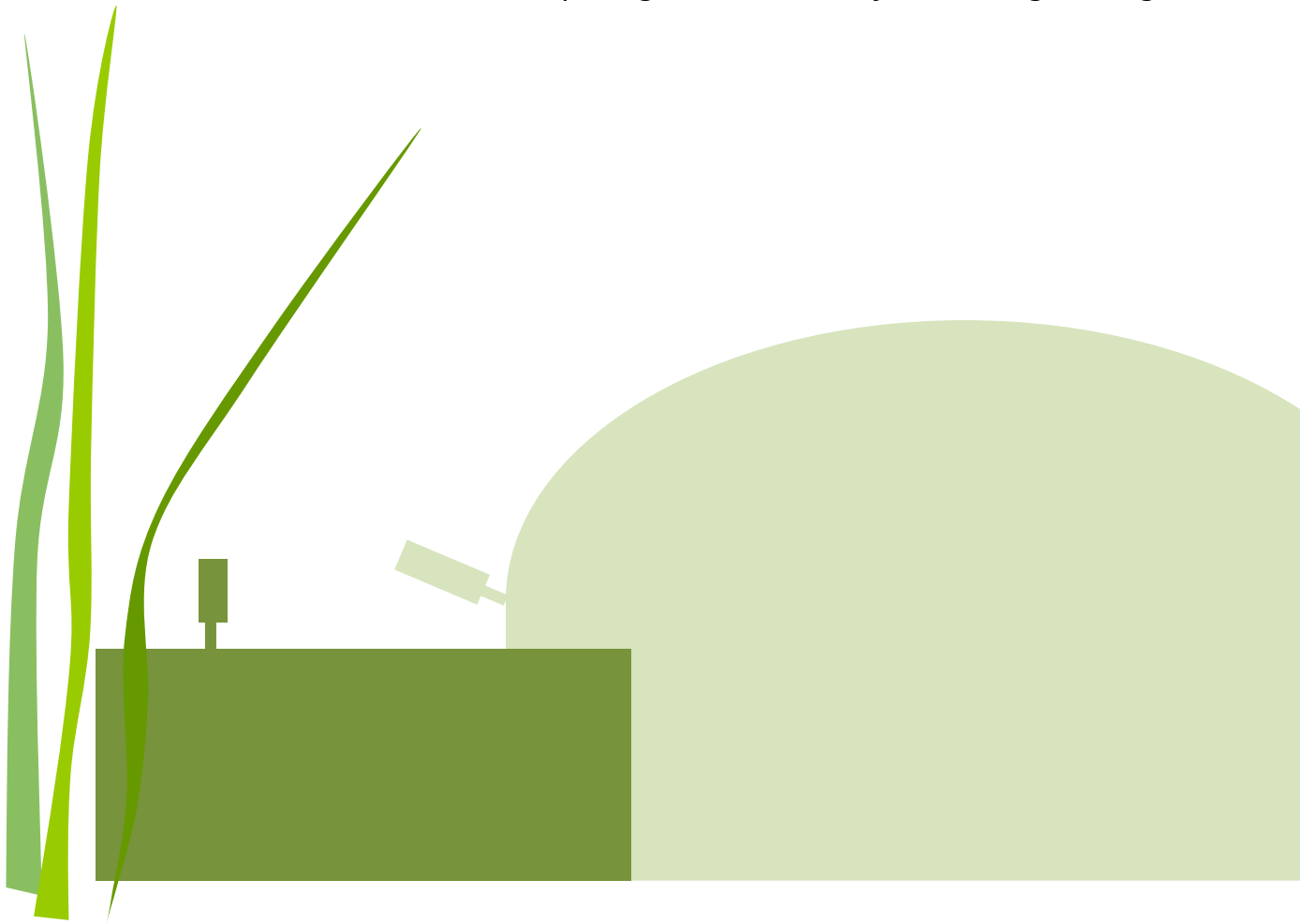


Informationen und Empfehlungen zum Betrieb landwirtschaftlicher
Hydrolyse- und Versäuerungsstufen

Ergebnisse des Projekts **AcEta**[↑]

*Effiziente Hydrolyse und Acidogenese:
bioprozesstechnische Optimierung
zweiphasiger landwirtschaftlicher Biogasanlagen*



Projektförderung:



Bundesministerium
für Ernährung
und Landwirtschaft

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Projektträger:



Verbundprojekt

AcEta - Effiziente Hydrolyse und Acidogenese: Bioprozesstechnische Optimierung zweiphasiger landwirtschaftlicher Biogasanlagen

Projektförderung



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Projekträger



Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V.
Hofplatz 1
18276 Gülzow

Koordinator,
Verbundpartner und
Auftraggeber des
Unterauftrags



ttz Bremerhaven

ttz Bremerhaven
Wasser-, Energie- und Landschaftsmanagement
Am Lunedeich 12
27572 Bremerhaven

Unterauftragnehmer



CORDES+WINTERBERG GbR
Seestraße 2A
39175 Biederitz

Projektpartner



Hochschule Anhalt (FH)
*Fachbereich Angewandte Biowissenschaften und
Prozesstechnik*
Strenzfelder Allee 28
06406 Bernburg

FKZ

FKZ 22015412 und 22011413

Autoren

Prof. Dr. Gerhard Schories
Prof. Dr. Christiana Cordes
Dr. Ralf Winterberg

Ort und Datum

Bremerhaven, Bernburg und Biederitz
31.07.2018

Adressen und Ansprechpartner

ttz Bremerhaven

Verein zur Förderung des Technologietransfers an der Hochschule Bremerhaven e. V.
Am Lunedeich 12
27572 Bremerhaven
www.ttz-bremerhaven.de

Ansprechpartner Prof. Dr.-Ing. Gerhard Schories

Fon 04 71 / 80934 102
Fax 04 71 / 80934 299
Mobil 01 60/97 26 25 77
E-Mail gschories@ttz-bremerhaven.de

Hochschule Anhalt (FH)

Fachbereich Angewandte Biowissenschaften und Prozesstechnik
Strenzfelder Allee 28
06406 Bernburg
www.hs-anhalt.de

Ansprechpartnerin Prof. Dr. rer. nat. Christiana Cordes

Fon 0 34 71 / 3 55 – 35 37
Mobil 01 71 / 7 60 02 24
E-Mail c.cordes@bwp.hs-anhalt.de

Cordes+Winterberg GbR (im Unterauftrag des ttz)

Technische Bioprozesse und Bioenergie
Seestraße 2A
39175 Biederitz
www.bioprozesse.de

Ansprechpartner Dr. rer. nat. Ralf Winterberg

Fon 03 92 92 / 66 – 3 51
Fax 03 92 92 / 66 – 9 46
Mobil 01 70 / 9 01 08 55
E-Mail winterberg@bioprozesse.de

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages mit Mitteln des Bundesministeriums für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL) über die Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR) als Projektträger des BMEL für das Förderprogramm Nachwachsende Rohstoffe unterstützt. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

Dank

Die Autoren danken dem Auftraggeber des Verbundprojekts, dem Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft und der Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe für die Bereitstellung finanzieller Mittel zur Bearbeitung des Projekts und für die konstruktive und angenehme Zusammenarbeit.

Ohne die engagierte Unterstützung der Felduntersuchungen durch die Betreiber und Fahrer der untersuchten Biogasanlagen wäre die vorliegende Studie nicht realisierbar gewesen. Auch ihnen sei daher an dieser Stelle herzlich gedankt.

Inhalt

1.	Hydrolysestufen im Fokus	7
2.	Phasen und Stufen: Eine Begriffserläuterung	9
2.1	Anaerobe Nahrungskette: Substratabbau in vier Schritten	9
2.2	Phasen und Stufen	9
2.3	Anmaischer oder Hydrolysestufe?	10
3.	Die "Philosophie" der Hydrolysestufe	11
3.1	Vorteile	11
3.2	Nachteile	11
3.3	Rezirkulation und ihre Folgen	11
4.	Biogase und Emissionen der Vorstufen	13
4.1	Phase I: Betriebsdatenauswertungen für 20 Biogasanlagen	13
4.2	Phase II: Emissionsmessungen an 6 Biogasanlagen	14
4.2.1	Untersuchte Biogasanlagen	14
4.2.2	Methanemissionen	17
4.2.3	Einfluss des Vorstufenvolumens auf den Methanverlust	18
4.2.4	Einfluss der Rührwerksaktivität auf die Biogasfreisetzung	19
4.3	Wirtschaftliche Bewertung der Methanverluste	20
4.4	Methanemissionen der Vorstufen vor dem Hintergrund des Klimaschutzes	20
4.5	Betriebssicherheit und Arbeitsschutz	21
5.	Bioprozesstechnische Effizienz der Hydrolyse- und Versäuerungsstufe	23
5.1	Effizienz der Hydrolyse: kein Abbau der "Rohfaser"	23
5.2	Effizienz der Gärproduktbildung: signifikante Versäuerung	24
6.	Aktualisierte Bewertung von Hydrolysestufen zur Vergärung faserreicher landwirtschaftlicher Substrate	26
7.	Empfehlungen zur Optimierung der Hydrolysestufe	28
8.	Literatur	30

Abkürzungen, Einheiten und Symbole

BGA	Biogasanlage
BHKW	Blockheizkraftwerk
CH ₄	Massenstrom Methan in der Modellierung
CO ₂	Massenstrom Kohlenstoffdioxid in der Modellierung
DBFZ	Deutsches Biomasseforschungszentrum gGmbH
EEG	Erneuerbare-Energien-Gesetz
GRL	Gärrückstandslager
H+V-Stufe	Hydrolyse- und Versäuerungsstufe
K	kinetische Konstante
kWh	Kilowattstunde
kW _{el}	Kilowattstunde elektrische Energie (Strom)
m ³	Kubikmeter
m ³ _N	Normkubikmeter (0°C, 1,013 bar, trockenes Gas)
μ	Wachstumsrate der Mikroorganismen (h ⁻¹)
NawaRo	Nachwachsende Rohstoffe
nb	nicht bestimmt
NG	Nachgärer
nn	nicht nachweisbar
oTM	organische Trockensubstanz
TM	Trockenmasse
TS	Trockensubstanz (gleichbedeutend mit Trockenmasse")
ttz	ttz Bremerhaven e. V.
V	Volumen

1. Hydrolysestufen im Fokus

Für die Erzeugung von Biogas aus landwirtschaftlichen Substraten stehen zahlreiche Verfahrenskonzepte unterschiedlicher Hersteller zur Verfügung. Vor allem im Zusammenhang mit der Nutzung sogenannter "schwieriger" Substrate (wie z. B. Landschaftspflegegras oder Festmist) werden zweiphasige Biogasanlagen genutzt. Diese Anlagen verfügen über eine separate Hydrolyse- und Versäuerungsstufe, die dem Methanreaktor vorgeschaltet ist. Häufig, aber nicht hinreichend präzise, wird auch von zweistufigen Biogasanlagen gesprochen. Das Konzept wurde in den frühen 1970er Jahren mit dem Ziel entwickelt, die separate Optimierung beider Phasen zu ermöglichen und damit insgesamt eine höhere Produktivität und Umsatzeffizienz zu erreichen. Zudem soll die Separation der Hydrolyse und der Versäuerung die empfindlichen Methanbakterien vor unkontrollierten Erhöhungen der Konzentration organischer Säuren schützen.

In der Landwirtschaft wurden zunächst nur vereinzelt zweiphasige Biogasanlagen realisiert, bevor mit dem Jahr 2004 die Zahl zweiphasiger Systeme deutlich zunahm. Der Auslöser war der sogenannte "NawaRo-Bonus" des EEG, der erstmals eine kostendeckende energetische Verwertung von Energiepflanzen in Biogasanlagen ermöglichte. Abbildung 1 zeigt beispielhaft die Konfiguration einer der untersuchten Biogasanlagen.

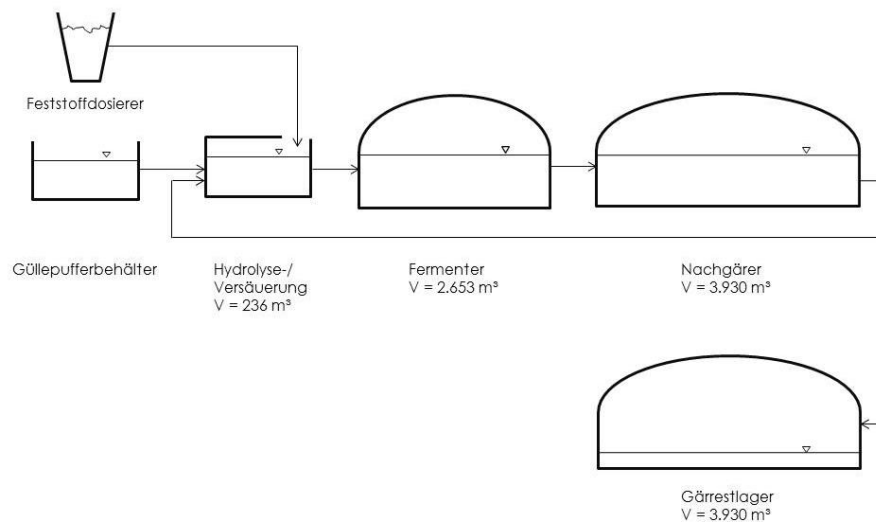


Abbildung 1: Beispielhafte Darstellung der Anlagenkonfiguration einer zweiphasigen landwirtschaftlichen Biogasanlage

Heute erfahren Hydrolyse- und Versäuerungsstufen als Komponenten großtechnischer Biogasanlagen eine zunehmende Verbreitung. Der Anteil der deutschen landwirtschaftlichen Biogasanlagen, die mit einer Hydrolyse- und Versäuerungsstufe ausgestattet sind, dürfte zurzeit bei ca. 8 % liegen. Regional sind höhere Anteile möglich (Tabelle 1).

Tabelle 1: Anteil der landwirtschaftlichen Biogasanlage mit Anmaischer oder Hydrolyse- und Versäuerungsstufe nach Ergebnissen verschiedener Studien

Studie	Anzahl der untersuchten Biogasanlagen	davon mit		Bezugsjahr	erfasste Region
		Vorgrube/ Anmaischer (%)	Hydrolyse- und Versäuerungsstufe (%)		
FNR, 2005	61	n. b.	8	2001	Deutschland
FNR, 2009	63	8	8	2005	Deutschland
Winterberg, 2013	44	n. b.	20	2010	Sachsen-Anhalt
Winterberg et al., 2012	18	n. b.	17	2010	Altmark

n. b.: nicht bestimmt

Angesichts eines aktuellen Gesamtbestandes der deutschen Biogasanlagen von ca. 9.200 Anlagen (Stand: Mai 2018) wird die Relevanz eines wirtschaftlich und prozesstechnisch optimalen Betriebs dieser Anlagenkomponenten für die Landwirtschaft und das Klima deutlich. Praxisuntersuchungen haben allerdings gezeigt, dass eine fehlerhafte Auslegung der Hydrolyse- und Versäuerungsstufen sehr weit verbreitet ist. Energieverluste (Wasserstoff- und Methanemissionen), hohe Betriebsaufwendungen und unnötige Klimagasemissionen (Methan) sind häufige Folgen. Wesentliche Ursache dieser unerwünschten Entwicklung ist das Fehlen geeigneter Entscheidungs- und Planungsgrundlagen.

Die am Markt bestehende Unsicherheit verdeutlichen die folgenden Zitate:

- "Ich würde diese Anlage auch heute wieder so bauen. Die niedrigen Wartungskosten und die hohe Betriebssicherheit überzeugen mich". (Betreiber der Biogasanlage 16, 14.10.2015)
- "Nie wieder würde ich mich für eine zweistufige Anlage entscheiden. Die enormen Energieverluste und die hohen Investitionskosten machen das System unwirtschaftlich". (Betreiber der Biogasanlage 4, 14.10.2015)

Zwei Betreiber, zwei gegensätzliche Erfahrungen mit zweiphasigen Biogasanlagen, deren Verfahrenskonzepte sehr ähnlich sind. Besser als durch diese Stellungnahmen, die im Rahmen zweier Telefoninterviews im Oktober 2015 erfolgten, konnte das Motiv der vorliegenden Arbeit nicht bestätigt werden: Mit dem Verbundprojekt AcEta sollten die dringend benötigten Grundlagen für die fundierte Auslegung und den effizienten Betrieb von Hydrolyse- und Versäuerungen geschaffen werden.



Projektkonzept auf einen Blick

Im Zentrum des Verbundprojekts standen 20 zweiphasige landwirtschaftliche Biogasanlagen, deren Betriebsdaten ausgewertet wurden. Die Erfahrungen der Betreiber flossen in diese Auswertung ein. Auf dieser Basis wurden 6 offene Anmaischer und Hydrolysestufen für Emissionsmessungen ausgewählt. Die Ergebnisse dieser Felduntersuchungen wurden mit dem aktuellen Wissensstand zu den vorliegenden Empfehlungen zusammengefasst.

2. Phasen und Stufen: Eine Begriffserläuterung

2.1 Anaerobe Nahrungskette: Substratabbau in vier Schritten

Der Abbau komplexer Substratgemische erfolgt unter anaeroben Bedingungen, also auch in Biogasanlagen, in vier Schritten: der Hydrolyse (Aufspaltung von Makromolekülen), der Acidogenese (Säurebildung), der Acetogenese (Essigsäurebildung) und der Methanogenese (Methanbildung). An dieser Nahrungskette sind drei Gruppen von Mikroorganismen beteiligt:

1. die acidogenen Bakterien, die zum Teil hydrolytisch aktiv sind
2. die acetogenen Bakterien
3. die methanogenen Bakterien

Der Ablauf der mikrobiellen Verwertung organischer Substrate in den vier Schritten ist vielfach und detailliert beschrieben worden. Der aktuelle Wissensstand zu diesem Thema ist hoch komplex. Er wurde in der jüngeren Vergangenheit mehrfach zusammengefasst (z. B. Gallert und Winter, 2015), so dass hier auf eine erneute Darstellung verzichtet wird. Einzelne Aspekte, die wichtig für das Verständnis der Bioprozesse der Hydrolysestufen sind, werden in den folgenden Kapiteln beschrieben.

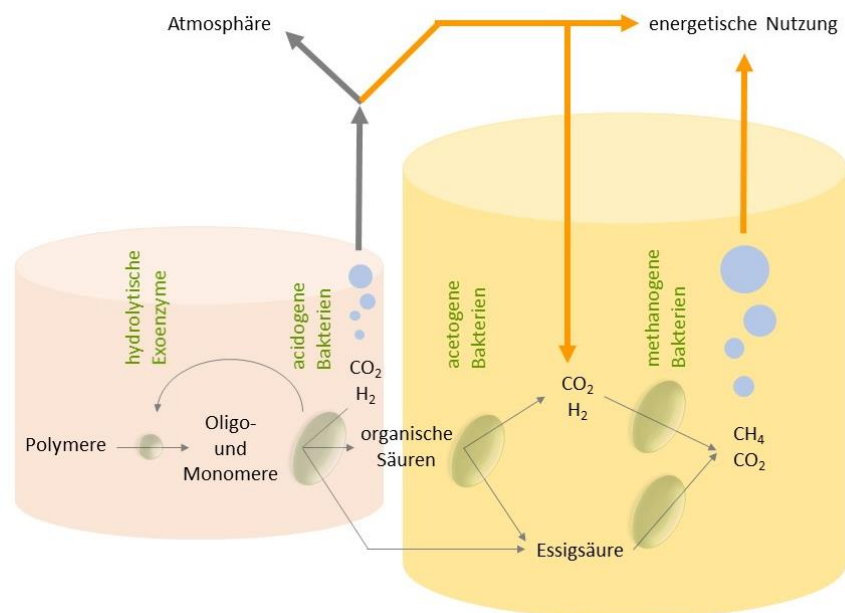


Abbildung 2: Vereinfachte Darstellung der anaeroben Nahrungskette und ihrer Verteilung auf die Hydrolyse- und Versäuerungsstufe (links, rot) sowie die Methanstufe (rechts, gelb) in einer "klassischen" zweiphasigen Biogasanlage mit scharfer Phasenseparation. Durch intensive Rezirkulation von Fermenter- oder Gärrestlagerinhalt wird diese scharfe Phasenseparation aufgehoben, und der Charakter der Hydrolysestufe nähert sich dem dem Methanreaktor an, so dass Methan und nicht Wasserstoff gebildet wird (Grafik: Cordes+Winterberg 2017)

2.2 Phasen und Stufen

Technische Anlagen, in denen organische Substanzen in zwei seriell betriebenen Reaktoren mit dem Ziel der Entsorgung oder der Energiegewinnung mikrobiell umgesetzt werden, sind bereits vor mehr als 100 Jahren realisiert worden. Mit diesen Systemen ist eine anhaltende Begriffsverwirrung verbunden, da von zweistufigen und/oder zweiphasigen Anlagen gesprochen wird, ohne dass sich bislang eine allgemeingültige

Definition dieser Begriffe durchgesetzt hat. Im Folgenden wird der Begriff „Stufe“ für einen Reaktor verwendet, der in eine seriell geschaltete Reaktorkaskade integriert ist, und zwar unabhängig von der Art der Reaktion, die in ihm abläuft. Der Begriff „Phase“ steht dagegen für den biochemischen Reaktionstypus innerhalb der anaeroben Nahrungskette, also die Schritte Hydrolyse, Säurebildung und Methanbildung.

So sind z. B. Haupt-/Nachgärer-Systeme zweistufig, aber einphasig. Eine Biogasanlage mit vorgeschalteter Hydrolyse- und Versäuerungsstufe ist dagegen nicht nur zweistufig, sondern auch zweiphasig. Die verschiedenen, dem Hauptfermenter vorgeschalteten Substratbehälter lassen sich als Vorstufen zusammenfassen (Abbildung 3).

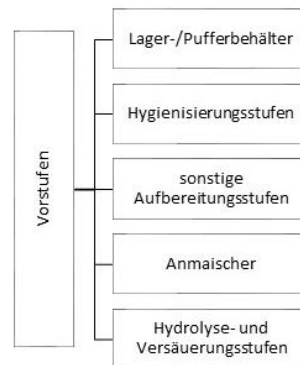


Abbildung 3: Verschiedene Formen der Vorstufen landwirtschaftlicher Biogasanlagen

2.3 Anmischer oder Hydrolysestufe?

Die Speicher- und Pufferbehälter, Anmischer sowie Hydrolyse- und Versäuerungsstufen lassen sich hinsichtlich ihrer bioprozesstechnischen Eigenschaften nicht eindeutig voneinander unterscheiden, da ihre jeweiligen Funktionen in der Regel Nebeneffekte verursachen, die über die Kernfunktion hinausgehen. So kommt es in der Regel in allen Vorstufen zu mikrobiellen Hydrolyse- und Versäuerungsreaktionen. Auch die Beheizung des Behälterinhalts, typisches Merkmal vieler Hydrolyse- und Versäuerungsstufen, ermöglicht keine sichere begriffliche Abgrenzung gegenüber Anmischern, wenn diese mit erwärmtem Rezirkulat betrieben werden, das aus einem Nachgärer stammt. Die in der Fachpresse immer wieder als typisches Merkmal der H+V-Stufen erwähnte "kontrollierte" Versäuerung setzt ein regelmäßiges Monitoring des Bioprozesses voraus. Dieses ist aber nach den Ergebnissen der vorliegenden Studie allerdings in der Praxis eine seltene Ausnahme. Lediglich die Belüftung, typisch für bestimmte Herstellerkonzepte, ist nahezu ausschließlich den Hydrolyse- und Versäuerungsstufen vorbehalten.

In Ermangelung eindeutiger Abgrenzungskriterien wurde im Rahmen der vorliegenden Studie die *Hydrolyse- und Versäuerungsstufe* als ein Reaktor bezeichnet, der vom Planer oder Hersteller installiert wurde, um die Phasen der Hydrolyse und der Versäuerung räumlich möglichst weitgehend von der nachfolgenden Aceto- und Methanogenese zu trennen. Die Mindestvoraussetzung für die reaktionstechnische Trennung der Hydrolyse und der Acidogenese einerseits und der Aceto- und Methanogenese andererseits ist eine kinetische Prozesssteuerung: Die Verweilzeit des Substrats in der Hydrolyse- und Versäuerungsstufe muss kürzer sein als die Generationszeit der im System aktiven acetogenen und methanogenen Bakterien, um die Etablierung einer stabilen Population dieser Bakterien in der Hydrolyse- und Versäuerungsstufe zu verhindern.

Definition: Hydrolyse- und Versäuerungsstufe

Als Hydrolyse- und Versäuerungsstufe wird in Abgrenzung gegenüber anderen Vorstufen ein Reaktor bezeichnet, der vom Planer oder Hersteller installiert wurde, um die Phasen der Hydrolyse und der Versäuerung räumlich möglichst weitgehend von der nachfolgenden Aceto- und Methanogenese zu trennen.

3. Die "Philosophie" der Hydrolysestufe

3.1 Vorteile

Für die Realisierung von Biogasanlagen, die mit zwei oder mehr seriell geschalteten Reaktoren ausgestattet sind, sprechen folgende Gründe:

1. Schaffung von Puffervolumen und/oder Vergleichmäßigung der Zulauftrate und der Zusammensetzung des Substrates, des Abwassers oder des Bioabfalls
2. Anmischung von Substraten mit hohem Feststoffanteil in einer vorgeschalteten Stufe
3. Aufheizung der Substrate auf die angestrebte Fermentationstemperatur
4. Hygienisierung des Substrats (Bioabfallvergärung)
5. Erweiterung des Anlagenvolumens durch Hinzufügung eines weiteren Reaktors zur Entlastung der bestehenden Anlage (z. B. in der Form eines Haupt- und Nachgärersystems) oder zur Nutzung des Kaskadeneffektes
6. Etablierung von 2 bioprozesstechnischen Phasen (Hydrolyse- und Versäuerungsstufe einerseits sowie Methanstufe andererseits) mit dem Ziel, die Prozesseffizienz zu erhöhen

Während die unter (1) bis (5) aufgeführten Punkte hier nicht eingehend diskutiert werden sollen, ist Punkt (6) höchst umstritten. Die bioprozesstechnische Effizienz wird daher in den folgenden Kapiteln detaillierter betrachtet.

3.2 Nachteile

Ein nicht von der Hand zu weisender Nachteil der Hydrolyse- und Versäuerungsstufen sind ihre Investitionskosten. Ob die Vorstufen zusätzlich durch höhere Betriebskosten gekennzeichnet sind, ist umstritten und wurde auch im Rahmen der hier beschriebenen Studie nicht untersucht. Anspruchsvoll ist die rühr- und pumpentechnische Beherrschung der Vorstufe. Die Verfasser wurden Zeugen mehrerer Havarien, die durch nicht mehr beherrschbare Schwimmschichten verursacht wurden. Der Schlüssel zum Erfolg liegt in der Rührtechnik. Dies wird in den Empfehlungen kurz erläutert.

Der wesentliche Nachteil offener Vorstufen liegt in den Emissionen, die in die Atmosphäre gelangen. Dieses Thema steht im Mittelpunkt der folgenden Erläuterungen.

3.3 Rezirkulation und ihre Folgen

Das Anmischen schüttbarer Substrate in Vorstufen landwirtschaftlicher Biogasanlagen macht die Nutzung von Rezirkulaten erforderlich, wenn das Volumen der verfügbaren Gülle nicht ausreicht. Dies trifft für alle sechs untersuchten Vorstufen zu: Mit Trockenmasse- (TM-) Konzentrationen von 15-38 % sind die Substrate ohne Anmischung mit TM-ärmeren Stoffströmen nicht rühr- und pumpbar (Tabelle 2).

Tabelle 2: Betriebsdaten und Messergebnisse zur Rezirkulation von Fermenterhalten oder Gärrest in den 6 untersuchten BGA

BGA-Nr	Masseanteil schüttbarer Substrate (%)	TM des Substrat-Gemischs ohne Rezirkulat (berechnet) (%)	Rezirkulat-/Substrat-Quotient	Herkunft des Rezirkulats	TM des Substrat-Gemischs mit Rezirkulat (berechnet) (%)	TM des Substrat-Gemischs mit Rezirkulat (gemessen) (%)
2	62	26	1,8	NG, GRL	13	9,8
3	100	38	3,4	GRL, Separator	13	15
12	35	20	1,4	GRL	12	11
16	36	18	2,5	NG	9,5	9,5
17	58	24	0,75	NG	16	15
18	34	15	2,5	GRL	8,9	(4,0)*

NG: Nachgärer; GRL: Gärrestlager; * nicht repräsentative Probe

Die Rezirkulation wird von den Betreibern so eingestellt, dass in der (ersten) Vorstufe unter Berücksichtigung der mikrobiellen Abbauvorgänge TM-Konzentrationen von 10-15 % zu bewältigen sind. Wie die Ortstermine gezeigt haben, ist auch dies noch eine verfahrenstechnische Herausforderung. Vor allem das Untermischen der aufschwimmenden Feststoffe benötigt viel Zeit.

Die Rezirkulation führt kontinuierlich acetogene und methanogene Bakterien in die Anmaischer und/oder Hydrolysestufen zurück, die sich aufgrund der kurzen hydraulischen Verweilzeiten in diesen Vorstufen ohne Rezirkulation nicht halten könnten, da ihre Wachstumsraten zu gering sind. Die konsequente Phasentrennung von Hydrolyse und Versäuerung einerseits und Acetogenese und Methanogenese andererseits, wie sie zahlreichen Forschungsarbeiten zugrunde gelegt wurde, wird in der landwirtschaftlichen Praxis durch die Rezirkulation aufgegeben. Stattdessen nehmen die Hydrolysestufen, was relevante bioprozesstechnische Bedingungen angeht (pH-Wert, Temperatur, Populationszusammensetzung), weitgehend den Charakter von Methanstufen an. So kann unter günstigen Lebensbedingungen für acetogene und methanogene Bakterien mit messbaren Umsetzungen dieser Organismen gerechnet werden, also mit Methanbildung.

Mikrobielle Population der Anmaischer und der Hydrolysestufen

Die Bakterienpopulation der Vorstufen setzt sich zusammen aus den über die Substrate sowie das Rezirkulat eingetragenen Bakterien. Aufgrund der hohen Rezirkulationsraten sind die Vorstufen durch Populationszusammensetzungen gekennzeichnet, die denen der Methanfermenter, Nachgärer und Gärrestlager sehr ähnlich ist. Spezifische Ausprägungen der acidogenen Populationen sind aufgrund dieser Überlagerung nicht erkennbar. Auch ein Einfluss der Substrate, der Jahreszeit oder Vorstufenfunktion (Anmaischer oder Hydrolyse/Versäuerung) auf die Populationszusammensetzung ist nicht erkennbar. Sichtbar sind dagegen ungleichmäßige Dosierungsraten, die zu variablen Populationszusammensetzungen führen sowie die fest/flüssig-Separation des Gärrests, die zu einer Verringerung des Anteils methanogener Bakterien an der Gesamtpopulation führt.

Die kurzen hydraulischen Verweilzeiten der Vorstufen verhindern allerdings die vollständige Umsetzung der Substrate und Zwischenprodukte zu Methan und Kohlendioxid, so dass die Säurekonzentrationen hoch sind, die pH-Werte der Maischen (mit Ausnahmen) im leicht sauren Bereich liegen und die Methankonzentrationen im Vergleich zu denen der Methanstufen niedrig sind. Dies wird im folgenden Kapitel dargestellt.

4. Biogase und Emissionen der Vorstufen

4.1 Phase I: Betriebsdatenauswertungen für 20 Biogasanlagen

In einer ersten Phase der Untersuchung von landwirtschaftlichen Biogasanlagen wurden aus dem deutschen Bestand landwirtschaftlicher Biogasanlagen zunächst 20 Biogasanlagen für einen Ortstermin mit dem Betreiber sowie für eine Betriebsdatenauswertung ausgewählt. Die auf der Basis der Betriebsdaten berechneten relativen Methanerträge (bezogen auf KTBL-Richtwerte, KTBL, 2015) der zweiphasigen BGA reichten von 76 bis 108 % (Sonderkonstruktionen nicht berücksichtigt). Wie zu erwarten war, besteht ein signifikanter Zusammenhang zwischen hydraulischer Verweilzeit bzw. organischer Raumbelastung und dem Methanertrag. (Abbildung 4).

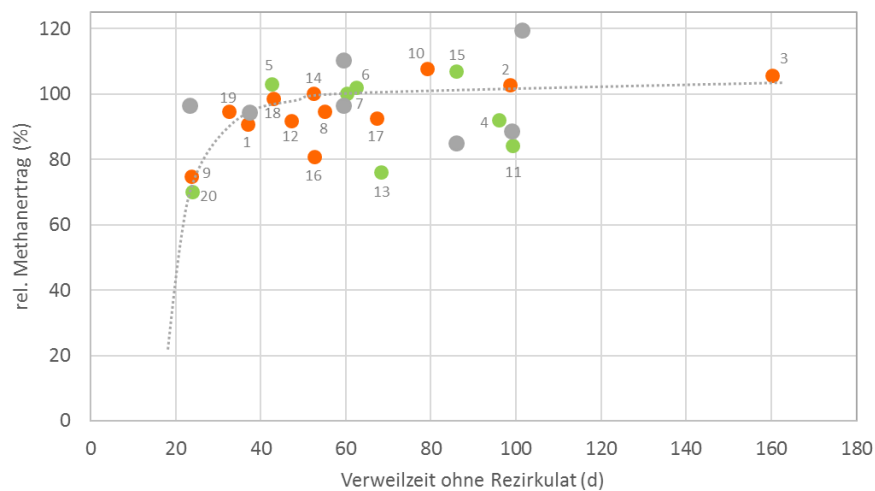


Abbildung 4: Abhängigkeit der relativen Methanerträge (bezogen auf KTBL 2015) der untersuchten Biogasanlagen von der Substratverweilzeit (grün: zweiphasige BGA mit gasdichter Vorstufe; orange: zweiphasige BGA mit nicht gasdichter Vorstufe (Daten dieser Studie); grau: einphasige BGA (Daten: Cordes+Winterberg))

Übereinstimmend mit anderen vergleichenden Untersuchungen (FNR, 2009) kann abgeleitet werden, dass hydraulische Verweilzeiten im Fermentationssystem (ohne Gärrestlager) unterhalb von 50 Tagen und oTM-Raumbelastungen von mehr als 3 kg oTM/m³ d (nicht dargestellt) zu einer signifikanten Reduzierung des Methanertrags führen. Ein signifikanter Effizienzunterschied zweiphasiger und einphasiger Biogasanlagen (deren Leistungsdaten den Datenbanken der Autoren entnommen wurden) und auch zwischen zweiphasigen BGA mit oder ohne gasdichten Abschluss der Vorstufe ist nicht erkennbar.

Die Ortstermine zeigten, was die Zufriedenheit der Betreiber mit ihrer Vorstufe betrifft, ein heterogenes Bild (Abbildung 5, links). Als vorteilhaft wurden folgende Aspekte empfunden:

1. spürbar erhöhter Methanertrag (vor allem BGA 1 und 3)
2. geringe Wartungskosten durch geringe Abrasion der Anmaischer (vor allem BGA 16) im Vergleich zu Schneckensystemen und anderen Direktzufuhrsystemen
3. Absetzer-Funktion der Vorstufe (Steine, Metallteile)

Als wesentliche Kritikpunkte wurden genannt:

1. hohe Kosten der Vorstufe ohne erkennbare Effizienzsteigerung; Dieser Punkt führte in einigen Fällen zur "Degradierung" der Hydrolyse- und Versäuerungsstufe zum Güllepuffer
2. Gasverluste offener Stufen; Einige Betreiber ließen offene Stufen daher gasdicht abdecken
3. Als anspruchsvoll zeigte sich bei zahlreichen vor-Ort-Terminen die Einbringung der schüttbaren Substrate in die Maische. Vor allem schnell laufende Propellerrührwerke zeigten wenig Wirkung. Mehrere Betreiber ließen während der Studienlaufzeit derartige Rührer gegen langsam laufende Rührwerke (Langsamläufer mit Propeller oder Paddelrührwerke mit horizontaler Achse) austauschen. Dieser Austausch erhöhte- beurteilt auf Basis der Beobachtung des Mischvorgangs - in allen Fällen die Durchmischungseffizienz.

Nur 11 der 18 Vorstufen (BGA mit integrierter H+V-Zone wurden in diesem Zusammenhang ausgenommen) waren bis zum Zeitpunkt der Untersuchung nicht wesentlich verändert worden. Drei Stufen waren vor Beginn der Studie wesentlich erweitert oder nachträglich errichtet worden. Ebenfalls jeweils drei H+V-Stufen waren wieder außer Betrieb genommen oder nachträglich gasdicht abgedeckt worden (Abbildung 5, rechts).

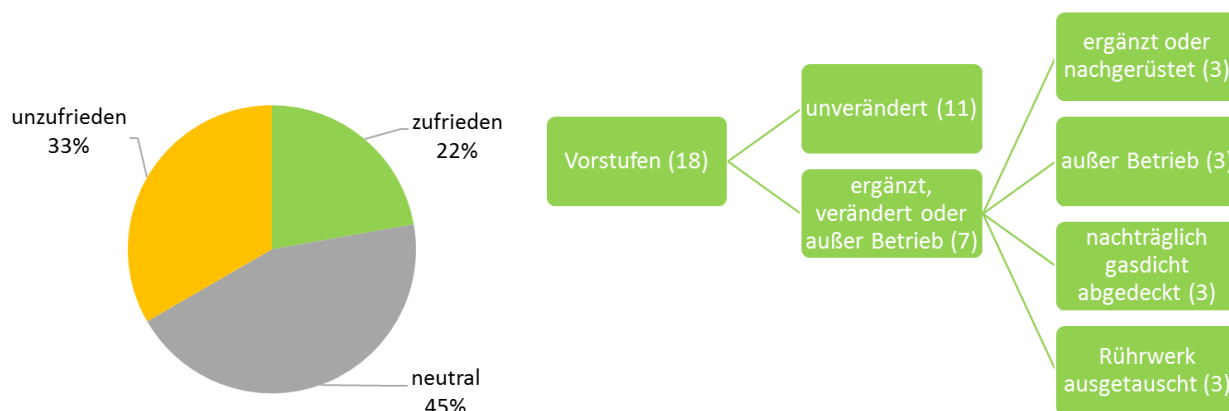


Abbildung 5: Beurteilung der Anmaischer und H+V-Stufen durch ihre Betreiber (n=18, links) und prozesstechnische Anpassungen im Bereich der Vorstufen vor oder während der Untersuchung (n=18/Mehrfachnennungen möglich, rechts)

Unterlagen der Planer oder Hersteller mit Aussagen zur bioprozesstechnischen Leistungsfähigkeit der H+V-Stufen lagen in keinem der untersuchten Fälle vor. Auch Untersuchungen der Betreiber zur Prozesseffizienz waren eine seltene Ausnahme. Zu den bioprozesstechnischen Leistungen der Vorstufen der 20 BGA der Phase I der Feldstudien sind daher keine vergleichenden Aussagen möglich.

Die Untersuchungen der ersten Phase Felduntersuchungen zeigen deutlich, dass sowohl die H+V-Stufen als auch die Anmaischer noch nicht generell als ausgereift bezeichnet werden können. Auslegung und Betrieb erfolgen in der Regel vorwiegend empirisch.

4.2 Phase II: Emissionsmessungen an 6 Biogasanlagen

4.2.1 Untersuchte Biogasanlagen

Unter Berücksichtigung der Ergebnisse der Ortstermine und der Betriebsdaten der 20 BGA der Phase I der Fallstudien wurden für die experimentellen Untersuchungen sechs Biogasanlagen ausgewählt, die eine große Vielfalt hinsichtlich der Art der Vorstufe (Anmaischer oder Hydrolysestufe), der Hersteller und der Substratmischung abbildeten. Auch die Zufriedenheit der Betreiber mit der Funktion der Vorstufe deckte das gesamte denkbare Spektrum ab. Alle ausgewählten BGA waren mit mindestens einer nicht gasdichten Vorstufe ausgestattet (Tabellen 3 und 4).

Tabelle 3: Übersicht der untersuchten landwirtschaftlichen Biogasanlagen

BGA Nr.	elektrische Leistung (kW _{el})	Haupt-Substrate (auf Basis der Masse)	Anlagen-konfiguration	gesamtes Fermentations-volumen (m ³)
2	920	Maissilage Schweinegülle Rindergülle	1 Hydrolyse 2 Fermenter 1 Nachgärer 1 GRL (gasdicht)	7.100
3	510	Maissilage Grassilage	1 Anmaischer 1 Hydrolyse 1 Fermenter 1 Nachgärer 1 GRL (gasdicht)	3.600
12	380	Rindergülle Maissilage	1 Hydrolyse 1 Fermenter 1 GRL	1300
16	740	Rindergülle Maissilage Grassilage	1 Anmaischer 1 Hydrolyse 1 Fermenter 1 Nachgärer 1 GRL	5.100
17	760	Rindergülle Maissilage Grassilage	1 Anmaischer 1 Hydrolyse 1 Fermenter 1 Nachgärer 1 GRL (gasdicht)	4.000
18	600	Schweinegülle Maissilage Grassilage	1 Hydrolyse 1 Fermenter 2 GRL (gasdicht)	2.900

GRL: Gärrestlager

Tabelle 4: Übersicht der Vorstufen der 6 zur experimentellen Untersuchung ausgewählten Biogasanlagen

BGA Nr.	Art der Vorstufe (A: Anmaischer, H: Hydrolyse)	Temperatur (°C)	Flüssigkeitsverweilzeit Substrat+Rezirkulat (d)	oTM-Raumbelastung (kg/m ³ d)	pH	Rezirkulat-/Substrat-Verhältnis	Herkunft des Rezirkulats	Rührertyp (L: Langsamläufer; S: Schnellläufer)	Belüftung
2	H	35 ± 4	0,9	85	6,3 ± 0,5	1,8	GRL (Sommer) NG (Winter)	L, S	ja
3	A	33 ± 5	1,6	53	6,9 ± 0,5	3,4	GRL (Separator)	L	ja*
	H	32 ± 4	2,6 ²	32 ²	6,4 ± 0,6			L	ja
12	H	33 ± 6	2,1	34	6,1 ± 0,4	1,4	GRL	S	nein
16	A	35 ± 3	0,32	150	7,0 ± 0,2	2,5	NG	S → L	nein
	H ¹	36-42	0,55 ²	85 ²	6,9			S	nein
17	A	36 ± 3	1,3	98	6,9 ± 0,4	0,75	NG	S → L	nein
	H	40	1,8 ²	69 ²	7,1			S	ja
18	H	30 ± 3	1,0	50	6,4 ± 0,2	2,5	GRL	S	nein

NG: Nachgärer

GRL: Gärrestlager

¹ ohne Prozesssteuerung (Temperierung, Belüftung)

² Substratabbau in der Hydrolyse- und Versäuerungsstufe nicht berücksichtigt

* Option nicht genutzt

Im Verlauf von 5 Messkampagnen, die jeweils zwischen April und Dezember der Jahre 2015 bis 2017 stattfanden, wurden flüssige Fermenterinhalt und Biogase untersucht. Die Untersuchungsergebnisse werden in den folgenden Kapiteln erläutert und diskutiert.

➤ Messtechnik: Biogasuntersuchungen an offenen Vorstufen

Die Untersuchung der Biogasbildung offener Vorstufen erfolgte an 6 Biogasanlagen, die mit offenen Anmischern und Hydrolysestufen ausgestattet waren. Das Biogas der offenen Vorstufen wurde durch einen 100 l-Gassammler (Sonderanfertigung, ttz Bremerhaven) aufgefangen, der auf die Flüssigkeitsoberfläche der Maischen aufgesetzt wurde. Das aufgefangene Gas wurde über einen Trommelgaszähler geleitet. Nach Abschluss der Gasflussmessung wurde die Gasuhr durch ein Biogas-Feldmessgerät ersetzt, mit dem die Biogaszusammensetzung ermittelt wurde. Für jede Anlage wurde außerdem die Wasserstoffkonzentration der Biogasproben bestimmt. Dazu wurde nach der qualitativen Biogasuntersuchung Biogas in Gasbeuteln gesammelt und im Labor des Deutschen Biomasseforschungszentrums gaschromatografisch untersucht.

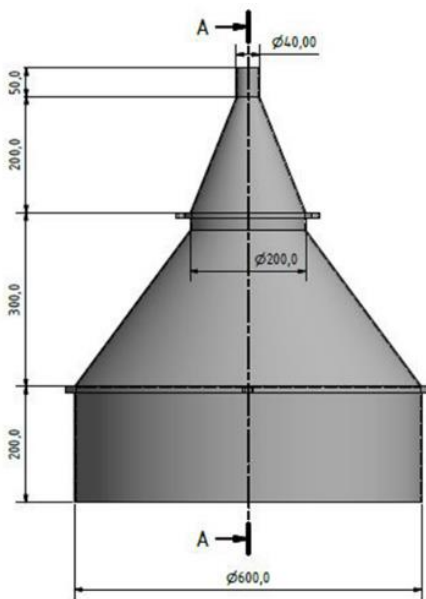


Abbildung 6: Querschnitt des Gassammlers (links) und Gassammler im Einsatz an einer offenen Vorstufe (CAD-Zeichnung: ttz Bremerhaven 2016)

4.2.2 Methanemissionen

Was bereits die Blasenbildung der Maischen angezeigt hatte, wurde durch die Untersuchungen bestätigt: Alle untersuchten Anmischer und H+V-Stufen emittierten Biogase in erheblichem Umfang. Diese setzten sich vor allem aus Kohlendioxid und Methan zusammen. Die mittleren Methankonzentrationen der trockenen Biogase lagen im Bereich von 13,8 % bis 24,3 %. Wasserstoff spielte dagegen mit Konzentrationen von 0,018 bis 0,91 % eine untergeordnete Rolle (Tabelle 5).

Tabelle 5: Zusammensetzung der Biogase (feucht) der untersuchten Anmaischer und Hydrolysestufen

BGA Nr.	Art der Vorstufe	Biogaszusammensetzung (trocken)			Methanbildungsrate (feucht) (m ³ /m ³ d)
		Methan (%)	Kohlendioxid (%)	Wasserstoff ppm	
2	H	16,0	83,9	731	0,71
3	A	13,8	85,3	9.060	1,32
	H	21,1	78,4	4.510	0,51
12	H	16,3	83,6	348	0,35
16	A	20,3	79,3	3.200	1,37
17	A	24,3	75,6	687	0,87
18	H	16,5	83,3	183	0,79

Dieser Befund weicht von den Ergebnissen zahlreicher Technikumsuntersuchungen zur Hydrolyse und Versäuerung landwirtschaftlicher Substrate ab, die vor allem Wasserstoff als energiereiche Komponente des Biogases beschrieben haben (Preißler et al., 2008, Lindner et al., 2015). Die Bildung eines methanreichen Biogases ist auf die hohen Rezirkulationsraten der untersuchten Biogasanlagen zurückzuführen (Tabelle 2).

4.2.3 Einfluss des Vorstufenvolumens auf den Methanverlust

Die relativen Methanverluste der 6 untersuchten Biogasanlagen liegen im Bereich zwischen 2,4 und 6,2 % des im BHKW verstromten Methans. Mit einer Emission von 11 % des verstromten Methans und zwei seriell betriebenen offenen Vorstufen bildet die BGA 3 eine Ausnahme. Gut erkennbar ist die Korrelation des relativen Methanverlustes mit dem Anteil offener Stufen am gesamten Reaktorvolumen (Abbildung 7).

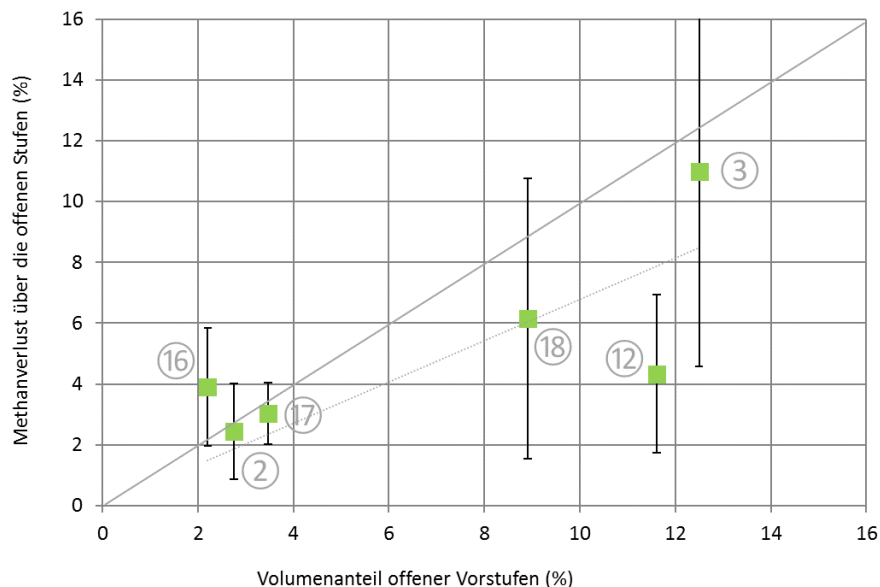


Abbildung 7: Zusammenhang zwischen dem relativen Methanverlust (bezogen auf das verstromte Methan) und dem Volumenanteil offener Stufen am gesamten Reaktorvolumen (gasdicht geschlossene Vorstufen, Haupt- und Nachgärer) der untersuchten Biogasanlagen (gekennzeichnet entsprechend ihrer Nummern)

Über den dargestellten Zusammenhang hinaus haben weitere Faktoren Einfluss auf die Methanemissionen der offenen Vorstufen. Dazu gehören die Substratzusammensetzung, der pH-Wert, die Temperatur, die Rezirkulationsrate, Art und Aufbereitung des Rezirkulats. Ihr Einfluss tritt jedoch gegenüber dem Volumenanteil der offenen Stufen zurück. Einen starken Einfluss hat dagegen die Durchmischung der Maische.

4.2.4 Einfluss der Rührwerksaktivität auf die Biogasfreisetzung

Es ist bekannt, dass die Rührwerksaktivität die Biogasfreisetzung sehr stark beeinflusst. Daher wurde in einer mit zwei Tauchmotorrührwerken ausgestatteten offenen Hydrolysestufe (Biogasanlage 18) eine 6-stündige Emissionsmessung mit der in Kapitel 4.2.1 beschriebenen Technik durchgeführt. Die Biogasemissionen im Bereich des Rührwerks unterlagen während dieser Messung starken Fluktuationen (Tabelle 7, Abbildung 8). Signifikant ist der Einfluss der Rührwerksaktivitäten auf die Höhe der Emissionen. Deutlich erkennbar ist, dass die Methanemissionen nach dem Abschalten der Rührwerke innerhalb von 5-8 Minuten im Durchschnitt auf ca. 1/3 der mittleren täglichen Methanemissionsrate reduziert wurde. Nach dem Einschalten der Rührwerke kam es mit einer Verzögerung von ca. 1-3 Minuten zu einem signifikanten Anstieg der Methanemissionen.

Tabelle 6: Methanemissionen der Hydrolyse- und Versäuerungsstufe der BGA 18 am 15.09.2016 unter verschiedenen Betriebsbedingungen (gemessen am Schacht des Rührwerks 201)

Taktfrequenz der Rührwerke	Mittlere Methanemission der Gesamtmessung	mittlere Methanemission während der 30-minütigen Durchmischungen	mittlere Methanemission vor Beginn der periodischen Durchmischungen
	m ³ /H+V d	m ³ /H+V d	m ³ /H+V d
2 min ein/8 min aus (vormittags)	328	405	86
2 min ein/5 min aus (nachmittags)	298	367	116
ganztags	317		

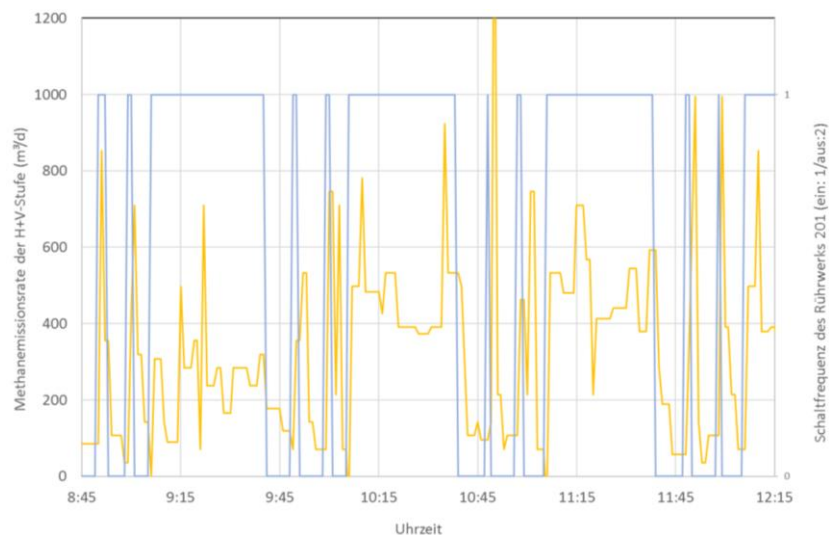


Abbildung 8: Methanemissionen am Schacht des Rührwerks der H+V-Stufe der Biogasanlage 18 am 15.09.2016 im Zeitraum von (8:45 bis 12:15 Uhr). In diesem Zeitraum wurde das Rührwerk im Wechsel 2 Minuten ein- und 8 Minuten ausgeschaltet (blaue Linie; die Ziffer 1 markiert die Einschaltung, die Ziffer = die Ausschaltung). Jeweils zur vollen Stunde wurde, parallel zur Substratdosierung, das Rührwerk ca. 33 Minuten lang betrieben. Die Methanemissionsrate ist als gelbe Linie dargestellt.

4.3 Wirtschaftliche Bewertung der Methanverluste

Die wirtschaftliche Bedeutung der Emissionen der Vorstufen ist erheblich: Geht man von der Verstromung des Methans mit einem durchschnittlichen elektrischen Wirkungsgrad von 40 %, 8.000 Betriebsstunden/Jahr und einer durchschnittlichen Vergütung des eingespeisten Stroms von 0,20 €/kWh aus, verursachen die Methanemissionen der offenen Stufen im Bereich von 2-11 % des verstromten Methans Erlösminderungen von ca. 20.000-100.000 €/Jahr (Wärmeerlöse nicht berücksichtigt). Diese Summe steht zur Finanzierung eines gasdichten Abschlusses der offenen Stufen zur Verfügung.

Die allgemeingültige Wirtschaftlichkeitsberechnung einer nachträglich realisierten gasdichten Abdeckung ist aufgrund der Vielfalt der Systeme, des Fehlens der Informationen zu den materialtechnischen und statischen Rahmenbedingungen und aufgrund fehlender Referenzen kaum möglich. Dennoch kann angesichts von Gesamtkosten einer offenen Hydrolysestufe von ca. 100.000 – 120.000 € (ohne Planungs- und Finanzierungskosten, Betreiberdaten BGA 14) davon ausgegangen werden, dass eine nachträgliche gasdichte Abdeckung mit einem Gesamtkostenaufwand von nicht mehr als 125.000 € realisierbar sein sollte (Tabelle 7).

Tabelle 7: Wirtschaftlichkeitsabschätzung für die Nachrüstung einer gasdichten Vorstufenabdeckung

Komponenten	Kosten inkl. Montage (€, netto)
Planung und Genehmigung	10.000
Betondecke	20.000
2 Rührwerke für die Deckenmontage	40.000
Anpassung der Substratdosierung (Stopfschnecke) gasführendes System	15.000
Finanzierung	25.000
<i>Gesamtkosten</i>	<i>125.000</i>

Im Falle einer Restlaufzeit von 10 Jahren stehen dann, grob geschätzt, jährliche Kosten in Höhe von 12.500 € Mehreinnahmen in Höhe von 20.000-100.000 € (s. o.) gegenüber. Das Ergebnis ist daher eindeutig: Eine Nachrüstung kann sich, sofern sie technisch machbar ist, rechnen. Entscheidende Faktoren sind der relative Methanverlust vor dem Repowering und die Restlaufzeit der Anlage.

4.4 Methanemissionen der Vorstufen vor dem Hintergrund des Klimaschutzes

Die Auswertung der Messung der Biogasbildungsraten der 6 untersuchten Vorstufen landwirtschaftlicher Biogasanlagen hat gezeigt, dass ein Methanvolumen emittiert wurde, das 2,4-11 % des im BHKW verwerteten Methans entspricht. Der mittlere Anteil des emittierten Methans lag bei 5,1 % des im BHKW verwerteten Methans.

Methan wird nicht nur durch offene Vorstufen, sondern auch durch Substratlagertanks, Überdruckventile, offene Gärrestlager, Leckagen und den BHKW-Schlupf emittiert. Diese Emissionen wurden in der Fachliteratur beschrieben (Liebetrau et al., 2013, Reinelt et al., 2016).

Tabelle 8: Mittlere Methanemissionen einzelner Komponenten und Prozessstufen landwirtschaftlicher Biogasanlagen: Vergleich von Literaturdaten mit den Ergebnissen des Verbundprojekts AcEta

Prozessstufe	mittlere relative Methanemission (%) *	Informationsquelle
Silagelagerung	0,00069	Liebetrau et al., 2013
Substratlagertank	0,091	Liebetrau et al., 2013
Beschickung	0,086	Liebetrau et al., 2013
Mischbehälter	0,14	Liebetrau et al., 2013
offene Anmaischer und Hydrolysestufen	4,0 (5,1)**	Projekt AcEta
Fermenter mit Folienabdeckung	0,0065	Liebetrau et al., 2013
Überdrucksicherung	0,06 / 3,6-3,9	Reinelt et al., 2016
Separator	0,07	Liebetrau et al., 2013
Gärrückstandslager	3,5	Liebetrau et al., 2013
BHKW	1,7	Liebetrau et al., 2013

* Bezug: emittiertes Methanvolumen in Relation zum energetisch genutzten Methanvolumen

** BGA 3 mit zwei offenen Vorstufen nicht berücksichtigt (in Klammern: BGA 3 berücksichtigt)

Aus Sicht der Statistik besteht sicherlich die Notwendigkeit, die zurzeit verfügbaren Daten zu den Methanemissionen zu vertiefen und zu ergänzen. Dennoch machen die vorliegenden Daten die wesentlichen Emissionsquellen landwirtschaftlicher Biogasanlagen deutlich erkennbar: Die offenen Vorstufen tragen wesentlich zu den Methanemissionen einer Biogasanlage bei. Die Bewertung dieser Ergebnisse aus Sicht des Klimaschutzes sollte aber berücksichtigen, dass nur ca. 12 % der deutschen landwirtschaftlichen Biogasanlagen mit offenen Vorstufen ausgestattet sind.

4.5 Betriebssicherheit und Arbeitsschutz

Im Bereich offener Vorstufen können Risiken auftreten, die für Biogasanlagen im Allgemeinen typisch sind und die daher im einschlägigen Sicherheits- und Arbeitsschutzregelwerk berücksichtigt worden sind. Unterschätzt werden allerdings die Gefahren, die durch die gasförmigen Emissionen offener Vorstufen verursacht werden können. Dies sind vor allem:

1. Explosion eines zündfähigen Gemischs
2. Toxische Wirkung des Biogases, vor allem des Schwefelwasserstoffs
3. Erstickungsgefahr durch Kohlendioxid
4. Infektionsrisiken durch Mikroorganismen (*biologische Arbeitsstoffe*) in Aerosolen

Unfälle, die den oben genannten Risikobereichen zugeordnet werden müssen, sind den Autoren der vorliegenden Studie zwar nicht bekannt, doch sollten vor allem Unwägbarkeiten im Bereich des Explosionsschutzes näher betrachtet werden, da im Falle der Nichtbeachtung dieses Risikos fatale Folgen ausgelöst werden könnten.

Die typischen Biogase offener Vorstufen, die sich in der Regel deutlich vom Biogas der Hauptfermenter, Nachgärer und Gärrestlager unterscheiden, sind bislang von den Regelungen zum Explosionsschutz bestenfalls am Rande behandelt worden. Dies steht im Widerspruch zur weiten Verbreitung offener Vorstufen. Die Bundesanstalt für Materialprüfung (BAM) hat verschiedene Gasgemische, die auch Methan und/oder Wasserstoff enthielten, hinsichtlich der unteren und der oberen Explosionsgrenzen untersucht (Schröder, 2002, 2013). Die Explosionsgrenzen der Methan/Kohlendioxid/Luft-Gemische hängen wesentlich von den Konzentrationen der einzelnen Gase ab. Diese wurden im Rahmen der Versuche der BAM auf Biogase der Fermenter,

Nachgärer und Gärrestlager abgestimmt, so dass hinsichtlich der Explosionsgrenzen der Methan/Kohlendioxid/Luft-Gemische der Vorstufen erhebliche Unsicherheiten bestehen.

Tabelle 9: Vergleich der Zusammensetzung von trockenen Biogasen der 6 untersuchten Vorstufen und der Methanstufen ("Fermenter")

	Einheit	Biogase der untersuchten Vorstufen	Biogase der Fermenter*
Methan	Vol.-%	14-24	45-75
Kohlendioxid	Vol.-%	76-85	25-55
Methan/Kohlendioxidverhältnis	-	14/86 – 24/76	45/55 – 75/25
Wasserstoff	ppm	180-9.100	< 10.000 (meist 200-2.000)
Schwefelwasserstoff	ppm	130-890	20 – 20.000

* Scholwin 2009; ergänzt

Immerhin sind für Methan/Kohlendioxid-Gemische in Luft Ergebnisse veröffentlicht worden (Molnarne, 2007, KAS 2009), die zeigen, dass auch Biogase mit einem geringen Methan- und einem hohen Kohlendioxidanteil in bestimmten Mischungsverhältnissen mit Luft explosionsfähig sind. So sind Biogase der Vorstufen mit einem typischen Methan/Kohlendioxidverhältnis von ca. 30/70 bis 20/80 explosionsfähig, wenn die Methankonzentration im Biogas/Luft-Gemisch bei ca. 5-9 % liegt (Molnarne, 2007).

Diese Daten zeigen, dass im Umfeld offener Vorstufen mit dem Auftreten explosiver Gasgemische gerechnet werden muss. Diese Auffassung wurde auch durch die *Kommission für Anlagensicherheit* vertreten (KAS 2009). Ergänzungen des Regelwerks sind daher erforderlich.

5. Bioprozesstechnische Effizienz der Hydrolyse- und Versäuerungsstufe

Neben der Frage, ob und in welchem Umfang energiereiche Biogase emittiert werden, war zu klären, ob die Hydrolyse- und Versäuerungsstufen ihre namensgebende Funktion effizient erfüllen.

5.1 Effizienz der Hydrolyse: kein Abbau der "Rohfaser"

Im Zentrum der Untersuchungen und Recherchen, die zur Untersuchung der Bioprozesseffizienz durchgeführt wurden, stand die Frage, ob die Hydrolysestufen die Effizienz des Faserstoffabbaus erhöhen – denn die Beschleunigung des Abbaus der "Rohfaser" ist häufig das entscheidende Motiv des Baus einer Hydrolysestufe.

Für keine der sechs untersuchten Biogasanlagen konnte allerdings mit Hilfe einer Weender-Stoffgruppenanalyse eine signifikante "Rohfaser"-Hydrolyse nachgewiesen werden. Dieses Ergebnis überrascht nicht, da die in der Fachliteratur veröffentlichten Reaktionsgeschwindigkeitskonstanten der Feststoffdesintegration und der Cellulosehydrolyse sehr deutlich zeigen, dass angesichts der sehr kurzen Substratverweilzeiten der Vorstufen von 0,3-2,6 Tagen mit einem signifikanten Abbau von Faserstoffen nicht gerechnet werden konnte. Die Abbildung zeigt außerdem, dass in Methanfermentern mit typischen Verweilzeiten von 30-60 Tagen ein weitgehender "Rohfaser"-Abbau erwartet werden kann.

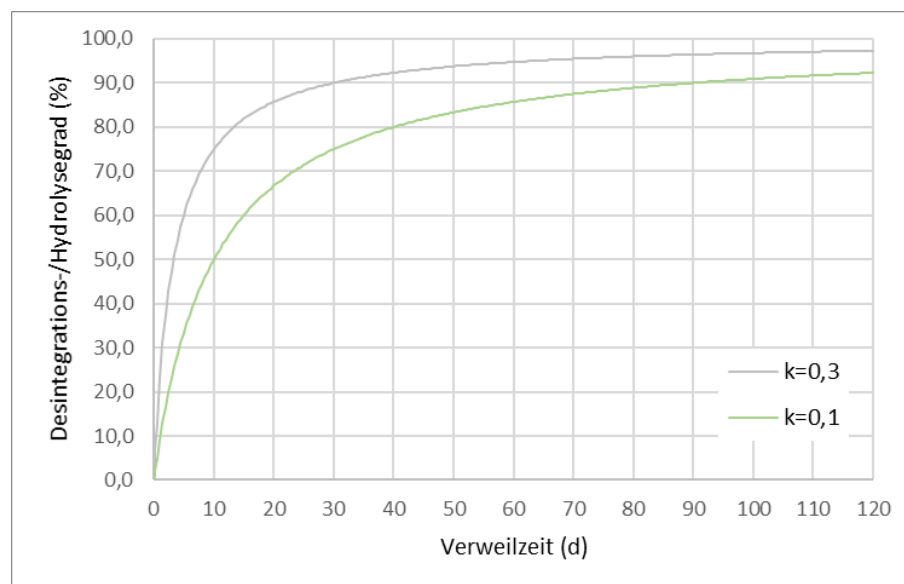


Abbildung 9: Abhängigkeit des Desintegrations- bzw. Hydrolysegrades von der Verweilzeit bei Verwertung von Energiepflanzensilagen oder Cellulose mit einem Reaktionsgeschwindigkeitskoeffizienten von $0,1 \text{ d}^{-1}$ bzw. $0,3 \text{ d}^{-1}$. Berechnung nach dem Modell von Eastman und Ferguson (1981), dem eine Reaktion erster Ordnung zugrunde liegt. Das Modell berücksichtigt weder die kritische Verweilzeit (die maximale Wachstumsrate der für die Hydrolyse verantwortlichen Bakterien), noch den maximalen Abbaugrad des Substrats (Abbildung: Cordes+Winterberg 2018)

Das Ziel, den geschwindigkeitsbestimmenden Schritt der anaeroben Nahrungskette landwirtschaftlicher Biogasanlagen, die Faserstoffhydrolyse, mit einer separaten, kleinvolumigen Hydrolyse- und Versäuerungsstufe signifikant zu beschleunigen und somit den Gesamtprozess spürbar effizienter zu gestalten, kann also aus kinetischen Gründen nicht erreicht werden. Was die Faserstoffhydrolyse betrifft, tragen Hydrolysestufen ihren Namen also zu Unrecht.

aber, dass eine Erhöhung des Rezirkulat/Substratverhältnis von etwa 3 auf 4 bei dem Substrat Maissilage zu höheren Fettsäurekonzentrationen führte, während bei dem Substrat Grassilage eher ein gegenläufiger Effekt zu erkennen war.

Auch in den Technikumsversuchen wurde bei allen untersuchten Verweilzeiten eine signifikante Biogas- bzw. Methanbildung festgestellt, die gebildete Gasmenge war bei vergleichbarem Methangehalt aber in der Regel bei Grassilage höher als bei Maissilage, insbesondere bei Verweilzeiten über 2 Tagen. Mit steigender Verweilzeit steigt die gebildete Biogas- bzw. Methanmenge erwartungsgemäß weiter an.

Bei einer - für Versäuerungsstufen extremen Verweilzeit von 8 Tagen – wurde für Maissilage Versäuerungsgrade (bezogen auf die oTM des Substrates) von 12 – 70 % ermittelt, während bei gleichen Bedingungen bei Grassilage der Versäuerungsgrad im Bereich von 12 – 29 % lag. Die Konzentration der Fettsäuren in Summe lag bei Maissilage mit 3,5 – 19,7 g/l etwa in der vorgenannten Größenordnung, wohingegen bei Maissilage deutlich niedrigere Fettsäurekonzentrationen (3,3 – 7,7 g/l) gemessen wurden.

Betrachtet man die Ergebnisse der beprobten großtechnischen Anlagen im Kontext der ergänzend durchgeführten Technikumsversuche, so lässt sich schlussfolgern, dass die Versäuerung – zumindest unter Laborbedingungen – durch das Substrat (wenn Monosubstrate betrachtet werden) beeinflusst zu werden scheint.

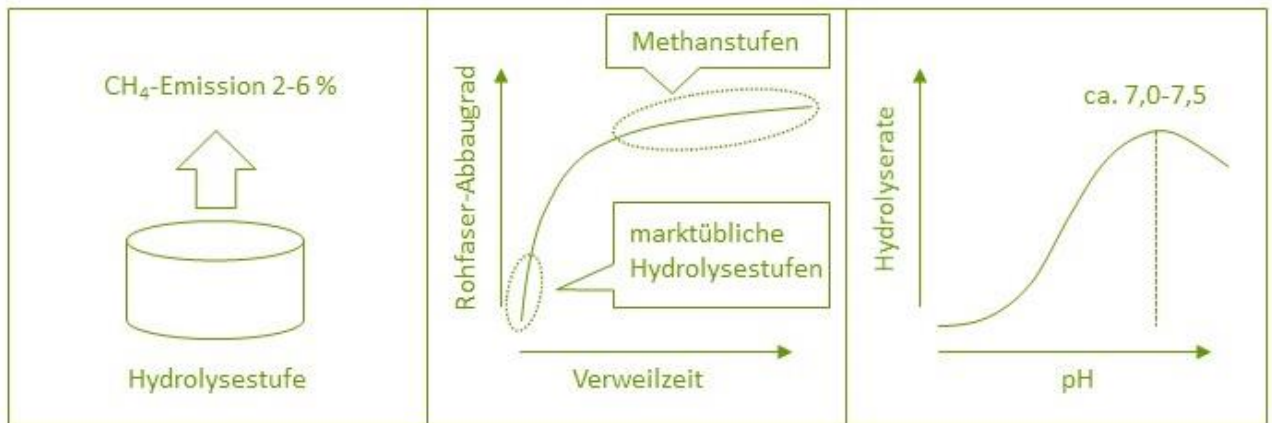
6. Aktualisierte Bewertung von Hydrolysestufen zur Vergärung faserreicher landwirtschaftlicher Substrate

In Kapitel 3.1 sind die Motive der Entscheidung für eine zweiphasige Biogasanlage beschrieben worden. Zahlreiche Gründe sprechen für ein solches System. Das zentrale Argument, mit der Etablierung von 2 bioprozesstechnischen Phasen (Hydrolyse- und Versäuerungsstufe einerseits sowie Methanstufe andererseits) könne die Prozesseffizienz auch für landwirtschaftliche Biogasanlagen erhöht werden (Kapitel 3.1., Punkt 6), war bislang sehr umstritten (Effenberger et al., 2010). Das hier beschriebene Projekt macht folgende Aussagen zu (zum Teil umstrittenen) Fragen möglich:



Verbundprojekt AcEta: Kernaussagen auf einen Blick

1. Die vorliegende Studie stellt die erste Hersteller-unabhängige Untersuchung landwirtschaftlicher Hydrolyse- und Versäuerungsstufen in Deutschland dar. Die ermittelten Betriebsbedingungen der Hydrolyse- und Versäuerungsstufen weichen signifikant von denjenigen ab, die für zahlreiche Labor- und Technikumsstudien zur Hydrolyse und Acidogenese gewählt wurden.
2. Die bioprozesstechnischen Bedingungen der Hydrolyse- und Versäuerungsstufen werden maßgeblich durch die Anmaischerfunktion und ihre Anforderung an die Prozessführung bestimmt. Dies gilt vor allem für die Rezirkulation von Fermenterhalten oder Gärresten.
3. Die Methanemissionen der untersuchten, nicht gasdichten Anmaischer und Hydrolysestufen machten 2,4 bis 6,2 % (in einem Ausnahmefall sogar 11 %) des verstromten Methans aus und sind daher relevant für Betriebswirtschaft sowie Klima- und Arbeitsschutz.
4. Eindeutig konnte gezeigt werden, dass das mit Hydrolysestufen verfolgte Ziel eines verbesserten Abbaus der "Rohfaser"-Fraktion der Substrate nicht erreicht werden kann. Zu kurz sind die hydraulischen Verweilzeiten der marktüblichen Hydrolysestufen, zu langsam erfolgt die Desintegration und Hydrolyse der ungelösten cellulosereichen Komplexe, die analytisch als "Faserstoffe" erfasst werden. Da eine deutliche Verlängerung der Verweilzeit die Vorstufe zum Methanreaktor machen würde, kann – zumindest für konventionelle landwirtschaftlicher Fermentertechnik – kein Lösungsweg aufgezeigt werden. Innovative Verfahren, die auf einer Feststoffrückhaltung in der Hydrolysestufe beruhen, konnten sich am Markt bislang nicht durchsetzen.
5. Die weit verbreitete Auffassung, dass Hydrolyse und Säurebildung optimal bei niedrigeren pH-Werten ablaufen, konnte nicht bestätigt werden: sowohl die Auswertung der Fachliteratur als auch die Ergebnisse der vorliegenden Studie zeigen, dass die Hydrolyse von Kohlenhydratpolymeren, Proteinen und Fetten optimal im pH-Neutralbereich ablaufen. Lediglich einige Bakterien, die gut verwertbare niedermolekulare Kohlenhydrate verwerten, zeigen ein pH-Optimum im leicht sauren Bereich. Die Umsetzung dieser acidogenen Bakterien sind jedoch in der Regel nicht geschwindigkeitsbestimmend für die Gesamtumsetzungen.
6. Der häufiger beobachtete Leistungsvorteil zweiphasiger Biogasanlagen gegenüber einphasigen Systemen dürfte bei vergleichbarem Faulraumvolumen vor allem auf die intensive Homogenisierung des Substratgemischs im Anmaischer und auf den Kaskadeneffekt seriell betriebener Reaktoren zurückzuführen sein.



Insgesamt zeigen die Ergebnisse des Verbundprojekts AcEta, dass die zweiphasige landwirtschaftliche Biogasanlage aus bioprozesstechnischer Sicht einer kritischen Revision unterzogen werden sollte, da wesentliche Vorteile, die ihr zugeschrieben wurden, nicht bestätigt werden konnten. Kostenintensive Maßnahmen der Steigerung der Bioprozesseffizienz - wie Beheizung und Belüftung – sollten daher auf Basis der beschriebenen Zusammenhänge kritisch geprüft werden.

Nicht bezweifelt wird dagegen die Funktion der Vorstufen als Anmaischer. Als solche bewirken sie:

1. das Aufbrechen von großen Feststoffagglomeraten, die – direkt in den Methanreaktor eingebracht – zu langfristigem Aufschwimmen neigen können
2. die intensive Homogenisierung von Substratgemischen
3. eine hydraulische Pufferung, die zur besseren Steuerung der Substratdosierung genutzt werden kann.

Eine Kosten-/Nutzen-Analyse der Installation oder des Betriebs eines Anmaischers müsste Gegenstand einer speziellen Untersuchung sein. Viele Betreiber sind von den genannten Vorteilen überzeugt, und keiner der untersuchten Anmaischer ist bisher außer Betrieb genommen worden.

Die Projektergebnisse dienen der Ableitung der folgenden Empfehlungen.

7. Empfehlungen zur Optimierung der Hydrolysestufe

Vorstufen, die dem Anmischen und/oder der Substrathydrolyse dienen, verursachen zusätzliche Investitionskosten, die durch die Reduzierung von Betriebskosten oder die Erhöhung der bioprozesstechnischen Anlageneffizienz mindestens ausgeglichen werden müssen. Zweifellos sind zweiphasige Biogasanlagen im Vergleich mit eistufigen Systemen durch folgende Vorteile gekennzeichnet:

1. Intensive Homogenisierung der Substratmischung außerhalb des Fermenters und damit gleichmäßigere Substratdosierung sowie Reduzierung der Bildung ungleichmäßiger Schwimmschichten im Fermenter
2. Kaskadeneffekt, der den Direktaustrag nicht vergorenen Materials, die sogenannte "Kurzschlussströmung", signifikant verringert

Ist die Investition bereits erfolgt, ist die Nutzung der Vorstufe – eine effiziente Rührtechnik vorausgesetzt – also sinnvoll. Für bereits realisierte Anmischer oder Hydrolyse- und Versäuerungsstufen bestehen folgende Optimierungsmöglichkeiten:

1. **Gasdichte Ausführung der Vorstufe.** Für zukünftige Biogasanlagen wird eine gasdichte Auslegung der Vorstufen dringend empfohlen, um den Anforderungen der Anlageneffizienz, des Arbeitsschutzes und des Klimaschutzes zu entsprechen. Auch für bestehende, nicht gasdichte Vorstufen kann sich die nachträgliche gasdichte Abdeckung lohnen, sofern der Umbau aus technischer Sicht möglich ist. Wesentlich beeinflusst wird die Wirtschaftlichkeit einer Umbaumaßnahme vom Ausmaß der Methanemission sowie von der Restlaufzeit der Anlage.
2. **Rührtechnik.** Ein Nebenergebnis dieser Studie, das nicht durch systematische Untersuchungen, sondern durch die Beobachtungen während der Messkampagnen an den Großanlagen abgeleitet werden kann, betrifft die Rührwerkstechnik: Es war deutlich erkennbar, dass langsam laufende Propeller- oder Paddelrührwerke eine überzeugende Durchmischungsleistung zeigten, während schnell laufende Propellerrührwerke in den Maischen mit TM-Konzentrationen um 10 % nicht sehr wirksam zu sein schienen, auch nicht in der Form eines Zwangsmischers. Die beobachtete Minder-effizienz dieser Rührwerke konnte von den Anlagenfahrern durch geschickte Handhabung ausgeglichen werden, doch nahm diese viel Zeit und elektrische Energie in Anspruch. Langsam laufende Rührwerke sind daher in Anmischen und Hydrolysestufen der Energiepflanzen-BGA zu bevorzugen.
3. **Rezirkulationsrate.** Zur Anmischung der schüttbaren Substrate landwirtschaftlicher Biogasanlagen reicht die verfügbare Gülle in der Regel nicht aus. Daher muss zusätzlich Fermenter- oder Gärrückstandslager-Inhalt rezirkuliert werden. Je geringer die Feststoff-Konzentration des Rezirkulats ist, desto wirksamer kann die Feststoffkonzentration in der Vorstufe abgesenkt werden. Eine fest/flüssig-Trennung des Rezirkulats ist daher aus bioprozesstechnischer Sicht sinnvoll, muss aber auch unter Berücksichtigung der Investitions- und Betriebskosten bewertet werden. Vor allem im Falle knapp bemessener Gärrestlager lässt sich die optimierte Rezirkulation mit der Reduzierung des Gärrestvolumens verknüpfen.

Die Rezirkulation von Gärrest, also von ausgefaultem Material, verkürzt die Verweilzeit des frisch zugeführten Substrats in der Vorstufe und beeinflusst die Abbaugrade aus kinetischen Gründen negativ. Bakterien, deren minimale Generationszeit oberhalb der Verweilzeit liegt, können sich in der Vorstufe nicht vermehren – sie werden aber, sofern sie in den Methanreaktoren geeignete Lebensbedingungen finden, über das Rezirkulat in die Vorstufe eingetragen. Zudem nähern sich die Kultivierungsbedingungen der Vorstufe mit steigendem Rezirkulat/Substrat-Quotienten denjenigen der Methanstufe an. Dies wirkt sich positiv auf die Substratumsatzraten und -grade aus.

4. **pH-Wert.** Vor allem der durch die Rezirkulation steigende pH-Wert bewirkt nachweisbar erhöhte Umsatzleistungen, da das pH-Optimum aller relevanten heterotrophen Mikroorganismen der Biogasanlage mit Ausnahme der auf gut abbaubaren Substraten wachsenden acidogenen Bakterien im Neutralbereich liegt.

5. **Temperatur.** Offene Vorstufen sollten mit möglichst niedrigen Temperaturen betrieben werden, um Energieverluste durch Methan- (und ggf. Wasserstoff-) Emissionen zu minimieren. Soll die bioprozesstechnische Effizienz gasdichter Vorstufen optimiert werden, gelten die bekannten Temperatur-optima der meso- und der thermophilen Mikroorganismen.
6. **Belüftung.** Einige Planer und Hersteller empfehlen die Belüftung der Hydrolysestufen. Der Effekt der Belüftung wurde in dieser Studie nicht gezielt untersucht, so dass zur Frage der Belüftung keine Empfehlung gegeben wird. Ein signifikanter Effekt der Belüftung war allerdings in den untersuchten Anlagen nicht feststellbar.
7. **Additive.** Dass landwirtschaftliche Biogasanlagen, vor allem im Falle der Verwertung von Energiepflanzen, Spurenelemente benötigen, ist allgemein bekannt. Zur Wirksamkeit weiterer Additive liegen zahlreiche Untersuchungen mit teilweise widersprüchlichen Ergebnissen vor. Das Thema wird in der Branche intensiv und kontrovers diskutiert. Auch die in die Studie eingebundenen Betreiber hatten unterschiedlichste Auffassungen zu diesem Thema. Das Thema wurde im Rahmen der vorliegenden Studie nicht untersucht. Ein Nebenergebnis ist allerdings die Feststellung, dass der Verzicht auf Additive in den untersuchten Vorstufen keine erkennbaren Leistungseinbußen bewirkte.



Abbildung 11: Aspekte zweier beispielhaft ausgewählter Hydrolyse- und Versäuerungsstufen mit nicht gasdichter (links) und gasdichter (rechts) Abdeckung (Fotos: Cordes+Winterberg)

8. Literatur

- EFFENBERGER, M., KISSEL, R., MARÍN-PÉREZ, C., BECK, J., FRIEDRICH, F. 2010. Empfehlungen zu Verfahren der Hydrolyse in der Praxis. Biogas Forum Bayern, Nr. IV – 5/2010, Arbeitsgemeinschaft Landtechnik und landwirtschaftliches Bauwesen in Bayern e. V. (Hrsg.), Freising
- EASTMAN, J. A., FERGUSON, J. F. 1981. Solubilization of Particulate Organic Carbon during the Acid Phase of Anaerobic Digestion. Journal Water Pollution Control Federation, 53, 352-366
- GALLERT C., WINTER, J.: Mikrobielle Grundlagen der Methangärung 2015. In: ROSENWINKEL, K.-H., KROISS, H., DICHTL, N., SEYFRIED, C.-F., WEILAND, P. (Hrsg.). Anaerobtechnik, Berlin, Springer Vieweg.
- KAS 2009. Merkblatt Sicherheit in Biogasanlagen. KAS Kommission für Anlagensicherheit des BMU (Hrsg.), Bonn 2009
- LINDNER, J., ZIELONKA, S., OECHSNER, H., LEMMER, A. 2015. Effect of different pH-values on process parameters in two-phase anaerobic digestion of high-solid substrates. Environmental Technology, 36, 198-207
- KTBL KURATORIUM FÜR TECHNIK UND BAUWESEN IN DER LANDWIRTSCHAFT 2015. Gasausbeute in landwirtschaftlichen Biogasanlagen. Darmstadt
- LIEBETRAU, J., REINELT, J., CLEMENS, J., HAFERMANN, C., FRIEHE, J., WEILAND, P. 2013. Analysis of greenhouse gas emissions from 10 Biogas Plants within the agricultural sector. Water Science & Technology 67.6, 1370-1379
- MOLNARNE, M., SCHRÖDER, V. (BAM BUNDESANSTALT FÜR MATERIALFORSCHUNG UND –PRÜFUNG) 2007. Wie werden die Explosionsgrenzen von Biogasen berechnet? Vortrag, ProcessNet, Aachen, 16.10.2007
- PREISLER, D., SHAH, A., ZIELONKA, S., LEMMER, A., OECHSNER, H., JUNGBLUTH, T. 2008. Untersuchungen zur Hydrolyse von Maissilage. Landtechnik, 63, 2
- REINELT, T., LIEBETRAU, J., NELLES, M. 2016. Analysis of operational methane emissions from pressure relief valves from biogas storages of biogas plants. Bioresource Technology 217, 257-264