

## Abschlussbericht

# Repowering von Biogasanlagen – Maßnahmen zur Effizienzsteigerung für den vorhandenen Anlagenbestand

## Kurztitel: Repowering (FKZ: 03KB071A-D)

### Laufzeit des Vorhabens:

FKZ 03KB071A	01.10.2012 – 31.03.2015
FKZ 03KB071B	01.10.2012 – 31.03.2015
FKZ 03KB071C	01.10.2012 – 30.09.2014
FKZ 03KB071D	01.10.2012 – 30.09.2014

### für das:

Bundesministerium für Wirtschaft und Energie

### vertreten durch:

Forschungszentrum Jülich GmbH  
Projekträger Jülich (PTJ)  
Geschäftsbereich Erneuerbare Energien (EEN)  
Außenstelle Berlin  
Zimmerstraße 26-27  
10969 Berlin

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie unter dem Förderkennzeichen 03KB071A-D gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor

REPOWERING ist ein Verbundvorhaben der Firmen und Institutionen: Fraunhofer-Institut für Umwelt-, Sicherheits- und Energietechnik UMSICHT, Bioreact GmbH, Gewitra GmbH und Bonalytic GmbH

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

## Projektteam:

Fraunhofer-Institut für Umwelt-,  
Sicherheits- und Energietechnik (UMSICHT)  
Osterfelder Straße 3  
46047 Oberhausen



Joachim Krassowski  
**Projektkoordinator**

Tel.: +49 208 8598 – 1162  
joachim.krassowski@umsicht.fraunhofer.de

bioreact GmbH  
Gierlichstraße 6  
53840 Troisdorf  
Thomas Dickhaus

Tel.: +49 2241 9715 - 3000  
thomas.dickhaus@bioreact.de



gewitra mbH  
Gierlichstraße 6  
53840 Troisdorf  
Dr.-Ing. Thomas Fritz

Tel.: +49 2241 9715 - 3500  
thomas.fritz@is-forschung.de



bonalytic GmbH  
Gierlichstraße 6  
53840 Troisdorf  
Nadine Hörter

Tel.: +49 2241 9715 0 - 2500  
nadine.hoerter@bonalytic.de



## Weitere Autoren:

Michael Jandewerth  
Dr. Jürgen Lenz  
Dr. Carsten Cuhls  
Jan Aufderbeck  
Dr. Joachim Clemens

Fraunhofer UMSICHT  
bioreact GmbH  
gewitra mbH  
gewitra mbH  
bonalytic GmbH

5. Dezember 2015

## Inhalt

<b>1</b>	<b>Identifizierung technischer Optionen für das Repowering</b>	<b>5</b>
1.1	Auswertung aktueller Literatur und Einbindung der Ergebnisse aktueller FuE-Vorhaben	5
1.1.1	Substrataufbereitung und Substrateintrag	5
1.1.2	Vergrößerung des Gesamtgärtraumes	6
1.1.3	Gärbehälter	7
1.1.4	Rührwerk	7
1.1.5	Temperatur	8
1.1.6	Entschwefelung	9
1.1.7	Blockheizkraftwerke	10
1.1.8	Bereichsübergreifende Optimierungsoptionen	12
1.1.9	Gasleitungen	15
1.1.10	Gasspeicher	16
1.1.11	Gärrestelager	17
1.1.12	Notfallverbraucher	17
1.1.13	Zusammenfassung der Literaturlauswertung	18
1.2	Auswertung laufender Anlagenoptimierungen	19
1.2.1	Beitrag von Emissionsminderungsmaßnahmen zum Repowering	19
1.3	Ableitung von Optionen für das Repowering	28
1.3.1	Entwicklung neuer Konzepte für die enzymatische Vorbehandlung lignocellulosehaltiger Inputstoffe	28
1.3.2	Wissenschaftlich-technische Ergebnisse	28
1.3.3	Identifizierung weiterer technischer Optionen	36
1.3.4	Technische Repowering-Maßnahmen	37
1.3.5	Systemorientierte Repowering-Maßnahmen	43
1.3.6	Zusammenfassung der Repowering-Maßnahmen	45
1.3.7	Möglichkeit des Einsatzes alternativer Substrate am Beispiel der Pferdemitverwertung in bestehenden NawaRo-Biogasanlagen	45
1.3.8	Möglichkeit der Verwertung von anfallenden Tierkadavern aus Tierseuchenbeseitigungsmaßnahmen in bestehenden NawaRo-Biogasanlagen	53
<b>2</b>	<b>Monitoring des Anlagenbestands</b>	<b>55</b>
2.1	Identifizierung geeigneter BGA	55
2.2	Statistische Analysen des Bioreact Datensatzes	55
2.3	Auswertung der Anlagendaten	56
2.3.1	Anlagenbaujahr, installierte elektrische Leistung und Anlagenaufbau	56
2.3.2	BHKW und Wirkungsgrad	58
2.3.3	BHKW-Auslastung und Substratausnutzung	58
2.3.4	Faulraumvolumen und installierte Leistung	59
2.3.5	Substratausnutzung und Verweilzeit	60
2.3.6	Substrate und deren Qualität	62

2.3.7	Substratkonservierung und Lagerung	66
2.4	Prozessbiologie und prozessbiologische Parameter	69
2.4.1	Die vier Stufen des biologischen Abbaus	69
2.4.2	Prozessbiologische Parameter	72
2.4.3	Die Säuren: FOS	72
2.4.4	Der Puffer: TAC, pH-Wert und Titration	73
2.4.5	FOS-TAC-Bestimmung	75
2.4.6	Stickstoff: Ammonium (NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> )/Ammoniak (NH <sub>3</sub> )	77
2.4.7	Leitfähigkeit	78
2.4.8	pH-Wert und Temperatur	79
2.4.9	Gaschromatografie der organischen Fettsäuren	81
2.4.10	Ursachen von Prozessstörungen und Handlungsmaßnahmen zur Behebung	84
2.4.11	Schwefelwasserstoff	94
<b>3</b>	<b>Szenarien zur Technologieimplementierung</b>	<b>99</b>
3.1	Anwendung der Technologieoptionen auf Modellfälle	99
3.1.1	Flexibilisierung der Biogasbeschickung durch die Installation einer Hydrolysestufe	99
3.1.2	Optimierung einer Praxisanlage aus dem Projekt durch Zugabe von Prozesshilfsstoffen	101
3.1.3	Möglichkeiten des Einsatzes von alternativen Substratformen in bestehenden NawaRo-Biogasanlagen	103
3.1.4	Flexibilisierung der Vorortverstromung	107
3.2	Technische Konzepte zur Flexibilisierung der Biogasproduktion	109
3.2.1	Entwicklung Raumbezogener Szenarien	109
3.2.2	Entwicklung raumbezogener Szenarien für Anlagenverbünde	109
3.2.3	Zusammenfassung von mehreren einzelnen Biogasanlagen über eine Gassammelleitung mit zentraler Biogasaufbereitung	118
3.2.4	Zusammenfassung Szenario 2	130
3.2.5	Konzepte für die Umsetzung alternativer Substratformen	131
<b>4</b>	<b>Literatur</b>	<b>143</b>
<b>5</b>	<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>147</b>
<b>6</b>	<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>150</b>
<b>7</b>	<b>Anlagen - REPOWERING Fact Sheets</b>	<b>150</b>

## 1 Identifizierung technischer Optionen für das Repowering

### 1.1 Auswertung aktueller Literatur und Einbindung der Ergebnisse aktueller FuE-Vorhaben

Als erster Schritt innerhalb des Vorhabens erfolgte die Auswertung geeigneter Literatur. Die Einordnung der ermittelten Optionen erfolgte nach den in den Projekten untersuchten Anlagenteilen. Hinsichtlich der Ableitung von Repoweringoptionen wurden hier insbesondere typische Schwachstellen der Biogasanlagen betrachtet.

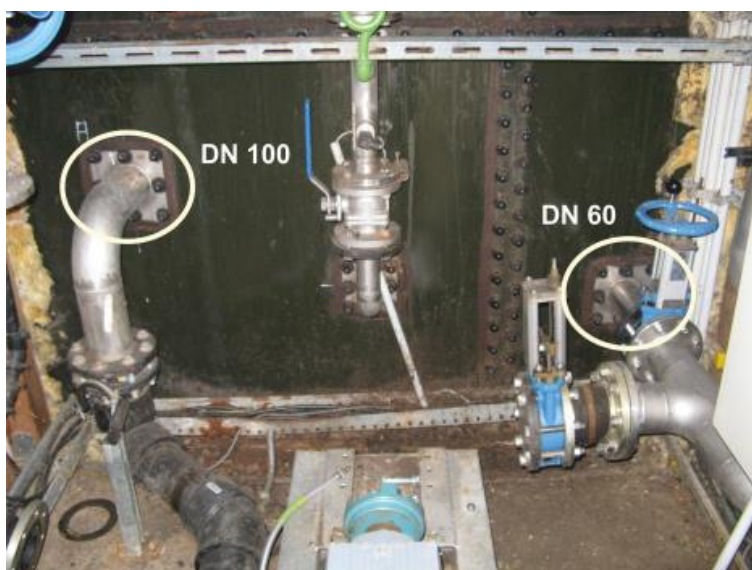
#### 1.1.1 Substrataufbereitung und Substrateintrag

Die Substrataufbereitung und das Eintragungssystem werden mehrfach als Fehlerquellen bei Störfällen genannt. Auch bei störfallfreiem Betrieb bietet dieser Anlagenbereich häufig ein gutes Optimierungspotential. Unabhängig vom verwendeten Substrat kommt es bei zwei untersuchten Anlagen zu Verstopfungen der Rohrleitung aufgrund zu enger Rohrquerschnitte in Verbindung mit zu großen oder faserigen Partikeln [1] [2]. In diesen Fällen wurden erfolgreich das regelmäßige Spülen der Substratleitungen sowie der Austausch der Rohre gegen größere vorgenommen. Auch ein anderes Projekt ohne konkreten Anlagenbezug schlägt die Vergrößerung des Nenndurchmessers (DN, Diameter Nominal [mm]) als sinnvolles Mittel gegen Verstopfungen vor [3]. Außerdem konnte gezeigt werden, dass die Erweiterung der Rohre von DN 150 auf DN 250 sowie die Reduzierung der Rohrbogenanzahl in der Substratleitung den Druckverlust der Leitung drastisch reduziert und so der Energiebedarf der Eintragungspumpen gesenkt wird [4]. Weiterhin zeigt sich die Zerkleinerung des Substrats als wirksames Mittel gegen Verstopfungen der Rohrleitungen und Pumpen [1], [2], [3]. Auch das Feststoffeintragsystem selber kann ein hohes Optimierungspotential aufweisen. Die untersuchte Anlage wies ein älteres Feststoffeintragsystem auf, welches einerseits höhere Energiekosten verursacht als moderne Systeme, außerdem mussten regelmäßig Reparaturen zu hohen Kosten durchgeführt werden. Im Rahmen der Erweiterung der Rohrdurchmesser wurde daher ein neues Feststoffeintragsystem mit integriertem Feststoffzerkleinerer installiert [4].

Bei der Vergärung von Kommunalabfällen in Biogasanlagen kann es außerdem zu Verstopfungen durch anorganische Störstoffe wie Sand, Kies und Kunststoffteile kommen. Dies zeigt sich bei einer, in die städtische Biomüllentsorgung integrierte, Anlage in Schweden [1]. Um die größeren Partikel zu entfernen wird hier das Substrat vor der Verwendung gesiebt, ein nachgeschalteter Sandfang soll den Sand aus dem Substratmassenstrom entfernen. Da dieser Sandfang trotz verschiedener Variationen der Luftenblasung den Sand nicht vollständig entfernen kann kommt es zu abrasionsbedingten Schäden der Pumpen. Abhilfe schafft bei dieser Anlage der Austausch der Pumpen gegen abrasionsbeständigere Modelle.

Auch die Substratmenge pro Fütterung stellt eine potentielle Fehlerquelle dar. Der Optimierungsleitfaden Biogas zeigt auf, dass einige Biogasanlagen über keine Wiegeeinrichtung verfügen, bei anderen wurde sie seit der Installation nicht kalibriert und zeigt in Folge dessen falsche Werte an. Um den, für den reibungslos laufenden Abbauprozess, notwendigen Substratmassenstrom einhalten zu können muss hier eine Wiegeeinrichtung nachgerüstet bzw. vorhandene Systeme kalibriert werden.

Ein weiterer wichtiger Punkt der Substrataufbereitung ist das Anmischen von festen Substraten wenn diese mittels Pumpen in den Fermenter gebracht werden sollen. Im Rahmen eines FNR-Forschungsprojekts der Gesellschaft für Nachhaltige Stoffnutzung mbH (GNS) wird die Auswirkung des von der GNS patentierten ANAStrip®-Verfahrens auf den Ammoniumstickstoffgehalt des  $\text{NH}_4\text{-N}$ -Gehalts um 80 % nachweisen [5], die Minderung der Gärhemmung hingegen wird nur im Labormaßstab nachgewiesen, nicht an einer großtechnischen Anlage. Auch schlecht positionierte Rohranschlüsse zur Rezikulatentnahme können ein prozessstörendes Element sein [4]. In der von ihm untersuchten Biogasanlage befanden sich die Rohranschlüsse der Substratleitung vom Fermenter zum Nachgärer und der Rohrleitung zur Rezikulatpumpe nur etwa einem Meter versetzt in der Behälterwand. Diese Situation ist deutlich in Abbildung 1 zu erkennen. Der DN 100 Anschluss links verbindet den Fermenter mit dem Nachgärer, am DN 60 Anschluss (rechts) ist die Rezikulatleitung angeflanscht.



**Abbildung 1:** Anschlüsse der Fermenter-Substratleitung und der Rezikulatpumpe am Nachgärer [4]

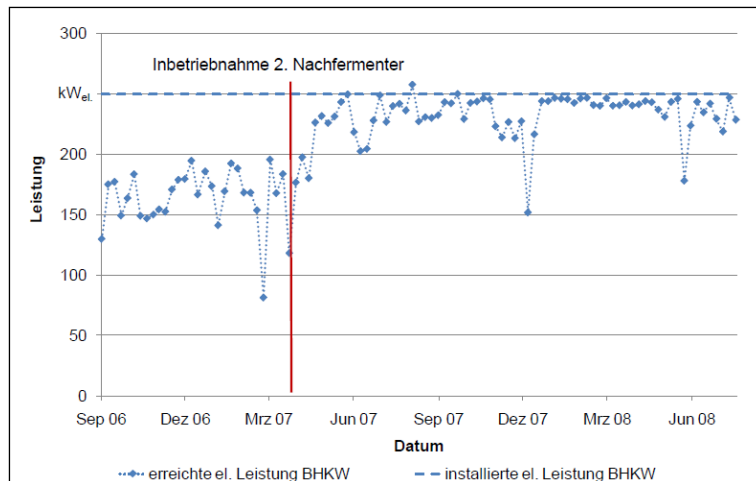
Wird nun die Rezikulatpumpe zum Anmischen von frischem Substrat betrieben und, betriebsbedingt nahezu gleichzeitig, überschüssiges Substrat vom Fermenter in den Nachgärer gefördert, besteht eine große Wahrscheinlichkeit von Kurzschlussströmungen. Durch den Umbau an eine andere, weiter entfernte Stelle in der Behälterwand konnte die Kurzschluss-Wahrscheinlichkeit drastisch gesenkt werden. Außerdem kann an der neuen Position ein DN 150 Anschluss genutzt werden. Durch diese Durchmessererweiterung reduzierte sich die Leistungsaufnahme der Pumpe um etwa 25.500 kWh/a [4].

### 1.1.2 Vergrößerung des Gesamtgärraumes

Bei drei Projekten zeigt sich die Vergrößerung des Gärraumes durch Neubau eines Nachgärers als wirksames Mittel zur Optimierung der Anlage, da hierdurch das verwendete Substrat durch die längere Verweilzeit besser ausgenutzt wird, weiterhin ist es möglich den Substratmassenstrom zu erhöhen.

Eine im Rahmen eines Projekts der Bayerischen Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL) untersuchte Biogasanlage zeigte eine durchschnittliche elektrische Auslastung von 65,9 % der installierten

Leistung von 250 kW. Durch den Neubau eines Nachgärers mit 1106 m<sup>3</sup> Volumen zusätzlich zu den vorhandenen Gärbehältern (Fermenter 276 m<sup>3</sup> und Nachgärer 396 m<sup>3</sup>) kann die elektrische Auslastung auf 89,5 % gesteigert werden (Abbildung 2). Dieser trotz regelmäßigem Volllastbetrieb noch verhältnismäßig niedrige Wert resultiert aus zwei wartungsbedingten Leistungseinbrüchen (Wartung des BHKW und Erneuerung der Fermenterabdeckung) im Messzeitraum [3].



**Abbildung 2:** Elektrische Auslastung vor und nach Inbetriebnahme des neuen Nachgärers nach [3]

Die Ergebnisse eines Projekts des Fraunhofer Instituts für Umwelt-, Sicherheits- und Energietechnik UMSICHT sowie des Deutschen Biomasseforschungszentrums (DBFZ) führten zum Neubau eines Nachgärers an einer Abfallvergärungsanlage. Die Messergebnisse zeigten ein deutliches Restgaspotential in den Gärresten des einstufigen Prozesses, so dass dieser durch den Neubau eines Nachgärers zu einem zweistufigen Prozess erweitert wird. Da der Bau des neuen Gärbehälters zum Zeitpunkt des Projektendes noch nicht abgeschlossen war liegen keine Daten zum derzeitigen Restgaspotential vor [6].

Weiterhin ist einer Pressemitteilung der ABO Wind zum Repowering der Biogasanlage Samsleben zu entnehmen, dass dort im Rahmen der Umbaumaßnahmen ein vorhandenes Gärrestelager zum Nachgärer umgerüstet wurde. Durch diesen Umbau konnte die hydraulische Verweilzeit von durchschnittlich 33 Tagen auf 50 Tage erhöht werden [7]. Durch diese Maßnahme wurde das Restgaspotential der Gärreste reduziert, ebenso sinken deren Geruchsemissionen durch den weiter fortgeschrittenen Abbau.

### 1.1.3 Gärbehälter

Die Gärbehälter selber sowie seine direkte Peripherie enthalten eine Reihe an Möglichkeiten zur Optimierung an verschiedenen Stellen, beispielsweise an den Rührwerken, der Beheizung oder der Entschwefelungstechnik.

### 1.1.4 Rührwerk

Das Rührwerk übernimmt einige wichtige Funktionen im Gärbehälter. Es sorgt dafür, dass das bei der Fütterung eingebrachte Substrat gleichmäßig (homogen) verteilt wird. Auch bei der Temperaturführung des Behälters spielt das Rührwerk eine wichtige Rolle: Der Fermenterinhalt muss gut durchmischt werden um für eine homogene Temperaturverteilung zu sorgen. Dies ist notwendig

damit es einerseits nicht zu lokalen Kältezonen kommt und andererseits damit keine Überhitzung im Bereich der Heizschlangen stattfindet, durch die es zum Absterben der Mikroorganismen in diesem Bereich kommen könnte. Auch kann ein Hitzestau an den im Fermenter installierten Heizschlangen zum Anbacken des Substrats führen, wodurch der Wärmeübergang behindert und der Heizungswirkungsgrad gesenkt wird.

Ein Projekt von Fraunhofer UMSICHT konnte durch Simulationsrechnungen sowie durch praktische Versuche einen Einfluss der Rührergeometrie auf die Aufheizzeit, notwendige Mischzeit zur Homogenisierung sowie Schwimmschichtbildung nachweisen. Durch eine Veränderung der Geometrie des Paddelrührers konnte die notwendige Zeit zur Homogenisierung und damit die Aufheizzeit des Fermenterinhalt gesenkt werden. Auch die Schwimmschichtbildung wurde reduziert bzw. bestehende Schwimmschichten konnten teilweise aufgelöst werden. Ob die kürzeren Aufheizzeiten und bessere Kontrolle der Schwimmschichten den um etwa 20 % gestiegenen Energiebedarf rechtfertigen bleibt zu untersuchen [8].

Andere Untersuchungen zeigen, dass in einigen Anlagen sehr hohe Rührwerkslaufzeiten von bis zu 11 h/d realisiert werden. Dies wirkt sich negativ auf den Eigenenergieverbrauch der Anlage aus, außerdem beeinträchtigt es die Methanproduktion, da sich in dauerhaft durchmischten Medien keine stabilen Symbiosen der Mikroorganismen bilden können [6]. Daher sollte bei Anlagen mit hohen Rührerlaufzeiten durch Versuche ermittelt werden in wieweit sich die Laufzeiten reduzieren lassen ohne eine spürbar negative Auswirkung auf den Prozess zu zeigen. Da die mögliche Verkürzung der Betriebszeiten von sehr vielen Einflussfaktoren wie Substrattyp, Rührwerkstyp und -dimension, Rührwerksleistung, Behältergröße und -geometrie abhängt muss dies anlagenspezifisch getestet werden, es lassen sich keine allgemeingültigen Empfehlungen geben [9].

Der „Optimierungsleitfaden Biogas“ empfiehlt vor einem geplanten Substratwechsel bei einer bestehenden Biogasanlage die Eignung des Rührwerks für den neuen Substrattyp zu überprüfen. Durch ungeeignete Rührwerke kann es zu Prozesshemmungen durch starke Schwimmschichtbildung, Sinkschichten und inhomogene Substratverteilung im Fermenter kommen [10].

### 1.1.5 Temperatur

Temperaturschwankungen im Gärbehälter wirken sich negativ auf den biologischen Abbauprozess aus, durch ein Ungleichgewicht der Mikroorganismen können instabile Betriebszustände hervorgerufen werden.

Im Rahmen der bereits angesprochenen Optimierung der BGA Samsleben [7] wurde eine neue Dämmung am Fermenter installiert um Temperaturschwankungen so weit wie möglich zu reduzieren. Hierdurch konnten die vor allem im Winter auftretenden Schwankungen mit kurzzeitig stark sinkender Behältertemperatur verhindert werden.

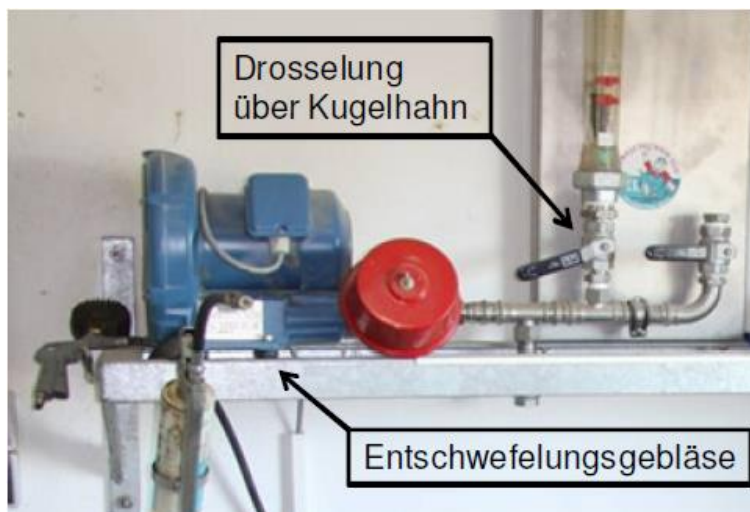
Auch der „Optimierungsleitfaden Biogas“ beschäftigt sich mit der Fermentertemperatur. Häufig seien die Heizungen bei der Planung zu klein ausgelegt worden. Dadurch kann im Fall eines behinderten Wärmeübergangs aufgrund von Ablagerungen und Anbackungen an die Heizungsrohre die Betriebstemperatur nicht stabil gehalten werden. Hier ist es unter Umständen sinnvoll größere Wärmeübertragerflächen zu installieren. Auch ist die Art der Beheizung an den jeweiligen Prozess anzupassen, so eignen sich beispielsweise Bodenheizungen nicht bei Anlagen in denen es aufgrund



des Substrats zu starker Sinkschichtbildung kommt. In Bezug auf die Fermenterdämmung wird eine lückenlos ausgeführte Mindestdämmstärke von 80 mm empfohlen [10].

### 1.1.6 Entschwefelung

Die in den meisten Biogasanlagen betriebene biologische Entschwefelung ist aus technischer Sicht äußerst einfach, sie bedarf lediglich einer geringen Luftereinblasung in den Gasraum des Gärbehälters. Dennoch zeigt der Abschlussbericht des BGA\_OPT-Projekts ein deutliches Optimierungspotential in Bezug auf die notwendige elektrische Leistung für die Luftzufuhr. Bei zwei Anlagen wird die Luftzufuhr über Druckluftkompressoren geregelt, welche einerseits einen zu hohen Luftvolumenstrom und andererseits einen zu hohen Druck erzeugen. Dies führt zu einem unnötig hohen Takt der Kompressoren. Auch sind teilweise Luftversorgungssysteme mit überdimensionierten Gebläsen zu finden. So hat das Gebläse einer untersuchten Anlage eine Leistungsaufnahme von 540 W, der zu hohe Volumenstrom wird mittels eines fast geschlossenen Kugelhahns reguliert (Abbildung 3) [11].



**Abbildung 3:** Überdimensioniertes Entschwefelungsgebläse mit Kugelhahn [11]

Ein Austausch der überdimensionierten Gebläse und Kompressoren beispielsweise gegen eine Linearkolbenpumpe (LKP) mit einer Leistungsaufnahme von 85 W bis 95 W reduziert den Energieverbrauch der Luftereinblasung drastisch. Diese Maßnahme rentiert sich bei Investitionskosten von 250 € - 450 € oft schon in unter einem Jahr.

Als realistischen Zielwert des Energieverbrauchs bei der Luftereinblasung werden in dem entsprechenden Abschlussbericht  $0,05 \text{ (kWh}_{\text{el.}}/\text{d})/(\text{Nm}^3/\text{h})$  angegeben. Bei einer während des Projekts betrachteten Anlage lässt sich durch den Umbau von einem Kompressor auf eine 95 W Linearkolbenpumpe der spezifische Energieverbrauch der Luftversorgung von  $0,12 \text{ (kWh}_{\text{el.}}/\text{d})/(\text{Nm}^3/\text{h})$  auf  $0,02 \text{ (kWh}_{\text{el.}}/\text{d})/(\text{Nm}^3/\text{h})$  reduzieren. Dies entspricht einer Einsparung von 642 €/a bei einem Strompreis von 0,15 €/kWh [11].

Weiterhin sollte beachtet werden, dass jeder Gärbehälter, welchem frisches Substrat zugeführt wird, über eine Entschwefelungsanlage verfügen muss. Da der Schwefelwasserstoff hauptsächlich zum Anfang der Zersetzung des organischen Materials freigesetzt wird, verfügen viele mehrstufige Biogasanlagen über eine Entschwefelungsanlage im Fermenter, nicht jedoch im Nachgärer. Soll nun auch dem Nachgärer frisches Substrat zugeführt werden, so muss auch dieser mit einer

Entschwefelungsanlage nachgerüstet werden. Dies verhindert, dass H<sub>2</sub>S-haltiges Biogas der Verbrennung im BHKW zugeführt wird und dort Schäden verursacht [4].

### 1.1.7 Blockheizkraftwerke

Die zur Verstromung des erzeugten Biogases genutzten Blockheizkraftwerke sind laut der „Schwachstellenanalyse Biogasanlagen“ eine der größten Fehlerquellen und Hauptursache bei Produktionsausfällen. 45 % der aufgetretenen Störfälle aller untersuchten Biogasanlagen betreffen die verwendeten BHKW [2]. Es konnte festgestellt werden, dass bis zu 53 % der Störfälle die BHKW betreffen. Außerdem treten auch an direkt mit den Kraftwerken zusammenhängenden Anlagenteilen Beeinträchtigungen und Störungen auf. Dies betrifft beispielsweise die Gasleitungen zum BHKW oder Überhitzung der Betriebsräume. Diese Störfälle werden ebenfalls in diesem Kapitel behandelt [12].

#### 1.1.7.1 Schäden direkt am Blockheizkraftwerk

Zu den am häufigsten auftretenden Schäden an Blockheizkraftwerken gehören Motorschäden, die auf mangelhafte oder fehlende Wartung zurückzuführen sind. Obwohl das Problem der Motorölübersäuerung durch Schwefelwasserstoffreste im Biogas bekannt ist, kommen mehrere Untersuchungen zu dem Ergebnis, dass einige Anlagenbetreiber die vom Hersteller angegebenen Ölwechselintervalle nicht einhalten. Auch wird bei vielen Anlagen keine regelmäßige Motorölanalyse vorgenommen, durch die ein notwendiger Ölwechsel rechtzeitig erkannt werden könnte [11], [2], [12]. Auch andere auftretende Störfälle, wie beispielsweise der Ausfall von Zündkerzen, ließen sich zum Teil durch das Einhalten von Wartungsintervallen vermeiden [12].

Der thermische Wirkungsgrad bei Zündstrahlmotoren nimmt in der Regel mit der Zeit ab. Dies ist auf Rußablagerungen auf den Abgaswärmeübertragern zurückzuführen. Um einen möglichst hohen Wirkungsgrad aufrecht zu erhalten, sollten die Wärmeübertragerflächen je nach Zündölanteil des Motors 1- bis 2-mal jährlich gereinigt werden [9].

Auch falsch positionierte Kühler können zu Schäden oder regelmäßigem Abschalten der BHKW führen. Bei einer im Rahmen der „Schwachstellenanalyse Biogasanlagen“ untersuchten BGA kam es zu einem Motorschaden durch einen falsch positionierten Tischkühler (Ausrichtung südwärts). In den Sommermonaten konnte nicht ausreichend Wärme an die Umgebung abgegeben werden, wodurch das BHKW mit überhöhter Temperatur betrieben wurde. In Folge dessen kam es zu Schäden an den Zylinderbuchsen [2].

Das Forschungsprojekt BGA\_OPT der Hochschule Ingolstadt kommt zu dem Ergebnis, dass sich bei Anlagen mit älteren BHKW die Neuanschaffung eines oder mehrerer moderner Blockheizkraftwerke mit höherem elektrischem Wirkungsgrad schon nach kurzer Zeit amortisieren kann. Durch den höheren Wirkungsgrad aktueller Modelle im Vergleich zu älteren kann bei gleichem Biogaseinsatz mehr elektrische Energie erzeugt und verkauft werden. Soll hingegen die Energieproduktion nicht erhöht werden, kann die Energiemenge mit geringerem Biogaseinsatz gewonnen werden, wodurch die jährlichen Substratkosten sowie die benötigte Anbaufläche reduziert werden. Ein Austausch der Kraftwerke kann sich schon ab einer Wirkungsgradsteigerung um einen Prozentpunkt lohnen [11].

### 1.1.7.2 Schäden an umgebenden Anlagenteilen

Schäden an umgebenden Bauteilen eines Blockheizkraftwerks können aus verschiedensten Gründen entstehen. Besonders in den Sommermonaten steigen die Temperaturen in den Betriebsräumen der BHKW stark an wenn keine ausreichende Belüftungsanlage vorhanden ist. Dies kann zu hitzebedingten Schäden an Elektronikkomponenten und Computern führen welche im selben Raum untergebracht sind [12]. Dies betrifft beispielsweise Computer zur BHKW-Steuerung sowie messtechnische Bauteile. Um hitzebedingte Schäden zu verhindern ist auf eine ausreichend dimensionierte Belüftungsanlage zu achten.

Die „Schwachstellenanalyse Biogasanlagen“ zeigt an einem Beispiel auf, dass die sorgfältige Auslegung der Gasleitungen einer Biogasanlage massiven Einfluss auf die Effizienz der BGA hat. Das BHKW konnte vor einem Umbau nur im Teillastbetrieb gefahren werden, da der Gasleitungsquerschnitt nicht ausreichte um genügend Gas für den Volllastbetrieb zu liefern. Weiterhin war bei dieser Anlage kein automatischer Druckausgleich zwischen den Gasspeichern über dem Fermenter und dem Nachgärer möglich. Dies führte dazu, dass das BHKW den Gasspeicher über dem Nachgärer leer gesogen hat, obwohl der Speicher über dem Fermenter ausreichend gefüllt war. Durch diese Unterdrucksituation kam es zum Einsturz der Nachgärerdecke und zur Deformation der Gasleitungen (Abbildung 4). Durch den Umbau auf Rohrleitungen größeren Durchmessers und einen automatischen Druckausgleich kann das angeschlossene BHKW gegen Ende des Untersuchungszeitraums unter Volllast betrieben werden.



**Abbildung 4:** Durch Unterdruck verformte Gasleitungen [7]

### 1.1.7.3 Sonstiges Optimierungspotential an Blockheizkraftwerken

Die Blockheizkraftwerke einer Biogasanlage erzeugen im Betrieb einen nicht unerheblichen Lärmpegel, besonders bei größeren Anlagen. Vor allem bei siedlungsnah errichteten BHKW kann dies zur Lärmbelästigung der Anwohner und damit zu Beschwerden führen. Abhilfe kann hier eine bessere Geräuschdämmung schaffen, wodurch die Akzeptanz der Anlage durch die Anwohner steigt [7].

### 1.1.7.4 Abwärmenutzung

Neben der elektrischen Energie werden durch die Verbrennung des Biogases große Mengen Wärme frei. Bei den meisten Anlagen übertrifft die jährlich erzeugte Wärmemenge ( $\text{kWh}_{\text{th}}/\text{a}$ ) die Produktion elektrischer Energie ( $\text{kWh}_{\text{el}}/\text{a}$ ). Im Gegensatz zur el. Energie, die vollständig genutzt wird, wird jedoch bei vielen Anlagen nur ein kleiner Teil der Abwärme genutzt. In der Regel nutzen die Betreiber der Biogasanlage die Abwärme zur Prozesswärmeversorgung, also zur Beheizung der Gärbehälter, teilweise auch zum Beheizen des eigenen Wohnhauses und Stallungen. Gelegentlich werden auch Nachbarhäuser mit Wärme versorgt [13], [14], [7]. Ein großer Teil der Wärme wird jedoch ungenutzt in die Umgebung abgegeben. Da nach dem EEG die im Rahmen der Kraft-Wärme-Kopplung genutzte thermische Energie vergütet wird, sollte der Betreiber einer BGA mit geringer Wärmenutzung versuchen neue Abnahmeverträge zu schließen. Dazu kann die Wärme mittels eines lokalen Nahwärmenetzes zu den Abnehmern gebracht werden. Entnommen werden kann die Wärme an drei Stellen der BHKW: Bei einem Temperaturniveau von etwa  $80\text{ °C} - 90\text{ °C}$  aus der Ladeluftkühlung sowie dem Motorkühlwasserkreislauf und bei etwa  $400\text{ °C} - 600\text{ °C}$  aus dem Abgasstrom [7].

Das Projekt BGA\_OPT kommt zu dem Ergebnis, dass einige der älteren Biogasanlagen mit Betriebsbeginn vor 2004 zwar anteilig die erzeugte Wärme nutzen, jedoch über keinen Wärmemengenzähler verfügen und so auf den KWK-Bonus verzichten. Anderen Anlagen mit Wärmemengenzähler fehlt teilweise nur das notwendige Umweltgutachten um ihren Anspruch auf die EEG-Vergütung geltend machen zu können. Bei Investitionskosten von etwa  $600 - 1700\text{ €}$ , je nach Anlagengröße, für den Wärmemengenzähler inkl. Einbau und  $800 - 1300\text{ €}$  für das Gutachten kann sich die Investition bereits nach einem Jahr amortisieren [7]. Der Wärmemengenzähler besteht dabei aus einem Durchflussmesser sowie zwei Temperaturfühlern, einer im Vorlauf des Wärmeübertragers, einer im Rücklauf.

### 1.1.8 Bereichsübergreifende Optimierungsoptionen

Neben den vorgenannten, bereichsspezifischen Optimierungsmöglichkeiten gibt es in einer Biogasanlage weitere, bereichsübergreifende Möglichkeiten den Betrieb zu optimieren, um so eine höhere Wirtschaftlichkeit der Anlage zu erreichen.

#### 1.1.8.1 Lagerhaltung von Ersatzteilen

In einer Biogasanlage kommt es aufgrund der Anzahl verschiedener Bauteile und technischer Apparate unausweichlich zu Problemen unterschiedlichster Art. Die meisten Defekte und Störungen werden vom Betreiber in Eigenleistung behoben. So zeigt die „Schwachstellenanalyse Biogasanlagen“ am Beispiel der Betriebseinheit BHKW, dass der Anteil an in Eigenleistung behobener Störfälle bei  $57,5\%$  liegt, die in Eigenleistung behobenen Störfälle der Betriebseinheit Pumpen und Rohrleitungen betragen  $77,3\%$  [2]. Laut dem Optimierungslaufplan Biogas kommt es jedoch auch bei in

Eigenleistung behobenen Arbeiten häufig zu Produktionsausfällen, da Ersatzteile nicht immer sofort lieferbar sind und der Betreiber der Anlage somit die Lieferzeiten des Herstellers in Kauf nehmen muss. Abhilfe schafft hier die Lagerhaltung von Ersatzteilen für die wichtigsten und störfallanfälligen Anlagenteile [10], [11]. So sollten vor allem wichtige Teile für die BHKW, Pumpen, Fütterungsvorrichtungen und Rührwerke vor Ort bereitgehalten werden [11].

### 1.1.8.2 Biogasemissionen

Eines der wichtigsten Ziele einer Biogasanlage ist die Gewinnung von Biogas zur weiteren Verwertung. Verschiedene Forschungsprojekte der letzten Jahre konnten nachweisen, dass in BGA zum Teil erhebliche Mengen an Biogas ungenutzt und unbemerkt in die Atmosphäre gelangen. Eine Studie des Instituts für Energetik und Umwelt schätzte ab, dass in einer Biogasanlage etwa 1,8 % des jährlich erzeugten Biogases durch Leckagestellen vor der Verwertung verloren geht [15]. Bei Anlagen mit offenen Gärrestlagern wird zusätzlich weiteres Biogas ungenutzt in die Atmosphäre abgegeben. Ebenso kommt es, besonders bei älteren Anlagen, teilweise zu massiven Methanemissionen bei einem Ausfall des Blockheizkraftwerks wenn keine alternative Verwertungsmöglichkeit oder zusätzliche Speicherkapazität besteht. Neben dem Verlust des Rohstoffs und den damit verbundenen Umsatzverlusten für den Betreiber der Anlage stellen diese Methanemissionen auch ein großes Umweltproblem dar. Das so freigesetzte Methan hat auf 100 Jahre gesehen ein 25-mal größeres Treibhauspotential als CO<sub>2</sub> [16].

Im Folgenden werden die an verschiedenen Anlagen identifizierten Leckagestellen nach Anlagenbereich geordnet aufgezeigt.

### 1.1.8.3 Gärbehälter

Der Großteil des emittierten Methans stammt direkt aus den Gärbehältern der Biogasanlagen. Diese haben diverse Durchführungen für die Substratzufuhr, die Substratentnahme, für Rührwerke, Schaugläser und Mannlöcher. Vor allem die Seildurchführungen von höhenverstellbaren Tauchmotorrührwerken erwiesen sich als Emissionsquellen (Abbildung 5). Messungen ergaben hier mehrfach CH<sub>4</sub>-Konzentrationen über 10.000 ppm [11], [2]. Emissionen an dieser Stelle können nicht verhindert werden, sie sind konstruktiv bedingt. Eine regelmäßige Wartung der Durchführung, also das Fetten nach jeder Höhenanpassung, kann jedoch zur drastischen Verminderung der emittierten Methanmenge beitragen [11]. Auch die Durchführungen anderer Rührwerke durch die Behälterwand stellen potenzielle Leckagestellen dar. So kann beispielsweise die Verankerung bzw. die Wellendurchführung eines Langachsenrührwerks einen Methanaustritt verursachen [11].



**Abbildung 5:** Seildurchführung eines Tauchmotorrührwerks als Emissionsquelle [2]

Eine weitere Fehlerquelle bilden die Eintragungssysteme. Obwohl diverse verschiedene Systeme am Markt erhältlich sind, zeigten nahezu alle Systeme Undichtigkeiten. Meist sind diese konstruktiv bedingt und treten direkt im Übergangsbereich zum Fermenter auf [11].

Bei Gärbehältern mit Betondecke kommt es besonders häufig auch bei Durchführungen durch den Beton zu Emissionen. Hier konnten Methanlecks an Substratzugabevorrichtungen, an Revisionsöffnungen und Mannlöchern, (Abbildung 6) und an messtechnischen Vorrichtungen nachgewiesen werden [11], [2].



**Abbildung 6:** Blasenbildung durch defekte Silikonabdichtung einer Revisionsöffnung im Betondach[2]

Offene Überläufe, wie sie bei älteren Anlagen häufiger anzutreffen sind bilden ebenso eine Emissionsquelle [11]. Abbildung 7 zeigt eine Methanmessung an einem offenen Überlauf einer bayrischen Biogasanlage. Oben links ist das Methanmessgerät noch mit im Bild.



**Abbildung 7:** Methanmessung an offenem Überlauf [11]

Auch an Über- und Unterdrucksicherungen konnten Methanemissionen nachgewiesen werden. Zum einen entstehen hier Emissionen wenn die Gaslager durch Überproduktion oder Kraftwerksausfall gefüllt sind und keine Notfallverbraucher vorhanden sind wie beispielsweise Gasfackeln, Heizkessel oder Ersatz-BHKW. Zum anderen zeigt sich, dass die häufig anzutreffenden Wassertassen aufgrund mangelhafter Wartung nicht ausreichend befüllt sind. Auch können die Dichtflächen von Über- und Unterdrucksicherungen verspröden oder durch Substrat verunreinigt werden. Eine regelmäßige Wartung inklusive Kontrolle der Dichtflächen hilft die Methanemissionen an dieser Stelle einzudämmen [10].

### 1.1.9 Gasleitungen

Auch an den Gasleitungen verschiedener Biogasanlagen konnten erhöhte Methankonzentrationen nachgewiesen werden. Grundsätzlich können für den Gastransport bei BGA sowohl Stahl- als auch Kunststoffrohre eingesetzt werden [10]. Bei den zumeist verwendeten Kunststoffrohren bilden die Verbindungsstellen, vor allem bei gleichzeitiger Durchmesseränderung, eine mögliche Emissionsquelle (Abbildung 8). Um Lecks weitestgehend zu vermeiden empfiehlt der „Optimierungsleitfaden Biogas“ bei Kunststoffrohren auf gesteckte oder geklebte Verbindungen zu verzichten. Stattdessen sollten die Rohre miteinander verschweißt werden, außerdem sollten möglichst lange Rohrstücke verwendet werden um die Zahl der Nahtstellen zu minimieren. Weiterhin wird empfohlen, die gesamte Rohrleitung in dem gleichen Durchmesser auszulegen [2]. Dadurch werden leckanfällige Reduzierstellen vermieden. Außerdem sollte darauf geachtet werden, dass die gesamte Gasleitung über ein leichtes Gefälle sowie ausreichende Entwässerungsmöglichkeiten verfügt. Bei erdverlegten Leitungen wie beispielsweise Kühlstrecken muss ein stabiler Untergrund vorhanden sein um ein Setzen der Leitung zu verhindern. Durch eine Verformung der Rohre könnten an den Nahtstellen Lecks entstehen [10].



**Abbildung 8:** Emissionsmessung an notdürftig abgedichteter Gasleitung

### 1.1.10 Gasspeicher

Bei den Verlusten während der Speicherung des Biogases muss zwischen Diffusionsverlusten und Verlusten durch Beschädigungen unterschieden werden.

Verluste durch Diffusion lassen sich nicht vollständig vermeiden, solange an beiden Seiten der Membran unterschiedliche Konzentrationen vorliegen. Allerdings hat sich die Folientechnik in den letzten Jahren stetig weiterentwickelt und es wurden speziell auf Biogasanlagen abgestimmte Folien auf dem Markt gebracht. Berechnungen der „Schwachstellenanalyse Biogasanlagen“ anhand von Messergebnissen an drei Gärbehältern einer BGA ergaben, dass durch die Tragluftfolienhaube eines Gärbehälters zwischen 8,6 – 64,4 g CH<sub>4</sub>/h diffundieren. Am Beispiel der untersuchten Anlage bedeutet dies, dass die jährlichen Verluste maximal 0,08 % der Jahresgasproduktion betragen [2]. Vogt et al. geben einen Verlust durch Diffusion von etwa 0,5 % der Jahresbiogasproduktion an [17]. Deutlich höher können die Gasverluste durch Beschädigungen der Gasspeicher sein, sowohl bei integrierten als auch bei externen Folienspeichern. Bei den integrierten Speichern ist vor allem der Bereich der Befestigung am Gärbehälter, also der komplette Randbereich, gefährdet. Dieser Übergangsbereich wird durch den Kontakt zum Behältermaterial am stärksten beansprucht, besonders bei Wetterereignissen wie Starkwind und Sturm. Hier kommt es häufig zu Rissen in der Folie [11]. Um andauernde Gasverluste zu verhindern sollte die Foliendeckung regelmäßig, besonders nach Stürmen, kontrolliert werden. Kleine Risse lassen sich dann noch einfach reparieren.

Externe Speicher sind in der Regel robust verarbeitet und stellen nur dann ein Risiko dar, wenn sie nicht fachmännisch installiert werden. Bei freistehenden Doppelmembranspeichern sowie bei in Hallen untergebrachten Folienspeichern (Abbildung 9) sind die gasdichten Membranen sehr gut gegen Witterungseinflüsse geschützt [18]. Anders sieht es bei im Freien installierten Folienspeichern aus. Hier



ist die gasdichte Membran direkt den Witterungseinflüssen ausgesetzt. Wird ein solches Gasspeichersystem verwendet, sollte unbedingt darauf geachtet werden, dass der Gassack in leerem wie auch gefülltem Zustand keinen Kontakt zu anderen Gegenständen hat, an denen die Membran bei Wind leakscheuern kann (Abbildung 10) [11].



**Abbildung 9:** einer Halle fachgerecht installiertes Folienkissen, Quelle: Novatech GmbH



**Abbildung 10:** Schlecht positioniertes Folienkissen [13]

#### 1.1.11 Gärrestelager

Die größte Emissionsquelle bilden die offenen Gärrestelager älterer Anlagen. Je nach Substratausnutzung, Restgaspotential und Lagerzeit bis zur Leerung können hier große Mengen Biogas entstehen, etwa 2,5 – 15 % der Jahresgesamtproduktion einer Biogasanlage [17]. Abhilfe schafft die gasdichte Abdeckung des Gärrestelagers. Dies verhindert nicht nur die Methan- und Geruchsemissionen, sondern macht auch das im Gärrest entstehende CH<sub>4</sub> verfügbar für die Verwertung.

Umwelttechnisch betrachtet bietet die Abdeckung der Lager in jedem Fall eine Verbesserung. Ökonomisch betrachtet können keine generellen Empfehlungen gegeben werden. Ob sich eine nachträgliche Abdeckung finanziell lohnt hängt von diversen Einflussfaktoren wie dem verwendeten Substrat, dem Restgaspotential sowie der Bauform des Gärrestelagers ab [14], [4], [11], [17]. Neben den direkten ökologischen und ökonomischen Vorteilen trägt die Abdeckung der Lager, besonders bei siedlungsnahen BGA, durch das Eindämmen der Geruchsemissionen zur Akzeptanz der Anlage durch die Anwohner bei [7].

#### 1.1.12 Notfallverbraucher

Durch den Ausfall von Blockheizkraftwerken kommt es immer wieder zu Überproduktionen an Biogas, die aufgrund fehlender Speicherkapazitäten in die Atmosphäre abgelassen werden müssen. Um diese Emissionen zu vermeiden sollten an jeder Anlage Notfallverbraucher vorhanden sein [10]. Die einfachste Form stellt eine Gasfackel dar (Abbildung 11). Hiermit wird der Gasüberschuss gezielt verbrannt, das entstehende CO<sub>2</sub> gelangt klimaneutral in die Umgebung [18], [16].



**Abbildung 11:** Gasfackel einer Biogasanlage [7]

Da die Beheizung der Gärbehälter in der Regel über die Abwärme der BHKW erfolgt muss auch hierfür ein Notfallsystem zur Verfügung stehen. Soll auf eine elektrische Notfallbeheizung verzichtet werden bietet sich der Einsatz eines Gaskessels an, über den nicht nur die Fermenterbeheizung sondern auch der Wärmebedarf externer Wärmeabnehmer gedeckt werden kann. Eine weitere Möglichkeit ist das Bereitstellen eines Ersatz-BHKW. Diese Variante bietet sich besonders dann an, wenn durch eine Modernisierung ein altes Kraftwerk nicht weiter verwendet wird. Anstatt es zu entsorgen kann es so angeschlossen werden, dass es bei einem Ausfall des Hauptaggregats sofort in Betrieb genommen werden kann [7]. Bei Anlagen, an denen häufig eine Überproduktion eintritt, kann sich auch die Anschaffung eines weiteren Gasspeichers rentieren [11].

### 1.1.13 Zusammenfassung der Literaturlauswertung

Die Auswertung der Literatur zur Anlagenoptimierung und zum Repowering zeigt, dass eine Vielzahl unterschiedlicher Optionen existiert. Hieraus wurden für das Projekt REPOWERING Optionen identifiziert, die sowohl hinsichtlich des ihres Potenzials, als auch hinsichtlich der Kompetenzen des Projektteams von hoher Relevanz sind.

Die im weiteren untersuchten Aspekte und Optionen untergliedern sich in drei Teilbereiche:

#### 1. Verminderung / Vermeidung von Klimagasemissionen

- Methanschlupfbestimmung
- Berücksichtigung der gefundenen Leckagen bei der Berechnung der Effizienz der Biogasanlage

#### 2. Optimierung des Gärprozesses

- Überprüfung der Effizienz der Biogasgewinnung (Untersuchung der Input- und Output-Parameter mittels Gärtests)
- Vergleich der Werte mit den real gemessenen Biogasausbeuten an der Anlage (mittels erzeugte Gasmengen/ Abgleich mit Menge eingespeisten Strom)

- Spurenelementscreening des Fermenterinhalts
- Säuremuster des Fermenterinhalts
- Hydrolyseleistung des Fermenterinhalts

### 3. Technische Konzepte zur Flexibilisierung der Stromproduktion

- Identifizierung der wesentlichen Kenngrößen im Anlagenbestand
- Ermittlung von Optionen und Kosten zur Flexibilisierung der Stromproduktion
- Ermittlung von Optionen und Kosten zur Flexibilisierung des Substrateinsatzes und der Anlagenbeschickung
- Optionen und Kosten für den Zusammenschluss von Biogasanlagen.

## 1.2 Auswertung laufender Anlagenoptimierungen

### 1.2.1 Beitrag von Emissionsminderungsmaßnahmen zum Repowering

#### 1.2.1.1 Methanemissionen von BGA bei bestimmungsgemäßem Betrieb

An 10 unterschiedlichen BGA des vorhandenen Anlagenbestands in Deutschland wurden die Treibhausgase (THG) Methan und Lachgas, sowie Ammoniak gemessen und die CO<sub>2</sub>-Äq. bestimmt. Zu erkennen sind große anlagenspezifische Unterschiede sowie eine breite Spanne (min./max.) an jeweils einer Anlage bei verschiedenen Betriebszuständen (siehe Abbildung 12 bis Abbildung 14). Die Unterschiede sind bedingt durch verfahrens- und bautechnischen Unterschiede einerseits (z. B. offene Gärrestläger) und Substrateinflüsse (z.B. hohe Gärrestpotentiale) andererseits. Die THG-Emissionen sind in ihrer Höhe als grundsätzlich relevant einzustufen und bestätigen die Arbeitshypothese. Zu unterscheiden sind die hier ermittelten Methanemissionen von den Methan-Leckagemessungen der Projektpartner Bonalytic, die einen nicht bestimmungsgemäßen Betrieb aufgrund von Undichtigkeiten abbilden. Diese Emissionen sind bei der Klimaschutzwirkung zusätzlich zu berücksichtigen.

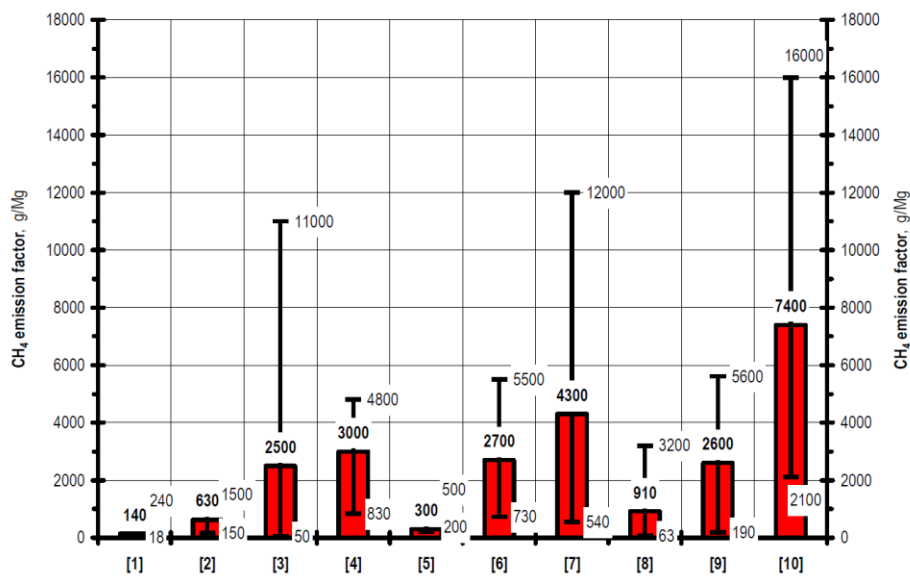


Abbildung 12: Methanemissionen aus 10 unterschiedlichen BGA [Gewitra]

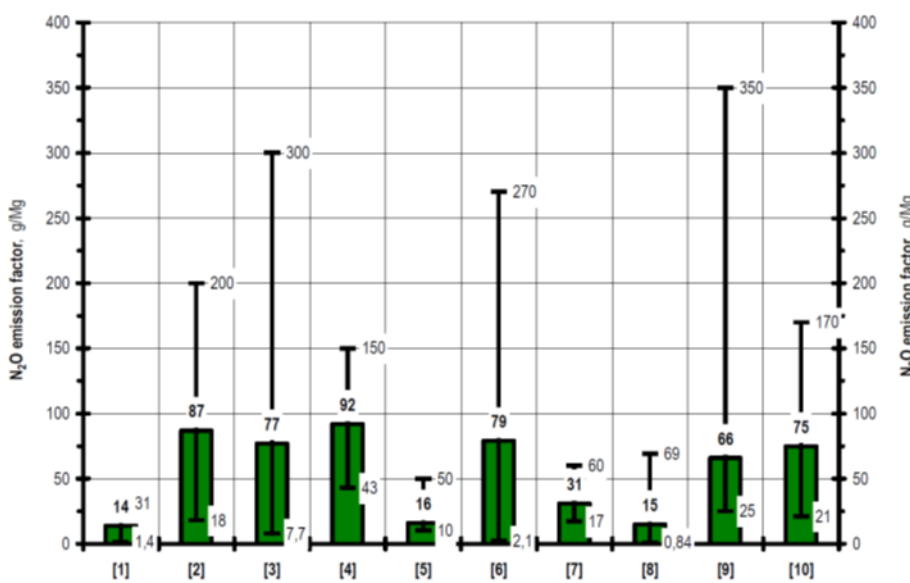


Abbildung 13: Lachgasemissionen aus 10 unterschiedlichen BGA [Gewitra]

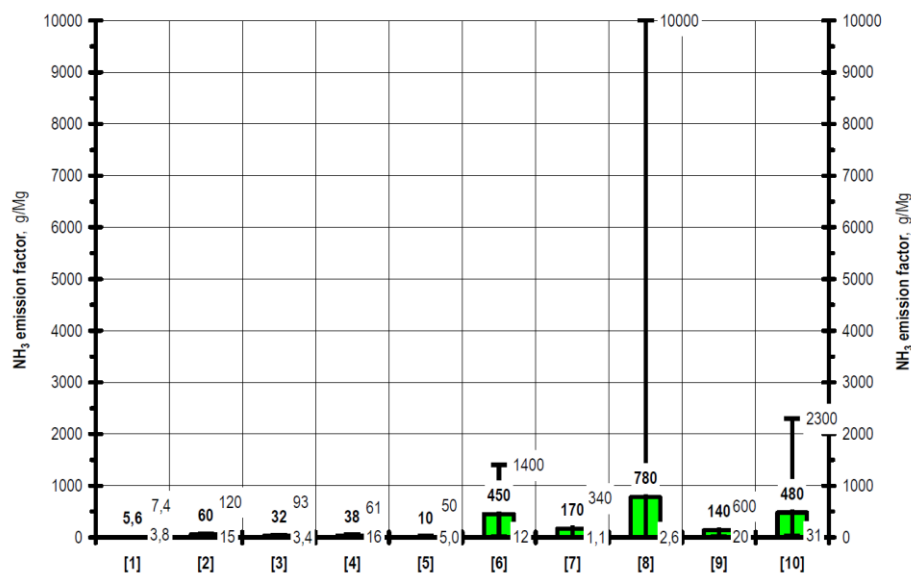


Abbildung 14: Ammoniakemissionen aus 10 unterschiedlichen BGA [Gewitra]

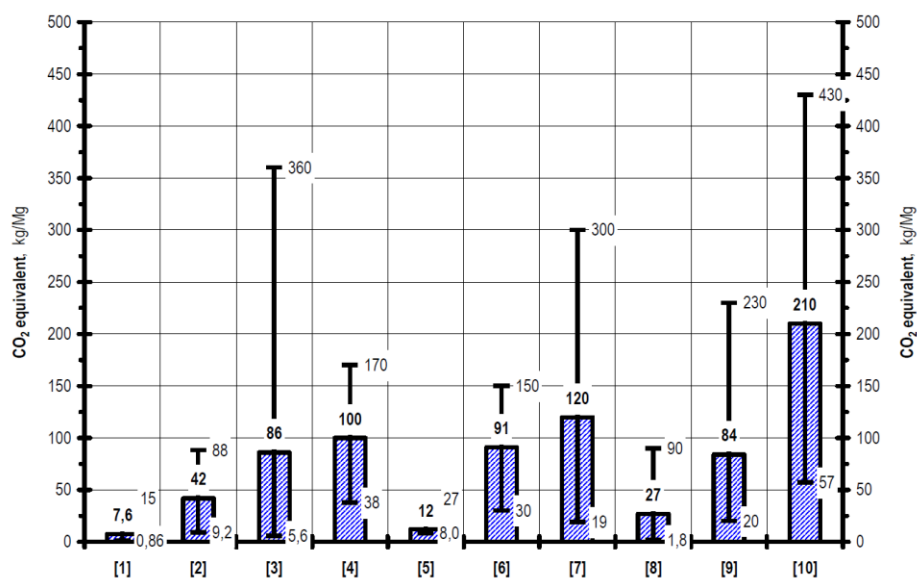


Abbildung 15: Berechnete CO<sub>2</sub>-Äq. aus Methan (Faktor 25) und Lachgas (Faktor 298) aus 10 unterschiedlichen BGA [Gewitra]

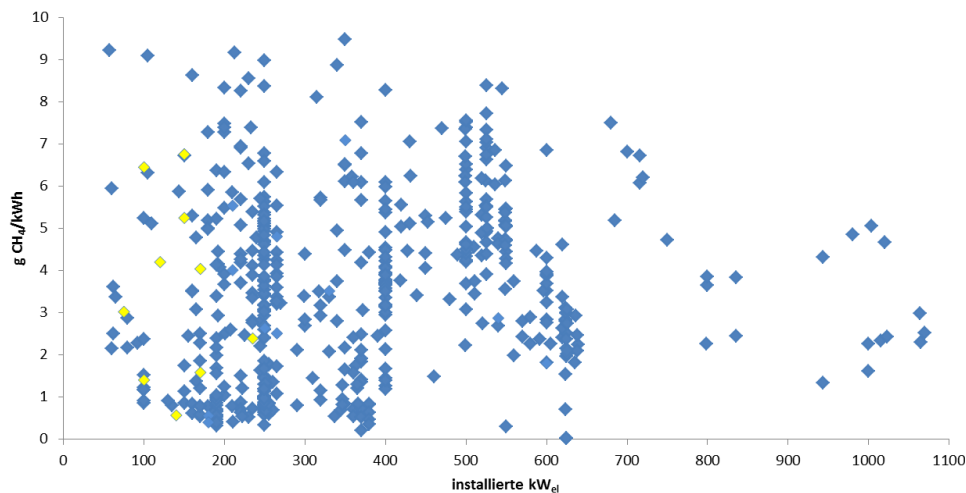
### 1.2.1.2 Methanschluß aufgrund von Undichtigkeiten

Bioreact übermittelte der Bonalytic 10 Anlagen, die von Bonalytic auf Leckagen, Methanschluß und andere Emissionsquellen untersucht wurden. Es handelte sich um kleinere Anlagen mit elektrischer Leistung bis maximal 250 kW.

Die Anlagen wurden von Bonalytic GmbH angefahren und auf Emissionen untersucht. Die Detektion der Emissionen vor Ort kam eine Kohlenwasserstoffsensitive Kamera (FLIR GF320), Methanspürgeräte (SigiEx) zum Einsatz. Bei Bedarf wurde eine Gasprobe gezogen (z.B. an Tragluftdächern und Biolenen) und diese im Labor gemessen.

Es stellte sich heraus, dass auf Anlagen mit regelmäßiger Wartung die Emissionen tendenziell niedriger lagen als auf Anlagen, die nur sporadisch und erst bei Auftreten von Problemen gewartet

wurden. Als ein Beispiel ist die hohe Bandbreite von Methanemissionen als Methanschlupf zu nennen (Abbildung 16).



**Abbildung 16:** Untersuchte mögliche Anlagen zum Repowering im Vergleich zu allen bisher untersuchten Anlagen [Bonalytic]

Bei nichtsachgerechter kleineren Erweiterungsaktivitäten wurden zum Teil gasführende Leitungen und getrennt und diese nicht gasdicht abgeschlossen.

An Biolenen wurden in 2 von 30 Fällen eine erhöhte Diffusion, die deutlich über dem Grenzwert der T14 lag, ermittelt. Der gasdichte Abschluss der Membranen an der Fermenterwand zeigte ähnlich hohe Leckagen als die Befestigung von Tragluftdächern.

Prinzipiell konnte keine direkte Korrelation zwischen Anlageninbetriebnahme und Leckagehäufigkeit festgestellt werden. Als Gründe für die fehlende Abhängigkeit des Anlagenalters und Leckagehäufigkeit sind zu nennen:

#### **Jahreszeit der Dachkonstruktion**

Bei kälteren Temperaturen scheinen Dichtungsmaßnahmen während der Bauphase nicht so erfolgreich zu sein als in der wärmeren Jahreszeit.

#### **Besondere Ereignisse**

Wird eine Folie innerhalb einer kürzeren Spanne mehrfach überdehnt, kann es zu Undichtigkeiten kommen, die denen bei einem längeren Betrieb und weniger hoher Dehnungsfrequenz gleichzusetzen sind.

#### **Wartung**

Regelmäßige Wartung des BHKWs verringert die CH<sub>4</sub>-Emissionen am BHKW. Sensibilisierte Betreiber führen einen täglichen Kontrollgang durch und protokollieren ggf. Geruchswahrnehmungen. Auch große Leckagen können vom Betreiber nicht zwangsläufig über den Geruchssinn wahrgenommen werden. Denn je nach Windrichtung und -stärke sind Leckagen nur sporadisch oder überhaupt nicht wahrzunehmen.

### 1.2.1.3 Vergleichende Untersuchungen zur Detektionsgrenze von Methanleckagen an Biogasanlagen durch berührungslose Messverfahren

Methanemissionen an Biogasanlagen sind aus ökonomischer, ökologischer und vor allen Dingen aus sicherheitstechnischer Sicht unerwünscht. Durch berührungslose Messverfahren können Anlagen theoretisch rasch auf Undichtigkeiten und Leckagen überprüft werden. Bonalytic verglich die Kohlenwasserstoffsensitive IR-Kamera GF320 von FLIR mit dem Lasersystem von crowcon (LaserMethane mini) durch die Simulation einer Gasleckage an der Biogasanlage (10, 50, 100, 500, 875 l CH<sub>4</sub>/h). Für das IR-Verfahren wurde eine Detektionsgrenze von 11 l CH<sub>4</sub>/h festgestellt. Eine Kategorisierung zur Abschätzung der Emissionen ist möglich. Das Lasersystem konnte keine Emissionsquellen detektieren sobald keine Reflexionsfläche für den Laserstrahl zur Verfügung stand. Eine Kategorisierung zur Abschätzung der Emissionen ist ebenfalls möglich. Im Praxistest auf der Biogasanlage detektierte das Lasersystem nicht alle die von der IR-Kamera vorab detektierten Undichtigkeiten: Leckagen im Bereich Fermenterwand und Dach, welcher ein typischer und häufig auftretender Emissionsort ist, konnten mit dem Laser nur unzureichend (eine von vier Leckagen) detektiert werden.

Die Leckage- und Dichtheitsuntersuchung an Biogasanlagen ist wesentlicher Bestandteil der sicherheitstechnischen Routineüberprüfung von Biogasanlagen. Auch aus ökologischer und ökonomischer Sicht sind solche Untersuchungen sinnvoll.

Zur Erkennung von Leckagen aus größeren Entfernungen sind berührungslose Messverfahren geeignet. In der Praxis kommen aktive und passive Verfahren zum Einsatz. Das gängige aktive Messverfahren ist ein Methansensitiver Laser, der die Konzentration zwischen dem Messgerät und der Emissionsquelle in ppm\*m misst. Als passives Messverfahren ist die Gasvisualisierung mittels einer Kohlenwasserstoffsensitiven IR-Kamera auf dem Markt. Der Vorteil der Gasvisualisierung mittels IR-Kamera liegt in der Visualisierung und somit in der raschen Lokalisationsmöglichkeit der Leckage. Allerdings sind solche Kameras deutlich teurer als die Lasersysteme, mit denen nur schwer der Leckageort zu lokalisieren ist, insbesondere wenn Reflektionsflächen fehlen. Denn der Laser ist darauf angewiesen, dass ein Teil des ausgestrahlten Laserstrahls reflektiert wird und wieder in das Messgerät gelangt.

Allerdings gibt es im Moment widersprüchliche Angaben zur Leistungsfähigkeit beider Systeme. Deshalb untersuchte die Bonalytic im Rahmen der nach DIN/EN/ISO 17025 akkreditierten Methode zur Leckagedetektion an Biogasanlagen die Detektionsgrenze der IR-Kamera und führte zusätzlich vergleichende Messungen mit zwei IR Kameras und einem Lasersystem durch.  
Vergleich IR-Kamera – Laser; Seite 2

#### 1.2.1.3.1 Material und Methoden

Es kamen zwei IR-Kameras der Firma FLIR (GF320) mit einem 23 und 38mm Objektiv und ein LaserMethane mini der Firma crowcon (Baujahr 2010) zum Einsatz.

Experiment 1: Kalibriergas (50%CO<sub>2</sub> und 50% CH<sub>4</sub>) wurde mit geeigneten Flowmetern in einer Höhe von 4,6 bis 4,95m freigesetzt und somit eine Leckage an einer Biogasanlage simuliert. Dabei bildete bei der ersten Messung nur die Atmosphäre den Hintergrund, während bei der zweiten Messung als Reflexionsquelle eine Spanplatte etwa 40 cm hinter der Emissionsquelle platziert wurde. Es wurden jeweils Emissionsraten von 10, 50, 100, 500 und 875 l CH<sub>4</sub>/h eingestellt. Aus einer Entfernung von 8,5 m untersuchten drei Messtechniker mit allen drei Geräten, ob sie einen CH<sub>4</sub>-Austritt erkennen konnten. Beim Lasersystem wurde die maximal gemessene Konzentration (in ppm\*m) notiert.

Experiment 2: Da die Emissionsrate von 10 l CH<sub>4</sub>/h nicht von allen Messtechnikern detektiert wurde, wurde von diesem Wert an die Emissionsrate in Schritten von 1 l CH<sub>4</sub>/h erhöht, bis alle drei Messtechniker den Emissionsaustritt mit Hilfe beider IR-Kameras detektieren konnten.

Von den Leckagen wurden Filme aufgenommen. Diese wurde im Nachgang im Labor, ohne dass Informationen zur Leckagerate zur Verfügung standen, gesichtet und versucht, die Filme in die Emissionskategorien < 100 l CH<sub>4</sub>/h und < 1000 l CH<sub>4</sub>/h einzuordnen.

Während der beiden Experimente betrug die Temperatur der Luft 16,9 °C, die Temperatur des austretenden Gases 16,1°C, des Himmels 2,9°C, die Temperatur der Spanplatte 13,5°C. Die Windstärke betrug zwischen 0-1 beaufort.

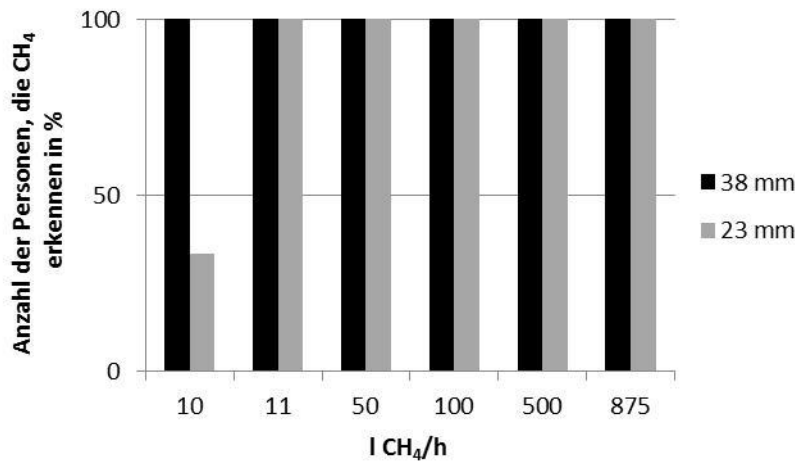
Experiment 3: Auf einer Biogasanlage wurden von einem Messtechniker die mit der IR-Kamera (38 mm Objektiv) gefundenen Leckagen mit Hilfe des Lasers ebenfalls vermessen und überprüft, ob alle Leckagen gefunden werden konnten. Ein Teil der Fermenter hatte eine Betondecke, die begangen werden konnte.

#### 1.2.1.3.2 Ergebnisse und Diskussion

Die Emissionen mit atmosphärischem Hintergrund konnten von allen drei Messtechnikern bis 50 l CH<sub>4</sub>/h mit beiden Kameras gut erkannt werden. Bei einer Emissionsrate von 10 l CH<sub>4</sub>/h erkannten alle Messtechniker den Gasaustritt nur mit der Kamera mit dem 38 mm Objektiv, zwei Messtechniker sahen mit der Kamera mit 23mm Objektiv keinen Gasaustritt mehr. Bereits ab 11 l CH<sub>4</sub>/h erkannten alle drei Messtechniker mit beiden Kameras den Gasaustritt( Abbildung 17). Das Ergebnis deckt sich mit Aussagen des QMaB (Arbeitskreis Qualitätssicherung Methanemissionsmessung an Biogasanlagen), der eine Detektionsgrenze von 12 l CH<sub>4</sub>/h angibt.



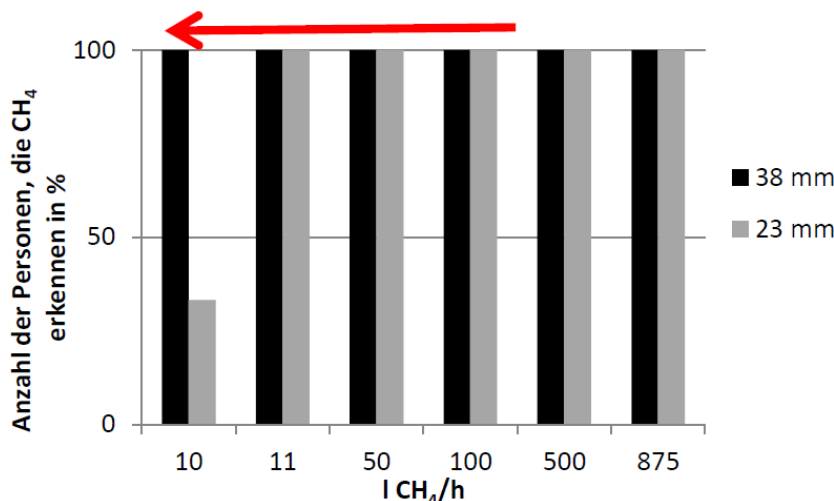
### CH<sub>4</sub>-Austritt mit Himmel als Hintergrund (T=276 K)



**Abbildung 17:** Prozent der Messtechniker (100% = 3), die einen Gasaustritt (X-Achse in l CH<sub>4</sub>/h) vor atmosphärischem Hintergrund detektierten; es wurde eine Kamera mit 23 und eine mit 38mm Objektiv eingesetzt [Bonalytic]

War bei dem Gasaustritt die Spanplatte als Hintergrund installiert, konnte der Gasaustritt bis 500 l CH<sub>4</sub>/h mit der Spanplatte als Hintergrund von allen drei Messtechnikern detektiert werden. Bei niedrigeren Emissionsraten wurde der Gasaustritt dann detektiert, sobald hinter der Methanwolke atmosphärischer Hintergrund war (Abbildung 18). Dieses Ergebnis zeigt deutlich, dass mögliche Leckageorte von mehreren Seiten aus betrachtet werden müssen, ansonsten können Leckagen übersehen werden: Ist die Temperatur des Hintergrundes ähnlich wie die des austretenden Gases, ist die Detektionsempfindlichkeit herabgesetzt.

### CH<sub>4</sub>-Austritt mit Reflexionsfläche (Spanplatte) als Hintergrund (T=287 K)

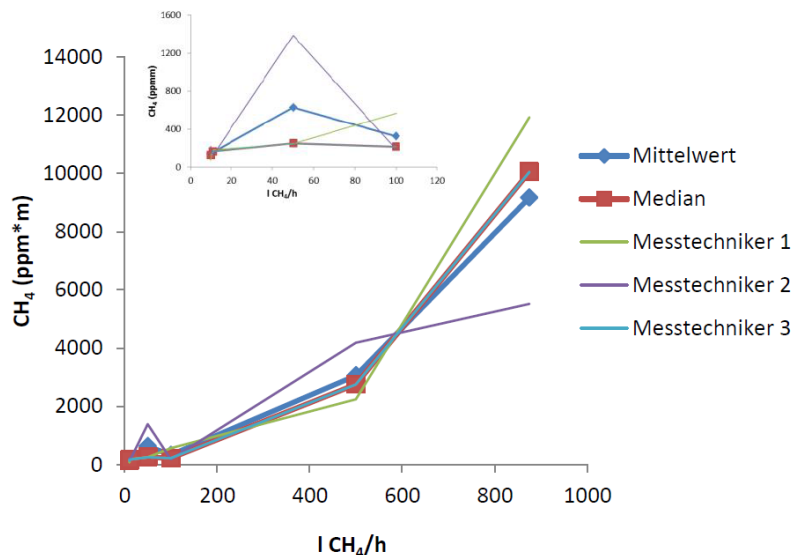


**Abbildung 18:** Prozent der Messtechniker (100% = 3), die einen Gasaustritt (X-Achse in l CH<sub>4</sub>/h) vor einer Spanplatte als Reflexionsfläche detektierten; es wurde eine Kamera mit 23 und eine mit 38mm Objektiv eingesetzt; ab einem Gasaustritt < 100 l CH<sub>4</sub>/h wurde der Gasaustritt erst dann erkannt, wenn das Gas vor den atmosphärischen Hintergrund gelangte (roter Pfeil) [Bonalytic]

Das Lasersystem lieferte keine Ergebnisse bei einem Gasaustritt mit atmosphärischem Hintergrund, da hier eine Reflexionsfläche fehlte. War eine Spanplatte als Reflexionsquelle installiert, so wurden Signale vom Lasersystem empfangen, die tendenziell mit steigender Emissionsrate zunahmen (Abbildung 19). Unter 100 l CH<sub>4</sub>/h gab es keine eindeutig positive Korrelation zwischen Lasersignal und Gasaustrittsrate. Allerdings war es schwierig die Emissionsquelle mit dem Laser anzusteuern, da der dafür vorhandene Laserpointer im Gerät sehr schwach war.

Die Emissionsabschätzung der Filme in die beiden Kategorien < 100 l CH<sub>4</sub>/h und zwischen 100 und 1000 l CH<sub>4</sub>/h war zu 100% erfolgreich. Bei Emissionsraten, welche um den Schwellenwert von 100 l CH<sub>4</sub>/h liegen, kann in der Praxis sicherlich nicht immer die genaue Kategorisierung erfolgen, so dass ein solches Einstufungsmodell mit einer gewissen Unsicherheit behaftet ist. Eine Emissionskategorisierung mit Hilfe des Lasers war Fall ebenfalls möglich.

#### Lasersignal mit Reflexionsfläche hinter Emissionsquelle (Laserstrahl trifft im 90°-Winkel auf eine Spanplatte)



**Abbildung 19:** gemessene maximale CH<sub>4</sub>-Konzentration (ppm\*m) in Abhängigkeit von der freigesetzten CH<sub>4</sub>-Menge; kleine Grafik: Ausschnitt der Grafik bei Gasaustritt unter 100 l CH<sub>4</sub>/h. [Bonalytic]

Bei der Begehung der Biogasanlage konnte eine von vier gefundenen Leckagen an dem Übergang von Fermenterwand und -dach mit dem Lasersystem wiedergefunden werden. Auf dem Betondach wurden 4 von 5 mit der IR-Kamera gefundenen Leckagen wiedergefunden (Tabelle 1). Damit wurden die Ergebnisse der systematischen Untersuchungen bestätigt: Sobald Leckagen nur vor atmosphärischem Hintergrund auftreten, ist eine Detektion mittels Laser nicht möglich. Darüber hinaus ist das Lasergerät schwer handhabbar, wenn der mögliche Leckageort mehrere Meter entfernt ist. In diesem Fall verursachen kleine Verschiebungen des Gerätes in der Hand (Zittern), eine Standortveränderung des Laserstrahles von mehreren Dezimetern.

**Tabelle 1:** Zusammenfassung der Leckagen, die mit dem Laser wiedergefunden wurden, nachdem sie mittels IR-Kamera detektiert wurden [Bonalytic]

	IR-Kamera	Laser
Leckagen am Übergang	4	1
Fermenter/Dach		
Leckagen auf dem	5	4
Betondach		

### 1.2.1.3.3 Zusammenfassung der Ergebnisse

Mit Hilfe der IR-Kamera konnten CH<sub>4</sub>-Austritte ab 11 l CH<sub>4</sub>/h festgestellt werden. Die Detektionsgrenze war mit der Kamera mit 38mm Objektiv etwas besser (11 l CH<sub>4</sub>/h) als die mit 23 mm Objektiv. Geringe Temperaturdifferenzen zwischen austretendem Gas und Hintergrund verringerten die Detektionsgrenze deutlich (von 11l CH<sub>4</sub>/h auf <500 l CH<sub>4</sub>/h). Deshalb ist bei einer Kamera-Begehung auf Biogasanlagen dringend darauf zu achten, dass sämtliche möglichen Leckageorte von verschiedenen Blickwinkeln aus überprüft werden (z.B. Handlungsanweisung des QMaB, [www.qmab.de](http://www.qmab.de)) [19].

Lasersysteme finden keine Leckagen, wenn diese nur mit atmosphärischem Hintergrund auftreten, was insbesondere bei Leckagen im Bereich Wand/Dach/Folie der Fall ist. Sind geeignete Reflexionsflächen vorhanden, so detektiert der Laser Methan, wobei das Messsignal bei CH<sub>4</sub>-Austritten von unter 100 l CH<sub>4</sub>/h nicht mit der Gasaustrittsmenge korrelierte. Die Handhabung des Lasersystems war schwierig, da der Laserpointer bei Tag zu schwach war, um die Position des Messstrahles zu lokalisieren. Außerdem war das Anzielen möglicher Leckageorte, die mehr als 5 Meter entfernt waren, sehr schwierig, da der Messstrahl aufgrund kleinster Verschiebungen in der Hand stark schwankte. Ein stärkerer Laserpointer und ein Stativ könnten hier Abhilfe schaffen.

Die Einordnung der Leckagen mit beiden Systemen in Emissionskategorien ist möglich. Aber insbesondere an den Grenzemissionen (hier 100 und 1000 l CH<sub>4</sub>/h) dürfte die Einordnung in der Praxis mit Unsicherheiten behaftet sein. Hier sind Detailuntersuchungen notwendig.

Das Lasersystem ist unserer Meinung bisher nur als unterstützendes System geeignet. Basis einer aussagekräftigen Leckage- und Dichtheitsuntersuchung ist eine Kohlenwasserstoffsensitive Kamera, wobei weitere Methoden zur Bewertung des Gasaustrittes hinzuzuziehen sind. Eine entsprechende Handlungsanweisung und Bewertung wurde vom QMaB publiziert.

## 1.3 Ableitung von Optionen für das Repowering

### 1.3.1 Entwicklung neuer Konzepte für die enzymatische Vorbehandlung lignocellulosehaltiger Inputstoffe

Aufbauend auf dem Stand der Technik bezüglich physikalischer und mikrobieller Vorbehandlungsmethoden von Inputstoffen für die anaerobe Fermentation wurde, basierend auf Laboruntersuchungen und einer Modellanalyse, ein Konzept für die überwiegend Enzymatische Vorhydrolyse von Inputstoffen entwickelt. Im Kern sieht das Verfahrenskonzept vor, Inputstoffe in einem Vorhydrolysebehälter soweit mit Hilfe zugesetzter Enzyme unter hierfür optimierten Bedingungen aufzuschließen, dass das Inputmaterial in der nachfolgenden, anaeroben Fermentation mit signifikant erhöhter Rate abgebaut wird, wobei durch geeignete Maßnahmen der mikrobielle Abbau in der Hydrolysestufe minimiert wird.

Das neu konzipierte Verfahren setzt sich von bekannten, zwei-phasigen Fermentationsprozessen mit mikrobieller Vorhydrolyse vor allem dadurch ab, dass die Biogasbildung in der Vorhydrolysestufe soweit wie möglich vermieden wird. Es bildet deshalb formal eine Alternative nicht zu diesen mikrobiellen Verfahrensvarianten, sondern zu technisch-physikalischen Vorbehandlungsmethoden für faserhaltige Inputstoffe, wie sie im Abschnitt zur Nutzung alternativer Substrate zusammenfassend beschrieben sind. Technisch-physikalischen Vorbehandlungsmethoden gegenüber ist der verminderte Energieeintrag der wesentliche Vorteil des neuen Verfahrenskonzepts.

### 1.3.2 Wissenschaftlich-technische Ergebnisse

#### 1.3.2.1 Experimentelle Untersuchungen im Labormaßstab

Zur Untersuchung der Wirkung der Enzymatischen Vorhydrolyse auf die Verbesserung der Abbauraten von Inputstoffen in der anaeroben Fermentation wurden Experimente mit Gersten- und Weizenstroh, stellvertretend für lignocellulosereiche und damit schwer abbaubare Inputstoffe, im Labormaßstab durchgeführt. Dabei erfolgte die Enzymatische Vorhydrolyse im Batchverfahren. Anschließend wurden Gärtests - ebenfalls im Batchverfahren - mit dem voraufgeschlossenen Inputmaterial durchgeführt und die spezifische Biogasbildung im Vergleich zu einer Kontrolle ohne Enzymatische Vorhydrolyse gemessen.

Zusätzlich wurden Gärtests mit den unbehandelten Strohs durchgeführt, bei denen die Enzyme direkt in den Gäransatz gegeben wurden (also ohne Enzymatische Vorhydrolyse).

Die Enzymatische Vorhydrolyse erfolgte in verschlossenen Flaschen über einen Zeitraum von 20 Stunden bei Raumtemperatur (ca. 20°C). Für die Vorhydrolyse wurde das Stroh auf eine Halmlänge von 2 cm geschnitten und jeweils 23 g Stroh (Frischmasse) mit Enzymextrakt und Leitungswasser versetzt. Dabei wurde die zugegebene Menge Enzymextrakt so bemessen, dass die darin enthaltene Wirkstoffaktivität derjenigen Wirkstoffaktivität entsprach, die in 31 mg des verwendeten festen (Granulat) Multienzymprodukts der Bioreact GmbH enthalten ist. Das eingesetzte Multienzymprodukt wurde entsprechend den Praxiserfahrungen der Bioreact GmbH ausgewählt. Der Enzymextrakt wurde zusammen mit Leitungswasser homogen im Stroh verteilt, wobei soviel Leitungswasser hinzugefügt wurde, dass der finale Trockenmassegehalt des Vorhydrolyseansatzes 20% betrug.

Dasselbe Gewichtsverhältnis von eingesetztem Multienzymprodukt und Stroh wurde in den Gärtests verwendet, bei denen der Enzymextrakt direkt zum Gäransatz gegeben wurde.

Die Gärversuche erfolgten mit einem standardisierten Klärschlamm und wurden über einen Zeitraum von 44 Tagen bei 38°C, jeweils 3-fach parallel, durchgeführt.

### 1.3.2.2 Enzymatische Vorhydrolyse von Gerstenstroh

Abbildung 20 zeigt die spezifische Biogasbildung von Gerstenstroh mit und ohne Enzymatische Vorhydrolyse sowie mit Zugabe des Enzymextrakts direkt zum Gäransatz, wie oben beschrieben.

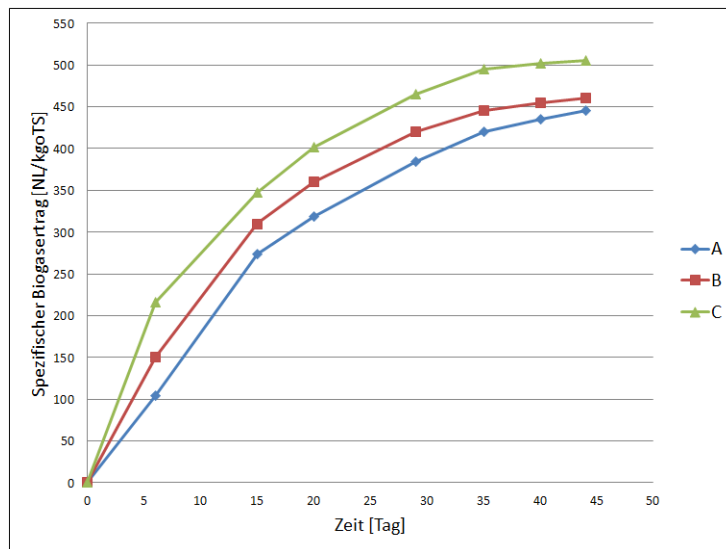


Abbildung 20: Spezifischer Biogasertrag in Abhängigkeit von der Gärzeit für folgende Ansätze: A: Gerstenstroh, B: Gerstenstroh + Enzymextrakt, C: Gerstenstroh nach enzymatischer Vorhydrolyse. [Bioreact]

Ohne Vorbehandlung wurde ein spezifischer Biogasertrag aus der anaeroben Vergärung des Gerstenstrohs in Höhe von ca. 450 NL/kg<sub>oTS</sub> nach 45 Tagen Inkubation erzielt, wobei der spezifische Biogasertrag zu diesem Zeitpunkt noch anstieg.

Mit Enzymatischer Vorhydrolyse betrug der spezifische Biogasertrag nach 44 Tagen etwa 500 NL/kg<sub>oTS</sub>. Zudem wurde die mikrobiologische Abbaurrate des Gerstenstrohs um ca. 40% erhöht. Dies folgt aus der Äquivalenz von Verweilzeit und Abbaurrate unter der vereinfachten Annahme eines anaeroben Vergärungsprozesses erster Ordnung.

Bei Zugabe des Enzymextrakts in den Gäransatz (ohne Enzymatische Vorhydrolyse) wurde nach 44 Tagen ein spezifischer Biogasertrag in Höhe von ca. 460 NL/kg<sub>oTS</sub> erreicht. Die mikrobiologische Abbaurrate war im Vergleich zur Kontrolle ohne Enzymbehandlung um ca. 20% erhöht worden. Unter den beschriebenen Laborbedingungen und bei gleichem Mengenverhältnis von Multienzymprodukt zu Stroh war die Enzymatische Vorhydrolyse also effizienter als eine äquivalente Enzymzugabe in den Gäransatz.

### 1.3.2.2.1 Enzymatische Vorhydrolyse von Weizenstroh

Dieser Trend zeigte sich auch in den Untersuchungen mit Weizenstroh (siehe Abbildung 21).

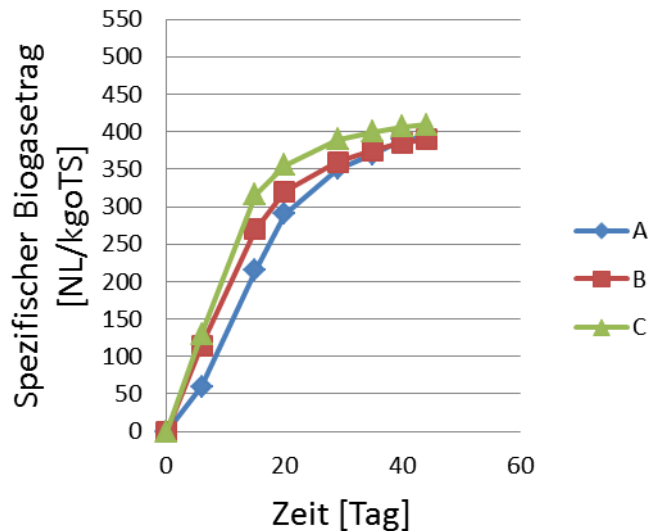


Abbildung 21: Spezifischer Biogasertrag in Abhängigkeit von der Gärzeit für folgende Ansätze:

A: Weizenstroh, B: Weizenstroh + Enzymextrakt, C: Weizenstroh nach Enzymatischer Vorhydrolyse. [Bioreact]

Hier wurde im Kontrolllauf ohne Enzymatische Vorbehandlung und ohne Zugabe von Enzymen in den Gäransatz ein spezifischer Biogasertrag in Höhe von ca. 390 NL/kg<sub>oTS</sub> nach 44 Tagen Inkubation erzielt.

Mit Enzymatischer Vorhydrolyse betrug der spezifische Biogasertrag nach 44 Tagen wenig mehr (ca. 405 NL/kg<sub>oTS</sub>), die mikrobiologische Abbaurate des Gerstenstrohs wurde aber um 30-35% erhöht.

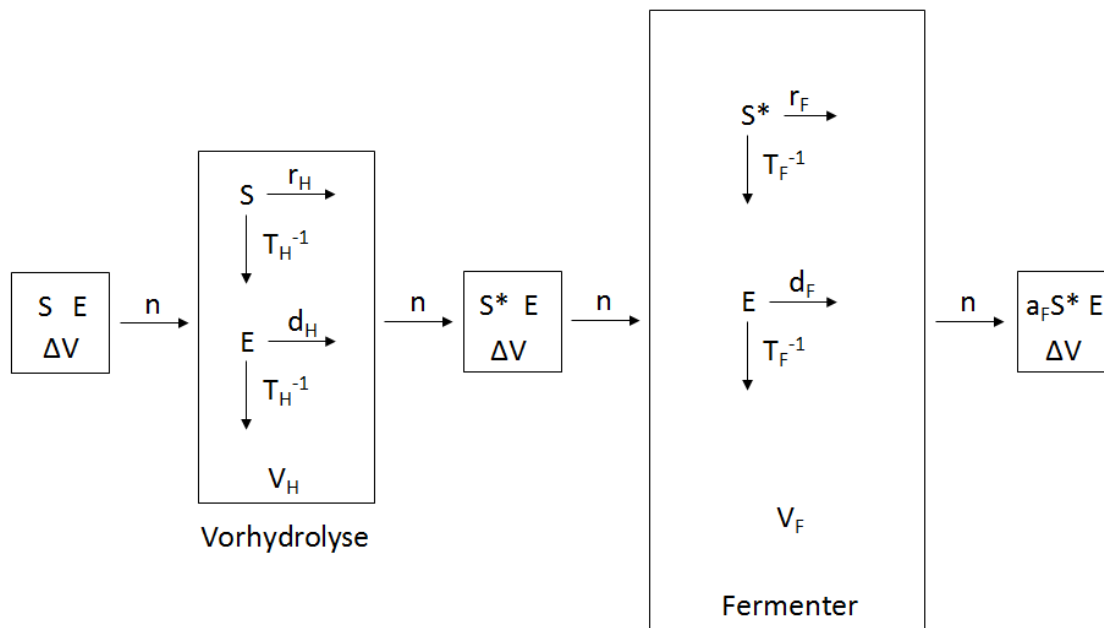
Bei Zugabe des Enzymextrakts in den Gäransatz wurde nach 44 Tagen ein spezifischer Biogasertrag in Höhe von etwa 390 NL/kg<sub>oTS</sub> (vergleichbar der Kontrolle) erreicht. Im Vergleich zur Kontrolle war die mikrobiologische Abbaurate diesmal um 20-30 % erhöht.

### 1.3.2.2.2 Vereinfachtes Verfahrensmodell der Enzymatischen Vorhydrolyse

In beiden Versuchen, mit Gerstenstroh und mit Weizenstroh, ergab sich mit Enzymatischer Vorhydrolyse im Vergleich zur Enzymzugabe in den Gäransatz eine zusätzliche Verbesserung der Abbaurate. Bei Gerstenstroh zeigte der Gärversuch mit enzymatisch vorausgeschlossenen Stroh nach 44 Tagen Inkubation zudem einen spezifischen Mehrbiogasertrag gegenüber der Kontrolle in Höhe von ca. 10%.

Die Laboruntersuchungen deuten also an, dass eine Enzymatische Vorhydrolyse gegenüber einem Einsatz von Enzymen im Fermenter zusätzliche Vorteile bieten könnte. Aus verfahrenstechnischer Sicht besonders attraktiv ist der Umstand, dass mit 20°C ein vergleichsweise niedriges Temperaturniveau der Vorhydrolyse zugrunde gelegt wurde. Für eine Bemessung des Verfahrens der Enzymatischen Vorhydrolyse ist allerdings zu berücksichtigen, dass unter Praxisbedingungen eine kontinuierliche Betriebsführung vorherrscht.

Für eine Modellanalyse des Verfahrens wurde deshalb ein vereinfachtes Modell auf Basis einer kontinuierlichen Verfahrensführung entworfen (siehe Abbildung 22).



**Abbildung 22:** Schema des Verfahrensmodells. Es symbolisieren: S - Substrat (Inputstoffe), E - Multienzymkomplex und  $S^*$  - Voraufgeschlossenes Substrat. [Bioreact]

Das Verfahrensmodell besteht aus der Vorhydrolysestufe und einer Fermenterstufe. Es wird angenommen, dass in der Vorhydrolysestufe ausschließlich eine enzymatische Hydrolyse stattfindet, also dort kein Biogas entsteht. Das Substrat wird durch die Wirkung der Enzyme in einer Weise aufgeschlossen, dass sich seine Verdaulichkeit in der nachfolgenden anaeroben Fermentation erhöht. Dies geschieht vor allem dadurch, dass Nicht-Stärke-Polysaccharide (NSP) enzymatisch zerkleinert und Vernetzungen zwischen den Polymeren aufgelöst und die bakterielle Bioverfügbarkeit dadurch erhöht wird. In einem bestimmten Umfang werden auch energiereiche Metabolite in Form von Zuckern und Zuckersäuren frei, die in der Fermenterstufe direkt verstoffwechselt werden können. Eine Bildung von Gärprodukten wie Fettsäuren und Alkoholen soll jedoch durch die Prozessführung minimiert werden (siehe unten). Die organische Gesamttrockenmasse des täglich der Vorhydrolysestufe zugeführten Inputs bleibt deshalb erhalten, das heißt, wird auch dem nachfolgenden Fermenter in gleicher Menge täglich zugeführt. Für den enzymatischen Aufschluss des oder der Inputstoffe in der Vorhydrolysestufe wird stark vereinfachend eine Aufschlussrate erster Ordnung angenommen. Auch für den mikrobiell-enzymatischen Abbau des Inputmaterials im Fermenter wird eine Abbaurrate erster Ordnung vorausgesetzt.

Für die Enzyme wird angenommen, dass sie sowohl in der Vorhydrolysestufe als auch im Fermenter thermisch und durch weitere Prozesse über die jeweilige Verweilzeit hinweg in einem bestimmten Maße inaktiviert werden, wobei vorausgesetzt wird, dass auch die Inaktivierungsraten erster Ordnung sind. Sowohl in der Vorhydrolysestufe als auch im Fermenter stellen sich stationäre Konzentrationen der Enzyme ein, die von den Verweilzeiten in der jeweiligen Stufe und den Inaktivierungsraten abhängen. Diese stationären Enzymkonzentrationen sind bestimmend für die Aufschlussrate der Inputstoffe in der Vorhydrolysestufe bzw. für einen zusätzlich zum mikrobiellen Abbau stattfindenden enzymatischen Aufschluss des Inputmaterials auch im Fermenter. Auch dies trägt zur Erhöhung der Abbaurrate im Fermenter bei, das heißt, die Enzyme wirken im Fermenter weiter.

Für die Beschreibung der Verbesserung der Abbaurates des Inputmaterials im Fermenter durch enzymatische Vorhydrolyse einerseits und die sich im Fermenter einstellende stationäre Enzymkonzentration andererseits, wird ein einfacher phänomenologischer Ansatz gewählt, der diese beiden Effekte so miteinander koppelt, dass ein zunehmender Aufschluss der Inputstoffe in der Vorhydrolysestufe zu einer abnehmenden Wirkung der Enzyme auf das (bereits voraufgeschlossene) Inputmaterial im Fermenter führt (siehe unten). Die Enzymwirkung verteilt sich also paritätisch zwischen Vorhydrolyse- und Fermenterstufe.

### 1.3.2.3 Analyse des Verfahrensmodells

Ziel der Modellanalyse ist zu untersuchen, ob und gegebenenfalls unter welchen Bedingungen sich bei kontinuierlicher Verfahrensführung zeigen lässt, dass sich durch eine enzymatische Vorhydrolyse im Vergleich zur Enzymzugabe in der Fermenter ein noch höherer Abbaugrad der Inputstoffe erreichen lässt.

Das Modell selbst besteht aus den folgenden Gleichungen, Größen und Parametern mit ihren jeweiligen Einheiten (siehe dazu auch Abbildung 22):

$$a_H = 1/(1+r_H \cdot T_H)$$

$$a_F = 1/(1+r_F \cdot T_F)$$

$$r_H = u \cdot E_H$$

$$r_F = r + q \cdot (1 - a_H) + s \cdot a_H \cdot E_F$$

$$E_H = n \cdot E / (1 + d_H \cdot T_H)$$

$$E_F = n \cdot E_H / (1 + d_F \cdot T_F)$$

$$T_H = V_H / \Delta V$$

$$T_F = V_F / \Delta V$$

$$d_H = \ln 2 / t_{1/2H}$$

$$d_F = \ln 2 / t_{1/2F}$$

$a_H$  : Umwandlungsgrad der Inputstoffe in der Hydrolysestufe [1]

$a_F$  : Abbaugrad des vorhydrolysierten Inputmaterials in der Fermenterstufe [1]

$r_H$  : Aufschlussrate der Inputstoffe in der Hydrolysestufe [1/d]

$r_F$  : Abbaurates des vorhydrolysierten Inputmaterials in der Fermenterstufe [1/d]

$u$  : Enzymabhängige Aufschlussrate in der Hydrolysestufe [ $\text{m}^3/(\text{g} \cdot \text{d})$ ]

$r$  : Mikrobiologische Abbaurates in der Fermenterstufe [1/d]

$q$  : Vorhydrolyseabhängige Abbaurates in der Fermenterstufe [1/d]

$s$  : Enzymabhängige Abbaurates in der Fermenterstufe [ $\text{m}^3/(\text{g} \cdot \text{d})$ ]

$E_H$  : Stationäre Enzymkonzentration in der Hydrolysestufe [ $\text{g}/\text{m}^3$ ]

$E_F$  : Stationäre Enzymkonzentration in der Fermenterstufe [ $\text{g}/\text{m}^3$ ]

$E$  : Enzymkonzentration im Zulauf zur Hydrolysestufe [ $\text{g}/\text{m}^3$ ]

$T_H$  : Mittlere hydraulische Verweilzeit in der Hydrolysestufe [d]

$T_F$  : Mittlere hydraulische Verweilzeit in der Fermenterstufe [d]

$V_H$  : Arbeitsvolumen der Hydrolysestufe [ $\text{m}^3$ ]

$V_F$  : Arbeitsvolumen der Fermenterstufe [ $\text{m}^3$ ]

$\Delta V$  : Zulaufvolumen in die Hydrolysestufe [ $\text{m}^3$ ]

$d_H$  : Mittlere Inaktivierungsrate der Enzyme in der Hydrolysestufe [1/d]

$d_F$  : Mittlere Inaktivierungsrate der Enzyme in der Fermenterstufe [1/d]

$t_{1/2H}$  : Mittlere Halbwertszeit der Enzyme in der Hydrolysestufe [d]

$t_{1/2F}$  : Mittlere Halbwertszeit der Enzyme in der Fermenterstufe [d]

$n$  : Zulaufrate in [1/d]



Die Modellgleichungen ließen sich zwar auf zwei Gleichungen für die Größen  $a_H$  und  $a_F$  reduzieren. Hierauf wurde aus Gründen der Transparenz aber verzichtet.

Das Vergleichsmodell für den Fall der Zugabe der Enzyme in den Fermenter ohne Enzymatische Vorhydrolyse lautet entsprechend:

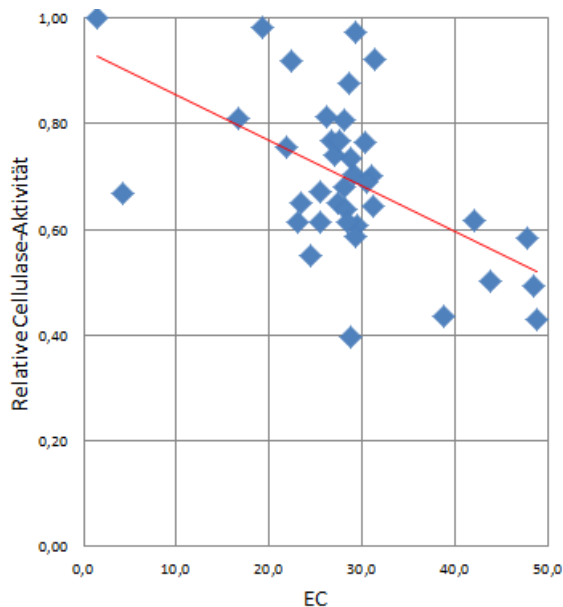
$$a_F = 1/(1+r_F \cdot T_F)$$

$$r_F = r + s \cdot E_F$$

$$E_F = n \cdot E / (1+d_F \cdot T_F)$$

Hierfür gelten die gleichen Größen- und Parameterbezeichnungen und Einheiten.

Zur Abschätzung der Inaktivierungsrate wurden Untersuchungen zur Stabilität der Enzyme unter verschiedenen Bedingungen durchgeführt. Um hierbei einen möglichst großen Bereich unterschiedlicher Einflüsse abzudecken, wurden die Versuche in Fermenterschlamm durchgeföhrt. Dazu wurden Fermenterschlämme aus 38 Biogasanlagen mit einem Multienzymkomplex dotiert und die Aktivität der Cellulase als Leitenzym zu Beginn der Inkubation und nach 24 h gemessen. Die Inkubation wurde bei Raumtemperatur durchgeföhrt. Zugleich wurde die elektrische Leitfähigkeit der Fermenterschlämme als Indikator für den Ionengehalt gemessen. Dabei ist bekannt, dass die elektrische Leitfähigkeit maßgeblich durch den Gehalt an Ammonium und Hydrogencarbonat determiniert wird.

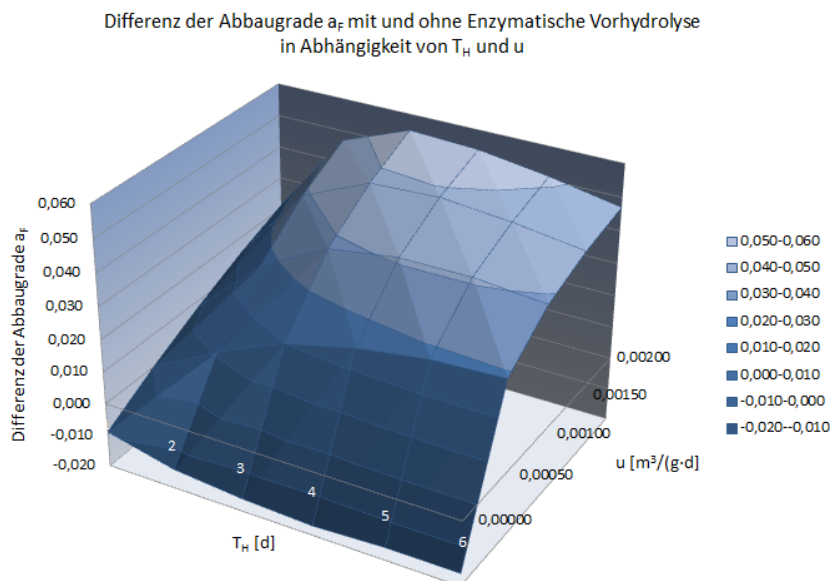


**Abbildung 23:** Relative Cellulase-Restaktivität nach 24 h Inkubation in Abhängigkeit von der Leitfähigkeit. [Bioreact]

Abbildung 23 zeigt, dass die relative Restaktivität der Cellulase nach 24 h Inkubation leicht negativ mit der elektrischen Leitfähigkeit korreliert. Unter Durchschnittsbedingungen bezüglich der Leitfähigkeit beträgt die mittlere Halbwertszeit mindestens 2 Tage. Deshalb wurde in der Modellanalyse mit dieser Halbwertszeit gerechnet.

Abbildung 24 zeigt die Differenz der Abbaugrade  $a_F$  des Inputmaterials im Fermenter ohne Enzymatische Vorhydrolyse (das heißt stattdessen mit Zugabe der Enzyme in den Fermenter) einerseits, und mit Enzymatischer Vorhydrolyse andererseits, in Abhängigkeit von der Verweilzeit in

der Hydrolysestufe  $T_H$  und der enzymabhängigen Aufschlussrate  $u$  in der Hydrolysestufe für folgende Parameterwerte:  $V_F = 2000 \text{ m}^3$ ,  $V_H = 60 \text{ m}^3$ ,  $\Delta V = 10\text{-}60 \text{ m}^3$  (variabel),  $t_F = t_H = 2 \text{ d}$ ,  $r = 0,02 \text{ 1/d}$ ,  $q = 0,017 \text{ 1/d}$ ,  $s = 0,00024 \text{ m}^3/(\text{g}\cdot\text{d})$  und  $u = 0\text{-}0,002 \text{ m}^3/(\text{g}\cdot\text{d})$  (variabel). Die Parameterwerte wurden so gewählt, dass bei einer Raumbelastung der Fermenterstufe in Höhe von  $4 \text{ kgoTS}/(\text{m}^3\cdot\text{d})$  und bei einer Verweilzeit in der Fermenterstufe von  $100 \text{ d}$  die Inputstoffe in der Fermenterstufe um  $66\%$  abgebaut werden und dass bei Zugabe von  $5 \text{ g}/\text{m}^3$  Enzymen pro  $\text{d}$  in die Fermenterstufe der Abbaugrad auf  $70\%$  (das heißt um  $6\%$ ) gesteigert wird.



**Abbildung 24:** Differenz der Abbaugrade  $a_F$  mit und ohne Enzymatische Vorhydrolyse in Abhängigkeit von  $T_H$  und  $u$ . [Bioreact]

Aus Abbildung 24 ist ersichtlich, dass bei den gewählten fixen Parameterwerten und innerhalb der untersuchten Wertebereiche für  $T_H$  und  $u$  durch die Enzymatische Vorhydrolyse in weiten Teilen eine zusätzliche Verbesserung des Abbaugrads erreicht werden kann (positive Differenz der Abbaugrade in Abbildung 24). Interessant ist, dass die erzielte Verbesserung bei niedrigen Werten für  $u$  mit steigender Verweilzeit in der Hydrolysestufe innerhalb des betrachteten Wertebereichs stetig zunimmt, bei hohen Werten für  $u$  aber ein Maximum der erzielten Verbesserung des Abbaugrads in Abhängigkeit von der Verweilzeit  $T_H$  existiert. Dabei beträgt die höchste erzielte Verbesserung des Abbaugrads  $5,5 \text{ \%-Punkte}$  im Vergleich zum Enzymeinsatz im Fermenter.

Grundsätzlich zeigt die Analyse des vereinfachten Verfahrensmodells, dass unter optimierten Bedingungen durch eine Enzymatische Vorhydrolyse im Vergleich zur Enzymzugabe in den Fermenter eine zusätzliche Verbesserung des Abbaugrades der Inputstoffe im Fermenter möglich ist.

#### 1.3.2.4 Mögliche Verfahrensrealisierungen in der Praxis

Für eine mögliche Realisierung des hier skizzierten Verfahrens einer vorwiegend Enzymatischen Vorhydrolyse in der Praxis kann in verfahrenstechnischer Hinsicht auf bestehende zweiphasige, anaerobe Vergärungsverfahren mit mikrobiologischer Vorhydrolyse aufgesetzt werden. Wie oben gesagt, ist das hier skizzierte Verfahren nicht als Alternative zur praktizierten mikrobiologischen Vorhydrolyse gedacht, sondern als Alternative zu technisch-physikalischen

Vorbehandlungsmethoden. Für eine künftige Schätzung der Investitions- und Betriebskosten können aber die Kosten der mikrobiologischen Vorhydrolyse als Basis dienen.

Mögliche verfahrenstechnische Aspekte und Besonderheiten des hier beschriebenen Verfahrens sollen im Folgenden skizziert werden:

Um die mikrobiologische Vorhydrolyse zu minimieren sollte der pH-Wert im Hydrolysebehälter auf maximal pH 4,0 eingestellt werden. Im Gegensatz dazu sind für eine mikrobiologische Vorhydrolyse aus eigener Erfahrung heraus pH-Werte zwischen pH 5,0 und pH 7,0 vorteilhaft. Ein pH-Wert von pH 4,0 fördert dagegen die enzymatische Hydrolyse in besonderem Maße und beschleunigt auch das Quellen der Inputstoffe. Da, anders als im Falle der mikrobiologischen Hydrolyse, keine pH-Absenkung durch die entstehenden Gärssäuren stattfindet, muss die pH-Einstellung durch dem Hydrolysebehälter zugesetzte Säuren erfolgen. Hierfür bietet sich Milchsäure an, die einen  $pK_s$ -Wert von 3,9 (bei 25°C) aufweist und deshalb den pH-Wert im Zielbereich stabilisiert. Bei Einsatz überwiegend von Silagen mit pH-Werten im Bereich pH 4,0-4,5 beschränkt sich die Zugabe zusätzlicher Milchsäure auf das für die Einstellung des pH-Werts von pH 4,0 noch notwendige Maß. Um keine in höheren pH-Bereichen puffernden Substanzen einzutragen und auch, um einen zusätzlichen Eintrag von Mikroorganismen zu vermeiden, sollte auf eine Zugabe von Gülle oder Rezirkulat in die Hydrolysestufe verzichtet werden.

Sauerstoffsäuren, die aus Gasreinigungsverfahren rückgewonnen werden könnten, kommen wegen ihrer korrosiven Wirkung nicht in Betracht.

Bezüglich der Einstellung des Trockenmassegehaltes in der Hydrolysestufe wird hier ein Ansatz vorgeschlagen, der auf eine Optimierung des Gehalts an freiem Wasser zielt. Dabei sollte der Gehalt an freiem Wasser so eingestellt werden, dass eine ausreichende Homogenisierung und Pumpbarkeit des Inhalts des Hydrolysebehälters gewährleistet ist und zugleich eine hinreichende Beweglichkeit der Enzyme innerhalb der freien wässrigen Phase. Die Einstellung des Trockenmassegehaltes könnte dabei durch die geregelte Zugabe von Wasser so erfolgen, dass zum Beispiel ein bestimmter Rühraufwand als Regelgröße verwendet wird, wenn zugleich die der Gehalt an freiem Wasser in der Hydrolysestufe als Funktion des Rühraufwands bekannt ist.

Unter diesen Bedingungen gelten die üblichen Konzentrationsmaße zur Beschreibung enzymatischer Reaktionen in wässrigen Lösungen nicht mehr. Vielmehr lassen sich die Substratkonzentration (als verfügbare Oberfläche) und die Enzymkonzentration besser auf das Volumen an freiem Wasser beziehen, in dem die Enzyme entlang der Substratoberfläche diffundieren. Unter derartigen Voraussetzungen stellen sich im Vorhydrolysebehälter im Vergleich zur Enzymzugabe in den Fermenter wesentlich höhere effektive Enzymkonzentrationen bezogen auf die Trockensubstanz des Substrats dann ein, wenn man die Dosierung der Enzyme in den Hydrolysebehälter so vornimmt, dass man diejenige Menge an Enzymen, wie man sie täglich in den Fermenter geben würde, dem Hydrolysebehälter zuführt. Vorteilhaft auf die stationäre Enzymkonzentration wirkt auch, dass der proteolytische Abbau der Enzyme durch bakterielle Proteasen, der Ammoniumgehalt und die Verweilzeit im Vergleich zum Fermenter wesentlich vermindert sind. Das für die Einstellung des Trockensubstanzgehaltes verwendete Wasser könnte aus der Biogastrocknung rückgewonnen werden.

Der Hydrolysebehälter sollte wie im Falle der mikrobiellen Hydrolyse für die kontinuierliche Betriebsweise mit einem leistungsstarken Rührwerk ausgerüstet werden. Gleiches gilt für die Pumpentechnik. Abbildung 25 zeigt zur Anschaulichkeit die Situation im Falle der mikrobiologischen

Vorhydrolyse. Es ist aber zu beachten, dass sich durch die minimierte Gasbildung bei der Enzymatischen Vorhydrolyse andere Reibungsverhältnisse einstellen werden.



**Abbildung 25:** Blick in die Hydrolysegrube einer Praxis-Biogasanlage mit zwei-phasiger Verfahrensführung. [Bioreact]

Für die mikrobielle Hydrolyse wird aus eigener Erfahrung eine Verweilzeit zwischen 2-4 Tagen als optimal angesehen. Auch die obige Modellanalyse ergab bei hohen enzymatischen Aufschlussraten eine optimale Verweilzeit im Hydrolysebehälter von 3 Tagen. Auch bezüglich der Auslegung der Behältergrößen kann man sich darum an den bisherigen Verhältnissen praxisbetriebener mikrobiologischer Verfahren orientieren.

### **1.3.3 Identifizierung weiterer technischer Optionen**

Neben der Erarbeitung eigener Optionen war das Ziel des Projektes auch die Einbindung der Ergebnisse aktueller FuE-Vorhaben, bzw. die Ermittlung bereits marktverfügbarer Technologien die für das Repowering verfügbar sind. Von der Gewitra wurde hierzu eine Umfassende Marktrecherche durchgeführt die u.a. auch auf einer Informationsabfrage bei relevanten Herstellern auf der Energy Decentral 2014 und dem Besuch auf der Biogas, einer Internationalen Jahrestagung und Fachmesse des Fachverband Biogas e.V. beruht.

Mögliche Repowering-Maßnahmen lassen sich in die drei Gebiete Biologie, Technik und Organisation einer Biogasanlage zuordnen.

**Tabelle 2:** Mögliche Repowering-Maßnahmen (verändert nach [20])

Gebiet des Repowering:	Mögliche Repowering-Maßnahme:
<b>Biologie</b>	Optimierung der Nährstoffversorgung
	Zugabe von Enzymen
	Zugabe von Bakterien
<b>Technik</b>	Optimierung/Nachrüstung der Zerkleinerungstechnik
	Optimierung/Nachrüstung der Rührwerkstechnik
	Optimierung/Nachrüstung der Abdeckung
	Optimierung/Erweiterung des BHKW
<b>System</b>	Biogasverwertung
	Wärmenutzung
	Vermarktung
	(Direktvermarktung, Flexibilitätsprämie,...)

Im Folgenden werden die gesammelten Praxisbeispiele, die zur Ableitung der Handlungsoptionen in genutzt werden erläutert und bewertet.

#### 1.3.4 Technische Repowering-Maßnahmen

Von einer besonders großen Vielfalt sind die *technischen Repowering-Maßnahmen*. Die Maßnahmen können generell der Optimierung oder der Nachrüstung zugeordnet werden. Unter Optimierung sind der Austausch von bestehenden Technologien durch gleichartige aber effizientere Technologien zu verstehen sowie auch bei eventuellen Defekt der Technik. Eine Nachrüstung hingegen liegt vor, wenn die gewählte Technologie erstmalig neu eingebaut wird.

Der Teilbereich „Versorgung der Biogasanlage“ beinhaltet die Substrataufbereitung die mit der Zerkleinerung einen ersten Ansatzpunkt für technologische Repowering-Maßnahmen bietet. Durch die Zerkleinerung wird die biologische Abbaubarkeit infolge von Zunahme der spezifischen Oberfläche des Substrates erhöht. Zudem wird die Förderbarkeit des Substratgemisches verbessert. Für Landwirtschaftliche Biogasanlagen bietet der *Biogrinder (RBG)* des Unternehmens BHS-Sonthofen GmbH eine passende Möglichkeit um die Effizienz der Anlage zu erhöhen. Der *Biogrinder (RBG)* eignet sich vor allen für pflanzliche Rohstoffe aber auch für Bioabfälle, Speiseabfälle und Schlachtabfälle, welche mittels Prall- und Scherkräften zerkleinert und zerkleinert werden. Durch die intensive mechanische Vorbehandlung können die Bakterien das organische Material wesentlich schneller abbauen und die Gasausbeute erhöht sich. Weiterhin werden die Förderbarkeit und die Homogenität des Substrates gesteigert. Nach einer Studie der Uni Hohenheim führte die mechanische Aufbereitung durch den *Biogrinder (RBG)* in einer Forschungsbiogasanlage zu einer Erhöhung der Gasausbeute um mehr als 40% [26]. In Abbildung 26 ist ein Anwendungsbeispiel vom *Biogrinder (RBG)* gezeigt, im ersten Bild ist unbehandelte Maissilage zu sehen ist und im zweiten Bild Maissilage nach der Behandlung mit dem *Biogrinder (RBG)*. Die Betrachtung der beiden Bilder zeigt, dass die Maissilage zunächst aus sehr groben und ungleichmäßigen Häcksel besteht. Nachdem Einsatz von den *Biogrinder (RBG)* hingegen lassen sich deutlich kleinere und homogenere Häcksel feststellen. Alles in allem wird die Wirtschaftlichkeit der Biogasanlage durch den Einsatz von den *Biogrinder (RBG)* zum einen aufgrund der höheren Gaserträge und der Energieeinsparungen (Rühr-,

Pumpaufwand,...) deutlich gesteigert [27]. Die Kosten für den Biogrinder (RBG) liegen, je nach Rotordurchmesser und Motorleistung, zwischen 40 000 und 60 000 € [27].



**Abbildung 26:** Anwendungsbeispiel des Biogrinder anhand von Maissilage [27]

Neben der Zerkleinerung bietet die Vorgrube zusammen mit den Fermenter ein weiteres Feld für technische Repowering-Maßnahmen einer Landwirtschaftlichen Biogasanlage. Die Vorgrube und der Fermenter verfolgen beide eine Homogenisierung des Substrates, wodurch den Bakterien eine möglichst gleichmäßige Substratzusammensetzung und ein konstantes Nährstoffangebot geboten werden kann. Aufgrund der so ermöglichten stabilen Nährstoffversorgung der Bakterien steigt die Prozessstabilität der Biogasbildung an. Zur Homogenisierung werden vorzugsweise verschiedene Rührwerktechniken eingesetzt, deren Einsatzdauer wegen der mechanischen und auch chemischen (pH-Wert, Korrosion,...) Belastungen begrenzt ist. Ein Austausch von kaputten Rührwerken, der Ersatz von noch intakten durch moderne und effizientere Techniken oder eine Nachrüstung von Rührwerkstechniken, stellen allesamt weitere technische Repowering-Maßnahmen dar.

Das Unternehmen Xylem bietet unter der Marke *Flygt* Pump- und Rührtechnik für Biogasanlagen an und ermöglicht mit diesen Konstruktionsmöglichkeiten für eine optimale Durchmischung des Fermenters oder auch der Vorgrube. Anhand eines Beispiels für eine mögliche Konstruktion für einen Fermenter, werden zwei verschiedene Baureihen der *Flygt* Rührwerke näher erläutert. Durch die Kombination der *Flygt* Rührwerke der Baureihe 4460 und dem Kompaktmixer der Baureihe 4600 lässt sich eine optimale Durchmischung des Fermenter erzielen. Hierbei wird durch die Rührwerke der Baureihe 4460 eine kontrollierte Durchmischung und Homogenität des Substrates sichergestellt und zusätzlich das Ausgasen erleichtert. Der gleichzeitige Einsatz der Kompaktmixer der Baureihe 4600 hingegen verhindert die Bildung von Schwimm- und Sinkschichten. Bei den Rührwerken der Baureihe 4460, handelt es sich um Tauchmotor-Rührwerke die mit zwei Propellerdurchmessern (1 400 mm und 2 500mm) und drei unterschiedlichen Motoren hergestellt werden können. Die Wahl des Propellerdurchmessers und Motors ist von der Geometrie (Form und Größe der Grundfläche) und dem Volumen des Fermenters, aber auch von der Beschaffenheit des eingesetzten Substrates abhängig. Wegen seines Profils besitzt der *Flygt Banana-Propeller* eine hervorragende Selbstreinigungswirkung, die Verstopfungen auch bei sehr faserigen Substraten vermeidet. Des Weiteren lässt sich durch die Verbindung von den großen Propellerdurchmessern und geringen Drehzahlen ein maximaler Schub für die Durchmischung bei einem geringen Stromverbrauch erzeugen. Die Konstruktionsweise des Rührwerkes ist sehr robust, wie die Betriebsstunden von bis zu 180 000 h (über 20 Jahre) bei Dauereinsatz zeigen. Zur Veranschaulichung der Profilform und des

gesamten Aufbaues der Flygt Rührwerke der Baureihe 4460 ist in Abbildung 27 das größere Rührwerk abgebildet.



**Abbildung 27:** Flygt Rührwerk der Baureihe 4460 (Propellerdurchmesser= 2 500 mm) (nach [28])

Der Propeller setzt sich aus zwei doppelt gekrümmten Blättern mit dünnem Querschnitt zusammen und bildet die Grundlage für den niedrigen Stromverbrauch und den verstopfungsfreien Betrieb. Zudem lässt sich das Rührwerk beim Einbau ganz individuell Ausrichten und Positionieren, so dass neben der Höhe auch die Richtung des vom Rührwerk erzeugten Schubes an die jeweilige Beckenform angepasst werden kann. Die Höhe der zweiten eingesetzten Rührwerke der Baureihe 4600 lässt sich sogar während des Betriebes verändern und vermeidet somit mögliche Schwimm- und Sinkschichten. Diese hätten Temperaturschichtungen oder auch eine ungleichmäßige Substratzusammensetzung zu Folge, womit die Prozessstabilität der Biogasbildung gefährdet ist. Beim Propeller handelt es sich um einen dreiflügeligen Schubpropeller, welcher eine turbulente Störung erzeugt. Das Rührwerk ist an eine Schienenvorrichtung angebracht und kann mit einer Zugvorrichtung in der Höhe verstellt werden. Insgesamt lässt er sich mit einer Schiffsschraube vergleichen, wie auch das Rührwerk der Baureihe 4600 in Abbildung 28 zeigt.



**Abbildung 28:** Flygt Rührwerk Baureihe 4600 (nach [28])

Je nach Volumengröße werden zwei Rührwerke der Baureihe 4460 und ein Rührwerk der Baureihe 4600 eingesetzt. Dabei werden die Rührwerke 4460 gegenüber voneinander installiert und das Rührwerk 4600 gegenüber der Substratzugabe [28].

Eine weitere technische Repowering-Maßnahme stellt die nachträgliche gasdichte Abdeckung des Gärrestlagers dar, welches bei moderneren Biogasanlagen (nach EEG 2012) meist durch den Nachgärer ersetzt wurde. Insbesondere bei älteren Bestandsanlagen, die vor dem EEG 2012 und der eingeführten 150 tägigen gasdichten Abdeckpflicht, errichtet wurden sind noch viele Gärrestlager offen und besitzen keine Abdeckung. Nach einer Betreiberumfrage des DBFZ aus dem Jahr 2013 sind 288 von 900 Biogasanlagen offen und somit potenzielle Kandidaten für diese Art des Repowerings [29]. Obwohl bei den offenen Gärrestlagern nicht anaerobe sondern aerobe Bedingungen herrschen, wird auch im Gärrestlager noch Biogas gebildet. Durch die Lagerung und den damit verbundenen Setzungen entstehen im unteren Bereich des Gärrestbeckens durchaus anaerobe Bedingungen und diese ermöglichen den Bakterien weiterhin die Bildung von Biogas, welches dann in die Atmosphäre gelangt. So geht zum einen Biogas als Brennstoff für das BHKW verloren und zum anderen kommt es zu Emissionen der klimaschädlichen Gasen CO<sub>2</sub> und CH<sub>4</sub>. Aber auch der Austausch oder die Erneuerung von bestehender Abdeckung am Fermenter, Nachgärer (jeweils Teilbereich zwei und drei Produktion von Biogas und Zwischenspeicherung von Biogas und Gärreste) und Gärrestlager, aufgrund von witterungsbedingtem Verschleiß und daraus resultierenden Gasleckagen lassen sich den technologische Repowering-Maßnahmen zuordnen.

Das Unternehmen MT-Energie GmbH stellt hierzu für offene Rundbehälter zwei verschiedene Konzepte zur Tragfolienabdeckung zu Verfügung. Die Funktionsweise der Tragfolienabdeckung gleicht der Funktionsweise der Tragluftdächer. Hierbei werden zum einen Tragfolienabdeckungen aus zwei kegelförmig übereinanderliegenden Folien angeboten, die ein rundliches Spitzdach mit einer Schräge von 30° ausbilden. Je nach Durchmesser des Fermenters, Nachgärers oder Gärrestlagers werden zur gasdichten Befestigung der Gasspeicherfolie und Wetterschutzfolie verschiedene Klemmschienen eingesetzt. Bis zu einem Durchmesser von d=24 m kommen 90° Klemmschienen und von d=24-34 m kommen 45° Klemmschienen zum Einsatz, dabei beschreiben die Gradzahlen die Öffnung der Klemmschienen. Mit einem Druckluft befüllten Klemmschlauch werden die Folien in der Klemmschiene gasdicht befestigt. Seit dem EEG 2012 wird durch die Einführung der Flexibilitätsprämie die zusätzlich zu Verfügung gestellte flexible Stromerzeugungsleistung mit 130 €/a\*kW gefördert. Aus diesem Grund hat MT-Energie die *N8-Speicher-Abdeckung* entwickelt, um den Anlagenbetreibern ein noch größeres Gasspeichervolumen zu ermöglichen und so die Stromerzeugung besser an die Nachfrage anpassen zu können. Die *N8-Speicher-Abdeckung* bildet anders als die üblichen Tragfolienabdeckungen eine Drittelkugel aus, dadurch ergibt sich ein deutlich größeres Gasspeichervolumen (siehe Tabelle 3).

**Tabelle 3:** Gegenüberstellung der Gasspeichervolumina bei herkömmlicher 30° Bauweise und N8 (Drittelkugelbauweise) (verändert nach MT-ENERGIE GMBH, 2013)

Innendurchmesser Behälter [m]:	Gasspeichervolumen bei 30° Tragluftabdeckung [m <sup>3</sup> ]:	Gasspeichervolumen bei N8-Speicher-Abdeckung [m <sup>3</sup> ]:
18	380	843
23	782	1733
30	1714	3800
34	2483	5506

Somit ermöglicht die N8-Speicher-Abdeckung dem Anlagenbetreiber während geringer Stromnachfrage (Nacht, Wochenende,...) das produzierte Biogas zu sammeln und flexibel bei hoher Stromnachfrage (Morgen, Mittagszeit,...) im BHKW zur Stromerzeugung zu nutzen. Die Abkürzung N8 im Produktnamen steht stellvertretend für Nacht und symbolisiert die Nachtspeichermöglichkeit. Das



größere Gasspeichervolumen erfordert eine stärkere Befestigung, welche durch die Power-Grip-Schiene erreicht wird. Die Power-Grip-Schiene erreicht Festigkeiten einer Flanschverbindung und benötigt keine Hilfsenergie, des Weiteren lässt sich die Power-Grip-Schiene trotzdem leicht öffnen und wieder verschließen.

Für die Aufspürung von eventuellen Gasleckage bietet das MT-Energie Serviceteam Untersuchungen mit einer leistungsstarken Esders-Gaskamera an, die auf Grundlage einer Spektralanalyse von elektromagnetischer Strahlung potenzielle Gaswolken aufgrund von Leckagen visualisiert [30]. Die elektromagnetische Strahlung wird von den Gasmolekülen teilweise reflektiert, wobei die Wellenlänge der reflektierten Strahlung hierbei von den Eigenschaften der Gasmoleküle abhängig ist. Durch eine Analyse der reflektierten Strahlung kann nach Vergleich mit der charakteristischen Wellenlänge von CH<sub>4</sub> ein möglicher Gasaustritt aus der Biogasanlage sichtbar gemacht werden. Generell lässt sich die Gaskamera mit einer Wärmebildkamera vergleichen und zeigt in Echtzeit die Gasaustritte aus möglichen Leckagen auf einen Monitor an. Die Leckagen werden dann im Falle von kleineren und wenigen geflickt oder falls mehrere und größere existieren wird die Abdeckung erneuert [30].

Der Teilbereich „Energiegewinnung und Gärrestnutzung“ ermöglicht besonders bei der Energiegewinnung technische Repowering-Maßnahmen. Bei den meisten landwirtschaftlichen Biogasanlagen wird hierzu das erzeugte Biogas in einem BHKW verbrannt, wobei elektrische Energie und Wärmeenergie gewonnen werden. Die Effizienz ist hierbei abhängig von den elektrischen und thermischen Wirkungsgraden des BHKW. Ein Ersatz des genutzten BHKW durch ein neues BHKW mit höheren Wirkungsgraden stellt eine mögliche Repowering-Maßnahme dar und ermöglicht bei gleichbleibender Energieerzeugung Substrateinsparungen, dies zeigt auch ein weiteres Rechenbeispiel in Tabelle 4 zusammengefasst, mit der bereits verwendeten fiktiven Biogasanlage. Im Falle einer Wirkungsgraderhöhung auf 40% (inklusive Generatorverluste und Übertragungsverluste) benötigt das BHKW weniger Biogas, um den bisherigen Stromertrag zu erzeugen. Da die Maissilage mit 36 €/t FM das teuerste Substrat der Anlage ist, wird die Menge der Maissilage (X) [t FM] durch lösen nachfolgenden Gleichung minimiert.

#### Bestimmung der minimalen Menge Maissilage [t FM]

$$3095551,4 \text{ kWh} = 0,4 \cdot 5 \frac{\text{kWh}}{\text{m}_n^3 \text{ Biogas}} \cdot \left( X \cdot 216,1 \frac{\text{m}_n^3 \text{ Biogas}}{\text{t FM}} + 406330 \text{ m}_n^3 \text{ Biogas} \right)$$

Die Lösung der Gleichung ergibt für die Maissilage folgende Menge:

$$X = 5282,03 \text{ t FM} .$$

**Tabelle 4:** Substrateinsparung nach Erhöhung des elektrischen Wirkungsgrades (inklusive Verluste) von 35,5% auf 40%

Substrat:	Bisherige Substratmenge [t FM/a]:	Substratmenge nach BHKW-Austausch [t FM/a]:
Maissilage (35% TM):	6500	5282,03
Grasssilage (35% TM):	1500	1500
Rindergülle mit Futterresten (10% TM):	2200	2200
Schweinegülle (6% TM):	1500	1500

**Biogaserträge [m<sup>3</sup><sub>n</sub>]:**

96,3% des KTBL Wertes:	1743973,7
Biogasertrag nach BHKW-Austausch:	1547776,7

**Stromertrag für 1 Jahr:**

96,3% des KTBL Wertes:	3095553,4
Biogasertrag nach BHKW-Austausch:	3095553,4

**Einsparung von 1.217,97 t Maissilage**

Annahme 1t FM Maissilage= 36€	<b><u>43.846,92 €</u></b>
-------------------------------	---------------------------

Insgesamt lassen sich durch den BHKW Austausch ca. 1218 t Maissilage und somit 43846,92 € Betriebskosten einsparen. Die Kosten für ein neues BHKW sind im Vergleich zu den bisherigen betrachteten Repowering-Maßnahmen sehr hoch. Das Unternehmen MTP BHKW Service GmbH vertreibt mit dem *Liebherr BHKW vom Typ BGW 500 G 9512* ein geeignetes BHKW für die Annahmen im Rechenbeispiel. Laut Herstellerangaben besitzt das BHKW eine installierte elektrische Leistung von 500 kW<sub>el</sub> und einen elektrischen Wirkungsgrad von 42,1%. Nach Abzug von den Generator- und Übertragungsverluste sowie der Berücksichtigung, dass die Angaben vom Hersteller meist unter Vollastbetrieb ermittelt worden sind, ist eine Kalkulation mit einem Wirkungsgrad von 40% durchaus plausibel. Die Kosten für das BHKW beginnen bei 333 200 € inklusive Mehrwertsteuer, wobei der Anlagenbetreiber die Mehrwertsteuer zurückerstattet bekommt. Der Nettopreis für das BHKW im passenden Container beläuft sich auf ca. 280 000 €, daraus resultiert eine Amortisationszeit von ungefähr sechseinhalb Jahre [31]. Bei einer Investition in ein neues BHKW sollte der Anlagenbetreiber deshalb immer die verbleibende Zeit mit Anspruch auf die EEG Einspeisevergütung und der damit erhöhten finanziellen Sicherheit im Hinterkopf haben.

Im Zuge einer möglichen Gasspeichererweiterung und dem Vorhaben der bedarfsgerechten Stromerzeugung kommt dem BHKW eine Schlüsselrolle zu. Die installierte elektrische Leistung muss erweitert werden, umso in der Lage zu sein, seine Leistung kurzfristig an den Bedarf anpassen zu können. Für einen Wechsel von 24 h Stunden Betrieb auf 12 h Betrieb pro Tag muss die installierte Leistung auf etwa das Doppelte erweitert werden [32]. Die Erweiterungen der BHKW Leistungen zur flexiblen Stromerzeugung stellen weitere technische Repowering-Maßnahmen dar.

### 1.3.5 Systemorientierte Repowering-Maßnahmen

Ein weiteres Gebiet der Repowering-Maßnahmen umfasst Grundsatzfragen des Anlagen-konzeptes und dem System Biogasanlage. Die möglichen systemorientierten Repowering-Maßnahmen kommen in der Regel nicht ohne technische Anpassungen aus. Zwischen dem Bereich der systemorientierten und technischen Repowering-Maßnahmen herrscht also meist eine enge Verbindung und Überschneidung.

Eine erste grundsätzliche Frage einer jeden Biogasanlage ist die Art und Weise, wie das erzeugte Biogas genutzt werden soll. In diesen Bereich dominiert die Biogasverwertung in BHKW, wo aus dem Biogas elektrische Energie und Wärmeenergie gewonnen wird. Infolge einer Biogasaufbereitung ergeben sich mit der Einspeisung in das Erdgasnetz oder auch die Nutzung als Fahrzeugtreibstoff weitere potenzielle Nutzungsweisen für Biogas.

Damit Biogas in das Erdgasnetz als sogenanntes *Biomethan* eingespeist werden kann muss das Biogas zunächst auf Erdgasqualität aufbereitet werden. Die Richtwerte für eine Biogaseinspeisung in das Erdgasnetz sind dem Regelwerk des Deutschen Verein des Gas- und Wasserfaches e.V. (DVGW) zu entnehmen, ausgewählte Richtwerte sind in Tabelle 5 zusammengefasst.

**Tabelle 5:** Ausgewählte Richtwerte für Biogaseinspeisung ins Erdgasnetz nach [33] und[34]

Nebel, Staub, Flüssigkeit, Ammoniak, Amine:	technisch frei
Gasbestandteil:	Richtwert:
maximaler Wassergehalt [mg/m <sup>3</sup> ]:	
MOP≤10 bar	200
MOP>10 bar	50
Methangehalt (CH <sub>4</sub> ) [Mol.-%]:	
L-Gas-Netz	90
H-Gas-Netz	95
Kohlenstoffdioxid (CO <sub>2</sub> ) [Mol.-%]:	
verbleibender Anteil	5-10
Sauerstoffgehalt (O <sub>2</sub> ) [Mol.-%]:	
MOP≥16 bar	0,001
MOP<16 bar	3
Schwefel (S) [mg/m <sup>3</sup> ]:	
Schwefelwasserstoff (H <sub>2</sub> S) und Kohlenstoffoxidsulfid (COS)	5

Bei den Richtwerten in der **Tabelle 5** werden anhand des maximal zulässigen Betriebsdrucks (MOP) [bar] und des oberen Wobbe-Index [MJ/m<sup>3</sup> bzw. kWh/m<sup>3</sup>] unterschiedliche Anforderungen gestellt. Generell wird zwischen dem L-Gas-Netz und dem H-Gas-Netz unterschieden. Die Unterscheidung dieser beiden geschieht durch den oberen Wobbe-Index<sup>1</sup>, hierbei liegt ein H-Gas bei einen  $W_{s,n}=45$  MJ/m<sup>3</sup> (12,5 kWh/m<sup>3</sup>) vor und ein L-Gas bei einen  $W_{s,n}=39,6$  MJ/m<sup>3</sup> (11 kWh/m<sup>3</sup>) (DVGW G 260:2013-03 (A)).

<sup>1</sup> „Der Wobbe-Index ist ein Kennwert für die Austauschbarkeit von Gasen hinsichtlich der Wärmebelastung der Gasgeräte. Der obere Wobbe-Index  $W_{s,n}$  ist der Quotient aus dem Brennwert  $H_{s,n}$  und der Quadratwurzel aus der relativen Dichte  $d_n$ .“ nach DVGW G 260:2013-03 (A)

Mit 35% ist die Aminwäsche, ein chemisches Absorptionsverfahren, das am weitesten verbreitete Biogasaufbereitungsverfahren, welches auch von der MT-BioMethan GmbH angeboten wird [35]. Hierbei wird das Rohbiogas zunächst getrocknet, um den Wasserdampfanteil im Gas zu senken und damit eine weitere Veredelung des Gases zu ermöglichen. Nach der Trocknung wird dem Biogas noch der vorhandene Schwefelwasserstoff entzogen. Dies geschieht in einem Aktivkohlefiltersystem, welches den Schwefelwasserstoff in elementaren Schwefel umwandelt und bindet. Das vorbehandelte Biogas wird nun drucklos mit einer Aminwaschlösung<sup>2</sup> in Kontakt gebracht, wobei das CO<sub>2</sub> von der Aminlösung aufgenommen wird (Absorption). Hingegen kann CH<sub>4</sub> nicht mit der Aminwaschlösung reagieren und verlässt das System als hochreines Biomethan. Zum Abschluss des Aufbereitungsverfahrens wird das Biomethan, bevor es in das Erdgasnetz gelangt, nochmals getrocknet und gekühlt [36]. Durch die verschiedenen Schritte der Aminwäsche werden die in der Tabelle 5 zusammengestellten Richtwerte erreicht. Der Wechsel zur Biogaseinspeisung in das Erdgasnetz ist mit einem hohen technischen Aufwand, aufgrund von Umrüstung und Anpassung der Technik, verbunden. Des Weiteren gibt es mehrere Repowering-Maßnahmen die mit geringerem Aufwand an Bestandsanlagen durchgeführt werden können. Aus diesen Gründen ist die Biomethanherzeugung insbesondere für geplante Biogasanlagen eine Option.

Nachdem die grundsätzliche Frage der Biogasverwertung beantwortet wurde, stellt sich für Biogasanlagen zur Energieerzeugung BHKW nutzen die Frage, wie die entstehende Wärmeenergie effizient genutzt werden kann. Zum einen kann ein Teil der Wärme zur Wärmeversorgung des Fermenters oder auch des Nachgärers genutzt werden. Auch die eventuell notwendige Hygenisierung kann durch einen weiteren Teil der Wärme unterstützt werden. Doch vor allen für Biogasanlagen in ländlichen Regionen (Siedlungen, Dörfer,...) oder im nahen Umfeld von Gebäuden mit hohem Wärmebedarf (Krankenhäuser, Schwimmbäder,...) bietet die Nahwärmeversorgung eine ökologische wie auch ökonomische Alternative. Die Realisierung von Nahwärmenetzen bedarf neben der Errichtung der Infrastruktur (Leitungen, Übergabestationen,...) insbesondere organisatorische Aufgaben. Hierzu zählt vor allem die Findung von genügend Wärmeabnehmern, dies ist meist mit einer Vielzahl von Gesprächen mit Kommunen, Anwohnern und Unternehmen verbunden, wobei teilweise durchaus Überzeugungsarbeit geleistet werden muss.

Der Wärmebedarf [kWh] pro Fläche [m<sup>2</sup>], die sogenannte Wärmebezugsdichte [kWh/m<sup>2</sup>], sollte für den Ausbau eines Nahwärmenetzes zwischen 50-70 kWh/m<sup>2</sup> liegen. Viele Biogasanlagenbetreiber schrecken der organisatorische Aufwand und die anfallenden Kosten zur Errichtung der benötigten Infrastruktur ab. Die anfallenden Kosten sind stark abhängig von den Eigenschaften des Versorgungsgebietes, hinsichtlich der Bodenbeschaffenheit und der bisherigen Erschließung. Bei mittleren Wärmenetzen liegen die Kosten für den Bau der Nahwärmeleitung zwischen 200 und 400 €/m [37].

Trotzdem sind Nahwärmenetze nach ausgiebiger Planung und Standortanalyse für Biogasanlagenbetreiber eine Möglichkeit, die auch bei Bestandsanlagen nachträglich errichtet werden kann, um die Effizienz der Biogasanlage zu steigern. Zudem wird den potenziellen Wärmeabnehmern durch Nahwärmenetze eine günstige Wärmebereitstellung, auch im Vergleich zu fossilen Energien, verbunden mit einer hohen Versorgungssicherheit geboten. Zuletzt bleibt noch die Frage der Vermarktungsstrategie der Biogasanlage zu klären. In diesem Bereich wurde durch die Novellierung des EEG 2012 und der Einführung der Direktvermarktung eine weitere Option für die Anlagenbetreiber geschaffen (EEG 2012, §§ 33 a-i). Die Direktvermarktung ist „die Veräußerung von

---

<sup>2</sup> „Amine, aus Ammoniak (NH<sub>3</sub>) durch Ersatz von einem, zwei oder drei Wasserstoffatomen entstandene Verbindungen.“ nach

*Strom aus erneuerbaren Energien oder aus Grubengas an Dritte, es sei denn, der Strom wird in unmittelbarer räumlicher Nähe zur Anlage verbraucht und nicht durch ein Netz geleitet.“ EEG 2014 § 5 Abs. 9*

Die erzeugte elektrische Energie wird bei der Direktvermarktung somit selbst vom Biogasanlagenbetreiber vermarktet und verkauft. Mittels der Einführung der Markt- und Flexibilitätsprämie (EEG 2012, § 33 g, § 33 i) und der Fortsetzung der Flexibilitätsprämie in Form von den Flexibilitätszuschlag (EEG 2014, § 53) ermöglicht die Direktvermarktung gegenüber der herkömmlichen Vermarktungsstrategie über Stromhändler potenzielle Mehreinnahmen [32]. Insgesamt stellt ein Wechsel hin zur Direktvermarktung aufgrund der möglichen Steigerung der Wirtschaftlichkeit der Biogasanlage eine weitere Repowering-Maßnahme dar.

### 1.3.6 Zusammenfassung der Repowering-Maßnahmen

Die bisher geschilderten Repowering-Maßnahmen sind bereits marktverfügbar, wie auch die jeweiligen Ausstellerbeispiele zeigen. In Tabelle 6 werden die Optionen für die Repowering-Maßnahmen mit Beispielen zusammengefasst dargestellt.

**Tabelle 6** Optionen möglicher Repowering-Maßnahmen

Gebiet des Repowering:	Mögliche Repowering-Maßnahme:	Beispiel:
<b>Biologie</b>	Optimierung der Nährstoffversorgung	Spurenelementdosierung
	Zugabe von Enzymen	Enzymzugabe
	Zugabe von Bakterien	Dosierung hydrolytisch arbeitender Bakterien
<b>Technik</b>	Optimierung/Nachrüstung der Zerkleinerungstechnik	Nachrüstung Zerkleinerungstechnik
	Optimierung und Nachrüstung der Rührwerkstechnik	Nachrüstung effizienter Rührwerke
	Optimierung/Nachrüstung der Abdeckungen	Vergrößerung des Gasspeichervolumens
	Optimierung/Erweiterung des BHKW	Ersatz des bestehenden BHKW - Wirkungsgradsteigerung
<b>System</b>	Biogasverwertung	Biogasaufbereitung

Die aufgezeigten Maßnahmen ermöglichen zwar Substrateinsparungen, wie auch die beiden Rechenbeispiele zeigen, stellen jedoch keine grundlegende konzeptionelle Änderung des Verfahrens dar. Eine wesentlich umfassendere Anpassung der Anlagen wird durch die Erschließung von neuen kostengünstigen Substratquellen erreicht. Im Projekt Repowering wurden aus diesem Grund auch die Möglichkeiten für die Nutzung von alternativen Substratformen in bestehenden NawaRo-Biogasanlagen analysiert.

### 1.3.7 Möglichkeit des Einsatzes alternativer Substrate am Beispiel der Pferdemistverwertung in bestehenden NawaRo-Biogasanlagen

Als separater Punkt bei der Betrachtung alternativer Substratformen für das Repowering wurde der Einsatz von Pferdemist betrachtet. Pferdemist nimmt eine Sonderstellung ein, da er zum einen über

ein relativ großen Mengenpotenzial verfügt, zum anderen aber auch ein klassischer landwirtschaftlicher Reststoff ist, der sich gut in die Substratversorgungskette landwirtschaftlicher Biogasanlagen integrieren lässt.

Die Möglichkeit der Verwendung von Pferdemist in Biogasanlagen wird bereits in der BiomasseV 2012 in der „Anlage 3 (zu § 2a Absatz 1 und 2) Einsatzstoffe der Einsatzstoffvergütungskategorie II und ihre Energieerträge“ erwähnt. Demnach liegt der Energieertrag von Pferdemist bei 35 CH<sub>4</sub> m<sup>3</sup>/t FM, dies kommt einem Biogasertrag von 112,5 m<sup>3</sup><sub>n</sub> Biogas/t FM gleich [38] [24]).

Nach dem EEG 2012 und 2014 wird der Einsatz von Pferdemist bis zu einer installierten elektrischen Leistung von 75 kW gefördert, wenn der Einsatz des Pferdemists mindestens 80% der eingesetzten Substratmasse ausmacht. Der Vergütungssatz betrug zunächst 25 ct/kWh für Anlagen die im Geltungsbereich des EEG 2012 fallen [39] bzw. beträgt 23,73 ct/kWh für Anlagen des Geltungsbereiches des EEG 2014 [40]. Hierbei verringert sich der Vergütungssatz des EEG 2012 jährlich zum 1. Januar um 2%, wobei die erste Verringerung am 1. Januar 2013 folgte (EEG 2012, §§ 20 Abs. 2 Nr. 5). Der Vergütungssatz des EEG 2014 hingegen sinkt ab dem Jahr 2016 jeweils zum 1. Januar, 1. April, 1. Juli und 1. Oktober eines Jahres um 0,5% bezogen auf den Vergütungssatz der vorangegangenen drei Monate (EEG 2014, §§ 28 Abs. 2).

Trotz der lukrativen Vergütungen macht der Pferdemist nach einer Betreiberumfrage (n=707) des DBFZ aus dem Jahr 2014 nur 0,2% des massebezogenen Substrateinsatzes aus [29]. Dabei besitzt der Pferdemist in Deutschland ein enormes Potenzial, dies zeigt auch eine Betrachtung des Pferdebestandes in Deutschland.

*Laut einer Pressemitteilung der Deutschen Reiterlichen Vereinigung e.V. (FN) vom 1. Mai 2014 leben in Deutschland ca. 1,2 Mio. Pferde und Ponys. Ein Pferd produziert zwischen 15 bis 45 kg Pferdemist pro Tag (OLDENBURG, 24.06.2014), so dass sich eine jährliche Mistmenge von ca. 6,6 bis 19,7 Mio. t FM allein für Deutschland ergibt. Aus dieser Mistmenge ließen sich 0,7 bis 2,2 Mrd. m<sup>3</sup><sub>n</sub> Biogas erzeugen. Insgesamt könnten so 3,4 bis 10,3 Mio. t FM Maissilage (35% TM, Biogasertrag 216,1 m<sup>3</sup><sub>n</sub> Biogas/t FM) ersetzt werden und eine Anbaufläche von 57 000 bis 256 000 ha anderswertig genutzt werden. Des Weiteren ist Pferdemist, im Vergleich zu den an Erntezeiten gebundenen NawaRo, ganzjährig verfügbar und aufgrund des steigenden Pferdebestandes sowie der zunehmenden Beliebtheit des Pferdesportes ist zudem eine Versorgungssicherheit gewährleistet. Die Zunahme des Pferdebestandes zeigt dessen Entwicklung, innerhalb der letzten 40 Jahre hat sich der Bestand vervierfacht [41], .*

Generell handelt es sich bei Pferdemist um eine inhomogene Masse bestehend aus Einstreu, Pferdekot, Pferdeurin und Futterrückstände. Aber auch Haltungsrückstände, wie Sand und Steine, sind im Pferdemist enthalten. Die Haltungsrückstände stellen für eine Biogasanlage Stoffe mit erheblichen Störstoffpotenzial dar.

Der Begriff Einstreu steht stellvertretend als Oberbegriff für saugfähiges Material, mit welchem der Boden der Pferdebox oder des Ruheplatz der Pferde eingestreut wird. Durch die Einstreu soll das Pferd zum einen warm, trocken und weich stehen bzw. liegen können. Zum anderen soll die Einstreu aber auch den Pferdeurin und den Pferdekot aufsaugen sowie binden. Im besten Fall wird zusätzlich die Geruchsemission der Pferdeausscheidungen gemindert [42]. Typische Einstreumaterialien sind Stroh, Holzspäne, Holz- und Strohpellets oder auch Granulate. Der Einsatz von Stroh dominiert den Einstreueinsatz, besonders bei der weitverbreiteten Boxenhaltung (Reit-, Sportpferde, Pferdehaltung in städtischen Ballungsräumen,...) kommt Stroh in verschiedenen Schnittlängen und Sorten zum Einsatz [43].

Die Pferdemitzzusammensetzung wird maßgeblich von der Art der Haltung, der Fütterung oder auch von der Häufigkeit des Ausmistens bestimmt. Bei einer Weidehaltung ist mit höheren Sand- und Steinanteilen, im Vergleich zu der Boxenhaltung, zurechnen. Dagegen weist die Boxenhaltung meist einen größeren Einstreuanteil auf. Die Häufigkeit des Ausmistens (täglich, wöchentlich oder monatlich) hat besonderen Einfluss auf den Anteil von Kot und Urin im Pferdemit. Eine beispielhafte Pferdemitzzusammensetzung für die Boxenhaltung zeigt Tabelle 7.

**Tabelle 7:** Beispielhafte Mengen von Bestandteilen bei Boxenhaltung (nach HABERLAND, 13.02.2013)

Inhaltsstoff:	Menge [kg/d · Pferd]:
Kot	15-25
Urin	3-10
Stroh	5-10
Gesamt	23-45

### 1.3.7.1 Probleme bei der Pferdemitnutzung in NawaRo-Biogasanlagen

Aus Tabelle 7 wird ersichtlich, dass die Zusammensetzung des Pferdemists sehr unterschiedliche Mengenverhältnisse aufweisen kann. Dadurch schwankt zum einen der Trockensubstanzgehalt des Pferdemists (20 bis 80%), gleichzeitig aber auch das Nährstoffangebot für die am Abbau beteiligten Bakterien [44]. Der schwankende Trockensubstanzgehalt beeinflusst die nötige Flüssigkeitszugabe während der Vorbehandlung des Pferdemists. Wie bei der Nutzung von Bioabfall in bestehenden NawaRo-Biogasanlagen muss aus dem Pferdemit zunächst ein flüssiges, pump- und rührfähiges Substratgemisch erzeugt werden. Eine schwankende Nährstoffversorgung der Bakterien verringert die Prozessstabilität der Biogasbildung.

Zwar enthält Pferdemit aus Boxenhaltung gegenüber der Weidehaltung deutlich weniger Störstoffe wie Sand oder Steine, trotzdem können sie aufgrund von Ausritten und Ausläufen in die Box eingetragen werden und so in den Mist gelangen. Für die eingesetzten Fördersysteme, Rühr- und Zerkleinerungstechniken bedeuten Steine und Sand hohe Beanspruchungen. Die erhöhten Beanspruchungen machen sich durch starken Verschleiß oder sogar Zerstörungen der Rührwerke oder Pumpen bemerkbar. Auch Ablagerungen können Folge von hohem Sand- und Steinanteil im Substratgemisch sein, wodurch die Rohrleitungsquerschnitte oder auch das Fermentervolumen eingeschränkt werden kann. Insgesamt kann es durch diese Einschränkungen zu Problemen in der Beschickung der Biogasanlage kommen, wodurch die Prozessstabilität der Anlage gefährdet wird. Damit ein flüssiges, rühr- und pumppfähiges Substratgemisch entsteht reicht es jedoch nicht aus, dass der Trockensubstanzgehalt des Pferdemists durch Zugabe von Flüssigkeit auf unter 15% verringert wird. Das Einstreumaterial, bei der Boxenhaltung überwiegend Stroh, beeinflusst die Förderbarkeit des Substratgemisches maßgeblich. Aufgrund seiner faserigen Eigenschaften neigt die Einstreu zur Ausbildung von Schwimmschichten im Fermenter, welche eine gleichmäßige Nährstoff- und Wärmeverteilung verhindern. Zugleich besteht eine Verstopfungsgefahr für die eingesetzte Förder-/Rührtechnik und es ist mit erhöhten Energieverbräuchen infolge von Mehrleistung für die Förderung/Durchmischung zurechnen. [44], [45], [46].

Hinzu kommt, dass Stroh und auch die anderen Einstreumaterialien (Holzspäne, Holzpellets, Granulat,...) wegen ihrer chemischen Zusammensetzung, die hohe Anteile an Cellulose, Hemicellulose und Lignin aufweist, meist schwer biologisch abbaubar sind. Die hohen Anteile an

Cellulose, Hemicellulose und Lignin sind typisch für Pflanzen, da aus diesen drei Stofffraktionen die pflanzlichen Zellwände bestehen und diese Stoffe somit das Stützgewebe der Pflanzen ausbilden [46], [45], [47]. Von den hydrolytischen Bakterien können sie jedoch nur langsam aufgespalten werden und so für die weiteren beteiligten Bakterien der Biogasbildung nutzbar gemacht werden. Auch in der Zusammensetzung des Pferdemists spiegelt sich der Einfluss des Einstreumaterials in Form von hohen Stoffanteilen der drei Stofffraktionen wieder. Demnach besteht Pferdemist zu 47% aus Cellulose, 27% aus Hemicellulose und 13% aus Lignin. Weitere Bestandteile des Pferdemists sind Proteine (9%), Fette (2%) sowie Stärke und lösliche Zucker (2%) [45], [46].

Unter Stroh werden in der Landwirtschaft alle trockenen Halme, Stängel und Blätter der ausgedroschenen Getreidearten, Hülsenfrüchte, Öl- und Faserpflanzen verstanden. Stroh steht stellvertretend als Oberbegriff für Erntenebenprodukte [48] [49]. Nach der BiomasseV 2012 „Anlage 3 (zu § 2a Absatz 1 und 2) Einsatzstoffe der Einsatzstoffvergütungskategorie II und ihr Energieertrag“ ist Stroh *„das halmgutartige Nebenernteprodukt von Getreide, Ölsaaten oder Körnerleguminosen, wenn das Hauptprodukt (Korn) nicht energetisch genutzt wird und das halmgutartige Nebenernteprodukt vom Korn separiert vorliegt.“*

Der Energieertrag von Stroh liegt nach BiomasseV 2012 bei  $161 \text{ CH}_4 \text{ m}^3_n/\text{t FM}$ , jedoch ist für eine Vergärung von Stroh ein erheblicher Aufbereitungsaufwand nötig. Lediglich 48% der organischen Trockensubstanz von Stroh sind ohne eine weitere Aufbereitung vergärbar, weitere ca. 35% lassen sich nur sehr schwer oder nicht vergären und rund 10% der organischen Trockensubstanz sind Asche. Besonders das Lignin, welches einen Anteil von 10 bis 15% ausmacht, lässt sich nur durch Pilze im aeroben Milieu abbauen und ist somit in der Biogasanlage nicht nutzbar. Durch eine mechanische Zerkleinerung oder eine verlängerte Verweilzeit im Fermenter lässt sich der schwer vergärbare Anteil jedoch deutlich verringern

Ein weiteres Problem für eine mögliche Strohvergärung stellt das Nährstoffangebot von Stroh dar. Hier lässt sich bei Stroh ein sehr weites C:N-Verhältnis von 80-100:1 feststellen, während der vier Phasen der Biogasbildung ist ein Verhältnis von 10-45:1 anzustreben. Während der Acetogenese und der Methanogenese sind weiterhin Spurenelemente (Mikronährstoffe) essenziell für die Biogasbildung, diese sind in Stroh nicht vorhanden. Für die Strohvergärung müssen diese Defizite im Nährstoffangebot durch Mitvergärung eines nährstoffreichen Kosubstrat (Gülle, Perkolat,...) oder durch die gezielte Zugabe von Spurenelementen ausgeglichen werden [47].

Insgesamt benötigt der Pferdemist eine Vorbehandlung bevor er in Biogasanlagen genutzt werden kann. Zu den Hauptaufgaben einer jeden Pferdemistvorbehandlung zählen die Störstoffabtrennung (Sand, Steine,...) und die Einstreuentfernung. Der Einstreuentfernung folgt im Optimalfall eine Aufbereitung, welche das Einstreumaterial zerkleinert und somit eine Nutzung der Einstreu ermöglicht.

Um eine Nutzung in bestehenden NawaRo-Biogasanlagen zu ermöglichen kommt, wie bei der Bioabfallaufbereitung, der Herstellung eines flüssigen, pump- und rührfähigen Substratgemischs die Schlüsselrolle der Vorbehandlung zu.



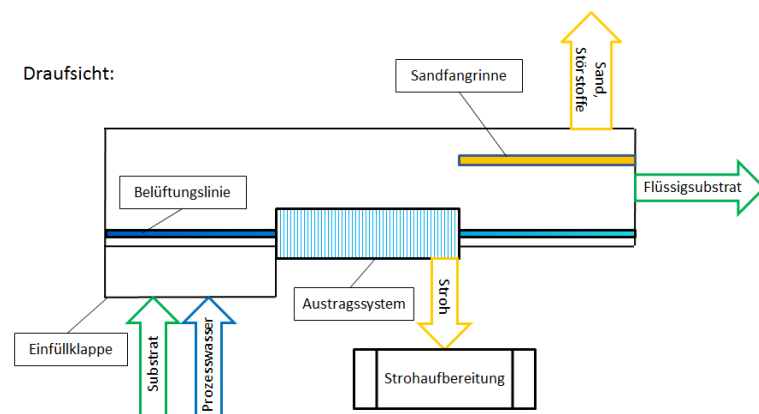
### 1.3.7.2 Mögliches Verfahren zur Pferdemist Vorbehandlung für die Nutzung in bestehenden NawaRo-Biogasanlagen

Eine Möglichkeit zur Pferdemistaufbereitung wird in der Patent Offenlegungsschrift „Nassvergärung von Pferdemist“ (DE 10 2013 101 401 A1 2014.08.12) beschrieben.

Bei dem Verfahren wird mittels eines innovativen Aufbereitungsaggregat der Pferdemist von den enthaltenden Störstoffen (Sand, Steine,...) und dem Einstreumaterial, vorzugsweise Stroh, befreit. Gleichzeitig wird aus dem Pferdekot eine für die Nassfermentation nutzbare rühr- und pumpfähige Mischung, bestehend aus gelösten Pferdekot und ein wässrigen Medium (Prozesswasser, Wasser,...), erzeugt. Je nach Anlagentyp kann ein Trockensubstanzgehalt von  $\leq 8-15\%$  eingestellt werden. Das Verfahren kommt ohne kostenintensive technische Anpassungen an der Biogasanlagentechnik aus und eignet sich für eine Vielzahl von bestehenden Biogasanlagen [44].

Erste positiven Tests mit diesem Verfahren werden in einer Biogasanlage in Itzehoe gemacht und für dieses Jahr ist der Bau einer weiteren Referenzanlage geplant. Die Bauvoranfrage wurde positiv beantwortet und das Unternehmen ARCHEA Biogas N.V. steht als Investor in den Startlöchern [44][50].

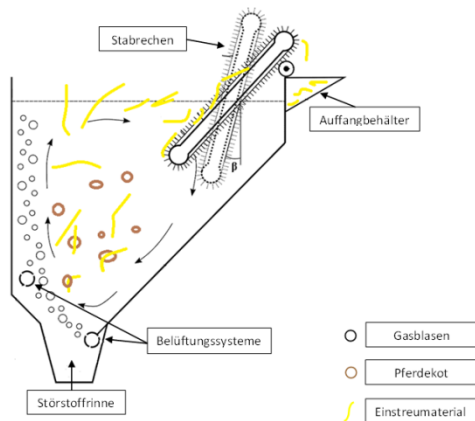
**Abbildung 29** Abbildung 29 zeigt eine Draufsicht auf das beckenförmige/beckenartigen Aufbereitungsaggregat und den Funktionsablauf der Pferdemistvorbehandlung. Generell lässt sich das Aufbereitungsaggregat und der Ablauf der Vorbehandlung in drei aufeinanderfolgende Abschnitte einteilen: 1. Zusammenführung des Pferdemists mit einem flüssigem Medium, 2. Austrag der Einstreumaterialien 3. Störstoffabtrennung. Zu Beginn der Vorbehandlung wird der Pferdemist mit einem wässrigen Medium, hier Prozesswasser aus der angeschlossenen Biogasanlage zusammengeführt. Mit Hilfe von einem integriertem Belüftungssystem, beispielsweise in Form von einer perforierten Rohrleitung, wird ein gasförmiges Medium (Druckluft,  $O_2$ ,...) in die aus der Zusammenführung entstandenen Mischung aus Pferdemist und Prozesswasser (Pferdemistmischung) eingeleitet.



**Abbildung 29:** Draufsicht auf das Aufbereitungsaggregat und Funktionsablauf der Vorbehandlung (verändert nach [44])

Durch den Gaseintrag über das Belüftungssystem und aufgrund des besonderen Beckenquerschnitts Abbildung 30 entsteht eine zirkulierende Strömung, wodurch die Pferdemistmischung umgewälzt wird. Der Querschnitt des Beckens verjüngt sich nach unten und bildet im unteren Bereich eine Rinne aus, in der sich im Laufe der Vorbehandlung die Störstoffe (Sand, Steine,...) ablagern. Die Umwälzung

der Pferdemitmischung ermöglicht eine Abtrennung des Strohs/ der Einstreu von dem Pferdekot und erleichtert zudem die Auflösung des Pferdekots. Das gelöste Stroh/Einstreumaterial gelangt durch die aufsteigenden Gasblasen an die Oberfläche der Pferdemitmischung. Im zweiten Abschnitt des Aufbereitungsaggregates wird das aufgetriebene Stroh/ Einstreumaterial mittels eines Rechens oder ähnlichen Abschöpfvorrichtungen abgeschöpft.



**Abbildung 30:** Querschnitt des Aufbereitungsaggregats (verändert nach [51])

In der Abbildung 30 dient ein Stabrechen mit umlaufenden Reinigungsharken als Abschöpfvorrichtung. Eine mögliche Konstruktion stellt eine auf Rollen umlaufende Matte, welche mit nach außen vorstehenden Stiften aus Metall, Kunststoff oder ähnlichen Materialien ausgestattet ist, dar. Dabei lässt sich der Eintauchwinkel ( $\beta$ ) des Stabrechens variieren, umso eine an die Strömung angepasste Position und gleichzeitig eine gute Abschöpfleistung zu erreichen. Das an die Oberfläche aufgestiegene Stroh/Einstreumaterial wird nun mittels der Stifte aus der Pferdemitmischung entfernt und aufgrund der umlaufenden Bewegung in einen Auffangbehälter befördert.

Zuletzt werden die noch in der Pferdemitmischung befindlichen Störstoffe abgetrennt. Dazu wird die höhere Dichte der Störstoffe im Vergleich zu den anderen Bestandteilen ausgenutzt (Schwerkraftabscheidung). Die Störstoffe sedimentieren in die vorgesehene Rinne und werden aus dieser mit der Zeit entnommen.

Der Trockensubstanzgehalt der Pferdemitmischung kann durch Zugabe von weiteren Prozesswassers an der verschiedenen Anforderung der bestehenden Biogasanlagen angepasst werden. Nach dem Durchlauf der drei Abschnitte des Aufbereitungsaggregat und der Einstellung des gewünschten Trockensubstanzgehaltes kann die entstandene flüssige, rühr- und pumpfähige Pferdemitmischung in den an das Aggregat angeschlossene Fermenter gefördert werden. Dort kann die Mischung ohne weitere Anpassungen an der vorhandenen Anlagentechnik energetisch genutzt werden [51].

### 1.3.7.3 Anpassungen zur Nutzung des abgetrennten Strohs

Um das gesamte energetische Potenzial des Pferdemitstes zu erschließen benötigt das Aufbereitungsaggregat eine technische Ergänzung zur mechanischen Zerkleinerung des Strohs. Hierzu eignen sich Zerkleinerungsaggregate, welche das in dem Auffangbehälter gesammelte Stroh mechanisch zerkleinern. Nach den Erfindern hat sich eine Zerkleinerung der Strohhalme auf  $\leq 10\text{mm}$  besonders bewährt [51].

Infolge der Zerkleinerung wird die Verstopfungsgefahr die vom Stroh ausgeht reduziert und somit ein Einsatz in den bestehenden Biogasanlagen ermöglicht ohne die eingesetzte Rühr- und Pumptechnik zu blockieren. Des Weiteren führt die Zerkleinerung zu einer Zunahme der spezifischen Oberfläche verbunden mit einer verbesserten biologischen Abbaubarkeit. Als Beispiel für ein Zerkleinerungsaggregat kann hier wiederum der *Biogrinder RBG* erwähnt werden.

Auf den Markt wird eine Vielzahl von weiteren Zerkleinerungsaggregaten angeboten, die je nach Trockenheit des Substrates eingesetzt werden können [52]. Für nasse Einstreumaterialien kann ein Lochscheibenzerkleinerer oder auch ein Dissolver eingesetzt werden, welche das nasse Material mittels rotierender Messerscheiben oder Messern zerkleinern. Die Zerkleinerung von trockeneren Material hingegen lässt sich eher durch Extruder, Prallreaktoren oder auch Mühlen (Hammer-, Rührwerkskugelmühlen,...) durchführen. Dabei wird bei den Extrudern das Einstreumaterial zwischen zwei oder mehreren gegenläufigen Schnecken aufgrund der entstehenden Druck- und Reibungskräfte zerkleinert. Zusätzlich wirken neben den mechanischen Belastungen noch thermische Belastungen in Form von unterschiedlichen Temperaturspitzen während des Vorgangs auf das Material ein [53]. Ein Beispiel für einen Prallreaktor bietet das Unternehmen MeWa Recycling Maschinen und Anlagenbau GmbH mit dem *Bio QZ*, wobei es sich um eine Querstromzersetzer (QZ) handelt. Anders als bei vielen Zerkleinerungsaggregaten wird beim *Bio QZ* das Substrat nicht durch Schneidwerkzeugen sondern mittels rotierenden Metallketten, die sich am Boden des Maschinenbehälters befinden, zerkleinert. Dabei nutzt der *Bio QZ* die Aufprallenergie der Ketten aus, indem das Substrat, welches sich zwischen den Ketten und Behälterboden befindet, wird zerfasert. Das Wirkungsprinzip des *Bio QZ* lässt sich mit einem Mörser vergleichen, wobei durch die Zerfaserung den Bakterien eine deutlich größere Angriffsfläche geboten wird [54]. Tabelle 8 fasst einige Zerkleinerungsmöglichkeiten aus der Praxis zusammen.

**Tabelle 8:** Zerkleinerungsmöglichkeiten und Praxisbeispiele für nasse bis trockene Substrate (verändert nach [52])

Substrat Eigenschaft:	Zerkleinerungsverfahren:	Praxisbeispiel:	Hersteller:
nass ↓ trocken	Lochscheibenzerkleinerer	RotaCut	Hugo Vogelsang Maschinenbau GmbH
	Dissolver	Kreisdissolver	EnviTec Biogas AG
	Extruder	Bioextrusion®	Lehmann Maschinenbau GmbH
	Prallreaktoren	Bio QZ	Mewa Recycling Maschinen und Anlagenbau GmbH
		Biogrinder RBG	BHS Sonthofen GmbH Vertrieb: MEBA Metallbau Bachmann

Das nach Durchlauf des Aufbereitungsaggregates abgetrennte Stroh ist eher trocken als nass, so dass insbesondere Extruder oder Prallreaktoren für die Strohzerkleinerung in Frage kommen. Bevor neue Zerkleinerungsaggregate angeschafft werden, sollte die vorhandene technische Ausstattung der Biogasanlage geprüft werden. Vorhandene Zerkleinerungsaggregate, die bisher zur Zerkleinerung der NawaRo genutzt werden, können eventuell auch zur Zerkleinerung von Stroh eingesetzt werden.

Das zerkleinerte Stroh kann nun entweder der Pferdemistmischung beigemischt werden und dann in den Fermenter der Biogasanlage gepumpt werden oder nach der Zerkleinerung separat, direkt in den Fermenter gefördert werden [51].

Aufgrund der neuen Substratzusammensetzung sollten regelmäßig Laboranalysen durchgeführt werden, damit überprüft werden kann, ob die Bakterien im Fermenter mit genügend Nährstoffen versorgt werden. Wegen des bereits erwähnten geringen Spurenelementgehaltes von Stroh, ist eine mangelnde Versorgung nicht auszuschließen. Die Spurenelemente dienen zur Ausbildung der für die Biogasbildung benötigten Enzyme, weiterhin sind die Spurenelemente wichtige Reaktionspartner und übernehmen wichtige Funktionen beim Elektronentransport.

Eine mögliche Maßnahmen gegen eine eventuelle mangelnde Versorgung vorzugehen bietet die gezielte Zugabe von Spurenelementen. Dieses Verfahren zählt zu den biologischen Repowering-Maßnahmen. Aber auch ein erhöhter Gülleeinsatz in der NawaRo-Biogasanlage kann, aufgrund der nährstoffreichen Gülle, den Mangel an Spurenelementen entgegenwirken.

Die Zusammensetzung von Stroh weist mit ca. 35% einen sehr hohen Anteil von schwer oder nicht vergärbaren Anteil auf. Aus diesem Grund könnte der Einsatz von Enzymen oder Bakterien zu einer weiteren Verbesserung der Strohvergärung führen. Der Einsatz von Enzymen würde insbesondere bei der Aufspaltung der Cellulose und Hemicellulose helfen, die in der Hydrolyse nur sehr langsam von den hydrolytischen Bakterien aufgespalten werden können. Die aus dem Reich der Pilze gewonnen Enzyme helfen bei dem Abbau der Makromoleküle und zersetzen diese zu einfachen und nutzbaren organischen Verbindungen (Zucker, Aminosäuren,...). Diese können dann im weiteren Prozessablauf der Biogasbildung von den beteiligten Bakteriengruppen zu Biogas umgewandelt werden.

Insgesamt kann Stroh aus der Abtrennung von Pferdemist und auch anfallendes Stroh, durchaus als Kosubstrat in bestehenden NawaRo-Biogasanlagen eingesetzt werden. Jedoch bedarf Stroh neben der mechanischen Zerkleinerung, eine ausreichende Nährstoffversorgung durch die Mitvergärung einer nährstoffreichen Flüssigkeit (Gülle, Prozesswasser,...) und eventuelle Zugaben von zusätzlichen Spurenelementen oder Hilfsmitteln (Enzyme, Bakterien,...). Wegen mangelnder Praxiserfahrung ist eine regelmäßige Überprüfung der Nährstoffzusammensetzung im Fermenter notwendig, um einen reibungslosen Prozessablauf aufrechtzuerhalten.

### 1.3.8 Möglichkeit der Verwertung von anfallenden Tierkadavern aus Tierseuchenbeseitigungsmaßnahmen in bestehenden NawaRo-Biogasanlagen

Ein in der BiogASForschung wenig behandeltes Thema stellt die energetische Verwertung von anfallenden Tierkadavern im Tierseuchenfall dar. Dabei müssen im Falle einer Tierseuche oft mehrere tausend Tonnen an Tierkadavern beseitigt werden.

Nach dem „Gesetz zur Vorbeugung vor und Bekämpfung von Tierseuchen“ [55] sind Tierseuchen nach § 2 Abs. 1 definiert als „*Infektion oder Krankheit, die von Tierseuchenerreger unmittelbar oder mittelbar verursacht wird, bei Tieren auftritt und auf a) Tiere oder b) Menschen (Zoonose) übertragen werden kann.*“ Das TierGesG ist als Gesetzesgrundlage für die Vorbeugung und Bekämpfung von Tierseuchen anzusehen und dient generell zur Erhaltung und Förderung der Gesundheit von Vieh und Fischen die der landwirtschaftlichen Erzeugung dienen (TierGesG, § 1). Zur Erfüllung des Ziels kann das Bundesministerium insgesamt 29 Vorschriften erlassen, die in § 6 *Ermächtigungen zur Vorbeugung vor und Bekämpfung von Tierseuchen* des TierGesG aufgezählt sind. Eine Vorschrift besagt hierbei das seuchenkranke oder verdächtige Tiere getötet werden müssen. Weiterhin müssen Tiere von denen eine Verschleppungsgefahr oder Ausbreitungsgefahr der Tierseuchenerreger ausgeht getötet werden und Tötungen sind im Falle der Beseitigung eines Infektionsherdes durchzuführen (TierGesG, § 6 Nr. 20).

Zuletzt sorgte in der zweiten Dezemberhälfte 2014 der Ausbruch von der hochpathogenen Aviären Influenza H5N8 (Geflügelpest) in den Landkreisen Cloppenburg und Emsland für Aufruhe. Bei den Bekämpfungsmaßnahmen wurden insgesamt ca. 130 000 Puten (bis zu 19 kg beim Ende der Mast), Hühnern (bis 1,5-1,8 kg beim Ende der Mast), Enten (bis zu 3 kg beim Ende der Mast) und Gänse (bis zu 5 bis 7 kg beim Ende der Mast) getötet [56], . Unter Annahme von einer gleichmäßigen Verteilung der Tierarten, würde sich so eine zu entsorgende Menge an Tierkadaver von ca. 1 000 t ergeben. Ein aktuelles Beispiel der weniger gefährlichen Form der Geflügelpest (Influenza-A-Subtyp H7) im Landkreis Cuxhaven vom 02. März 2015 veranschaulicht das mögliche Ausmaß der anfallenden Masse an Tierkadavern zusätzlich. Hier müssen ca. 23 400 Puten getötet werden, so dass 444,6 t Tierkadaver beseitigt werden müssen.

Als rechtliche Grundlage für die Beseitigung und Verwendung von Tierkadavern aus dem Tierseuchenfall ist die Verordnung (EG) Nr. 1069/2009 des Europäischen Parlaments und Rates anzusehen.

In der Verordnung werden die Tierkadaver aus Tierseuchenfällen dem Material der Kategorie 1 und 2 zugeordnet. Zum Material der Kategorie 1 zählen nach Art. 8 Abs. a) „*ganze Tierkörper und alle Körperteil, einschließlich Häute und Felle folgender Tiere: i) TSE-verdächtige Tiere [...] ii) Tiere, die im Rahmen von TSE-Tilgungsmaßnahmen getötet wurden.*“ Die Nutzung von TSE<sup>3</sup> infizierten Tierkörpern ist in Biogasanlagen nicht möglich und wird zum Beispiel durch Verbrennung beseitigt (Verordnung (EG) Nr. 1069/2009, Art. 12 Abs. a)). Hingegen kann das Material der Kategorie 2, wozu auch Tierkörper die zum Zweck der Tierseuchenbekämpfung getötet wurden gezählt werden, zu Biogas umgewandelt werden (Verordnung (EG) Nr. 1069/2009, Art. 9 Abs. f)). Bevor das Material der Kategorie 2 jedoch zu Biogas umgewandelt werden kann, muss es zunächst einer Drucksterilisation unterzogen werden und das zurückbleibende Material muss dauerhaft gekennzeichnet werden (Verordnung (EG) Nr. 1069/2009, Art. 13 Abs. e)). Für eine mögliche Nutzung von Tierkadavern aus

---

<sup>3</sup> „transmissible spongiforme Enzephalopathien (TSE)“: alle transmissiblen spongiformen Enzephalopathien gemäß Artikel 3 Absatz 1 Buchstabe a der Verordnung (EG) Nr. 999/2001“ Verordnung (EG) Nr. 1069/2009, Art. 3 Abs. 17

Tierseuchenfällen in Biogasanlagen muss gewährleistet sein, dass es sich bei dem zu sterilisierenden Material nur um Material der Kategorie 2 handelt.

Ein mögliches Verfahren zur Nutzung des bisher unbekanntes Potenzials, könnte die Herstellung von einem sterilisierten Fleischbrei aus Material der Kategorie 2 darstellen. Dieser könnte dann von bestehenden Verarbeitungsbetrieben zu Biogasanlagen transportiert werden und dort energetisch genutzt werden.

Die Anzahl der Verarbeitungsbetriebe gemäß Art. 24 Abs. 24 a der Verordnung (EG) Nr. 1069/2009 bei denen tierische Nebenprodukte durch Drucksterilisation behandelt werden können ist sehr gering. Laut einer Liste „Zugelassene und registrierte Betriebe für die tierische Nebenprodukte gemäß Artikel 23 und 24 der Verordnung (EG) Nr. 1069/2009“ des Bundesministeriums für Ernährung und Landwirtschaft waren im Februar 2015 lediglich sieben Verarbeitungsbetriebe in Deutschland zugelassen und registriert, in denen nur Material der Kategorie 2 verarbeitet wird. Hinzukommen vier weitere Anlagen in denen Material der Kategorie 1 und 2 verarbeitet werden kann und drei Betriebe in denen Material der Kategorien 1 bis 3 verarbeitet wird [57]. Der Großteil der anfallenden Tierkadaver wird momentan in Verbrennungs- und Mitverbrennungsanlagen durch Verbrennung beseitigt.

Aus rechtlicher Sicht ist eine Nutzung von Tierkadavern aus Tierseuchenfällen in Biogasanlagen generell gestattet, wenn die beschriebenen Vorschriften und Maßnahmen eingehalten werden. Allerdings besteht enormer Forschungsbedarf, um die benötigten Kapazitäten für die Herstellung eines nutzbaren Fleischbreis und dessen Verwendung in Biogasanlagen zu bestimmen. Bei der Bestimmung der Kapazitäten kommt der Wahrscheinlichkeit von Tierseuchen und der Analyse von früheren Tierseuchenausmaßen eine Schlüsselrolle zu. Durch eine ausführliche Analyse der benötigten Kapazitäten ließe sich zudem der logistische Aufwand für die Versorgung der Biogasanlagen besser abschätzen. Damit eine Kosten-Nutzen-Analyse durchgeführt werden kann, sind des Weiteren Laborversuche zum möglichen Biogasertrag von dem entstehenden Fleischbrei essentiell.

Die Entwicklungen in der Biogasforschung werden zeigen, ob die Verwertung von Tierkadaver aus Tierseuchenfällen wirtschaftlich sowie energetisch gesehen sinnvoll sein kann.

## 2 Monitoring des Anlagenbestands

### 2.1 Identifizierung geeigneter BGA

Das Projekt REPOWERING verfolgt den Ansatz die Möglichkeiten und Kosten des Repowering anhand von Modellanlagen zu evaluieren, die auf Basis realer Anlagendaten entwickelt werden. Als Datengrundlage wurden, neben der Auswertung des Bioreact Datensatzes die folgenden weiteren Datenquellen genutzt:

- Öffentlich verfügbare Daten aus den EEG Meldungen, veröffentlicht von der Deutschen Gesellschaft für Sonnenenergie e.V. (DGS) auf <http://www.energymap.info/>
- Anlagensteckbriefe des Biogasmessprogramms und des Biogasmessprogramms 2 veröffentlicht von der Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR) auf <http://www.fnr-server.de/cms35/fileadmin/biz/pdf/biogas/Messprogramm/> und [http://www.fnr-server.de/ftp/pdf/literatur/pdf\\_385-messprogramm\\_ii.html](http://www.fnr-server.de/ftp/pdf/literatur/pdf_385-messprogramm_ii.html)
- Anlagendaten aus Datensätzen von Fraunhofer UMSICHT
- Informationen aus den regelmäßigen Datenerhebungen des Deutschen Biomasseforschungszentrums (DBFZ)

### 2.2 Statistische Analysen des Bioreact Datensatzes

Der firmeneigene Datensatz von Bioreact wurde im Berichtszeitraum umfassend statistisch analysiert. Dies betraf unter anderem die Verteilung von:

- Herstellern von Biogasanlagen
- Installierter elektrischer Leistung
- Art des BHKW
- Anzahl an Behältern
- Raumbelastung
- Verweilzeit
- Substratausnutzung
- Inputstoffen
- biochemischen Parametern

und die Untersuchung von Korrelationen zwischen den verschiedenen Größen. Diese Untersuchungen bilden den Einordnungs- und Bewertungshintergrund der für die Arbeiten im Rahmen des Projekts ausgewählten Stichprobe von Biogasanlagen. Für eine aktualisierte Bestandsaufnahme der der Anlagendaten wurde ein Frage- und Berechnungsbogen für die Hand des Außendienstes der Bioreact GmbH erarbeitet. Dieser wurde durch einen Analyse katalog, der in Zusammenarbeit mit der Bonalytic GmbH entwickelt wurde, komplettiert.

## 2.3 Auswertung der Anlagendaten

Im Zuge der langjährigen Betreuung wurden die Leistungs- und Prozessdaten von über 2.000 Biogasanlagen durch die Bioreact-Spezialberater aufgenommen. Sie wurden anonymisiert und statistisch ausgewertet. Aus dieser, in Deutschland einzigartigen Datengrundlage können viele praxisrelevante Erkenntnisse gewonnen werden.

In Rahmen des Projekts REPOWERING wurde die Datenbank aktualisiert und die Daten von 1809 Biogasanlagen ausgewertet. Alle Anlagen werden mit nachwachsenden Rohstoffen betrieben. Von diesen Biogasanlagen liegen neben den Anlagendaten auch die kompletten Laboranalysen vor. Einzig zum Baujahr fehlte bei 147 BGAs die Angabe. Die Mittelwerte der verschiedenen Parameter dieser Biogasanlagen sind in der Tabelle 9 angegeben:

**Tabelle 9:** Mittelwerte der 1809 von Bioreact untersuchten Anlagen [Bioreact]

Anlagendaten	
Anlagenzahl (Kontrollgruppe)	1809
Fermentervolumen (m <sup>3</sup> )	1732
Nachgärervolumen (m <sup>3</sup> )	1828
Endlagervolumen (m <sup>3</sup> )	2740
kg oTS / m <sup>3</sup> / d (Fermenter)	4,50
Verweilzeit Fermenter	62,3
Gesamtverweilzeit	117
installierte elektrische Leistung (kW)	430
Auslastung BHKW (%)	90,2
Volllaststunden pro Jahr	7901
angegebener elektrischer Wirkungsgrad	38,37
Substratausnutzung (Erreicht / KTBL * 100)	97,85

### 2.3.1 Anlagenbaujahr, installierte elektrische Leistung und Anlagenaufbau

Die Mehrzahl der von Bioreact untersuchten Biogasanlagen ging in den Jahren 2004-2007 ans Netz. Im Jahr 2008 wurden aufgrund der Unsicherheit bezüglich der Novellierung des am 1.1.2009 in Kraft getretenen neuen EEGs zunächst weniger Anlagen gebaut. Dank der besseren Rahmenbedingungen stieg die Anzahl neuer Anlagen in den Jahren 2009 bis 2011 wieder deutlich an (siehe Abbildung 31).



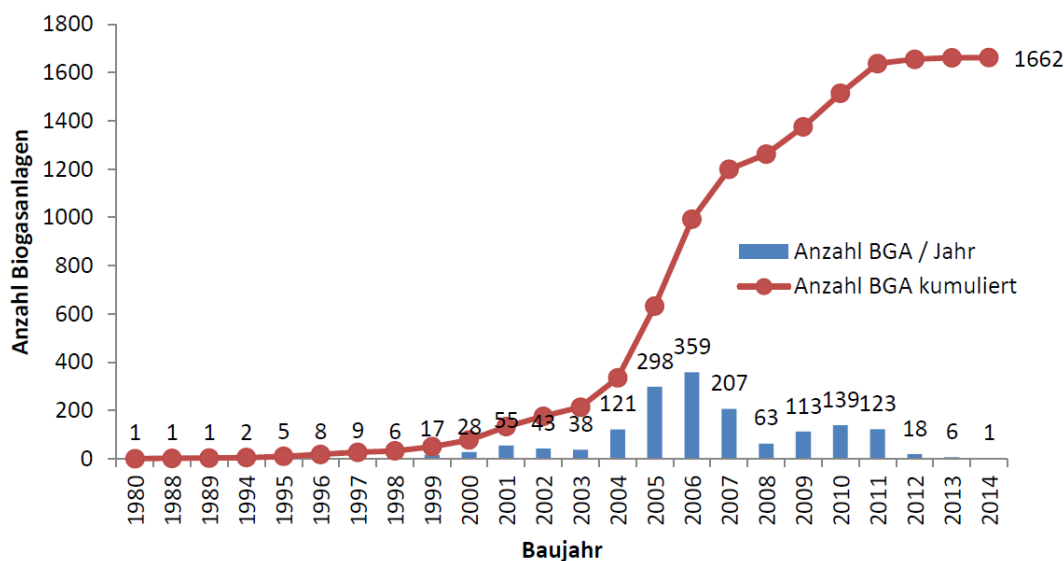


Abbildung 31: Anzahl der von Bioreact untersuchten Anlagen nach Baujahr [Bioreact]

Die durchschnittliche installierte Leistung der untersuchten Anlagen beträgt 430kW. BHKW mit einer Leistung von 200 bis 250kW sowie von 400 und 500 – 550kW sind besonders oft anzutreffen (Abbildung 32)

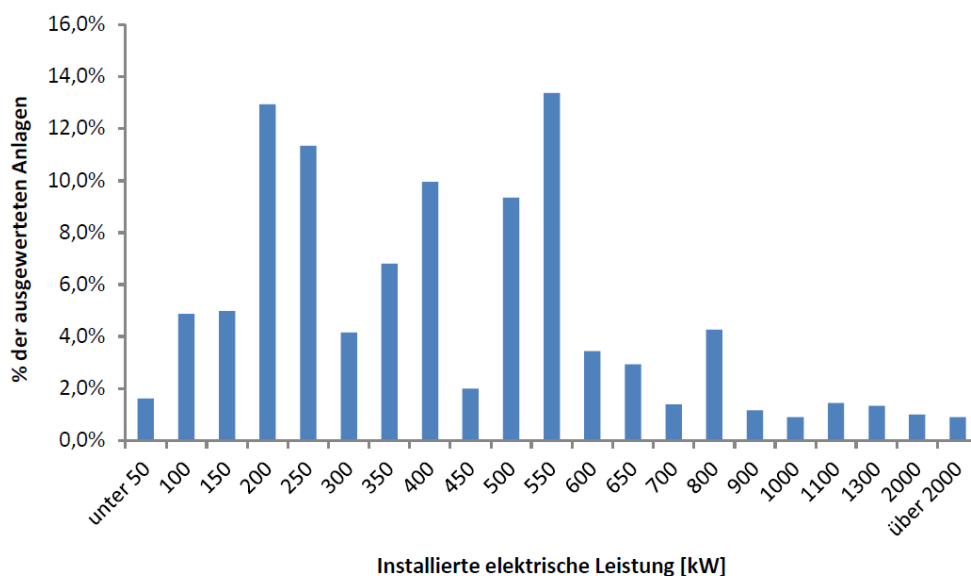
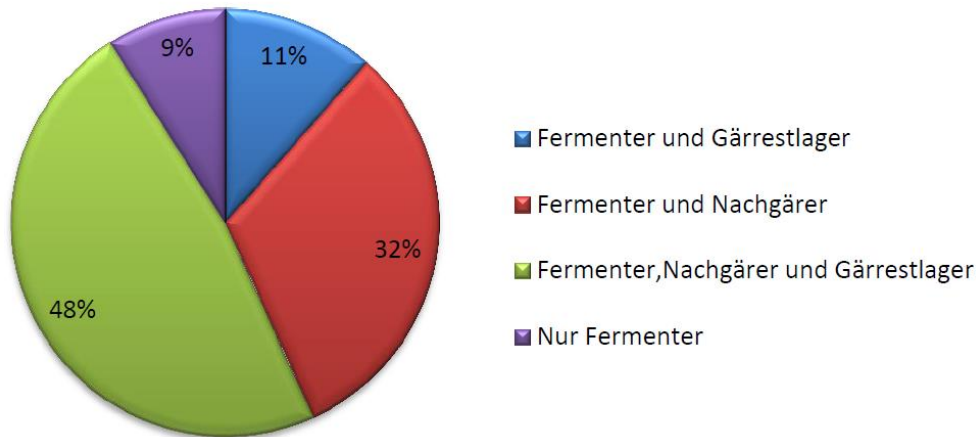


Abbildung 32: Verteilung der elektrischen BHKW-Leistungen in deutschen Biogasanlagen [Bioreact]

Betrachtet man die Anzahl und Art der vorhandenen Behälter in den untersuchten Biogasanlagen, so verfügen 9% der Biogasanlagen über einen Fermenter mit einem Durchschnittsvolumen von 1961 m<sup>3</sup> und ein offenes Gärrestlager. 31,7% der Anlagen bestehen aus einem Fermenter mit einem Durchschnittsvolumen von 1835 m<sup>3</sup> und einem Nachgärer (2133 m<sup>3</sup>) sowie einem offenem Gärrestlager. Knapp die Hälfte der untersuchten Biogasanlagen (48%), verfügen über Fermenter (1614 m<sup>3</sup>), Nachgärer (1626 m<sup>3</sup>) und einem abgedeckten und in den meisten Fällen gasdichten

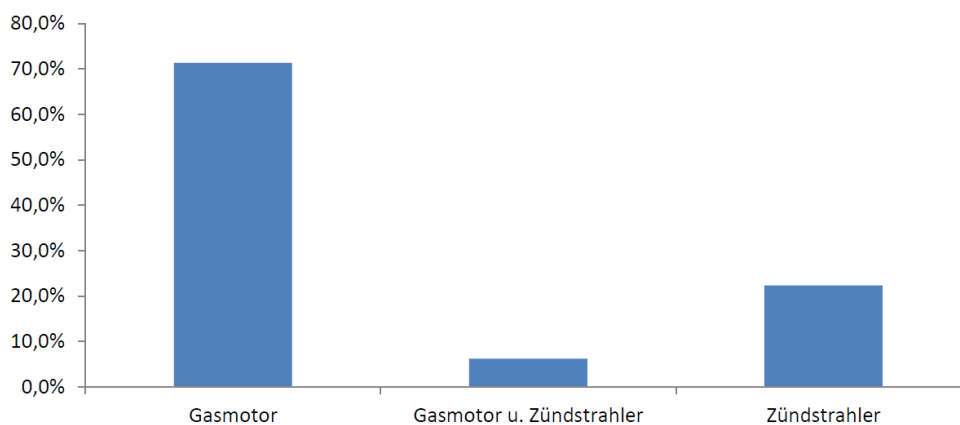
Gärrestlager (2684 m<sup>3</sup>). 11,5 % der Anlagen sind aus einem Fermenter (1760 m<sup>3</sup>) und einem abgedeckten und Gärrestlager (2684m<sup>3</sup>) gebaut worden.



**Abbildung 33:** Anteile der unterschiedlichen Biogasanlagen (Fermenter, Nachgärer, Gärrestlager) [Bioreact]

### 2.3.2 BHKW und Wirkungsgrad

Den Hauptanteil der Blockheizkraftwerke auf den von Bioreact untersuchten Anlagen machen mit 71,4% die Gasmotoren aus. Die durchschnittliche installierte Leistung bei einem durchschnittlichen Wirkungsgrad (WKG) von 38,1% dieser Motoren-Typen beträgt 448 kWel. 22,4% der Anlagenbetreiber nutzen zur Verstromung des Biogases Zündstrahlmotoren (durchschnittlich 380kWel, WKG 39,4%) und lediglich 6,2% der Betreiber nutzen sowohl Gas- als auch Zündstrahlmotoren (durchschnittlich 400kW; 37,6% WKG)



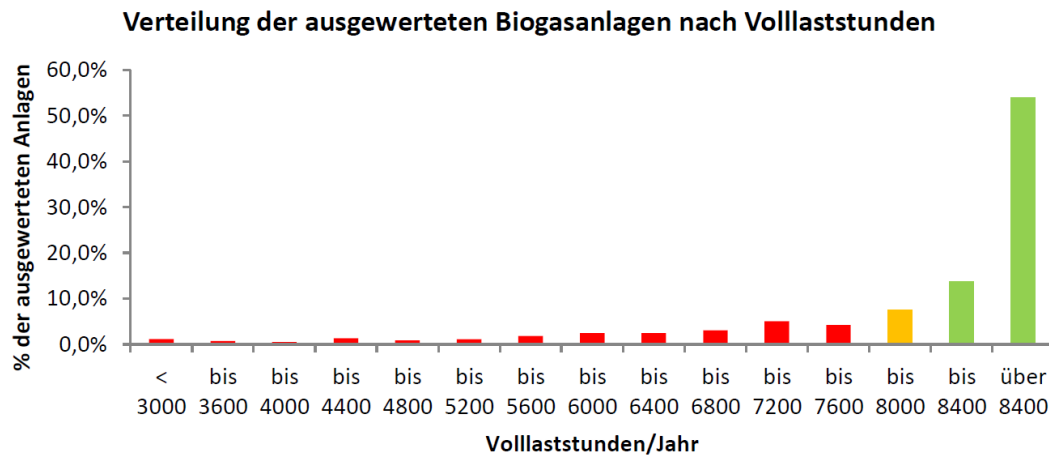
**Abbildung 34:** Verteilung der BHKW auf den Biogasanlagen [Bioreact]

### 2.3.3 BHKW-Auslastung und Substratausnutzung

Die Wirtschaftlichkeit von Biogasanlagen hängt maßgeblich von zwei variablen Faktoren ab. Zum einen von der Laufzeit des Blockheizkraftwerkes pro Jahr unter Höchstleistung (Volllaststunden), also

den real produzierten kWh, zum anderen von der optimalen Nutzung der zunehmend teurer werdenden Substrate ab.

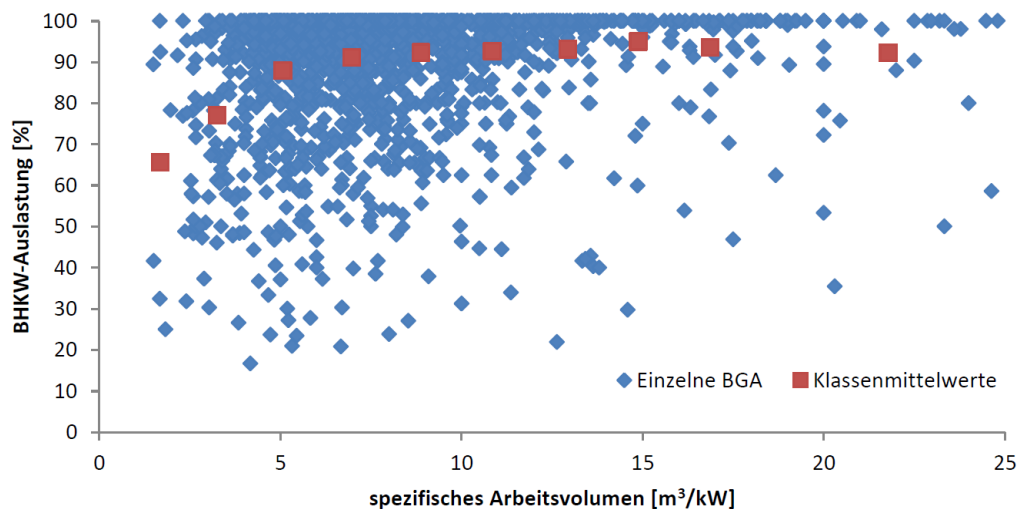
7901 Volllaststunden erreichten die ausgewerteten Biogasanlagen im Durchschnitt. Nur ca. 29,9 % der untersuchten Anlagen liegen unter dem Durchschnittswert. 68% aller Anlagen liegen pro Jahr bei über 8000 Volllaststunden (Abbildung 35)



**Abbildung 35:** Verteilung der Biogasanlagen nach Volllaststunden pro Jahr. Knapp ein Drittel der Anlagen sind schlechter als der Mittelwert von 7901 Volllaststunden und laufen im betriebswirtschaftlich gesehen gelben bis roten Bereich. [Bioreact]

### 2.3.4 Faulraumvolumen und installierte Leistung

Je größer das spezifische Arbeitsvolumen ist, also das zur Verfügung stehende Faulraumvolumen pro kW installierte elektrischer Leistung, umso besser werden die BHKW ausgelastet. Anlagen mit einem hohen spezifischen Faulraumvolumen (Quotienten aus Faulraumvolumen und installierter Leistung [ $\text{m}^3/\text{kW}$ ]) können auf längere VWZ und niedrigere Raumbelastungen vertrauen. Die Prozesse laufen so in der Regel stabiler und effizienter. Dabei gibt es - wie auch bei allen anderen Parametern – gute und schlechte Anlagen. Der generelle Zusammenhang wird erst deutlich, wenn Anlagen mit gleichen Quotienten zu „Klassen“ zusammengefasst werden und die Klassenmittel betrachtet werden. Anlagen mit Quotienten zwischen 2 und 8 laufen deutlich schlechter als Anlagen mit mehr Faulraum pro kW installierter Leistung



**Abbildung 36:** Das spezifische Arbeitsvolumen der von Bioreact untersuchten Anlagen in Beziehung zur BHKW-Auslastung. [Bioreact]

### 2.3.5 Substratausnutzung und Verweilzeit

Wieviel Biogas in den Substraten steckt, erfährt der Biogasanlagenbetreiber am besten von der KTBL, die in Ihren Heften Nr.50 und Nr. 88 Gaserträge aus den verschiedensten Einsatzstoffklassen veröffentlicht hat. Diese veröffentlichten Daten bilden die Realität der untersuchten Biogasanlagen sehr genau ab. Die relative Substratausnutzung, die im Folgenden mit den Parametern hydraulischer Verweilzeit und Raumbelastung in Beziehung gesetzt wird, wurde im rechnerischen Vergleich der auf der BGA erreichten Gasausbeute mit der standardmäßig möglichen (KTBL Heft 50 und Heft 88) – ermittelt. Eine entscheidende Bedeutung bei der Rückrechnung des Stromertrages hat dabei der angegebene Wirkungsgrad des BHKW.

In jedem Bereich gibt es Anlagen die schlechter laufen und eine Substratausnutzung unter 100% aufweisen und Anlagen die besser als vorausgesagt die Substrate ausnutzen. Hier steigt die Substratausnutzung in der Statistik auf über 100%, obwohl selbstverständlich nicht mehr Energie aus den Substraten kommen kann, als drin steckt.

Wie gut die dem Biogasanlagenbetreiber zur Verfügung stehenden Werte sind, wird dadurch deutlich, dass im Durchschnitt aller Biogasanlagen und über alle Substrate hinweg die KTBL/FNR-Vorhersage zu 97,85% erreicht wird (Abbildung 37). 47% der Anlagen liegen unterhalb des Mittelwertes. 51,5% der aller Anlagen liegen in einer Spanne +/-10% um den Mittelwert und 83% in einem Bereich +/- 20%.

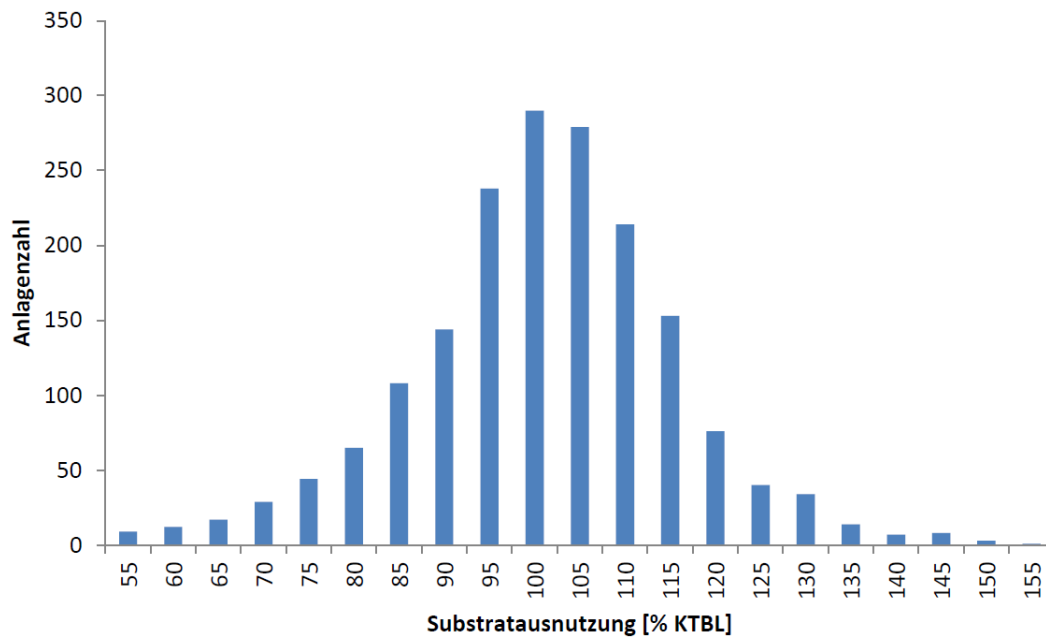


Abbildung 37: Verteilung der Substratausnutzung der von Bioreact untersuchten Biogasanlagen [Bioreact]

Eine gute Substratausnutzung ist abhängig von einer Vielzahl von Faktoren und prozessbiologischen Parametern, aber immer von der Verweilzeit und der Raumbelastung.

Zusätzliche hydraulische Verweilzeit in der Anlage bringt in der Tendenz eine verbesserte Substratausnutzung. In ihrer Summe bilden die für die unterschiedlichsten Substrate publizierten KTBL-Zahlen die Realität bestens ab. Die mittlere relative Substratausnutzung von zunächst 91,3 % bei Anlagen mit einer VWZ von 25 Tagen steigt kontinuierlich an. Ab einer mittleren hydraulischen Verweilzeit von ca. 185 Tagen und einer mittleren Substratausnutzung von 103% bringt eine weitere Verlängerung der hydraulischen Verweilzeit keinen weiteren Nutzen (Abbildung 38).

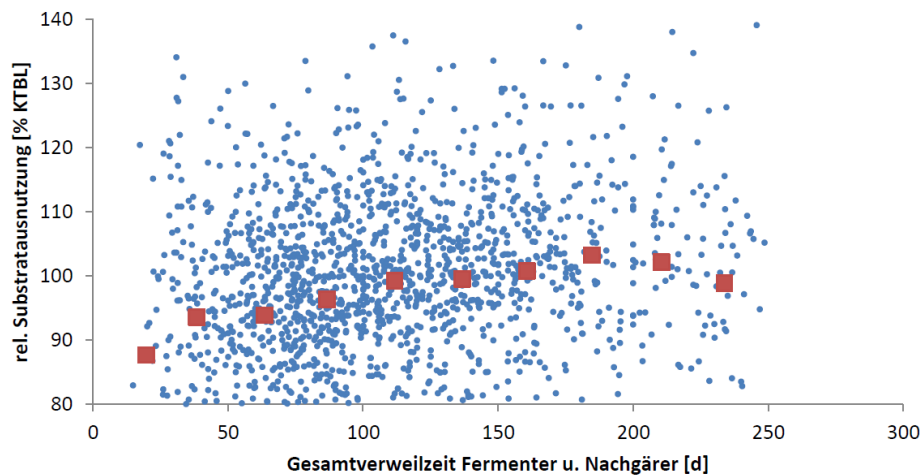


Abbildung 38: Beziehung zwischen der hydraulischen VWZ im beheizten Fermentationsvolumen (Fermenter + Nachgärer) und der zur KTBL relativen Substratausnutzung [Bioreact].

Ein weiterer gewichtiger Faktor der die relative Substratausnutzung beeinflusst ist die Raumbelastung. Mit steigender Raumbelastung des Fermenters geht die Substratausnutzung zurück. Aber auch hier, wie man an der Punktwolke sehen kann gibt es Anlagen mit guten und schlechten Substratausnutzungen im jeweiligen Raumbelastungsbereich. Anlagen die mit einer mittleren Raumbelastung von > 4,5 gefahren werden, nutzen ihre Substrate im Mittel ca. 5% schlechter aus als Anlagen mit einer Raumbelastung unter 1,7. (Abbildung 39)

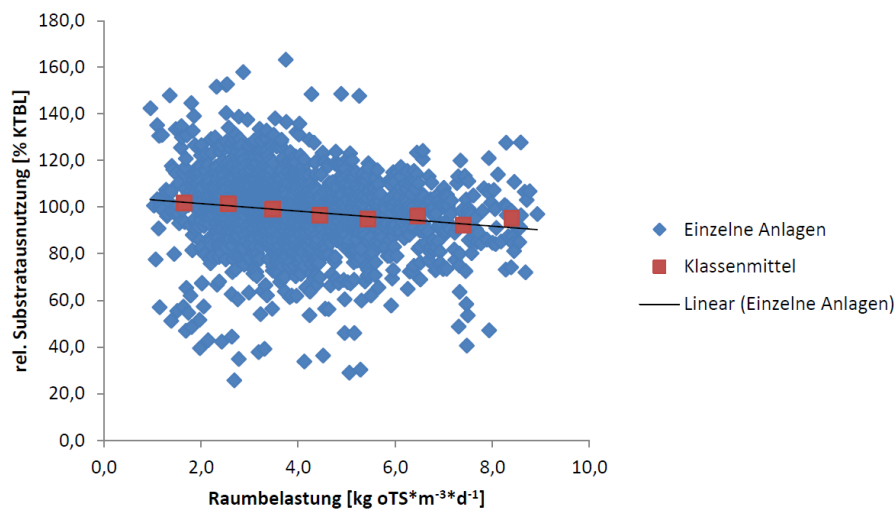


Abbildung 39: Beziehung zwischen Raumbelastung und relativer Substratausnutzung [Bioreact].

Anhand der Grafiken, kann man gut erkennen wenn man die Klassenmittelwerte betrachtet, dass die Substratausnutzung von der gesamten hydraulischen Verweilzeit und der Raumbelastung abhängig ist. Aber an den Punktwolken ist deutlich zu erkennen, dass es in jedem Bereich gute und schlechte Anlagen gibt. Eine kurze Verweilzeit und eine hohe Raumbelastung bedeuten nicht zwingend, dass die Anlagen ihre Substrate schlechter ausnutzen.

Mögliche Gründe für eine unterdurchschnittliche Anlagenleistung sind extrem divers. Sie können in technischen Defekten (verschlossene Rührwerke, Ausfall der Fütterung, Ausfall BHKW), Fehlauslegungen der Anlage, aber vor allem in biologischen Prozessstörungen (z.B. Spurenelementmangel, schlechter Hydrolyseleistung, Ammoniak-Hemmungen), von der Substratart und Qualität, aber auch am Substratmangel liegen. Auf die technischen Ursachen wurde innerhalb des AP 1 eingegangen, im Folgenden werden die prozessbiologischen Zusammenhänge eingehender betrachtet.

### 2.3.6 Substrate und deren Qualität

Neben ackerbaulichen, ernte und anlagenspezifischen Gesichtspunkten ist die Biogasausbeute eines der ausschlaggebendsten Kriterien bei der Substratwahl. Die potentiellen Biogaserträge der verwendeten Substrate können dabei zum Einen, bei Substraten wie Grassilage, Maissilage, CCM oder Getreide-GPS, auf Basis einer erweiterten Futterwertanalytik mittels NIR auf Nährstoffgehalte und Faserstrukturen wie NDF, ADF und ADL untersucht werden, aus denen dann rechnerisch das Biogaspotential ermittelt wird. Außerdem bekommt man über diese Analytik Informationen zur Verdaulichkeit und Qualität der Substrate. Die Trockensubstanz, vor allem bei Substraten wie

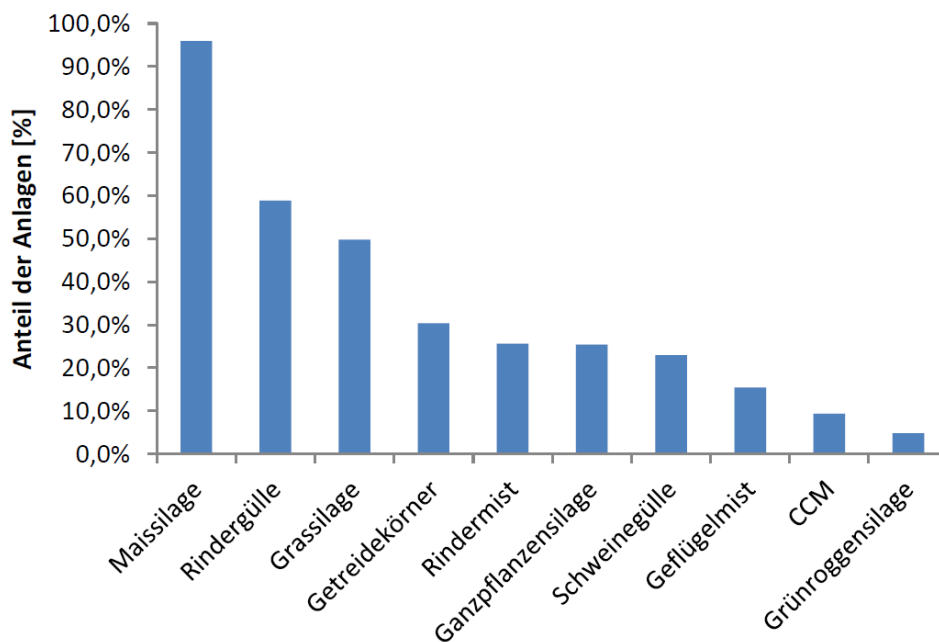
Grassilage oder Getreide-Ganzpflanzensilage, wird maßgeblich vom Schnittzeitpunkt und der Anwelkdauer beeinflusst wird. Ein zu später Erntezeitpunkt erhöht den Anteil der ADF und ADL-Fraktion in der Silage und macht sie daher schwerer verdaulich und mit steigendem ADL-Gehalt (Lignin-Anteil) sinkt das Biogaspotential. Umgekehrt bewirkt ein früher Schnittzeitpunkt eine bessere Verdaulichkeit. Mit steigender „Anwelkdauer“ erhöht sich der Trockensubstanzanteil solcher Silagen ohne die Verdaulichkeit zu beeinflussen. Um genauere Aussagen über die Qualität und das Biogaspotential der eingesetzten Substrate zu bekommen, ist daher eine regelmäßige Überprüfung mittels NIR-Futterwertanalytik zu empfehlen.

Praktisch bestimmt werden, kann das Biogaspotential von NawaRo-Substraten, Wirtschaftsdüngern, Abfällen, sowie das Restgaspotential von Gärresten über „Batch“-Gärversuche in Anlehnung an die VDI 4630.

Jede Bestimmung durch ein Labor, sei es wie oben genannt eine Futterwertanalytik oder die Bestimmungen von z.B. dem Spurenelementgehalt in der Gärflüssigkeit, kann nur so gut sein wie die Probennahme selbst. Wird die zu untersuchende Probe oder das Substrat verfälscht so, so zieht sich der Fehler durch die ganze Analytik und es kann zur falschen Bewertung des Zustandes der Anlage führen. Daher sollten Probenahmen immer nach einer akkreditierten Probenahmenvorschrift, bestenfalls durch einen akkreditierten Probenehmer erfolgen. So wird sichergestellt, dass die Proben immer auf die gleiche Weise gezogen werden und einer Verfälschung durch die Probenahme vorgebeugt wird.

Anbauziel für alle in der Biogasproduktion eingesetzten nachwachsenden Rohstoffe sind hohe Biomasseerträge bei gleichzeitiger guter Konservier- und Lagerfähigkeit sowie optimale Vergärbarkeit mit hohen Gasausbeuten. Mais erfüllt diese Kriterien nach wie vor am vollständigsten. Er kann, neben Zuckerrüben (22.000 kWh/ha), die höchsten Stromerträge je Hektar vorweisen (22.200 kWh/ha) [58]. Darüber hinaus besteht für Mais als langjährig etabliertes tierisches Futtermittel eine technisch ausgereifte Saat- und Erntelogistik, die vergleichsweise kostengünstig und in Deutschland flächendeckend verfügbar ist.

Aus diesen Gründen liegt Maissilage mit 95,9 % Einsatzhäufigkeit in Biogasanlagen nach wie vor annähernd konkurrenzlos an der Spitze, gefolgt von Grassilage (49,7 %) und Getreidekörner (30,4 %) und Getreide-GPS (25,4%) (Abbildung 40).



**Abbildung 40:** Nicht nur in den absoluten Mengen aller von Bioreact untersuchten Biogasanlagen dominiert die Maissilage. Die betreffenden Anlagen setzten davon im Mittel pro 100kW installierter elektrischer Leistung 3,27 t FM pro Tag ein. Anlagen die Grassilage und Ganzpflanzensilage nutzen, füttern im Mittel 1,28t bzw. 1,19t Frischmasse pro 100kw installierter Leistung [Bioreact].

Maissilage ist biologisch und technisch sehr gut handhabbar. Aufgrund der kurzen Häcksellängen lässt sie sich gut mit den gängigen Feststoffdosierern in den Fermenter einbringen oder mit Pumpen einspülen. Außerdem lässt sich das Substrat i.d.R. sehr gut einrühren. Die vergleichsweise kleinen Silage-Partikel besitzen dabei eine relativ große Oberfläche, was den Abbau durch die Bakterien erleichtert.

Sehr hohe Maisanteile in der Substratration, z.B. Mais-Mono-Fütterung (100 % Maissilage), führen in Biogasanlagen erfahrungsgemäß jedoch rasch zu einem Spurenelementmangel, da die Spurenelementgehalte in Mais für eine bedarfsdeckende Versorgung der stark zehrenden Methanbakterien nicht ausreichen. Spurenelementmangel senkt die Stoffwechselrate der Methanbakterien. Dies führt zu Säureanreicherung und in Folge zu einer Senkung der Methankonzentration im Biogas und Leistungseinbußen. Daher setzen diese Anlagen, optimaler Weise ein Spurenelementpräparat mit einer anlagenspezifischen Rezeptur von Bioreact ein, die gezielt fehlenden Spurenelemente ergänzt, einen nachhaltigen Abbau akkumulierter Säuren bewirkt und eine stabilen Prozess bei dauerhafter Anwendung gewährleistet. Durch die bedarfsgerechte Mischung werden Überdosierungen gezielt vermieden.

Mit steigenden TS-Gehalten der Silagen, und/oder gleichzeitig hohen Faulraumbelastungen kann es darüber hinaus sinnvoll sein, den Abbau der komplexen Pflanzenstruktur in der Hydrolyse durch hydrolytische pilzliche Enzyme zu unterstützen und zu beschleunigen. Aufgrund der Komplexität der Substrate, sollten hier speziell auf die Substrate zugeschnittene Multienzym-Präparate eingesetzt werden. Der Einsatz von Gras hingegen gilt bei vielen Betreibern nach wie vor als schwierig. Gras ist als Substrat in seiner Zusammensetzung und Beschaffenheit aufgrund unterschiedlicher Sortenwahl, jahreszeitlichen Schwankungen (Schnittzeitpunkt), Schnittlänge u.a. grundsätzlich sehr variabel [59] [60]. Verfahrenstechnisch stellt Gras höhere Anforderungen an Silier- und Anlagentechnik. Gras lässt



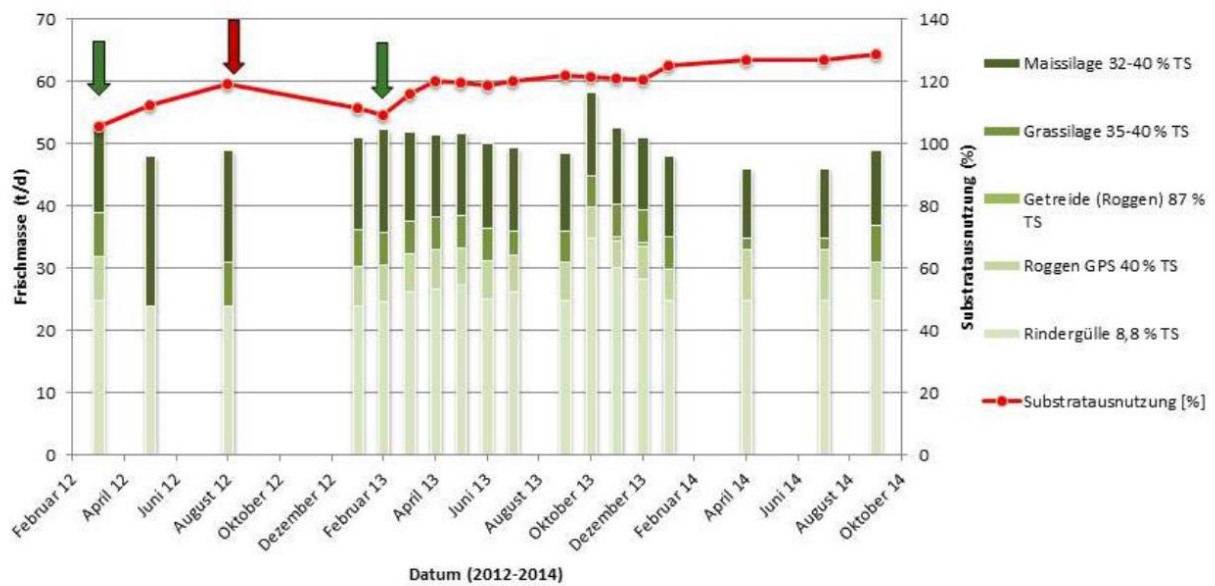
sich aufgrund seines geringeren Zuckergehaltes und höheren Anteils an Faserkohlenhydraten (Cellulose und Hemicellulose) schlechter silieren. Erdanhang und stabilisierende Siliziumeinlagerungen erhöhen Pumpen- und Rührwerksverschleiß.

Der verhältnismäßig hohe Stickstoffgehalt in Gras, insbesondere des ersten Schnittes, erhöht den  $\text{NH}_4^+$ -N-Gehalt sowie den pH-Wert in der Gärflüssigkeit. In Kombination mit der Temperatur kann dies oft in Kombination mit anderen proteinhaltigen Substraten und stickstoffreichen Wirtschaftsdüngern wie z.B. Geflügelmist eine Ammoniakhemmung hervorrufen. Gegenmaßnahmen können eine Temperaturabsenkung, Senkung der Stickstoffzufuhr oder die Zugabe eines Ammoniumbinders ein. Gras benötigt aufgrund seiner Struktur längere Abbauzeiten als z.B. Mais und blockiert so durch die längere Verweildauer kostenintensiven Faulraum. Darüber hinaus kann die Vergärung von Gras die Viskosität (Zähflüssigkeit) im Fermenter erhöhen und zu Verstopfungen sowie Sink- und Schwimmschichten führen. Hier sollte eine Enzymmischung eingesetzt werden, die speziell auf hohe TS-Gehalte im Fermenter und eine faserbedingt hohe Viskosität ausgelegt ist. Die Hydrolyse wird beschleunigt und der Fermenterinhalt wird fließfähiger und besser rühr- und pumpfähig. So können auch hohe Rationen faserlastiger Substrate gut vergoren werden. Bioreact hat dazu auf Grundlage jahrelanger Erfahrung und Forschung eine Enzymbaustein-System mit Substrat- und funktionsangepassten Enzymprodukten entwickelt, die je nach herrschender oder zukünftiger Substratsituation miteinander kombiniert werden können (Abbildung 41).

		Inputstoff		Funktion		
		BV MAIS PLUS	BV GRAS PLUS	VISKO-F	VISKO-S	SL
Funktion	Starter			●	●	
	Maissilage	●				
	Grassilage		●			
Inputstoff	Getreide GPS		●			
	Maissilage Grassilage Getreide GPS	●	●			
	Grünroggen		●		●	
	Festmist		●	●		
	Rübensilage				●	
	Faser-Viskosität			●		
Funktion	Schleim-Viskosität				●	
	Gemischte Viskosität			●	●	
	Schwimmschichten					●
	Sinkschichten			●	●	

**Abbildung 41:** Bioreact – Bausteinsystem zum Enzymeinsatz. Die Bioreact – ENZYMPRODUKTE können der bestehenden Fütterungssituation angepasst werden [Bioreact].

Wie Bioreact Enzyme sich auf die Wirtschaftlichkeit von Biogasanlagen auswirkt zeigt folgendes Praxisbeispiel: Zum Zeitpunkt des ersten Enzymeinsatzes hatte die 600kW-Biogasanlage eine Substratausnutzung von 106%, bei 91 Tagen hydraulischen Verweilzeit und einer Raumbelastung von 3,75. Die Grafik zeigt deutlich die kontinuierliche Verbesserung der Substratausnutzung nach Einsatz der Enzyme (siehe Abbildung 42). Nach den anfänglichen 106 % liegt sie inzwischen seit Februar 2014 bei stabilen 127 % bei durchweg niedriger Viskosität. Obwohl die 600 kW-Anlage mit fast 50 % Gras und Getreide-GPS gefahren wurde, sind Rühr- oder Pumpprobleme kein Thema. Zirka 2 Tonnen Maissilage und 2 Tonnen Getreide-GPS/Grassilage werden weniger gefüttert als vor dem ersten Einsatz der Enzyme. Außerdem sind für die Anlage größere Futterumstellungen kein Problem mehr.



**Abbildung 42:** Darstellung der Inputstoffe und -mengen (t FM/d) sowie Substratausnutzung (%). Wechselnde TS- und Biogasertragswerte sind auf Grundlage von Futterwertuntersuchungen (NIR) in die Berechnung der Substratausnutzung (SA) einbezogen. SA berechnet in Relation zu Standardgaserträgen (KTBL, Lfl). BHKW-Auslastung/Mittel: 98,5 %. Grüne Pfeile: Beginn Einsatz BIOREACT-Enzyme, roter Pfeil: Zugabe der Enzyme zeitweilig ausgesetzt [Bioreact].

### 2.3.7 Substratkonservierung und Lagerung

Eine der Grundlagen für den wirtschaftlichen Betrieb einer Biogasanlage ist die optimale Methanausbeute pro Hektar eingesetzter Ackerfläche. Ziel der Substratkonservierung muss es aus diesem Grunde sein den pflanzlichen Energiegehalt weitgehend zu erhalten und vermeidbare Verluste zu minimieren [61].

Daher sollten die folgenden Silierregeln beachtet werden:

#### Optimalen Ernte-/Schnittzeitpunkt wählen

Die Wahl des richtigen Ernte- bzw. Schnittzeitpunkts (z.B. Beginn des Rispen- oder Ährenschiebens, bzw. zwischen Teig- und Wachsreife) ist ausschlaggebend für einen optimalen Trockenmassegehalt (zwischen 28-35 % bei Mais, 30-40 % bei Gras), hohe Energiegehalte und eine gute Vergärbarkeit der Silagen. Je später der Schnittzeitpunkt, desto niedriger liegt der Zuckergehalt und desto höher steigen die Anteile an schwer verdaubaren Faserkohlenhydraten (Cellulose und Hemicellulose) sowie der unvergärbare Ligninanteil (Verholzungen). Werden Substrate jedoch zu früh geerntet oder welken sie ungenügend an, sind sie häufig zu nass (< 30 % TS). Dies fördert Lagerverluste durch Fehlgärungen und ein hoher Energieanteil geht in Form von Sickersaft verloren. Optimal angelwelktes Erntegut hingegen (ca. 30-40 % TS) bietet Milchsäurebakterien gute Milieubedingungen und erhöht die Silagequalität und deren Stabilität gegenüber Nacherwärmung bei Entnahme.

Um Verholzungen zu vermeiden, muss bei Getreide-GPS aufgrund des engen Erntefensters besonders auf den richtigen Erntezeitpunkt geachtet werden.

### **Erntetechnik optimieren**

Durchschnittlich entstehen rund 5 % unvermeidbare Feldverluste durch mechanische Bearbeitung, Erntegutaufnahme (z.B. Pick-up) sowie bei Übergabe und Transport.

Vermeidbare Feldverluste lassen sich durch optimale Einstellung der Erntetechnik, geringe Feldliegezeiten, direkte Schwadzusammenführung durch einen Mähaufbereiter und den optimalen Erntezeitpunkt verringern.

Verschmutzungen des Erntegutes (Steine, Erde, Tierkadaver u.Ä.) beispielsweise führen zu einem erhöhten Eintrag an unerwünschten Buttersäurebakterien und Clostridien und erhöhen die Gefahr von Fehlgärungen im Silostock.

Vorbeugen lässt sich mit nicht zu tief gewählten Schnitt- und Schwadtiefen (ca. 6-7 cm bei Gras). Dies wirkt sich zwar leicht negativ auf den Flächenertrag aus, jedoch umso positiver auf die spätere Silagequalität und den nächsten Aufwuchs.

Um Transportverluste zu verringern, sollte Überladung vermieden und eine Abdeckung verwendet werden.

### **Sachgerecht konservieren**

Siliergut sollte beim Häckseln gut zerkleinert, anschließend zügig einsiliert, kräftig verdichtet und zeitnah, sorgfältig abgedeckt werden.

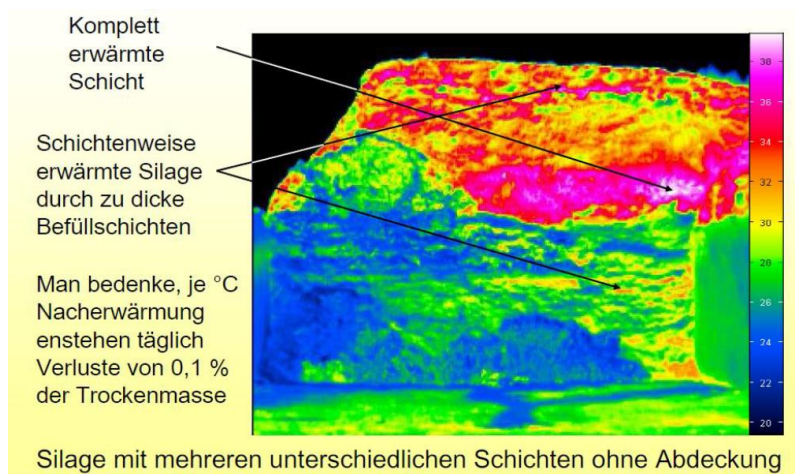
Gut zerkleinertes Futter (in Abhängigkeit vom TS-Gehalt: 4-7 mm/Mais, 2-4 cm/Gras) lässt sich beim Silieren besser verdichten. So wird eingeschlossene Luft rascher aus dem Silo verdrängt und bestehende Luftkanäle geschlossen. Dies verhindert ein späteres Eindringen von Luft und fördert die Milchsäuregärung. Es wirkt der Vermehrung von Schadkeimen (Clostridien, Listerien, Hefen, Schimmelpilze) entgegen und verringert das Risiko von Fehlgärungen. Eine gute Verdichtung senkt außerdem den Siloraumbedarf und hilft einem Übersilieren –in der Höhe sowie über Silokammern hinweg- vorzubeugen.

Für eine gute Verdichtung gilt:

- Maximal 30 cm Schichtdicke, Substrate ausreichend über die Silofläche verteilen
- Reifendruck ca. 2 - 3,5 bar (Um die Aufstandsfläche des Walzfahrzeugs zu minimieren und den Druck pro Fläche zu maximieren, sollten statt Zwillingsreifen schmale Reifen/Betonreifen verwendet werden.)
- Mehrfache Überfahrt (mind. 3x)
- Langsame Walzgeschwindigkeit (ca. 4 - 6 km/h)
- Raumgewichte von 420 kg/t Silage nicht unterschreiten (Dabei gilt: je höher der TS-Gehalt, desto schwieriger fällt die Verdichtung und desto stärker muss sie erfolgen.) Eine maximale Füllhöhe des Silos von ca. 4 m sollte nicht überschritten werden, da dies die Verdichtung erschwert und den Entnahmevorschub senkt.

Um Lagerverluste zu minimieren, ist eine sorgfältige Siloabdeckung unverzichtbar. Mangelhafte/fehlende Abdeckung führt zu Lufteintritt, insbesondere an Rändern und Oberflächen.

Folge sind Energieverluste durch Atmungsstoffwechsel aerober Mikroorganismen (Nacherwärmung) (Abbildung 43), Nährstoffauswaschung, Verpilzung und Schimmelbildung (Abbildung 44).



**Abbildung 43:** Wärmebildaufnahme eines Fahrsilanschnittes. Aufnahme: Mit freundlicher Genehmigung der Landmaschinenschule Triesdorf.



**Abbildung 44:** Verpilzung und Schimmelbildung in einer Sandwichsilage (Mais/Gras) bei zu geringem Entnahmevorschub.

Die Verwendung von Unterzieh- und Wandfolie, Silofolie, Siloschutzgitter und Silosäcken schafft Abhilfe. Das Anlegen von Ablaufrinnen in den Randbereichen und die sofortige Reparatur von Folienbeschädigungen tun ihr Übriges. Auf windexponierten Fahrsilos müssen die Folien besonders gut beschwert werden, um das typische Flattern der Folien zu verhindern, das Luftsaurestoff in den Silostock „pumpt“.

### Silierprozess optimieren

Im Konservierungsprozess spielt ein schnellstmöglicher und nachhaltiger Luftabschluss eine zentrale Rolle, da eine Milchsäuregärung erst unter anaeroben Bedingungen abläuft. Bei dieser Form der Gärung werden pflanzeigene Zucker unter Luftabschluss in konservierende Säure umgesetzt. Je rascher der pH-Wert im Silostock aufgrund der gebildeten Säuren auf unter pH 4 gesenkt werden kann, desto geringer sind Energieverluste durch bakteriellen Atmungsstoffwechsel und die Vermehrung unerwünschter Mikroorganismen wie Clostridien, Hefen, Schimmelpilzen u.a. Durch

einen substratspezifischen Einsatz von Siliermitteln lässt sich die pH-Absenkung im Silostock beschleunigen. Der Markt bietet speziell auf die Bedürfnisse von Biogasanlagen zugeschnittene Siliermittel an (z.B. Silasil Energy der Fa. Schaumann). Dabei ist neben der genannten Reduzierung von Gär- und Entnahmeverlusten vor allem eine Verbesserung und Beschleunigung des Fermenterstoffwechsels durch höhere Essigsäuregehalte in der Silage ein Ziel der Biogas-Silierzusätze. Die Siliermittel für den Biogasbereich enthalten sogenannte homofermentative und/oder heterofermentative Milchsäurebakterien.

Bei der homofermentativen Milchsäuregärung (MSG) entsteht als Hauptendprodukt nur Milchsäure, die zu einer raschen pH-Wert-Absenkung führt und auf diese Weise eine Vermehrung von Verderberregern schnell unterdrückt.

Bei heterofermentativer MSG wird neben Milchsäure als Hauptendprodukt auch Essigsäure gebildet. Essigsäure ist zweifach positiv für Biogassilagen: sie erhöht deren aerobe Stabilität bei Entnahme und wird darüber hinaus als direkter Vorläufer des Methans in der Biogasanlage sofort zu Biogas umgesetzt.

Obwohl die Trockenmasseverluste bei heterofermentativer MSG etwas höher sind, fällt die Gesamt-Energiebilanz aufgrund der erhöhten aeroben Stabilität positiv aus.

Die Silagestabilität lässt sich sowohl während als auch nach der Silierung durch die Bestimmung des Säurespektrums (z.B. Milchsäure, Ameisensäure, Alkohole u.a., durch HPLC<sup>4</sup>) ermitteln. Die Bonalytic GmbH ist mit modernster HPLC-Technologie ausgestattet und bietet verlässliche, kostengünstige und zeitnahe Ergebnisse.

### **Sinnvolle Entnahme**

Bei der Entnahme dringt Luft, d.h. Sauerstoff, in den Silostock ein und ermöglicht die Vermehrung aerob lebender Hefen und Schimmelpilze, die während der Lagerung überdauert haben.

Je tiefer der Lufteintritt, desto stärker sind Nacherwärmung und Schimmelbindung. Sie führen zu Energieverlusten und rufen biologische Prozessstörungen in der Biogasanlage hervor.

Aus diesen Gründen sollte die Anschnittfläche dem Silageverbrauch unbedingt so angepasst werden, dass ausreichend Vorschub (ca. 1 - 1,5 m/Tag im Winter, ca. 2 - 2,5 m/Tag im Sommer) bei möglichst kleiner Anschnittfläche gegeben ist. Auch die richtige Entnahmetechnik (Blockschneider, Schneidschild) hilft den Lufteintritt ins Silo zu minimieren.

## **2.4 Prozessbiologie und prozessbiologische Parameter**

### **2.4.1 Die vier Stufen des biologischen Abbaus**

Die Vergärung von organischer Biomasse zu Biogas läuft in einstufigen Anlagen zeitgleich und ortsparell ab. Im Fermenter bauen Milliarden verschiedener Bakterien unterschiedlicher Arten die Substrate zu Methan (CH<sub>4</sub>) und Kohlendioxid (CO<sub>2</sub>) ab. Dabei reichen sie sich ihre Stoffwechselprodukte jeweils als Nahrung weiter. Da den meisten Bakterien keine Möglichkeit der Fortbewegung besitzen, um sich ihrer Nahrung zu nähern, kommt einer effektiven und störungsfreien Rührtechnik daher größte Bedeutung zu.

---

<sup>4</sup> HPLC: Hochleistungsflüssigkeitschromatografie: High Performance Liquid Chromatography, analytische Methode in der Chemie

Aufgrund der unterschiedlichen Lebensansprüche der Bakterien und um teuren Faulraum wirtschaftlich optimal zu nutzen, muss für die Bedingungen im Reaktor ein Kompromiss gefunden werden, der eine maximale Abbaugeschwindigkeit ermöglicht. Dabei wird die Gesamtabbaurrate in der Regel von der Methanogenese (Methanbildung), dem letzten und langsamsten Teilschritt, limitiert.

Der biologische Abbau lässt sich in **vier Stufen** unterteilen. Die Stoffwechselprodukte der jeweils vorausgehenden Stufe werden von den Bakterien der Folgestufe energetisch genutzt.

Im ersten Abbauschritt, der **Hydrolyse**, werden die komplexen organischen Makromoleküle (Kohlenhydrate, Proteine, Fette) durch Enzyme verschiedener Bakteriengattungen in ihre Monomere (Mono-/Disaccharide, Aminosäuren, kurzkettige Fettsäuren) gespalten. Da die Moleküle für eine Aufnahme in die Bakterienzellen zu groß sind, geben die Organismen Enzyme an das Außenmedium ab, d.h. die Spaltung erfolgt außerhalb der Bakterienzellen. Der optimale pH-Bereich der hydrolytischen Bakterien liegt bei pH 5-6. Lignin kann von den Enzymen nicht gespalten werden.

Mit der **Acidogenese (Säurebildung)** beginnt der eigentliche Gärprozess. Die entstandenen Monomere (Mono-/Disaccharide, Aminosäuren, kurzkettige Fettsäuren) werden von acidogenen Bakterien aufgenommen und metabolisiert. Stoffwechselprodukte dieser Phase sind v.a. kurzkettige Fettsäuren (Propion-, Butter-, Valeriansäure u.a.), CO<sub>2</sub>, Wasserstoff sowie in kleineren Mengen auch Alkohole, Schwefelwasserstoff (H<sub>2</sub>S) und Milchsäure. Das pH-Optimum dieser, sowie der nächsten Phase liegt zwischen pH 4 und 6.

Propionsäure- (CH<sub>3</sub>CH<sub>2</sub>COOH) und Buttersäuregärung (CH<sub>3</sub>CH<sub>2</sub>CH<sub>2</sub>COOH) stellen Nebenabbauewege zur CH<sub>4</sub>-Bildung dar. Beide Säuren sind unmittelbare Vorstufen für ca. 70 % der Essigsäure. Anreicherungen von Propion- und Buttersäure sind daher sichere Anzeichen einer Prozessüberlastung im Reaktor. Darüber hinaus gelten erhöhte Essigsäuregehalte (> 2,5 g/l) und ein Propionsäure-/Essigsäure-Verhältnis von > 1,4 als sichere Indikatoren (90 %) für eine bestehende oder bevorstehende Prozessstörung.

Während der **Acetogenese (Essigsäurebildung)** werden die entstandenen Stoffwechselprodukte von acetogenen Bakterien (Acetobacterium, Syntrophomonas) zu vorwiegend Acetat (eine Form der Essigsäure) und Wasserstoff (H<sub>2</sub>) umgewandelt. Acetat bildet die wichtigste Grundlage zur Bildung von CH<sub>4</sub> in der nächsten Phase. Wird der gebildete Wasserstoff (H<sub>2</sub>) durch die Methanogenese nicht verstoffwechselt, führt der erhöhte H<sub>2</sub>-Partialdruck zur Hemmung der Acetogenese (Rückkopplungshemmung).

Im letzten Schritt, der **Methanogenese (Methanbildung)**, verstoffwechseln methanogene Archaeen (Methanococcus- und Methanobacterium-Arten) Acetat oder entstandenes CO<sub>2</sub> und H<sub>2</sub> zu CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub> und Wasser. Die Methanogenese stellt den Prozessschritt dar, der am sensibelsten auf Veränderungen der Prozessbedingungen (Temperatur, pH, H<sub>2</sub>-Partialdruck) reagiert und somit am störungsanfälligsten ist. Das pH-Optimum der Methanspezies liegt bei 6,6 - 7,5. Die Generationszeiten methanogener Mikroorganismen liegen zwischen 3 Tagen bei 35 °C und 50 Tagen bei 10 °C. Aufgrund dieser vergleichsweise langsamen Reproduktionszeit sind zum vollständigen Abbau der organischen Substanz im Biogasreaktor hohe Verweilzeiten notwendig.

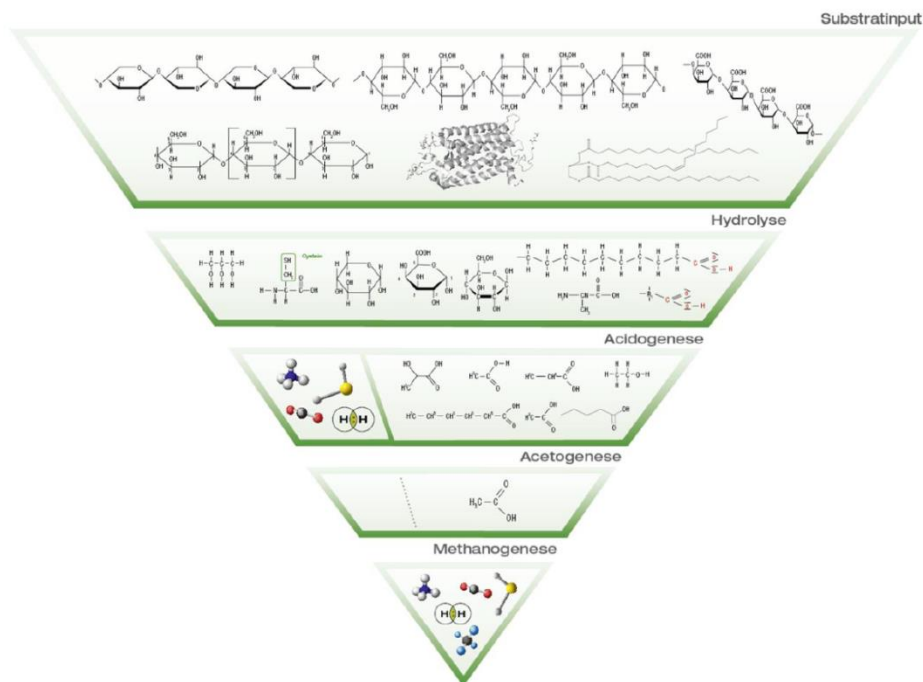


Abbildung 45: Schematische Darstellung des anaeroben Abbauprozesses [Bioreact].

**Ein stabiler Gärprozess ist demnach die Grundlage** für hohe Methanerträge. Eine belastbare Mikrobiologie beginnt jedoch nicht erst im Fermenter, sondern nimmt ihren Anfang bereits in guter fachlicher Praxis beim Ackerbau und der Auswahl geeigneter Einsatzstoffe. Professionelle Substratkonservierung zur Minimierung von Silierverlusten, ein leistungsbezogener Substrateinsatz auf der Anlage sowie reibungslose technische Abläufe und regelmäßige biologische Prozesskontrolle sind die weiteren Voraussetzungen für biologische Stabilität und hohe Methanerträge (Abbildung 46).



**Abbildung 46:** Grundlagen eines stabilen Gärprozesses [Bioreact].

## 2.4.2 Prozessbiologische Parameter

Ein schlecht laufender biologischer Gärprozess oder gar dessen Zusammenbruch mindern die Wirtschaftlichkeit einer Biogasanlage erheblich. Daher ist es von großer Bedeutung verlässliche Kenngrößen zu erfassen, die Prozessstörungen **frühzeitig** aufzeigen und Betreibern genügend **Reaktionszeit** zur Behebung der Ursache verschaffen.

Die im Folgenden genannten Parameter sind die verlässlichsten und auf Biogasanlagen am häufigsten gemessenen. Für alle Analyseparameter gilt: Fast egal in welchen Analysebereichen eine Anlage ist überall gibt es sehr gute und sehr schlechte Anlagen – manchen Bereichen allerdings mehr Gute als Schlechte. In diesen Bereichen sollte eine Biogasanlage nach Möglichkeit betrieben werden um eine bestmögliche Wirtschaftlichkeit erzielen zu können. Die von Bioreact empfohlenen Bereiche sind dabei entstanden, in dem die wirtschaftlichen Parameter wie Substratausnutzung und BHKW-Auslastung zu den jeweiligen Analyseparametern in Beziehung gesetzt wurden.

## 2.4.3 Die Säuren: FOS

Kurzkettige organische Fettsäuren (flüchtige organische Säuren: FOS, z.B. Essigsäure, Propionsäure, Buttersäure u.a.) sind wichtige Zwischenprodukte des anaeroben Substratabbaus und bilden die Vorstufe zu  $\text{CH}_4$  und  $\text{CO}_2$ . Läuft der Gärprozess stabil, stehen Produktion und Verstoffwechslung der Säuren in einem Gleichgewicht. Bei eingeschränkter methanogener Aktivität, z.B. aufgrund von Spurenelementmangel oder Ammoniak- bzw. Schwefelwasserstoff-Hemmung, werden Essigsäure sowie die in den beiden vorgelagerten Abbaustufen entstehenden Säuren nicht weiter zu  $\text{CH}_4$  abgebaut, sondern reichern sich im Fermenter an. Sinkt aus diesem Grunde der pH-Wert, wirkt dies hemmend auf den Gärprozess und kann zur Versauerung des Reaktors führen (Azidose).

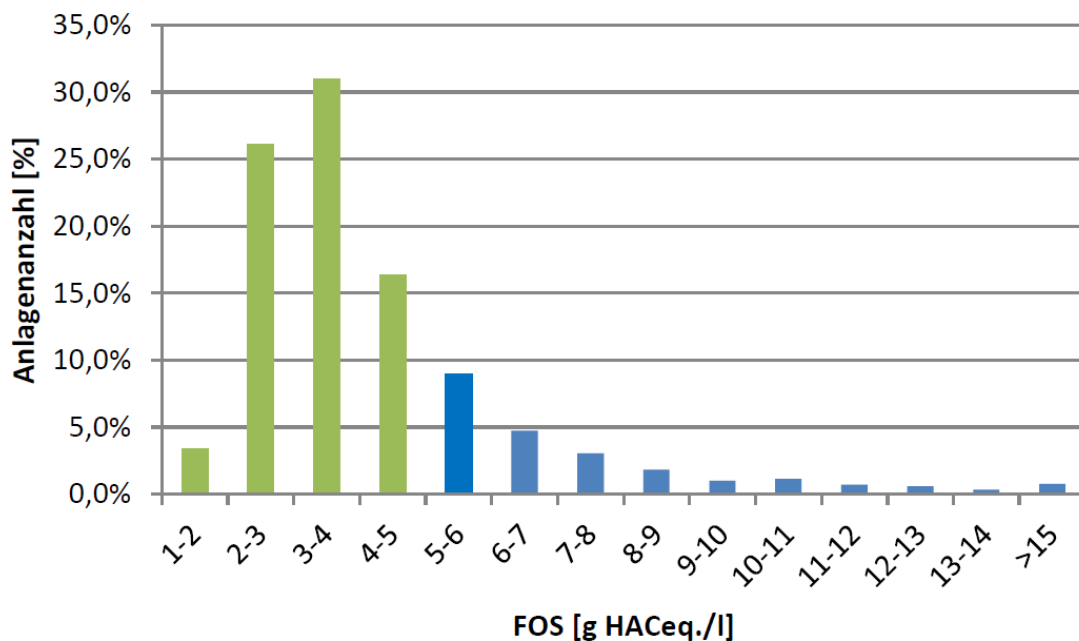
Die Konzentration der flüchtigen organischen Säuren in Summe kann durch Titration bestimmt werden, die jeweiligen Einzelkonzentrationen (Essigsäure, Propionsäure, Buttersäure, Iso-Buttersäure, Valeriansäure, Iso-Valeriansäure, Capronsäure) durch Gaschromatografie (GC). Bei dieser Messmethode kann auch das sogenannte Essigsäureequivalent ermittelt werden. Dabei handelt es sich um die Summe der freien organischen Säuren, normiert auf das Molgewicht von Essigsäure.

Sowohl die Summen als auch die Einzelkonzentrationen können als Stabilitätsindikatoren für die Belastung eines Biogasreaktors dienen.

Das Vorhandensein sowie die Höhe der Konzentration einzelner Säuren und das Verhältnis von Essig- und Propionsäure zueinander können häufig Aufschluss geben über Art und Dauer einer Prozessstörung (siehe auch: Kapitel Spurenelementmangel).

Der von Bioreact empfohlene Bereich siehe Abbildung 47 (grüne Balken) liegt beim FOS zwischen 1 und 5 g/l HAC eq. 76,8 % der Anlagen liegen in dem von Bioreact empfohlenen Bereich.





**Abbildung 47:** Verteilung des FOS bei den von Bioreact untersuchten Anlagen. Grüne Balken kennzeichnen den empfohlenen Bereich [Bioreact].

#### 2.4.4 Der Puffer: TAC, pH-Wert und Titration

Puffersysteme verhindern ein Absinken des pH-Wertes bei vermehrter Säureproduktion ( $H^+$ -Ionen werden „gepuffert“). Aus diesem Grund wirken sich insbesondere bei hohen Pufferkonzentrationen (in BGA > 10 g/l) erst sehr hohe Säurekonzentrationen auf den pH-Wert aus.

Der in Biogasanlagen vorliegende Hydrogencarbonatpuffer spielt für die Aufrechterhaltung des mikrobiellen pH-Optimums im Biogasreaktor eine entscheidende Rolle [62]. Er liegt neben dem Ammonium/Ammoniak-Puffer als Hauptpuffersystem in Gülle vor und puffert die gebildeten organischen Säuren (Abbildung 48). Er ist einer der auf BGA am häufigsten erfassten Parameter und wird durch Titration als TAC (*total inorganic carbon*) bestimmt.

Die zweifach protonenbindende Wirkung des Hydrogencarbonatpuffers beruht auf den pH-abhängigen Gleichgewichtsreaktionen zwischen Carbonat ( $CO_3^{2-}$ ) und Hydrogencarbonat ( $HCO_3^-$ ), sowie zwischen Hydrogencarbonat ( $HCO_3^-$ ) und Kohlensäure ( $H_2CO_3$ ) (Abbildung 48). Die Kohlensäure liegt zu 99 % in Form von  $CO_2$  und Wasser ( $H_2O$ ) vor.

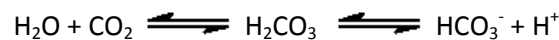


Die  $pK_s$ -Werte<sup>5</sup> der beiden Reaktionen liegen bei pH 10,45 ( $CO_3^{2-}/HCO_3^-$ ), bzw. pH 6,52 ( $HCO_3^-/H_2CO_3$ ). Da der pH-Wert in Biogasanlagen in der Regel unter 8 liegt, sind die  $CO_3^{2-}$ -Konzentrationen vernachlässigbar gering und brauchen nicht weiter betrachtet werden. Bei einem Absinken des pH-Wertes verschiebt sich das Gleichgewicht auf die Seite der unbeständigen Kohlensäure, die zu  $HCO_3^-$

<sup>5</sup>  $pK_s$ : pH-Wert bei dem die beteiligten Spezies ( $CO_3^{2-}/HCO_3^-$  bzw.  $HCO_3^-/H_2CO_3$ ) zu jeweils 50 % (1:1) vorliegen (pH 6,52 und pH 10,4).

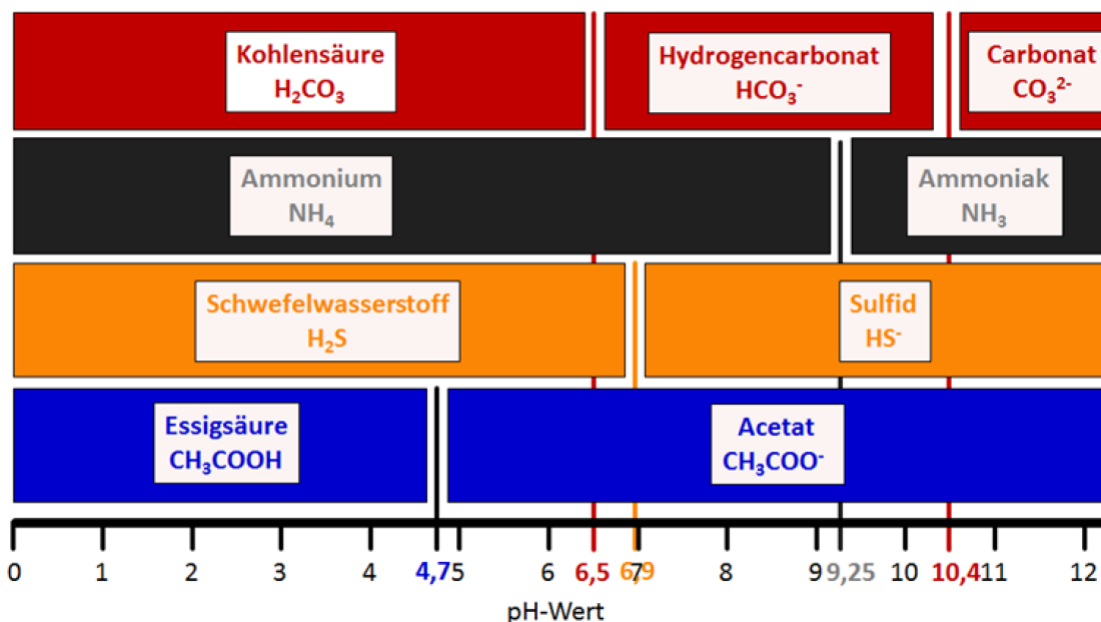
und  $\text{CO}_2$  zerfällt. Aufgrund dieser Bildung von  $\text{CO}_2$  aus Kohlensäure und dessen Ausgasung ( $\uparrow$ ), nimmt der Hydrogencarbonatpuffer im Verlauf der Pufferung ab (offenes Puffersystem). Daher deutet eine rasche TAC-Abnahme in der Regel frühzeitig einen Anstieg der Säuren und ein beginnendes Prozessgleichgewicht an.

Die doppelseitigen Reaktionspfeile in der Reaktionsgleichung unten machen die Möglichkeit der Hin- als auch der Rückreaktion deutlich. Das heißt, dass ein durch  $\text{CO}_2$ -Ausgasung erschöpfter Hydrogencarbonatpuffer durch die Rückreaktion mit mikrobiell gebildetem (Methanbakterien) und/oder chemisch hinzugefügtem  $\text{CO}_2$  (Pufferverstärker, z.B. Bioreact® Bicarbo) wieder aufgefüllt werden kann.



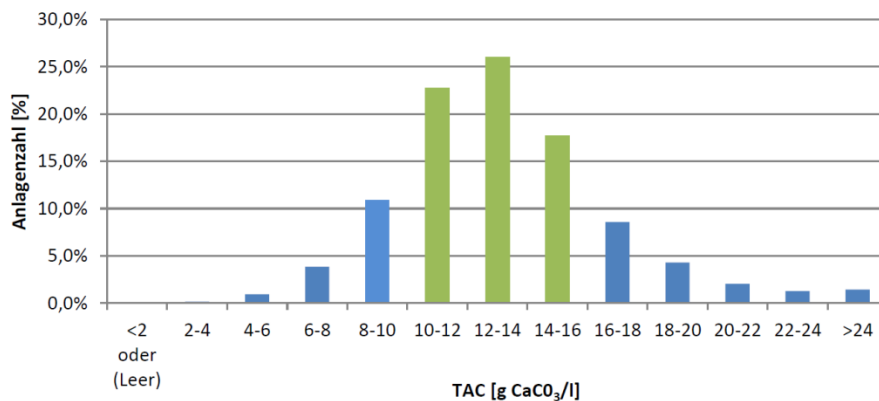
Hinsichtlich des pH-Wertes kommt es erst bei Unterschreitung eines anlagenspezifischen TAC-Grenzwertes zu dessen Absinken, d.h. zur Veränderung der bakteriellen Milieu-/Lebensbedingungen, und zu negativen Auswirkungen auf deren Stoffwechsel und die Gasbildungsrate.

Die für die Bakterien positive Aufrechterhaltung des pH-Wertes durch den TAC macht den pH-Wert demnach jedoch als verlässlichen, frühzeitig warnenden Prozessparameter unbrauchbar. Bei der Messung des pH-Wertes ist zu beachten, dass der pH-Wert durch die Ausgasung von  $\text{CO}_2$  bei Probenahme und Transport leicht ansteigt. Daher werden vor Ort in aller Regel niedrigere pH-Werte ermittelt als im Labor.



**Abbildung 48:** pH-abhängige Gleichgewichte in Biogasanlagen. Gezeigt wird der Zusammenhang zwischen pH-Wert und Umwandlung der diversen Spezies. Der rot unterlegte Hydrogencarbonatpuffer ist das Hauptpuffersystem für die während der Vergärung gebildeten freien organischen Säuren (FOS, z.B. Essigsäure) und für die Aufrechterhaltung des pH-Wertes in den Reaktoren verantwortlich. Ammoniak ( $\text{NH}_3$ ), Schwefelwasserstoff ( $\text{H}_2\text{S}$ ) und Essigsäure sind für die Bakterien toxisch. Ihr Vorhandensein sollte vermieden werden [Bioreact].

Der von Bioreact empfohlene Bereich (Abbildung 49) grüne Balken, liegt zwischen 10 und 16. 66,5 % der von Bioreact untersuchten Anlagen liegen in dem empfohlenen Bereich.



**Abbildung 49:** Verteilung des TAC bei den von Bioreact untersuchten Anlagen. Grüne Balken kennzeichnen den empfohlenen Bereich [Bioreact].

#### 2.4.5 FOS-TAC-Bestimmung

Für die Bestimmung des FOS (Summe) und TAC existieren eine ganze Reihe unterschiedlicher Titrationsmethoden. Eine der einfachsten in der Durchführung und diejenige mit der weitesten Verbreitung ist die Titration nach Nordmann [63].

Durchführung der FOS/TAC-Titration nach Nordmann:

- 1. Titrationsausrüstung:** Bürette zur Dosierung der Säure, Magnetrührer, Rührfische, Waage oder Messkolben zur Abmessung des Gärrestes, pH-Meter und pH-Elektrode, Teesieb + Teelöffel o.ä. zur Vorbehandlung der Probe
- 2. Probenvorbereitung:** 20ml Gärrest aus einer frischen Probe absieben und mit 20ml Wasser verdünnen. Auf Magnetrührer stellen, Rührfisch hinzugeben und pH-Elektrode so installieren, dass der Rührfisch nicht an die Elektrode schlägt und sie sich im Flüssigkeitsstrom befindet.
- 3. Titration mit 0,05M H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> (Schwefelsäure):** Säure dosiert so zugeben, dass die Titrationspunkte pH 5 und pH 4,4 genau erreicht werden. Bei Erreichen der Titrationspunkte jeweils den Säureverbrauch in Millilitern notieren.
- 4. TAC-Bereich:** Ausgangs-pH bis pH 5 ⇒ Säureverbrauch notieren  
**FOS-Bereich:** pH 5 bis 4,4: ⇒ Säureverbrauch notieren
- Ermittelte Säuremenge in Milliliter (ml) in die untenstehenden Gleichungen einsetzen:

$$\text{TAC} = \frac{G_{\text{TAC}} \times 250}{(G_{\text{TAC}} = \text{ml } 0,05\text{M H}_2\text{SO}_4)}$$

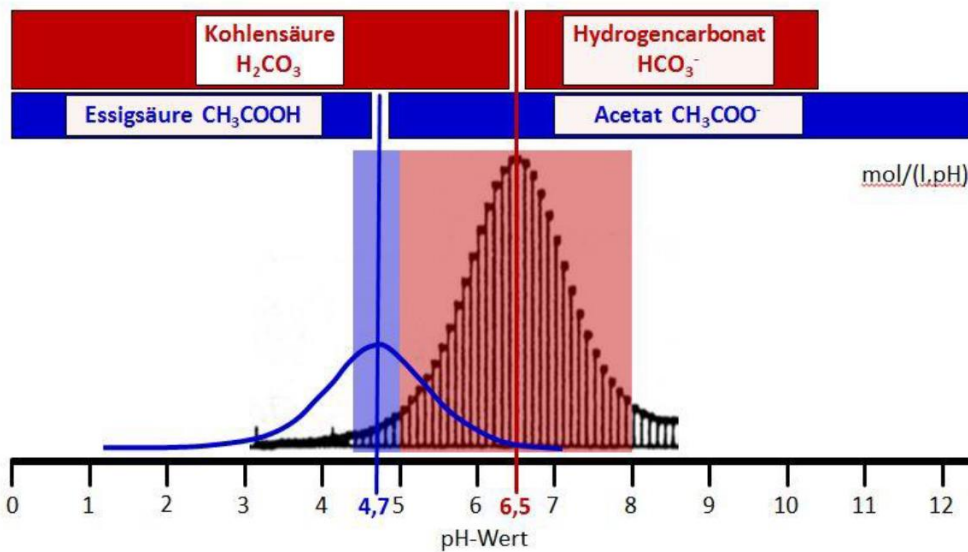
$$\text{FOS} = (G_{\text{FOS}} \times 1,66 - 0,15) \times 500$$

$$(G_{FOS} = \text{ml } 0,05\text{M H}_2\text{SO}_4)$$

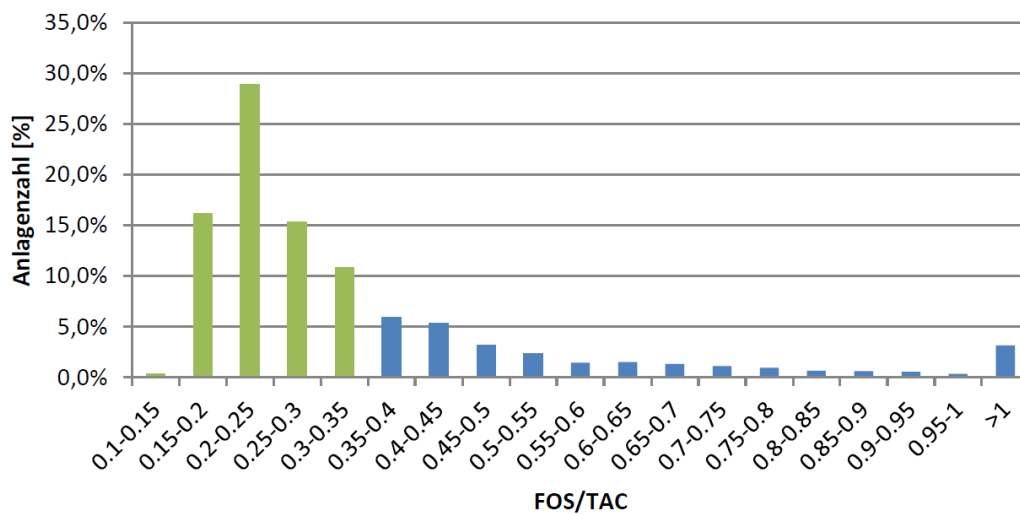
Einheit: mg/l Calciumcarbonat ( $\text{CaCO}_3$ ) bzw. mg/l Essigsäure ( $\text{C}_2\text{H}_4\text{O}_2$ )

6. Ggfs. Quotient bilden: FOS/TAC (einheitenlos)

Der von Bioreact empfohlene Bereich liegt bei einem FOS/TAC-Verhältnis kleiner 0,35 (siehe Abbildung 51). 71,6% der Anlagen liegen in dem empfohlenen Bereich.



**Abbildung 50:** Pufferkurven der TAC- und FOS-Puffersysteme im Verlauf einer Titration nach NORDMANN. Bei dieser Form der Titration werden die Säuremengen der Titrationsbereiche (1) Ausgangs-pH bis pH 5 (rot unterlegter Bereich = TAC), sowie (2) pH 5 bis pH 4,4 (blau unterlegter Bereich = FOS) ermittelt und daraus mit Hilfe einer Gleichung die Prozessparameter FOS (in Summe) und TAC errechnet [Bioreact].

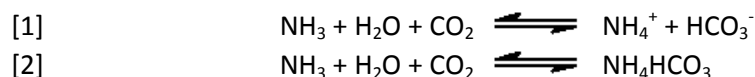


**Abbildung 51:** Verteilung des FOS/TAC-Verhältnisses bei den von Bioreact untersuchten Anlagen. Anlagen mit einem FOS/TAC-Verhältnis unter 0,35 (grüne Balken) liegen im empfohlenen Bereich [Bioreact].

#### 2.4.6 Stickstoff: Ammonium (NH<sub>4</sub><sup>+</sup>)/Ammoniak (NH<sub>3</sub>)

Hohe Konzentrationen an Ammonium (NH<sub>4</sub><sup>+</sup>) als direkt pflanzenverfügbare Düngerkomponente werten Gärrest im Hinblick auf dessen Düng- und Verkaufswert auf. Ein negativer Aspekt hoher NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-Konzentrationen im Fermenter ist jedoch die vermehrte Entstehung von Ammoniak (NH<sub>3</sub>), einem Gas, das als Zellgift toxisch auf die Reaktor-Biologie wirkt und die Biogasentstehung hemmen kann.

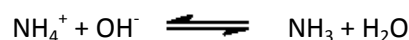
Ammoniak entsteht beim anaeroben Abbau von Proteinen aus den freiwerdenden Eiweißbausteinen, den Aminosäuren. Es reagiert mit Wasser und CO<sub>2</sub> entweder zu Ammonium (NH<sub>4</sub><sup>+</sup>) und Hydrogencarbonat (HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>) [1] oder zu Ammoniumhydrogencarbonat (NH<sub>4</sub>HCO<sub>3</sub>) [2].



NH<sub>4</sub>HCO<sub>3</sub> reagiert bei Säurezugabe -genau wie der Hydrogencarbonatpuffer/TAC- unter Bildung von CO<sub>2</sub> und Wasser. Es ist also ebenfalls ein offenes Puffersystem, das vollständig aus dem Fermenter entweichen und im Gegenzug durch Pufferadditive und mikrobielles CO<sub>2</sub> wieder neu gebildet werden kann (Kap. Versauerung).



Das Gleichgewicht zwischen NH<sub>4</sub><sup>+</sup> und NH<sub>3</sub> ist pH-abhängig (pK<sub>s</sub> 9,25)<sup>6</sup>.

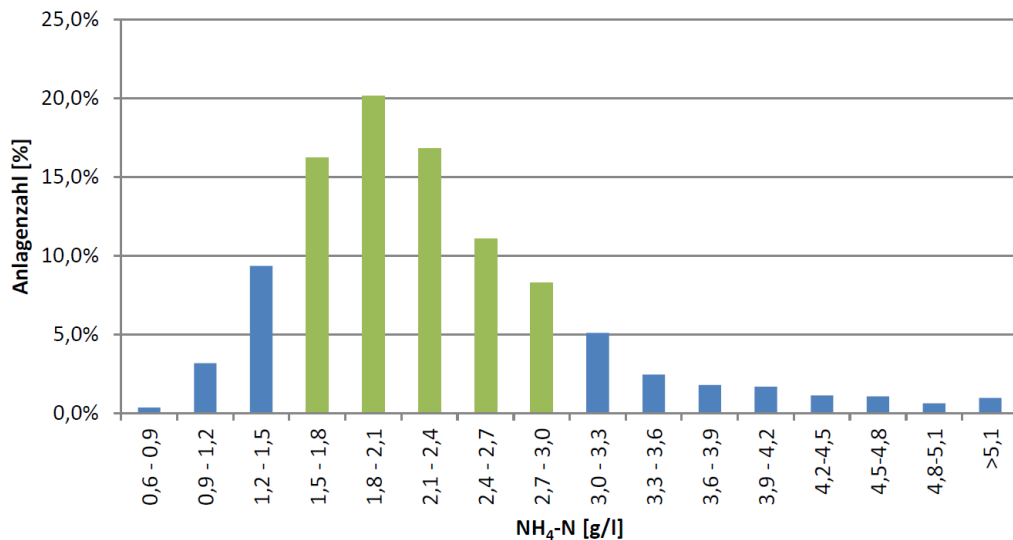


Es verschiebt sich mit sinkendem pH-Wert auf die Seite des NH<sub>4</sub><sup>+</sup>, wobei Hydroxidionen (OH<sup>-</sup>) freigesetzt werden. Aufgrund der vollständigen Dissoziation bei pH-Werten < 6 spielt das NH<sub>4</sub><sup>+</sup>/NH<sub>3</sub>-Puffersystem für die Pufferung der organischen Säuren im Fermenter nur eine untergeordnete Rolle. Mit steigendem pH-Wert entsteht verstärkt undissoziiertes, toxisches NH<sub>3</sub> (Abbildung 48). Zur Vermeidung einer NH<sub>3</sub>-Toxizität sollten dem Fermenter daher möglichst geringe Proteinfrachten zugeführt und ein pH-Wert unter 8 angestrebt werden. Denn bei pH-Werten darüber führt NH<sub>3</sub> durch die Bildung von Ammoniumhydrogencarbonat (NH<sub>4</sub>HCO<sub>3</sub>) zu einer Erhöhung der Gesamtpufferfähigkeit eines Biogasreaktors (Löslichkeit 220g l<sup>-1</sup>, bei 20°C) und zu einer Erhöhung des pH-Wertes. Daher werden in Anlagen mit hohen Stickstofffrachten häufig sehr hohe TAC-Werte von über 20g/l und pH-Werte über 8 gemessen. Dies kann Prozessstörungen hervorrufen (Kap. Ammoniakhemmung).

Eine weitere Problematik, die bei hohen Stickstoffgehalten auftreten kann, ist die Schaumentstehung. Häufig ausgelöst durch ein ungünstiges C/N-Verhältnis, d.h. in diesem Fall zu niedrige Rohfasergehalte, kann sich im Fermenter Schaum bilden, der gasführende Leitungen verschließt. Ist die Überdrucksicherung ebenfalls zugesetzt oder kann sie die entstehende Gasmenge nicht bewältigen, kann dies im schlimmsten Fall zum vollständigen Anheben der Fermenterdecke, bzw. zu Beschädigungen an Foliendächern führen. Abhilfe schafft in der Regel die Zuführung

<sup>6</sup> pK<sub>s</sub>: pH-Wert bei dem die beteiligten Spezies (NH<sub>4</sub><sup>+</sup>/NH<sub>3</sub>) zu jeweils 50 % (1:1) vorliegen.

rohfaservaltiger Substrate wie, z.B. Stroh, Mist, Grassilage u.ä. oder die Senkung der Stickstofffracht durch eine Substratumstellung, den Einsatz von Ammoniumbindern oder Anti-Schaummitteln. Der von Bioreact empfohlene Bereich liegt bei einer Ammoniumkonzentration zwischen 1,5 und 3,0g/l (**Abbildung 52**). 72,5% der Anlagen liegen in dem empfohlenen Bereich.



**Abbildung 52:** Verteilung des Ammoniumgehaltes bei den von Bioreact untersuchten Anlagen. Anlagen mit einem Ammoniumgehalt zwischen 1,5 und 3 g/l (grüne Balken) liegen im empfohlenen Bereich [Bioreact].

### 2.4.7 Leitfähigkeit

Die elektrische Leitfähigkeit (Konduktivität, electric conductivity: EC) ist das Maß für die Fähigkeit eines Stoffes (insbesondere Metalle) oder einer Lösung Strom zu leiten. Je höher der Gehalt an Ionen in einer Lösung, desto höher liegt die Leitfähigkeit. Zu den chemischen Verbindungen, die Ionen freisetzen, zählen z.B. alle Salze (z.B. Natriumchlorid/NaCl („Speisesalz“, Viehsalz), aber auch Säuren (H<sup>+</sup>-Ionen) und Laugen (OH<sup>-</sup>-Ionen). Für den Biogasprozess interessant ist die elektrische Leitfähigkeit aufgrund der Tatsache, dass alle Lebewesen –das schließt auch Biogas-Bakterien ein- einen gewissen Salzgehalt zum Überleben benötigen. Zu hohe oder zu niedrige Salzgehalte schränken die Stoffwechselrate ein, d.h. in BGA: die Gasbildungsrate sinkt.

Der von Bioreact empfohlene Bereich liegt bei der Leitfähigkeit zwischen 22 und 34 mS/cm. 73,5 % der Anlagen liegen in diesem Bereich.

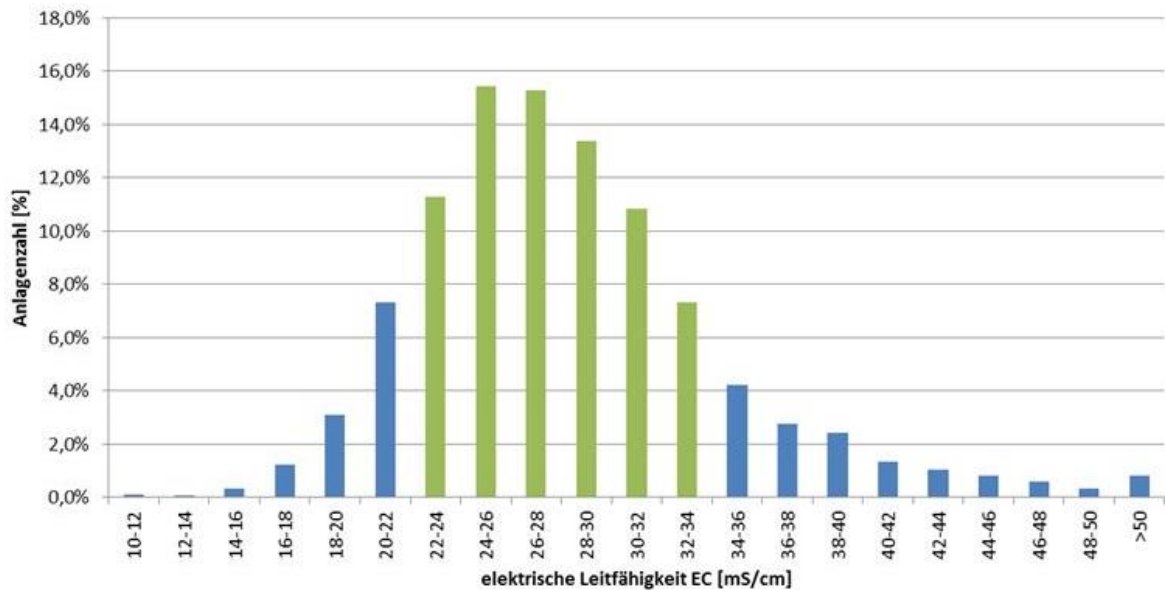


Abbildung 53: Verteilung der Leitfähigkeit in den von Bioreact untersuchten Anlagen. Anlagen mit einer Leitfähigkeit zwischen 22 und 34 mS/cm liegen im empfohlenen Bereich (grüne Balken) [Bioreact].

#### 2.4.8 pH-Wert und Temperatur

Der pH-Wert in Biogasanlagen in den von Bioreact untersuchten Anlagen liegt bei pH 7,73. Der von Bioreact empfohlene Bereich liegt zwischen pH 7,5 und 8,0 (Abbildung 54). 75 % der Anlagen liegen in diesem Bereich.

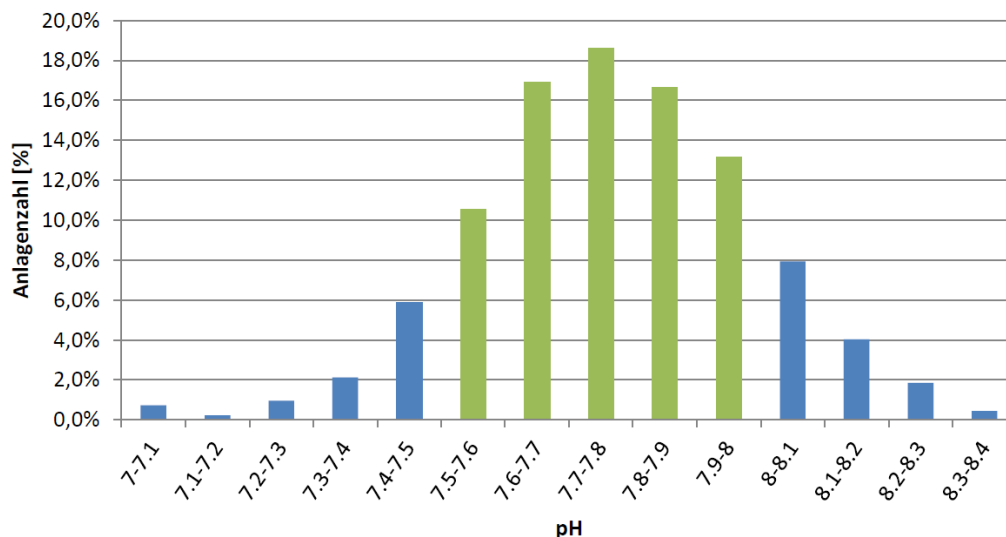


Abbildung 54: Verteilung des pH-Wertes in den von Bioreact untersuchten Anlagen. Anlagen mit einem pH-Wert zwischen 7,5 und 8,0 liegen im empfohlenen Bereich (grüne Balken) [Bioreact].

Der pH-Wert beeinflusst die Wirtschaftlichkeit einer Anlage nicht nur direkt, sondern auch indirekt. So liegen organische Säuren (Abbildung 48; Beispiel Essigsäure) oder Schwefelwasserstoff (H<sub>2</sub>S) bei

einem niedrigen pH undissoziiert vor und hemmen in dieser Form. Im alkalischen Bereich liegen sie dissoziiert vor und hemmen nicht. Im Gegensatz dazu liegt das wasserlösliche und relative unkritische Ammonium ( $\text{NH}_4^+$ ) im alkalischen zunehmend als gasförmiger und hemmender Ammoniak ( $\text{NH}_3$ ) vor.

Als eine weitere Einflussgröße ist die Temperatur mit der die Biogasanlage betrieben wird zu nennen. Sie beeinflusst nicht nur die Geschwindigkeit biochemischer Reaktionen, sondern wirkt auch auf eine Vielzahl weiterer Faktoren, wie z.B. Druck, Volumen und Leitfähigkeit. Von großer Bedeutung ist die Temperatur auch, da die Lage verschiedener Gleichgewichtsreaktionen durch sie beeinflusst wird. Dies gilt in hohem Maße für das Gleichgewicht zwischen dem ungiftigen Ammonium ( $\text{NH}_4^+$ ) und dem giftigen Ammoniak ( $\text{NH}_3$ ), das ebenfalls stark durch den pH-Wert beeinflusst wird. Hemmungen der Mikrobiologie durch Ammoniak können bereits ab Konzentrationen von 0,15 g/l auftreten (FNR Handreichungen). In der Praxis sind Verschlechterungen des Prozesses erst ab einer Konzentration von über 0,25 g/l statistisch auffällig.

Hohe Temperaturen beeinflussen jedoch nicht nur die Lage des Gleichgewichtes zwischen Ammonium und Ammoniak, sondern zusätzlich auch die Empfindlichkeit der Bakterien gegenüber dem Ammoniak. So ist eine Ammoniak-Konzentration von 0,25 g/l bei 39°C wesentlich unkritischer, als die gleiche Konzentration bei 49°C.

Die Temperatur wirkt sich ebenfalls auf das Löslichkeitsverhalten von Gasen in Biogasanlagen aus. Je höher die Temperatur umso geringer ist die Löslichkeit der Gase im Gärsubstrat. Dieser Effekt kann eine besondere Bedeutung für den aus gelöstem  $\text{CO}_2$  bestehenden Carbonatpuffer (TAC) aufweisen, der bei höheren Temperaturen geschwächt ist. In Anlagen im höheren Temperaturbereich wirken sich deshalb Änderungen der Konzentration organischer Gärssäuren potenziell schneller auf den pH aus.

Ebenfalls eine wichtige Rolle spielt die Temperatur bei der Viskosität des Fermenterinhalt, die mit steigender Temperatur abnimmt. Eine Temperatur-erhöhung kann sich folglich positiv auf den Energieeintrag von Rührwerken und Pumpen in der Biogasanlage auswirken.

Der von Bioreact empfohlene Temperatur-Bereich liegt zwischen im mesophilen Temperaturbereich zwischen 39-42°C

**Tabelle 10:** Von Bioreact empfohlener Temperaturbereich liegt im mesophilen Bereich zwischen 39 und 42°C. 51 % der Anlagen liegen in diesem Bereich [Bioreact].

Temperatur [°C]	Anlagenzahl [%]	rel. Substrat [% KTBL]	Hydraulische Gesamtverweilzeit [d]
< 39	8,1	96,44	88,64
39 - 42	51,1	98,54	118,73
42 - 47	29,6	97,52	121,86
47 - 54	10,8	96,46	116,72
> 54	0,4	88,89	147,70



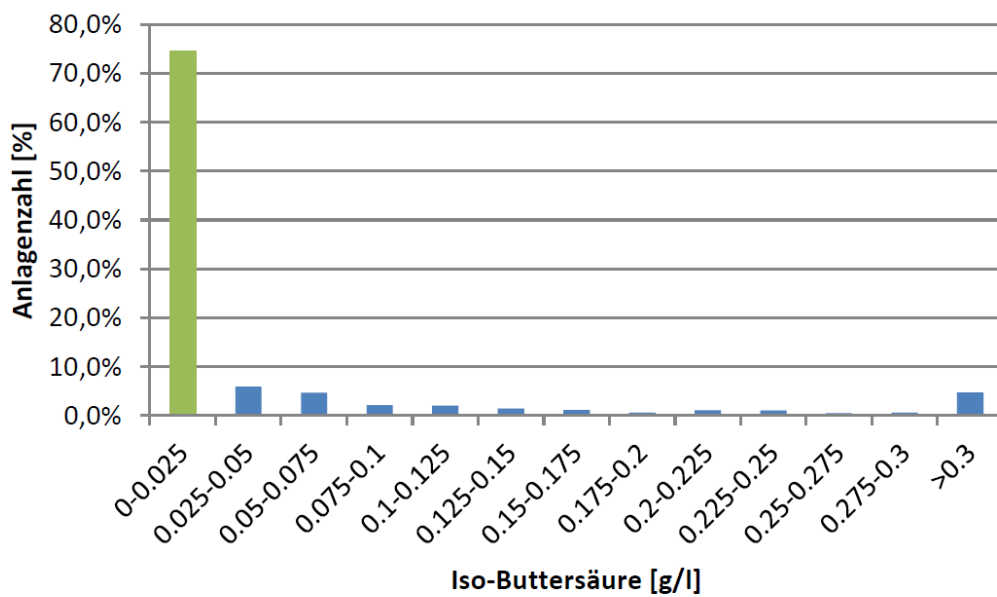
### 2.4.9 Gaschromatografie der organischen Fettsäuren

Mittels gaschromatografischer Analyse werden zur Prozessüberwachung die Säuren Essigsäure, Propionsäure, Iso-Buttersäure, Buttersäure, Valeriansäure, Iso-Valeriansäure und Capronsäure gemessen. Anhand typischer Säuremuster lassen sich häufig die Ursachen der Prozessstörung eingrenzen. So deutet sich zum Beispiel in einem Anstieg der Propionsäure und dem erstmaligen auftreten der Iso-Buttersäure, die durch Methylierung der Propionsäure beim Überschuss von Wasserstoff (H<sub>2</sub>) gebildet wird, ein Spurenelementmangel an. Eine durch Ammoniak hervorgerufene Hemmung der Gärbiologie zeigt sich in der Regel durch eine Verschiebung des Säuremusters in Richtung eines erhöhten Propionsäurespiegels. Der Gehalt der Propionsäure steigt dabei kontinuierlich an und übersteigt die Essigsäurekonzentration. Außerdem sind die ISO-Säuren nachweisbar (Abbildung 55, Hemmung).

	Essigsäure (g/l)	Propionsäure (g/l)	Buttersäure (g/l)	iso-Buttersäure (g/l)	Valeriansäure (g/l)	iso-Valeriansäure (g/l)	Capronsäure (g/l)
Optimaler Prozess	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	0,35	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	0,41	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	0,72	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Überlastung ??	3,42	0,18	0,00	0,04	0,00	0,06	0,00
	2,42	0,12	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	3,31	0,28	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Hemmung ??	2,02	7,06	0,00	0,12	0,08	0,25	0,00
	0,64	9,67	0,02	0,19	0,10	0,64	0,01
	0,20	8,45	0,00	0,06	0,00	0,03	0,06
Mangel ??	2,38	0,72	0,03	0,61	0,02	0,24	0,04
	1,51	0,25	0,00	0,48	0,00	0,00	0,00
	3,47	0,72	0,00	0,29	0,00	0,18	0,00

**Abbildung 55:** Typische Gärsäureprofile. Mit roten Kreis gekennzeichnet ein typisches Säuremuster bei einer Ammoniak-Hemmung der Gärbiologie[Bioreact].

Die von Bioreact empfohlenen Bereiche liegen für die Essigsäure bei <1 g/l (61,6% der Anlagen liegen in diesem Bereich), für die Propionsäure <0,20 g/l (73,1% der Anlagen) und die Säuren Iso-Buttersäure (74,6% der Anlagen) bis Capronsäure < 0,03 g/l (Bestimmungsgrenze). In der Regel sollte in einem stabilen Fließgleichgewicht, bei guter Spurenelementversorgung und guter Substratausnutzung nur wenig Essigsäure bis gar keine Essigsäure zu messen sein. In Abbildung 56 ist exemplarisch die Iso-Buttersäure dargestellt.



**Abbildung 56:** Der empfohlene Bereich für die Iso-Buttersäure liegt unter der Bestimmungsgrenze von 0,025 g/l (Grüne Balken). 74,6% der Anlagen liegen in dem empfohlenen Bereich [Bioreact].

#### 2.4.9.1.1 Die von Bioreact empfohlenen Bereiche

Auch im Fließgleichgewicht (siehe Kapitel Fließgleichgewicht) sollte regelmäßig analysiert werden! Ein stabiles, erfolgreiches System sollte nicht beeinflusst, Risiken jedoch immer minimiert werden. In der folgenden Tabelle sind auf Basis der statistischen Auswertungen und Erfahrungen aus 1809 Biogasanlagen zusammengefasst. Anlagen innerhalb dieses Bereichs laufen statistisch gesehen wirtschaftlicher. Da viele Faktoren dabei eine Rolle spielen und jede Anlage für sich einzigartig ist, müssen zur Bewertung und einer möglichen Optimierung des Prozesses möglichst viele Parameter ermittelt und Daten ausgewertet werden. Denn in allen Bereichen gibt es gut und schlecht laufende Anlagen.

**Tabelle 11:** Durchschnittswerte der Analyseergebnisse aus 1809 NawaRo-Fermentern und die statistisch ermittelten optimalen Bereiche der jeweiligen Messgrößen. HAceq: Essigsäureäquivalent (Summe der freien organischen Säuren, normiert auf das Molgewicht von Essigsäure) [Bioreact].

Messgröße	Einheit	Mittelwert	von Bioreact empfohlener Bereich
FOS	g HAceq/L	4,25	<5,0
TAC	g CaCO <sub>3</sub> /L	13,20	10 – 16
FOS/TAC		0,36	<0,35
pH	log cH <sup>+</sup>	7,73	7,5 – 8,0
EC	mS/cm	28,28	22 – 34
NH <sub>4</sub> -N	g/L	2,27	1,5– 3,0
Essigsäure	g/L	1,09	0 – 1
Propionsäure	g/L	0,44	0 – 0,20
Buttersäure	g/L	0,04	<0,025
iso-Buttersäure	g/L	0,05	<0,025
Valeriansäure	g/L	0,02	<0,025
iso-Valeriansäure	g/L	0,08	<0,025
Capronsäure	g/L	0,01	<0,025
HAceq	g/L	1,72	<1,25
Temperatur	°C	41,9	39-42

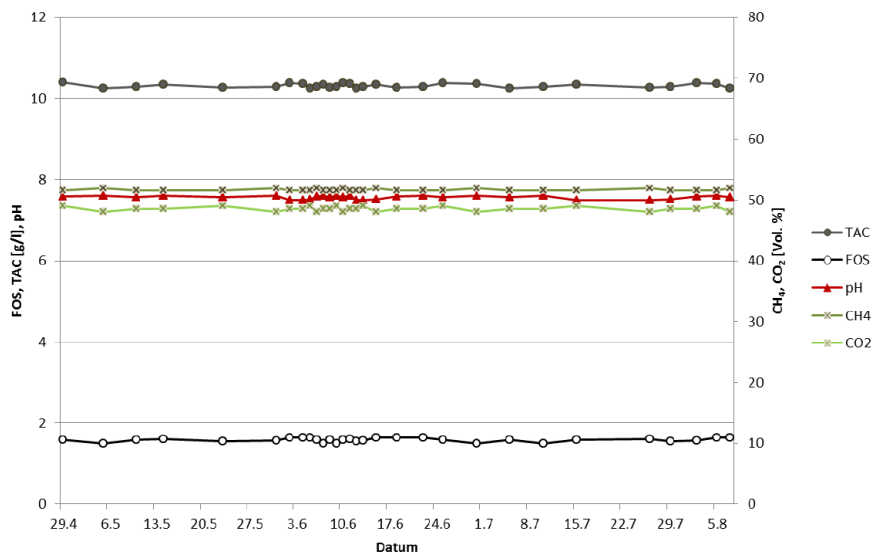
## 2.4.10 Ursachen von Prozessstörungen und Handlungsmaßnahmen zur Behebung

### 2.4.10.1 Das Fließgleichgewicht

Der angestrebte Idealzustand eines Biogasreaktors ist das Fließgleichgewicht. Wenn Säurebildung nach Substratspaltung und Säureabbau durch Biogasbildung in einer optimalen Balance stehen, pendelt sich der pH-Wert i.d.R. auf einen optimalen, physiologischen Wert um pH 7,5 ein und die Methanbildung erfolgt kontinuierlich (Abbildung 57)

Grundlage für ein stabiles Fließgleichgewicht ist ein technisch und biologisch einwandfreier Betrieb der Anlage. Dazu zählen eine effektive und verlässliche Rührwerks- und Einbringtechnik, konstante Gärtemperatur (mesophil oder thermophil), optimale Substratqualität, ein der Anlagenleistung angepasster Substratinput (Faulraumbelastung, Verweilzeit) und eine ausgewogene Einsatzstoffauswahl (C/N-Verhältnis), sowie eine optimale Versorgung der Mikrobiologie mit Makro- und Mikroelementen.

Sind diese Voraussetzungen gegeben, ist die Basis für optimale Substratausnutzung und Gasausbeute, und somit die sichere Wirtschaftlichkeit einer Anlage gelegt.



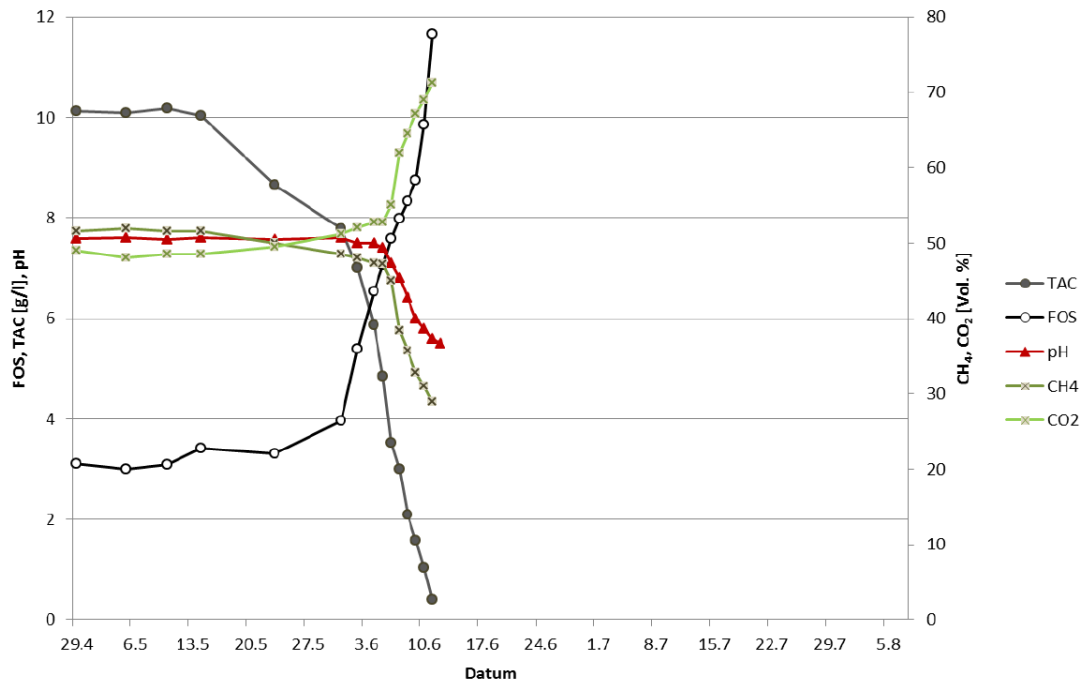
**Abbildung 57:** Biogasreaktor im Fließgleichgewicht. Bei störungsfreiem Betrieb verhalten sich alle Parameter konstant. Zugeführtes Substrat wird ohne Anreicherung von Säuren umgesetzt, die Biogasbildung verläuft gleichmäßig [Bioreact].

Wird das Fließgleichgewicht aufgrund biologischer oder technischer Ursachen gestört, sind sinkende bakterielle Stoffwechselraten, Gasverluste und wirtschaftliche Einbußen die Folge.

Mögliche Ursachen, Symptome und Gegenmaßnahmen der häufigsten Prozessstörungen sollen im Folgenden betrachtet werden.

Die häufigste Symptomatik in Biogasanlagen ist ein Anstieg der organischen Säuren (FOS) bei gleichzeitiger Abnahme des Hydrogencarbonatpuffers (TAC) und zunächst konstantem pH-Wert.

Gleichzeitig sinkt der  $\text{CH}_4$ -Gehalt, während der  $\text{CO}_2$ -Gehalt durch die Pufferung ansteigt ( $\text{CO}_2$  aus Kohlensäure, Abbildung 58). Die Diagnose lautet dann oft: Versauerung.



**Abbildung 58:** Versauerung eines Biogasreaktors (Labordaten). Durch die Pufferung der ansteigenden Säuren sinkt der TAC (offenes Puffersystem), während der pH-Wert zunächst konstant bleibt. Das Unterschreiten eines anlagenspezifischen TAC-Grenzwertes führt schließlich zum Absinken des pH-Wertes. Dies hat die Inaktivierung der methanogenen Bakterien zur Folge – die Biogasbildung geht zurück, d.h. der Methangehalt im Biogas sinkt, bei gleichzeitigem Anstieg des  $\text{CO}_2$ -Gehaltes durch Ausgasung von  $\text{CO}_2$  aus Kohlensäure, – während die säurebildenden Bakterien aktiv bleiben: die Versauerung des Reaktors wird beschleunigt [Bioreact].

Eine Versauerung liegt dann vor, wenn der pH-Wert so weit gefallen ist, dass die methanogenen Bakterien ihre Stoffwechselaktivität reduzieren oder völlig einstellen (ca. ab pH 6,5). Der optimale pH-Bereich in Biogasanlagen liegt zwischen pH 7,4 und pH 8,0. Dieser Bereich wird in der Biogasanlage vor allem durch einen ausreichenden Hydrogencarbonat-Puffer stabilisiert.

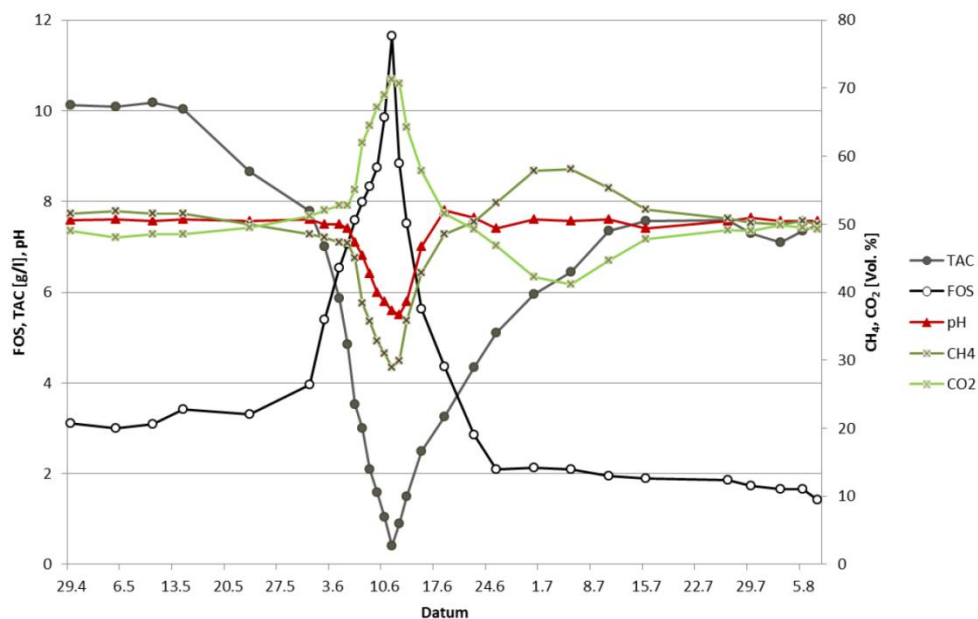
Die in jedem Biogasprozess durch Säurebildung entstehenden Protonen ( $\text{H}^+$ ) werden vom Hydrogencarbonat-Puffer abgefangen und in Form von  $\text{CO}_2$  abgegeben (offenes Puffersystem). Somit verändert sich der pH-Wert im Fermenter kaum, solange die Pufferkapazität (TAC) ausreichend groß ist.

Die Ursachen für eine Versauerung können vielfältig sein: Überfütterung (z.B. defekte Wägeeinrichtung, Futterkegel unter Einbringung, aufschwimmende Sinkschichten u.ä.), Futterumstellung („neuer“ Mais, neues Silo, frischer Grasschnitt in den Sommermonaten), Spurenelementmangel, Hemmung (z.B. Schwefelwasserstoff, Ammoniak, Antibiotika, Mycotoxine) u.a.

Ist der TAC jedoch erst einmal erschöpft und der pH-Wert unter 6,5 gefallen, stellen die milieusensiblen methanogenen Bakterien ihre Stoffwechselaktivität ein: die Biogasbildung kommt zum Erliegen.

Lösungen können eine Futterreduktion sein, der Einsatz von Spurenelementen und/oder die Beseitigung des Hemmstoffes. Auch die Zugabe von Rindergülle oder Material aus anderen, ebenfalls geheizten Behältern, z.B. Nachgärer, kann eine Lösung sein. Dabei sollte auf die Erhaltung der Prozesstemperatur in dem versauerten Fermenter und auf den pH des hinzugefügten Materials geachtet werden. Der pH-Wert sollte nicht unter pH 7 und der Säuregehalt (FOS) nicht über 2 g/L liegen. Die jeweilige Vorgehensweise sollte in Absprache mit einem erfahrenen Anlagenberater geschehen und kann nur situationspezifisch entschieden werden!

Um die Erholung des Prozesses zu beschleunigen, kann der pH-Wert mit pufferverstärkenden Mitteln angehoben und der TAC ergänzt werden.



**Abbildung 59:** Versauerung eines Biogasreaktors mit anschließender Erholungsphase (Labordaten). Durch die Pufferung der ansteigenden Säuren sinkt der TAC (offenes Puffersystem), während der pH-Wert zunächst konstant bleibt. Das Unterschreiten eines anlagenspezifischen TAC-Grenzwertes führt schließlich zum Absinken des pH-Wertes. Dies hat die Inaktivierung der methanogenen Bakterien zur Folge – die Biogasbildung geht zurück, d.h. der Methangehalt im Biogas sinkt, bei gleichzeitigem Anstieg des CO<sub>2</sub>-Gehaltes durch Ausgasung von CO<sub>2</sub> aus Kohlensäure,- während die säurebildenden Bakterien aktiv bleiben: die Versauerung des Reaktors wird beschleunigt. Nach Zugabe von Bioreact® Bicarbo (roter Pfeil) erholen sich sowohl pH-Wert als auch TAC rasch und die Methanbildner nehmen ihre Stoffwechselaktivität wieder auf. Bakteriell gebildetes CO<sub>2</sub> löst sich in der Gärflüssigkeit und formt Hydrogencarbonat (TAC) (Methanüberschuss) [Bioreact].

#### 2.4.10.1.1 Spurenelementmangel

Von den über 100 bekannten natürlichen Elementen werden 11 in allen bekannten Lebewesen genutzt, sei es Mensch, Tier oder Bakterium: die Makroelemente H, C, N, O, Na, Mg, P, S, K, Ca und Fe.<sup>7</sup>

<sup>7</sup> H: Wasserstoff, C: Kohlenstoff, N: Stickstoff, O: Sauerstoff, Na: Natrium, Mg: Magnesium, P: Phosphor, S: Schwefel, K: Kalium, Ca: Calcium, Fe: Eisen, Cu: Kupfer, Zn: Zink, Mn: Mangan, Ni: Nickel, Se: Selen, Co: Cobalt, Mo: Molybdän, W: Wolfram, V: Vanadium

Andere, die Spurenelemente, werden nur von bestimmten Lebensformen und nur in geringen Konzentrationen benötigt. Diese Elemente, in den meisten Fällen Metalle (bei vielen Organismen Cu, Zn, Mn aber auch Nichtmetalle wie Bor)<sup>4</sup>, sind oft obligatorischer Bestandteil aktiver Zentren von Enzymen und dort an Redox-Reaktionen beteiligt.

Je „exotischer“ der natürliche Standort eines Organismus, desto „exotischer“ kann auch sein Bedarf an Spurenelementen sein. Die einzigartigen Stoffwechsellösungen der methanogenen Archaeen benötigen einzigartige Enzyme und diese wiederum einzigartige Spurenelemente wie Ni, Se, Co, Mo, W, oder V (Tabelle 12).<sup>4</sup>

**Tabelle 12:** Enzyme der methanogenen Archaeobakterien und die für ihre Funktion notwendigen Spurenelemente. Quelle Prof. Deppenmeier, Uni Bonn.

Besondere Enzyme der methanogenen Archaea	Notwendige Spurenelemente	Bemerkung
Hydrogenasen	Ni, Fe, Se	Se nur für Hydrogenasen aus reinen H <sub>2</sub> und CO <sub>2</sub> -Verwertern
CO-Dehydrogenase	Ni, Fe, Co	
Methyl-CoM-Dehydrogenase	Ni	MCR macht bis zu 10 % des Gesamtproteins eines Archaeobakteriums aus
Methyltransferasen	Zn, Co	
Nitrogenasen	Mo, W, V	
Formylmethanofuran Dehydrogenasen	Mo, W	

So benötigt beispielsweise der Kofaktor F430 des Enzyms Methyl-Coenzym-M-Reduktase das Element Nickel in seinem aktiven Zentrum. Nur mit einem gebundenen Nickelatom kann dieses Enzym den letzten Abbauschritt der Methanogenese katalysieren und Methan freisetzen. Von den genannten Spurenelementen benötigen die methanogenen Archaeobakterien im Fermenter oft nur µg/l. Trotzdem können Spurenelemente - abhängig von den Input-Stoffen der Biogasanlage - in zu geringen Konzentrationen, d.h. im Mangel, vorliegen und die Stoffwechselaktivität der Methanbakterien begrenzen.

Eine solche durch Spurenelementmangel hervorgerufene Absenkung des Stoffwechsels zeigt sich am deutlichsten im Absinken der Methankonzentration sowie einem Anstieg des Wasserstoff-Partialdrucks (H<sub>2</sub>) und der Propionsäure im Fermenter. Grund für den Propionsäure-Anstieg ist die Tatsache, dass der Abbau von Propionsäure zu Essigsäure, CO<sub>2</sub> und H<sub>2</sub> stark endergon ist, d.h. der Reaktion für ihren Ablauf Energie zugeführt werden muss. Die Produkte müssen dem Prozess zudem ständig entzogen werden, sonst kommt es zu einer Endproduktthemmung.

Ein weiterer wichtiger Indikator für möglichen Spurenelementmangel ist ein Anstieg der „Isosäuren“, z.B. der Iso-Buttersäure (= 2-Methylpropansäure), die bei einem Überschuss an H<sub>2</sub> (Wasserstoff) durch Methylierung von Propionsäure entsteht.

Diese Säuren reichern sich häufig schleichend im laufenden Betrieb an. Durch regelmäßige Analysen (Gärsäuremuster/GC) lassen sie sich verlässlich frühzeitig nachweisen. Sie sind schwer abbaubar und darüber hinaus in hohen Konzentrationen toxisch. Reichern sie sich im Fermenter an, verläuft der Substratabbau unvollständig und die Gasaubeute sinkt. Im Fall schweren Spurenelementmangels kommt es zur Versauerung bis zum vollständigen Erliegen der Gasproduktion.

Aus den genannten Gründen ist eine optimale Versorgung von BGA mit Spurenelementen die Grundlage, um bei hohen Raumbelastungen, wechselnden Einsatzstoffen oder strombedarfsangepasster Fahrweise einer Anlage den biologischen Prozess stabil zu halten. Der Nachweis von Spurenelementen ist durch eine ICPE-Analyse leicht möglich.

Um einem Spurenelementmangel vorzubeugen oder entgegenzuwirken, sollte daher regelmäßig eine ICPE-Analyse der Spurenelemente durchgeführt werden.

Bioreact® SPURENELEMENTE bereits seit Jahren in über 500 Biogasanlagen erfolgreich eingesetzt. Sie ergänzen durch ihre anlagenspezifische Zusammensetzung gezielt die im Mangel vorliegenden Elemente, vermeiden so Überdosierungen und schonen so Geldbeutel und Umwelt. Bioreact® SPURENELEMENTE werden in fester und flüssiger Form angeboten.

Vor jedem Erst- oder Folgeinsatz der Bioreact® SPURENELEMENTE wird die für Ihre Fütterungssituation optimale Menge an Spurenelementen auf der Grundlage aktueller Analysen des Fermenters (Gaschromatographie der Fettsäuren, ICPE-Spurenelementanalytik) individuell an den aktuellen Bedarf und auf Basis wissenschaftlich ermittelter Bedarfsnormen an die Biogasanlage angepasst.

Ein Erfolg des Spurenelementeinsatzes ist direkt messbar: Die Säure-Konzentrationen (besonders die der „Isosäuren“) sinken, der Gasertrag steigt und der Methangehalt im Biogas erhöht sich. Erfahrungsgemäß läuft ein gut mit Spurenelementen versorgter Fermenter stabiler und reagiert resistenter auf Substratumstellungen/-schwankungen (z.B. „neuer“ Mais, frisches Silo, mehr Getreide, wechselnde Reststoffe), Erhöhungen der Faulraumbelastung bei Leistungserhöhung und Veränderungen der Milieubedingungen (z.B. Temperaturschwankungen oder ausbleibende Güllezufuhr wegen zugefrorener Leitungen im Winter u.ä.). Das im EEG 2012 anvisierte strombedarfsangepasste Fahren von BGA stellt ebenfalls höchste Anforderungen an die biologische Prozessstabilität, deren Basis eine ausreichende Versorgung mit Spurenelementen darstellt.

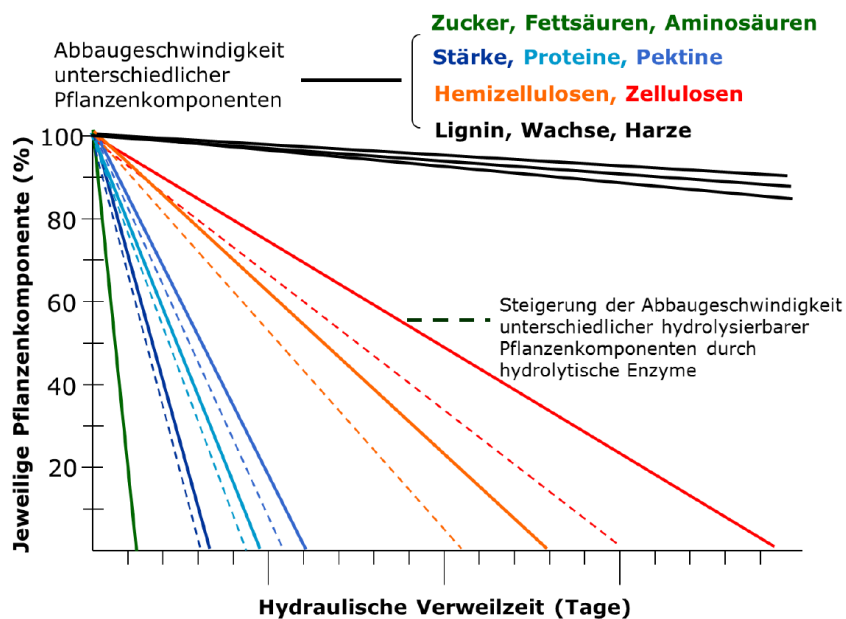
#### **2.4.10.2 Unvollständiger Substratabbau – erhöhtes Restgaspotential**

In Biogasanlagen wird organische Biomasse von anaeroben Bakterien unter Luftabschluss zu CH<sub>4</sub> und CO<sub>2</sub> vergoren. Während das Ausgangsmaterial aus so großen Molekülen besteht, dass es von den Bakterienzellen gar nicht aufgenommen werden kann, sind die gasförmigen Endprodukte im Vergleich winzig klein. Wie geht dieser Abbau vonstatten?

Bevor Biomasse von Zellen aufgenommen und energetisch genutzt werden kann, muss sie aufgrund ihrer Größe in ihre Einzelbausteine (Zucker, Aminosäuren, Fettsäuren) gespalten werden. Das Spalten dieser Ketten wird in der Natur von Enzymen, den Hydrolasen, katalysiert, von denen es Tausende verschiedener Arten gibt, die nur substratspezifisch arbeiten (Schlüssel-Schloss-Prinzip). Um die

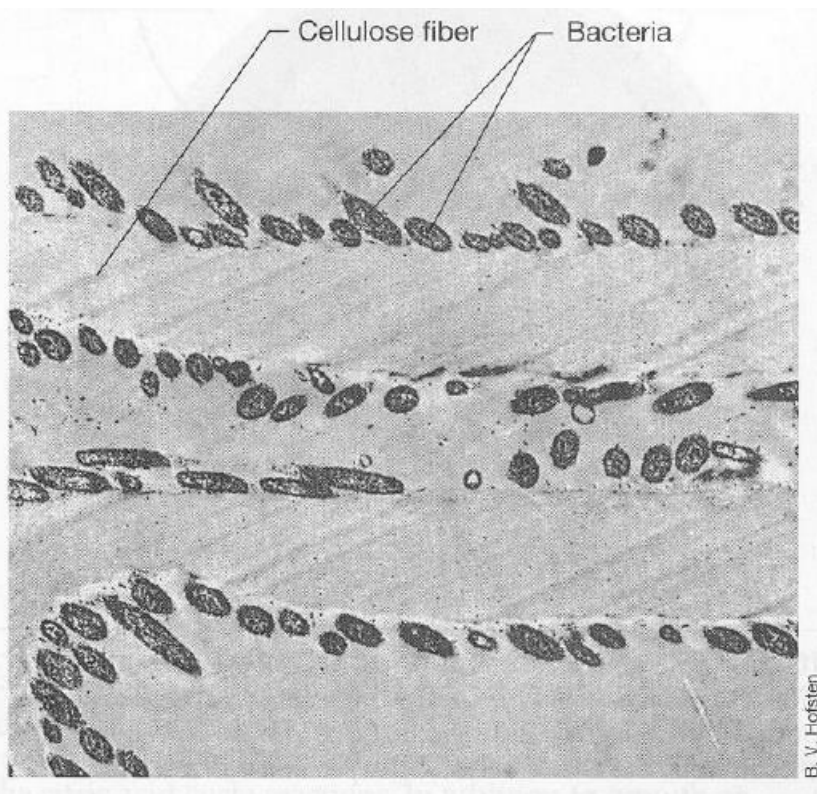


hochkomplexen Pflanzenstrukturen –insbesondere die energiereichen Zellwände- effizient abbauen zu können, ist daher ein Zusammenwirken unterschiedlicher Enzyme notwendig (Abbildung 60).



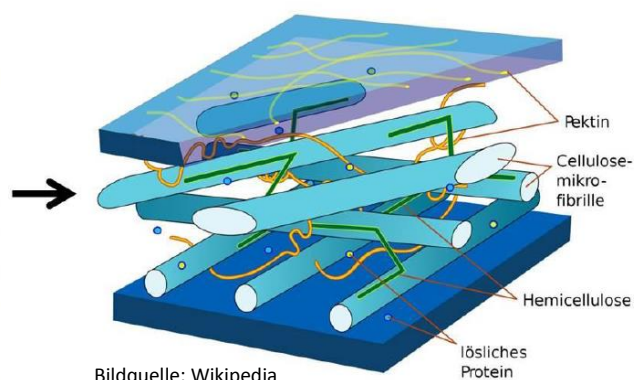
**Abbildung 60:** Beschleunigung des Substratabbaus durch Zugabe von Enzymen. Durch die beschleunigte Hydrolyse wird mehr Substrat pro Zeit umgesetzt, d.h., insbesondere bei faserreichen Inputstoffen, kann der bestehende Faulraum optimaler genutzt werden [Bioreact].

Da Bakterien an den zu spaltenden Zellwänden haften und ihre Enzyme dort ortsspezifisch freisetzen (Abbildung 61), benötigen sie zunächst den direkten Kontakt mit dem zu spaltenden Molekül, hier der Zellulose, um daraus Zucker freisetzen und selbst energetisch nutzen zu können. Da sie meist bewegungsunfähig sind, kommt einer effektiven Fermenterrührtechnik große Bedeutung zu, um die Bakterien in Kontakt mit ihrer Nahrung zu bringen.



**Abbildung 61:** Zellulosespaltung durch extrazelluläre Enzyme von Bakterien (Elektronenmikroskopische Aufnahme). Hydrolytische Bakterien haften an der Zelloberfläche. Durch extrazellulär abgegebene Hydrolasen werden die einzelnen Zellulosemoleküle der Zellwand in Einzelzucker gespalten, die von der Bakterienzelle aufgenommen werden können[64]

Da die pflanzliche Zellwand für die Pflanze in der Natur Schutz- und Stützfunktion übernimmt, ist sie in ihrem Aufbau sehr komplex (Abbildung 62). Dies erschwert den hydrolytischen Bakterien eine Anlagerung an die energetisch interessanten Zellulosemoleküle. Daher nimmt der Grad der Zerkleinerung eines Substrates einen großen Einfluss auf die Abbaugeschwindigkeit. Je kleiner die Substratpartikel, desto größer ist die Angriffsfläche für die Bakterien und desto schneller geht der Abbau vonstatten.



Bildquelle: Wikipedia

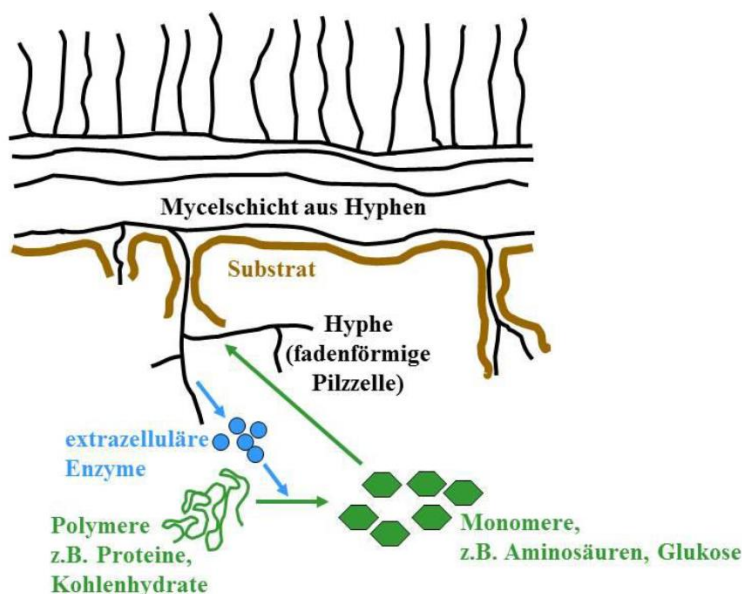
**Abbildung 62:** Roggen-Ganzpflanzensilage(links) und der Aufbau der pflanzlichen Zellwand (rechts, schematisch). Die pflanzliche Zellwand besteht primär aus quer zueinander verlaufenden und übereinander liegenden Zellulosefibrillen, die in eine Matrix eingebettet sind [Bioreact].

Neben ihrer substratspezifischen Abbauarbeit, wirken Enzyme vor allem als Katalysatoren. Katalysatoren beschleunigen biologische Reaktionen, die bei ausreichend langer Zeit auch von selbst ablaufen würden. Häufig sind die Verweilzeiten in BGA aufgrund hoher Raumbelastungen, nachträglicher Leistungserhöhungen und/oder Substratumstellungen jedoch zu gering, um die Abbaureaktionen vollständig ablaufen zu lassen.

Dies kann zu unvollständiger Substratausnutzung und verringerten Gasausbeuten führen, die zweifach Ertragseinbußen nach sich ziehen können: Zum Ersten aufgrund ungenutzten, bezahlten Substrates und zum Zweiten aufgrund unterdurchschnittlicher Stromerlöse (Schlechter BHKW-Auslastung).

Für die Wirtschaftlichkeit von Biogasanlagen bedeutet daher eine Beschleunigung des biologischen Abbaus ganz konkret eine schnellere Gasausbeute und somit eine optimalere Ausnutzung des bestehenden Faulraumes pro Zeit. Insbesondere wenn die Hydrolyse aufgrund kurzer Verweilzeiten und/oder hoher Raumbelastungen der limitierende, geschwindigkeitsbestimmende Faktor der Biogasbildung ist, wird eine Erhöhung der Abbaugeschwindigkeit wirtschaftlich interessant. In einem solchen Fall ist eine Unterstützung des Prozesses durch Enzyme sinnvoll.

Bioreact®-ENZYME sind speziell für den Abbau nachwachsender Rohstoffe entwickelte Multienzymkomplexe. Sie werden in einem Verfahren der Feststoff-Fermentation aus Pilzen gewonnen, den effektivsten natürlich vorkommenden Zersettern von Cellulosen und Hemicellulosen. Pilze scheiden ihre extrazellulären Enzyme in die sie umgebenden Substrate aus (Abbildung 63). Die Enzyme sind in der Lage die schlecht verfügbaren, langkettigen Moleküle der pflanzlichen Zellwand (Cellulosen, Hemicellulosen, Stärke, Pektine, Proteine, Fette) effizient zu zerkleinern und deren Einzelbausteine wie Zucker, Aminosäuren und Fettsäuren freizusetzen, die von den Bakterien direkt aufgenommen und zu Methan verstoffwechselt werden können. Zugleich nimmt die Viskosität (Zähflüssigkeit) des Fermenterinhalt ab. Er wird fließfähiger und homogener, was Pumpen und Rührwerke schont und den Verschleiß senkt (siehe Folgekapitel).



**Abbildung 63:** Von Pilzmycel ausgeschiedene, extrazelluläre Enzyme spalten Polymere in ihre Monomere[Bioreact].

Durch die beschleunigte und verbesserte Spaltung von Cellulose und Hemicellulosen werden Substrate für die Bakterien schneller verfügbar. Auf diese Weise erhöht der Einsatz dieser Enzyme die Durchsatzgeschwindigkeit der Einsatzstoffe. Dies wirkt sich insbesondere bei kurzen Verweilzeiten positiv auf die Wirtschaftlichkeit der Anlage aus, da bestehender Faulraum pro Zeit effektiver genutzt werden kann.

In der Praxis kann bei hydraulischen Verweilzeiten unter 110 Tagen durch den Einsatz der Bioreact®-ENZYMEN eine Verbesserung der Substratausnutzung um durchschnittlich 14 % erzielt werden. Bei Anlagen mit hydraulischen Verweilzeiten zwischen 110 und 150 Tagen ließen sich Verbesserungen der Substratausnutzung um durchschnittlich 8 % erzielen.

Der Einsatz der Bioreact®-ENZYME ist aus den genannten Gründen besonders bei kurzen Verweilzeiten, hohen Faulraumbelastungen, hohen oTS-Gehalten und hoher Viskosität zu empfehlen. Aufgrund der großen Bandbreite der in BGA eingesetzten Substrate ist das Bioreact Produktprogramm als Bausteinsystem aufgebaut, das durch Kombination der verschiedenen Bioreact®-Enzymprodukte den speziellen Erfordernissen jeder Fütterungssituation gerecht werden kann. Es umfasst derzeit die Enzymprodukte Bioreact®-BIOGASVERSTÄRKER MAIS PLUS; Bioreact®-BIOGASVERSTÄRKER GRAS; Bioreact®-VISKO-F (Faserstoffe) und Bioreact®-VISKO-S (Schleimstoffe) und den seit vielen Jahren bewährten Bioreact®-SCHWIMMSCHICHTLÖSER, der zuverlässig Schwimm- und Sinkschichten auflöst oder deren Neu-/Bildung vorbeugt.

Der Bioreact®-BIOGASVERSTÄRKER MAIS PLUS ist insbesondere auf den Abbau von Maissilagen mit hohen TS-Gehalten zugeschnitten. Bioreact®-BIOGASVERSTÄRKER GRAS Plus eignet sich für BGA, die hohe Mengen Grassilage, GPS oder Festmist einsetzen. In Kombination mit Bioreact®-VISKO-S wird die Vergärung von Grünroggen-GPS verbessert. Die Bioreact®-VISKO-Produkte sind zur Beseitigung von Viskositätsproblemen aufgrund hoher Faserstoffgehalte (Bioreact®-VISKO-F) sowie hoher Schleimstoffgehalte (Bioreact®-VISKO-S) entwickelt worden.

#### **2.4.10.3 Erhöhte Viskosität**

Viskosität wird als „Zähflüssigkeit“ eines Mediums definiert: je höher die Viskosität, desto dickflüssiger ist eine Flüssigkeit und umgekehrt.

Für den Fermenterinhalt einer Biogasanlage bedeutet das: je höher die Viskosität, d.h. je dickflüssiger das Substrat, desto höher liegen Rühr- und Pumpaufwand, d.h. Eigenstromverbrauch sowie wartungs- und kostenintensiver Verschleiß steigen, desto eher bilden sich Substrat- und Temperaturgradienten und desto wahrscheinlicher sind lokale Säurenansammlungen, substratarmer „Hungerregionen“ und verminderter Gasaustritt aus der flüssigen Phase. Auch das Risiko von Schwimm- oder Sinkschichten steigt. Darüber hinaus führt der unvollständige Substratabbau bei hoher Viskosität zu einer verminderten bakteriellen Energieaufnahme und verminderter Gasproduktion. Die dadurch entstehenden erhöhten Substratkosten können im schlimmsten Fall die Wirtschaftlichkeit einer Anlage langfristig gefährden.

Lange wurden diese Effekte als gegeben hingenommen. Doch inzwischen belegen wissenschaftliche Studien, dass die Zugabe von Bioreact®-ENZYMEN in den Fermenter die „Fließeigenschaften optimiert und somit den Rühraufwand verringert“ [65, 66]. Der Enzymeinsatz lohnt sich vor allem bei trockenmasse- und rohfaserreichen Substraten. Auch neue Untersuchungen einer Masterarbeit der Universität Göttingen beschrieben deutliche Viskositätsverbesserungen durch den Einsatz von

Enzymen. Je höher der TS-Gehalt eines Fermenters war, desto deutlicher traten die Effekte auf. Bioreact®-VISKO greift speziell an den Ursachen hoher Viskosität an. Moleküle, die aus langen Zuckerketten bestehen (Cellulose, Hemicellulosen (Xylan), Pektine u.a.) werden von Bioreact®-VISKO „verflüssigt“. Das Besondere an Bioreact®-VISKO ist nicht nur dessen hohe Aktivität an zuckerkettenspaltenden „Endo“-Enzymen. Bewusst wurde der Anteil an zuckerfreisetzenden „Exo“-Enzymen in dieser Neuentwicklung reduziert. Denn nicht eine Erhöhung der Substratausnutzung - die in dieser Anwendung ein spannender „Nebeneffekt“ ist - steht im Vordergrund, sondern allein die Homogenisierung des Fermenterinhalt und damit die Stabilisierung des Gärprozesses.

#### 2.4.10.4 Ammoniak-Hemmung

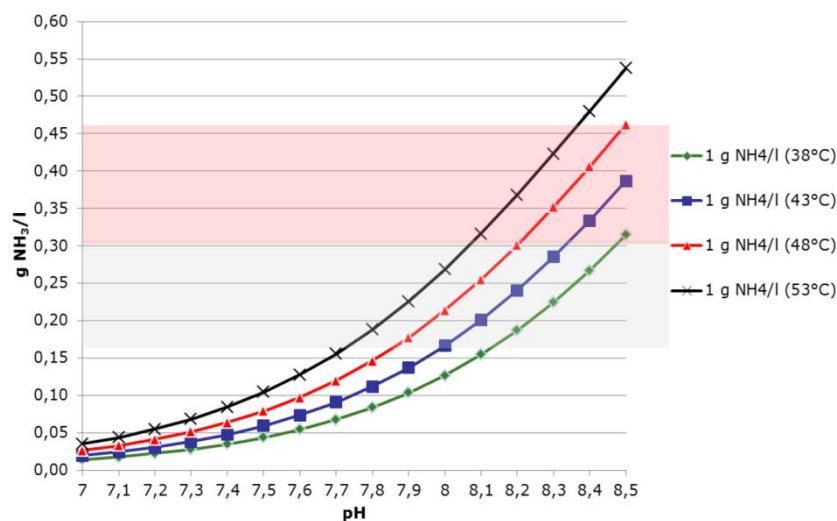
Eine Ammoniakhemmung kommt häufig in Anlagen mit hohen Proteinfrachten im Input vor, z.B. durch den Einsatz von Geflügelausscheidungen (Hühnermist, Hühnertrockenkot), Schlachtabfällen, Speiseresten und/oder klee gras- und/oder getreidelastigem Input. Sie stellt sich in der Regel durch substratbedingt hohe Stickstofffrachten ein ( $> 3,5 \text{ g/l NH}_4\text{-N}$ ) und ist reversibel.

Die Störung äußert sich in einem steigenden pH-Wert (deutlich über pH 8), steigendem TAC-Wert (häufig über 20 g/l) und einem deutlichen Anstieg der Säuren. Ein typisches Ammoniakhemmmuster zeigt höhere Propion- als Essigsäurekonzentrationen und die Anwesenheit von Iso-Säuren (Iso-Buttersäure, Iso-Valeriansäure). Wer den nötigen Ammoniak-Gassensor besitzt, stellt darüber hinaus steigende  $\text{NH}_3$ -Konzentrationen im Biogas fest.

Der Anstieg der TAC- und pH-Werte ist auf eine Anreicherung von Ammoniumhydrogencarbonat ( $\text{NH}_4\text{HCO}_3$ ) zurückzuführen. Steuert man in diesem Stadium nicht gegen, kann das zu einer Hemmung der Hydrolyse führen. In einem solchen Fall können die Einsatzstoffe aufgrund fehlender Zuckerfreisetzung in der Hydrolyse auch in den folgenden Abbaustufen (Säurebildung, Essigsäurebildung, Methanbildung) nicht mehr umgesetzt werden, so dass die Säurekonzentration gegen Null sinkt und die Biogasproduktion zurückgeht.

Im Gegensatz zur Hydrolysehemmung durch hohe pH-Werte, hemmt das Zellgift Ammoniak ( $\text{NH}_3$ ) direkt die Stoffwechselaktivität der Methanbakterien. Dies führt wie vorhin schon erwähnt zu einer Anreicherung von Säuren aus den mittleren Abbaustufen, v.a. Propion-, Essig- und Iso-Säuren.

Darüber hinaus gilt der Zusammenhang: je höher der pH-Wert und die Gärtemperatur, desto mehr Ammoniak entsteht ( $\text{pK}_s \text{ NH}_4^+/\text{NH}_3$ : 9,25, Abbildung 64). Thermophil betriebene Biogasanlagen (ca.  $50^\circ\text{C}$ ) laufen daher stärker Gefahr eine  $\text{NH}_3$ -Toxizität zu entwickeln.



**Abbildung 64:** Beschleunigte  $\text{NH}_3$ -Entstehung durch Temperaturerhöhung. Grau markierter Bereich: erste Hemmwirkungen, roter Bereich darüber: starke Hemmwirkung. Für den Betrieb einer Biogasanlage bedeutet dieser Zusammenhang, dass deren Prozesstemperatur bei hohen Stickstofffrachten im Input im mesophilen Bereich (ca. 38-42°C) liegen sollte.

Gegenmaßnahmen zur Verminderung einer Stickstoffhemmung können eine Senkung des Stickstoffeintrages durch veränderte Einsatzstoffzusammensetzung sein. Aus der Erfahrung lässt sich sagen, dass schnell verfügbare und saure Substrate wie beispielsweise stärkehaltige Substrate (angemischtes Getreide/Schrot, CCM, LKS u.a.), Glycerin und Sickersäfte helfen, den pH-Wert-Anstieg zu bremsen.

Stehen alternative Substrate nicht zur Verfügung oder dürfen sie nicht eingesetzt werden, können biologisch unbedenkliche Stickstoffbinder helfen.

#### 2.4.11 Schwefelwasserstoff

Im Biogasprozess werden Schwefelverbindungen wie z.B. Sulfate, von Mikroorganismen (den sog. Desulfurikanten) zu Schwefelwasserstoff reduziert. Erhöhte Anteile an proteinreichen Substraten wie z.B. Geflügelkot, Getreide, Speiseabfälle, Schlachtabfälle, Gülle etc. führen zu einem Anstieg der Sulfid-Konzentration im Fermenter.

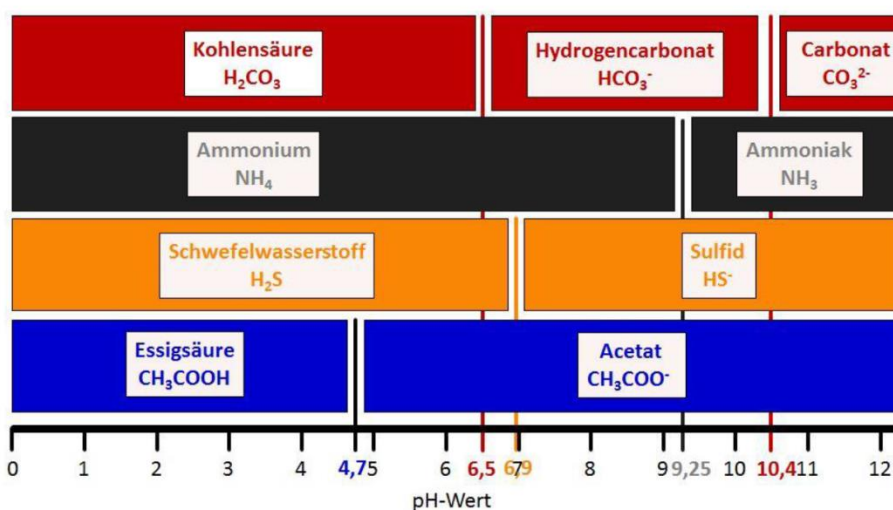
Das Sulfid ist im Biogasfermenter als gasförmiger Schwefelwasserstoff ( $\text{H}_2\text{S}$ ), als gelöster Schwefelwasserstoff ( $\text{H}_2\text{S}$ ) und als gelöstes  $\text{HS}^-$  sowie  $\text{S}_2^-$  zu finden. Schwefelwasserstoff ist neben Methan ( $\text{CH}_4$ ), Kohlendioxid ( $\text{CO}_2$ ), Stickstoff ( $\text{N}_2$ ), Wasserstoff ( $\text{H}_2$ ) und Ammoniak ( $\text{NH}_3$ ) Bestandteil des Biogases.

Der undissoziierte, gelöste Schwefelwasserstoff hat eine direkte toxische Wirkung auf viele fermenterbewohnende Mikroorganismen, vor allem auf die empfindlichen Methanbakterien. Darüber hinaus konkurrieren die sulfatverwertenden Desulfurikanten mit den methanogenen Archaeobakterien um Wasserstoff ( $\text{H}_2$ ) und behindern den Prozess der Methanbildung. Zudem werden durch Sulfide für Methanbakterien wichtige Spurenelemente wie z.B. Kobalt und Nickel irreversibel ausgefällt.

Aus diesem Grund sollte auf die Zugabe von Sulfat-Verbindungen in der Biogasanlage möglichst verzichtet werden.

Das chemische Gleichgewicht zwischen der undissoziierten und den dissoziierten Formen des Schwefelwasserstoffs ( $H_2S$  bzw.  $HS^-$  und  $S_2^-$ ) ist pH-Wert-abhängig. Bei pH 6,0 liegen über 90 % des Gesamtsulfides als  $H_2S$  vor. Bei dem in Biogasanlagen vorliegenden pH-Bereich zwischen pH 7,4 und 8,0 liegen 30 % (pH 7,4) und < 10 % (pH 8,0) des Sulfides als  $H_2S$  vor.

Das bedeutet, dass eine  $H_2S$ -Hemmung mit sinkendem pH-Wert und der damit verbundenen Verschiebung des chemischen Gleichgewichts in Richtung des undissoziierten  $H_2S$  zunimmt. Diese Tatsache kann bei Versauerung die ausschlaggebende Rolle spielen und den Rückgang der Gasproduktion maßgeblich beschleunigen.



**Abbildung 65:** pH-abhängige Gleichgewichte in Biogasanlagen. Gezeigt wird der Zusammenhang zwischen pH-Wert und Umwandlung der diversen Spezies. Das gelb unterlegte System zeigt den Zusammenhang zwischen sinkendem pH-Wert und steigender Toxizität von Schwefelwasserstoff. Im Gegensatz dazu kommt es im schwarz unterlegten System bei steigendem pH-Wert zu vermehrter Bildung giftigen Ammoniaks[Bioreact].

Neben den genannten biologischen Wirkungen wird  $H_2S$  bei der Verbrennung im BHKW zu schwefeliger Säure oxidiert. Dies führt zu Korrosion an Kolben und Zylinder und senkt stark die Lebensdauer des BHKW.

Neben den genannten biologischen Wirkungen wird  $H_2S$  bei der Verbrennung in BHKW zu schwefeliger Säure oxidiert. Dies führt zu Korrosion an Kolben und Zylindern und senkt stark die Lebensdauer von BHKW. Darüber hinaus macht die beschleunigte Versauerung des Motorenöls kürzere Ölwechselintervalle notwendig und erhöht so die Wartungskosten.

Eine  $H_2S$ -Hemmung kann über die Messung des  $H_2S$  im Biogas aufgespürt werden (vor Ort mit tragbaren Gasmessgeräten). Liegen die  $H_2S$ -Werte im Fermenter über 500 ppm, ist eine  $H_2S$ -Hemmung wahrscheinlich. Liegen sie nach Entschwefelung, d.h. unmittelbar vor dem Motor, noch über 100 ppm, treten die genannten Effekte auf Motor und Motorenöl auf.

Die Verminderung des Schwefelwasserstoffs kann über externe Entschwefelungsverfahren (z.B. Aktivkohlefilter) erfolgen, sowie über interne Verfahren, wie die Einblasung von Luftsauerstoff in den Gasraum.

Luftsauerstoff ermöglicht die Ansiedlung aerober Schwefelbakterien, die den  $H_2S$  aus dem Biogas verstoffwechseln und ihn so entfernen. Durch externe Entschwefelungsverfahren und Lufteinblasung wird der Schwefelwasserstoff nur im bereits ausgetretenen Biogas entfernt. Daher gelingt es durch diese Verfahren nicht, mögliche biologische Hemmeffekte des Schwefelwasserstoffs in der Gärflüssigkeit zu vermeiden. Darüber hinaus wird der Brennwert des Biogases durch verbleibenden Luftstickstoff gemindert.

Eine effektivere interne Entschwefelungsmöglichkeit ist daher die Zugabe von Eisenpräparaten (z.B. flüssiger Eisen-II-Chlorid-Lösung oder pulverförmigem Eisenhydroxiden) in die Gärflüssigkeit. Bei dieser Form der Entschwefelung wird die Schwefelwasserstoff-Konzentration bereits in der flüssigen Phase zuverlässig gesenkt. Sie verhindert zuverlässig Hemmungen und die Fällung von Spurenelementen durch  $H_2S$  sowie Gasminderungen durch Wasserstoffkonkurrenzen.

Eisenpräparate zur Entschwefelung haben zusammengefasst folgende Vorteile:

- wichtige Spurenelemente wie z.B. Kobalt und Nickel bleiben für die Methanbakterien verfügbar
- die Gefahr einer Hemmung der methanbildenden Bakterien durch Schwefelwasserstoff wird herabgesetzt
- Korrosion im Motorenbereich und den kondensatführenden Anlagenteilen wird minimiert
- Ölwechselintervalle verlängern sich, Wartungskosten sinken
- das Einblasen von Luft in den Fermenter kann reduziert werden, der Brennwert des Biogases wird hierdurch verbessert.
- eine Erhöhung des Inputs an proteinreichen und stickstoffhaltigen Substraten ist unter Umständen möglich

#### 2.4.11.1 Schaumbildung

Bei Schaumentwicklung in der Biogasanlage ist meist schnelle und effektive Hilfe gefordert, denn setzt der Schaum die Gaszuleitungen des BHKW und die Über-/Unterdrucksicherungen zu, sind aufgrund des Gasüberdrucks Schäden an den Behälterabdeckungen fast unvermeidlich und die Anlage ist unter Umständen für längere Zeit nicht betriebsfähig.

Schaumentstehung selbst kann kurzfristig oder dauerhaft sein. Sie kann eine Reihe möglicher Ursachen haben:

- Hohe pH-Differenzen zwischen den im Fermenter befindlichen Substraten und Einsatzstoffen (z.B. Sickersaft)  
ggfs. auch durch Rezirkulation mit Nachgärer- oder Endlagermaterial



- plötzliche, substantielle Substratumstellungen
- Einsatz bestimmter Substrate, wie z.B. Kartoffeln, Tomaten oder Rüben
- Einsatz von Substraten mit hohen Stickstofffrachten (HTK, Hühnermist, Rapsextraktionsschrot, Speisereste u.a.)
- Schnelle Biogasentstehung durch unmittelbar abbaubare Substrate (z.B. Glycerin, Rübenmus u.a.)
- Schnelle CO<sub>2</sub>-Ausgasung durch die Pufferung prozessimmanent gebildeter Säuren (CO<sub>2</sub> aus Kohlensäure/TAC)

Antischaummittel bekämpfen zuverlässig dauerhafte und akute Schaumprobleme in Biogasanlagen. Sie zerstören Schaum schnell, effektiv und nachhaltig. Entsteht Schaum kontinuierlich, z.B. hervorgerufen durch bestimmte Substrate, macht dies einen dauerhaften Einsatz des Schaumbrechers notwendig. Um in einem solchen Fall den längerfristigen Einsatz eines Schaumbrechers zu ermöglichen, sollten diese daher auf Derivaten natürlicher Fettsäuren basieren und biologisch abbaubar sein. Sie schonen das BHKW und sind für die Gärbiologie gut verträglich. Jedoch sollten immer auch die grundsätzlichen Ursachen der Schaumbildung ermittelt und wenn möglich beseitigt werden. Eine prozessbiologische Analyse und kompetente Beratung sind empfehlenswert. Die tägliche Einsatzmenge eines Antischaummittels variiert in Abhängigkeit von Art und Menge des auftretenden Schaumes und muss anlagenspezifisch ermittelt werden. Der Eintrag sollte möglichst direkt von oben auf die Oberfläche des Gärsubstrates erfolgen. Eine Zugabe über den Vormischbehälter oder eine Vorgrube ist möglich, aber nicht optimal. Ein Antischaummittel hat folgende Vorteile:

- löst gebildeten Schaum schnell auf und verhindert BHKW-Schäden
- verhindert Schaumneubildung
- ist biologisch abbaubar
- ist biologisch gut verträglich

#### 2.4.11.2 Leckagen

Leckagen an Biogasanlagen emittieren Methan. Dies führt zu teilweise massiven Rentabilitätsverlusten und der Gefahr einer Entflammung des austretenden Biogases. Darüber hinaus verringert es den positiven Umwelteffekt von Biogasanlagen und gefährdet die öffentliche und politische Akzeptanz des erneuerbaren Energieträgers Biogas.

Leckageortung wird u.a. mit Gasspürgeräten und Leckagesprays durchgeführt. Allerdings ist damit das Aufspüren von Leckagen an schwer zugänglichen Bereichen oder in komplex aufgebauten Anlagenbereichen schwierig, zeitaufwändig und teilweise gar nicht möglich.

Der Einsatz von speziellen gekühlten Infrarot-Kameras (Methanvisualisierung) stellt erstmals eine effiziente Möglichkeit dar, selbst solche schwer zugänglichen Bereiche sicher zu untersuchen. Bei fachgerechter Anwendung stellt die Kamera im Zusammenspiel mit Gasspürgeräten die beste Möglichkeit zur Leckagedetektion dar.

Leckagen sind keinesfalls immer das Resultat von Reparaturen, Extremwetterereignissen oder sonstigen Betriebsstörungen. Auch im Normalbetrieb entstehen immer wieder unbemerkt Leckagen.

Deshalb gilt es, diese frühzeitig zu erkennen und eine Wartung durchzuführen. Die Erfahrung aus über 600 Messungen auf BGA zeigt, dass die am häufigsten angetroffenen Leckagebereiche die Folienanbindung und die Seilzugdurchführung an Tauchmotorrührwerken sind. Wir empfehlen daher eine Kombination aus regelmäßiger Eigen- und Fremdkontrolle, um einen möglichst leckagearmen Betrieb zu gewährleisten.

Es lohnt sich, die Anlage einmal jährlich mit Hilfe einer Gaskamera zu begehen und eine professionelle Leckageortung durchzuführen. Der Ersttermin einer Begehung sollte unmittelbar nach Inbetriebnahme der Anlage sein. Zwischentermine können zudem sinnvoll sein

- nach Öffnen/Schließen von Membrandächern
- vor Ablauf der Gewährleistung
- bei Auftreten von plötzlichen und nicht erklärbaren Gasgerüchen
- bei ansteigendem Futtermittelbedarf für gleichbleibende Gasmenge oder
- nach Extremwetterereignissen.

### 3 Szenarien zur Technologieimplementierung

#### 3.1 Anwendung der Technologieoptionen auf Modellfälle

##### 3.1.1 Flexibilisierung der Biogasbeschickung durch die Installation einer Hydrolysestufe

Für an Biogasanlagen genutzte Eintragstechnik werden Abhängig von der Dimensionierung und der Beanspruchung bei der Projektentwicklung eine Abschreibungsdauer von 5 - 10 Jahren vorgesehen. Unabhängig von einem gezielten Umbau einer BGA zur Erhöhung der Flexibilität wird daher im Rahmen der 20 jährigen EEG-Vergütungsperiode einer BGA in der Regel zumindest eine Erneuerung der Eintragstechnik notwendig. Im Projekt REPOWERING wurde bei der Entwicklung von Szenarien zur Technologieimplementierung geprüft, inwieweit die Errichtung der Hydrolysestufe gegenüber als Ersatz einer „konventionellen Eintragstechnik“ bestehend aus Schubbodencontainern und konventionellen Dosiersystemen Vorteile hinsichtlich Anlagenleistung und Betriebssicherheit bieten kann.

Geprüft wurde das Szenario anhand des Modellfalls einer großen mit Nachwachsenden Rohstoffen betriebenen Biogasanlage mit einer Bemessungsleistung von 1,5 MW, bei der durch die Umrüstung auf eine Hydrolysestufe der Substrateinsatz von überwiegend Maissilage auf Reststoffe wie:

- Lignocellulosehaltige Reststoffe (Stroh und Festmist)
- Geflügelmist
- Grasschnitt

Die Anlagendaten der Modellanlage entstammen aus Projektbewertungen von Fraunhofer UMSICHT, die Kostenermittlung für die Umrüstung basiert auf Herstelleranfragen.

Die BGA wurde zum Zeitpunkt der ihrer Projektierung im Jahr 2006 mit zwei zentral durchmischten Rührkesselfermentern mit jeweils 3500 m<sup>3</sup> Nutzvolumen sowie mit einem Nachgärer mit Gasspeicherdach, jedoch ohne Beheizung und Isolierung, mit einem Volumen von 3000 m<sup>3</sup> geplant. Als Einsatzstoffe war zum Zeitpunkt der Projektierung der Anlage die in Tabelle 13 dargestellten Substratmischung beschickt wird.

**Tabelle 13:** Substratmischung 1,5 MW Modell-BGA [UMSICHT].

Material	Menge [t/d]
Maissilage	83
Roggenschrot	3,5
Summe	86,5

Als Eintragstechnik waren Schubbodendosierer und Schneckenförderer vorgesehen. Im Rahmen des Repowering-Szenarios soll die konventionelle Eintragstechnik durch eine Hydrolysestufe bestehend aus einem Anmischbehälter sowie einem Hydrolysebehälter ersetzt werden.

Insbesondere zeichnet sich der Einsatz einer Hydrolysestufe durch eine hohe Flexibilität beim Einsatz unterschiedlicher Substrate aus. Der hohe Anteil an Maissilage kann durch Festmist, Stroh, Geflügelmist oder Grasschnitt ersetzt werden.

Weitere Reststoffe ohne Einsatzstoffbezogene Vergütung die gemäß des EEG 2012 [EEG-2012] zusammen mit Einsatzstoffen der Vergütungsklassen I und II gemäß Biomasseverordnung 2012 [BiomasseV\_2012] in Biogasanlagen genutzt werden können, stehen für Anlagen die in den Geltungsbereich der Vorläufer EEG fallen nicht zur Verfügung

Der Betrieb der Hydrolysestufe kann grundsätzlich zu einer Optimierung des Anlagenbetriebs beitragen. Zum einen kann durch die in der Hydrolyse herrschenden Prozessbedingungen mit einem niedrigen pH-Wert ein Voraufschluss der Substrate erzielt werden und so einen beschleunigten Abbau im Fermenter ermöglichen. Bei leicht abbaubaren Substrate wie. z.B. Zuckerrüben ist der Einsatz einer Hydrolyse nicht unbedingt erforderlich, dieses Substrat kann jedoch zu einem schnelleren Versäuerungsprozess und damit zur Unterstützung der Hydrolyse schwerer abbaubarer Inputmaterialien beitragen.

Zum anderen ermöglicht die Hydrolyse eine sehr gleichmäßige Beschickung hinsichtlich der Substratqualität. Das Substrat, welches in den Fermenter gelangt, ist darüber hinaus komplett sauerstofffrei, was sich insbesondere positiv auf die obligat anaeroben Mikroorganismen in den Fermentern auswirkt.

Da das Substrat jedoch mit einem niedrigen pH-Wert von ca. 5 in den Fermenter eingebracht wird, muss eine geeignete Homogenisierung bei der Einbringung in den Fermenter sichergestellt werden, um eine Beeinträchtigung der methanogenen Mikroorganismen durch das versäuerte Substrat zu vermeiden.

Weiterhin beinhaltet das Hydrolysegas abhängig von den Prozessbedingungen und den eingesetzten Substraten auch Wasserstoff. Wasserstoff stellt einen hochenergetischen Energieträger dar. Trotzdem ist der Anteil an Wasserstoff am Biogas auf Grund der Brenneigenschaften dieses Gases bei der motorischen Nutzung im Blockheizkraftwerk (BHKW) begrenzt.

Hinsichtlich der Nutzung einer breiteren Substratmatrix die zusätzlich landwirtschaftliche Reststoffe enthält weist die Lösung des Substrateintrags mittels Anmischbehälters eine sehr gute Flexibilität auf und insbesondere bei der Vergärung schwer hydrolysierbarer z. B. stark strohhaltiger Substrate, lassen sich durch die Hydrolyse –bei unveränderter Verweilzeit in der Anlage – nennenswerte Steigerungen der Gasausbeute erzielen.

Tabelle 14 zeigt eine hypothetische Reststoffvariante, die sehr heterogen zusammengesetzt ist und bei der der Maissilagebedarf aufgrund des Einsatzes einer Hydrolysestufe halbiert werden kann.

**Tabelle 14:** Geplante Substratmischung der BGA bei Nachrüstung einer Hydrolysestufe [UMSICHT].

Material	Menge [t/a]
Maissilage	41
Grasschnitt	15
Zuckerrüben	28
HTK	18
Festmist und Stroh	21
Summe	123

### 3.1.2 Optimierung einer Praxisanlage aus dem Projekt durch Zugabe von Prozesshilfsstoffen

Das Nachfolgende Praxisbeispiel zeigt die Optimierungsmöglichkeiten einer Bestandanlage durch Enzym- und Spurenelementzugabe. Die Anlage wurde im Jahr 2014 im Rahmen des Projektes besucht. Es wurden Proben aus dem Fermenter für Komplettanalyse und Spurenelementanalysen gezogen.

**Tabelle 15:** Anlagendaten der Praxisanlage [Bioreact].

Typ	Wert
Vorhydrolyse	160 m <sup>3</sup> (offen)
Fermenter	650 m <sup>3</sup>
Endlager	offen
Installierte Leistung:	190 kW
Wirkungsgrad BHKW	37%
Baujahr	2006

Zum Zeitpunkt des ersten Besuches wurden 4,4 t Maissilage, 1,5t Getreide und 1 m<sup>3</sup> Rindergülle gefüttert. Das Substrat wurde täglich zusammen mit 19m<sup>3</sup> Rezirkulat aus dem offenen Gärrestlager in einen 160m<sup>3</sup> Hydrolysebehälter gegeben. Eine Reduzierung der Rezirkulatmenge war zu diesem Zeitpunkt nicht möglich, da sich der Hydrolyseinhalt mit reduzierter Rezirkulatmenge nicht pumpen ließ. Die Verweilzeit in der Hydrolyse betrug zu diesem Zeitpunkt 6,2 Tage. 25,9 m<sup>3</sup> des Hydrolysebreis wurden täglich in den Fermenter gepumpt. Daraus resultierte eine Verweilzeit von 25,1 Tagen. Die Fermentationstemperatur lag während des gesamten Betrachtungszeitraums zwischen 42,2 und 42,5 °C. Die Analyseparameter zeigten keine Auffälligkeiten.

Obwohl der Ammoniumspiegel mit 3,56 g/l (errechneter Ammoniakgehalt bei 42,5°C 0,474 g/l) außerhalb des empfohlenen Bereiches lag, konnte eine Ammoniakhemmung ausgeschlossen werden. Die Substrate wurden nur zu 80,8% (% KTBL) bei einer BHKW-Auslastung von 68,4 ausgenutzt. Zunächst kam ein Spurenelementpräparat zum Einsatz, das auf Basis regelmäßiger Spurenelementanalysen auf den Bedarf der Anlage angepasst wurde. Pro 100 kW Anlagenleistung und Tag wurden 0,4kg direkt dem Fermenter zugegeben. Zeitgleich wurde mit der Zugabe eines Enzympräparates aus dem Bioreact Enzymbaukasten-System begonnen. Es wurden täglich 2,5 kg Enzyme zugegeben. Ziel war es bei der kurzen Verweilzeit von 25,1 Tagen den Abbau des Substrates zu beschleunigen und die Viskosität des Fermenterinhalt zu senken. Eine deutliche Viskositätsverbesserung konnte schon nach 2 Wochen festgestellt werden. Nach ca. 3-4 Wochen ging die Leistung langsam nach oben.

Durch die Wirkung der Enzyme wurde der Fermenterinhalt fließfähiger. Gleichzeitig wurde der Gärrest auch dünner wodurch die Rezirkulationsmenge in die Hydrolysestufe sukzessive zurückgefahren werden konnte. Aktuell werden nur noch 14,5 m<sup>3</sup> Rezirkulat täglich der Hydrolysestufe zugegeben. Aus 4,3t Maissilage, 2t Getreide und 1 m<sup>3</sup> Rindergülle werden aktuell

185kWh pro Stunde produziert. Die Substratausnutzung wurde über die prozessbiologischen Maßnahmen von 80,8 auf 99,3% gesteigert. Außerdem läuft das BHKW mittlerweile mit 185kWh pro Stunde mit 97,4 % fast Vollast.

Der wirtschaftliche Erfolg der biologischen Prozessoptimierung ist direkt in Zahlen messbar. Der Ertrag nach Abzug der Kosten für die eingesetzten Substrate und Prozesshilfsstoffe hat sich mehr als verdoppelt und liegt nun bei 196,- Euro pro Tag (vor der Prozessoptimierung 84,- Euro).

**Tabelle 16:** Anlagenkennwerte vor und nach der Optimierung [Bioreact].

	Vor Optimierung	Nach Optimierung
<b>Substrat</b>	<b>Fütterungsmenge [t/d]</b>	<b>Fütterungsmenge [t/d]</b>
Maissilage	4,4	4,3
Getreide	1,5	2
Rindergülle	1	1
<b>Substratkosten</b>	<b>[€/d]</b>	<b>[€/d]</b>
Maissilage (40 €/t)	176	172
Getreide (180 €/t)	270	360
<b>Prozesshilfsstoffe</b>	<b>[kg/d]</b>	<b>[kg/d]</b>
Spurenelemente	0	0,74
Enzyme	0	2,5
<b>Kosten Prozesshilfsstoffe</b>	<b>[€/d]</b>	<b>[€/d]</b>
Spurenelemente	0	9,25
Enzyme	0	16,75
<b>Stromertrag</b>		
Stromproduktion [kWh/d]	3120	4440
Einspeisevergütung [€/kWh]	0,17	0,17
Einspeisevergütung [€/d]	530,4	754,8
<b>Erlös [€/d]</b>	<b>84,4</b>	<b>196,8</b>
<b>Mehrerlös durch Prozessoptimierung [€/d]</b>		<b>112,4</b>

### **3.1.3 Möglichkeiten des Einsatzes von alternativen Substratformen in bestehenden NawaRo-Biogasanlagen**

Neben den bisherigen erwähnten biologischen, technischen und systemorientierten Repowering-Maßnahmen bietet der Substrateinsatz ein weiteres Gebiet mit relativ großem Potenzial. Durch die Erschließung von Rest- und Abfallstoffen als Substrate kann ohne Anbauflächenverbrauch, eine zusätzliche Option für Biogasanlagen geschaffen werden.

Bioabfall macht nach einer vom DBFZ, im Jahr 2014 durchgeführten Betreiberumfrage (n=707), lediglich 2,5% des masse-bezogenen und 2,7% des energiebezogenen Substrateinsatzes ausmacht [67]. Die bisherigen bestehenden Biogasanlagen auf Basis von Abfällen zeigen jedoch, dass die Nutzung von den kostengünstigen und ohne Anbauflächenverbrauch anfallenden Abfällen generell möglich ist. Im November 2013 konnten 130 Biogasanlagen, die ausschließlich oder überwiegend Abfälle nutzen, gezählt werden. Davon wurden 75 Anlagen durch Bioabfälle aus getrennter Sammlung (Biotonne) betrieben [67]. Hinzukommen die Biogasanlagen die Bioabfälle bereits als Kosubstrat nutzen, wobei hier keine eindeutige beziehungsweise einheitliche Statistik existiert. Jedoch nutzten laut Statistisches Bundesamt im Jahr 2012 zu den reinen Abfallvergärungsanlagen rund 313 Biogasanlagen Bioabfälle oder organische Abfälle als Kosubstrat.

#### **3.1.3.1 Notwendige Aufbereitungsschritte für die Bioabfallnutzung in bestehenden NawaRo-Biogasanlagen**

Abfallvergärungsanlagen werden meist mit dem Verfahren der Trockenfermentation betrieben, im Gegensatz hierzu werden klassische NawaRo-Biogasanlagen mit dem Verfahren der Nassfermentation als Kofermentationsprozess betrieben. Das aus der Kofermentation durch Kombination von Gülle und NawaRo entstehende Substratgemisch ergibt eine flüssige, pump- und rührfähige Suspension. Als Richtwert für die Nassfermentation wird in der Literatur ein Trockensubstanzgehalt von bis zu 15% genannt [68]; [69]; [70]. Der Trockensubstanzgehalt beschreibt die Trockenmassekonzentration eines Stoffes und wird demnach maßgeblich von den Trockenmasseanteil eines Stoffes bestimmt. In der Literatur wird ein durchschnittlicher Trockenmasseanteil von 40% für Bioabfälle angegeben, wobei der Trockenmasseanteil immer in Abhängigkeit zu der Abfallzusammensetzung (Grünschnitt-, Speiseresteanteil,...) betrachtet werden muss und durchaus von den Durchschnittswert abweichen kann [24].

Durch den hohen Trockenmasseanteil wird die eigentliche Problematik der Nutzung von Bioabfällen in bestehenden NawaRo-Biogasanlagen deutlich. Damit der Bioabfall in den Anlagen genutzt werden kann muss er zunächst zu einer flüssigen, pump- sowie rührfähigen Substratsuspension, auch Maische genannt, aufbereitet werden. Des Weiteren muss nach BioAbfV zur Nutzung von Bioabfällen eine Hygienisierung gewährleistet sein, diese wird für die bisherige Substratnutzung, bestehend aus Gülle und NawaRo, nicht benötigt [71]. Insgesamt ist die Nutzung von Bioabfällen in NawaRo-Biogasanlagen mit einem höheren technischen Aufwand als bei der Trockenfermentation verbunden und bedarf Ergänzungen der vorhandenen Anlagentechnik der Biogasanlage.

Die Bioabfallaufbereitung für bestehende NawaRo-Biogasanlagen umfasst vier Aufbereitungsschritte, wobei die Notwendigkeit und der Umfang der einzelnen Schritte von der Störstoffbelastung des Bioabfalls abhängen. Allgemein sollte aus diesem Grund vorwiegend auf störstoffunbelasteten oder

vorbehandelten Bioabfall zurückgegriffen werden, um den Aufbereitungsaufwand im Rahmen zu halten.

Ein möglicher Prozessablauf der Bioabfallaufbereitung ist Abbildung 66 skizziert. Neben den bereits Substrataufbereitungsschritten Zerkleinerung, Störstoffabtrennung und Hygienisierung kommt der Herstellung einer verwertbaren Maische im Zuge der Bioabfallaufbereitung eine Schlüsselrolle zu.

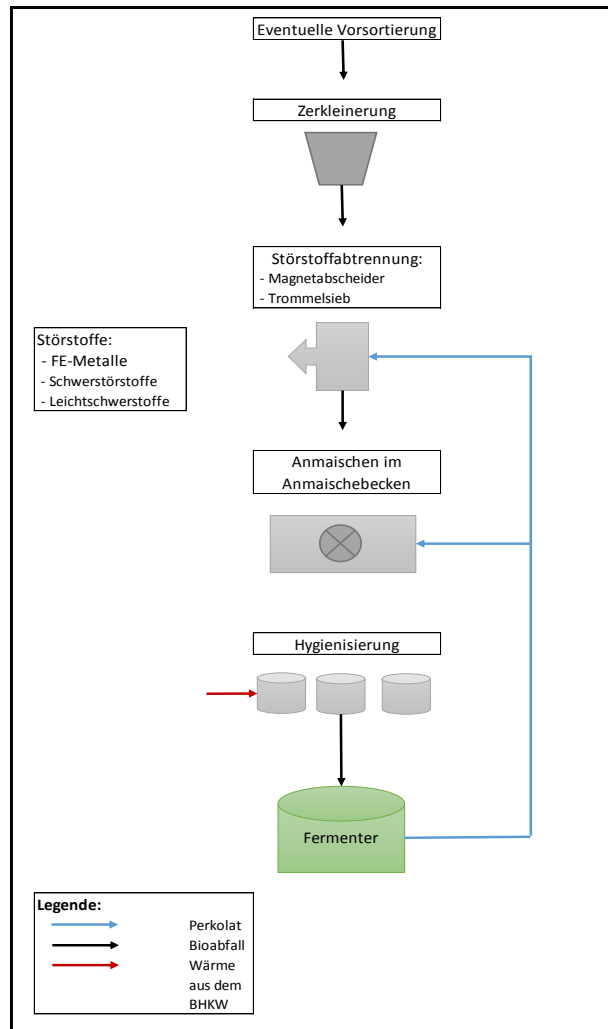


Abbildung 66: Möglicher Prozessablauf zur Bioabfallaufbereitung für NawaRo-Biogasanlagen [Gewitra]

Nach der Anlieferung des Bioabfalles wird der Abfall bei starker Störstoffbelastung zuerst nach größeren Störstoffen (größere Äste, Folien,...) untersucht, welche falls vorhanden aussortiert werden. Hierzu können grobe Siebvorrichtungen, aber auch manuelle Sortierungskabinen aus den reinen Abfallvergärungsanlagen genutzt werden. Das aussortierte Störstoffmaterial wird in einem weiteren Schritt vorschriftsmäßig entsorgt.

Auf diese erste grobe Vorsortierung folgt die Zerkleinerung des restlichen Abfalls durch den Einsatz eines Zerkleinerungsaggregates, als Beispiel aus der Praxis dient der bereits erwähnte *Biogrinder (RBG)*. Die Zerkleinerung steigert zum einen die biologische Abbaubarkeit, aufgrund der steigenden spezifischen Oberfläche des Abfalls und der damit verbundenen größeren Angriffsfläche für die am Abbau beteiligten Bakterien. Gleichzeitig steigt durch die Zunahme der spezifischen Oberfläche des Abfalls auch die Aufnahmefähigkeit von Flüssigkeiten, wodurch das Anmischen des Abfalles



erleichtert wird. Zudem wird der Abfall homogenisiert, so dass die Trennleistung einer weiteren Siebung wegen der vereinfachten Anpassung der Sieböffnungen verbessert wird [72].

Das zerkleinerte Abfallmaterial wird nun einer weiteren Siebung unterzogen damit auch die restlichen Störstoffe, die nicht bei der Vorsortierung erfasst wurden, entfernt werden können. Bevor die Siebung jedoch erfolgt werden durch den Einsatz von Magnetabscheider die eisenhaltigen Metalle (FE-Metalle) abgetrennt und der Wertstoffverwertung übergeben. Als Beispiele für eisenhaltige Metalle dienen Konservendosen (Weißblechdosen), Nägel aus Brettern oder Ästen und auch abgebrochene sowie versehentlich weggeworfene Gartenwerkzeuge. Die Entfernung der eisenhaltigen Metalle ermöglicht einen störfreien Prozessablauf und schützt die Pump- und Rührtechnik im weiteren Prozessverlauf.

Für die erneute Siebung eignen sich Trommelsiebe, welche den Bioabfall durch die unterschiedlich großen Sieböffnungen nach Korngröße trennen. Der Korngrößenbereich für einen Einsatz von Trommelsieben liegt bei 40 bis 250 mm. Aus Untersuchungen zu Bioabfällen geht hervor, dass sich 98% der enthaltenden Störstoffe in einer Siebfraction von >60 mm befinden. Deshalb ist eine Zerkleinerung des Bioabfalls auf eine Korngröße von 60 bis 80 mm zu empfehlen [73, 74]. Typische Trommelsiebe der Bioabfallaufbereitung liegen in den Bereich zwischen 60 bis 100 mm. [68].

Ein Trommelsieb besteht aus einem zylindrisch ausgebildeten Siebmantel, wobei die Sieböffnungen zunächst größer und am Auslass des Trommelsiebes meist kleiner sind. Durch Antrieb über Laufräder wird eine ständige Umwälzung des axial zugeführten Abfalls erreicht, bei der die Abfallbestandteile durch Reibungs- und Zentrifugalkräfte an den zylindrischen Siebmantel aufsteigen, abgleiten und infolge der geneigten Trommellage (4-6°) gleichzeitig eine langsame Vorwärtsbewegung erfahren. Dabei ermöglicht die ständige Umwälzung den Abfallbestandteilen sich über Sieböffnungen anzuordnen und diese, im Falle eines größeren Durchmessers, zu passieren. Um ein gutes Trennergebnis zu erzielen sollte der Füllgrad des Trommelsiebes ungefähr bei 15% liegen [72]. Während der Siebung wird dem Trommelsieb Prozesswasser aus dem Fermenter oder dem Nachgärer durch entsprechende Rohrleitungssysteme zugeführt. Ähnlich wie beim Perkulationsverfahren wird der Trommelinhalt vom Perkolat durchsickert und in Form von einer Abfallmaische ausgewaschen.

Die Abfallmaische gelangt in ein Anmischbecken, welches vergleichbare Funktionen wie die Vorgrube übernimmt. Dort wird die Abfallmaische mit weiteren Prozesswasser verdünnt bis eine pump- und rührfähige Suspension (TS-Gehalt <15%) entstanden ist. Damit dies erreicht wird kommen in den Anmischbecken wie bereits in der Vorgrube, Rühr-, Schneidrührwerke oder auch Stabmixer zum Einsatz. Diese homogenisieren die Abfallmaische und sorgen des Weiteren für eine weitere Zerkleinerung des enthaltenden Abfallmaterials.

In einem letzten Aufbereitungsschritt wird die Abfallmaische nun noch in Hygienisierungstanks 60 min lang einer Temperatur von mindestens 70 °C ausgesetzt (BioAbfV, Anh. 2 Nr. 2.2.1). Die hierfür benötigte Wärmeenergie kann von dem BHKW zu Verfügung gestellt werden. Generell lässt die BioAbfV zwar auch eine Hygienisierungsmaßnahmen nach dem Vergärungsvorgang zu. Doch ist zu beachten, dass die Gülle und die genutzten NawaRo zunächst keine Hygienisierung benötigen. Durch den im Fermenter stattfindenden Kontakt mit den unbehandelten Bioabfall müssten sie hingegen in Form des entstehenden Gärrest hygienisiert werden, wozu ein weitaus größerer technischer und energetischer Aufwand von Nöten wäre.

Neben der Hygienisierung kann der Aufenthalt in den Tanks auch zur Abtrennung von den letzten enthaltenden Schwimmstoffen und Sandfraktionen genutzt werden, welche sich am Boden des Tanks ablagern. Diese können durch Rechen, Schwerstoffschleusen entnommen oder durch eine gezielte Leerung des Tanks auf dem Boden zurückbleiben und dann entsorgt werden.

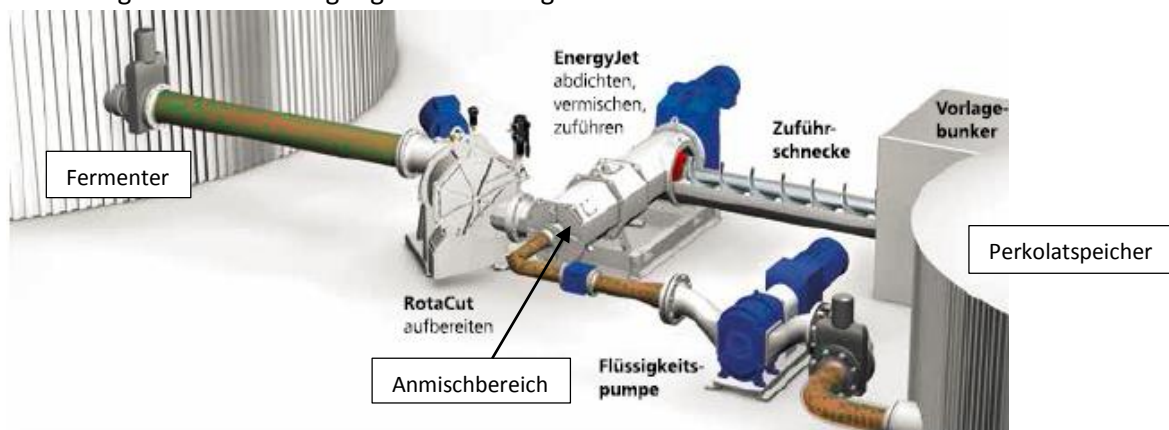
### Praxisbeispiel EnergyJet CS (Hugo Vogelsang Maschinenbau GmbH)

Die für die Bioabfallnutzung nötigen Nachrüstungen hängen neben der Störstoffbelastung des Bioabfalles auch von der bisherigen Ausstattung der Biogasanlage ab. Bei NawaRo-Biogasanlagen die bereits eine Zerkleinerung der genutzten NawaRo vornehmen, sollte zunächst geprüft werden in wie fern das genutzte Zerkleinerungsaggregat auch zur Bioabfallzerkleinerung genutzt werden kann. Aufgrund der weiteren notwendigen Komponenten (Trommelsiebe, Anmischbecken,...) ist die komponentenweise Zusammenstellung einer Bioabfallaufbereitung jedoch eher umständlich. Eine Komplettlösung für die Bioabfallaufbereitung bietet der *EnergyJet CS*® (Hugo Vogelsang Maschinenbau GmbH), welcher bis auf die Hygienisierung alle beschriebenen Aufbereitungsschritte ausführen kann. Den Aufbau und das Funktionsprinzip des *EnergyJet CS*® verdeutlicht die Abbildung 67

Die Hauptbestandteile des *EnergyJet CS*® sind eine Zufuhrschnecke für den Bioabfall, eine Flüssigkeitspumpe zur Förderung des Perkolats, der EnergyJet und der RotaCut RCX.

Zu Beginn des Aufbereitungsvorgangs wird dem EnergyJet mittels einer beliebigen Förderschnecke der Bioabfall seitlich, über einen freien Durchgangsquerschnitt von bis zu 100 mm, zugeführt. Dadurch ist der Einsatz von bereits vorhandenen Förderschnecken, die nun für die Einbringung von Bioabfall genutzt werden, möglich.

Im Korpus des EnergyJet befindet sich eine beidseitig gelagerte Edelstahlschnecke, die den Bioabfall durch langsame Drehbewegungen in Richtung des Anmischbereichs führt.



**Abbildung 67:** Aufbauschema des EnergyJet CS® (verändert nach [75])

Hierbei bilden die Schneckenwellen und der Korpus mit dem Bioabfall eine dichte Verbindung in Form eines Stopfens aus. In dem Anmischbereich wird der Stopfen durch eine rotierende mit Messern ausgestattete Anmischschnecke gelöst. Gleichzeitig wird durch die Flüssigkeitspumpe Perkolat oder auch eine andere flüssige Phase mit hoher Fließgeschwindigkeit in den Anmischbereich befördert. Der Flüssigkeitsstrom wird durch ein Belüftungssystem verwirbelt und durch die Anmischschnecke mit dem Bioabfall vermischt. Insgesamt übernimmt der *EnergyJet* die Funktionen des Anmischens und ersetzt insbesondere das Anmischbecken.

Die erzeugte Abfallsuspension wird in einem letzten Schritt mittels eines Lochscheibenzerkleinerers des Typs *RotaCut RCX* aufbereitet. Dabei werden die enthaltenen Feststoffe (Speisereste, Grünschnitt,...) zerkleinert, Zusammenballungen aufgelöst und die Suspension homogenisiert. Neben der Aufbereitung werden Störstoffe wie Steine und Metalle abgeschieden, so dass nachfolgende

Anlagenkomponenten geschützt werden. Der Einsatz des *RotaCut RCX* übernimmt somit die nötige Störstoffabtrennung und die Zerkleinerung des Bioabfalls.

Bevor die entstandene Abfallmaische jedoch, wie in Abbildung 67 dargestellt, in den Fermenter gefördert wird muss diese noch hygienisiert werden. Hierzu eignen sich zwischengeschaltete Hygienisierungstanks, welche die für die Hygienisierung benötigte Wärmeenergie aus dem BHKW in Form von Heißwasser beziehen. Bei den typischen Hygienisierungstanks handelt es sich um Edelstahlbehälter mit interner Heizung oder im Fall von doppelwandigen Edelstahlbehältern mit integrierter Wandheizung.

### 3.1.4 Flexibilisierung der Vorortverstromung

Die Flexibilisierung der Vorortverstromung bei Biogasanlagen hat sich in den letzten Jahren als gängige Praxis etabliert. Ziel dieser Maßnahmen ist es, mit dem an den Biogasanlagen erzeugten Strom einen Ausgleich zur fluktuierenden Energieerzeugung aus Wind- und Sonne zu erzielen. Aufgrund der aktuellen Regelungen des EEG 2014 [76] handelt es sich hierbei um die einzige Maßnahme, mit der eine bauliche Erweiterung an Biogasanlagen noch durch spezifische Anreize gefördert wird.

Für diese Technologieoption als Repoweringkonzept sind verschiedene Veröffentlichungen von wissenschaftlichen Institutionen sowie von Biogasanlagenbetreibern und Herstellern verfügbar. Im Rahmen des hier beschriebenen Vorhabens steht dieses Konzept nicht im Fokus, wird aber auf Basis der verfügbaren Literatur ebenfalls betrachtet.

Für die technische Umsetzung an Biogasanlagen sind hierfür abhängig von der Ausgangssituation unterschiedliche bauliche und betriebliche Maßnahmen erforderlich.

In der Regel sind an den meisten Anlagen die folgenden Umbauten notwendig:

- Erhöhung der BHKW Leistung
- Erweiterung der Gasspeicherkapazität
- Technische Anpassungen für den Steuerungseingriff durch den Stromhändler

Abhängig von den weiteren Rahmenbedingungen muss dieses ggf. um die folgenden Maßnahmen ergänzt werden:

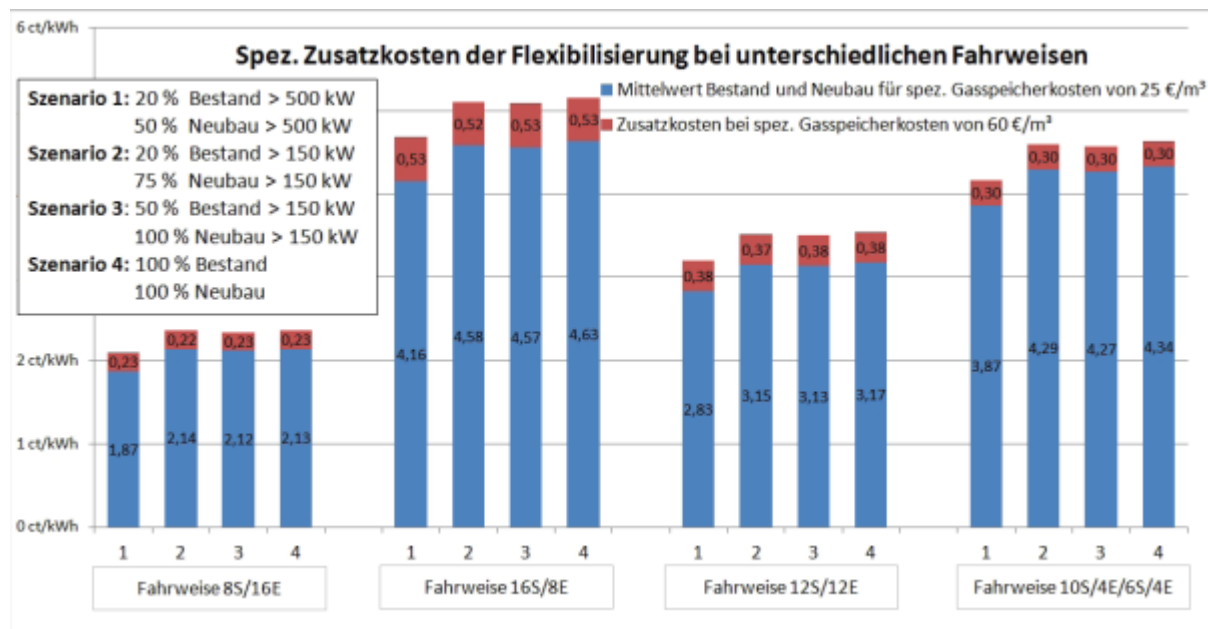
- Installation von Wärmespeichern / Back-Up Wärmeerzeugern
- Anpassung der Querschnitte der Gasleitungen / Kapazität der Verdichter
- Austausch des Transformators, Verlegung des Einspeisepunktes

Im weiteren Anlagenbetrieb müssen dann weitere Aspekte berücksichtigt werden, die direkte Auswirkungen auf den Anlagenbetrieb (Störungshäufigkeit / Wartungsaufwand) sowie auf die Betriebskosten haben:

- Zusätzliche Start-/Stopp Vorgänge
- Zusätzliche Stillstandzeiten

- Kurzzeitige Teillastphasen
- Motorwarmhaltung zur Vermeidung von Kaltstarts
- Vermeidung von Kondensation im Motorölkreislauf / Abgaswärmetauscher
- Thermische Wechselbelastung im Abgaskrümmner
- Sinkender Wirkungsgrad und steigende CO/C<sub>n</sub>H<sub>m</sub> Emissionen bei Teillastbetrieb

Umfassende Berechnungen der durch die Flexibilisierung entstehenden Kosten liegen unter anderem von der IZES gGmbH vor [77]. Je nach technischer Ausstattung, Fahrweise und Ausbauszenario ergeben sich hierbei spezifische Zusatzkosten in einer Größenordnung zwischen ca. 1,9 – 5,2 ct/kWh (Abbildung 68).



**Abbildung 68:** Zusatzkosten der Flexibilisierung bei unterschiedlichen Fahrweisen [77]

Diese theoretischen Betrachtungen lassen jedoch keinen Rückschluss darauf zu, ob mit der Flexibilitätsprämie und den Zusatzerlösen durch die Direktvermarktung auch in jedem Fall ein wirtschaftlicherer Betrieb der Anlage gegenüber dem Ursprungszustand ermöglicht werden kann. Wirtschaftlichkeitsberechnungen aus der Praxis, denen eine vollständige Bilanzierung aller Kosten und Einnahmen durch die Flexibilisierung zugrunde liegt, deuten an, dass dieses Konzept ggf. keine zusätzlichen Einnahmen generieren kann [78].

Ungeachtet der wirtschaftlichen Betrachtung liegt bei diesem Konzept eine der noch offenen Fragestellungen bei der Nutzung der beim KWK Betrieb entstehenden Wärme sowie bei der Treibhausgasminderung. Im Vergleich zu KWK-Anlagen im städtischen Raum oder an Industrie- und Gewerbestandorten weisen die BHKW an Biogasanlagen in der Regel einen deutlich schlechteren Wärmenutzungsgrad auf. Im Rahmen des Projektes REPOWERING, liegt daher einer der Schwerpunkte bei der Entwicklung raumbezogener Szenarien für Anlagenverbünde, mit denen geeignete Wärmesenken erschlossen werden können.

## 3.2 Technische Konzepte zur Flexibilisierung der Biogasproduktion

### 3.2.1 Entwicklung Raumbezogener Szenarien

Die Technologoptionen Einspeisung und Installation eines Satelliten-BHKWs weisen einen expliziten Raumbezug auf. Dies gilt für Einzelanlagen und im Besonderen auch für die Schaffung von Anlagenverbänden. Dabei sind diese Optionen gekennzeichnet durch Transportprozesse. Zum einem wird Rohbiogas (Mikrogasleitung), zum anderen Wärme transportiert (Wärmeleitung). Beide Prozesse sind damit leitungsgebunden.

Ausgangspunkt für die Installation einer Mikrogasleitung ist eine Biogasanlage, bzw. ein Anlagenverbund. Beim letzteren Fall sind zwischen Einzelanlage ebenfalls Leitungen zu bauen. Ziel des Transports kann eine Aufbereitungsanlage an einer Erdgasleitung bzw. ein BHKW sein. Bei einer Wärmeleitung ist der Ausgangspunkt ein BHKW und das Ziel ein Wärmeabnehmer. Ob für Einzelanlagen bzw. Anlagenverbände die Optionen in Betracht kommen ist zunächst von der Identifizierung der Ziele (Gasnetz bzw. Wärmeabnehmer) abhängig.

### 3.2.2 Entwicklung raumbezogener Szenarien für Anlagenverbände

Durch die Verbesserung der Wärmenutzung lässt sich die Gesamteffizienz des Systems Biogas verbessern [79] Neben der direkten Anbindung eines Wärmeverbrauchers am Ort der Biogasanlage ist es auch möglich, Verbraucher im näheren und weiteren räumlichen Umfeld der Anlagen zu erschließen. Für die Anbindung der Biogasanlage an die räumlich entkoppelten Verbraucher können zwei unterschiedlich netzgebundene Konzepte Anwendung finden:

- Beim ersten Konzept kann das produzierte Biogas am Standort im Motor verbrannt werden und die anfallende Wärme über ein angeschlossenes Wärmenetz zum Verbraucher transportiert werden (Konzept »Wärmenetz«).
- Beim zweiten Konzept wird das Biogas nicht am Standort der Biogasanlage in einem BHKW verstromt, sondern über eine Mikrogasleitung zum potenziellen Nutzer transportiert (Konzept »Mikrogassystem«). Ein möglicher Endpunkt des Transports kann dabei eine bestehende konventionelle Erdgasleitung sein, so dass eine Aufbereitung des Biogases auf Erdgasqualität notwendig wird (Biogaseinspeisung). Alternativ kann das Biogas, ohne Aufbereitung auf Erdgasqualität, zu einem BHKW transportiert werden, welches unmittelbar am Wärmeverbraucher installiert ist (Satelliten-BHKW).

Für Bestandsanlagen sind im Rahmen des Repowering beide Konzepte anwendbar. Aufbauend auf der exemplarischen Szenarienbetrachtung wurde für das Projekt ein allgemein anwendbarer Entscheidungsbaum (Abbildung 69) entwickelt und auf Praxisanlagen aus der Datenerhebung der BIOREACT angewendet.

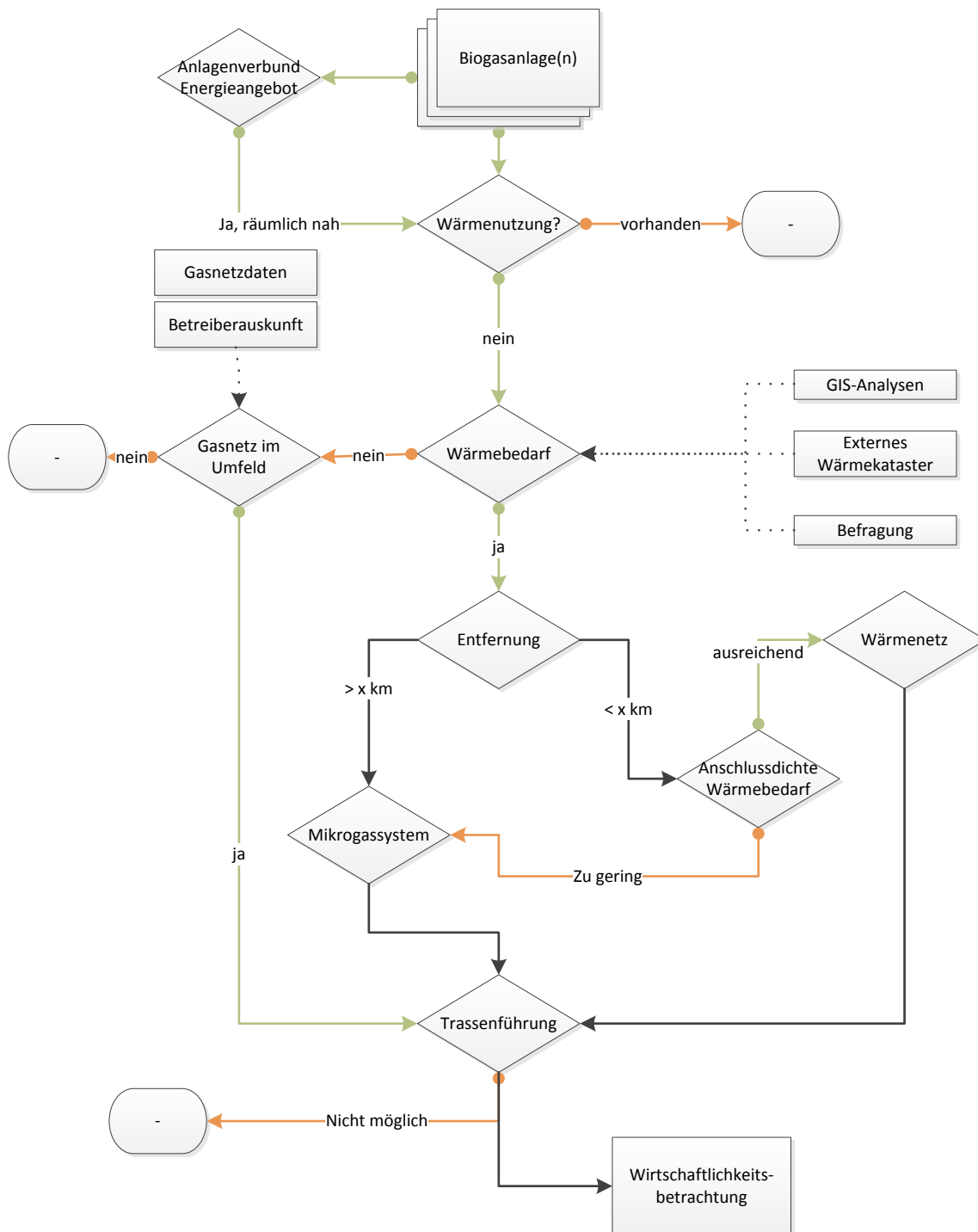


Abbildung 69: Entscheidungsbaum zur Entwicklung von Repoweringoptionen mit Raumbezug [UMSICHT]

Den Ausgangspunkt der Betrachtungen bilden die Biogasanlagen eines Untersuchungsraumes ohne effiziente Abwärmenutzung. Im ersten Schritt ist zu ermitteln, ob sich im räumlichen Umfeld zur Anlage geeignete Wärmeabnehmer mit entsprechendem Wärmebedarf finden. Zudem ist zu analysieren, welche Wärme- bzw. Gasmengen durch die Biogasanlagen im definierten Raum zur Verfügung gestellt werden können.

### 3.2.2.1 Konzept »Wärmenetz«

Für die technische Konzeption und wirtschaftliche Bewertung eines Wärmenetzes ist die Bestimmung der Anschlussdichte notwendig [80]. Die Anschlussdichte beschreibt das Verhältnis abgesetzter thermischer Energie bezogen auf die Trassenlänge. Die Kreditanstalt für Wiederaufbau, als Geber zinsgünstiger Kredite, fordert beispielsweise einen Mindestwärmeabsatz von 500 Kilowattstunden je Trassenmeter und Jahr. Somit sind sowohl die geographische Lage der Verbraucher als auch der potenzielle Wärmeverbrauch zu bestimmen.

Zur Beschreibung des Wärmebedarfs sowie der räumlichen Verteilung haben sich Methoden unter Verwendung von Geoinformationstechnologien neben empirischen Erhebungen, etabliert [81]. Eine empirische Datenerhebung durch direkte Befragung ist auf Ebene eine Konzeptstudie zu aufwändig und liefert hierfür gegebenenfalls auch einen zu hohen Detaillierungsgrad. Besonders gut geeignete Gebiete mit hohen Wärmebezugsdichten sind [82]:

- Gebiete mit mehrgeschossigen Wohnungsbauten
- Gebiete mit dichter Bebauung
- Gebiete mit Ansammlung öffentlicher Gebäude (Krankenhäuser, Schul- und Sportzentren)
- Gewerbe und Industriebetriebe mit hohem Wärmebedarf insbesondere aus der Lebensmittelindustrie

Über die Verwendung freier Geodaten, z. B. aus OpenStreetMap<sup>8</sup>, lässt sich schnell eine überblicksartige Darstellung der räumlichen Verteilung von Wohn-, öffentlichen und Wirtschaftsgebäuden erreichen. Ferner ist auch möglich, größere Einzelverbraucher aus Gewerbe und Industrie zu ermitteln.

Unter dem Begriff Wärmekataster werden Geodaten zu Wohn- und Nichtwohngebäuden in Verbindung mit Informationen zu Wärmeverbräuchen erstellt. Verschiedene Studien, u. a., [83], kombinieren Geodaten zum Gebäudebestand mit Kennwerten zum Heizwärmebedarf typologischer Gebäude. Der Gebäudebestand lässt sich über Daten aus dem ALKIS (Amtliches Liegenschaftskatasterinformationssystem) oder über kommerzielle Geodaten, z. B. der Infas360 GmbH, abbilden. Beide Datensätze enthalten neben einer hohen geometrischen Genauigkeit weitere Attribute zur Ableitung des Wärmebedarfs. Das ALKIS-Objektartenmodell sieht u. a. die Attribute »Gebäudefunktion«, »Bauweise« und »Grundfläche« vor. Erfahrungen mit den öffentlichen Geodaten zeigen, dass diese Attribute zwar vorgesehen, jedoch nicht durchgehend gepflegt worden sind. ALKIS wurde in der Mehrzahl der Bundesländer umgesetzt, in den Stadtstaaten und in Mecklenburg-Vorpommern hat die Migration der alten Datenbestände noch nicht begonnen. In Sachsen-Anhalt, Sachsen und Bayern soll sie in 2015 beginnen.

Wichtig für eine energetische Betrachtung ist neben dem Alter und der Größe der Gebäude eine Aussage zum Sanierungsstand, welcher in den Daten nicht enthalten ist und daher über eine entsprechende Modellierung einzubinden ist.

---

<sup>8</sup> <http://www.openstreetmap.de/>

### 3.2.2.2 Konzept »Mikrogassystem« mit anschließender Biogaseinspeisung

Finden sich keine Wärmeabnehmer, ist zu prüfen, ob eine Gasleitung zur Direkteinspeisung von aufbereitetem Biogas in der Nähe ist. Zur räumlichen Lage und Parametern wie Druckstufe oder Gasqualität sind die Netzbetreiber zu kontaktieren.

#### 3.2.2.2.1 Trassenverlauf

Mit der Analyse der Wärmeabnehmer bzw. der Einspeisepunkte in das Erdgasnetz sind die Zielpunkte für die Netzverläufe definiert. Gemeinsam mit den Startpunkten (der Biogasanlage bzw. dem BHKW) ist eine erste Auslegung der Trasse durchzuführen. Die Trassenverläufe und die Dimensionierung der Technologien ermöglichen anschließend Aussagen zur Wirtschaftlichkeit der Konzepte zu treffen. In Abhängigkeit von der Lage und Anzahl der Anlagen, die in das Konzept eingebunden werden, ist die Netztopologie zu entwickeln. Für die Netztopologie lassen sich gemäß Abbildung 70 lineare Systeme und sternförmige Systeme unterscheiden, die jedoch auch kombiniert werden können. Die Netztopologien lassen sich dann noch weiter in Maschen- oder Ringnetze unterscheiden, wenn mehrere Wärmeerzeuger eingebunden werden sollen [84]. Für Mikrogasleitungen sind sternförmige Sammelsysteme denkbar, wobei das lineare System üblicherweise mit kürzeren Trassen realisierbar ist.

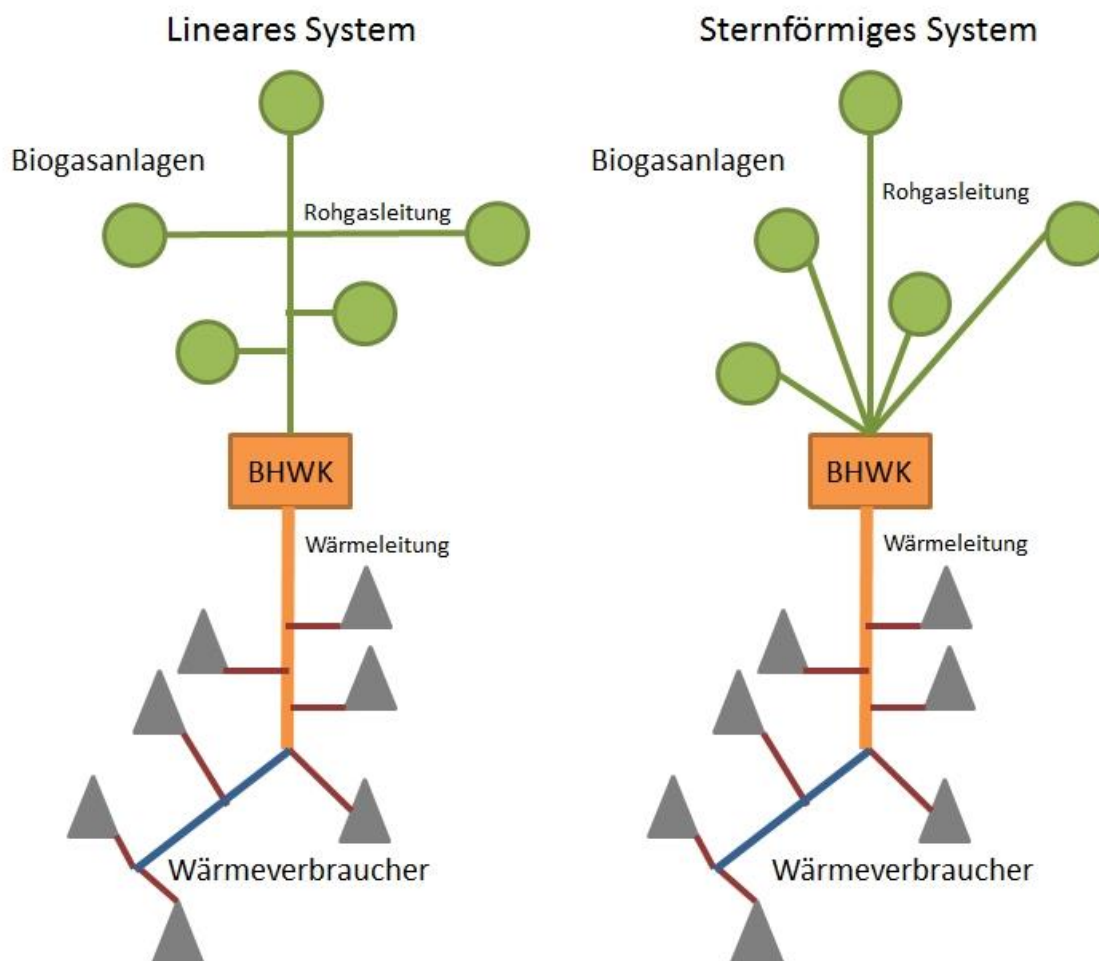


Abbildung 70: Netztopologien für Mikrogas- und Wärmenetze [UMSICHT]



Beide Konzepte beinhalten einen netzgebundenen Transport, wobei sich die Unterschiede in den Investitionskosten aufgrund der Auslegung und Konfiguration des Netzes zum Transport der unterschiedlichen Medien (Wärmeträger bzw. Gas) ergeben. Im Allgemeinen sind die Netzkosten für Mikrogasleitungen in Abhängigkeit von der Länge der Leitung günstiger als für Wärmeleitungen, da für Gasleitungen keine Wärmedämmung und kein Rücklauf für den Wärmeträger benötigt werden [85]. Hinzu kommt ein Wärmeverlust im Netz, der abhängig von der Transportentfernung ist. Höhere Kosten entstehen beim Mikrogasnetz hingegen für die netzunabhängigen Komponenten, wie der Gasaufbereitung (Trocknung, Grobentschwefelung, Kompression) und der Installation eines zweiten BHKWs zur Bereitstellung von Prozesswärme für die Biogasanlage. Für kürzere Entfernungen gelten Wärmenetze häufig als günstiger, für längere Distanzen werden diese jedoch aufgrund der o. g. Parameter eher unwirtschaftlich. Grundsätzlich gilt es, die Trasse aus wirtschaftlichen Gründen zu minimieren.

Im Folgenden sind wichtige Kriterien genannt, die zur Auslegung von Trassen sowohl für Wärme- als auch für Mikrogasleitungen gelten. Mit Hilfe des Kriterienkatalogs ist eine Grobtrassierung unter Zuhilfenahme von Geoinformationssystem möglich.

- Festlegung einer Direktverbindung (kürzeste Achse zwischen den zu verbindenden Punkten)
- Ermittlung großräumiger Widerstände (insbesondere sensible Siedlungsbereiche)
- Ermittlung evtl. Zwangspunkte (Gewässerkreuzungen)
- Fremdleitungsermittlung: Parallelführung zu bestehenden Netzinfrastrukturen bzw. Vermeidung von Kreuzungen
- Umgehung ökologisch sensibler Bereiche oder Festlegung einer verträglichen Trassenführung in solchen Bereichen
- Beachtung von Bau- u. Bodendenkmalen sowie Altlasten
- Auswertung planerischer Vorgaben (Regionalplan, Flächennutzungsplan, Bebauungspläne)
- Berücksichtigung Planungen Dritter (z. B. Straßenbau)
- Berücksichtigung der morphologischen Besonderheiten im Trassenverlauf (z. B. Hanglagen, Rutschungsgefährdung, Tragfähigkeit des Bodens – Moorböden)
- Berücksichtigung der Flurstückszuschnitte

Im ersten Schritt ist die direkte und damit kürzeste Verbindung zwischen der Biogasanlage und dem Zielpunkt zu ermitteln. Im Folgenden sind die räumlichen Hemmnisse der kürzesten Verbindungen zu lösen. Hierzu wird die Trasse mit einer Vielzahl von Geodaten verschnitten, so dass ein raumverträglicher Verlauf auch in Hinblick auf soziale und ökologische Aspekte entwickelt werden kann. Aus Sicht der Baukosten ist eine Verlegung in unbefestigtem Boden zu bevorzugen, jedoch kann die Verlegung parallel zu bestehenden Leitungen zum Beispiel im Randbereich von Straßen oder in Geh- und Radwegen Vorteile bezüglich der Raumverträglichkeit liefern. Sensible Siedlungsbereiche, wie Altstadtstrukturen oder reine Wohngebiete u. ä., sollten bei der Trassierung umgangen werden, wenn diese nicht für die Wärmeversorgung erschlossen werden sollen. Aus ökologischen wie wirtschaftlichen Gründen ist der Verlauf von natürlichen und künstlichen Gewässern zu beachten. Stehende Gewässer sind mit entsprechenden Abständen zu umgehen. Da Fließgewässer zwangsläufig zu queren sind, stellen sie sogenannte Zwangskreuzungen dar. Hierbei ist

aus ökonomischer Sicht eine möglichst geringe Distanz zu queren, da eine Vielzahl der Fließgewässer (Bundesgewässerstraßen, Gewässer 1. und 2. Ordnung) zu unterpressen sind. Im Vergleich zum offenen Leitungsbau ist das Pressen deutlich kostenintensiver.

Die Möglichkeit Leitungen parallel zu bestehenden Leitungsinfrastrukturen zu verlegen ist zu empfehlen, da diese Leitungen bereits aufgrund eines planerischen Konsenses verlegt wurden. Häufig finden sich im Straßenraum eine Vielzahl verschiedener Ver- und Entsorgungsleitungen sowie Leitungen der digitalen Informations- und Kommunikationsinfrastruktur. Die Leitungsbetreiber sind entsprechend zu kontaktieren, um die genannten Synergien für den Planungsprozess zu nutzen. Zu beachten ist jedoch, dass im genutzten Straßenraum ggf. Platzmangel bezüglich weiterer Leitungen herrscht.

Ein Aspekt mit besonderer Bedeutung ist die Vermeidung bzw. Minimierung der Querung von ökologisch sensiblen Bereichen. Die Meidung ist zu bevorzugen, da es bei einer Beeinträchtigung ökologisch sensibler Bereiche dazu kommen kann, dass kostenintensive Maßnahmen für Ausgleich und Ersatz ergriffen werden müssen. Zu den ökologisch sensiblen Bereichen gehören verschiedene Gebietskategorien, wie z. B. Naturschutz- und Landschaftsschutzgebiete, Gebiete der Flora-Fauna-Habitatrichtlinie, Vogelschutzgebiete und auch Überschwemmungsgebiete. Geodaten zu diesen Gebietskategorien lassen sich insbesondere bei den Natur- und Landschaftsschutzbehörden finden. Auch auf überregionaler Ebene lassen sich diese Daten bei den regionalen Planungsbehörden oder dem Bundesamt für Naturschutz beziehen.

Analog zu den ökologisch sensiblen Bereichen stellen Flächen mit Bau- und Bodendenkmälern Bereiche dar, die aufgrund ihrer kulturhistorischen Bedeutung zu meiden sind. Eine Umgehung in Abhängigkeit von der Bedeutung wird empfohlen. Altlasten, teilweise im Boden verborgen, können bei Querung Gefährdungen sowohl für die Leitung aber auch für das Umfeld darstellen. Im Rahmen einer Auswertung der Aktenlage bei den Bodenschutzbehörden bzw. einer Erkundung der Altlasten ist eine Umgehung zu prüfen.

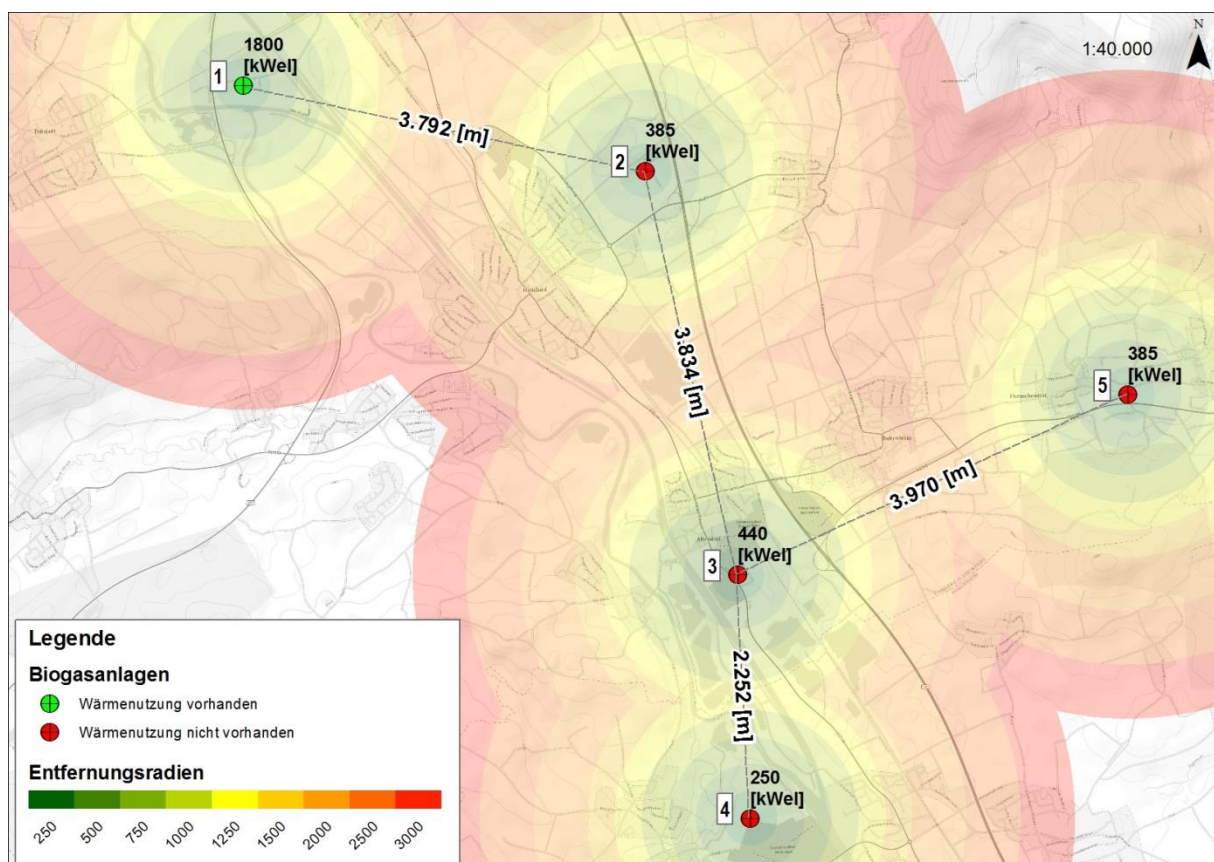
Frühzeitig sind auch planerische Vorgaben aus den Regional-, Flächennutzungs- und Bauleitplänen in die Betrachtungen zu integrieren. Nur so können konkurrierende Nutzungen bzw. Planungen, die dem Bau einer Leitung gegenüberstehen, in die Betrachtung eingebracht werden. Die Pläne sind bei den regionalen Planungsbehörden (in einigen Bundesländern den Bezirksregierungen) und den kommunalen Ämtern einsehbar. Auch Planungen Dritter, z. B. Straßenbau bzw. Instandsetzung, sind zu integrieren.

Letztendlich sind auch Aspekte wie Standsicherheit und geologische Besonderheiten von Bedeutung. Hangneigungen, felsige Untergründe und feuchte Bereiche sind zu meiden.

Über das Katasteramt sind Grundstücksdaten zu integrieren. Beachtet werden muss in diesem Analyseschritt insbesondere die Art und Weise der Querung einzelner Flurstücke. Zur Konfliktminimierung sind Flurstücke eher am Rande zu queren. Die Eintragung von Dienstbarkeiten bei einer diagonalen Querung von Flurstücken führt häufig zur Ablehnung von Trassenläufen.

### 3.2.2.3 Planbeispiel

Abbildung 71 zeigt fünf Biogasanlagen im ländlichen Raum. Die installierte elektrische Leistung reicht von 250 kW<sub>el</sub> bis 1800 kW<sub>el</sub>. Vier der Anlagen (Nr. 2 bis 5) weisen aktuell keine effiziente Wärmenutzung aus, so dass diese Anlagen exemplarisch einem räumlichen Screening zur Realisierung eines Wärmenetzes oder Biogaseinspeisung unterzogen werden. Gemeinsam haben die Anlagen eine installierte elektrische Leistung von ca. 1,4 MW. Ein Teil der Leistung wird für die Bereitstellung von Prozesswärme am Standort benötigt, weitere Teile können der externen Nutzung zur Verfügung gestellt werden. Das vorliegende Beispiel hat zunächst als grundlegende Annahme, die vier genannten Anlagen ohne effiziente Wärmenutzung in einem gemeinsamen Konzept zu optimieren. Der Anlagenverbund ist dabei zunächst über ein Mikrogasnetz herzustellen, so dass eine gemeinsame Versorgung eines Blockheizkraftwerkes bzw. eine Einspeisung erfolgen kann.



**Abbildung 71:** Räumliche Verteilung von fünf Biogasanlagen im ländlichen Raum [UMSICHT]

Die Abbildung zeigt weiterhin die kürzesten Distanzen (Luftlinie) zwischen den Anlagen. Für die Ermittlung von potenziellen Wärmesenken sind die einzelnen Anlagen mit Entfernungsradien umgeben. Die Umkreise visualisieren die Entfernung zwischen der Anlage und den potenziellen Wärmeabnehmern.

In Abbildung 72 werden zur Analyse potenzielle Wärmesenken OpenStreetMap-Daten zum Gebäudebestand genutzt. Die Analyse zeigt, dass zwei Industriegebiete (1250 m von Anlage 2 und 3) sowie kleinere Ansammlungen von Wohngebäuden im Umfeld der Anlagen zu finden sind. Zu prüfen ist, ob eines der Industriegebiete bzw. Wohngebiete Wärmemengen abnehmen kann, um den

Wärmenutzungsgrad der betrachteten Anlagen (2 bis 5) deutlich zu steigern. Einzelkonzepte sind grundsätzlich auch möglich, aber nicht im Fokus des Konzepts.

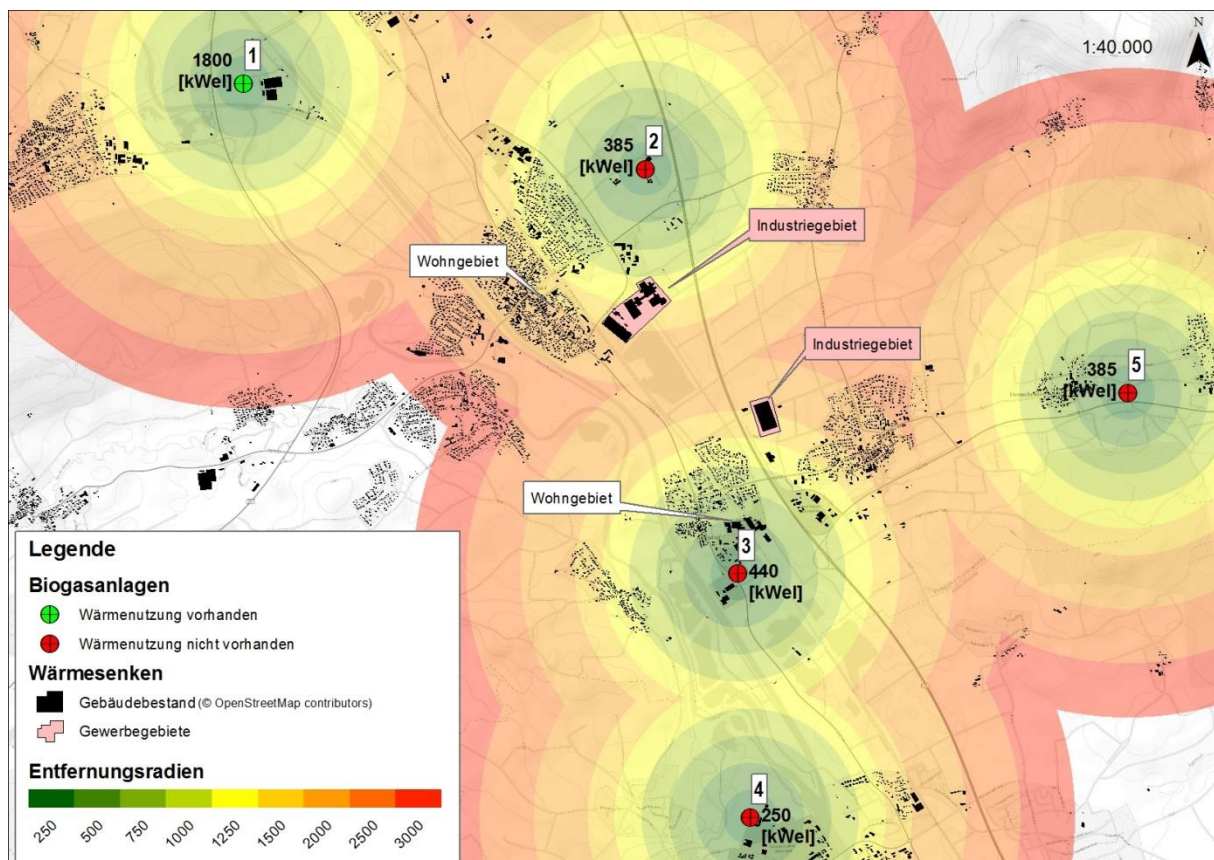


Abbildung 72: Verschneidung der Entfernungsradien mit dem OSM Gebäudebestand [UMSICHT].

Ist eine Gesamtoptimierung für ein Wärmenutzungskonzept nicht möglich, da z. B. das Wärmeangebot der Anlagen deutlich oberhalb des Wärmebedarfs liegt, so ist die Option der Biogasaufbereitung mit anschließender Einspeisung in das Gasnetz zu prüfen. Zu diesem Zweck wird angenommen, dass sich parallel zur Autobahn eine Gasleitung findet, die aufgrund ihrer Gasqualität und des Transportdrucks geeignet ist (Abbildung 73).

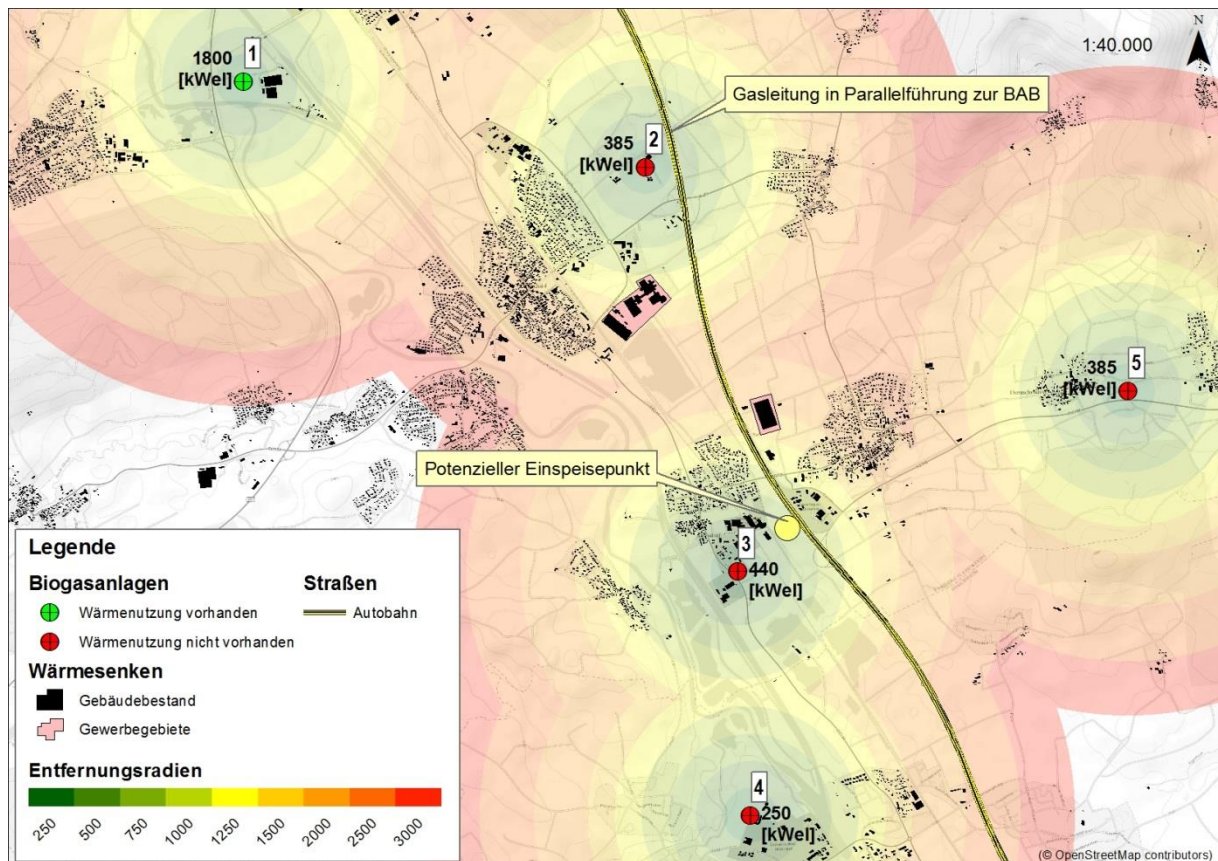


Abbildung 73: Entfernungsanalyse Gasleitung [UMSICHT]

Aufgrund der räumlichen Konstellation und insbesondere der Entfernungen ist grundsätzlich die Realisierung eines Anlagenverbunds möglich. Bei [86] wurde gezeigt, dass Anlagenverbünde zur gemeinsamen Biogaseinspeisung bzw. Versorgung eines Satelliten-BHKWs mit Trassenlängen bis 30 km wirtschaftlich realisiert werden können.

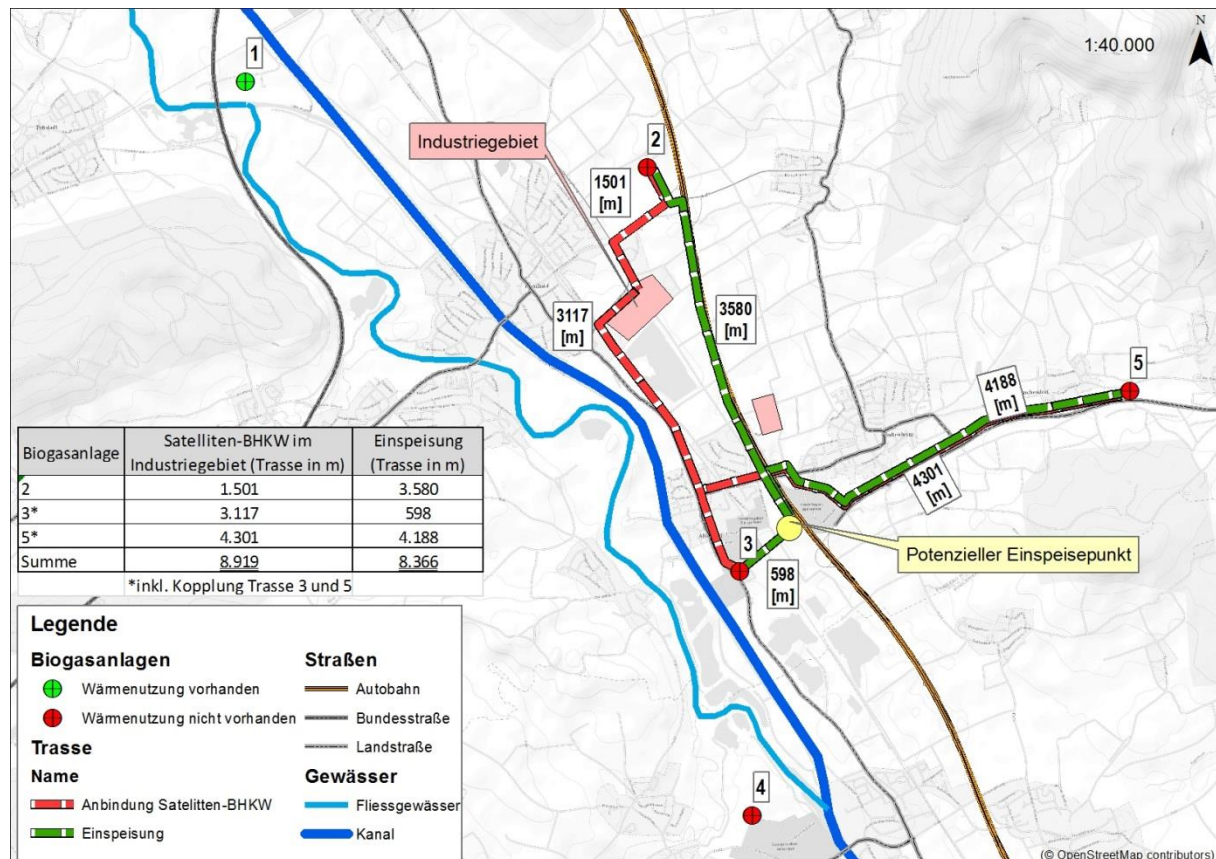


Abbildung 74: Trassenverlauf Mikrogasleitung [UMSICHT]

In Abbildung 74 sind mögliche Trassenverläufe zur Realisierung eines Anlagenverbundes für die Biogasanlagen 2, 3 und 5 dargestellt. Der rote Trassenverlauf mit einer Gesamtlänge von 8,9 km verbindet die Anlagen über eine Mikrogasleitung mit einem Satelliten-BHKW am Industriegebiet. Alternativ ist ein grüner Trassenverlauf dargestellt, der einen Anlagenverbund schafft, so dass eine gemeinsame Gasaufbereitung und Einspeisung geschaffen werden kann. Eine Anbindung der Anlage 4 ist nach Prüfung der o. g. Kriterien zur Trassenfindung nicht zu empfehlen, da neben einem Kanal auch noch ökologisch-sensible Flussauenbereiche zu queren sind, so dass eine raum- und umweltverträgliche Trasse wirtschaftlich kaum darstellbar ist

### 3.2.3 Zusammenfassung von mehreren einzelnen Biogasanlagen über eine Gassammelleitung mit zentraler Biogasaufbereitung

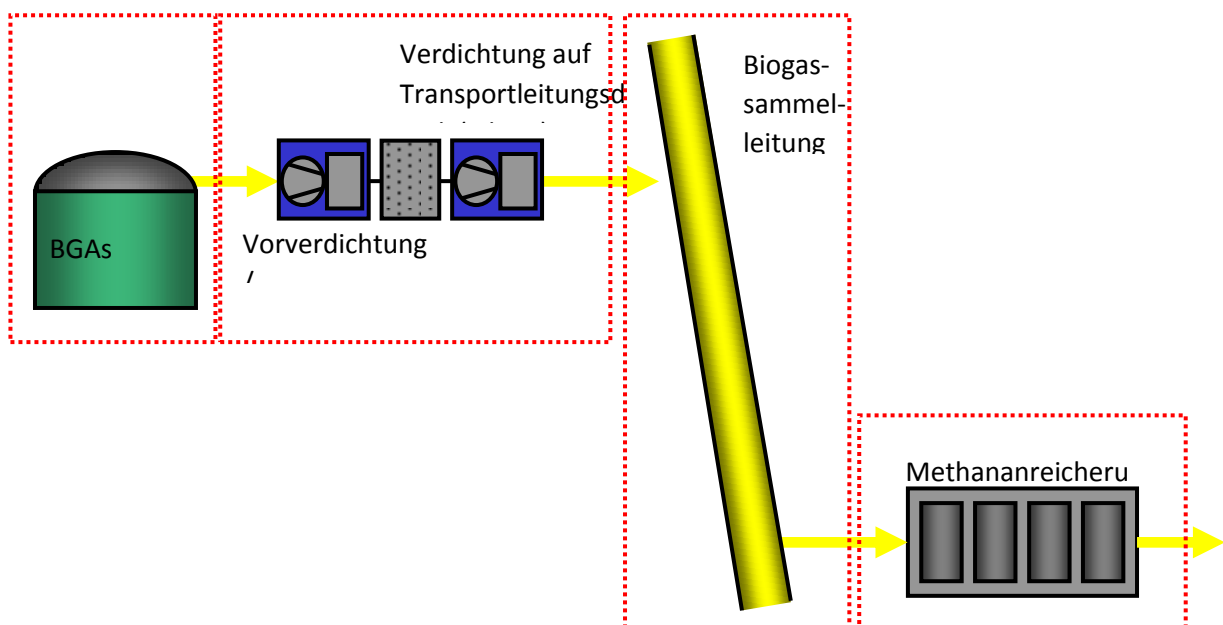
Eine herausragende Option für die Flexibilisierung von Biogasanlagen stellt die Umrüstung von Bestands-BGA mit Vorortverstromung auf die Biogaseinspeisung dar. Hierdurch steht das gesamte Gasnetz als Speicher für das Biogas zur Verfügung. darüber hinaus kann das Biogas an Standorten mit geeigneter Wärmesenke unter vollständiger energetischer Nutzung von Strom und Wärme genutzt werden. Eine Schwierigkeit bei dem Einsatz der Gasaufbereitung besteht allerdings bei der Vielzahl kleinerer Bestandsanlagen mit installierten elektrischen Leistungen von 500 kW oder darunter. Hier kann eine Gaseinspeisung nur unter idealen Bedingungen wirtschaftlich umgesetzt werden. Eine Option für den Anschluss solcher Anlagen an eine Biogasaufbereitung besteht jedoch durch die Zusammenfassung mehrerer Bestandsanlagen mit Hilfe einer Gassammelleitung. Für das Projekt Repowering wurde die Machbarkeit und Wirtschaftlichkeit dieser Option mit Daten realer

Biogasanlagen geprüft und bewertet. Die Anlagendaten wurden für eine exemplarisch gewählte Modellregion aus EnergyMap-Datensätzen [DGS-2013] entnommen.

Die Berechnung der Szenarien erfolgte anhand von Rechentools, welche im Kooperationsvorhaben »Nachhaltiges Biogas« [Klocke-2010] für die Neuerrichtung eines Biogasnetzes entwickelt wurden. Für das Repowering von Biogasanlagen wurden diese Tools für die Integration von Bestands-BGA erweitert

Es wurden die nachfolgend aufgeführten Module für das Biogassammelsystem berücksichtigt. Die Verschaltung der Module ist in Abbildung 75 schematisch dargestellt.

- Biogaserzeugung
- Aufbereitung für den Biogastransport
- Biogastransport – Biogassammelleitungen
- Methananreicherung



**Abbildung 75:** Aufteilung der Modell-Module

### 3.2.3.1 Biogaseinspeisesystem Szenario 1

#### Biogaserzeugung

Die Leistungen der Biogasanlagen (BGA) für das Szenario 1 sind in Tabelle 17 dargestellt.

**Tabelle 17:** Leistungsdaten für die im Szenario 1 berücksichtigten Biogasanlagen [UMSICHT]

Szenario 1: Gasnetz basierend auf Bestandsanlagen			
BGA	Elektrische Leistung	Biogas	aufbereitetes Biogas
		Gasmenge	Gasmenge
	[kW]	[Nm <sup>3</sup> /h]	[Nm <sup>3</sup> /h]
BGA 1	530	263,9	144,2
BGA 2	220	109,6	59,9
BGA 3	250	124,5	68,0
BGA 4	180	89,6	49,0
Summe		587,6	321,1

Bei den BGA handelt es sich durchweg um Bestandsanlagen. Leistungen und Inbetriebnahmezeitpunkte der Anlagen wurden aus den Energymap-Datensätzen [DGS-2013] entnommen. Zur Kalkulation der Anlagenkosten (Investition und Betrieb) wurden Mittelwerte der zum jeweiligen Inbetriebnahmezeitpunkt üblichen Investitionskosten für landwirtschaftliche BGA zugrunde gelegt. Insgesamt wird von einer Anlagenbetriebsdauer von jeweils 20 Jahren ausgegangen. Dem aus den bereits abgelaufenen Betriebszeiten resultierenden Restwert der Anlagen wurde zur Berechnung der Annuitäten eine Verzinsung von 3,5 % p.a. über die Restlaufzeit zugrunde gelegt. Tabelle 18 und Tabelle 19 zeigen die aus den Annahmen resultierenden Kapital- und Betriebskosten für die Anlagen.

**Tabelle 18:** Abgeschätzte Kapitalkosten für die Bestands-BGA [UMSICHT]

BGA	Leistung	spez. Invest	Invest ges.	IBN	Abschreibung	Buchwert 2014	verbleibende Abschreibungsdauer	CAPEX Annuität
	[kW]	[€/kW]	[€]		[a]	[€]	[a]	[€/a]
BGA 1	530	3200	1 696 000	2006	20	1 017 600	12	105 305 €
BGA 2	220	3500	770 000	2010	20	616 000	16	50 934 €
BGA 3	250	3300	825 000	2011	20	701 250	17	55 429 €
BGA 4	180	3600	648 000	2011	20	550 800	17	43 537 €



**Tabelle 19:** Abgeschätzte Betriebskosten für die Bestands-BGA [UMSICHT]

BGA	Betriebsstunden	Biogasproduktion	Biogas Brennwert	Maisäquivalent Substratbedarf	Substratkosten	Substratkosten gesamt	Betriebskosten pauschal	OPEX Betrieb + Substrate
	[h/a]	[Nm <sup>3</sup> /a]	[kWh/a(Hs)]	[t/a]	[€/t]	[€/a]	[€/a]	[€/a]
BGA 1	8 600	2 269 968	13 055 039	11 350	34	385 895	124 859	510 753
BGA 2	8 400	920 338	5 293 048	4 602	34	156 457	56 687	213 145
BGA 3	8 400	1 045 839	6 014 827	5 229	34	177 793	60 736	238 529
BGA 4	8 400	753 004	4 330 675	3 765	34	128 011	47 706	175 716

Auf Basis der abgeschätzten Kapital- und Betriebskosten errechnet sich ein über alle vier Anlagen gemittelter Rohbiogaspreis von 4,86 ct/kWh H<sub>2</sub><sup>9</sup>. Hierin sind über eine Verzinsung von 3,5 %/a auf die Investkosten hinaus noch keine weiteren Erlöse des BGA-Betreibers berücksichtigt. Eine genaue Aussage, welche Erlöse bei den Landwirten aus dem BHKW-Betrieb vor Ort realisiert werden können, ist nur im Rahmen einer Detailanalyse der jeweiligen Anlage möglich. Bei einer Rückrechnung aus den möglichen EEG-Erlösen (Basis EEG 2009) errechnet sich für die möglichen Rohgaserlöse für den Betreiber eine Spannbreite von 4,8 - 6 ct/kWh H<sub>2</sub> in Abhängigkeit von der Anlagenleistung und vom Wärmenutzungsgrad<sup>10</sup>. Für Biogasanlagen ohne eine geeignete Wärmesenke kann der Rohbiogaspreis von 4,86 ct/kWh H<sub>2</sub> somit als realisierbar betrachtet werden.

### 3.2.3.1.1 Aufbereitung für den Biogastransport am Ort der Biogaserzeugung

Die Aufbereitung an den Biogasanlagen erfolgt in einem Standardmodul in Containerbauweise. In diesem Modul sind alle notwendigen Aggregate und messtechnischen Einrichtungen für die Einspeisung in die Transportleitung vorgesehen. Für das Modul werden Investitionskosten in Höhe von insgesamt 160 000 Euro vorgesehen. Für die Einbindung des Moduls in das Gesamtsystem wird ein Aufschlag von 10 % berücksichtigt. Es wird von einer Nutzungsdauer von 10 Jahren und einer Verzinsung von 3,5 % per Jahr auf den Invest über die Nutzungsdauer ausgegangen.

### 3.2.3.1.2 Biogastransport Gassammelleitungen

In dem geplanten Gasnetz werden alle Anlagen über eine gemeinsame Sammelleitung mit zentraler Aufbereitungsanlage verknüpft. Als Einspeisepunkt für die Biogasaufbereitungsanlage wurde ein geeigneter Punkt an einer bestehenden Erdgasleitung festgelegt.

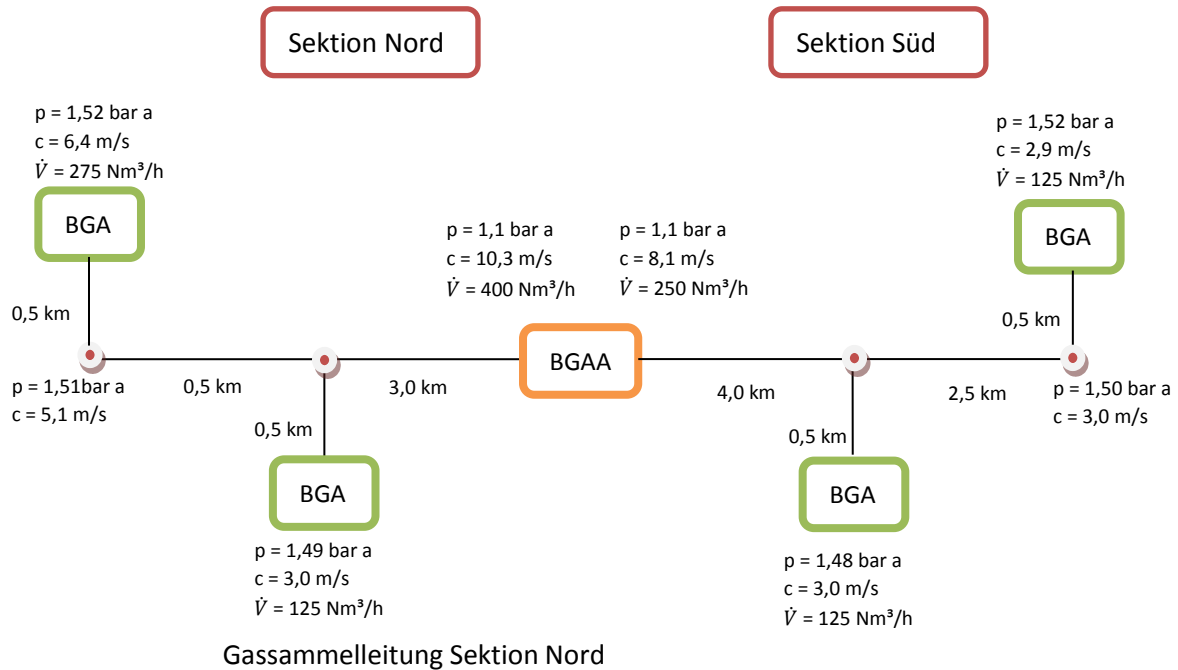
Das Biogassammelsystem besteht aus zwei Sektionen (Sektion Nord und Sektion Süd), von denen das Biogas der zentralen Aufbereitungsstation zugeführt wird. An jeder Sektion sind jeweils zwei BGA angeschlossen an der Nordsektion die BGA 1 mit einer Biogasproduktion von ca. 2 270 000 Nm<sup>3</sup>/a Rohbiogas und die BGA 2 mit einer Rohbiogasproduktion von ca. 920 000 Nm<sup>3</sup>/a. Die Sammelleitung der Nordsektion hat eine Leitungslänge von ca. 3,5 km zuzüglich jeweils ca. 500 m für die Einzelanschlussleitungen der BGA. Das Biogas wird an der zentralen Einspeisestelle in eine Erdgasleitung mit einem Betriebsdruck von 16 bar eingespeist.

An der Südsektion sind die BGA 4, mit einer Rohbiogasproduktion von 771 000 Nm<sup>3</sup>/a sowie die BGA 4 mit einer Rohbiogasproduktion von 1 071 000 Nm<sup>3</sup>/a angeschlossen. Bei der Südsektion hat die

<sup>9</sup> Mittelwert aus (OPEX+CAPEX)/Biogasbrennwert von allen berücksichtigten Anlagen

<sup>10</sup> Für den Wärmenutzungsgrad wurde eine Spannbreite von 0 – 30 % berücksichtigt.

Sammelleitung eine Länge von ca. 5,5 km und die Einzelanschlussleitungen haben eine Länge von jeweils 500 m. In Abbildung 76 ist der Aufbau der Sammelleitung schematisch dargestellt.



Bezeichnung	Werkstoff	DN	PN	Einzelkosten	Gesamtlänge	Gesamtkosten
				[€/m]	[km]	[€]
Einzelanschlussleitung	PE 100	125	4	47	1	47 080
Sammelleitung	PE 100	140	4	55	3,5	192 605
Summe						239 685

Gassammelleitung Sektion Süd

Bezeichnung	Werkstoff	DN	PN	Einzelkosten	Gesamtlänge	Gesamtkosten
				[€/m]	[km]	[€]
Einzelanschlussleitung	PE 100	125	4	47	1	47 080
Sammelleitung	PE 100	125	4	47	6,5	206 020
Summe						353 100

Abbildung 76: Schematische Darstellung der Biogassammelleitung für Szenario 1 [UMSICHT]

Aufgrund der relativ kurzen Leitungslängen sowie der geringen Gasvolumenströme können die Leitungsquerschnitte relativ klein dimensioniert werden.

- Einzelanschlussleitungen Sektion Nord PN100, DN 125
- Sammelleitungen Sektion Nord PN100, DN 140
- Einzelanschlussleitungen Sektion Süd PN100, DN 125
- Sammelleitungen Sektion Süd PN100, DN 125

Bei der Auslegung wurde darauf geachtet, dass der erforderliche Überdruck bei den Gasaufbereitungsstationen an den BGA maximal 500 mbar<sub>ü</sub> beträgt. Hierdurch ist es möglich, an den Stationen kostengünstige Seitenkanalverdichter einzusetzen.

Die Kostenrechnung basiert auf den Grundlagen, die im FuE Projekt »Nachhaltiges Biogas« entwickelt wurden. Die Gesamtkosten der Gassammelleitung einschließlich Armaturen und Planungskosten belaufen sich demnach auf ca. 680 000 Euro. Für die Wirtschaftlichkeitsberechnung wurde die Annuität basierend auf einer Nutzungsdauer von 40 Jahren und einer jährlichen Verzinsung von 3,5 % auf 30 000 Euro/a berechnet. Die Betriebskosten berücksichtigen Kosten für Wartung, Instandsetzung und Personal in Höhe von 700 €/km und wurden auf Basis dieses Wertes zu 8 400 Euro/a kalkuliert.

### 3.2.3.1.3 Aufbereitung für die Nutzung

Die Biogasproduktion für alle im Szenario 1 berücksichtigten BGA beträgt ca. 5 Mio. Nm<sup>3</sup>/a Rohbiogas. Hieraus errechnet sich ein Volumenstrom von ca. 590 Nm<sup>3</sup>/h Rohbiogas bzw. 320 Nm<sup>3</sup>/h aufbereitetes Biogas bei angenommenen 8 500 Betriebsstunden pro Jahr. Für die Biogasaufbereitung handelt es sich hiermit um einen eher geringen Volumenstrom. Von den marktgängigen Methananreicherungsanlagen sind für diese Größenordnung insbesondere Membranverfahren geeignet, da sie sich durch einen einfachen apparativen Aufbau auszeichnen. Membranverfahren haben im Biogasbereich zwar noch keine besonders große Verbreitung, werden aktuell aber schon von mindestens vier Lieferanten angeboten, die bewährte Biogasaufbereitungsanlagen bereitstellen können. In den Niederlanden und in Österreich wurden bereits Aufbereitungsverfahren basierend auf der Membrantechnologie, zum Teil in Kombination mit anderen Aufbereitungsverfahren, in Betrieb genommen.

Im Gegensatz zu anderen Aufbereitungsverfahren, wie z. B. Gaswäschen, hat die Membrantechnologie vergleichsweise geringe Anforderungen an den Anlagenstandort, da lediglich ein ausreichender Stromanschluss benötigt wird. Als weitere Vorteile sind zu nennen:

- Verzicht auf teure oder wassergefährdende Hilfsstoffe
- kein Wasserbedarf, kein Anfall von Abwässern
- kein Wärmebedarf
- wartungsarmer Betrieb, da der Anlagenaufbau wenige bewegliche Bauteile enthält
- einfache Skalierbarkeit
- kurze Anlaufzeiten des Prozesses und ein daraus resultierendes gutes Start-Stopp-Verhalten

Die Kostenrechnung für die Membrananlage basiert auf belastbaren bei Fraunhofer UMSICHT vorliegenden Daten verschiedener Anlagenhersteller. Für den Invest der Anlage werden 1,7 Mio. Euro angesetzt. Zusätzlich werden 250 000 Euro als anteilige Zahlung für die Einspeisestation angesetzt. Für die Planungskosten und Integration der Anlage in das Gesamtsystem werden 10 % der Investitionssumme veranschlagt. Der Übergabedruck der Membrananlage an die Einspeisestation beträgt ca. 5 bar. Eine weitere Druckerhöhung ist in der Kostenrechnung nicht berücksichtigt, da die Druckerhöhung auf Netzdruck gemäß der geltenden Gasnetzzugangsverordnung [GasNZV-2013] dem Netzbetreiber obliegt. Der Berechnung der Annuität für den Invest liegt eine Finanzierung über 15 Jahre und eine Verzinsung von 3,5 % zugrunde.

### 3.2.3.1.4 Zusammenfassung Szenario 1

Basierend auf den dargestellten Annahmen errechnen sich für das Szenario 1 des Sammelsystems die in Tabelle 20 dargestellten Investitions- und Betriebskosten.

**Tabelle 20:** Szenario 1 – Biogassammelsystem ausschließlich basierend auf Bestands-BGA [UMSICHT]

Erzeugter Biogasbrennwert H <sub>5</sub> [kWh/a]: 28 693 589			
Abschreibungsdauern:			
Biogasanlage:	Basis 20 a / 12 - 17 a Abschreibung abhängig von IBN-Datum		
Rohbiogasaufbereitung:			10 a
Biogassammelleitung		40 a	
Methananreicherung (Membrantechnik)			15 a
Verzinsung bei allen Komponenten 3,5 % auf den Invest über die gesamte Abschreibungsdauer			
Position	CAPEX [€/a]	OPEX [€/a]	Gaserzeugungskosten [ct/kWh]
Biogasanlagen	250 205		
Biogaserzeugung einschließlich Rohstoffe		1 138 143	
Modul Biogaserzeugung			4,86
Rohbiogasaufbereitung am Anlagenstandort	81 787	94 736	
Modul Rohbiogasaufbereitung			0,63
Biogastransportleitung	31 692	8 400	
Modul Biogastransportleitung			0,14
Biogasaufbereitungsanlage (Membrantechnologie)	183 114	300 300	
Modul Biogasaufbereitung			1,68
Gesamtkosten Einspeisesystem	549 484	1 540 579	7,29
Gesamtkosten unter Berücksichtigung von 2 % Methanverlust			7,43

Die Gesamtgestehungskosten von 7,43 ct/kWh (H<sub>5</sub>) liegen in der Größenordnung der derzeit marktüblichen Biomethanpreise. Die Berechnungsansätze verfügen unter Berücksichtigung des Aspekts, dass es keine verhandelten Preise sind, über eine ausreichende Sicherheit. Darüber hinaus wurde bei der Berechnung der Investitionskosten jeweils davon ausgegangen, dass der Finanzierungszeitraum die gesamte Abschreibungsdauer umfasst und durchgehend mit 3,5 % verzinst wird. In den Preisen sind jedoch noch keine Gewinne berücksichtigt. Unter Abwägung dieser

Aspekte kann das Fazit gezogen werden, dass das Szenario 1 ein Konzept darstellt, welches sich an der Grenze zur Wirtschaftlichkeit befindet.

### 3.2.3.2 Biogaseinspeisesystem Szenario 2

#### 3.2.3.2.1 Biogaserzeugung

Für die Umsetzung von Szenario 2 wird analog zu Szenario 1 von der Einbindung der vier Bestandsanlagen ausgegangen. Darüber hinaus wurde der Bestand um drei weitere Biogasanlagen erweitert. Hintergrund dieser Erweiterung war eine Zubaustrategie, die zu einer Kostenreduzierung durch die Kombination von Bestands- und Neuanlagen führen soll.

Bei der Auslegung der Neuanlagen wurde der Anteil von Silomais auf 33 % der Substratmasse begrenzt, um eine nachhaltige Fruchtfolge realisierbar zu machen und der herrschenden Diskussion um die »Vermaisung« der Landschaft durch Biogasanlagen entgegenzuwirken. Als weitere Substrate werden können alternative Anbaubiomassen oder Reststoffe eingesetzt werden. Diese Substratmischung ermöglicht einen Anbau mit nachhaltigen Fruchtfolgen. Die Biogasproduktion erhöht sich in diesem Szenario deutlich auf 1 285 Nm<sup>3</sup>/h Rohbiogas bzw. 700 Nm<sup>3</sup>/h aufbereitetes Biogas.

Wird eine Produktionsmenge von 700 Nm<sup>3</sup>/h Biogas nicht überschritten, kann der maximale Gasaufbereitungsbonus von 3 ct/kWh für den elektrischen Strom bei KWK-Nutzung des Biogases einkalkuliert werden [39]. Daher ist es aus wirtschaftlichen Gesichtspunkten sinnvoll, die Maximalkapazität der Gasaufbereitungsanlage auf diesen Wert zu begrenzen, auch wenn die verfügbaren Potenziale in der betrachteten Region darüber liegen. Die Leistungsdaten aller in Szenario 2 berücksichtigten Biogasanlagen sind in Tabelle 21 dargestellt.

**Tabelle 21:** Leistungsdaten für die im Szenario 2 berücksichtigten Biogasanlagen [UMSICHT]

Szenario 2: Gasnetz mit Ausbau auf max. 700 Nm <sup>3</sup> /h aufbereitetes Rohgas			
BGA	Elektrische Leistung	Biogas	aufbereitetes Biogas
Name		Gasmenge	Gasmenge
	[kW]	[Nm <sup>3</sup> /h]	[Nm <sup>3</sup> /h]
BGA 1 (Bestand)	530	263,9	144,2
BGA 2 (Bestand)	220	109,6	59,9
BGA 3 (Bestand)	250	124,5	68,0
BGA 4 (Bestand)	180	89,6	49,0
BGA 5 (Neubau)	500	249,0	136,1
BGA 6 (Neubau)	500	249,0	136,1
BGA 7 (Neubau)	400	199,2	108,8
Summe		1 284,9	702,1

#### 3.2.3.2.2 Aufbereitung für den Biogastransport

Die Aufbereitung an den Biogasanlagen erfolgt analog zu Szenario 1 in Standard-Modulen in Containerbauweise. Die Kostenansätze wurden identisch gewählt.

### 3.2.3.2.3 Biogastransport Gassammelleitungen

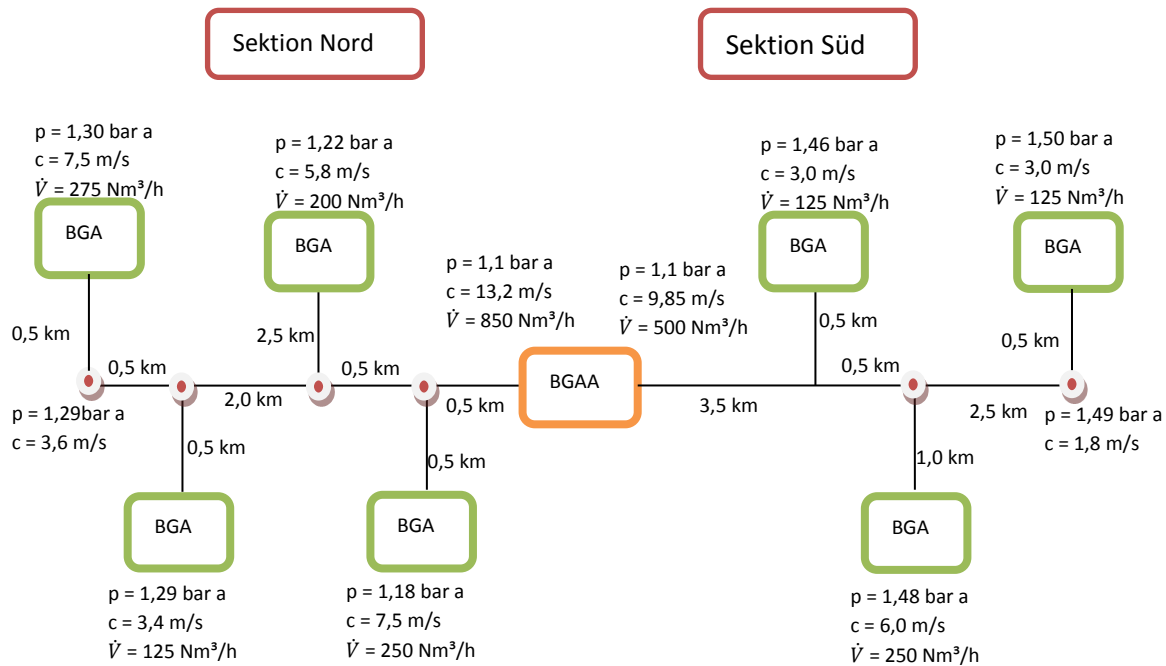
In dem geplanten Gasnetz werden alle Anlagen über eine gemeinsame Sammelleitung mit zentraler Aufbereitungsanlage miteinander verknüpft. Das Biogassammelsystem besteht aus zwei Sektionen (Sektion Nord und Sektion Süd), von denen das Biogas der zentralen Aufbereitungsstation zugeführt wird.

An der Nordsektion sind die BGA 1 mit einer Biogasproduktion von ca. 2 270 000 Nm<sup>3</sup>/a Rohbiogas und die BGA 2 mit einer Rohbiogasproduktion von ca. 920 000 Nm<sup>3</sup>/a angeschlossen. Hinzu kommen zwei neu zu errichtende Anlagen mit Produktionskapazitäten von 1 170 000 Nm<sup>3</sup>/a bzw. 936 000 Nm<sup>3</sup>/a Rohbiogas.

Die Sammelleitung der Nordsektion hat eine Leitungslänge von ca. 3,5 km zuzüglich jeweils ca. 500 m für die Einzelanschlussleitungen der BGA.

An der Südsektion sind die BGA 3 mit einer Rohbiogasproduktion von 771 000 Nm<sup>3</sup>/a sowie die BGA 4 mit einer Rohbiogasproduktion von 1 071 000 Nm<sup>3</sup>/a sowie eine neu zu errichtende Anlage mit 1 170 000 Nm<sup>3</sup>/a Rohbiogasproduktion angeschlossen.

Bei der Südsektion hat die Sammelleitung eine Länge von ca. 5,5 km und die Einzelleitungen der BGA 3 und BGA 4 haben Anschlussleitungen mit Längen von jeweils 500 m, die Anschlussleitung der neu zu errichtenden Anlage hat eine Länge von 1 500 m. In Abbildung 77 ist der Aufbau der Sammelleitung schematisch dargestellt.



Gassammelleitung Sektion Nord

Bezeichnung	Werkstoff	DN	PN	Einzelkosten	Gesamtlänge	Gesamtkosten
				[€/m]		
Einzelanschlussleitung	PE 100	125	4	47	4,0	188 320
Sammelleitung	PE 100	180	4	74	3,5	259 600
Summe						447 953

Gassammelleitung Sektion Süd

Bezeichnung	Werkstoff	DN	PN	Einzelkosten	Gesamtlänge	Gesamtkosten
				[€/m]		
Einzelanschlussleitung	PE 100	125	4	47	2,0	94 160
Sammelleitung	PE 100	160	4	66	6,5	426 595
Summe						520 755

Abbildung 77: Schematische Darstellung der Biogassammelleitung für Szenario 2 [UMSICHT]

Bei der Auslegung der Gassammelleitungen wurde ein Fokus auf einen geringen Druckverlust gelegt, der erforderliche Überdruck bei den Gasaufbereitungsstationen an den BGA beträgt maximal 450 mbar<sub>ü</sub>, wodurch an den Gasvorbehandlungsstationen der Biogasanlagen kostengünstige Seitenkanalverdichter eingesetzt werden können.



- Einzelanschlussleitungen Sektion Nord PN100, DN 125
- Sammelleitungen Sektion Nord PN100, DN 180
- Einzelanschlussleitungen Sektion Süd PN100, DN 125
- Sammelleitungen Sektion Süd PN100, DN 160

Die Gesamtkosten der Gassammelleitung einschließlich Armaturen und Planungskosten belaufen sich auf ca. 1 092 000 Euro. Für die Wirtschaftlichkeitsberechnung wurde die Annuität basierend auf einer Nutzungsdauer von 40 Jahre und einer jährlichen Verzinsung von 3,5 % auf 48 000 Euro/a berechnet. Die Betriebskosten berücksichtigen Kosten für Wartung, Instandsetzung und Personal in Höhe von 700 €/km und wurden auf Basis dieses Wertes zu 11 200 Euro/a kalkuliert.

#### 3.2.3.2.4 Aufbereitung für die Nutzung

Die Biogasproduktion für alle im Szenario 2 berücksichtigten BGA beträgt ca. 9,3 Mio. Nm<sup>3</sup>/a Rohbiogas. Hieraus errechnet sich ein Volumenstrom von ca. 1 080 Nm<sup>3</sup>/h Rohbiogas bzw. 700 Nm<sup>3</sup>/h aufbereitetes Biogas. Dieser Biogasvolumenstrom stellt die Obergrenze für den Bezug des maximalen Gasaufbereitungsbonus dar. Damit ergibt sich hier ein Optimum aus der Kombination von wirtschaftlicher Anlagengröße und Vergütung. Dementsprechend bieten alle relevanten Hersteller von Biogasaufbereitungsanlagen Anlagen in dieser Größenordnung an.

Für die Biogassammelleitung wurde unter den gegebenen Randbedingungen ein Aufbereitungsverfahren nach dem Prinzip der Druckwechseladsorption als geeignetes Verfahren gewählt. Zur Biogasaufbereitung wird die Druckwechseladsorption bereits vielfach angewendet und stellt in Deutschland eines der Standardverfahren zur Methananreicherung bzw. CO<sub>2</sub>-Abtrennung aus biogenen Gasen dar. Das Verfahren entspricht dem Stand der Technik und wird weltweit von mehreren Lieferanten angeboten (u. a. Schmack CarboTech GmbH, ETW Energie GmbH, Cirmac International BV, Xebec Adsorption Inc., Mahler AGS GmbH) und großtechnisch zur Biogasaufbereitung eingesetzt. Von den ca. 130 Biogasaufbereitungsanlagen in Deutschland (Stand September 2013) nutzen mindestens 31 das Prinzip der Druckwechseladsorption, welches damit zu den etablierten Aufbereitungstechnologien zu zählen ist.

Im Gegensatz zu den meisten anderen Aufbereitungsverfahren hat die Druckwechseladsorption vergleichsweise geringe Anforderungen an den Anlagenstandort, da nur ein ausreichender Stromanschluss benötigt wird. Als weitere Vorteile sind zu nennen:

- Verzicht auf teure oder wassergefährdende Hilfsstoffe
- kein Wasserbedarf, kein Anfall von Abwässern
- kein Wärmebedarf

Die Kostenrechnung für die Druckwechseladsorptionsanlage basiert auf belastbaren, bei Fraunhofer UMSICHT vorliegenden Daten, verschiedener Anlagenhersteller. Für den Invest der Anlage werden 2,7 Mio. Euro angesetzt. Zusätzlich werden 250 000 Euro als anteilige Zahlung für die Einspeisestation angesetzt. Für die Planungskosten und Integration der Anlage in das Gesamtsystem werden 10 % der Investitionssumme angesetzt. Analog zu Szenario 1 wurden auch in diesem Szenario aufgrund der Regelungen in der Gasnetzzugangsverordnung keine Kosten für eine

Verdichtung auf den Netzdruck berücksichtigt. Der Übergabedruck der PSA-Anlage liegt bei ca. 4,5 bar.

Für die Berechnung der Annuität für den Invest liegt eine Finanzierung über 15 Jahre und eine Verzinsung von 3,5 % zugrunde.

### 3.2.4 Zusammenfassung Szenario 2

Basierend auf den dargestellten Annahmen errechnen sich für das Szenario 2 des Sammelsystems die in Tabelle 22 dargestellten Investitions- und Betriebskosten.

**Tabelle 22:** Szenario 2 – Biogassammelsystem unter Berücksichtigung eines Anlagenneubaus bis auf 700 Nm<sup>3</sup>/h Rohbiogas [UMSICHT]

Erzeugter Biogasbrennwert H <sub>5</sub> [kWh/a]: 62 616 137			
Abschreibungsdauern:			
Biogasanlage: Basis 20 a / 12 - 17 a Abschreibung abhängig von IBN-Datum für Bestandsanlagen; 20 a für Neuanlagen			
Rohbiogasaufbereitung: 10 a			
Biogassammelleitung 40 a			
Methananreicherung (Druckwechseladsorption) 15 a			
Verzinsung bei allen Komponenten 3,5 % auf den Invest über die gesamte Abschreibungsdauer			
Position	CAPEX [€/a]	OPEX [€/a]	Gaserzeugungskosten [ct/kWh]
Biogasanlagen	611 514		
Biogaserzeugung einschließlich Rohstoffe		2 573 243	
Modul Biogaserzeugung			5,09
Rohbiogasaufbereitung am Anlagenstandort	143 128	165 788	
Modul Rohbiogasaufbereitung			0,49
Biogastransportleitung	47 919	10 500	
Modul Biogastransportleitung			0,10
Biogasaufbereitungsanlage (DWA)	276 711	300 000	
Modul Biogasaufbereitung			0,92
Gesamtkosten Einspeisesystem	1 079 272	3 049 531	6,60
Gesamtkosten unter Berücksichtigung von 2 % Methanverlust			6,73

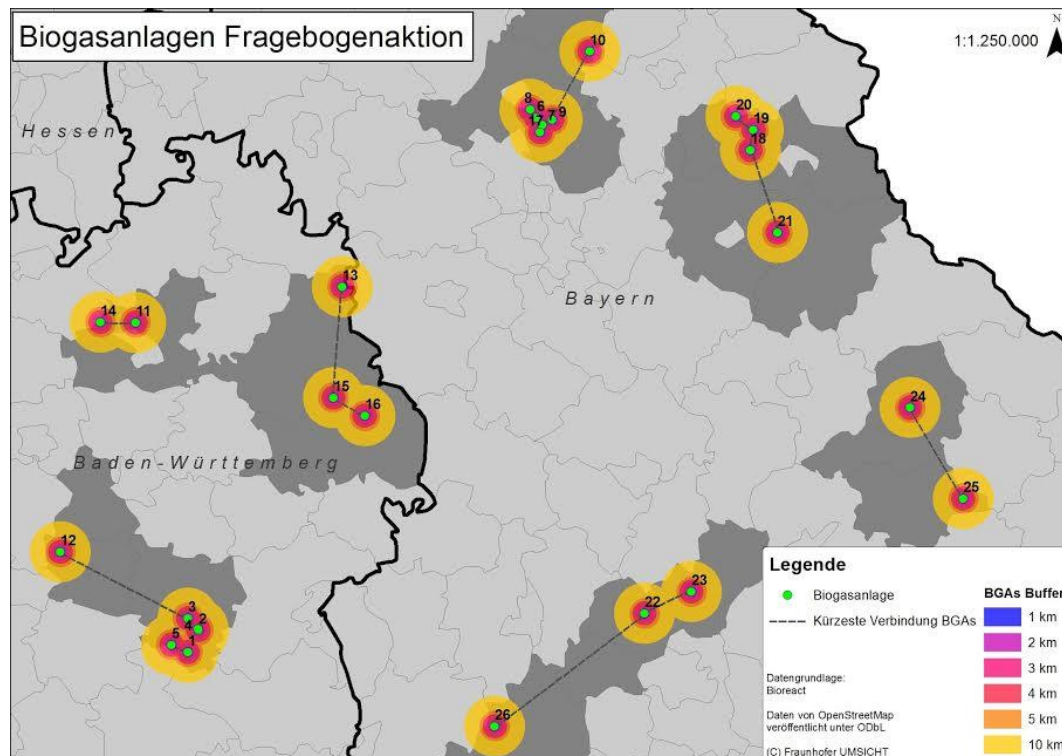
Die Gesamtgestehungskosten von 6,73 ct/kWh liegen unterhalb der derzeit marktüblichen Biomethanpreise. Darüber hinaus verfügen die Berechnungsansätze unter Berücksichtigung des Aspekts, dass es keine verhandelten Preise sind, über eine ausreichende Sicherheit. Bei den Investitionskosten wurde jeweils davon ausgegangen, dass der Finanzierungszeitraum die gesamte Abschreibungsdauer umfasst und durchgehend mit 3,5 % verzinst wird.

In den Preisen sind über die Verzinsung von 3,5 % hinaus, die auch als Erlöse auf das Eigenkapital angerechnet werden können, noch keine Gewinne berücksichtigt. Mit der Einrechnung höherer Gewinnmargen, steigen auch die Biomethangestehungskosten. Darüber hinaus müssen für die Biogaseinspeisung keine weiteren Kosten mehr eingerechnet werden. Ein Entgelt für die Einspeisung von Biogas in das Erdgasnetz fällt »unabhängig vom Einspeiser (Gasproduzent oder Gasnetzbetreiber) und unabhängig von der Netzebene (Verteiler- oder Fernleitungsnetz)« nicht an. Dies resultiert aus § 18 und § 19 der Gasnetzentgeltverordnung [GasNEV-2013]. Nach § 18 Abs. 1 Satz 3 GasNEV sind für die Einspeisung in das örtliche Verteilernetz keine Einspeiseentgelte zu entrichten. § 19 Abs. 1 Satz 3 GasNEV besagt, dass für die Einspeisung von Biogas in das Fernleitungsnetz ebenfalls keine Einspeiseentgelte zu entrichten sind. Entgelte für die Gasausspeisung werden vom »Gaskäufer« getragen, dieser Kostenpunkt würde ebenso bei der Nutzung von Erdgas anfallen.

Unter Abwägung aller Aspekte kann das Fazit gezogen werden, dass das Szenario 2 mit großer Wahrscheinlichkeit wirtschaftlich umgesetzt werden kann.

### 3.2.5 Konzepte für die Umsetzung alternativer Substratformen

Für die im AP 1 ermittelten Optionen Möglichkeiten der Bioabfall- und Pferdemistverwertung in bestehenden NawaRo-Biogasanlagen sollen im Folgenden anhand eines Planungsraumes, der im Rahmen des AP 2 aus der Betreiberbefragung der Bioreact und von Fraunhofer UMSICHT entwickelt wurde, mögliche Nutzungskonzepte erarbeitet werden. Abbildung 78. zeigt eine Übersichtskarte des Planungsraumes, welcher sich über Bayern und Baden-Württemberg erstreckt. Der Planungsraum beinhaltet 26 Biogasanlagen, die zum größten Teil NawaRo und tierische Exkremente (Gülle und Mist) nutzen. Die durchschnittliche installierte elektrische Leistung der betrachteten Biogasanlagen beläuft sich auf 450 kW, wobei eine Biogasanlage (Nr. 25) diesbezüglich keine Auskunft gab.



**Abbildung 78:** Planungsraum auf Grundlage einer Betreiberbefragung [Bioreact GmbH, Fraunhofer UMSICHT]

Eine Besonderheit stellt die Biogasanlage Nummer 8 dar, hierbei handelt es sich um eine Bioabfallvergärungsanlage betrieben von der BEB Bio Energie Bamberg GmbH & Co. KG. Die installierte Leistung der Anlage, welche mit Bioabfällen aus der Biotonne, organischen Gewerbeabfällen und Grüngut aus der Stadt sowie dem Landkreis Bamberg und dem Landkreis Forchheim versorgt wird, liegt bei 1,3 MW. Im Jahr 2013 wurden in der Anlage insgesamt 21 268 t Bioabfälle, organische Gewerbeabfälle und Grüngut verarbeitet [87]. Die Biogasanlagen mit den Nummern 6 bis 9 befinden sich allesamt im Landkreis Bamberg und die Biogasanlage mit der Nummer 17 im Landkreis Forchheim. Angesichts der bestehenden Bioabfallvergärungsanlage der BEB Bio Energie GmbH & Co. KG ist eine Umrüstung der bestehenden Anlagen wirtschaftlich gesehen uninteressant, da der Bioabfall bereits verwertet wird. Aus diesem Grund werden diese Biogasanlagen im weiteren Teil der möglichen Konzepte für die Bioabfallverwertung nicht weiter betrachtet.

Ein ähnlicher Sachverhalt ergibt sich für die Biogasanlagen 10 und 18 bis 20, welche in den Landkreis Lichtenfels (10) bzw. Neustadt an der Waldnaab (18-20) liegen. Die Landkreise Neustadt an der Waldnaab und Lichtenfels zählen zu den 57 bis 69 Landkreisen in Deutschland die, trotz gesetzlicher Sammelpflicht ab dem 01. Januar 2015, über kein Biotonnenangebot durch den öRE verfügen [88]. Auch diese Anlagen werden wegen der mangelnden Versorgungsmöglichkeit durch gesammelten Bioabfall für weitere Konzeptmöglichkeiten der Bioabfallverwertung nicht berücksichtigt. Des Weiteren lässt sich bei Betrachtung der Substratzusammensetzungen feststellen, dass sechs Anlagen (14, 22-26) des Planungsraums nach dem Verfahren der Trockenfermentation betrieben werden und die Biogasanlage 12 keine NawaRo-Biogasanlage ist. Die in Kapitel 5.2 und 5.3 beschriebenen Möglichkeiten zur Bioabfall- und Pferdemitverwertung in bestehenden NawaRo-Biogasanlagen beziehen sich jedoch speziell auf NawaRo-Biogasanlagen mit dem Verfahren der Nassfermentation und stellen somit für die genannten Anlagen (12, 14, 22-26) keine Alternative dar.

Nach Beachtung der Besonderheiten ergeben sich im Planungsraum somit potenziell 14 (1-11, 13, 15, 16) Standorte zur Bioabfallverwertung und 19 Standorte für die Pferdemistverwertung (1-11, 13, 15-21).

### 3.2.5.1 Dezentrale oder Zentrale Aufbereitungsanlagen für Bioabfälle

Aufgrund der zu meist relativ geringen Energiedichten von den Bioenergieträgern (Bioabfall, NawaRo, Gülle,...) ist ein Transport dieser meist sehr kostenintensiv, weshalb eine Nutzung am Ort des Substratanfalls anzustreben ist. In der **Tabelle 23**: Gegenüberstellung von ausgewählten Energieträgern anhand ihrer Energiedichte (verändert nach [89]) Tabelle 23 sind ausgewählte Energieträger anhand ihrer ungefähren Energiedichten gegenübergestellt.

**Tabelle 23:** Gegenüberstellung von ausgewählten Energieträgern anhand ihrer Energiedichte (verändert nach [89])

Energieträger:	Art des Energieträgers:	Energiedichte [MJ/kg]:
Rohöl	fossil	42
Rapsöl	biogen	37
Steinkohle	fossil	30
Braunkohle	fossil	20
Waldrestholz	biogen	15
Industrierestholz	biogen	12
Energiemais	biogen	7
Bioabfall	biogen	4
Gülle	biogen	1

Die Gegenüberstellung der Energiedichten von biogenen und fossilen Energieträgern in Tabelle 23 zeigt, dass lediglich Pflanzenöle (hier anhand Rapsöl) und Brennholz (Waldrestholz und Industrieholz) ähnlich hohe Energiedichten wie die fossilen Energieträger (Rohöl, Steinkohle,...) aufweisen. Dagegen liegen die Energiedichten von den für die Nutzung in Biogasanlagen prädestinierten Substratformen (Energiemais, Bioabfall und Gülle) deutlich unterhalb der Energiedichten fossiler Energieträger. Nach HAUFF et al. (2008) liegen typische Einzugsgebiete für die Versorgung von Biogasanlagen mit Gülle bei bis zu 10 km und für Mais bei bis zu 15 km. Ein Richtwert für das Einzugsgebiet von Bioabfall wird von HAUFF et al. (2008) nicht angegeben. Da die Energiedichte vom Bioabfall genau zwischen den der Gülle und des Energiemaisses liegt, wird als Annäherung zunächst ein Einzugsgebiet von 12,5 km angenommen. Hierbei dient die Entfernung von 12,5 km lediglich zu einer ersten Erstellung von möglichen Nutzungskonzepten und kann nicht als fester Wert angesehen werden. Das Einzugsgebiet von den Bioenergieträgern hängt generell von mehreren Faktoren ab (Nutzungsart, Transportart (LKW, Bahn,...),...) wie auch die weitaus höhere Entfernung des Waldrestholzes nach [89] von 100 km (nach Annahme für Bioabfall: ca. 22 km) deutlich macht. Hinzu kommt das die Energiedichte von Bioabfall ähnlich wie der Biogasertrag von Bioabfall, maßgeblich von der Zusammensetzung des Bioabfalls geprägt wird.

Zunächst werden aus diesem Grund die potenziellen Standorte des Planungsraums hinsichtlich ihres Bioabfallaufkommen im Umkreis von 12,5 km untersucht. Bei dem Ansatz über die Energiedichte wird allerdings nicht berücksichtigt, dass die Bioabfallentsorgung stattfinden muss und deshalb auch

teilweise längere Transportwege zur Abfallentsorgungsanlage in Kauf genommen werden müssen. Dies bestätigt auch eine Berechnung über die Gesamtfläche Deutschlands und der Anzahl der zur Verfügung stehenden Entsorgungsanlagen.

*Die Gesamtfläche von Deutschland beträgt 357 341 km<sup>2</sup> die anfallenden Abfälle aus der Biotonne wurden im Jahr 2012 in 306 Entsorgungsanlagen beseitigt [90]. Daraus ergibt sich ein Einzugsgebiet von ungefähr 1.200 km<sup>2</sup> für jede Entsorgungsanlage. Unter Annahme eines kreisförmigen Einzugsgebiets beträgt dessen Radius (r), der stellvertretend für die Transportentfernung steht, ca. 20 km.*

#### Überschlägige Bestimmung der momentanen Transportentfernungen:

$$\frac{\text{Gesamtfläche Deutschlands [km}^2\text{]}}{\text{Anzahl der Entsorgungsanlagen [-]}} = \pi \cdot r^2$$

$$r \approx 20 \text{ km}$$

Mit der so ermittelten Transportentfernung wird eine erneute Potenzialanalyse durchgeführt. Auf Grundlage der beiden Potenzialanalysen werden im weiteren Verlauf mögliche Nutzungskonzepte vorgestellt.

Die Datengrundlage für eine Potenzialabschätzung für die mögliche Pferdemitverwertung in bestehenden NawaRo-Biogasanlagen im Planungsraum ist sehr gering, trotzdem sollen auch hierzu Nutzungsmöglichkeiten vorgestellt werden.

#### 3.2.5.2 Potentialanalyse und Erstellung von möglichen Nutzungskonzepten für die Verwertung von Bioabfällen in NawaRo-Biogasanlagen des Planungsraums

Die Grundlage für eine Bioabfallverwertung in bestehenden NawaRo-Biogasanlagen bildet die getrennte Sammlung von Bioabfällen durch die örE, wodurch eine Versorgungssicherheit der Biogasanlage gewährleistet werden kann. Die Leerung von Biotonnen in Deutschland erfolgt in der Regel alle 14 Tage, wobei in den Sommermonaten teilweise auch wöchentliche Leerungen erfolgen [88]. Ziel der potenziellen Standorte ist es den örE, nach Anpassung der Anlagentechnik, eine lokale Möglichkeit zur Abfallbeseitigung zu bieten.

Um eine Potenzialabschätzung vorzunehmen wird im weiteren Verlauf eine Erfassungsmengen für Bioabfall aus der Biotonne von 60 kg/E · a angenommen, wobei es sich um einen Richtwert für städtische Siedlungsstrukturen handelt [88]. Die Bevölkerungszahlen in der Umgebung von den potenziellen Standorten für eine Aufbereitungsanlage beziehen sich auf den 31.12.2012 und wurden dem Gemeindeverzeichnis des Destatis entnommen [91]. Durch eine Multiplikation der Einwohnerzahlen mit der Erfassungsmenge kann die anfallende Bioabfallmenge bestimmt werden. Aus einer weiteren Multiplikation der Abfallmenge mit dem Biogasertrag von Bioabfall [123 m<sup>3</sup><sub>n</sub> Biogas/t FM] ergibt sich, dass Biogaspotenzial [m<sup>3</sup><sub>n</sub> Biogas] aus Bioabfall für den jeweiligen Standort. Dabei diente zur Erstellung der Übersichtskarten und Ermittlung der Entfernungen *Google Maps*. Mit Hilfe des Tools „Entfernung messen“ wurden die jeweiligen Entfernungen ermittelt. Die Basis bildet dabei eine zur Verwertung von Bioabfall angepasste NawaRo-Biogasanlage des Planungsraums. Als Ansatzpunkt für die Entfernungsmessung wurden, die jeweiligen Gemeindennamen genutzt, da diese stellvertretend für den Ortsmittelpunkt angesehen werden können. Zu beachten ist das die so ermittelten Entfernungen nur als grobe Abschätzung dienen. Neben der eigentlichen Entfernung zur

Basisbeeinflusst die Routenplanung der Abfallsammlung die Länge der Strecke bis zur Basis maßgeblich.

Das mögliche Vorgehen zur Beurteilung von möglichen Nutzungskonzepten, soll anhand der Biogasanlage Nummer 5 im weiteren Verlauf erläutert werden.

In einer ersten Potenzialanalyse wird zunächst die Biogasanlage Nummer 5 in einem Umkreis von 12,5 km untersucht. Das Einzugsgebiet und die Lage der Anlage werden durch die Übersichtskarte in **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** veranschaulicht und in Tabelle 24 sind die im Einzugsgebiet befindlichen Gemeinden mit ihrer Einwohneranzahl zusammengefasst. Zudem sind in der Tabelle die möglichen Biogaserträge aus dem Bioabfall den der bisherigen eingesetzten Maissilage gegenübergestellt.



Kartendaten ©2015 Geoasis-DE/BKG (©2009), Google

5 km



**Abbildung 79:** Übersichtskarte für die Biogasanlage Nummer 5 (r=12,5 km)

**Tabelle 24:** Potenzialanalyse für die Biogasanlage Nummer 5 im Umkreis von 12,5 km

Gemeinde:	Biogasanlage:	Landkreis:	Entfernung [km]:	Einwohner:
Pfronstetten	1	Reutlingen	7	1461
Hohenstein	3	Reutlingen	7	3660
Trochtelfingen, Stadt	5	Reutlingen	Basis	6333
Hayingen, Stadt	2,4	Reutlingen	17,5	2141
Zwiefalten	-	Reutlingen	17	2148
Engstingen	-	Reutlingen	10	5165
Sonnenbühl	-	Reutlingen	10	6978
Bitz	-	Zollernalbkreis	13	3606
Burladingen, Stadt	-	Zollernalbkreis	11	12148
Gammertingen, Stadt	-	Sigmaringen	8	6256
Hettingen, Stadt	-	Sigmaringen	10	1788
Neufra	-	Sigmaringen	8	1866

**Gesamt:** 53 550

**Legende:**

Biotonne wird flächendeckend angeboten
Entscheidungsprozess läuft

Bioabfallpotenzial [t/a]:	3213
Bioabfallpotenzial [t/14·d]:	123,58

Biogasertrag [m <sup>3</sup> <sub>n</sub> · Biogas/14·d]:	15199,96
---	----------

Biogasertrag der eingesetzten Maissilage [m <sup>3</sup> <sub>n</sub> · Biogas/14·d]:	14219,38
---	----------

Bei der Betrachtung wurden die Gemeinden Hayingen, Stadt und Zwiefalten trotz einer Entfernung von 17 bzw. 17,5 km mit einbezogen. Dies dient zum einen zur Überprüfung von einer möglichen zentralen Aufbereitung der gesammelten Abfälle, verbunden mit einer Verwertung der entstandenen Abfallmaische in mehreren Biogasanlagen in naher Umgebung. Des Weiteren lässt sich aus der Übersichtskarte vermuten, dass der Standort Hayingen, Stadt zumindest aufgrund der im Norden unbesiedelter Flächen eher geringes Potenzial besitzen wird.

Tabelle 24 zeigt, dass das Abfallpotenzial in der Umgebung von der Biogasanlage Nummer 5 ausreichen würde, um den bisherigen Einsatz der Maissilage (4,7 t FM/d) komplett zu ersetzen. Eine Versorgung von weiteren Biogasanlagen mit aufbereitetem Bioabfall ist aufgrund der geringen Abfallmenge jedoch uninteressant. Auch bei der Betrachtung der anderen Standorte zeigt sich, dass ein Umkreis von 12,5 km keine Versorgung von umliegenden Biogasanlagen ermöglicht. Teilweise reicht die potenzielle Abfallmenge noch nicht einmal aus die eingesetzte Menge an Maissilage zu ersetzen, was zum einen an den höheren Einsatz an Maissilage und zum anderen an den geringeren Einwohnerdichten im Umkreis der Biogasanlagen liegt.

Anstelle von 4,7 t FM Maissilage/d würden ca. 8,3 t FM Bioabfall/d für die Fütterung der Biogasanlage Nummer 5 benötigt, welche zunächst für die Nutzung aufbereitet werden müssten. Dadurch könnte der Anlagenbetreiber, falls die Maissilage komplett zugekauft werden müsste und nicht teilweise aus den eigenen Anbau bezogen wird, im Jahresverlauf ca. 62 000 € Substratkosten (SK) einsparen wie auch die Lösung der nachfolgenden Gleichung zeigt.

**Wegfallende Substratkosten (SK) bei Zukauf von Maissilage**

$$SK = 4,7 \frac{t \text{ FM Maissilage}}{d} \cdot 36 \frac{\text{€}}{t \text{ FM Maissilage}} \cdot 365 \frac{d}{a}$$

$$SK = 61\,758 \frac{\text{€}}{a} \approx 62\,000 \frac{\text{€}}{a}$$



Die anfallenden Kosten für die notwendige Bioabfallaufbereitung, die sich aus der Zerkleinerung, Störstoffabtrennung, Herstellung einer Abfallmaische und der Hygienisierung zusammensetzt, müssten vom Anlagenbetreiber allein getragen werden. Je nach Anlagengröße und bisheriger Ausstattung der Biogasanlage sind Kosten für die Aufbereitungstechnik von 150 000 bis 250 000 € zu erwarten.

Zunächst lässt sich vermuten, dass es sich um eine lohnenswerte Investition handelt. Die Amortisationszeit liegt unter Annahme der wegfallenden Substratkosten bei ungefähr vier Jahren. Nach vier Jahren könnte der Betreiber also mit Gewinn rechnen.

Bei diesem Gedankengang werden jedoch mehrere Aspekte missachtet, welche die Wirtschaftlichkeit der Anlage zusätzlich zu den wegfallenden Substratkosten beeinflussen.

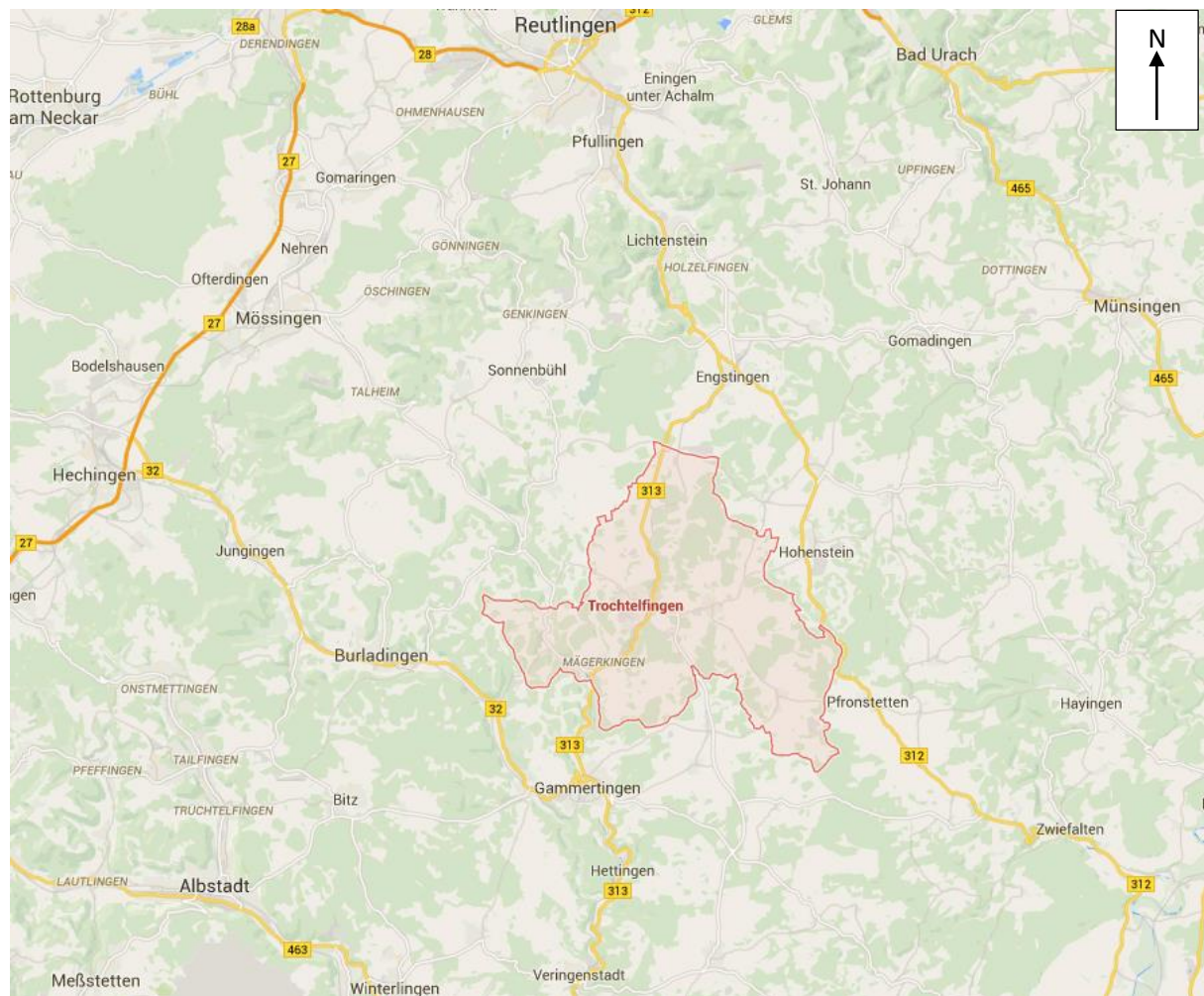
Zunächst einmal basiert die Rechnung auf der Annahme, dass die gesamte Menge an Maissilage von dritten erworben werden muss. Dies ist im Falle einer Landwirtschaftlichen Biogasanlage nur selten der Fall, da die Substratversorgung zum größten Teil aus den auf dem Hof anfallenden Biomassen (Gülle, Ernterückstände,...) und den angebauten Energiepflanzen (Mais, Getreide,...) sichergestellt wird.

Des Weiteren steigt durch die aufwendige Aufbereitung der Eigenenergieverbrauch der Biogasanlage enorm an. Die Energie wird für den Antrieb des Zerkleinerungsaggregates und des Trommelsiebes oder bei der Umrüstung mittels einer Komplettlösung, wie zum Beispiel mit dem *EnergyJet CS*, zur Aufrechterhaltung des Betriebes dieser benötigt. Hinzu kommt die zur Hygienisierung benötigte Wärmeenergie, diese wird meist aus dem BHKW der Biogasanlage bezogen. Durch die nötige Hygienisierung sinkt die Wärmemenge die zur Versorgung eines Nahwärmenetz oder von Gebäuden (Schwimmbäder, Ställe,...) genutzt wird/ werden könnte, wodurch es zu Einbußen bei den Einnahmen kommt.

Weiterhin ist zu beachten, dass der Einsatz von Bioabfällen eventuell geringere Vergütungsansprüche mit sich zieht. Bei Bestandsanlagen aus dem Geltungsbereich des EEG 2009 besteht die Gefahr, dass die Erhöhung der Vergütung infolge von einen Gülleeinsatz von mindestens 30m% ausbleibt (EEG 2009, §§ Anl. 2). Die veränderten Masseverhältnisse resultierend aus den notwendigen mehr Einsatz von Bioabfall, im Vergleich zur Maissilage, könnten zu den Verlust der Bonuszahlung führen. Direkten Einfluss hat die neue Substratzusammensetzung bei Biogasanlagen die in den Geltungsbereich des EEG 2012 fallen. Im Vergleich zu den bisherigen Fassungen des EEG richtet sich die Bonuszahlung für den Einsatz von NawaRo im EEG 2012 nach den spezifischen Energieerträgen der Einsatzstoffe der ESK I und II. Dadurch erhält lediglich die Strommenge eine höhere Vergütung, welche direkt aus den Stoffen der ESK I und II gewonnen wird (EEG 2012, §§ 27). Für die Anlage Nummer 5 würde dies bedeuten, dass die täglich erzeugte Strommenge aus den 4,7 t FM Maissilage lediglich durch die Mindestvergütung der Anlage gefördert würde. Die gleiche Strommenge erfuhr bisher eine erhöhte Vergütung infolge von dem Bezug des NawaRo-Bonus.

Insgesamt ist eine wirtschaftliche Beurteilung, der möglichen Anpassung der Anlagentechnik und die damit verbundene Verwertung von lokal anfallenden Bioabfällen, viel komplexer und ein stets individueller Prozess.

Wie groß die Auswirkungen einer Erhöhung des Umkreises sind, zeigt eine weitere Potenzialanalyse für die Biogasanlage Nummer 5. Nach gleichem Muster wurde für die Biogasanlage Nummer 5 eine weitere Potenzialanalyse durchgeführt, wobei der Umkreis von 12,5 auf 20 km erhöht wurde. Das sich neu ergebene Einzugsgebiet zeigt die Übersichtskarte in **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden..**



Kartendaten © 2015 GeoBasis-DS/BKG (©2009), Google

5 km

**Abbildung 80:** Übersichtskarte für die Biogasanlage Nummer 5 ( $r=20$  km)

Aufgrund des größeren Einzugsgebiets ergibt sich ein höheres Bioabfallpotenzial, wie auch die Ergebnisse der Potenzialanalyse für die Biogasanlage Nummer 5 in Tabelle 25 zeigen. Insbesondere die Nähe zu Reutlingen (110 681 E) macht sich bemerkbar, da die Einwohneranzahl von Reutlingen allein mehr als doppelt so groß ist wie die bisherige Gesamtanzahl der Einwohner.

**Tabelle 25:** Potenzialanalyse für die Biogasanlage Nummer 5 im Umkreis von 20 km

Gemeinde:	Biogasanlage:	Landkreis:	Entfernung [km]:	Einwohner:
Pfronstetten	1	Reutlingen	7	1461
Hohenstein	3	Reutlingen	7	3660
Trochtelfingen, Stadt	5	Reutlingen	Basis	6333
Hayingen, Stadt	2,4	Reutlingen	18	2141
Zwiefalten	-	Reutlingen	17	2148
Engstingen	-	Reutlingen	10	5165
Sonnenbühl	-	Reutlingen	10	6978
Burladingen, Stadt	-	Zollernalbkreis	11	12148
Gammertingen, Stadt	-	Sigmaringen	8	6256
Hettingen, Stadt	-	Sigmaringen	10	1788
Neufra	-	Sigmaringen	8	1866
Jungingen	-	Zollernalbkreis	15	1369
Albstadt, Stadt	-	Zollernalbkreis	19	43980
St. Johann	-	Reutlingen	17	5046
Gomadigen	-	Reutlingen	15	2239
Lichtenstein	-	Reutlingen	14	9030
Veringenstadt	-	Sigmaringen	14	2200
Reutlingen	-	Reutlingen	22	110681
Winterlingen	-	Zollernalbkreis	17	6464
Hechingen	-	Zollernalbkreis	20	18674
Nehren	-	Tübingen	18	4159
Bitz	-	Zollernalbkreis	13	3606
Ofterdingen	-	Tübingen	20	4527
Bodelshausen	-	Tübingen	21	5632
Münsingen	-	Reutlingen	22	13893
Langenenslingen	-	Biberach	20	3396
Pfullingen	-	Reutlingen	18	17540
Mössingen	-	Tübingen	17	19414

**Gesamt:** 321794

**Legende:**

Biotonne wird flächendeckend angeboten	
Entscheidungsprozess läuft	
kein Biotonnenangebot	

Bioabfallpotenzial [t/a]:	19307,64
Bioabfallpotenzial [t/14-d]:	742,60
Bioabfallpotenzial [t/d]:	53,04

Biogasertrag [m <sup>3</sup> <sub>n</sub> · Biogas/d]:	6524,28
--	---------

Biogasertrag der eingesetzten Maissilage der Biogasanlagen 1,2 und 5 [m <sup>3</sup> <sub>n</sub> · Biogas/14-d]:	3608,87
Biogasertrag der eingesetzten Grassilage der Biogasanlage 2 und 5 [m <sup>3</sup> <sub>n</sub> · Biogas/14-d]:	2022,3
Biogasertrag des eingesetzten GPS der Biogasanlage 5 [m <sup>3</sup> <sub>n</sub> · Biogas/14-d]:	968,67

Gesamer Biogasertrag der Biogasanlagen 1, 2 und 5 [m <sup>3</sup> <sub>n</sub> Biogas/d]:	<u>6599,84</u>
---	----------------

Im Einzugsgebiet befinden sich zwar Landkreise (Sigmaringen und Biberach) die momentan noch über kein flächendeckendes Biotonnenangebot verfügen, wegen der seit dem 01. Januar 2015 verpflichtenden Getrenntsammlung von Bioabfällen ist aber mit zeitnahen Änderungen zurechnen. Dies zeigt auch der Landkreis Sigmaringen bei den der Entscheidungsprozess zur Einführung über ein flächendeckendes Biotonnenangebot bereits läuft [88].

Infolge der deutlich angestiegenen Bioabfallmenge bieten sich neue Möglichkeiten für den Standort.

Die Biogasanlage Nummer 5 nutzt zunächst den Vorort aufbereiteten Abfall selbst, da die Anlage aber nicht die ganze anfallende Abfallmenge innerhalb von 14 Tagen verwerten kann, versorgt sie die in der näheren Umgebung liegenden Biogasanlagen mit dem kostengünstigen Substrat. Neben der bisherigen Nutzung der aufbereiteten Bioabfälle in der eigenen Anlage (dezentral), können durch Erweiterung des Umkreises sogar in der näheren Umgebung befindliche Biogasanlagen mit diesem versorgt werden (zentral). Die Biogasanlage Nummer 5 fungiert bei diesem Konzept als zentraler Versorger.

Insgesamt könnte durch die Nutzung der lokal anfallenden Bioabfälle fast die gesamte täglich benötigte Substratmenge, die zur Beschickung der Biogasanlagen 1,2 und 5 benötigt wird, ersetzt werden. Es ließen sich somit täglich 12,7 t FM Maissilage, 12,7 t FM Grassilage und 4,7 t FM GPS einsparen. Das Ergebnis der Potenzialanalyse mit einem Umkreis von 20 km macht deutlich, wie viel Potenzial in dem Bioabfall steckt.

Die Potenzialanalyse für die Biogasanlage 16 in einen Umkreis von 20 km zeigt ähnliche Ergebnisse, hier können durch die Verwertung der Bioabfälle täglich 20,7 t FM Maissilage eingespart werden. Einen enormen Vorteil bietet dieses Konzept in den Bereich der Finanzierung. Bei einer vertraglichen Einigung der verschiedenen Anlagenbetreiber könnten die Kosten für die Bioabfall Aufbereitung aufgeteilt werden. Die finanzielle Belastung des einzelnen wäre dadurch geringer und aus wirtschaftlicher Sicht ließe sich das Konzept somit eher als die dezentrale Nutzung umsetzen.

### 3.2.5.3 Mögliche Nutzungskonzepte für die Pferdemitverwertung

Die Potenzialabschätzung für die Pferdemitverwertung in bestehenden NawaRo-Biogasanlagen des Planungsraums ist aufgrund einer weitaus geringeren Datengrundlage sehr schwierig. Eine Verteilung der 1,2 Mio. in Deutschland lebenden Pferde und Ponys ist nur schwer auszumachen [41].

Als Anhaltspunkt für mögliche Nutzungskonzepte kann die Anzahl der Einhufer<sup>11</sup> in landwirtschaftlichen Betrieben<sup>12</sup> in den deutschen Bundesländern dienen.

---

<sup>11</sup> „Einhufer: Pferde, Ponys, Esel, Maultiere und weitere Einhufer“

<sup>12</sup> „Zur Grundgesamtheit der Agrarstrukturerhebung zählen seit 2010 alle landwirtschaftlichen Betriebe mit mindestens: 5 ha landwirtschaftlich genutzter Fläche, oder 10 Rindern, oder 50 Schweinen, oder 10 Zuchtsauen, oder 20 Schafe, oder 20 Ziegen, 1 000 Stück Geflügel, oder 0,5 ha Hopfenfläche, oder 0,5 ha Tabakfläche, oder 1,0 ha Dauerkulturfläche im Freiland, oder jeweils 0,5 ha Rebfläche, Baumschulfläche oder Obstanbaufläche, oder 0,5 ha Gemüse- oder Erdbeerfläche im Freiland, oder 0,3 ha Blumen- oder Zierpflanzenfläche im Freiland, oder 0,1 ha Fläche mit Kulturen unter hohen begehbaren Schutzabdeckungen einschließlich Gewächshäusern oder 0,1 ha Produktionsfläche für Speisepilze.“

**Tabelle 26:** Anzahl der Einhufer deutscher landwirtschaftlicher Betriebe [92]

Bundesland:	Anzahl:
Baden-Württemberg	58 000
Bayern	91 300
Berlin	600
Brandenburg	17 100
Bremen	1 000
Hamburg	3 000
Hessen	32 800
Mecklenburg-Vorpommern	13 800
Niedersachsen	66 200
Nordrhein-Westfalen	83 600
Rheinland-Pfalz	19 000
Saarland	5 600
Sachsen	11 300
Sachsen-Anhalt	6 600
Schleswig-Holstein	4 3400
Thüringen	8 000
<b>Gesamt:</b>	<b>461 300</b>

Die Differenz zwischen der Gesamtanzahl der Einhufer in den deutschen landwirtschaftlichen Betrieben und der laut Deutschen Reiterliche Vereinigung e. V. (FN) in Deutschland lebenden Pferde und Ponys ist enorm. Obwohl unter den Einhufern nicht nur Pferde und Ponys zusammengefasst werden, liegen ca. 700 000 Pferde und Ponys zwischen den beiden Angaben.

Auffällig und im Hinblick auf eine mögliche Nutzung von Pferdemist besonders interessant sind die hohen Werte der Bundesländer Baden-Württemberg und Bayern, in denen der Planungsraum liegt. Mit 149 300 liegen mehr als 30% der Einhufer in deutschen landwirtschaftlichen Betrieben in den beiden Bundesländern und somit auch im Planungsraum.

*Unter Annahme das es sich bei allen 149 300 Einhufern um Pferde handle und das ein Pferd 15 bis 45 kg Pferdemist/d produziert [51], fallen im Jahr zwischen 800 000 und 2,5 Mio. t FM Pferdemist an. Durch die Verwertung dieser Pferdemistmenge könnten 90 bis 281 Mio. m<sup>3</sup> Biogas erzeugt werden und 0,4 bis 1,3 Mio. t FM Maissilage ersetzen.*

Das in der Arbeit beschriebene Verfahren zur Pferdemistaufbereitung ist noch ein sehr innovatives Verfahren und es gibt nur wenige bis gar keine Erfahrungen in der Praxis. Erste Erfahrungen wurden einer Biogasanlage Itzehoe gemacht und für dieses Jahr ist der Bau einer weiteren Referenzanlage geplant. Die bisherigen Tests verliefen positiv, wobei dennoch immenses Verbesserungspotenzial bezüglich der Form und Strömungstechnik festgestellt wurden (KRAUSE, 2014). Trotz der fehlenden Informationen bezüglich der Investitionskosten sowie Betriebskosten, eine erste Konzeptidee für die Pferdemistverwertung stellen Bring- oder sogar Abholssysteme dar. Die Biogasanlagenbetreiber könnten den Pferdebesitzern Annahmestellen für den anfallenden Pferdemist schaffen oder regelmäßige Sammlungen anbieten. Hierbei lässt sich die Funktion der Annahmestelle mit der von Wertstoffhöfen vergleichen und die Sammlung basiert auf den System der Mülltonnen. Vor allen in Ballungsräumen und den innerstädtischen Bereich ist die Pferdemistentsorgung teilweise zum Problem und sehr kostspielig geworden.

Für gebrachten Pferdemist könnte man eine kostenlose Entsorgung anbieten, da die Verwertung von Pferdemist zu Substrateinsparungen führen kann und generell in der Biogasanlage zu Energie umgewandelt wird. Die Energie wird entweder selbst genutzt oder später verkauft, so dass der Pferdemist generell als Bezahlung angesehen werden kann.

Hingegen kann für die Abholung, die eine Dienstleistung darstellt, ein Entgelt verlangt werden. Insgesamt sind dies zwei mögliche Nutzungskonzepte die generell auch zusammen durchgeführt werden können. Der Aufwand für eine Annahmestelle lässt sich durch geregelte Öffnungszeiten in Rahmen halten.

Die Zukunft wird zeigen in wie fern sich die Idee auf den Markt beweisen kann und mit welchen finanziellen Aufwand (Kosten des Aufbereitungsaggregates, Betriebskosten,...) gerechnet werden muss.

## 4 Literatur

- [1] *Demonstration of an optimised production system for biogas from biological waste and agricultural feedstock: Abschlussbericht „AGROPTI-Gas“ 2006.*
- [2] Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V. (KTBL), *Erfassung und Analyse von Defiziten an landwirtschaftlichen Biogasanlagen: Schwachstellenanalyse Biogasanlagen, Darmstadt 2008.*
- [3] Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft, LfL, *Optimierung der Verfahrenstechnik landwirtschaftlicher Biogasanlagen*, Freising-Weihenstephan **2010.**
- [4] O. Jochum, *Entwicklung von Optimierungskonzepten an einer bestehenden Biogasanlage zur energetischen Effizienzsteigerung*, Bochum **2012.**
- [5] M. Lebuhn, et al., *Population dynamics of methanogens during acidification of biogas fermenters fed with maize silage – a causal analysis*, Erding **2009.**
- [6] C. Bauer, et al., *Mikrobiologische Prozesse in landwirtschaftlichen Biogasanlagen*, Freising-Weihenstephan **2009.**
- [7] ABO Wind AG, *Vom Sorgenkind zum Musterknaben*, Wiesbaden **2012.**
- [8] G. Deerberg, et al., *Strömungs- und Wärmetransportoptimierung in Biogasanlagen*, Oberhausen **2009.**
- [9] S. Besgen, *Energie- und Stoffumsetzung in Biogasanlagen*, Bonn **2005.**
- [10] Lokale Energieagentur Oststeiermark (LEA), *Optimierungsleitfaden Biogas - Erfahrungsbericht, Maßnahmenempfehlungen und Optimierungspotentiale für Biogasanlagen in Österreich*, Feldbach, Österreich **2008.**
- [11] Hochschule Ingolstadt, *Ökologische und ökonomische Optimierung von bestehenden und zukünftigen Biogasanlagen - „BGA\_OPT“*, Ingolstadt **2011.**
- [12] A. Vetter, *Aktuelle Entwicklungstendenzen bei der gekoppelten Strom- und Wärmeerzeugung* **2007.**
- [13] Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR), *Ergebnisse des Biogas-Messprogramms*, Gülzow-Prüzen **2005.**
- [14] Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR), *Biogas-Messprogramm II - 61 Biogasanlagen im Vergleich*, Gülzow-Prüzen **2009.**
- [15] Institut für Energetik und Umwelt, *Ökologische Analyse einer Biogasnutzung aus nachwachsenden Rohstoffen. FKZ 22014303 (03NR143)*, Leipzig **2006.**
- [16] Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), *IPCC fourth Assessment Report Climate Change 2007 (AR4)*, Cambridge **2007.**
- [17] Vogt, et al., *Optimierung für einen nachhaltigen Ausbau der Biogaserzeugung und –nutzung in Deutschland*, Heidelberg, Berlin, Leipzig, Darmstadt **2008.**
- [18] Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR), *Leitfaden Biogas – Von der Gewinnung zur Nutzung*, Gülzow-Prüzen **2010.**
- [19] J. Clemens, S. Kohne, S. Neitzel, W. Schreier, *Verluste durch Methanemissionen an Biogasanlagen - Qualitätssicherung bei der Erkennung: Gasmengen, Konzentrationen, Bewertung.*
- [20] Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR), *Repoweringmöglichkeiten* **2015.**
- [21] Bioreact GmbH, *Kosten der Bioreact GmbH Produkte SPURENELEMENTE und ENZYME*. Bremen **2015.**
- [22] Bioreact GmbH, *Bioreact® ENZYME* **2014.**

- [23] U. Hölker, *Substrate*, Troisdorf **2015**.
- [24] H. Döhler et al., *Faustzahlen Biogas, 3 Ausgabe*, Darmstadt **2013**.
- [25] Schmack Biogas Service GmbH, *METHANOS® – Hochleistungsbakterien zur Effizienzsteigerung von Biogasanlagen* **2013**.
- [26] MEBA Metallbau Bachmann, *Der Biogrinder. In Deutschland gefertigt. Weltweit exportiert* **2014**.
- [27] BHS-Sonthofen GmbH, *RBG Biogrinder. Substrate effizient aufbereiten* **2014**.
- [28] Xylem Water Solutions Deutschland GmbH, *Biogastechnik* **2014**.
- [29] M. Scheftelowitz et al., *Stromerzeugung aus Biomasse O3MAP250* **2013**.
- [30] MT-Energie GmbH, *Service nach Maß. Umfassende Leistungen für einen erfolgreichen Anlagenbetrieb* **2014**.
- [31] MTP BHKW Service GmbH, *Liebherr 500 kWel. BHKW. Liebherr 500 kWel. BHKW – Die Alternative! Hohen Neuendorf* **2015**.
- [32] M. Dederer et al., *Direktvermarktung von Biogasstrom*, (KTBL-Heft, 101) Unter Mitarbeit von S. Hartmann und U. Holzhammer, Darmstadt **2013**.
- [33] Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches e.V. (DVGW), *G 260 - Gasbeschaffenheit* **2013**.
- [34] Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches e.V. (DVGW), *DVGW G 262: Nutzung von Gasen aus regenerativen Quellen in der öffentlichen Gasversorgung* **2011**.
- [35] Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR), *Basisdaten Bioenergie Deutschland*, Gülzow-Prüzen **2011**.
- [36] MT-Biomethan GmbH, *Neue Perspektiven für die Energiewende. Zeven* **2014**.
- [37] Centrales Agrar-Rohstoff Marketing- und Energie-Netzwerk e.V. (C.A.R.M.E.N. e.V.), *Nahwärmenetze und Bioenergieanlagen* **2012**.
- [38] Bundestag der Bundesrepublik Deutschland, *Verordnung über die Erzeugung von Strom aus Biomasse, BiomasseV 2012* **2012**.
- [39] Bundestag der Bundesrepublik Deutschland, *Gesetz für den Vorrang Erneuerbarer Energien (EEG 2012)* **2012**.
- [40] Bundestag der Bundesrepublik Deutschland, *Gesetz für den Ausbau erneuerbarer Energien (EEG 2014)* **2014**.
- [41] Deutsche Reiterliche Vereinigung e.V., *Zahlen, Daten, Fakten 2014* **2014**.
- [42] Deutsche Reiterliche Vereinigung e.V., *Einstreu – Das Pferdebett. Deutsche Reiterliche Vereinigung e.V. (FN) (pferdenah, 01-2012)* **2012**.
- [43] S. Rentzing, *Pferdemist: Verheizen oder vergären?* **2013**.
- [44] S. Oldenburg, *Energetische Nutzung von Pferdemist*, Papenburg **2014**.
- [45] M. Mönch-Tegeder, H. Oechsner, *Möglichkeiten der Vergärung von Pferdemist in Biogasanlagen*, Fachgespräch Pferdehaltung - 28.11.2013, Gomadingen **2013**.
- [46] H. Oechsner, M. Mönch-Tegeder, *Mobilisierung ungenutzter Reststoffpotenziale- Pferdemist und Lanschftspflegematerial als Biogas Substrat*, Geislingen an der Steige **2014**.
- [47] G. Reinhold, E. Friedrich, *Vergärung von Stroh – Stand und Perspektiven*, Berlin **2012**.
- [48] D. Thrän et al., *Basisinformationen für eine nachhaltige Nutzung von landwirtschaftlichen Reststoffen zur Bioenergiebereitstellung*, DBFZ Report, 13, Leipzig **2012**.
- [49] E. Leibnitz, *Brockhaus abc: Landwirtschaft*, 3. überarbeitete und erweiterte Auflage, Leipzig **1974**.
- [50] K. Krause, *Innovativ: Forscherin macht Energie aus Pferdemist* **2014**.
- [51] F. Haberland, S. Oldenburg, K. Kuchta, *DE102013101401 A1*.
- [52] B. Schwarz, *Stand und neueste Entwicklungen auf dem Gebiet der Substratvorbehandlung für den Biomasseeinsatz in Biogasanlagen*, Dermbach **2011**.
- [53] W. Rudolph, *Biogas aus Stroh, Verfahrenstechnik* **2010**.



- [54] MEWA Recycling Maschinen und Anlagenbau GmbH, *Hier entsteht Zukunft. Maschinen Anlagen Prozesslösungen* **2015**.
- [55] Bundestag der Bundesrepublik Deutschland, *Gesetz zur Vorbeugung vor und Bekämpfung von Tierseuchen (TierGesG)* **2013**.
- [56] Albert Schweitzer Stiftung für unsere Umwelt, *Puten; Enten, Masthühner. Massentierhaltung* **2015**.
- [57] Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL), *Zugelassene und registrierte Betriebe für die tierische Nebenprodukte gemäß Artikel 23 und 24 der Verordnung (EG) Nr. 1069/2009* **2015**.
- [58] Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V. (KTBL), *Faustzahlen Biogas, Darmstadt* **2009**.
- [59] Joule, *Neues Gras für's Gas* **2011**.
- [60] Biogas Journal, *Gas aus Gras* **2008**.
- [61] Bundesarbeitskreis Futterkonservierung, *Praxishandbuch Futter- und Substratkonservierung, Frankfurt a.M* **2012**.
- [62] M. Hecht, *Bedeutung des Carbonatpuffersystems für die Stabilität des Gärprozesses landwirtschaftlicher Biogasanlagen, Bonn* **2009**.
- [63] W. Nordmann, *Die Überwachung der Schlammfäulung* **1977**.
- [64] M. T. Madigan, Martinko J. M., J. Parker, *Biology of Microorganisms* **2003**.
- [65] A. Hilse et al., *Enzyme im Einsatz* **2010**.
- [66] A. Hilse et al., *Weniger Rühren durch Enzyme?* **2010**.
- [67] M. Scheftelowitz et al., *Vorhaben Ila Stromerzeugung aus Biomasse, Vorbereitung und Begleitung der Erstellung des Erfahrungsberichts 2014 gemäß § 65 EEG im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie* **2014**.
- [68] W. Bischofsberger et al., *Anaerobtechnik, 2. Auflage, Berlin, Heidelberg* **2005**.
- [69] Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR), *Leitfaden Biogas: Von der Gewinnung bis zur Nutzung, Gülzow-Prüzen* **2010**.
- [70] M. Kern et al., *Ökologisch sinnvolle Verwertung von Bioabfällen - Anregungen für kommunale Entscheidungsträger, Berlin* **2012**.
- [71] Bundestag der Bundesrepublik Deutschland, *Verordnung über die Verwertung von Bioabfällen auf landwirtschaftlich, forstwirtschaftlich und gärtnerisch genutzten Böden (BioAbfV)*.
- [72] M. Kranert, K. Cord-Landwehr, *Einführung in die Abfallwirtschaft, Wiesbaden* **2010**.
- [73] B. Bilitewski, G. Härdtle, *Abfallwirtschaft. Handbuch für Praxis und Lehre, 4., aktualisierte und erweiterte Auflage, Berlin* **2012**.
- [74] K. Fricke et al., *Steigerung der Energieeffizienz in der Verwertung biogener Reststoffe, Endbericht zu Förderprojekt 03KB022* **2013**.
- [75] Hugo Vogelsang Maschinenbau GMBH, *Innovative und wirtschaftliche Einbringung von Bioabfällen. Zufuhrsystem für Nassfermentationsanlagen* **2014**.
- [76] Bundestag der Bundesrepublik Deutschland, *Gesetz für den Ausbau erneuerbarer Energien (Erneuerbare-Energien-Gesetz - EEG 2014): EEG 2014* **2014**.
- [77] E. Hauser, F. Baur, F. Noll, *Beitrag der Bioenergie zur Energiewende, Saarbrücken* **2014**.
- [78] S. Nefigmann, *Energie nach Bedarf, so kann's gehen!, Biomassezirkel Landwirtschaft NRW, Düsseldorf* **2014**.
- [79] E. Fischer, *Einflußfaktoren auf das Repowering landwirtschaftlicher Biogasanlagen: Repowering von Biogasanlagen - Möglichkeiten und Chancen, Hannover* **2012**.
- [80] Fraunhofer-Institut für Umwelt-, Sicherheits- und Energietechnik UMSICHT, *Leitfaden Nahwärme* **1998**.

- [81] R. Erler, *Standortgenaue Ermittlung des regionalen Biogaspotenzials und Bestimmung von Vorzugsstandorten für neue Biomethan- oder Biogas-Nahwärme-Anlagen*, Fachforum Biogas, Leipzig **2012**.
- [82] M. Blesl et al., *Wärmeatlas Baden-Württemberg: Erstellung eines Leitfadens und Umsetzung für Modellregionen*, Stuttgart **2008**.
- [83] T. Esch et al., *Potenzialanalyse zum Aufbau von Wärmenetzen unter Auswertung siedlungsstruktureller Merkmale*, Oberpfaffenhofen **2011**.
- [84] IFEU, *Transformationsstrategien Fernwärme: TRAF0 - Ein Gemeinschaftsprojekt von ifeu-Institut, GEF Ingenieur AG und AGFW*, AGFW Forschung und Entwicklung, Frankfurt am Main **2013**.
- [85] D. Oßwald, M. Speicher, *Entwicklung der Gemeinden Schmitt und Gillenbeuren zu Bioenergiedörfern*, Birkenfeld **2009**.
- [86] H. Pflaum, B. Klocke, *Energie, Wasser-Praxis* **2010**, 2010 (11), 56.
- [87] Bayerisches Landesamt für Umwelt, *Kompostier- und Vergärungsanlagen für Abfälle aus der Biotonne 2013* **2015**.
- [88] P. Krause et al., *Verpflichtende Umsetzung der Getrenntsammlung von Bioabfällen* **2015**.
- [89] J. Hauff, W. Haag, D. Zywiets, *Bioenergie und dezentrale Energieversorgung. Chancen in Deutschland und Europa*, Frankfurt, Main **2008**.
- [90] Statistisches Bundesamt, *Abfallentsorgung 2012*, Fachserie 19, Reihe 1 **2014**.
- [91] Statistisches Bundesamt, *Gemeindeverzeichnis*, Wiesbaden **2014**.
- [92] Statistisches Bundesamt, *Viehhaltung der Betriebe Agrarstrukturerhebung. Land- und Forstwirtschaft, Fischerei*, Fachserie 3, Reihe 2.1.3 **2014**.

## 5 Abbildungsverzeichnis

<b>Abbildung 1:</b> Anschlüsse der Fermenter-Substratleitung und der Rezikulatpumpe am Nachgärer [4]	6
<b>Abbildung 2:</b> Elektrische Auslastung vor und nach Inbetriebnahme des neuen Nachgärers nach [3]	7
<b>Abbildung 3:</b> Überdimensioniertes Entschwefelungsgebläse mit Kugelhahn [11]	9
<b>Abbildung 4:</b> Durch Unterdruck verformte Gasleitungen [7]	11
<b>Abbildung 5:</b> Seildurchführung eines Tauchmotorrührwerks als Emissionsquelle [2]	14
<b>Abbildung 6:</b> Blasenbildung durch defekte Silikonabdichtung einer Revisionsöffnung im Betondach[2]	14
<b>Abbildung 7:</b> Methanmessung an offenem Überlauf [11]	15
<b>Abbildung 8:</b> Emissionsmessung an notdürftig abgedichteter Gasleitung	16
<b>Abbildung 9:</b> einer Halle fachgerecht installiertes Folienkissen, Quelle: Novatech GmbH	17
<b>Abbildung 10:</b> Schlecht positioniertes Folienkissen[13]	17
<b>Abbildung 11:</b> Gasfackel einer Biogasanlage [7]	18
<b>Abbildung 12:</b> Methanemissionen aus 10 unterschiedlichen BGA [Gewitra]	20
<b>Abbildung 13:</b> Lachgasemissionen aus 10 unterschiedlichen BGA [Gewitra]	20
<b>Abbildung 14:</b> Ammoniakemissionen aus 10 unterschiedlichen BGA [Gewitra]	21
<b>Abbildung 15:</b> Berechnete CO <sub>2</sub> -Äq. aus Methan (Faktor 25) und Lachgas (Faktor 298) aus 10 unterschiedlichen BGA [Gewitra]	21
<b>Abbildung 16:</b> Untersuchte mögliche Anlagen zum Repowering im Vergleich zu allen bisher untersuchten Anlagen [Bonalytic]	22
<b>Abbildung 17:</b> Prozent der Messtechniker (100% = 3), die einen Gasaustritt (X-Achse in l CH <sub>4</sub> /h) vor atmosphärischem Hintergrund detektierten; es wurde eine Kamera mit 23 und eine mit 38mm Objektiv eingesetzt) [Bonalytic]	25
<b>Abbildung 18:</b> Prozent der Messtechniker (100% = 3), die einen Gasaustritt (X-Achse in l CH <sub>4</sub> /h) vor einer Spanplatte als Reflexionsfläche detektierten; es wurde eine Kamera mit 23 und eine mit 38mm Objektiv eingesetzt; ab einem Gasaustritt < 100 l CH <sub>4</sub> /h wurde der Gasaustritt erst dann erkannt, wenn das Gas vor den atmosphärischen Hintergrund gelangte (roter Pfeil) [Bonalytic]	25
<b>Abbildung 19:</b> gemessene maximale CH <sub>4</sub> -Konzentration (ppm*m) in Abhängigkeit von der freigesetzten CH <sub>4</sub> -Menge; kleine Grafik: Ausschnitt der Grafik bei Gasaustritt unter 100 l CH <sub>4</sub> /h. [Bonalytic]	26
<b>Abbildung 20:</b> Spezifischer Biogasertrag in Abhängigkeit von der Gärzeit für folgende Ansätze: A: Gerstenstroh, B: Gerstenstroh + Enzymextrakt, C: Gerstenstroh nach Enzymatischer Vorhydrolyse. [Bioreact]	29
<b>Abbildung 21:</b> Spezifischer Biogasertrag in Abhängigkeit von der Gärzeit für folgende Ansätze:	30
<b>Abbildung 22:</b> Schema des Verfahrensmodells. Es symbolisieren: S - Substrat (Inputstoffe), E - Multienzymkomplex und S* - Voraufgeschlossenes Substrat. [Bioreact]	31
<b>Abbildung 23:</b> Relative Cellulase-Restaktivität nach 24 h Inkubation in Abhängigkeit von der Leitfähigkeit. [Bioreact]	33
<b>Abbildung 24:</b> Differenz der Abbaugrade a <sub>F</sub> mit und ohne Enzymatische Vorhydrolyse in Abhängigkeit von T <sub>H</sub> und u. [Bioreact]	34
<b>Abbildung 25:</b> Blick in die Hydrolysegrube einer Praxis-Biogasanlage mit zwei-phasiger Verfahrensführung. [Bioreact]	36
<b>Abbildung 26:</b> Anwendungsbeispiel des Biogrinder anhand von Maissilage [27]	38
<b>Abbildung 27:</b> Flygt Rührwerk der Baureihe 4460 (Propellerdurchmesser= 2 500 mm) (nach [28])	39
<b>Abbildung 28:</b> Flygt Rührwerk Baureihe 4600 (nach [28])	39
<b>Abbildung 29:</b> Draufsicht auf das Aufbereitungsaggregat und Funktionsablauf der Vorbehandlung (verändert nach [44])	49
<b>Abbildung 30:</b> Querschnitt des Aufbereitungsaggregats (verändert nach [51])	50
<b>Abbildung 31:</b> Anzahl der von Bioreact untersuchten Anlagen nach Baujahr [Bioreact]	57
<b>Abbildung 32:</b> Verteilung der elektrischen BHKW-Leistungen in deutschen Biogasanlagen [Bioreact]	57
<b>Abbildung 33:</b> Anteile der unterschiedlichen Biogasanlagen (Fermenter, Nachgärer, Gärrestlager) [Bioreact]	58
<b>Abbildung 34:</b> Verteilung der BHKW auf den Biogasanlagen [Bioreact]	58
<b>Abbildung 35:</b> Verteilung der Biogasanlagen nach Volllaststunden pro Jahr. Knapp ein Drittel der Anlagen sind schlechter als der Mittelwert von 7901 Volllaststunden und laufen im betriebswirtschaftlich gesehen gelben bis roten Bereich. [Bioreact]	59
<b>Abbildung 36:</b> Das spezifische Arbeitsvolumen der von Bioreact untersuchten Anlagen in Beziehung zur BHKW-Auslastung. [Bioreact]	60

<b>Abbildung 37:</b> Verteilung der Substartausnutzung der von Bioreact untersuchten Biogasanlagen [Bioreact]	61
<b>Abbildung 38:</b> Beziehung zwischen der hydraulischen VWZ im beheizten Fermentationsvolumen (Fermenter + Nachgärer) und der zur KTBL relativen Substratausnutzung [Bioreact].	61
<b>Abbildung 39:</b> Beziehung zwischen Raumbelastung und relativer Substratausnutzung [Bioreact].	62
<b>Abbildung 40:</b> Nicht nur in den absoluten Mengen aller von Bioreact untersuchten Biogasanlagen dominiert die Maissilage. Die betreffenden Anlagen setzten davon im Mittel pro 100kW installierter elektrischer Leistung 3,27 t FM pro Tag ein. Anlagen die Grassilage und Ganzpflanzensilage nutzen, füttern im Mittel 1,28t bzw. 1,19t Frischmasse pro 100kw installierter Leistung [Bioreact].	64
<b>Abbildung 41:</b> Bioreact – Bausteinsystem zum Enzyemeinsatz. Die Bioreact – ENZYMPRODUKTE können der bestehenden Fütterungssituation angepasst werden [Bioreact].	65
<b>Abbildung 42:</b> Darstellung der Inputstoffe und -mengen (t FM/d) sowie Substratausnutzung (%). Wechselnde TS- und Biogasertragswerte sind auf Grundlage von Futterwertuntersuchungen (NIR) in die Berechnung der Substratausnutzung (SA) einbezogen. SA berechnet in Relation zu Standardgaserträgen (KTBL, Lfl). BHKW-Auslastung/Mittel: 98,5 %. Grüne Pfeile: Beginn Einsatz BIOREACT-Enzyme, roter Pfeil: Zugabe der Enzyme zeitweilig ausgesetzt [Bioreact].	66
<b>Abbildung 43:</b> Wärmebildaufnahme eines Fahrtiloanschnittes. Aufnahme: Mit freundlicher Genehmigung der Landmaschinen Schule Triesdorf.	68
<b>Abbildung 44:</b> Verpilzung und Schimmelbildung in einer Sandwichsilage (Mais/Gras) bei zu geringem Entnahmevorschub.	68
<b>Abbildung 45:</b> Schematische Darstellung des anaeroben Abbauprozesses [Bioreact].	71
<b>Abbildung 46:</b> Grundlagen eines stabilen Gärprozesses [Bioreact].	72
<b>Abbildung 47:</b> Verteilung des FOS bei den von Bioreact untersuchten Anlagen. Grüne Balken kennzeichnen den empfohlenen Bereich [Bioreact].	73
<b>Abbildung 48:</b> pH-abhängige Gleichgewichte in Biogasanlagen. Gezeigt wird der Zusammenhang zwischen pH-Wert und Umwandlung der diversen Spezies. Der rot unterlegte Hydrogencarbonatpuffer ist das Hauptpuffersystem für die während der Vergärung gebildeten freien organischen Säuren (FOS, z.B. Essigsäure) und für die Aufrechterhaltung des pH-Wertes in den Reaktoren verantwortlich. Ammoniak (NH <sub>3</sub> ), Schwefelwasserstoff (H <sub>2</sub> S) und Essigsäure sind für die Bakterien toxisch. Ihr Vorhandensein sollte vermieden werden [Bioreact].	74
<b>Abbildung 49:</b> Verteilung des TAC bei den von Bioreact untersuchten Anlagen. Grüne Balken kennzeichnen den empfohlenen Bereich [Bioreact].	75
<b>Abbildung 50:</b> Pufferkurven der TAC- und FOS-Puffersysteme im Verlauf einer Titration nach NORDMANN. Bei dieser Form der Titration werden die Säuremengen der Titrationsbereiche (1) Ausgangs-pH bis pH 5 (rot unterlegter Bereich = TAC), sowie (2) pH 5 bis pH 4,4 (blau unterlegter Bereich = FOS) ermittelt und daraus mit Hilfe einer Gleichung die Prozessparameter FOS (in Summe) und TAC errechnet [Bioreact].	76
<b>Abbildung 51:</b> Verteilung des FOS/TAC-Verhältnisses bei den von Bioreact untersuchten Anlagen. Anlagen mit einem FOS/TAC-Verhältnis unter 0,35 (grüne Balken) liegen im empfohlenen Bereich [Bioreact].	76
<b>Abbildung 52:</b> Verteilung des Ammoniumgehaltes bei den von Bioreact untersuchten Anlagen. Anlagen mit einem Ammoniumgehalt zwischen 1,5 und 3 g/l (grüne Balken) liegen im empfohlenen Bereich [Bioreact].	78
<b>Abbildung 53:</b> Verteilung der Leitfähigkeit in den von Bioreact untersuchten Anlagen. Anlagen mit einer Leitfähigkeit zwischen 22 und 34 mS/cm liegen im empfohlenen Bereich (grüne Balken) [Bioreact].	79
<b>Abbildung 54:</b> Verteilung des pH-Wertes in den von Bioreact untersuchten Anlagen. Anlagen mit einem pH-Wert zwischen 7,5 und 8,0 liegen im empfohlenen Bereich (grüne Balken) [Bioreact].	79
<b>Abbildung 55:</b> Typische Gärsäureprofile. Mit roten Kreis gekennzeichnet ein typisches Säuremuster bei einer Ammoniak-Hemmung der Gärbiologie[Bioreact].	81
<b>Abbildung 56:</b> Der empfohlene Bereich für die Iso-Buttersäure liegt unter der Bestimmungsgrenze von 0,025 g/l (Grüne Balken). 74,6% der Anlagen liegen in dem empfohlenen Bereich [Bioreact].	82
<b>Abbildung 57:</b> Biogasreaktor im Fließgleichgewicht. Bei störungsfreiem Betrieb verhalten sich alle Parameter konstant. Zuführtes Substrat wird ohne Anreicherung von Säuren umgesetzt, die Biogasbildung verläuft gleichmäßig [Bioreact].	84
<b>Abbildung 58:</b> Versauerung eines Biogasreaktors (Labordaten). Durch die Pufferung der ansteigenden Säuren sinkt der TAC (offenes Puffersystem), während der pH-Wert zunächst konstant bleibt. Das Unterschreiten eines anlagenspezifischen TAC-Grenzwertes führt schließlich zum Absinken des pH-Wertes. Dies hat die Inaktivierung der methanogenen Bakterien zur Folge –die Biogasbildung geht zurück, d.h. der Methangehalt im Biogas sinkt, bei gleichzeitigem Anstieg des CO <sub>2</sub> -Gehaltes durch Ausgasung von CO <sub>2</sub> aus Kohlensäure,- während die säurebildenden Bakterien aktiv bleiben: die Versauerung des Reaktors wird beschleunigt [Bioreact].	85
<b>Abbildung 59:</b> Versauerung eines Biogasreaktors mit anschließender Erholungsphase (Labordaten). Durch die Pufferung der ansteigenden Säuren sinkt der TAC (offenes Puffersystem), während der pH-Wert zunächst konstant bleibt. Das Unterschreiten eines anlagenspezifischen TAC-Grenzwertes führt schließlich zum Absinken des pH-Wertes. Dies hat die Inaktivierung der methanogenen Bakterien zur Folge –die Biogasbildung geht zurück, d.h. der Methangehalt im Biogas sinkt, bei gleichzeitigem Anstieg des CO <sub>2</sub> -Gehaltes durch Ausgasung von CO <sub>2</sub> aus Kohlensäure,- während die säurebildenden	

Bakterien aktiv bleiben: die Versauerung des Reaktors wird beschleunigt. Nach Zugabe von Bioreact® Bicarbo (roter Pfeil) erholen sich sowohl pH-Wert als auch TAC rasch und die Methanbildner nehmen ihre Stoffwechselaktivität wieder auf. Bakteriell gebildetes CO<sub>2</sub> löst sich in der Gärflüssigkeit und formt Hydrogencarbonat (TAC) (Methanüberschuss) [Bioreact]. 86

**Abbildung 60:** Beschleunigung des Substratabbaus durch Zugabe von Enzymen. Durch die beschleunigte Hydrolyse wird mehr Substrat pro Zeit umgesetzt, d.h., insbesondere bei faserreichen Inputstoffen, kann der bestehende Faulraum optimaler genutzt werden [Bioreact]. 89

**Abbildung 61:** Zellulosespaltung durch extrazelluläre Enzyme von Bakterien (Elektronenmikroskopische Aufnahme). Hydrolytische Bakterien haften an der Zellwandoberfläche. Durch extrazellulär abgegebene Hydrolasen werden die einzelnen Zellulosemoleküle der Zellwand in Einzelzucker gespalten, die von der Bakterienzelle aufgenommen werden können[64] 90

**Abbildung 62:** Roggen-Ganzpflanzensilage(links) und der Aufbau der pflanzlichen Zellwand (rechts, schematisch). Die pflanzliche Zellwand besteht primär aus quer zueinander verlaufenden und übereinander liegenden Zellulosefibrillen, die in eine Matrix eingebettet sind [Bioreact]. 90

**Abbildung 63:** Von Pilzmycel ausgeschiedene, extrazelluläre Enzyme spalten Polymere in ihre Monomere[Bioreact]. 91

**Abbildung 64:** Beschleunigte NH<sub>3</sub>-Entstehung durch Temperaturerhöhung. Grau markierter Bereich: erste Hemmwirkungen, roter Bereich darüber: starke Hemmwirkung. Für den Betrieb einer Biogasanlage bedeutet dieser Zusammenhang, dass deren Prozesstemperatur bei hohen Stickstofffrachten im Input im mesophilen Bereich (ca. 38-42°C) liegen sollte. 94

**Abbildung 65:** pH-abhängige Gleichgewichte in Biogasanlagen. Gezeigt wird der Zusammenhang zwischen pH-Wert und Umwandlung der diversen Spezies. Das gelb unterlegte System zeigt den Zusammenhang zwischen sinkendem pH-Wert und steigender Toxizität von Schwefelwasserstoff. Im Gegensatz dazu kommt es im schwarz unterlegten System bei steigendem pH-Wert zu vermehrter Bildung giftigen Ammoniaks[Bioreact]. 95

**Abbildung 66:** Möglicher Prozessablauf zur Bioabfallaufbereitung für NawaRo-Biogasanlagen [Gewitra] 104

**Abbildung 67:** Aufbauschema des EnergyJet CS® (verändert nach [75]) 106

**Abbildung 68:** Zusatzkosten der Flexibilisierung bei unterschiedlichen Fahrweisen [77] 108

**Abbildung 69:** Entscheidungsbaum zur Entwicklung von Repoweringoptionen mit Raumbezug [UMSICHT] 110

**Abbildung 70:** Netztopologien für Mikrogas- und Wärmenetze [UMSICHT] 112

**Abbildung 71:** Räumliche Verteilung von fünf Biogasanlagen im ländlichen Raum [UMSICHT] 115

**Abbildung 72:** Verschneidung der Entfernungsradien mit dem OSM Gebäudebestand [UMSICHT]. 116

**Abbildung 73:** Entfernungsanalyse Gasleitung [UMSICHT] 117

**Abbildung 74:** Trassenverlauf Mikrogasleitung [UMSICHT] 118

**Abbildung 75:** Aufteilung der Modell-Module 119

**Abbildung 76:** Schematische Darstellung der Biogassammelleitung für Szenario 1 [UMSICHT] 122

**Abbildung 77:** Schematische Darstellung der Biogassammelleitung für Szenario 2 [UMSICHT] 128

**Abbildung 78:** Planungsraum auf Grundlage einer Betreiberbefragung [Bioreact GmbH, Fraunhofer UMSICHT] 132

**Abbildung 79:** Übersichtskarte für die Biogasanlage Nummer 5 (r=12,5 km) 135

**Abbildung 80:** Übersichtskarte für die Biogasanlage Nummer 5 (r=20 km) 138

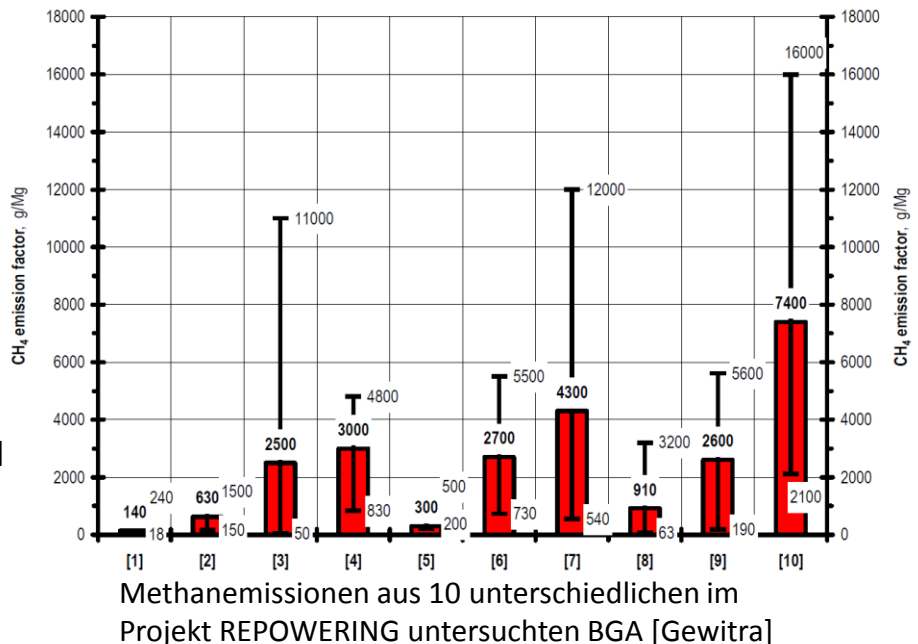
## 6 Tabellenverzeichnis

<b>Tabelle 1:</b> Zusammenfassung der Leckagen, die mit dem Laser wiedergefunden wurden, nachdem sie mittels IR-Kamera detektiert wurden [Bonalytic]	27
<b>Tabelle 2:</b> Mögliche Repowering-Maßnahmen (verändert nach [20])	37
<b>Tabelle 3:</b> Gegenüberstellung der Gasspeichervolumina bei herkömmlicher 30° Bauweise und N8 (Drittelkugelbauweise) (verändert nach MT-ENERGIE GMBH, 2013)	40
<b>Tabelle 4:</b> Substrateinsparung nach Erhöhung des elektrischen Wirkungsgrades (inklusive Verluste) von 35,5% auf 40%	42
<b>Tabelle 5:</b> Ausgewählte Richtwerte für Biogaseinspeisung ins Erdgasnetz nach [33] und[34]	43
<b>Tabelle 6</b> Optionen möglicher Repowering-Maßnahmen	45
<b>Tabelle 7:</b> Beispielhafte Mengen von Bestandteilen bei Boxenhaltung (nach HABERLAND, 13.02.2013)	47
<b>Tabelle 8:</b> Zerkleinerungsmöglichkeiten und Praxisbeispiele für nasse bis trockene Substrate (verändert nach [52])	51
<b>Tabelle 9:</b> Mittelwerte der 1809 von Bioreact untersuchten Anlagen [Bioreact]	56
<b>Tabelle 10:</b> Von Bioreact empfohlener Temperaturbereich liegt im mesophilen Bereich zwischen 39 und 42°C. 51 % der Anlagen liegen in diesem Bereich [Bioreact].	80
<b>Tabelle 11:</b> Durchschnittswerte der Analyseergebnisse aus 1809 NawaRo-Fermentern und die statistisch ermittelten optimalen Bereiche der jeweiligen Messgrößen. HAc <sub>eq</sub> : Essigsäureäquivalent (Summe der freien organischen Säuren, normiert auf das Molgewicht von Essigsäure) [Bioreact].	83
<b>Tabelle 12:</b> Enzyme der methanogenen Archaeobakterien und die für ihre Funktion notwendigen Spurenelemente. Quelle Prof. Deppenmeier, Uni Bonn.	87
<b>Tabelle 13:</b> Substratmischung 1,5 MW Modell-BGA [UMSICHT].	99
<b>Tabelle 14:</b> Geplante Substratmischung der BGA bei Nachrüstung einer Hydrolysestufe [UMSICHT].	100
<b>Tabelle 15:</b> Anlagendaten der Praxisanlage [Bioreact].	101
<b>Tabelle 16:</b> Anlagenkennwerte vor und nach der Optimierung [Bioreact].	102
<b>Tabelle 17:</b> Leistungsdaten für die im Szenario 1 berücksichtigten Biogasanlagen [UMSICHT]	120
<b>Tabelle 18:</b> Abgeschätzte Kapitalkosten für die Bestands-BGA [UMSICHT]	120
<b>Tabelle 19:</b> Abgeschätzte Betriebskosten für die Bestands-BGA [UMSICHT]	121
<b>Tabelle 20:</b> Szenario 1 – Biogassammelsystem ausschließlich basierend auf Bestands-BGA [UMSICHT]	125
<b>Tabelle 21:</b> Leistungsdaten für die im Szenario 2 berücksichtigten Biogasanlagen [UMSICHT]	126
<b>Tabelle 22:</b> Szenario 2 – Biogassammelsystem unter Berücksichtigung eines Anlagenneubaus bis auf 700 Nm <sup>3</sup> /h Rohbiogas [UMSICHT]	130
<b>Tabelle 23:</b> Gegenüberstellung von ausgewählten Energieträgern anhand ihrer Energiedichte (verändert nach [89])	133
<b>Tabelle 24:</b> Potenzialanalyse für die Biogasanlage Nummer 5 im Umkreis von 12,5 km	136
<b>Tabelle 25:</b> Potenzialanalyse für die Biogasanlage Nummer 5 im Umkreis von 20 km	139
<b>Tabelle 26:</b> Anzahl der Einhufer deutscher landwirtschaftlicher Betriebe [92]	141

## 7 Anlagen - REPOWERING Fact Sheets

## Biogas das nutzlos aus der Anlage entweicht liefert keinen Strom und schadet dem Klima!

Biogasanlagen müssen regelmäßig mit geeigneten Geräte auf Leckagen untersucht werden. Dies ist für alle Anlagen von Bedeutung, denn bei den Untersuchten Anlagen konnte keine direkte Korrelation zwischen Anlageninbetriebnahme und Leckagehäufigkeit festgestellt werden.



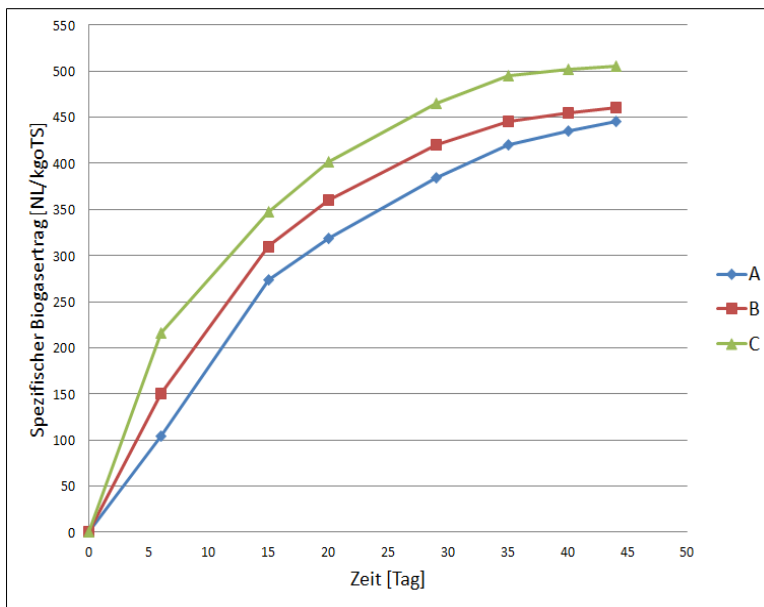
Zur Erkennung von Leckagen aus größeren Entfernungen sind berührungslose Messverfahren geeignet. In der Praxis kommen aktive und passive Verfahren zum Einsatz. Das gängige aktive Messverfahren ist ein methansensitiver Laser, der die Konzentration zwischen dem Messgerät und der Emissionsquelle in ppm\*m misst. Als passives Messverfahren ist die Gasvisualisierung mittels einer kohlenwasserstoffsensitiven IR-Kamera auf dem Markt.

**Die Leckage- und Dichtheitsuntersuchung an Biogasanlagen ist wesentlicher Bestandteil der sicherheitstechnischen Routineüberprüfung von Biogasanlagen. Auch aus ökologischer und ökonomischer Sicht sind solche Untersuchungen sinnvoll.**

## Die enzymatische Vorhydrolyse kann zukünftig zu einem besseren Aufschluss faserhaltiger Substrate beitragen

Im Projekt REPOWERING wurde das Konzept für eine enzymatische Vorhydrolyse entwickelt.

**Die Idee hinter dem Konzept war es, eine Alternative zu technisch-physikalischen Vorbehandlungsmethoden schaffen, die einen Aufschluss mit geringem Energiebedarf ermöglicht.**



Spezifischer Biogasertrag in Abhängigkeit von der Gärzeit für folgende Ansätze:

A: Gerstenstroh

B: Gerstenstroh + Enzymextrakt,

C: Gerstenstroh nach enzymatischer Vorhydrolyse.

[Bioreact]

Die ersten Laborversuche zeigen, dass die enzymatische Vorhydrolyse einen positiven Einfluss auf den Biogasertrag hat

Für eine mögliche Realisierung des hier skizzierten Verfahrens einer vorwiegend enzymatischen Vorhydrolyse in der Praxis, kann in verfahrenstechnischer Hinsicht auf bestehende zweiphasige, anaerobe Vergärungsverfahren mit mikrobiologischer Vorhydrolyse aufgesetzt werden. Das Verfahren ist damit nicht als Alternative zur praktizierten mikrobiologischen Vorhydrolyse, sondern als Alternative zu technisch-physikalischen Vorbehandlungsmethoden gedacht.



## Biologische Repowering-Maßnahmen - 1

### Biologische Repowering-Maßnahmen

Im Vordergrund der *biologischen Repowering-Maßnahmen* steht die Optimierung Prozessablaufs der Biogasbildung, dieser wird maßgeblich von der Aktivität und dem Zusammenspiel der beteiligten Bakteriengruppen bestimmt. Damit die Aktivität der Bakterien gewährleistet ist muss eine ausreichende Versorgung mit Nährstoffen insbesondere Spurenelemente (Mikronährstoffe) sichergestellt sein. Die Spurenelemente dienen zur Ausbildung der am Abbau beteiligten Enzyme und Proteine, stellen wichtige Reaktionspartner dar und ermöglichen den Elektronentransport.

### Best-Case-Praxisbeispiel: Optimierung einer Anlage aus dem Projekt durch Enzymzugabe

Das Nachfolgende Praxisbeispiel zeigt die Optimierungsmöglichkeiten einer Bestandanlage durch Enzym- und Spurenelementzugabe. Die Anlage wurde im Jahr 2014 im Rahmen des Projektes besucht. Es wurden Proben aus dem Fermenter für Komplettanalyse und ICP gezogen.

#### Anlagendaten der Praxisanlage [Bioreact]

Vorhydrolyse	160 m <sup>3</sup> (offen)
Fermenter	650 m <sup>3</sup>
Endlager	offen
Installierte Leistung:	190 kW
Wirkungsgrad BHKW	37%
Baujahr	2006

# REPOWERING – Fact Sheet

## Biologische Repowering- Maßnahmen - 2

Ziel der Optimierung war es bei der kurzen Verweilzeit von 25,1 Tagen den Abbau des Substrates zu beschleunigen und die Viskosität des Fermenterinhalt zu senken. Eine deutliche Viskositätsverbesserung konnte bereits nach 2 Wochen festgestellt werden. Nach ca. 3-4 Wochen stieg die Leistung langsam an.

Durch die Wirkung der Enzyme wurde der Fermenterinhalt fließfähiger. Gleichzeitig wurde auch der Gärrest auch dünnflüssiger wodurch die Rezirkulationsmenge in die Hydrolysestufe sukzessive zurückgefahren werden konnte. Aktuell werden nur noch 14,5 m<sup>3</sup> Rezirkulat täglich der Hydrolysestufe zugegeben. Aus 4,3t Maissilage, 2t Getreide und 1 m<sup>3</sup> Rindergülle werden aktuell 185kWh pro Stunde produziert. Die Substratausnutzung wurde über die prozessbiologischen Maßnahmen von 80,8 auf 99,3% gesteigert. Außerdem läuft das BHKW mittlerweile mit 185kWh pro Stunde mit 97,4 % fast Volllast.

	Vor Optimierung	Nach Optimierung
<b>Substrat</b>	<b>Fütterungsmenge</b>	<b>Fütterungsmenge</b>
	[t/d]	[t/d]
<b>Maissilage</b>	4,4	4,3
<b>Getreide</b>	1,5	2
<b>Rindergülle</b>	1	1
<b>Substratkosten</b>	[€/d]	[€/d]
<b>Maissilage (40 €/t)</b>	176	172
<b>Getreide (180 €/t)</b>	270	360
<b>Prozesshilfsstoffe</b>	[kg/d]	[kg/d]
<b>Spurenelemente</b>	0	0,74
<b>Enzyme</b>	0	2,5
<b>Kosten Prozesshilfsstoffe</b>	[€/d]	[€/d]
<b>Spurenelemente</b>	0	9,25
<b>Enzyme</b>	0	16,75
<b>Stromertrag</b>		
<b>Stromproduktion [kWh/d]</b>	3120	4440
<b>Einspeisevergütung [€/kWh]</b>	0,17	0,17
<b>Einspeisevergütung [€/d]</b>	530,4	754,8
<b>Erlös [€/d]</b>	84,4	196,8
<b>Mehrerlös durch Prozessoptimierung [€/d]</b>		<b>112,4</b>

## Technische Repowering-Maßnahmen

Von einer besonders großen Vielfalt sind die *technischen Repowering-Maßnahmen*. Die Maßnahmen können generell der Optimierung oder der Nachrüstung zugeordnet werden. Unter Optimierung sind der Austausch von bestehenden Technologien durch gleichartige aber effizientere Technologien zu verstehen sowie auch bei eventuellen Defekt der Technik. Eine Nachrüstung hingegen liegt vor, wenn die gewählte Technologie erstmalig neu eingebaut wird.

Besonders bei der Energiegewinnung können technische Repowering-Maßnahmen große Wirkung entfalten. Bei den meisten landwirtschaftlichen Biogasanlagen wird das erzeugte Biogas in einem BHKW verbrannt, wobei elektrische Energie und Wärmeenergie gewonnen werden. Die Effizienz ist hierbei abhängig von den elektrischen und thermischen Wirkungsgraden des BHKW. Ein Ersatz des genutzten BHKW durch ein neues BHKW mit höheren Wirkungsgraden stellt eine mögliche Repowering-Maßnahme dar und ermöglicht bei gleichbleibender Energieerzeugung Substrateinsparungen.

**Praxisbeispiel:**  
Substrateinsparung nach Erhöhung des elektrischen Wirkungsgrades 35,5% auf 40%

Substrat:	Bisherige Substratmenge [t FM/a]	Substratmenge nach BHKW-Austausch [t FM/a]
Maissilage (35% TM)	6500	5282,03
Grassilage (35% TM)	1500	1500
Rindergülle mit Futterresten (10% TM)	2200	2200
Schweinegülle (6% TM)	1500	1500

### Biogaserträge [m<sup>3</sup><sub>n</sub>]:

96,3% des KTBL Wertes	1743973,7
Biogasertrag nach BHKW-Austausch	1547776,7

### Stromertrag für 1 Jahr:

96,3% des KTBL Wertes	3095553,4
Biogasertrag nach BHKW-Austausch	3095553,4

### Einsparung von 1.217,97 t Maissilage

Annahme 1t FM Maissilage= 36€	<b>43.846,92 €</b>
-------------------------------	--------------------

## Das Repowering von Biogasanlagen kann an verschiedenen Teilbereichen der Anlage ansetzen

### Biologische Repowering-Maßnahmen

Im Vordergrund der *biologischen Repowering-Maßnahmen* steht die Optimierung Prozessablaufs der Biogasbildung, dieser wird maßgeblich von der Aktivität und dem Zusammenspiel der beteiligten Bakteriengruppen bestimmt. Damit die Aktivität der Bakterien gewährleistet ist muss eine ausreichende Versorgung mit Nährstoffen insbesondere Spurenelemente (Mikronährstoffe) sichergestellt sein. Die Spurenelemente dienen zur Ausbildung der am Abbau beteiligten Enzyme und Proteine, stellen wichtige Reaktionspartner dar und ermöglichen den Elektronentransport.

### Technische Repowering-Maßnahmen

Von einer besonders großen Vielfalt sind die *technischen Repowering-Maßnahmen*. Die Maßnahmen können generell der Optimierung oder der Nachrüstung zugeordnet werden. Unter Optimierung sind der Austausch von bestehenden Technologien durch gleichartige aber effizientere Technologien zu verstehen sowie auch bei eventuellen Defekt der Technik. Eine Nachrüstung hingegen liegt vor, wenn die gewählte Technologie erstmalig neu eingebaut wird.

### Systemorientierte Repowering-Maßnahmen

Ein weiteres Gebiet der Repowering-Maßnahmen umfasst Grundsatzfragen des Anlagen-konzeptes und dem System Biogasanlage. Die möglichen systemorientierten Repowering-Maßnahmen kommen in der Regel nicht ohne technische Anpassungen aus. Zwischen dem Bereich der systemorientierten und technischen Repowering-Maßnahmen herrscht also meist eine enge Verbindung und Überschneidung.

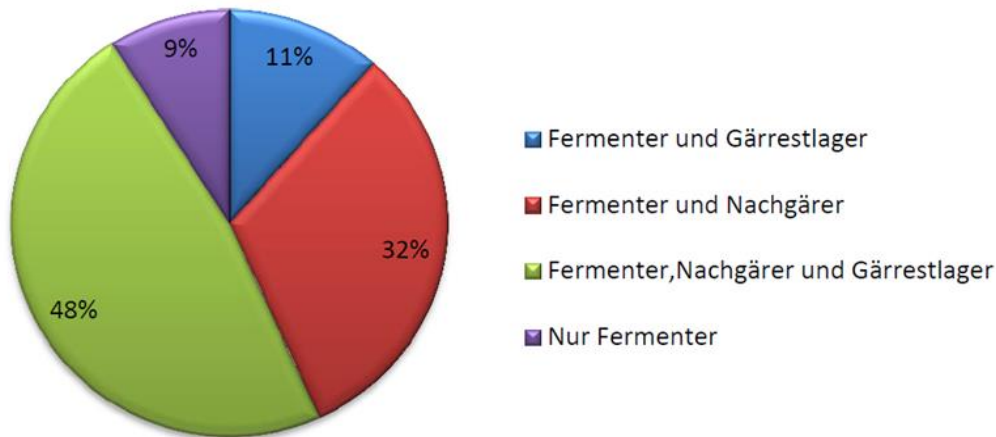
### Übersicht über mögliche Repowering-Maßnahmen

Gebiet des Repowering:	Mögliche Repowering-Maßnahme:	Beispiel:
Biologie	Optimierung der Nährstoffversorgung	Spurenelementdosierung
	Zugabe von Enzymen	Enzymzugabe
	Zugabe von Bakterien	Dosierung hydrolytisch arbeitender Bakterien
Technik	Optimierung/Nachrüstung der Zerkleinerungstechnik	Nachrüstung Zerkleinerungstechnik
	Optimierung und Nachrüstung der Rührwerkstechnik	Nachrüstung effizienter Rührwerke
	Optimierung/Nachrüstung der Abdeckungen	Vergrößerung des Gasspeichervolumens
	Optimierung/Erweiterung des BHKW	Ersatz des bestehenden BHKW - Wirkungsgradsteigerung
System	Biogasverwertung	Biogasaufbereitung

## Statistische Analysen bestehender Biogasanlagen - 1

Das Projekt REPOWERING verfolgt den Ansatz auf Basis einer umfassenden Datenanalyse die Möglichkeiten und Kosten des Repowering quantifizierbar zu machen.

In Rahmen des Projekts REPOWERING wurden die Daten von 1809 Biogasanlagen ausgewertet. Von diesen Biogasanlagen liegen neben den Anlagendaten auch die kompletten Laboranalysen vor.



**Anteile der unterschiedlichen Biogasanlagen (Fermenter, Nachgärer, Gärrestlager) [Bioreact]**

Betrachtet man die Anzahl und Art der vorhandenen Behälter in den untersuchten Biogasanlagen, so verfügen 9% der Biogasanlagen über einen Fermenter mit einem Durchschnittsvolumen von 1961 m<sup>3</sup> und ein offenes Gärrestlager. 31,7% der Anlagen bestehen aus einem Fermenter mit einem Durchschnittsvolumen von 1835 m<sup>3</sup> und einem Nachgärer (2133 m<sup>3</sup>) sowie einem offenem Gärrestlager. Knapp die Hälfte der untersuchten Biogasanlagen (48%), verfügen über Fermenter (1614 m<sup>3</sup>), Nachgärer (1626 m<sup>3</sup>) und einem abgedeckten und in den meisten Fällen gasdichten Gärrestlager (2684 m<sup>3</sup>). 11,5 % der Anlagen sind aus einem Fermenter (1760 m<sup>3</sup>) und einem abgedeckten und Gärrestlager (2684m<sup>3</sup>) gebaut worden.

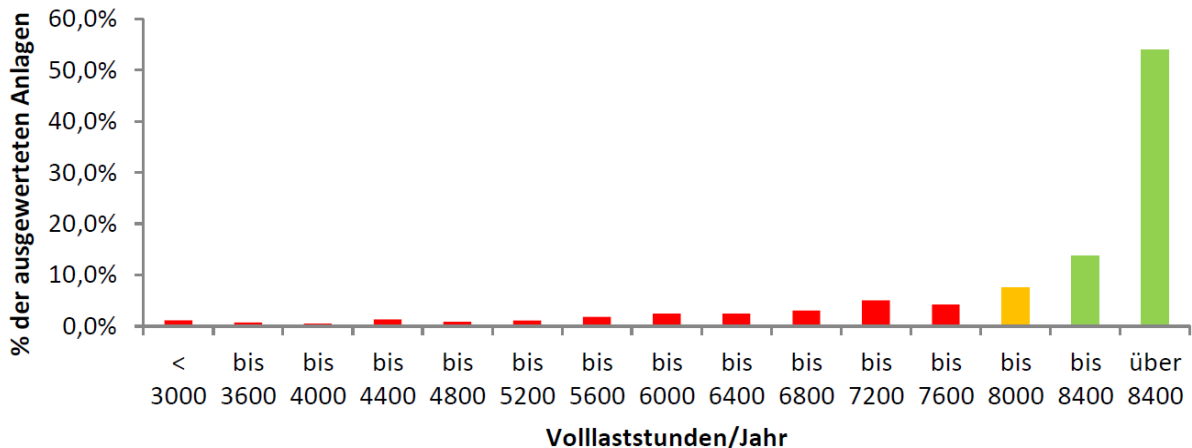
# REPOWERING – Fact Sheet

## Statistische Analysen bestehender Biogasanlagen - 2

Das Projekt REPOWERING verfolgt den Ansatz auf Basis einer umfassenden Datenanalyse die Möglichkeiten und Kosten des Repowering quantifizierbar zu machen.

In Rahmen des Projekts REPOWERING wurden die Daten von 1809 Biogasanlagen ausgewertet. Von diesen Biogasanlagen liegen neben den Anlagendaten auch die kompletten Laboranalysen vor.

Verteilung der ausgewerteten Biogasanlagen nach Volllaststunden



### BHKW-Auslastung und Substratausnutzung

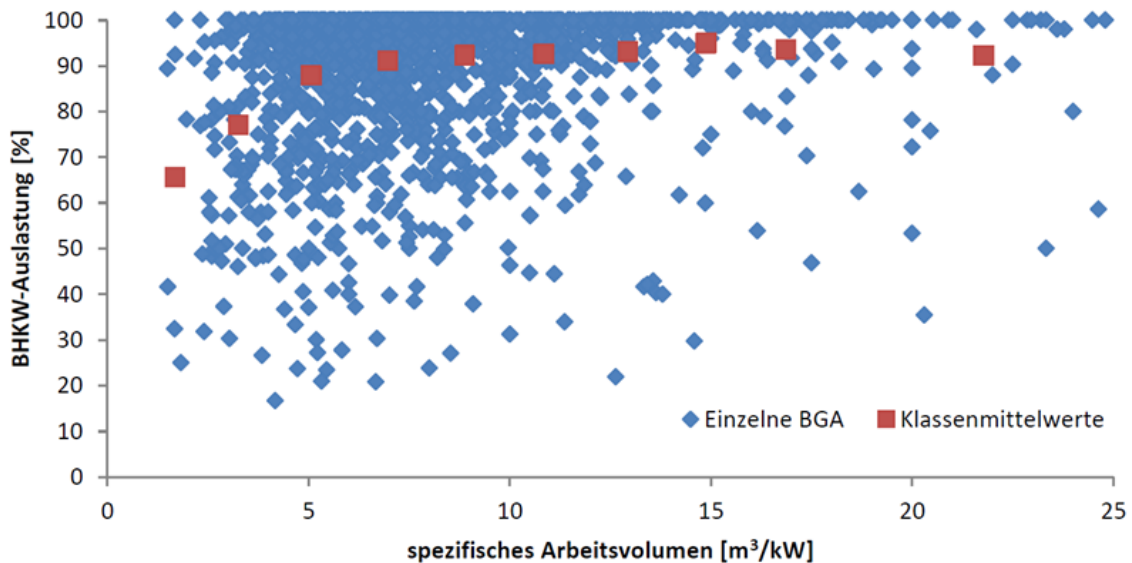
Die Wirtschaftlichkeit von Biogasanlagen hängt maßgeblich von zwei variablen Faktoren ab. Zum einen von der Laufzeit des Blockheizkraftwerkes pro Jahr unter Höchstleistung (Volllaststunden), also den real produzierten kWh, zum anderen von der optimalen Nutzung der zunehmend teurer werdenden Substrate ab.

7901 Volllaststunden erreichten die ausgewerteten Biogasanlagen im Durchschnitt. Nur ca. 29,9 % der untersuchten Anlagen liegen unter dem Durchschnittswert. 68% aller Anlagen liegen pro Jahr bei über 8000 Volllaststunden.

## Statistische Analysen bestehender Biogasanlagen - 3

Das Projekt REPOWERING verfolgt den Ansatz auf Basis einer umfassenden Datenanalyse die Möglichkeiten und Kosten des Repowering quantifizierbar zu machen.

In Rahmen des Projekts REPOWERING wurden die Daten von 1809 Biogasanlagen ausgewertet. Von diesen Biogasanlagen liegen neben den Anlagendaten auch die kompletten Laboranalysen vor.



### Faulraumvolumen und installierte Leistung

Je größer das spezifische Arbeitsvolumen ist, also das zur Verfügung stehende Faulraumvolumen pro kW installierter elektrischer Leistung, umso besser werden die BHKW ausgelastet. Anlagen mit einem hohen spezifischen Faulraumvolumen (Quotienten aus Faulraumvolumen und installierter Leistung [m³/kW]) können auf längere Verweilzeiten und niedrigere Raumbelastungen vertrauen. Die Prozesse laufen so in der Regel stabiler und effizienter. Dabei gibt es - wie auch bei allen anderen Parametern - gute und schlechte Anlagen. Der generelle Zusammenhang wird erst deutlich, wenn Anlagen mit gleichen Quotienten zu „Klassen“ zusammengefasst werden und die Klassenmittel betrachtet werden. Anlagen mit Quotienten zwischen 2 und 8 laufen deutlich schlechter als Anlagen mit mehr Faulraum pro kW installierter Leistung

## Flexibilisierung der Biogasbeschickung durch die Installation einer Hydrolysestufe - 1

Für die an Biogasanlagen genutzte Eintragstechnik werden abhängig von der Dimensionierung und der Beanspruchung bei der Projektentwicklung eine Abschreibungsdauer von 5 - 10 Jahren vorgesehen. Unabhängig von einem gezielten Umbau einer BGA zur Erhöhung der Flexibilität wird daher im Rahmen der 20 jährigen EEG-Vergütungsperiode einer BGA in der Regel zumindest eine Erneuerung der Eintragstechnik notwendig.

Im Projekt REPOWERING wurde geprüft, inwieweit die Errichtung der Hydrolysestufe gegenüber als Ersatz einer „konventionellen Eintragstechnik“ bestehend aus Schubbodencontainern und konventionellen Dosiersystemen Vorteile hinsichtlich Anlagenleistung und Betriebssicherheit bieten kann.

Geprüft wurde das Szenario anhand des Modellfalls einer großen mit nachwachsenden Rohstoffen betriebenen Biogasanlage mit einer Bemessungsleistung von 1,5 MW, bei der durch die Umrüstung auf eine Hydrolysestufe der Substrateinsatz von überwiegend Maissilage auf Reststoffe wie:

- Lignocellulosehaltige Reststoffe (Stroh und Festmist)
- Geflügelmist
- Grasschnitt

Die Anlagendaten der Modellanlage entstammen aus Projektbewertungen von Fraunhofer UMSICHT, die Kostenermittlung für die Umrüstung basiert auf Herstelleranfragen.

Der Betrieb der Hydrolysestufe kann grundsätzlich zu einer Optimierung des Anlagenbetriebs beitragen. Zum einen kann durch die in der Hydrolyse herrschenden Prozessbedingungen mit einem niedrigen pH-Wert ein Voraufschluss der Substrate erzielt werden und so einen beschleunigten Abbau im Fermenter ermöglichen. Bei leicht abbaubaren Substrate wie. z.B. Zuckerrüben ist der Einsatz einer Hydrolyse nicht unbedingt erforderlich, dieses Substrat kann jedoch zu einem schnelleren Versäuerungsprozess und damit zur Unterstützung der Hydrolyse schwerer abbaubarer Inputmaterialien beitragen.



# REPOWERING – Fact Sheet

## Flexibilisierung der Biogasbeschickung durch die Installation einer Hydrolysestufe - 2

Die Auswertung der Daten zeigte, dass durch den Einsatz einer Hydrolysestufe der Umstieg von einer überwiegend auf Maissilage basierenden Substratmischung, zu einer auf Reststoffen basierenden Substratmischung möglich ist.

Substratmischung 1,5 MW Modell-BGA mit klassischer Eintragstechnik  
[UMSICHT]

Material	Menge [t/d]
Maissilage	83
Roggenschrot	3,5
<b>Summe</b>	<b>86,5</b>

Mögliche Substratmischung mit Einsatz von Reststoffen der BGA bei Nachrüstung einer Hydrolysestufe [UMSICHT]

Material	Menge [t/d]
Maissilage	41
Grasschnitt	15
Zuckerrüben	28
HTK	18
Festmist und Stroh	21
<b>Summe</b>	<b>123</b>

## Entwicklung Planungshilfsmittel für Anlagenverbünde - 1

Durch die Verbesserung der Wärmenutzung lässt sich die Gesamteffizienz des Systems Biogas verbessern. Neben der direkten Anbindung eines Wärmeverbrauchers am Ort der Biogasanlage ist es auch möglich, Verbraucher im näheren und weiteren räumlichen Umfeld der Anlagen zu erschließen. Für die Anbindung der Biogasanlage an die räumlich entkoppelten Verbraucher können zwei unterschiedlich netzgebundene Konzepte Anwendung finden:

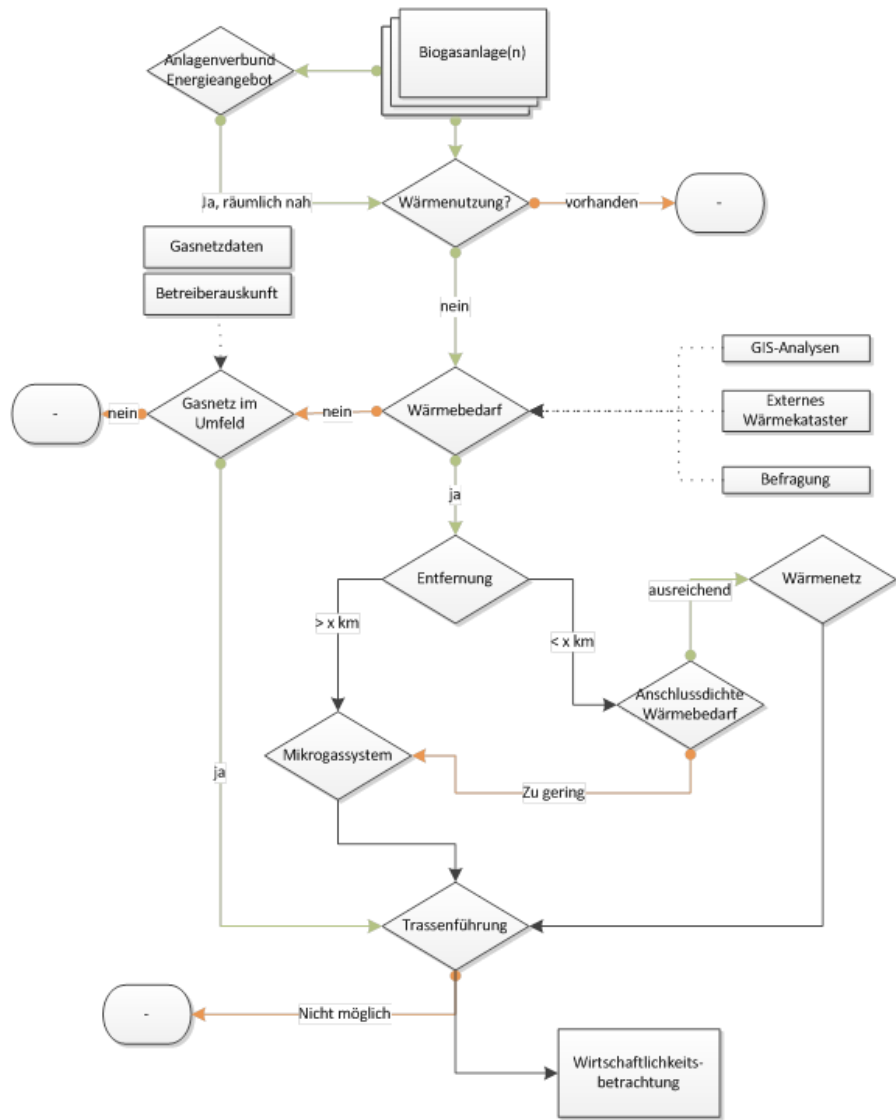
- Beim ersten Konzept kann das produzierte Biogas am Standort im Motor verbrannt werden und die anfallende Wärme über ein angeschlossenes Wärmenetz zum Verbraucher transportiert werden (Konzept »Wärmenetz«).
- Beim zweiten Konzept wird das Biogas nicht am Standort der Biogasanlage in einem BHKW verstromt, sondern über eine Mikrogasleitung zum potenziellen Nutzer transportiert (Konzept »Mikrogassystem«). Ein möglicher Endpunkt des Transports kann dabei eine bestehende konventionelle Erdgasleitung sein, so dass eine Aufbereitung des Biogases auf Erdgasqualität notwendig wird (Biogaseinspeisung). Alternativ kann das Biogas, ohne Aufbereitung auf Erdgasqualität, zu einem BHKW transportiert werden, welches unmittelbar am Wärmeverbraucher installiert ist (Satelliten-BHKW).

# REPOWERING – Fact Sheet

## Entwicklung Planungshilfsmittel für Anlagenverbünde - 2

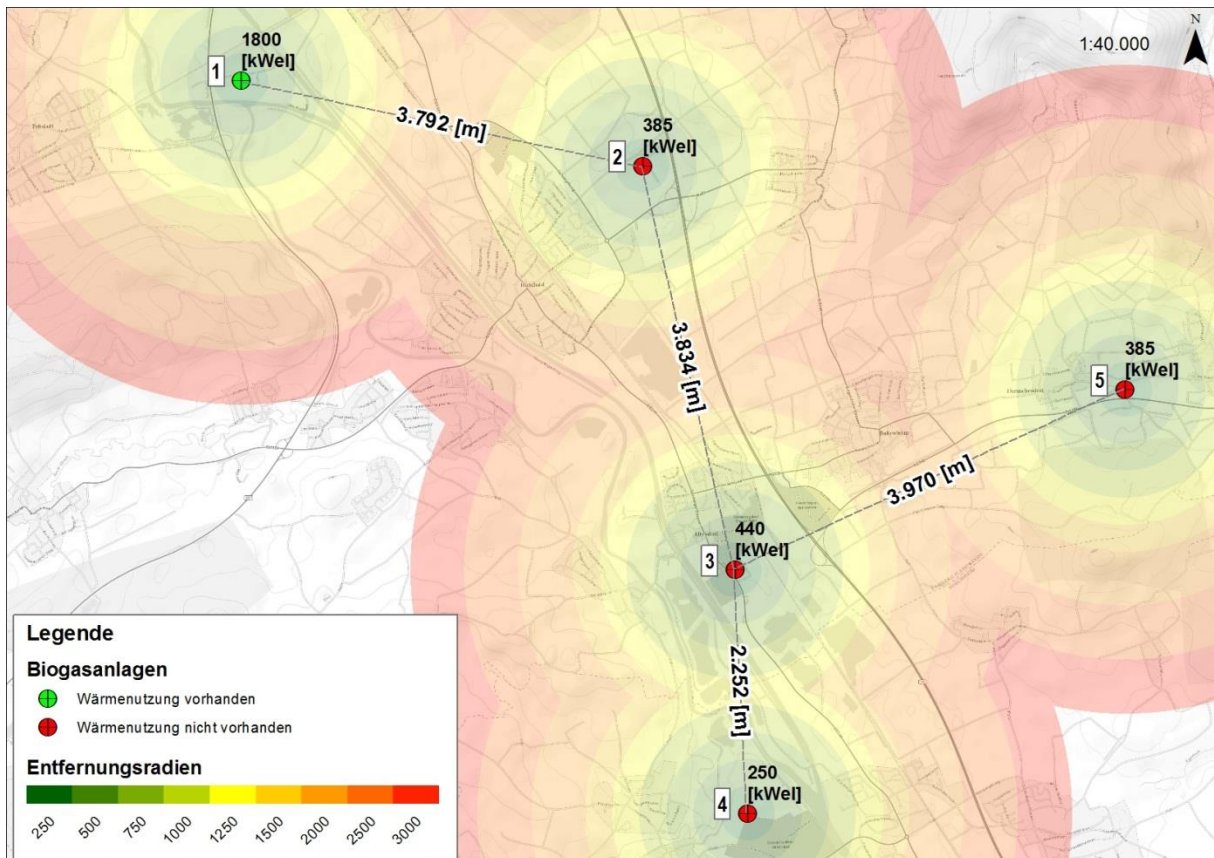
Für Bestandsanlagen sind im Rahmen des Repowering beide Konzepte anwendbar. Aufbauend auf der exemplarischen Szenarienbetrachtung wurde für das Projekt ein allgemein anwendbarer Entscheidungsbaum entwickelt welches auf Praxisanlagen angewendet werden kann.

### Entscheidungsbaum zur Entwicklung von Repoweringoptionen mit Raumbezug [UMSICHT]



## Planbeispiel Anlagenverbünde - 1

Das Planbeispiel zeigt fünf Biogasanlagen im ländlichen Raum. Die installierte elektrische Leistung reicht von 250 kWel bis 1800 kWel. Vier der Anlagen (Nr. 2 bis 5) weisen aktuell keine effiziente Wärmenutzung aus, so dass diese Anlagen exemplarisch einem räumlichen Screening zur Realisierung eines Wärmenetzes oder Biogaseinspeisung unterzogen werden. Gemeinsam haben die Anlagen eine installierte elektrische Leistung von ca. 1,4 MW.

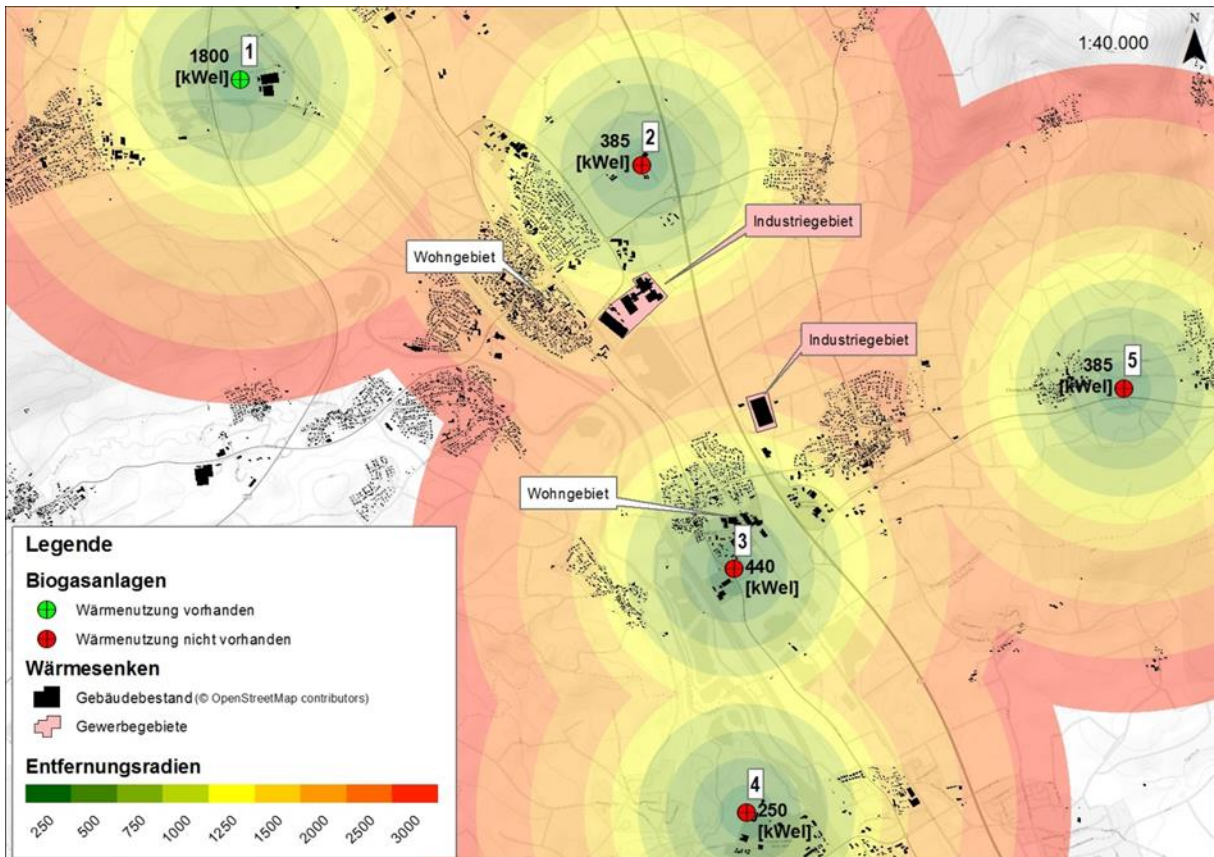


Räumliche Verteilung von fünf Biogasanlagen im ländlichen Raum [UMSICHT]

# REPOWERING – Fact Sheet

## Planbeispiel Anlagenverbünde - 2

Zur Analyse von potenziellen Wärmesenken werden OpenStreetMap-Daten zum Gebäudebestand genutzt. Die Analyse zeigt, dass zwei Industriegebiete (1250 m von Anlage 2 und 3) sowie kleinere Ansammlungen von Wohngebäuden im Umfeld der Anlagen zu finden sind. Zu prüfen ist, ob eines der Industriegebiete bzw. Wohngebiete Wärmemengen abnehmen kann, um den Wärmenutzungsgrad der betrachteten Anlagen (2 bis 5) deutlich zu steigern. Einzelkonzepte sind grundsätzlich auch möglich, aber nicht im Fokus des Konzepts.

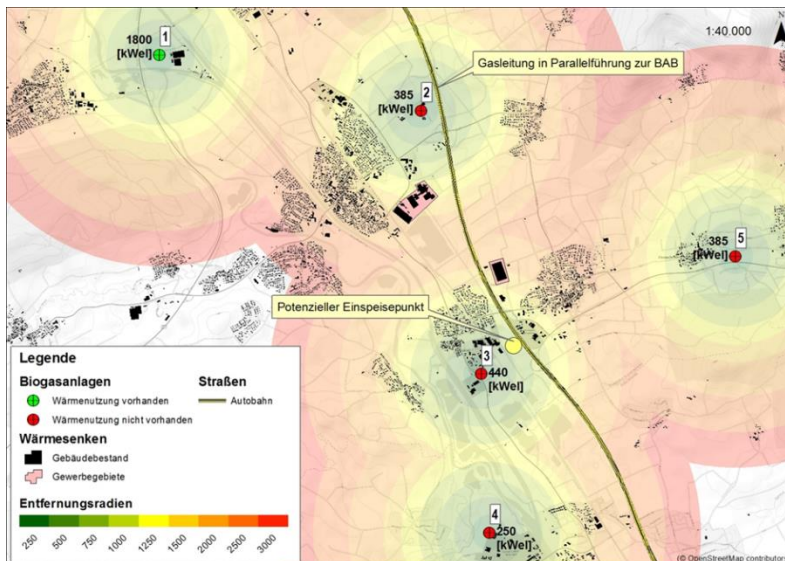


Verschneidung der Entfernungsradien mit dem OSM Gebäudebestand [UMSICHT].

# REPOWERING – Fact Sheet

## Planbeispiel Anlagenverbünde - 3

Aufgrund der räumlichen Konstellation und insbesondere der Entfernungen ist grundsätzlich die Realisierung eines Anlagenverbunds möglich. In Berechnungen von Fraunhofer UMSICHT wurde bereits gezeigt, dass Anlagenverbünde zur gemeinsamen Biogaseinspeisung bzw. Versorgung eines Satelliten-BHKWs mit Trassenlängen bis 30 km wirtschaftlich realisiert werden können.



Entfernungsanalyse  
Gasleitung [UMSICHT]

## Trassenverlauf Mikrogasleitung [UMSICHT]

