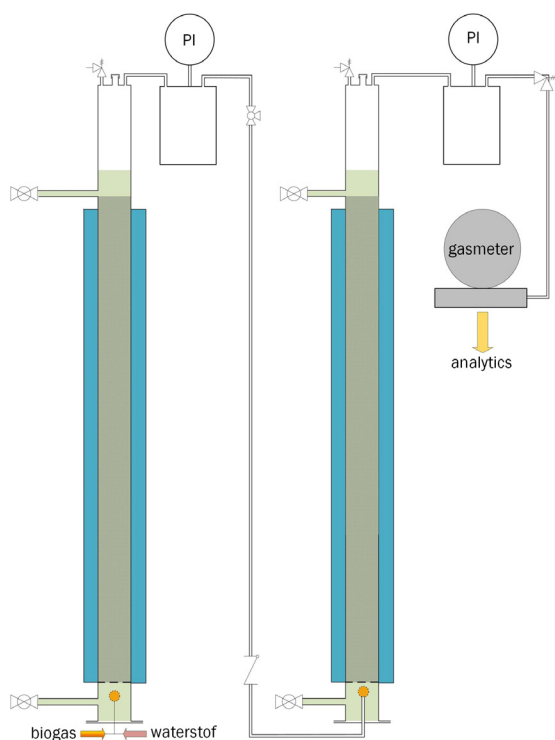
De uitdaging

Bij de ontwikkeling van een geschikt reactorconcept zijn er verschillende uitdagingen die een rol spelen. Micro-organismen zijn bepalend voor het succesvol methaniseren van biogas. Om de aangevoerde koolstofdioxide (CO_2) om te kunnen zetten in methaan (CH_4) is het noodzakelijk om optimale procescondities te creëren. Het oplosbaarheidsgedrag van gasen in een vloeistof of in de reactorinhoud speelt hierbij een belangrijke rol. De wet van Henry bepaalt dat de concentratie van een gas in een vloeistof recht evenredig is met de partiële druk van een gas boven een vloeistof. Deze evenredigheid wordt beschreven door de temperatuurafhankelijke Henry-constante. Hoe groter de Henry-constante, hoe beter oplosbaar een gas is. Als men de Henry-constante van CO_2 ($k_{\text{H}_{\text{c,p}}} = 3,4 \times 10^{-2} \text{ molgas/l/atm}$) en H_2 ($k_{\text{H}_{\text{c,p}}} = 7,8 \times 10^{-4} \text{ molgas/l/atm}$) bij 20°C met elkaar vergelijkt, dan wordt het duidelijk dat waterstof veel minder oplosbaar is in water. Door de verschillen in oplosbaarheid is de massaoverdracht van H_2 een beperkende factor voor de omzetting van CO_2 naar CH_4 . In verband met de beperkende massa-overdracht zijn temperatuur en druk andere belangrijke procesvariabelen die in acht moeten worden genomen om de omzettingspercentages te verhogen. In het geval van biologische methanisering is er ook het feit dat het een biologisch proces is waarbij gascomponenten worden verbruikt en geproduceerd en

op die manier de concentraties van de gasen in de reactorinhoud extra worden beïnvloed. De huidige processen geven de voorkeur aan overwegend thermofiele condities in termen van bedrijfstemperatuur, omdat deze condities resulteren in een hoge methaanvorming. De druk kan bijdragen aan het verbeteren van de oplosbaarheid van de gasen in de reactorinhoud en daarmee aan de prestatie van het proces.

Biologische methanisering met vastbedreactoren

Rekening houdend met de uitdagingen van het proces werden twee smalle, lange reactoren ontworpen door de Duits-Nederlandse projectpartners in het kader van het project. Na de eerste tests werden deze twee reactoren omgebouwd tot een kaskade, waardoor de gaskwaliteit van het productgas verbeterde. De reactoren zijn gevuld met een onregelmatige vulling van keramisch verpakkingsmateriaal, dat dient als groeioppervlak voor de micro-organismen. Tegelijkertijd verlengen ze de weg van de gasbellen door het reactorsysteem. Om diffusie van waterstof uit het reactorsysteem te voorkomen, bestaan deze twee vastbedreactoren (figuur 14) vrijwel uitsluitend uit roestvrijstalen onderdelen. In het begin werden de reactoren gevuld met een mengsel van digestaat van verschillende oorsprong en dus voorzien van een gemengde kweek van micro-organismen met als doel dat alleen die micro-organismen zich vermenigvuldigen die in staat zijn om de procescondities te weerstaan en CO_2 en H_2 tot CH_4 te metaboliseren.



Figuur 14: Schema van de reactorkaskade

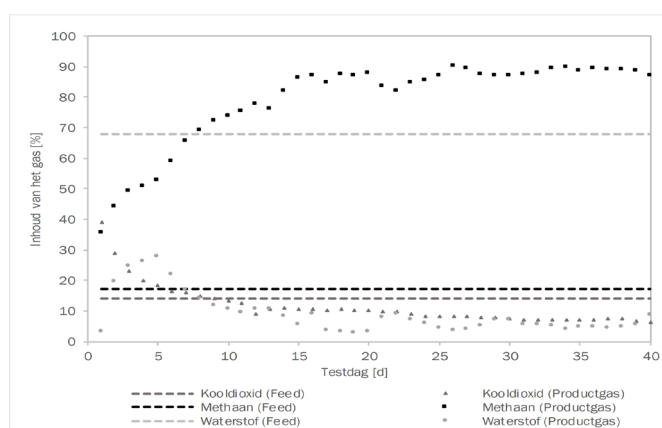
Voor de evaluatie van het proces wordt de geproduceerde hoeveelheid gas dagelijks kwantitatief en kwalitatief geregistreerd. Het rendement van het ontwikkelde reactorconcept werd geanalyseerd op basis van de samenstelling van het productgas, dat voornamelijk bestaat uit CH_4 , CO_2 en H_2 .

Na de bepaling van de behoefte aan sporenelementen en voedingsstoffen van de micro-organismen werd de maximaal haalbare zuiverheid van het productgas met het reactorsysteem bepaald. Hiertoe werd eerst de gastoevoer tot een minimum beperkt en vervolgens verhoogd.

Bij een temperatuur van 52°C en onder atmosferische druk werd de reactorkaskade gebruikt om een productgas te verkrijgen met een methaangehalte van meer dan 90 %

in volumepercentage (figuur 15).

Wat het methaangehalte van het productgas betreft, werd daarmee het vereiste gehalte voor de toevoer naar het Duitse L-gasnet volgens de werkbladen G 260 en G 262 van het Deutscher Verband des Gas- und Wasserfaches (DVGW) en het Nederlandse aardgasnet bereikt.



Figuur 15: Resultaten van de tests bij 52°C en bij atmosferische druk

Naast de gaskwaliteit van het productgas is ook de maximaal haalbare methaan-vormingsgraad een doorslaggevende factor voor de beoordeling van het proces. Het ontwerp van reactoren op grotere schaal is onder andere gebaseerd op de methaanvormingssnelheid. Hoe hoger de methaanvormingssnelheid, hoe kleiner de benodigde reactor kan zijn voor de biologische methanisering van een bepaalde hoeveelheid gas. Nadat de tests onder atmosferische druk waren uitgevoerd, werden aanvullende tests met variatie van de druk uitgevoerd. De resultaten van deze tests tonen aan dat een overdruk van 2,5 bar de methaan-vormingssnelheid verhoogde van $0,3 \frac{\text{L}_{\text{methaan}}}{\text{L}_{\text{reactorvolume}}}$ per dag naar $0,5 \frac{\text{L}_{\text{methaan}}}{\text{L}_{\text{reactorvolume}}}$ per dag.

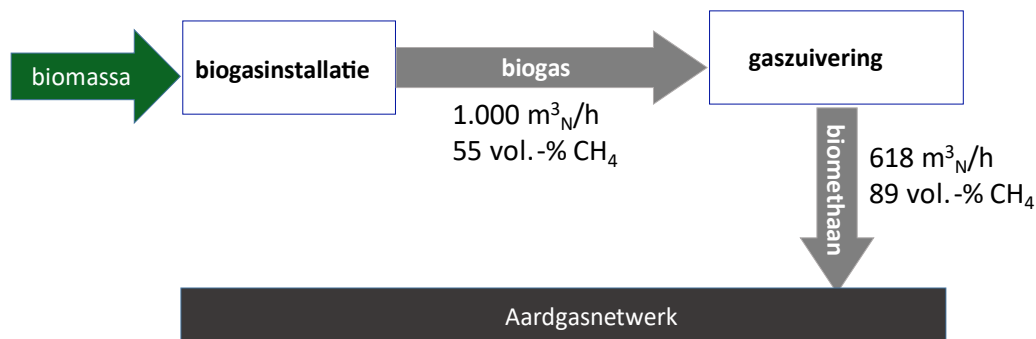
Mogelijke toepassingen en economische efficiëntie

Op basis van de gegevens van de experimenten met de reactorkaskade van twee vastbedreactoren heeft HoSt economische overwegingen voorbereid voor twee toepassingen van biologische methanisatie voor een schaalvergroting naar de praktijk. De gasproductiekosten van zowel scenario 1 als 2 werden vergeleken met de productie van biogas met een conventionele anaerobe vergisting als referentiescenario. In het volgende wordt eerst het referentiegeval beschreven als uitgangssituatie. Op basis hiervan worden de twee scenario's bekeken:

Scenario 1: De gascomponenten van het biogas worden eerst van elkaar gescheiden in een gaszuiveringsproces. De gasstroom die koolstofdioxide bevat, wordt vervolgens in een biologisch methaniseringsproces met waterstof behandeld.

Scenario 2: De opwaardering van biogas tot biomethaan gebeurt in één stap, eerst met biologische methanisering en vervolgens door scheiding van restgassen met een gaszuivering.

Referentiescenario

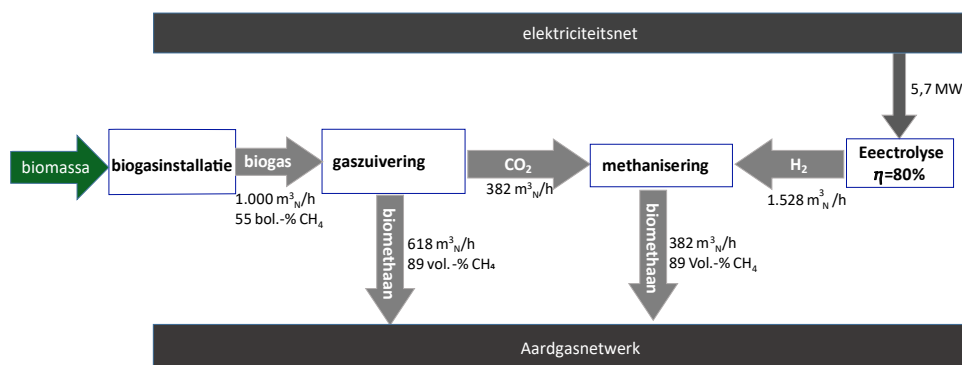


Figuur 16: Referentiescenario

Onderhavige referentie-installatie is een anaerobe vergistingsinstallatie met een capaciteit van 1.000 m³_N/u biogas. Het biogas wordt geproduceerd uit allerlei grondstoffen. De installatie wordt aangevuld met een gaszuiveringsinstallatie die een productgas produceert met een minimumvolumegehalte van 89 vol.-% methaan uit het eductgas met een methaangehalte van 55 vol.-%. (biogas). Dit komt overeen met de vereiste gaskwaliteit voor het Nederlandse aardgasnet. Uit 1.000 m³_N/u biogas wordt 618 m³_N/u biomethaan geproduceerd. Als we

kijken naar de Nederlandse gaskwaliteit van 89 vol.-%, dan resulteert dit in een aandeel van 618 m³_N/u biomethaan dat kan worden opgeslagen in het aardgasnet. De gasprijs is vastgesteld op 1,00 €/m³_N, wat momenteel een realistische marktwaarde is.

Scenario 1: Gaszuivering met extra methanisering



Figuur 17: Biogas en methanisering met behulp van elektrolyse

In de biogasinstallatie wordt organisch materiaal (biomassa) vergist en wordt biogas geproduceerd met een gehalte van 55 vol.-% CH_4 en 45 vol.-% CO_2 . In de gaszuiveringsinstallatie wordt het biogas gecomprimeerd en de gascomponenten gescheiden door membranen. Hierdoor ontstaat biomethaan, dat kan worden gebruikt voor de toevoer naar het aardgasnet, en een gasmengsel dat koolstofdioxide bevat. In tegenstelling tot het referentiescenario wordt de koolstofdioxide aan een biologisch methaniseringsproces toegevoegd. Waterstof is nodig om de koolstofdioxide door micro-organismen om te zetten in methaan. In dit geval wordt deze geproduceerd met een elektrolyse, die een rendement van 80 % heeft. Voor de omzetting van één mol CO_2 zijn vier mol H_2 nodig. Aangezien 1 $\text{m}^3_{\text{N}} \text{H}_2$ overeenkomt met een energie-inhoud van 10,8 MJ of 3 kWh, heeft 1 $\text{m}^3_{\text{N}} \text{H}_2$ 3,75 kWh elektriciteit nodig. Hieruit volgt dat in dit geval een elektrolyse-installatie van 5,7 MW moet worden ingericht voor de productie van waterstof die nodig is voor methanisering.

Het voordeel van dit procesconcept is dat de methanisering afhankelijk van de elektriciteitsprijs met waterstof kan worden gevoed. Dit betekent dat er tegen lage elektriciteitsprijzen waterstof wordt geproduceerd en gebruikt om de koolstofdioxide te methaniseren. Als de elektriciteitsprijzen echter te hoog zijn, bestaat ook de mogelijkheid om de stap van het biologische methaniseringsproces niet te laten werken, aangezien het

biologische methaniseringsproces flexibel kan worden uitgevoerd.

De kenmerkende gegevens van de afzonderlijke onderdelen van het procesconcept zijn de volgende:

Biogasinstallatie:

- 1.000 $\text{m}^3_{\text{N}}/\text{h}$ biogas: Vloeistoftoevoeropslag en vloeistoftoevoersysteem
- 2 hoofdvergistingsreservoirs $\varnothing 28 \times 6 \text{ m}$
- 1 secundaire vergister $\varnothing 28 \times 6 \text{ m}$
- Bijkomende opslag
- Fakkels

Gaszuivering:

- Biogascompressor, 1.400 $\text{m}^3_{\text{N}}/\text{h}$, 16 bar
- Membraan scheidingssysteem
- Gasanalyse en -injectie

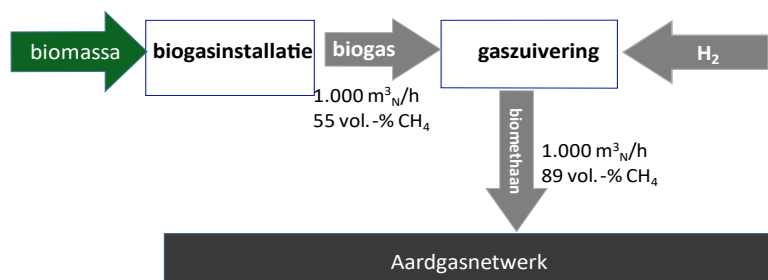
Elektrolyse:

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

Methaanreactor:

- 4 reactoren, $\varnothing 3,5 \times 11 \text{ m}$, 100 m^3
- Compressor, 400 $\text{m}^3_{\text{N}}/\text{h}$
- Gasanalyse en -toevoer

Scenario 2: Combinatie van gaszuivering en methanisering



Figuur 18: Scenario 2 Biogasinstallatie met methaniseringsreactor

In dit procesconcept wordt in één stap uitgegaan van de combinatie van methanisering en gaszuivering. Het in de vergister geproduceerde biogas wordt in het methaniseringsproces ingebracht om biomethaan te vormen met een CH₄-gehalte van 89 vol.-%. In dit geval wordt de waterstof geproduceerd door gasomzetting, gecomprimeerd en in deze vorm voor methanisering getransporteerd en daar gebruikt. Een compressor verhoogt de gasdruk om het gas met enkele membranen te zuiveren en om kleine schommelingen in de gaskwaliteit op te vangen en het gas naar het nationale/regionale gasnet te voeren. Het voordeel van dit procesconcept is dat het gas na methanisering al ongeveer 89 vol.-% CH₄ bevat. Daarom is een kleiner aantal membranen nodig dan in het referentiescenario. Dit zou leiden tot lagere kapitaalkosten. De directe combinatie van methanisering en gaszuivering vereist echter voortdurend waterstof.

Dit scenario bestaat uit:

Biogasinstallatie:

- 1.000 m³_N biogas: Vloeistoftoevoeropslag en vloeistoftoevoersysteem
- 2 hoofdvergistingsreservoirs Ø 28 × 6 m
- 1 secundaire vergister Ø 28 × 6 m
- Bijkomende opslag
- Fakkels

Methanisering:

- 4 reactoren, Ø 3,5 × 11 m, 100 m³ per reactor

Gaszuivering:

- Compressor 2.300 m³_N/h, 16 bar
- Met de waterstoftoevoer heeft de compressor een grotere capaciteit nodig
- Membraanscheiding, 40 membranen minder dan in scenario 1
- Gasanalyse en -toevoer

Economische vergelijking

Om de economische efficiëntie van het referentiescenario te vergelijken met de kosten van de procesconcepten scenario 1 en scenario 2, zijn de investeringskosten voor de installatiecomponenten in tabel 1 weergegeven. De cijfers zijn gebaseerd op ervaringswaarden van HoSt BV. Voor de methanisering is een schaalvergroting van de proefinstallatie uitgevoerd. De investeringskosten voor de elektrolyse bedragen 1.200 €/kWh, dus de kosten voor een 5,7 MW-installatie bedragen 6.876.000 €.

Voor de vergelijking van de drie scenario's is de totale

Tabel 3: Vergelijking van de investeringskosten

Component		Referentiescenario	Scenario 1	Scenario 2
Compressor (biogas/biomethaan)	€	1.500.000	2.250.000	2.010.000
Methanisering	€	-	320.000	320.000
Biogasinstallatie	€	2.434.000	2.434.000	2.434.000
Elektrolyse	€	-	6.876.000	-
Totaal	€	3.934.000	11.880.000	4.764.000

opbrengst per jaar berekend. Met betrekking tot de totale kosten is uitgegaan van een jaarlijks aantal bedrijfsuren van 8.300 uur en een bedrijfsduur van 10 jaar. De beide scenario's 1 en 2 verschillen aanzienlijk in de werkwijze van de biologische methanisering en in de waterstofproductie, waarmee ook bij de kostenberekening rekening moet worden gehouden. In scenario 1 wordt ervan uitgegaan dat de flexibele werking van de methanisering afhankelijk is van de elektriciteitsprijs. De elektriciteit is nodig om de waterstof met een elektrolyseur te produceren. In scenario 2 wordt de biologische methanisering daarentegen continu toegepast. In dit geval is er dus voortdurend waterstof nodig, die in deze casestudy door de exploitant van de installatie moet worden aangekocht. Voor de berekening van de waterstofkosten wordt ervan uitgegaan dat de waterstof wordt geproduceerd door middel van stoomreforming. De kosten van de waterstof uit dit proces bedragen 2 €/kg (Shell, 2017). Om deze waterstof te kunnen gebruiken voor biologische methanisering, moet het eerst worden gecomprimeerd en vervolgens naar de fabriek worden getransporteerd. Hiervoor moet 2,35 €/kg extra worden berekend (ETASP, 2014). Daarom worden in scenario 2 kosten van 4,35 €/kg of 0,39 €/m³N berekend voor waterstof. Tabel 2 toont alle kostenposten voor scenario 1 en scenario 2 in vergelijking met het referentiescenario. De totale opbrengst van 5.129.400 € per jaar aan toe te voegen biomethaan is de hoogste in het referentiescenario. In scenario 1 wordt er 4.602.048 € per jaar verdiend, rekening houdend met de vermelde kostenposten, en de inkomsten in scenario 2 zijn 3.004.160 € per jaar, wat het laagste is. Scenario 1 komt zeer dicht in de buurt van de som

van het referentiescenario wat de jaarlijkse opbrengst betreft. Dit komt doordat de opbrengst per m³_N methaan verschilt met 0,53 € per m³_N in scenario 1 met 0,95 € per m³_N in het referentiescenario, echter in scenario 1 wordt meer biomethaan geproduceerd dan in het referentiescenario.

Conclusie

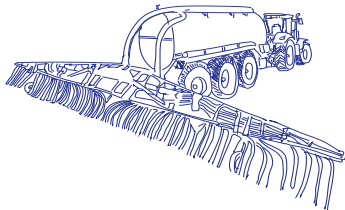
Voor een continue werking van biologische methanisering zijn de kosten voor waterstof momenteel te hoog (scenario 2) om een aantrekkelijk alternatief te vormen voor het referentiescenario. Dit blijkt ook uit de beschouwingen van scenario 1, waarin de kosten voor de productie van waterstof door elektrolyse in de eerste plaats afhankelijk zijn van de elektriciteitsprijs. In de berekeningen werd uitgegaan van een elektriciteitsprijs van 50 €/MWh. Zou men anders dan de aanname in tabel 4 slechts 20 €/MWh voor de stroom moeten betalen, dan zou de jaarlijkse opbrengst van het procedureconcept scenario 1, 6.107.981 €/MWh bedragen en dan zou dit dus een zeer aantrekkelijk alternatief bieden voor het onderzochte referentiescenario (5.129.400 €).

Op basis van de beschreven toepassingsmogelijkheden van de biologische methanisering en de economische afweging is de exploitatie van een dergelijke installatie als aanvulling op een biogasinstallatie met gaszuivering een veelbelovende optie om uit biogas duurzaam biomethaan te genereren.

Tabel 4: Vergelijking van de investeringskosten Investitionskosten

Onderdeel	Eenheid	Referentiescenario	Scenario 1	Scenario 2
Biomethaan geproduceerd	m ³ _N	618	1.000	1.000
Investeringskosten (10 Jaar)	€	-	-794.692	-83.092
Rente (1,5 %)	€	-	-11.920	-1.246
Elektriciteitskosten (50 €/MWh)	€	-	-2.509.888	-
Waterstofkosten	€	-	-	-5.171.618
Opbrengst biomethaan	€	5.129.400	8.300.000	8.300.000
Onderhoud (4 % van de investeringskosten)	€	-	-381.452	-39.884
Totaalrendement	€ per jaar	5.129.400	4.602.048	3.004.160
Totaalrendement	€ per m ³ _N	0,95	0,53	0,34

Kengetallen



70 miljoen ton

200 miljoen ton

Mest wordt jaarlijks in Nederland geproduceerd.

Vloeibare mest is wat het is in Duitsland.

In Duitsland omvat dit
43 miljoen ton
rundermest en
6 miljoen ton

Varkensmest gebruikt voor de productie van biogas.



Waarvan in Nederland
1,2 miljoen ton
rundermest en
1,5 miljoen Tonnen

Schweinegülle zur Biogaserzeugung genutzt.

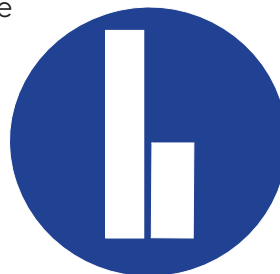
Als de helft van de tot nu toe ongebruikte hoeveelheid vloeibare mest zou worden ontwikkeld, dan moet in Duitsland een extra

75 miljoen ton

en in Nederland

34 miljoen ton

vloeibare mest kan worden gebruikt voor de productie van biogas.



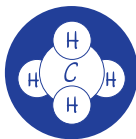
35 vol.-%

waterstofgehalte in de productie van waterstof uit industrieel afvalwater,



70 vol.-%

methaangehalte dat wordt bereikt na de vergisting van varkensmest met hoge belasting,



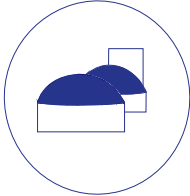
> 90 vol.-%

methaangehalte na de biologische methanatie van biogas.

Kengetallen

9,47 miljoen

Huishoudens in Duitsland worden voorzien van biogasstroom.



In Nederland

90.000

huishoudens worden voorzien van groen gas.

Verhoging van het methaangehalte van biogas uit

55 vol.-% op > 90 vol.-%

is mogelijk door middel van biologische methanisatie.



20 %

van de stroom uit hernieuwbaar
Energies ontstaan in
Duitsland en de
Nederland uit biomassa.

Waterstofvormingspercentages van

0,3 bis **1,2 m³/m³/d**

werden continu geproduceerd.



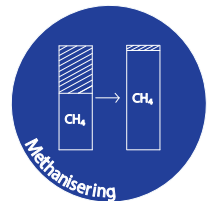
Het duurt maar
4 dagen

om biggenmest te
fermenteren met
hoogbelastingsre-
actoren.

Methaanvormingspercentages van

0,5 m³/m³/d

werden bereikt met biologische
methanatie.

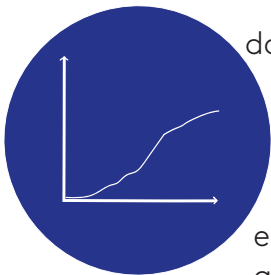


9.523 biogasinstallaties in Duitsland

davon **200** biomethaaninstallaties

250 biogasinstallaties in
Nederland

en **25** installaties voor
gasreiniging



De gasproductiekosten van de
vergisting van biggenmest met
hoge belasting bedragen

4,6 Cent/kWh

