



Endbericht

Verbundvorhaben FlexFeed

Flexibilisierte Fütterung in Biogasprozessen mit Modell-basierter Prozesserkennung im Praxismaßstab

FKZ: 03KB101B

Zeitraum: 01.Oktober 2014 – 31.März 2018

Ausführende Einrichtung:

Landesanstalt für Agrartechnik und Bioenergie
Universität Hohenheim
Dr. Hans Oechsner
Garbenstr. 9
70599 Stuttgart

Autoren:

Dr. Hans Oechsner, Dr. Hans-Joachim Nägele, Philipp Kress
Die Verantwortung dieses Berichtes liegt bei den Autoren



Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Hohenheim, November 2018

Inhaltsverzeichnis

I. Einleitung, Zielsetzung und Methodik	3
I.1 Aufgabenstellung.....	3
I.2 Hintergrund des Projektes (Voraussetzung)	3
I.3 Zielsetzung und Ablauf des Vorhabens	4
I.4 Stand der Forschung und Technik	4
I.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen.....	8
II. Eingehende Darstellung	9
II.1 Ergebnisse.....	9
II.2 Verwertbarkeit der Ergebnisse im Sinne des Verwertungsplans	46
II. 3 Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen.....	46
II. 4 Erfolgte und geplante Veröffentlichungen.....	46
III. Erfolgskontrollbericht	48
1. Beitrag des Ergebnisses zu den förderpolitischen Zielen des Förderprogramms	48
2. Wissenschaftlich-technische Ergebnisse	48
3. Fortschreibung des Verwertungsplans.....	49
4. Arbeiten, die zu keiner Lösung geführt haben	51
5. Präsentationsmöglichkeiten für mögliche Nutzer - z.B. Anwenderkonferenzen.....	51
6. Einhaltung der Ausgaben-/Kosten- und Zeitplanung	52

I. Einleitung, Zielsetzung und Methodik

I.1 Aufgabenstellung

Die flexibilisierte Fütterung in Biogasprozessen mit modell-basierter Prozesserkennung im Praxismaßstab ist ein Forschungsprojekt der Landesanstalt für Agrartechnik und Bioenergie der Universität Hohenheim, das im Rahmen des Forschungsprogrammes „Energetische Biomassenutzung“ des Ministeriums für Wirtschaft und Energie im Zeitraum vom 01.10.2014 bis 31.03.2018 finanziert wurde.

I.2 Hintergrund des Projektes (Voraussetzung)

Der Ausbau der erneuerbaren Energien ist eine der großen Herausforderungen unserer Zeit. Probleme bei diesem Ausbau entstehen hauptsächlich durch fehlende Möglichkeiten zur Speicherung der erzeugten Energie. Diese sind jedoch zwingend erforderlich, da bei der Energieversorgung aus regenerativen Ressourcen Stromspitzen und -täler entstehen, die überbrückt werden müssen. Die fehlende Infrastruktur für den räumlichen und zeitlichen Ausgleich zwischen der Energieproduktion und deren Nutzung ist ein entscheidender limitierender Faktor beim Ausbau der erneuerbaren Energien. Insgesamt kann eine Energieversorgung, die weitgehend auf erneuerbaren Energieträgern basiert, nur dann sichergestellt werden, wenn gleichzeitig die deutschen bzw. europäischen Energieversorgungssysteme einer grundlegenden, strukturellen Transformation unterzogen werden.

Die Kombination verschiedener Energieerzeugungsanlagen (basierend auf Biomasse, Sonne, Wind) mit unterschiedlichen Transportsystemen (Erdgasnetz, Stromnetz) ist daher zur Umgestaltung des europäischen Energiesystems ein wichtiger Schritt. Mit Hilfe der speicherbaren Biomasse besteht die Möglichkeit, den biologischen Prozess der Biogasherstellung flexibel und regelbar über das Fütterungsmanagement zu betreiben. Was bisher vielfach fehlt, ist eine ausreichende Datenbasis und methodische Untersuchung des Beitrags eines flexiblen Füttermanagements auf die Produktbildung unter Einbeziehung innovativer Prozessüberwachung und Probennahmestrategien zur Absicherung des Betriebes. Im Projekt FlexFeed soll daher untersucht werden, inwiefern ein flexibles Füttermanagement die Nachhaltigkeit von Biogasanlagen und eine bedarfsgerechte Gaserzeugung unterstützen kann, und ob die Mechanismenerkennung als Methodik zu einem stabilen und risikoärmeren Betrieb unter Wechselastbedingungen beitragen kann. Dazu wird in einem Modell eine Parameteranpassung bei verschiedenen Betriebszuständen durchgeführt. Die Mechanismenerkennung identifiziert dann im Betrieb den Parametersatz, der den aktuellen Zustand am besten beschreiben kann. Dadurch wird der Prozesszustand bewertet und kann mit einer entsprechenden Regelung verknüpft werden.

Der große Vorteil liegt darin, dass vereinfachte Relationen zwischen Messparametern für die Überwachung herangezogen und zustandsabhängig gewichtet werden können. Bisher werden die Signale einzeln betrachtet, was zu einem Informationsverlust führt. Im Projekt werden Lanzen-basierte Probennahmesysteme aus einem Vorgängerprojekt sowie neue Sensorik an Prozess-kritischen Orten in der Flüssigphase eingesetzt und deren Bedeutung auf die vorgestellte Methodik quantitativ evaluiert.

I.3 Zielsetzung und Ablauf des Vorhabens

Im Projektteil der Universität Hohenheim werden in einem ersten Schritt die räumliche Verteilung der Intermediate des Biogasprozesses im Fermenter in Abhängigkeit der Substratzusammensetzung, Substratqualität, Fütterungshäufigkeit, Substrataufbereitung, Substratabbaus sowie des Rührwerkseinsatzes untersucht. Hierzu soll ein Lanzen-basiertes Probennahmesystem eingesetzt werden und mit Hilfe von biologischen Tracern kritische Bereiche identifiziert werden. Des Weiteren werden Strömungsgeschwindigkeiten in räumlicher Auflösung sowie die Viskosität des Substrates über Rohrviskosimeter erfasst und mit einem Mischgütemodell verglichen.

Im zweiten Arbeitsschritt werden die Inhaltsstoffe der Inputsubstrate für den Biogasprozess mit Hilfe der Nahinfrarotspektroskopie online bestimmt. In Laborversuchen wird die Leistungsfähigkeit eines Messensors basierend auf dem Prinzip der akustischen Wellenleitung zur Bestimmung der biologischen Prozessparameter untersucht.

Im dritten Arbeitsschritt wird an der Forschungsbiogasanlage durch gezielte Fütterungsoptimierung eine bedarfsgerechte Gasproduktion dargestellt und darüber hinaus kritische Betriebszustände generiert. Diese kritischen Zustände sollen mit Hilfe der entwickelten Sensorik erfasst und daraus eine resultierende Regelungsstrategie abgeleitet werden. Die entwickelten Modelle zur bedarfsgerechten Gasproduktion sollen in diesem Schritt auf ihre Güte und Anwendbarkeit geprüft werden.

I.4 Stand der Forschung und Technik

Biogasanlagen bieten das Potenzial, die Versorgungssicherheit und Stabilität bei steigender Dynamik im Stromnetz zu unterstützen. Solange Gasaufbereitungsverfahren sich für viele Bestandsanlagen nicht lohnen, wird derzeit versucht, die Stromerzeugung vor allem durch die Erweiterung der Gasspeicher sowie auf Seiten der Blockheizkraftwerke zu flexibilisieren.

HÄRING et al. (2015) zeigte, dass Biogasanlagen durch die Zwischenspeicherung von Biogas technisch in der Lage sind, die Stromerzeugung so zu verlagern, dass die fluktuierende Stromerzeugung aus

Windkraft- und Photovoltaikanlagen ausgeglichen werden kann. Neben notwendigen Erweiterungen der Technik zur Verstromung werden oft zusätzliche Investitionen in Gas- und Wärmespeicher erforderlich, wodurch sich die Wirtschaftlichkeit derartiger Anlagenkonzepte nur schwer darstellen lässt.

Eine weitere Möglichkeit zur flexiblen Biogaserzeugung bietet sich durch eine technische und prozessbiologische Verfahrensanpassung. GANAGIN et al. (2014) integrierte einen mit flüssigem Hydrolysat beschickten Festbettreaktor in eine bereits bestehende zweiphasige Vergärung. Mit dieser Technologie wird eine Unterbrechung der Biogasproduktion für mehrere Tage und ein erneutes Anfahren in wenigen Stunden möglich. Als nachteilig erweist sich der relativ hohe Aufwand zur nachträglichen Einbindung eines derartigen Reaktors in eine bestehende Biogasanlage.

Ähnliche Untersuchungen wurden am FRAUNHOFER IKTS (2015) innerhalb des BMWi-Verbundprojektes PROKOSYS vorgenommen. Hier wurde zur gezielten Gasproduktion die Flüssigphase aus der Hydrolyse in den Nachfermenter geleitet. Die finanziellen Aufwendungen der zur Erzeugung der Flüssigphase erforderlichen Entwässerungsstufe sind jedoch deutlich größer als die zur Errichtung eines größeren Gasspeichers.

Im Gegensatz zum Gasspeicherzubau oder der Einführung mehrstufiger Konzepte ist die Einflussnahme auf den biologischen Abbauprozess kostengünstig. Mit der von MAUKY et al. (2015a) entwickelten modellprädiktiven Regelung zur Anpassung der Substratbeschickung an den BHKW-Fahrplan, welche die jeweiligen Abbaugeschwindigkeiten der zum Einsatz kommenden Substrate in die Regelung einbezieht, liegt ein vielversprechendes Verfahren zur flexiblen Biogaserzeugung vor. Neben komplexen Modellen wie dem Anaerobic Digestion Model No.1 (BATSTONE, 2002) stehen dabei auch vereinfachte Prozessmodelle zur Verfügung (RODRÍGUEZ, 2008; MAUKY, 2011; GARCÍA-DIÉGUEZ, 2013; WEINRICH, 2015), welche die dynamische Biogasproduktion abbilden und zur modellprädiktiven Regelungen eingebunden werden können.

Die im großtechnischen Maßstab an der Forschungsbiogasanlage der Universität Hohenheim vorgenommene Überprüfung hat die Ansätze der modellprädiktiven Regelung bestätigt. Die Versuche haben jedoch die Notwendigkeit zur Anpassung des Mischprozesses an die veränderte Substratdosierung verdeutlicht. Die im FRAUNHOFER IKTS durchgeführten prozess-tomographischen Untersuchungen zum Einmischen unterschiedlicher Substratmengen in einen Biogasfermenter zeigen die entstehenden Betriebsprobleme bei der schlagartigen Dosierung hoher Substratmengen. Die schlechtere Durchmischung ist mit einem lokalen Anstieg der Fließeigenschaften und dem daraus abzuleitenden verringerten Stofftransport zu begründen.

Untersuchungen in Hohenheim zeigen, dass basierend auf der derzeit verwendeten Rührtechnologie ein Einsparpotenzial von 50 % der für die Rührfähigkeit benötigten elektrischen Energie realisiert werden kann (NÄGELE 2013). Das ermittelte Volumen der Einsparungen an Biogasanlagen in Deutschland beträgt nach ersten Hochrechnungen ~140 Millionen Euro im Jahr. Zusätzlich zur Substratkonzentration beeinflusst der granulometrische Zustand der einzumischenden Substrate wesentlich das sich ausbildende Fließverhalten und somit den Strömungsprozess im Reaktor. Beispielsweise bewirkte eine Reduzierung der maximalen Faserlänge von 20 auf 15 mm eine Erniedrigung der dynamischen Viskosität um 50 %, das wiederum zu einem Anstieg der Biogasausbeute um 20 % führte (FRAUNHOFER IKTS/TU BERLIN/KSB AG, 2015).

Zur Realisierung einer ausreichenden Substratvermischung ist eine Anpassung der einzusetzenden Rührtechnik und der zu wählenden Prozessparameter an die vorliegenden Substrateigenschaften vorzunehmen. Auf der Basis prozesstomographischer Untersuchungen konnten erste quantitative Zusammenhänge zur Bewertung des sich im gesamten Reaktor ausbildenden Strömungsprozesses und der daraus abzuleitenden Beeinflussung der Biogasausbeute ermittelt werden (FRAUNHOFER IKTS/TU BERLIN/KSB AG, 2015). Zur Ableitung eines allgemeingültigen Regelalgorithmus wird es erforderlich, die bisher betrachteten Rührer-Geometrien zu erweitern und jeweils die optimale Position der Rührwerke hinsichtlich ihrer Korrespondenz im Reaktor und des notwendigen Turbulenzgrades am Eintrag in Abhängigkeit zu rheologischen und granulometrischen Randbedingungen zu ermitteln.

Nachteil der oben genannten innovativen Ansätze zur Realisierung einer effizienten bzw. flexiblen Biogaserzeugung ist, dass diese auf die Optimierung von einzelnen Prozessschritten der Biogaserzeugung beschränkt bleiben. Voraussetzung für eine Breitenanwendung der Ergebnisse ist die Entwicklung einer prozessstabilen Systemlösung unter Beachtung der geforderten Dynamisierung der Biogaserzeugung. Dazu wird die Entwicklung eines allgemeingültigen Algorithmus zur Regelung der Prozesse Substrateinmischung und Substratvorbehandlung in Verbindung mit einer modellbasierten prädiktiven Regelung des biologischen Abbauprozesses bei flexiblem Anlagenbetrieb erforderlich. Entsprechend den Darstellungen in der Literatur beschränken sich die von Dritten erstellten Regelkonzepte auf die chemisch/biologischen Prozesse der Biogaserzeugung (ZOSEL, 2013), (BMBF- Projekt MOST).

BATSTONE, D.J. et al. (2002): Anaerobic Digestion Model No 1 (ADM1). IWA Publishing.

FRAUNHOFER IKTS (2015): Prozesse, Komponenten und Systeme für den flexibilisierten Betrieb von Biogasanlagen unter Nutzung biogener Rest- und Abfallstoffe (PROKOSYS). Abschlussbericht BMWi-Verbundvorhaben PROKOSYS, BMWi-FKZ: 03KB072, Dresden.

FRAUNHOFER IKTS/TU BERLIN/KSB AG (2015): Entwicklung eines Steuerungs- und Regelkonzeptes für Mischprozesse in Biogasfermentern auf der Basis zu validierender Prozessmodelle. FNR-FKZ: 22023012, Zwischenbericht.

GANAGIN, W. et al. (2014): Flexible Biogaserzeugung durch technische und prozessbiologische Verfahrensanpassung. 7. Innovationskongress Biogas, Osnabrück, 22./23. Mai 2014.

GARCÍA-DIÉGUEZ, C. et al. (2013): Reducing the Anaerobic Digestion Model No. 1 for its application to an industrial wastewater treatment plant treating winery effluent wastewater. *Bioresource Technology*, 132, S. 244-253, 2013.

HÄRING, G. et al. (2015): BioStrom - Steuerbare Stromerzeugung mit Biogasanlagen. Endbericht zum BMWi-Verbundvorhaben 03KB061, Ingolstadt.

MAUKY, E. (2011): Robustes Prozessmodell zur dynamischen Simulation der anaeroben Fermentation, DBFZ Report Nr. 8, 2011.

MAUKY, E. et al. (2015): Bedarfsgerechte Biogasproduktion durch modellprädiktive Fütterungsregelung im Praxismaßstab. 8. Innovationskongress Biogas, Osnabrück, 02./03. Juni 2015.

NÄGELE, H. (2013): A full-scale study on efficiency and emissions of an agricultural biogas plant. Dissertation, verfügbar unter: <http://opus.uni-hohenheim.de/volltexte/2013/904/>.

RODRÍGUEZ, J. et al. (2008): Determination of the adequate minimum model complexity required in anaerobic bioprocesses using experimental data. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, 83, S. 1694-1702, 2008.

WEINRICH, S. et al. (2015): Critical comparison of different model structures for the applied simulation of the anaerobic digestion of agricultural energy crops. *Bioresource Technology*, 178, S. 306-312, 2015.

ZOSEL, J.: Mobile Versuchsanlage zur Ertragssteigerung/Prozessoptimierung von Biogasanlagen (VESBA). 5. Statuskonferenz Energetische Biomassenutzung, Leipzig, 14./15.11.2013.

I.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Das interdisziplinäre Verbundprojekt Flex-Feed wurde im Rahmen der BMWi- Förderinitiative Energetische Biomassenutzung gefördert. Die Beteiligten Projektpartner sind nachfolgend aufgeführt:

- Projektpartner 1 (Projektkoordinator): Prof. Dr. Peter Neubauer, Dr. Stefan Junne, Technische Universität Berlin, Fachgebiet Bioverfahrenstechnik (TUB).
- Projektpartner 2: Dr. Hans Oechsner, Universität Hohenheim, Landesanstalt für Agrartechnik und Bioenergie (LAB).
- Projektpartner 3: Herr Bailly, Sota Solutions GmbH (Sota).

II. Eingehende Darstellung

II.1 Ergebnisse

In dem beantragten Projekt wird die Evaluierung und Optimierung einer Strategie zum Fütterungsmanagement an Biogasanlagen angestrebt, die innovative Sensorik in der Flüssigphase, Modell-basierte Überwachung und auf neuronalen Netzen beruhende Prognosen als methodische Ansätze vereint. Die Universität Hohenheim bearbeitet in diesem Projekt drei Arbeitspakete zur Evaluierung der Sensorik, flexiblem Fütterungsmanagement sowie „off line“ Analytik zur Identifikation kritischer Zonen im Biogasfermenter mittels entsprechender Messtechnik. Nach Einstellung des Doktoranden im März 2015 und einer Einarbeitungszeit wurde mit den Forschungsarbeiten umgehend begonnen. Im Folgenden wird der bisherige Stand in den jeweiligen Arbeitspaketen vorgestellt.

- **Arbeitspaket 1:** Identifikation der kritischen Zonen im Biogasfermenter
- ✓ Auswahl der Messsysteme, Inbetriebnahme vorhandener Messsysteme
- ✓ Einfluss der Rührdauer auf die Nährstoffverteilung im Fermenter
- ✓ Strömungsgeschwindigkeit und Strömungsprofil im Biogasfermenter
- ✓ Charakterisierung der rheologischen Eigenschaften
- ✓ Einsatz von Tracern zur Bestimmung der Durchmischung

Einfluss der Rührdauer auf die Nährstoffverteilung im Fermenter

In der Einarbeitungsphase wurden alle benötigten Messsysteme in Betrieb genommen und überprüft. Nach Abschluss dieser Arbeiten wurde das Versuchsdesign festgelegt und mit den Untersuchungen begonnen. In Vorarbeit zum flexiblen Betrieb von Fermentern wurde der Ist-Zustand eines Fermenters untersucht und dargestellt. Darauf aufbauend wurde im Jahr 2015 der Betrieb unter Wechsellastbedingungen untersucht. In einem ersten Schritt wurde untersucht welche Auswirkungen eine verkürzte Rührwerkslaufzeit auf die Nährstoffverteilung und die Energieeffizienz (Mischgüte) im Fermenter hat. Hierzu wurde im Sommer 2015 eine dreimonatige Messreihe durchgeführt. Hierfür wurde zuerst die im Normalbetrieb erforderliche Rührdauer ermittelt und analysiert. Um den Effekt der Fütterung auszuschließen wurde eine kontinuierliche Fütterung des Fermenters angestrebt. Da die Eintragstechnik die Menge und die Geschwindigkeit der zugeführten Inputstoffe bestimmt und diese Mindestlaufzeiten eingehalten werden wurde ein Fütterungstakt von 30 Minuten festgelegt. Auf diesen Takt wurde auch das Rührintervall angepasst. Es ergab sich somit im Standardbetrieb eine Rührzeit von 10 Minuten

je Takt sowie stark verkürzte Laufzeiten in einer Variante mit 5 Minuten und einer Variante mit 2 Minuten. Als Grundvoraussetzung für diesen Versuch wurde eine Raumbelastung von mindestens $3,5 \text{ kg oTS/m}^3 \cdot \text{d}$ angestrebt, welche durch erhöhte Fütterungsmengen erreicht werden konnte. Als Substrate wurden Maissilage, Grassilage, Rinder- und Pferdemist sowie Getreide eingesetzt. Die Versuchsdauer war auf eine drei wöchige Einlaufphase sowie eine siebenwöchige Versuchsphase geplant. In der Einlaufphase wurde die Fütterung und das Rührintervall auf die Zielvorgaben angepasst und so die Biozönose auf die veränderten Gegebenheiten eingestellt. Die Versuchsphase wurde in 2 Blöcke unterteilt in welchem jede Variante zwei Mal beprobt und untersucht wurde. Ziel war es die Nährstoffverteilung mit einem lanzenbasierten Messsystem zu beproben und ermitteln. In Ergänzung zur Messung der Nährstoffverteilung an 6 Messstellen in jeweils drei Höhen wurde am Ende jeder Variante die Viskosität des Gärsubstrates gemessen. Mit einer Probenanzahl von 216 Stück und 6 Viskositätsmessungen konnte eine sehr hohe Anzahl an Werten generiert und analysiert werden. Aufbauend auf bereits vorangegangenen Arbeiten an der Forschungsbiogasanlage können so weitere Kenntnisse zur Mischgüte, Rührqualität, Fermenterbiologie und Substratverwertung ermittelt werden. Abbildung 1 zeigt die Entnahmepositionen (grau hinterlegte Probenstellen) sowie die Entnahmehöhen.

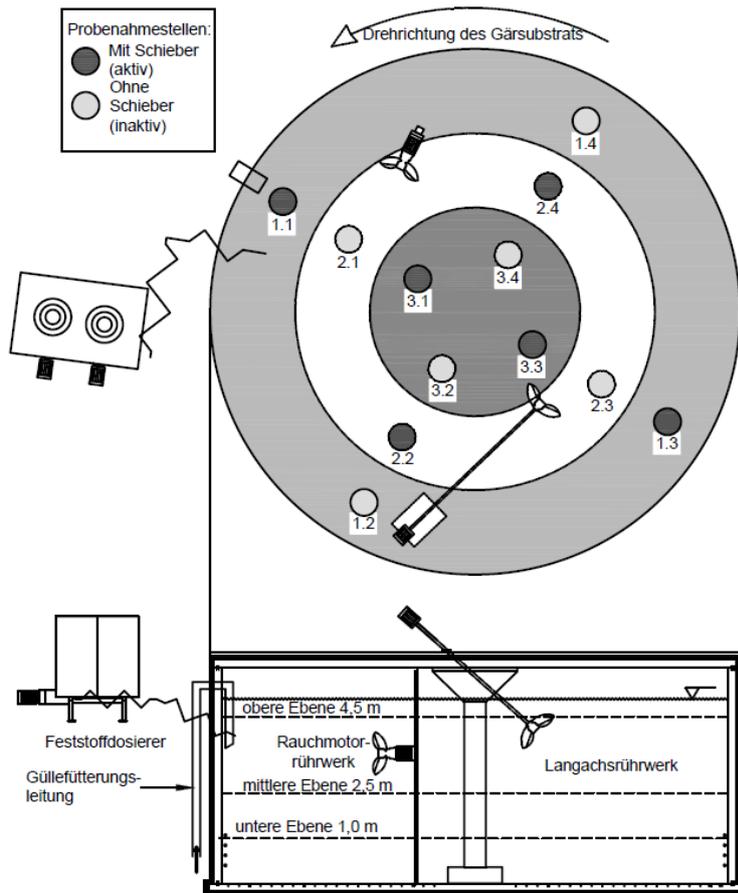


Abbildung 1: Draufsicht und Seitenansicht des Fermenter 1 der Forschungsbiogasanlage Unterer Lindenhof mit Benennung der Probenahmestellen sowie der Entnahmehöhen

Im Standard-Betrieb der Versuchsbiogasanlage vor dem Untersuchungszeitraum wurden beide Fermenter mit nahezu identischen Rationen kontinuierlich beschickt. Um die vorgegebene, erhöhte Raumbelastung im Versuchsfermenter zu erreichen, wurde das Fütterungsregime dahingehend umgestellt, dass weitestgehend der gesamte Futterbedarf an Feststoffen der Biogasanlage in den Versuchsfermenter eingetragen wurde, während Fermenter 2 vor allem mit flüssigen Substraten (Gülle) gefüttert wurde. In Abbildung 2 wird die Zusammensetzung der Futterrations des Versuchsfermenters über Einlauf- und Untersuchungsphase im Zeitverlauf dargestellt. Die Futterrations war dabei auf die am Betrieb zum Zeitpunkt verfügbaren Substrate gebunden und wurde auf die Versuchsziele angepasst.

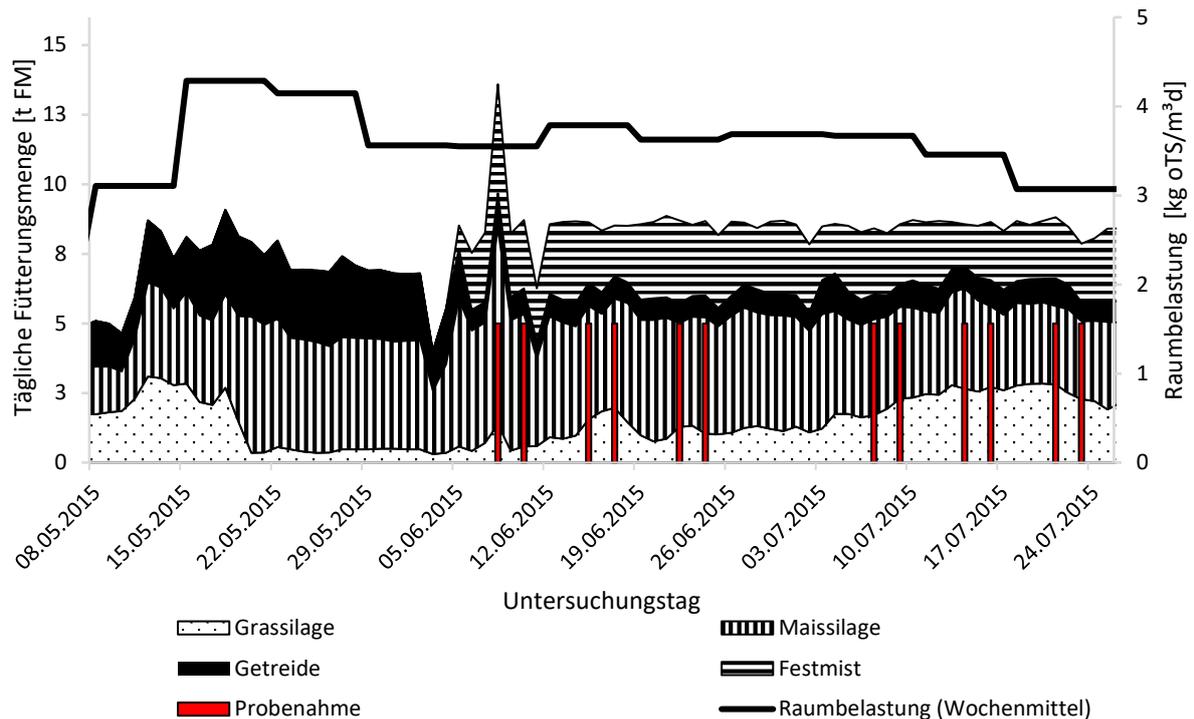


Abbildung 2: Fütterung des Fermenters über die Einlaufphase und den Untersuchungszeitraum

Zu Beginn der Einlaufphase bestand die Ration aus Getreide (30-39%), Maissilage (37-41%) und Grassilage (26-37%). Mit abnehmender Verfügbarkeit der Grassilage (<10%) wurde diese mit Mais (bis zu 62%) substituiert. Zu Beginn der Versuchsphase wurde Getreide (9-14%) durch Festmist (Rinderfestmist und Pferdemist, 21-34%) ersetzt. Mit fortschreitender Versuchsphase erhöhte sich die Verfügbarkeit von Grassilage auf einen Rationsanteil von bis zu 33 %. Der Anteil von Maissilage reduzierte sich auf bis zu 32 % in der Fütterungsration. Diese Ergebnisse zeigen einen der herausforderndsten Punkte in der Praxisforschung auf. Die Verfügbarkeit und Qualität der Inputsubstrate muss über einen längeren Zeitraum gewährleistet sein und Änderungen müssen kontinuierlich überwacht werden.

Die statistische Auswertung der Parameter der in der Hauptuntersuchung gezogenen Proben erfolgte über ein gemischtes statistisches Modell mittels Varianzanalysen.

$$y_{ij} = \mu + \text{Block} + \text{Block} * \text{Rührintensität} + \text{Rührintensität} + \text{Position} + \text{Ebene} + \text{Rührintensität} * \text{Position} + \text{Rührintensität} * \text{Ebene} + \text{Position} * \text{Ebene} + \text{Rührintensität} * \text{Ebene} * \text{Position} + e_{ij}$$

Die höchsten Signifikanzen sind im Bereich der FOS/TAC, TS sowie Essigsäuregehalte festzustellen (Tabelle 1). Die Rührintensität zeigte eine hohe Signifikanz in Abhängigkeit der Rührintensität. Ebenso wurde ein starker Einfluss des festen Effektes Position auf die Fettsäuren, den FOS/TAC und auch auf die Trockensubstanz gemessen. Die Ergebnisse zeigen, dass sowohl die Rührdauer als auch der Ort der

Probenentnahme Hinweise auf Bereiche im Biogasfermenter geben welche nur unzureichend Durchmisch sind. In Abweichung zu vorherigen Untersuchungen war kein Effekt in den Ebenen zu beobachten. Für die Praxis heißt dies, dass die Nährstoffe über die Höhen im Fermenter gleichmäßig verteilt scheinen. Beim Einbau der Multipositionssensorik hat die Position als auch die verwendete Rührdauer einen größeren Einfluss als die Höhe. Dies soll mit Hilfe der Multipositionssensorik im Verlauf des Projektes geprüft werden. Die weiteren Ergebnisse zeigen die Effekte im Detail.

Tabelle 1: Übersicht der Signifikanzen der getesteten Effekte der Analyseparameter im vollen Modell

Feste Effekte	Hac	Essig- säure	TS	oTS	FOS/ TAC	pH	Tempe- ratur
Rührintensität	.	.	ns	ns	***	ns	ns
Position	*	*	**	.	***	ns	ns
Ebene	ns	ns	ns	ns	ns	ns	.
Rührintensität*Ebene	ns	ns	*	ns	ns	ns	ns
Rührintensität*Position	ns	ns	ns	ns	*	ns	ns
Ebene*Position	ns	ns	*	.	ns	ns	ns
Rührintensität* Ebene* Position	ns	ns	*	*	.	ns	ns

Der höchste Trockensubstanzgehalt (Abbildung 3) wurde an den Positionen 1.1 und 2.4 mit durchschnittlich 14,1 % gemessen. Auch die Position 1.3 im Strömungsbereich randseitig gegenüber der Einbringschnecke zeigten im Durchschnitt Trockensubstanzgehalte von 14 % im Mittel. Auf den Positionen 3.1, 2.2 und 3.3, welche im Zentrum des Fermenters positioniert sind, lagen die TS Gehalte geringfügig niedriger. Die Ergebnisse der Trockensubstanzverteilung zeigen, dass auch im standardbetrieb in dem kontinuierlich gefüttert wird, keine homogene Durchmischung im Biogasfermenter erreicht werden kann. Es kann vermutet werden, dass gerade im Bereich des Zentrums die Wirkung der Rührwerke nicht ausreichen um das Substrat ausreichend zu durchmischen. Deutlich homogener zeigen sich die Ergebnisse zur Verteilung der Essigsäure über die Positionen. Der höchste Wert wurde direkt am Substrateintrag (0,770 g/kg) gemessen. An allen weiteren Positionen konnten geringere Konzentrationen um 0,6 g/kg gemessen werden die kaum Schwankungen unterliegen. Dies lässt die Vermutung zu, dass trotz der ungleichmäßigen Verteilung der Trockensubstanz die Säuren im Gärraum z.B. durch Diffusion gleichmäßiger verteilt werden als ursprünglich vermutet.

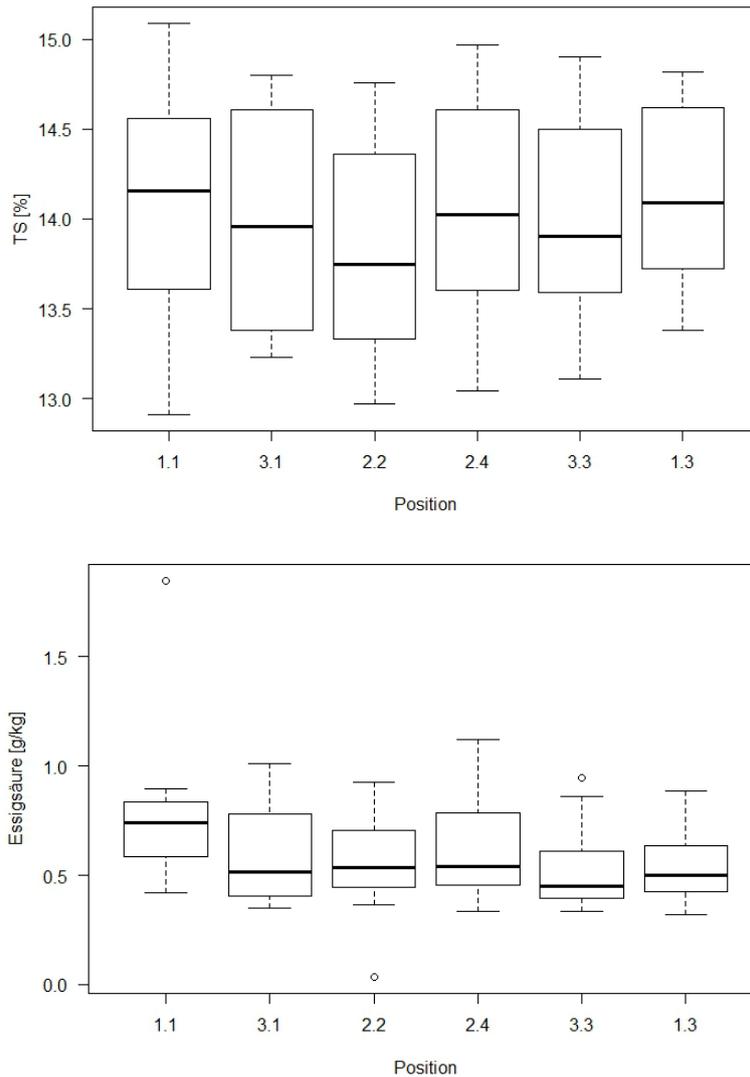


Abbildung 3: TS-Gehalt sowie Essigsäurekonzentration über alle Varianten hinweg

Die Ergebnisse der gemessenen Gasproduktion (Abbildung 4) zeigen, dass sich mit abnehmender Rührintensität die freigesetzten Gasmengen im Fermenter reduzieren. Während in der 10-Minuten Variante die Gasproduktion bei durchschnittlich $74 \text{ m}^3\text{N/h}$ lag, reduzierte sich diese in der 5-Minuten Variante auf bis zu $65 \text{ m}^3\text{N/h}$ und in der 2-Minuten Variante auf bis zu $63 \text{ m}^3\text{N/h}$. Dabei lagen die Gaserträge im ersten Untersuchungsblock etwas höher als im zweiten Untersuchungsblock. Die weit überdurchschnittlichen Gaserträge am Tag 7, an welchem die Fermenter in Vorbereitung zur nächsten Einstellung vollständig homogenisiert wurden, zeigte sich in der der Untersuchungsvarianten 5-Minuten und 2-Minuten, dass in der Versuchsphase kein vollständiger Gasaustrieb stattgefunden hat und größere Gasmengen im Fermentersubstrat gespeichert wurden.

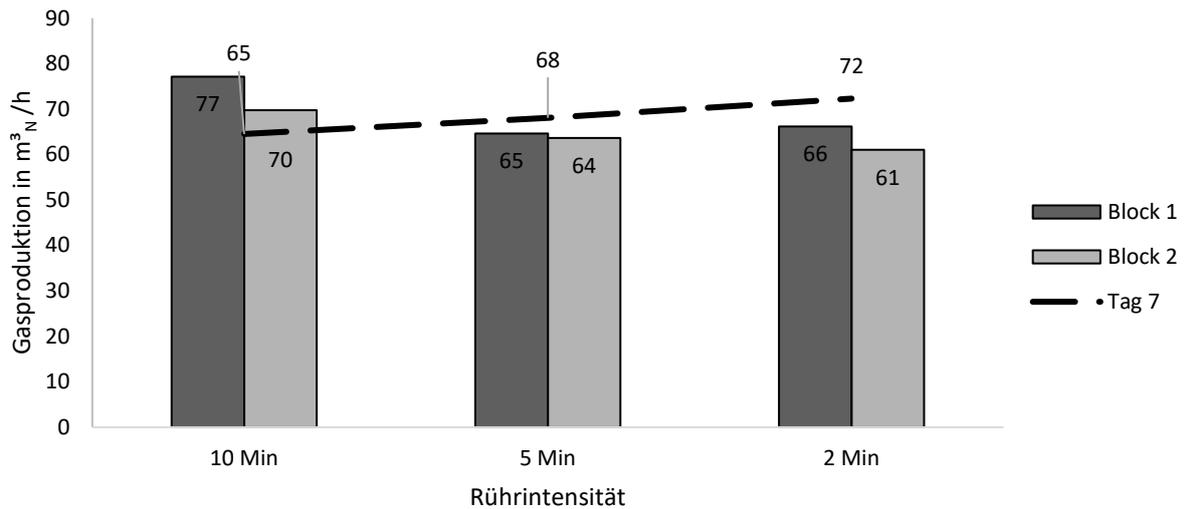


Abbildung 4: Gasproduktion in Abhängigkeit der Rührintensität

Fazit:

Auch im standardbetrieb einer Biogasanlage mit gleichbleibenden sehr engmaschigen Fütterungsintervallen und Fütterungsmengen bei vergleichsweise geringen Raumbelastungen zeigen sich Unterschiede in der Nährstoffverteilung vor allen in Abhängigkeit der Position und der Rührintensität. Bei zukünftigem flexiblem Anlagenbetrieb mit stoßweiser Fütterung sehr großer Mengen kann vermutet werden, dass es zu einer Verstärkung dieser Problematik kommen kann und in dieser Betriebsweise noch weitere kritische Zonen entstehen.

Strömungsgeschwindigkeit und Strömungsprofil im Biogasfermenter

Im Rahmen des Projektes wurde ein Strömungsmessgerät der Firma OTT beschafft. Dieses Gerät ist konzipiert für die Messungen von Strömungen in Flüssen und Abwässern mittels eines magnet-induktiver Messverfahrens. Dieses Verfahren hat den Vorteil, dass keine beweglichen Teile verbaut sind und der Messkopf im Biogasprozess eingesetzt werden kann ohne dass es zu technischen Störungen durch das Fermentersubstrat kommen kann. In einer ersten Phase wurde das Gerät in Einsatz gebracht und erprobt. Als Ziele sollten die Funktionsweise sowie ein geeigneter Messablauf ermittelt werden um bei weiteren Untersuchungen einen reibungslosen Ablauf zu gewährleisten.

Im ersten Schritt wurde untersucht, welche Höhenabstände für die Messungen sinnvoll und in der Praxis umsetzbar sind. Dazu wurden Messungen in den Abständen von 20cm, 30cm sowie 50cm von Fermenterboden bis Substratoberfläche untersucht. Des Weiteren wurde die Hauptströmungsrichtung in den jeweiligen Höhen bestimmt. Die Untersuchungen zeigten, dass sich für eine ausreichende Genauigkeit sowie für einen guten Prozessablauf bei den Messungen 50 cm Abstände als ausreichend angesehen werden können. Im anschließenden Hauptversuch wurden 6 Messstellen am Fermenter 2 der Forschungsbiogasanlage untersucht. Hierbei wurden in 3 Wiederholungen je Messstelle, 9 unterschiedliche Höhen und je Höhe 4 unterschiedliche Strömungsrichtungen untersucht. Zusätzlich wurde mittels Rohrviskosimeter die rheologische Eigenschaft des Biogassubstrates ermittelt. Während des Untersuchungszeitraumes lag der TS-Gehalt im Fermentersubstrat bei durchschnittlich 10,44%. Als Substrate wurden Maissilage (3-4 t/d), Grassilage (2-3 t/d), Ganzpflanzensilage (1-3 t/d), Gülle (4-10 t/d), Pferdemist (0-1 t/d) sowie Getreide (0-1 t/d) gefüttert.

Die Strömungsgeschwindigkeiten in Abhängigkeit der Strömungsrichtung sind in Abbildung 5 dargestellt. Die in blau gekennzeichneten Kurven zeigen die vom Messpersonal als Richtung mit der höchsten Strömungsgeschwindigkeit in einer Richtung, in orange sind die dazu in 180° versetzten Strömungsrichtungen abgebildet. Hinzu kommen die gestrichelten Kurven, welche in 30° links sowie rechts zu Strömungsrichtung gemessenen Werte aufzeigen. An Messstelle 1.3 lassen sich im oberen Bereich des Fermenters Strömungen messen, welche mit 2,43 cm/s klar im Messbereich des Sensors liegen und somit als zielgerichtete Strömungen gedeutet werden können. Im mittleren Bereich des Fermenters konnten Strömungen von -4,05 cm/s gemessen werden. Diese Messungen sowie die Messungen im Bereich von -1,5 cm/s bis 1,5 cm/s liegen im Bereich der Nullpunktstabilität des Messgerätes und können nicht als tatsächliche Messwerte angenommen werden. An Messstelle 3.3 bilden sich im mittleren Bereich klare Strömungen von bis zu 5,8 cm/s aus. Auf dieser Höhe ist das Rührwerk entsprechend positioniert. Die Ergebnisse des Hauptversuches, wurden nach der Auswertung bei einem Treffen mit dem Vertrieb des Messgeräteherstellers auf ihre Plausibilität überprüft und das Messintervall in Frage gestellt.

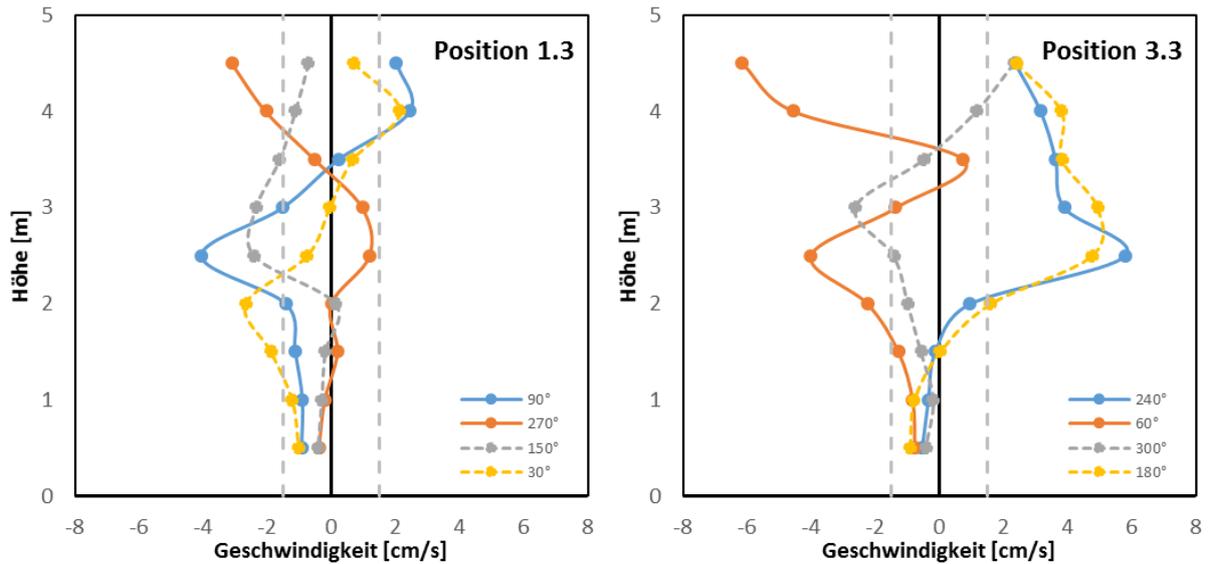


Abbildung 5: Strömungsprofil der ersten Wiederholung an Messstelle 1.3 sowie 3.3

Im Anschluss an diese Messreihen, wurde in weiterer Versuch geplant, in welchem das Messintervall entsprechend angepasst wurde um höher aufgelöste Messdaten zu erhalten. Diese Messungen wurden am Fermenter 1 an der Position 2.4 durchgeführt. Der Fermenter wurde kurz zuvor komplett entleert, gereinigt und im Anschluss mit sehr dünnflüssigem separierten Gärrest wieder befüllt. Das Material hatte eine nahezu wässrige Konsistenz und besaß im Vergleich zum vorausgegangenen Versuch an Fermenter 2 einen sehr viel niedrigeren Trockensubstanzgehalt (~3%). In diesem Versuch wurde angestrebt das Messintervall zu verringern um damit den Einfluss der einzelnen Rührwerke (Tauchmotorrührwerk (TMR) und Langachsrührwerk (LAR)) sowie eine Kombination beider Rührwerke auf die Strömungsgeschwindigkeit in den einzelnen Höhen zu messen.

Im direkten Vergleich der drei Varianten lässt sich erkennen, dass das Tauchmotorrührwerk an dieser Messstelle deutlich langsamere und „konstantere“ Geschwindigkeiten erzeugt als das Langachsrührwerk. Es zeigt sich die Tendenz, dass von der Substratoberfläche zum Fermenterboden die Strömungen immer langsamer werden. Bei alleinigen Einsatz des Langachsrührwerkes sind die Geschwindigkeiten im Fermenter deutlich höher und erreichen an der Oberfläche bis zu 50 cm/s. Beim Einsatz beider Rührwerke in Kombination werden über alle Höhen die höchsten Geschwindigkeiten erreicht. In der Spitze können bis zu 65cm/s gemessen werden. Beim Langachsrührwerk und bei beiden in Kombination zeigen die Messdaten eine Art „Wölbung“, in der sich die Geschwindigkeiten in der Mitte des Substrates zum Boden hin stark verlangsamen, danach aber zum Grund hin wieder teilweise stark erhöhen. Deutlich ist die Korrespondenz beim Einsatz beider Rührwerke zu erkennen. Sehr eindrucksvoll ist die Abnahme der Strömungsgeschwindigkeit von sehr flüssigem bis zu sehr TS-reichem Substrat aus

dem Hauptversuch zu beobachten. Wurden dort Spitzengeschwindigkeiten von bis zu 6 cm/s gemessen erhöhten sich diese im TS-armen Substrat um nahezu das 10-fache. Nachdem eine prinzipielle Eignung der Messtechnik festgestellt war und ein geeigneter Untersuchungsrahmen festgelegt wurde war es Ziel einer neuen Untersuchung ein Strömungsprofil eines Fermenters von einem geringen TS-Gehalt ausgehend bis zu einem anlagentypischen TS-Gehalt zu messen. Zusätzlich wurden die in einem Standardbetrieb intermittierenden Rührintervalle nachgeahmt um die Abkling- und Anfahrzeiten bei unterschiedlichen TS-Gehalten zu messen.

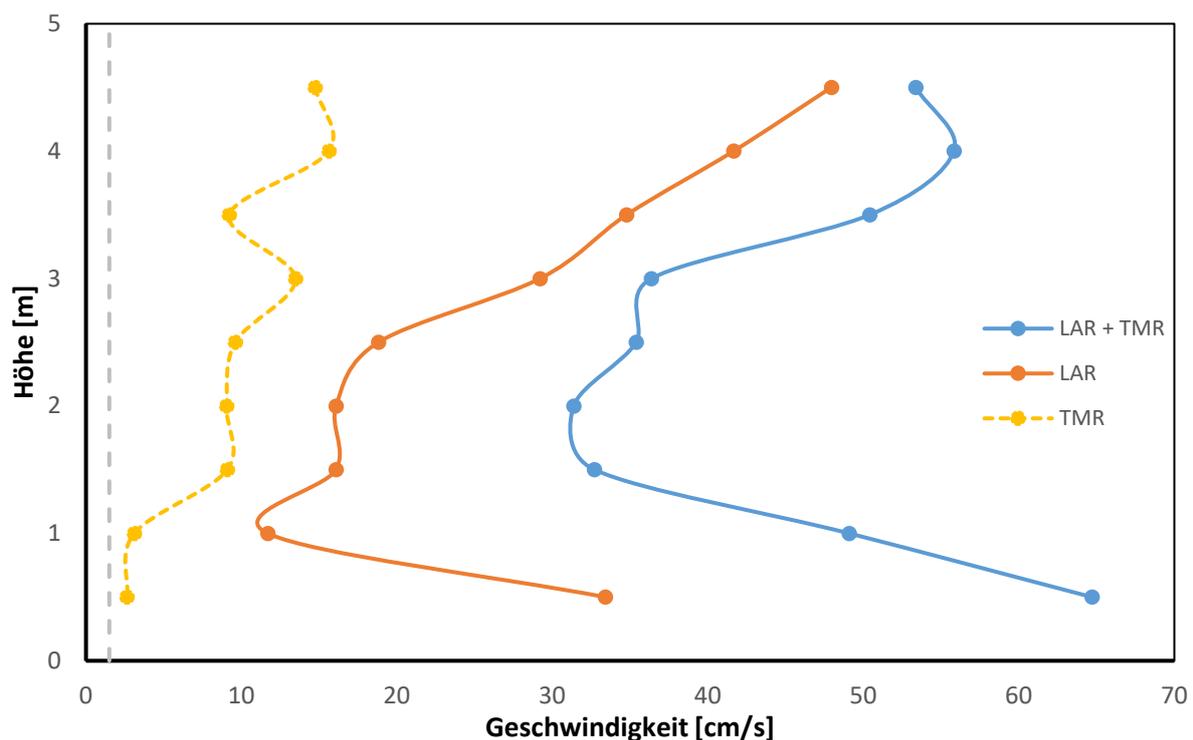


Abbildung 6: Mittelwerte der Strömungsgeschwindigkeit unter verschieden eingesetzten Rührwerken.

Die Messungen dieser Versuchsreihe über einen Zeitraum von sechs Wochen wurden an Fermenter 1 der Forschungsbiogasanlage durchgeführt, welcher nach einer Reinigung entsprechend angefahren wurde und sich im Laufe der Zeit ein erhöhter TS-Gehalt einstellte. Als Inputstoffe wurden Rindermist, Pferdemist, geringe Mengen Getreide sowie Ganzpflanzensilage (GPS), welches nach und nach durch Grassilage ersetzt wurde verwendet. Alle Materialien wurden nach Verfügbarkeit eingesetzt. Die durchschnittliche Fütterungsmenge betrug 6.387kg FM/d. Die angestrebte Raumbelastung betrug 3,5 kg oTS/m³*d. Aufgrund des sehr flüssigen Fermentersubstrates wurde während des Versuchszeitraumes auf eine zusätzliche Gabe von Gülle verzichtet. Der zu erwartende Anstieg des TS-Gehaltes im Biogassubstrat, konnte durch die Analyse bestätigt werden. Es wurde ein Anstieg von 7,74 % bis hin zu 10,75 % in der sechsten Woche gemessen. Die Messung der Strömungsgeschwindigkeit wurde an 6

Messstellen des Fermenters in jeweils neun unterschiedlichen Höhen, 0,5 m – 4,5 m durchgeführt. In Anlehnung an die Vorversuche wurde in diesem Versuch die Strömungsrichtung an jeder einzelnen Messstelle und in jeder Höhe bestimmt. Das Messintervall konnte nach dem im Vorfeld stattgefundenen Gespräch mit dem Hersteller geändert und verbessert werden. Im Versuchszeitraum von sechs Wochen wurden jede Woche Messungen durchgeführt. In Ergänzung zur Strömungsgeschwindigkeit wurde die Viskosität im Gärsubstrat wöchentlich bestimmt. Das Gärsubstrat der ersten Woche war mit der vorhandenen Messtechnik nicht auswertbar, da das Fluid zu dünnflüssig war und kein ausreichender Druck in der Messtrecke erzeugt werden konnte. So konnte keine Aussage über die Eigenschaften des Substrates in der ersten Woche in Bezug auf die rheologischen Eigenschaften getroffen werden. Der Vergleich der Viskositäten der folgenden fünf Wochen (Abbildung 7) zeigt ein strukturviskoses Verhalten des Gärsubstrates. Mit ansteigender Trockensubstanz erhöhte sich die dynamische Viskosität auf bis zu 2,25 Pas.

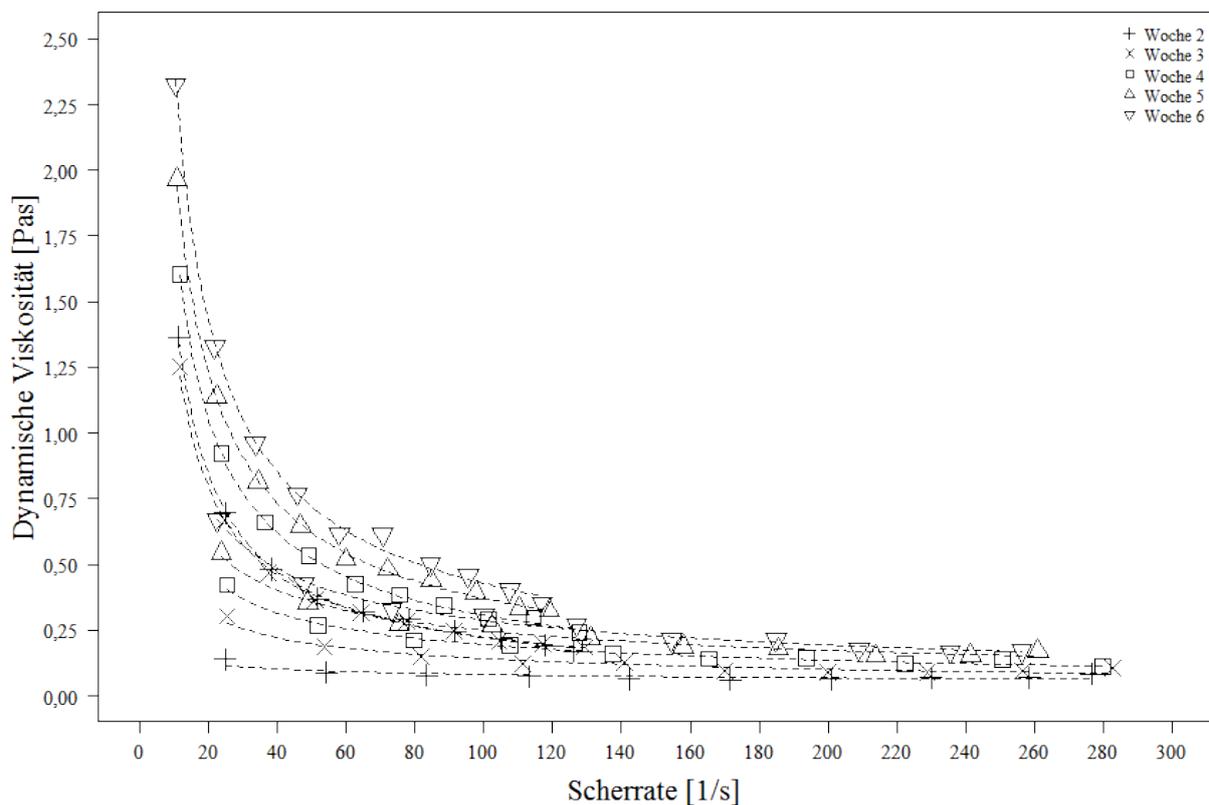


Abbildung 7: Vergleich der dynamischen Viskosität der zweiten bis zur sechsten Woche

Die Ergebnisse zeigen, dass mit steigendem Trockensubstanzgehalt und steigender dynamischer Viskosität die Strömungsgeschwindigkeit an allen Messstellen und über alle Höhen hinweg sehr stark abnimmt (Abbildung 8). Die Geschwindigkeiten wurden bei einem dünnflüssigeren Substrat stärker von den Positionen der Rührwerke, der Höhe und dem Strömungsradius an der Messstelle beeinflusst. Je

dickflüssiger das Substrat, desto mehr gleichen sich die Strömungsgeschwindigkeiten über alle Schichten hinweg aneinander an. Nur Schleusen nahe der Rührwerke, in dieser Messanordnung nur die Schleuse 1.3, zeigten noch den direkten Einfluss einer turbulenten Strömung auf. Ab der fünften Woche bildeten sich mehrere Stellen mit geringen Strömungen heraus: Schleuse 1.3 am Boden mit 1,19cm/s, Schleuse 2.4 am Boden mit 1,07cm/s, Schleuse 3.1 ab der fünften Woche in den untersten zwei Schichten mit 0,95cm/s bis 1,72cm/s und in der sechsten Woche in den untersten vier Schichten mit 1,19cm/s bis 1,59cm/s und zuletzt an der Schleuse 3.3 in den obersten beiden Bereichen mit 0,05cm/s bis 0,96cm/s. Der Geschwindigkeitsunterschied zwischen den verschiedenen Abstandsradien zur mittleren Betonstütze war in dünnflüssigen Substraten stark ausgeprägt. An den äußeren und mittleren Positionen 1.1, 1.3, 2.2 und 2.4 schwankten die Strömungsgeschwindigkeiten unterhalb von 2,5m in der ersten Woche zwischen 20cm/s und 40cm/s, im inneren Radius mit den Positionen 3.1 und 3.3 hingegen zwischen 10cm/s und 25cm/s. In der sechsten Woche verliefen alle Messkurven in einem ähnlich linearen Muster mit Geschwindigkeiten am Fermenterboden von 1,07cm/s bis 4,13cm/s und unter der Oberfläche von 0,05cm/s bis 17,52cm/s. Die Ausnahme bildete hier die Schleuse 1.3 mit einer klaren Ausbuchtung auch noch in der sechsten Woche von 37,36cm/s.

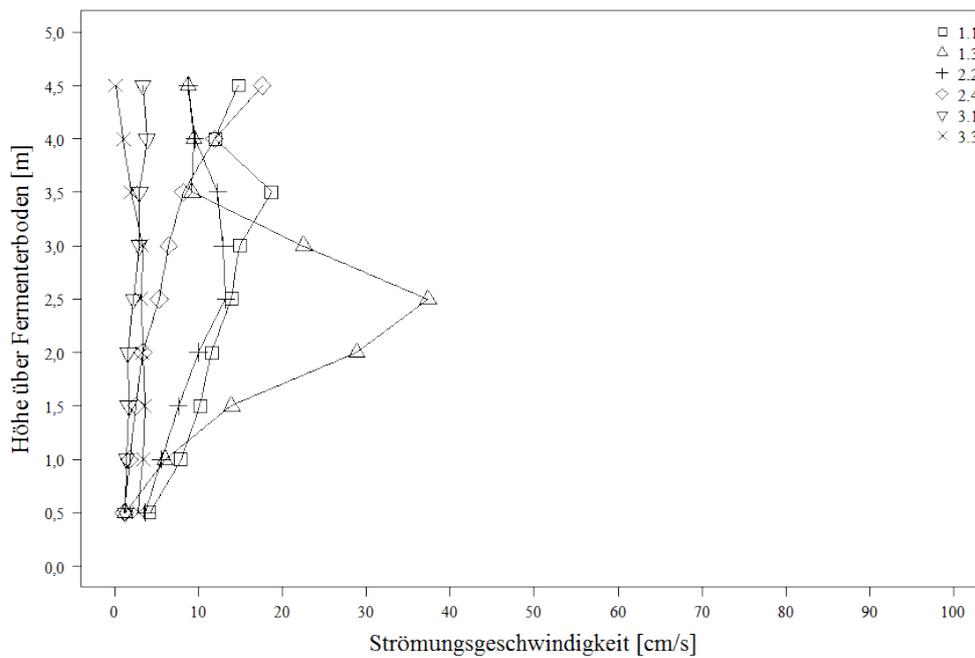
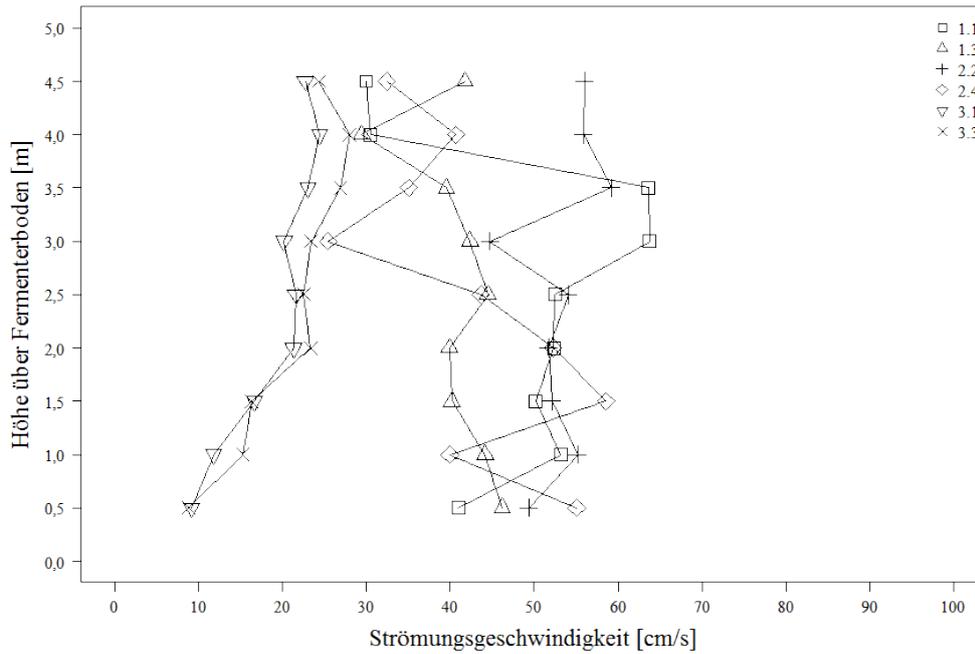


Abbildung 8: Strömungsgeschwindigkeiten in der ersten (oben) und sechsten Woche (unten)

Der Einfluss der Trockensubstanz des Gärsubstrates auf die Strömungsgeschwindigkeit konnte ebenfalls im intermittierenden Betrieb deutlich gemessen werden. Hierbei wurde die Praxis simuliert in der die Rührwerke nicht durchgängig betrieben werden, sondern zeitweise zugeschaltet werden. Hierzu wurde eine Messstelle (2.2 in 2,5 m Höhe) ausgewählt. In Woche eins war eine Strömungsgeschwindigkeit noch rund 25 Minuten nach Ausschalten der Rührwerke vorhanden. In Woche sechs hingegen

kam das Substrat nach rund 1,5 Minuten zum Stillstand. Deutlich ist auch eine Abnahme der Anfangsgeschwindigkeit im Zeitverlauf zu erkennen. Mit Fortschreiten der Versuchsdauer von nahezu 50 cm/s auf einen Bereich zwischen 10-15 cm/s. Für die Praxis bedeutet dies, dass der Fermenterinhalt nicht wie so oft vermutet nach Aussetzen der Rührwerke noch längere Zeit „nachdreht“, sondern bei hohen TS-Gehalten bereits nach wenigen Sekunden ganz zum Stillstand kommt.

Ähnliches wurde nach dem Einschalten der Rührwerke nach einer Rührpause und einem vollständigen Ruhen des Fermenters gemessen. Die Messstelle 1.1 in der mittleren Position 5 (Höhe 2,5m) zeigte über alle sechs Messwochen hinweg einen ähnlichen Anfangsverlauf, mit einer kurzzeitigen negativen Spitze auf eine Geschwindigkeit von bis zu -19,14cm/s in der ersten Woche (Abbildung 10). Nach 15s waren alle Werte wieder im positiven Bereich. Der Ausschlag reduzierte sich auf -3,31cm/s in der sechsten Woche. Es folgte ein relativ linearer Anstieg bis zu einem Zeitpunkt, der nach 60s bis 80s erreicht wurde, ab welchem die Strömungsgeschwindigkeit stark anstieg. In der ersten Woche von 4,95cm/s auf 33,46cm/s, um danach wieder auf 17,30cm/s abzufallen. Dieser Verlauf wiederholte sich, auf einem höheren Geschwindigkeitsniveau, zwischen 150s und 220s sowie 260s und 330s. Diese wellenförmige Beschleunigung ist auch in den folgenden Wochen sichtbar, allerdings weniger ausgeprägt. Ab der vierten Woche verblieb der Geschwindigkeitsanstieg nach der ersten negativen Spitze auf einem relativ linearen Verlauf bis auf die Endgeschwindigkeit. In dünnflüssigen Substraten mit geringer Viskosität erschwerten turbulente Strömungen hinter den Rührwerken die Ermittlung der Endzeiten für die Anfahrzeiten. In der ersten Woche war die gemessene Geschwindigkeit nach 160s mit 55,64cm/s ähnlich hoch wie nach 360s mit 55,34cm/s. Ein vergleichbarer Zeitverlauf ist in der zweiten Woche ersichtlich. Es war nicht möglich aus den Daten eine definitive Endzeit auszulesen. Mit steigender Viskosität verbesserte sich die Messgenauigkeit. In der sechsten Woche schwankte die Geschwindigkeit in den letzten 130 aufgezeichneten Sekunden zwischen 8,69cm/s und 13,42cm/s. Zusammenfassend kann ausgesagt werden, dass sich mit steigendem Trockensubstanzgehalt die Abklingzeiten stark verkürzen und auch beim Anlaufen der Rührwerke geringere Spitzengeschwindigkeiten gemessen werden.

Ziel dieser Untersuchung war es, erstmalig ein möglichst umfassendes Bild der Strömungen in einem Biogasfermenter aufzuzeigen, die Anfahr- und Abklingzeiten zu ermitteln und die Ergebnisse mit den Daten zur Prozessbiologie, den TS- und oTS-Gehalten und der Viskosität abzugleichen. Es konnte im Verlauf der Versuchsdurchführungen gezeigt werden, dass die Geschwindigkeiten im Fermenter und die Viskosität des Substrates sehr stark von steigenden TS-Gehalten beeinflusst werden und insbesondere auf der Höhe des Fermenterbodens auch bei dünnflüssigen Substraten stark abnehmen. Die Abklingzeiten reduzierten sich über die sechs Wochen um bis zu 95 % und die Zeit- und Geschwindigkeitsunterschiede in den einzelnen Schichten passten sich im gesamten Fermenterinhalt aneinander an.

Die Messapparatur, das Rohrviskosimeter und das Betondach mit den eingelassenen Schleusen an der Biogasanlage auf dem „Unteren Lindenhof“ erlaubten die Datenaufnahme direkt im laufenden Betrieb. Diese Ausarbeitung beschränkte sich auf das Sammeln von Zahlenwerten für eine erste Grundlage in der Strömungsanalyse im Praxismaßstab und diente in erster Linie als Basis für weitere Untersuchungen. Die Messung der Strömungsgeschwindigkeit an einem Praxis-Biogasfermenter in dieser Auflösung ist bislang einmalig und liefert in Kombination mit den Daten der Nährstoffverteilung wertvolle Hinweise auf eine optimale Positionierung der Prozesssensoren. Aufbauend auf diesen Versuchen im kontinuierlichen Standardbetrieb werden nun weitere Messreihen folgen welche diese Daten bei flexiblem Anlagenbetrieb erheben.

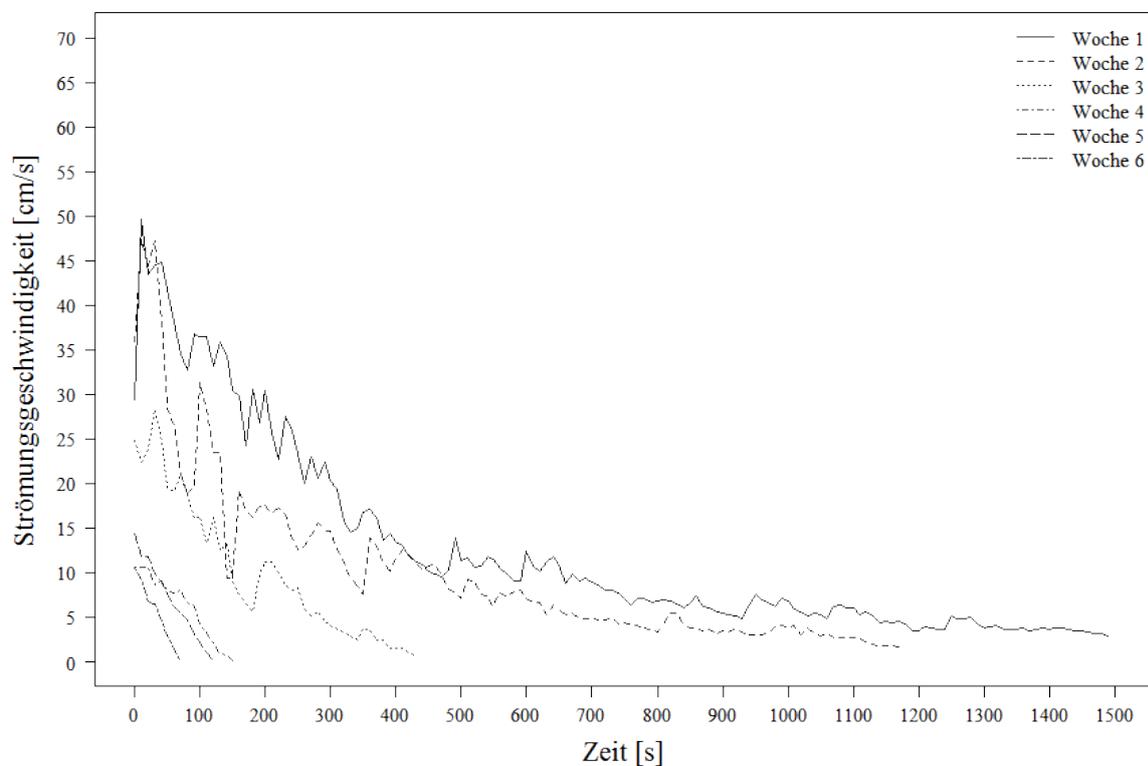


Abbildung 9: Abklingzeiten an der Schleuse 2.2 auf der Höhe von 2,5m

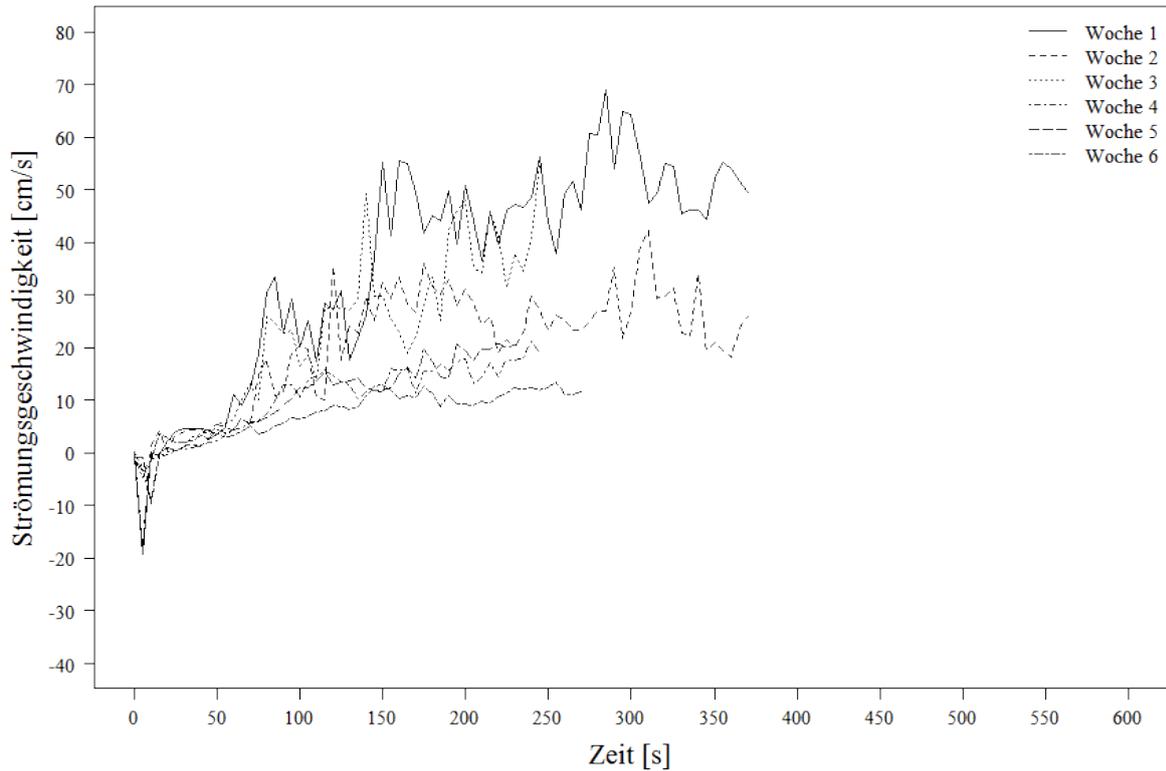


Abbildung 10: Anfahrzeiten an der Schleuse 1.1 auf 2,5 m Höhe

Weitere Untersuchungen an der Praxisforschungsanlage

Nach Umbau und Installation eines leistungsfähigeren Blockheizkraftwerkes können seit Februar 2016 größere Raumbelastungen im Fermenter gefahren werden. Vorab werden die im Projektantrag beschriebenen Versuche zur Nährstoffverteilung mit natürlichen Tracern zur Erhöhung der Säurekonzentration durchgeführt. Hierfür sollen zwei unterschiedliche Rührvarianten getestet werden um die Durchmischung im Fermenter beurteilen zu können. Fermenter 1 wird hierzu konstant gefüttert und an den Versuchstagen wurde mit Propionsäure konserviertes Getreide hinzugegeben. Die Getreidemenge wurde so ausgewählt das die Konzentration der Propionsäure im Biogasfermenter sich um 200 mg/kg erhöhte. In Variante I wurde lediglich mit dem Tauchmotorrührwerk gerührt. In Variante II hingegen wurden beide Rührwerke betrieben. Die Rührintervalle wurden so angepasst, dass in beiden Varianten dieselbe Rührleistung an elektrischer Energie in den Fermenter eingetragen wurde. Nach erfolgter Hinzugabe und der damit einhergehenden erhöhen der Propionsäurekonzentration wurden an 2 Messstellen über einen Zeitraum von 4 Stunden Proben gezogen um die Durchmischung bewerten zu können.

Abbildung 11: Propionsäurekonzentration an Messstelle 2.2 U

Abbildung 12: Propionsäurekonzentration an Messstelle 2.4 U

In Abbildung 11 und Abbildung 12 ist die jeweilige Messstelle abgebildet. Als horizontale Linie dargestellt ist die Konzentration welche sich anhand der zugegeben Menge an Getreide einstellen sollte. Gut ersichtlich ist an beiden Messstellen, dass sich in Variante II die Konzentration bereits nach sehr kurzer Zeit einstellt. Dies deutet auf eine sehr gute Durchmischung im Fermenter hin. In Variante I ist eine langsame Erhöhung der Propionsäurekonzentration zu sehen. Entsprechend der Rührintervalle und der eingebrachten Leistung in den Fermenter ist eine Verteilung von Nährstoffen in dieser Variante nach rund 120min eingestellt. Entsprechend der Wirkrichtung eines TMRs ist jedoch nicht zu empfehlen nur mit diesem den Fermenter zu betreiben. Hingegen in Variante II die sehr schnelle Durchmischung eingestellt war ist hier ein Betrieb beider Rührwerke mit verminderter Rührzeit empfehlenswert.

Zum Ende des Jahres 2016 konnte der flexible Anlagenbetrieb in einem Fermenter realisiert werden. Es wurde über einen Zeitraum von 4 Wochen der Fermenter einmal pro Tag gefüttert. Die tägliche Fütterungsmenge von 9.000 kg wurde dem Fermenter zu dosiert. Der entsprechende Übergang von der Fütterung aus dem Normalbetrieb (alle 2 Stunden) hinzu der Flexfütterung (einmal pro Tag) wurde ohne Umstellungsphase realisiert.

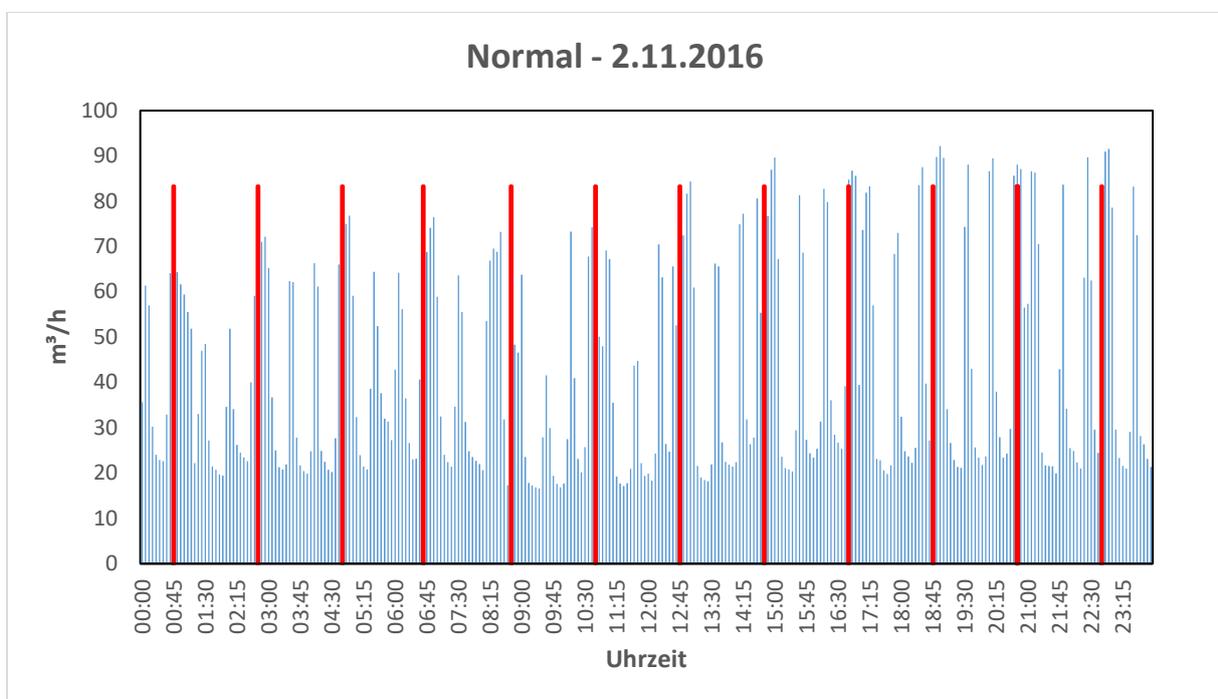


Abbildung 13: Gasproduktion bei normaler Fütterung, Fütterungszeitpunkte sind rot dargestellt

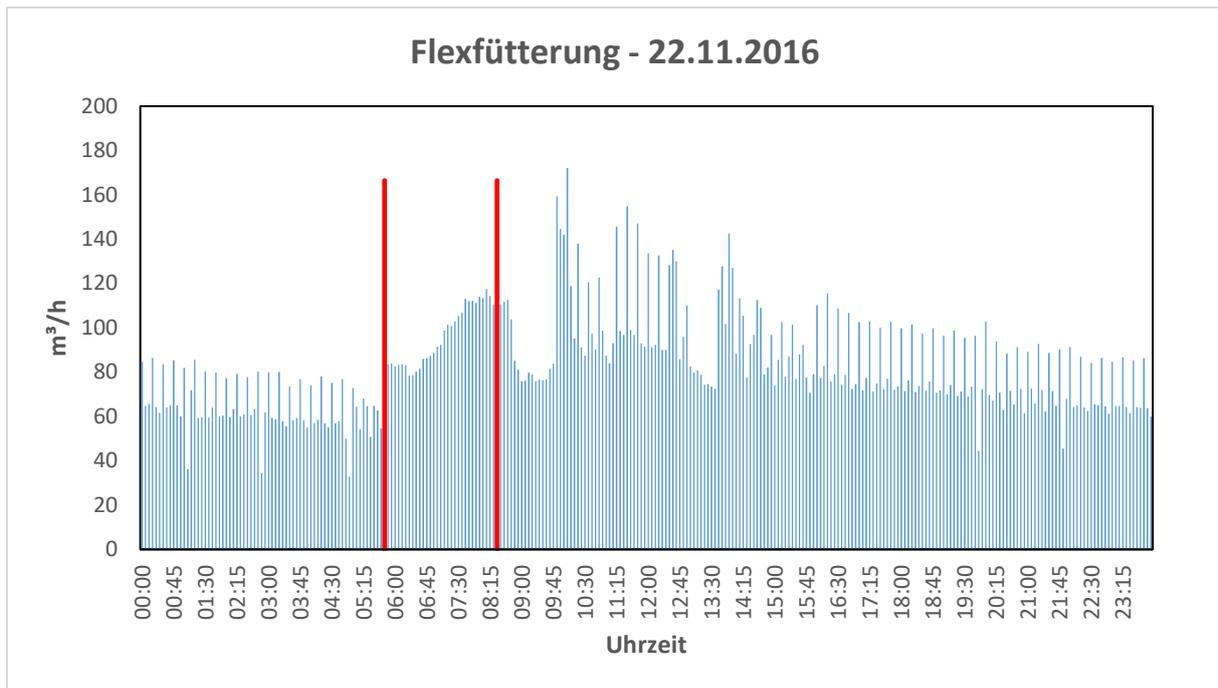


Abbildung 14: Gasproduktion bei flexibler Fütterung, rot dargestellt der Zeitraum der Fütterung

In den Abbildung 13 und Abbildung 14 ist die Gasproduktion je Stunden in 5minuten Intervallen dargestellt. In Abbildung 13 ist ein gesamter Tag bei normale Fütterung aufgezeigt, die roten Balken zeigen die Fütterungsintervalle. Hierbei ist die gleichmäßige Gasproduktion über den Tag gesehen gut zu erkennen. Lediglich die Rührintervalle bei Fütterung und Umpumpvorgängen sowie bei der normalen Taktung zeigen einen erhöhten Peak, da hierbei über einen längeren Zeitraum gerührt wird und somit das Gas entsprechend ausgetrieben wird. In Abbildung 14 ist hingegen die Gasproduktion bei flexibler Fütterung aufgezeigt. Hierbei sind lediglich die roten Balken nicht einzelne Fütterungszeitpunkte, sondern diese schließen den Zeitraum der Gesamtfütterung ein. Gut zu sehen ist hier der Gasaustrieb während des gesamten Fütterungszeitraumes. Wenn man sich die Stundenwerte der Gasproduktion anschaut, ist ein deutlicher Anstieg der Gasmenge im Zeitraum 10 Uhr bis 14 Uhr zu sehen. Die Gasmenge vor der Fütterung liegt bei $60\text{m}^3/\text{h}$ und wird durch die Fütterung auf über $100\text{m}^3/\text{h}$ gesteigert. Dies hohe Niveau kann über einen Zeitraum von ca. 4 Stunden gehalten werden, bis im Anschluss die Gasmenge langsam abnimmt und am folge Tag wieder auf dem Niveau von $60\text{m}^3/\text{h}$ liegt.

Während des gesamten Zeitraumes wurde die Multipositionssensorik der TU-Berlin entsprechend den Vorgaben in ihrer Position verändert. Die gesamten Ergebnisse wurden bereits mit den Kollegen besprochen und ergänzende Daten der Anlagensteuerung wurden ihnen bereitgestellt. Ebenfalls konnten aus diesem Anlagenbetrieb wichtige Daten für den weiteren Partner, SOTA-Solutions, erzeugt und übermittelt werden.

Das in diesem Arbeitspaket angestrebte Ziel, Identifikation kritischer Zonen, konnte mittels der unterschiedlichsten Untersuchungen erreicht werden. Anhand der Untersuchungen konnten sowohl Zonen mit unterschiedlichen Geschwindigkeitsprofilen, als auch Zonen mit unterschiedlichen Nährstoffverteilungen aufgezeigt werden.

- **Arbeitspaket 2:** Installation und Validierung des akustischen Wellenleiters und der Nahinfrarotspektroskopie
- ✓ Erfassung vorhandener Messsysteme, Bauteilen und Software
- ✓ Versuche mit dem akustischen Wellenleiter abgeschlossen
- ✓ Test und Auswahl eines Nahinfrarotspektroskopes und Erarbeitung eines Messkonzeptes
- ✓ Langzeitdatenaufnahme der Inputsubstrate mittels Nahinfrarotspektroskopie

In Vorbereitung auf die Erreichung des Ziels der Entwicklung eines kostengünstigen und wartungsarmen Sensorsystems zur Beurteilung der biologischen Parameter bei flexibler Substratbeschickung, wurden die bereits am Markt vorhandenen NIRS-Sensoren begutachtet. Entsprechende vergleichbare Sensoren, welche in der Landtechnik in Verwendung sind, wurden entsprechend recherchiert und zur Prüfung hinterlegt. Hierbei konnte ein möglicher Kooperationspartner aus der Industrie gefunden werden. Dabei können kostengünstig die notwendigen Sensoren beschafft und installiert werden. Ebenso sind bereits erste Kalibrationskurven vorhanden, welche entsprechend verwendet wurden. Mittels des Sensors können die in die Biogasanlage zugeführten Substrate auf den Trockensubstanzgehalt sowie weitere Inhaltsstoffe (Stärke, Zucker, Rohprotein, Rohfaser, ADF, NDF) analysiert werden. Somit ist ein erster Ansatz für die Fütterung nach TS gegeben. Aufgrund des Substratgemisches, welches sich im Feststoffeintrag befindet, ist es nicht möglich den Sensor dort direkt zu platzieren und die Fütterung direkt zu beeinflussen. Vor erste sollten die in den Feststoffeintrag eingebrachten Einzelsubstrat beprobt und analysiert werden. Dadurch ist es möglich erste Erfahrungen mit unterschiedlichen Qualitäten der Silagen zu sammeln und für weitere Schritte entsprechend die Planungen anpassen. Die angedachte Installation eines akustischen Wellenleiters an der Forschungsbiogasanlage ist nach Rücksprache mit dem Hersteller nur eingeschränkt realisierbar.

An der Landesanstalt für Agrartechnik und Bioenergie wurde im Rahmen eines anderen Projektes ein Schallwandler-Sensor der Firma Sensaction beschafft. Nach Beendigung der Versuche dies Projektes konnte der Sensor im Rahmen dieses Projektes benutzt werden. Da Vorversuche zeigten, dass Gärsubstrat sowie separiertes Substrat nicht geeignet waren, wurde auf Hydrolysat aus den Laborbiogasanlagen zurückgegriffen. 10 Liter Hydrolysat wurden mit 30 Liter Wasser vermischt und so eine Essigsäurekonzentration von 1.000 ppm eingestellt. Mittels 60%-iger-Essigsäure, 99%-iger-Buttersäure und 99%-iger-Propionsäure wurden unterschiedlichste Konzentrationen von 1.000ppm bis hin zu 15.000ppm eingestellt. Die gemischten Hydrolysate wurden im Labor auf Chemischen Sauerstoffbedarf (CSB) sowie flüchtige Fettsäuren, Zuckerverbindungen und Alkohole untersucht.

Tabelle 2: Bestimmtheitsmaße des Zusammenhangs zwischen der Schallgeschwindigkeit und dem Essigsäureäquivalent, der CSB-Konzentration sowie der Einzelsäurekonzentrationen

Parameter	R ²	R ²	R ²
	Essigsäure	Buttersäure	Propionsäure
Essigsäureäquivalent	0,25	0,70	0,81
CSB-Konzentration	0,27	0,66	0,79
Essigsäure	0,25	-	-
Buttersäure	-	0,66	-
Propionsäure	-	-	0,79

Die Bestimmtheitsmaße schwanken sehr zwischen den einzelnen Säuren, so weist Essigsäure das geringste Bestimmtheitsmaß mit 25% bei dem Essigsäureäquivalent und der Essigsäurekonzentration sowie mit 27% bei der CSB-Konzentration auf (Tabelle 2).

Da bereits im Vorhinein mit dem Sensorhersteller gesprochen wurde, war vor Versuchsbeginn klar, dass mit reinem Biogassubstrat keine Ergebnisse erzielt werden können. Jedoch zeigt der dargestellte Versuch, dass bei entsprechenden Laboranlagen, diese Art von Sensor durchaus zum Einsatz kommen könnte, für die Praxis hingegen wird es in naher Zukunft noch Forschungsbedarf geben.

Die Inbetriebnahme des NIRS-Sensor erfolgte im Sommer 2016. Über einen Versuchszeitraum von 194 Tagen wurden an der Forschungsbiogasanlage die Inputsubstrate Maissilage sowie Grassilage auf ihren TS-Gehalt analysiert. Hierzu wurde bei jeder Befüllung des Feststoffdosierers von den entsprechenden Substraten eine repräsentative Probe entnommen. Es wurde aus jeder Schaufel, welche in den Feststoffdosierer entleert wurde, an mehreren Stellen eine kleine Probe entnommen und in ein Gefäß gefüllt. Bei mehreren Schaufeln und somit mehreren Proben wurde so ein Querschnitt über die gesamte eingebrachte Menge an Substrat erzielt. Im Anschluss an diese Probenentnahme wurde die gesamte Probe mittels des Nahinfrarotsensors direkt vor Ort gemessen.

Die Trockensubstanzgehalte der Inputmaterialien schwanken sehr stark über den Versuchszeitraum (Tabelle 3). Die in Abbildung 13 und 14 gezeigten Kurven geben einen ersten Überblick über unterschiedlichen Qualitäten.

Tabelle 3: Mittelwerte sowie Standardabweichung der Silagen

	Grassilage	Maissilage
Mittelwert TS [%]	39,6	34,3
Standabweichung	8,37	4,55

Bei der Planung der Fütterungsrationen bei Biogasanlagen wird meist von einem konstanten TS-Gehalt der Inputsubstrate ausgegangen. Dieser Wert ist in beiden folgenden Abbildungen als orangene horizontale Linie abgebildet. Die tatsächlich gemessenen TS-Gehalte der einzelnen Substrate sind entsprechende dazu aufgetragen. Deutlich zu sehen sind die sehr hohen Schwankungen über den Versuchszeitraum. In der Maissilage wurde von Versuchsbeginn bis Ende Oktober eine Maissilage gefüttert welche einen deutlich niedrigeren TS-Gehalt aufwies als der bei der Planung angenommenen TS-Gehalt. Aufgrund dessen konnte die geplante Leistung des BHKWs nicht entsprechend angerufen werden, da die Gasausbeute nicht erreicht wurde. Ab November bis zum Ende des Versuchszeitraumes war der TS-Gehalt deutlich über dem TS-Gehalt der Planung, sodass in diesem Zeitraum ein entsprechend höherer Gasertrag erfolgte und somit das BHKW mit einer erhöhten Leistung gefahren werden konnte.

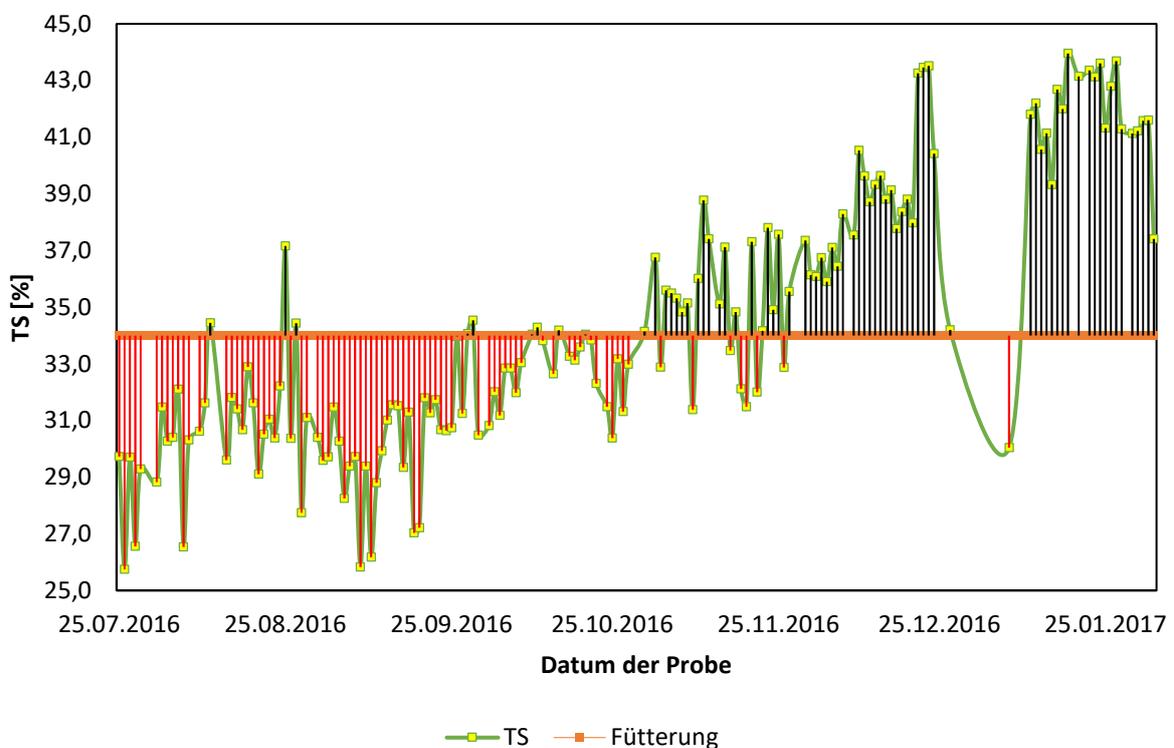


Abbildung 15: TS-Gehalte und Defizit bei Fütterung mit Maissilage

Die Abbildung 16, welche die Grassilage abbildet, ist analog zur vorangegangenen Abbildung aufgebaut. Deutlich zu sehen ist hier, dass sich der TS-Gehalt der Grassilage fast über den gesamten Versuchszeitraum über halb des in der Planung angenommenen TS-Gehalt befindet. Es konnte somit eine erhöhte Gasproduktion stattfinden, welche wiederum eine erhöhte Leistung nach sich zieht.

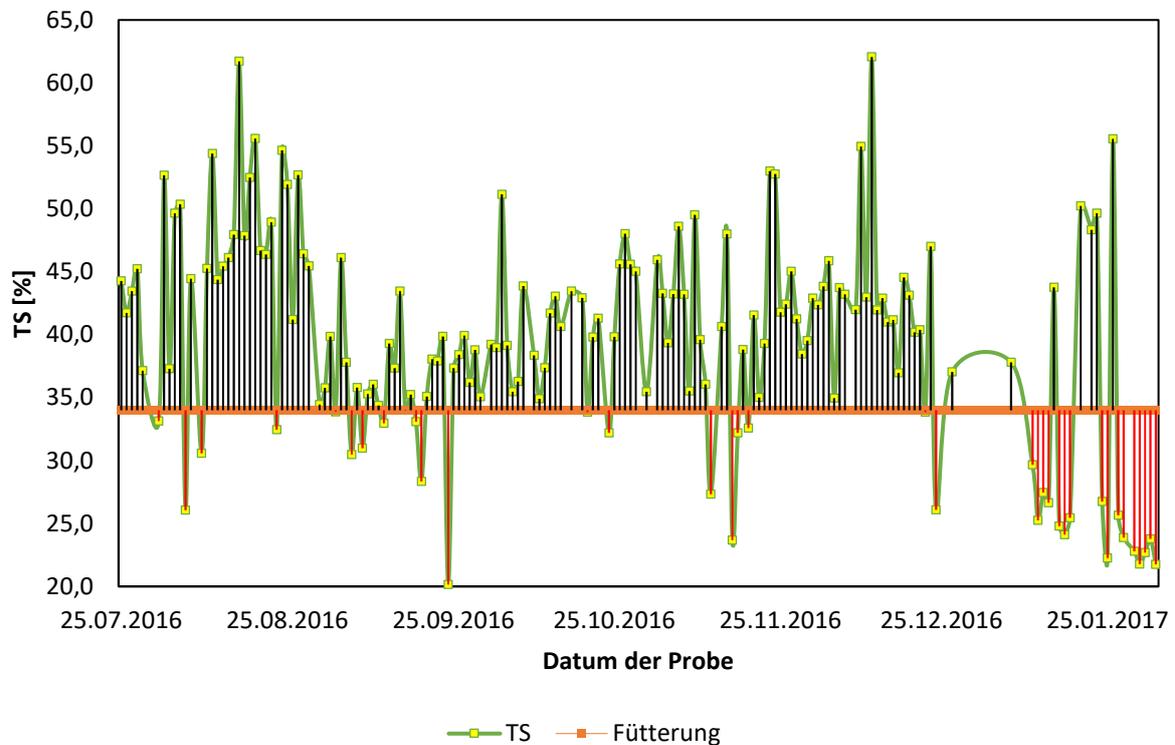


Abbildung 16: TS-Gehalte und Defizit bei Fütterung mit Grassilage

Schwankungen in der Substratqualität werden in der Praxis eher selten bemerkt und entsprechend kann darauf nicht reagiert werden. Anhand der dargestellten Ergebnisse kann das Potential von regelmäßigen Analysen gut aufgezeigt werden. Eine Substrateinsparung kann durch angepasste Fütterungsmengen gezeigt werden. Aber auch eine Leistungsreduzierung durch veränderte Inputsubstrateigenschaften kann mittels angepasster Substratplanung dargestellt werden.

Durch die erhobenen Messwerte und die damit verbundenen Ergebnisse konnte dem Sensorhersteller das Potential des Sensors verdeutlicht werden. Im Rahmen der Weiterentwicklung wurde nun auch die Messung des Aschegehaltes realisiert, sodass fortan direkt die Methanproduktion ermittelt werden kann. Für die Praxis bedeutet dies, dass bei einzelnen Substraten direkt die mögliche Methanausbeute errechnet werden kann. Bei regelmäßigen Substratkontrollen kann man so sehr schnell auf schwankende Substrateigenschaften reagieren und entsprechend die Substratzusammensetzung oder auch die zu dosierende Substratmenge verändern. Dadurch kann das BHKW entsprechend den Vorgaben die Energie exakt produzieren.

Die seitens des Hersteller zur Verfügung gestellten Kalibrationskurven sind für den bisher angedachten Einsatz bei Landwirten und Lohnunternehmern sinnvoll, stellen jedoch für die Biogasbranche nicht das optimalste Leistungsspektrum dar. So können derzeit Mais-, Gras- und Ganzpflanzensilage analysiert werden. Des Weiteren sind seit geraumer Zeit auch flüssig Gülle aus Schweine- sowie Rinderhaltung und das Gärsubstrat aus Biogasanlagen messbar. Um beim Einsatz in Biogasanlagen nicht nur Teile des Inputsubstrates messen zu können ist es erfindlicher in dieser Richtung weiter zu forschen. So stellen Pferdemist und andere Reststoff einen deutlichen Teil der Inputsubstrate dar. Auch das messen von Substratgemischen könnten in Zukunft von Bedeutung sein.

Als weiteren Punkt dieses Versuches ist es ein Sensor direkt in die Pumpstation der Forschungsbiogasanlage einzubauen umso auch die flüssigen Inputsubstrate messen zu können. Zusätzlich zu den Inputsubstraten ist es dann auch möglich im laufenden Betrieb entsprechende Messungen der einzelnen Fermenter durch zu führen. Damit ist es möglich den aktuellen Zustand der Prozessbiologie zu analysieren und zu beschreiben.



Abbildung 17: NIRS-Sensor eingebaut in Pumpstation

Für den Einbau des NIRS-Sensors in die Pumpstation musste diese umgebaut werden. Der Umbau konnte aus betrieblichen Gründen erst gegen Ende des Jahres 2017 erfolgen. Ebenso gab es Probleme

bei der Herstellung des Sensors, weshalb dieser seitens des Lieferanten erst im Dezember 2017 geliefert wurde. Nach erfolgreichem Umbau der Pumpstation und entsprechendem Einbau des Sensorrohres und des Sensor, wurde dieser in Betrieb genommen (Abbildung 17). Im Rahmen des regulären Anlagenbetriebes und der gleichzeitigen Messungen stellen sich diverse Probleme heraus (Abbildung 18).



Abbildung 18: Dichtung zwischen Pumpstation und des Sensorrohr

Im Rahmen der Messungen des letzten Versuches wurde der Sensor entsprechend eingesetzt. Trotz der auftretenden Probleme, welche in unregelmäßigen Abständen auftraten wurden erste Messungen im Online-Verfahren während des Anlagenbetriebes durchgeführt. Parallel zu diesen Messungen wurden händisch Proben gezogen, welche im Labor analysiert werden um einen Vergleich zwischen Sensor und Laboranalytik aufzuzeigen.

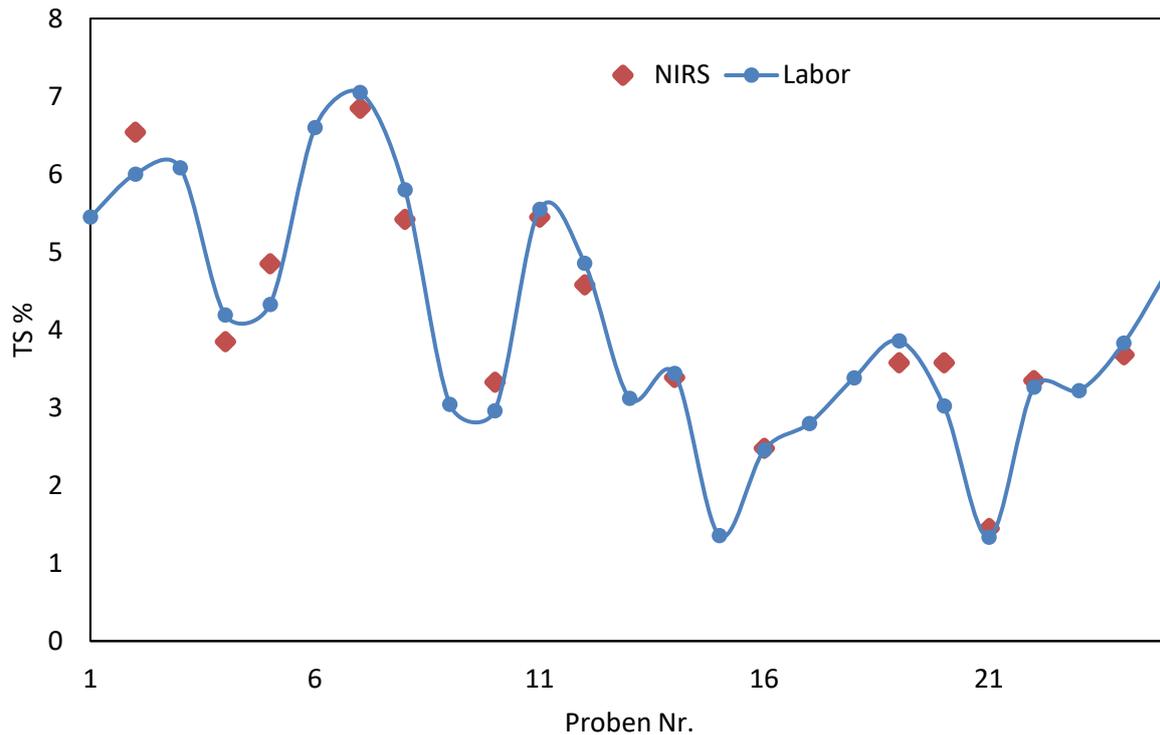


Abbildung 19: Analysedaten der Rohgülle mittels NIRS sowie Labor

Die in Abbildung 19 gezeigten Messwerte stammen aus einem Zeitraum von 13 Wochen. Die Gülle welche auf dem gesamten Versuchshof anfällt und zur Fütterung der Biogasanlage dient, wird in einer Vorgrube an der Biogasanlage vorgehalten. Aus den Stallungen wird 1-2 Mal die Woche Gülle in diese Vorgrube gefördert, sodass immer eine ausreichende Menge zur Verfügung steht. Über den Versuchszeitraum hinweg wurde wöchentlich 2 Mal die Vorgrube mit neuer Gülle befüllt. An diesen Zeitpunkten wurden auch die Analysen durchgeführt, da bei keiner Neubefüllung sich die Zusammensetzung kaum ändert. Neben einer Probe für die Untersuchung im Labor der Universität wurde auch mittels NIRS-Sensors gemessen. Abbildung 19 zeigt die entsprechenden Messwerte der Labordaten und des Sensors. Es sind deutliche Schwankungen des TS-Gehaltes zu sehen. Welche auf verschiedenste Ursachen zurückzuführen sind. Dies wäre einerseits, dass bei Regenereignissen das Wasser der Stallungen über die Gülle entsorgt wird und somit ebenfalls an der Biogasanlage verwertet wird. Andererseits wäre dies auf die Reinigung der Schweineställe zurück zu führen. Aber auch Stroh welches zur Beschäftigung in der Schweinehaltung eingesetzt wird hat einen Einfluss auf den TS-Gehalt. All diese Faktoren können aber seitens der Biogasanlage nicht gesteuert bzw. beeinflusst werden. Nach einer gewissen Zeit zeigte sich, dass die Sensorscheibe verklebte und somit nicht an jedem Probenstag einen entsprechenden Messwert des Sensors zur Verfügung steht. Substrat welches nach Beendigung des Pumpvorganges an der Sensorscheibe haftet trocknet an und wird nicht mehr durch das im nächsten Pumpvorgang vorbeifließende Substrat beseitigt. Die Auswertung der Sensordaten konnte nicht zeitgleich zur Probenahme durchgeführt werden und somit war eine nachträgliche Messung nicht möglich.

Der Einsatz von Sensorik an Biogasanlagen konnte in diesem Arbeitspaket dargestellt werden. Vielversprechend erwies sich der NIRS-Sensor in Bezug auf eine verbesserte Fahrweise von Biogasanlagen, da nicht nur nach Gewicht, sondern auch oTS-bezogen gefüttert werden kann und somit Substratschwankungen ausgeschlossen werden können. Eine Echtzeitmessung von Substratmischungen kann aktuell nicht durchgeführt werden. Jedoch können die Einzelsubstrate gemessen werden. So kann bei täglicher Befüllung der Feststoffeinträge die einzelnen Substratkomponenten ermittelt werden und entsprechend für die weitere Fütterungsplanung herangezogen werden. Bei flexibler Substratbeschickung sind somit tägliche Schwankungen der Substratinputstoffe durch angepasstes Fütterungsmanagement ausgeschlossen. Für Praxisanlagen ist für eine schnelle und kostengünstige Umsetzung ein System zu empfehlen, welches stationär eingesetzt werden kann.

- **Arbeitspaket 3:** Überprüfung der entwickelten Modelle in den Großmaßstab
- ✓ Vorbereitungen zur flexiblen Fahrweise an der Biogasanlage
- ✓ Untersuchung der Rührwerksmodelle mittels Prozesstomographie
- ✓ Datenaufnahme zur Modellentwicklung
- ✓ Langzeit-Datenaufnahme zur Modellanpassung bei flexibler Fahrweise

Im Rahmen dieses Arbeitspakets konnte mit dem Partner der TU Berlin ein erster Versuch durchgeführt werden. Hierbei wurde der Multisensoriksensor auf der Forschungsbiogasanlage Unterer Lindenhof installiert und in Betrieb genommen. Der Sensor wurde mehrmals am Tag in seiner Position geändert, so dass in unterschiedlichen Höhen Messwerte erhoben werden konnten. Zu Beginn des Versuches wurde der Fermenter im Standardbetrieb betrieben. Dies bedeutet eine gleichbleibende Fütterung, alle 2 Stunden, über den Tag hinweg. Im Anschluss daran wurde auf die flexible Fütterung umgestellt. In Abbildung 20 ist die produzierte Gasmenge über 4 Versuchstage dargestellt. Ziel war es während der flexiblen Fahrweise im Fermenter kritische Zustände zu erzeugen und zu erfassen. Später können draus Regelungsstrategien abgeleitet werden. Entsprechende Ergebnisse dieses Versuches können im Zwischenbericht der TU Berlin entnommen werden.

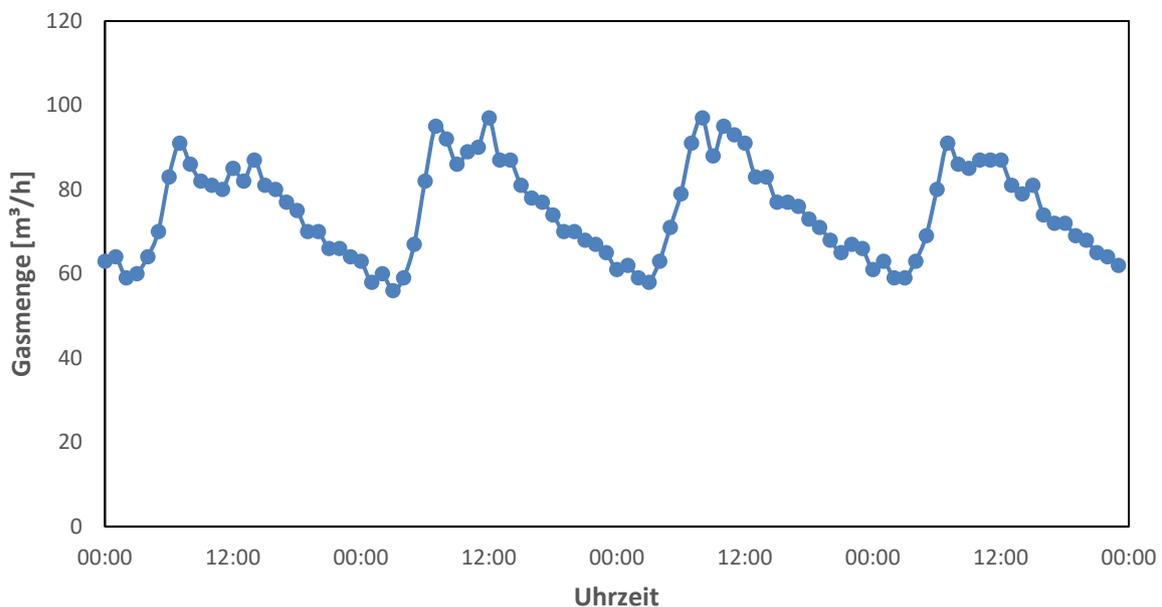


Abbildung 20: Gasmenge über 4 Versuchstage hinweg bei flexibler Fütterung

Um die im Praxismaßstab erhobenen Daten zur Nährstoffverteilung und Strömungsgeschwindigkeit zu evaluieren waren Untersuchungen beim Fraunhofer Institut in Dresden geplant. Dort wurden mittels

Computertomographie ein Strömungsbild im Versuchsreaktor, welcher im Maßstab dem Praxisfermenter entspricht, erstellt und mit den Messungen an der Forschungsbiogasanlage verglichen. Hierfür waren maßstabsgetreue Modelle der in der Praxis befindlichen Rührwerke erforderlich. Aufgrund der dreidimensionalen Form der Rührflügel war eine einfache Fertigung nicht möglich. Mit der Firma Wehl Group wurde ein Partner gefunden, welcher mittels selektivem Lasersintern ein Modell der vorher angepassten CAD-Daten erstellen konnte (Abbildung 21). Das Modell ist somit eine 1zu1 Kopie des Originals und aus dem Material Polyamid, welches für den Einsatz im Computertomographen sehr gut geeignet ist. Für den Einbau der Rührwerke im Versuchsreaktor mussten entsprechende Halterungen gefertigt werden. Ebenso wurden die Rührflügel entsprechend der Vorgaben gefertigt, lackiert und beschichtet. Es ist uns gelungen von allen Rührwerksherstellern von welchen die Rührtechnik an der Forschungsbiogasanlage verbaut ist Rohdaten zu erhalten um daraus Modelle anzufertigen.



Abbildung 21: Modelle der Rührwerke aus der Sinterproduktion

Die Untersuchungen im Labormaßstab beim Fraunhofer Institut in Dresden konnten vollständig abgeschlossen werden. Die Forschungsbiogasanlage der Universität Hohenheim wurde erstmals im Labormaßstab nachgebildet und entsprechende Untersuchungen durchgeführt. Die unterschiedlichen Rührwerkseinstellungen und –setups wurden auf Ihre Mischgüte sowie Strömungsgeschwindigkeit hin untersucht.

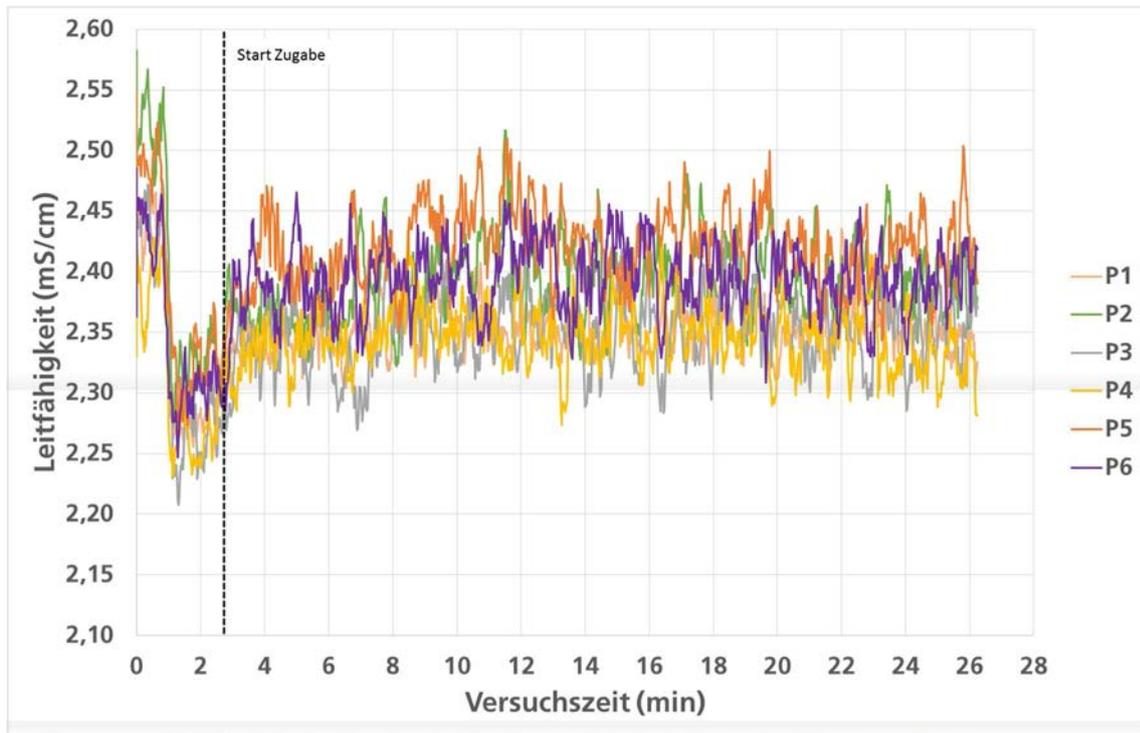


Abbildung 22: Leitfähigkeitsänderungen bei Versuch II: Flygt 3950 min⁻¹, Rema 810 min⁻¹

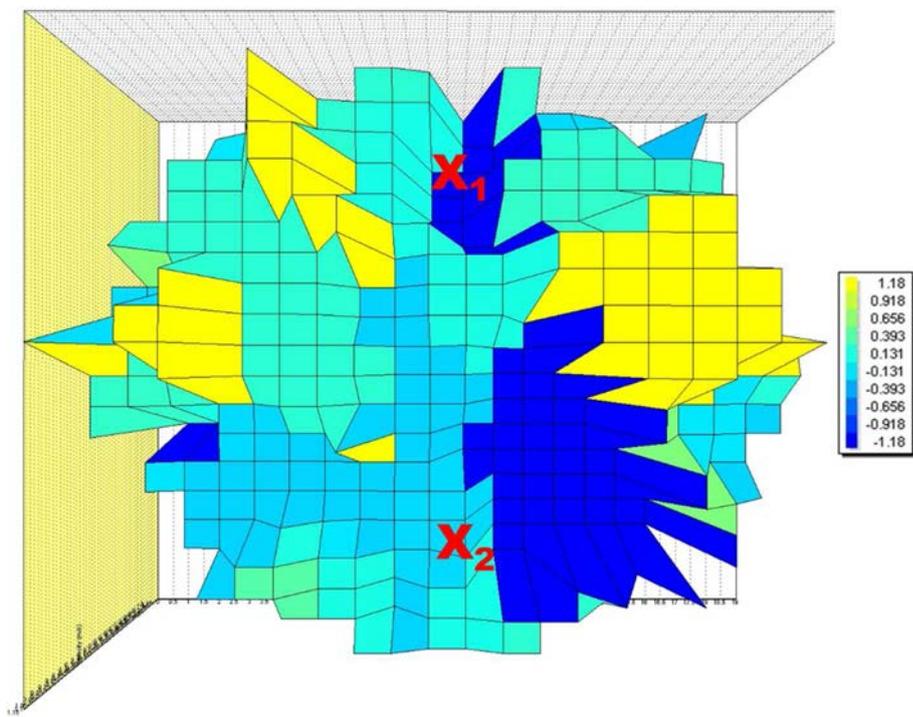


Abbildung 23: Axiales Geschwindigkeitsprofil in m/s Versuch II: Flygt (X2) 3950 min⁻¹, Rema (X1) 810 min⁻¹

Im Versuch II wurden das Rema sowie Flygt-Rührwerk zusammen betrachtet, so wie es im Fermenter 1 der Forschungsbiogasanlage bei jeder Substratdosierung stattfindet. Die Fraunhofer Kollegen beschrieben das Ergebnis wie folgt: „Abbildung 22 zeigt die Leitfähigkeitsänderungen für Versuch II. Die Zugabe erfolgte nach 2,7 min. Das Substrat wird direkt nach der Zugabe eingemischt. Unterschiede in den einzelnen Ebenen infolge der Substratzugabe werden, auch bei detaillierter Betrachtung des Zugabezeitraums nicht sichtbar. Die Substratzugabe erfolgte in direkter Nähe zum Propellerstrahl des Flygt-Rührwerks.“

Das Mischergebnis kann durch den optischen Eindruck während des Versuchs bestätigt werden. Sowohl in axialer Richtung als auch auf der Reaktoroberfläche war eine deutliche Strömungsbewegung erkennbar. Abbildung 23 zeigt das axiale Geschwindigkeitsprofil für Versuch II. Besonders hohe Geschwindigkeiten konnten in der Nähe des Flygt-Rührwerks gefunden werden. Die maximalen Geschwindigkeiten sind dabei deutlich höher anzunehmen als der hier maximal erfassbare Betrag der Geschwindigkeiten mit 1,18 m/s.“

Bei den weiteren Untersuchungen wurden noch die Kombination aus Flygt und Streisalrührwerk, sowie alle drei einzelnen Rührwerke untersucht. Die Kombination aus einem Tauchmotorrührwerk, hier des Herstellers Flygt, und einem langsam laufenden Schrägachsrührwerk stellte sich als beste Kombination heraus, wenn man die komplette Durchmischung des Fermenters betrachtet. Beim Betrieb des Tauchmotorrührwerks konnten die Erfahrungen aus der Praxis auch im Labor abgebildet werden. Hier wurde im Labor eine vertikale Durchmischung des Reaktorinhalts nur um das Rührwerk selbst beobachtet, axiale Geschwindigkeiten konnten ebenfalls nur um das Rührwerk selbst ermittelt werden. Somit werden die dosierten Substratmengen, welche direkt vor dem Rührwerk in den Fermenter eingetragen werden, vom Rührwerk gut mit dem restlichen Substrat durchmischt und mit den horizontalen Strömungen mitbewegt.

Entsprechende Erfahrungswerte aus 9 Jahren Betrieb der Forschungsbiogasanlage konnten bei diesen Untersuchungen bestätigt werden. Dennoch ist derzeit in direkter Vergleich von Ergebnissen aus der Praxis mit den Ergebnissen aus dem Labor nicht vollständig möglich. Am Beispiel der Strömungsgeschwindigkeit ist dies gut sichtbar. So werden Strömungsprofile an der Forschungsbiogasanlage in horizontaler Richtung gemessen und aufgezeichnet, wobei hingegen Strömungen im Laborreaktor nur in horizontaler Richtung ermittelt werden können.

Für die Modellanpassung im flexiblen Anlagenbetrieb wurden im Jahr 2017 die bisherigen Versuche für die flexible Fahrweise weiter ausgedehnt. Im ersten Schritt wurde über 3 Monate hinweg der Substrateinfluss und entsprechender Substratwechsel untersucht. Hierfür wurden beide Fermenter abwechseln mit den entsprechenden Einzelsubstraten gefüttert. Vor Versuchsbeginn fand eine Einfahrphase statt, hierbei wurden beide Fermenter identisch gefüttert. Die im Versuchszeitraum eingesetzte Menge wurde anhand der errechneten Methanproduktion eingestellt. Ziel war es bei allen Substraten eine gleiche Methanproduktion zu erhalten. Als Substrate kamen Maissilage, Grassilage, Getreideschrot, Pferdemist sowie Zuckerrüben zum Einsatz. Maissilage wurden 6.000kg je Tag gefüttert, Grassilage 6.400kg, Getreideschrot 2.450kg, Pferdemist 13.700kg sowie Zuckerrüben 4.500kg. Die täglich zu dosierende Menge wurde in einer Ration dem Fermenter zugeführt. Die an der Forschungsbiogasanlage installierte Fütterungstechnik ermöglicht den Vergleich von aufbereitetem Substrat zu nicht aufbereitetem Substrat.

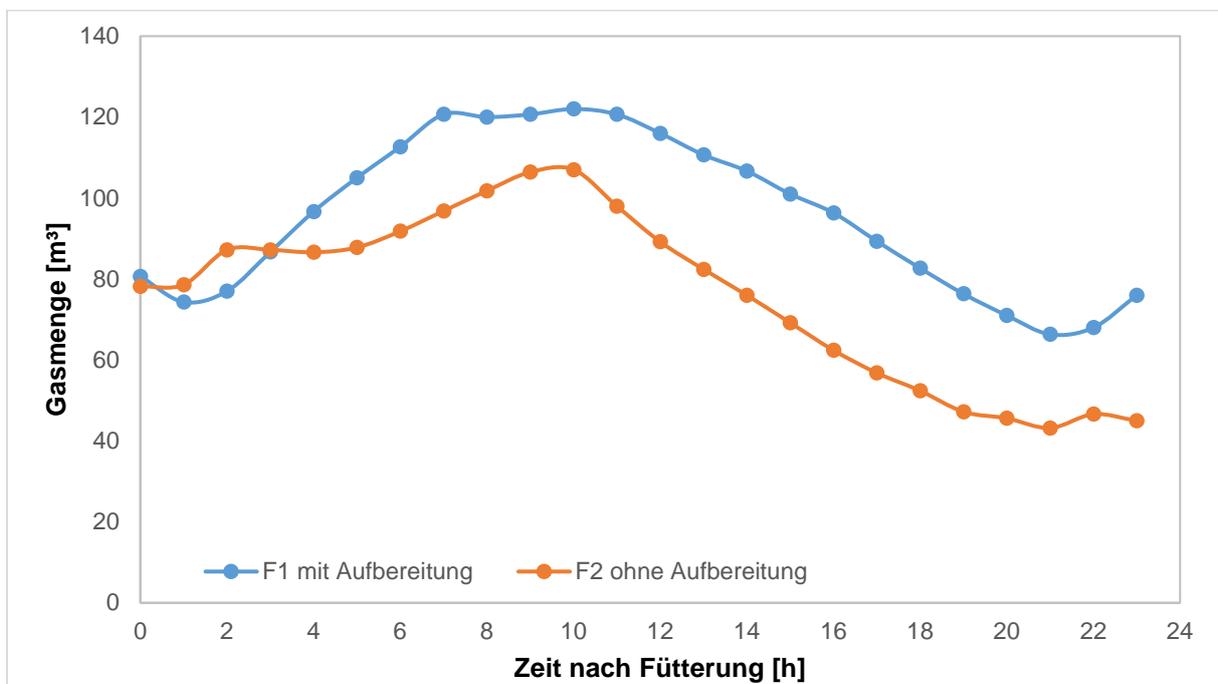


Abbildung 24: Substrateinfluss bei flexibler Fütterung mit Maissilage

In Abbildung 24 ist die Gasmengenkurve der Versuchsvariante mit Maissilage zu sehen. Dargestellt ist der Verlauf nach Beendigung der Fütterung. Dies wurde gewählt, da bei der Fütterung mit beiden vorhandenen Rührorganen gerührt wurde und somit der Gasaustrieb hierbei gesteigert wird. Man sieht einen deutlichen Unterschied zwischen beiden Varianten. Fermenter 1 mit Aufbereitung zeigt einen deutlich schnelleren Anstieg der Gasbildung als Fermenter 2 ohne Aufbereitung. Bei Fermenter 1 konnte die maximale Gasbildung 7 Stunden nach der Fütterung erreicht werden, die Gasmenge wurde von 80m³/h auf 120m³/h gesteigert. Bei der Variante ohne Aufbereitung konnte die maximale Gasbildung 9 Stunden nach der Fütterung erreicht werden.

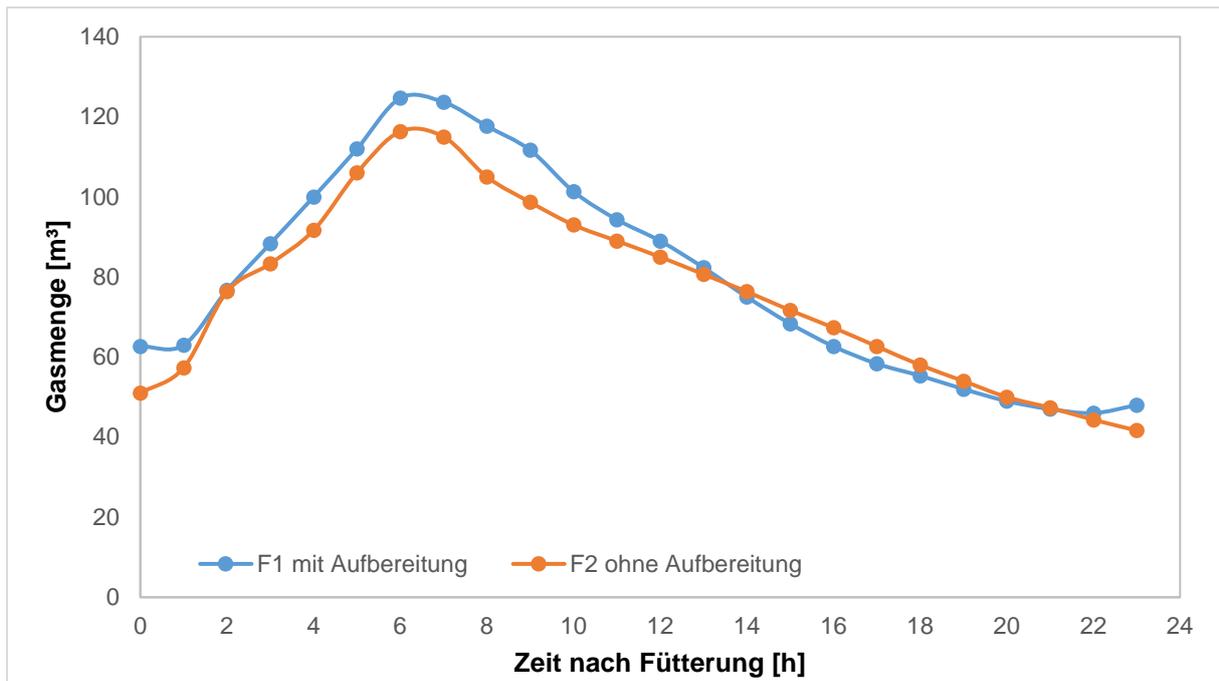


Abbildung 25: Substrateinfluss bei flexibler Fütterung mit Getreideschrot

Bei der Fütterung von Getreideschrot konnte kein Unterschied zwischen den beiden Varianten festgestellt werden (Abbildung 25). Dies ist darauf zurück zu führen, dass das Getreide bereits zerkleinert den Feststoffdosieren zugegeben wird und somit beide Fermenter aufbereitetes Substrat dosiert bekommen. Die maximale Gasbildung war bei dieser Variante 6 Stunden nach der Fütterung vorhanden und es konnte eine Steigerung von $60\text{m}^3/\text{h}$ erzielt werden.

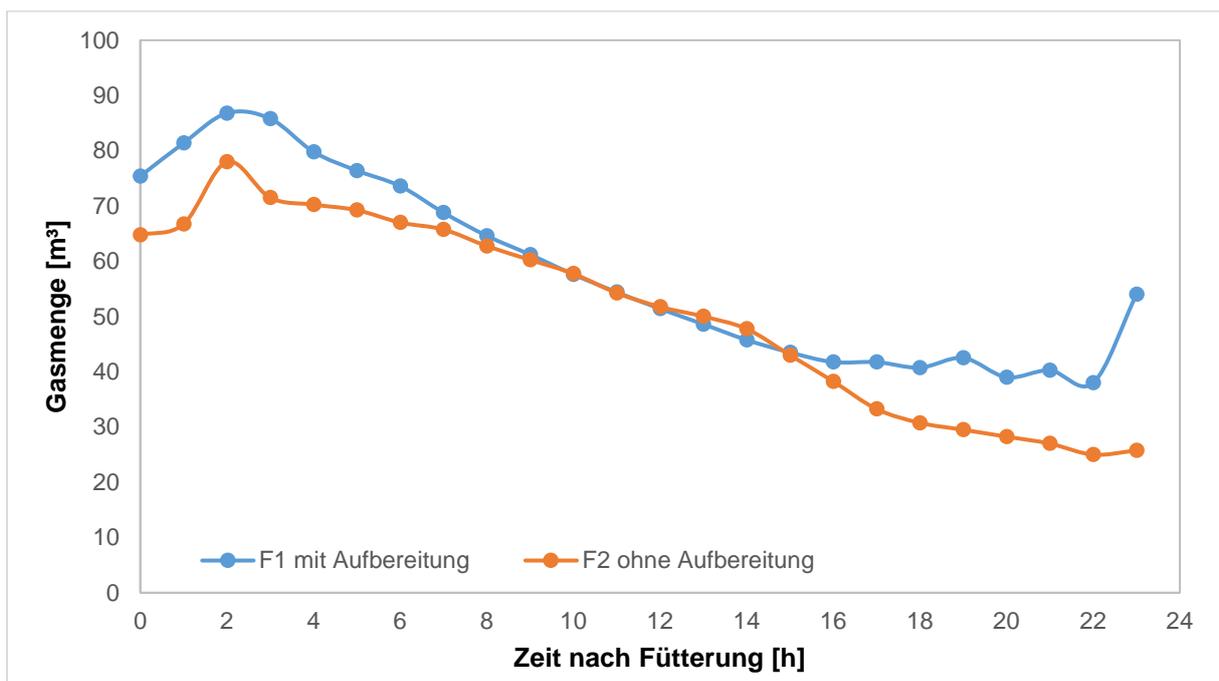


Abbildung 26: Substrateinfluss bei flexibler Fütterung mit Grassilage

Ein Einfluss der Aufbereitung des Substrates konnte bei Grassilage nicht im Ausmaß festgestellt werden wie es bei den zuvor genannten Substraten der Fall war (Abbildung 26). Einen klaren Gaspeak konnte bei der Grassilage nicht erzeugt werden. Die Gasmenge erhöhte sich lediglich um $15\text{m}^3/\text{h}$ innerhalb von 3 Stunden. Im Anschluss daran fiel die Gasproduktion konstant ab.

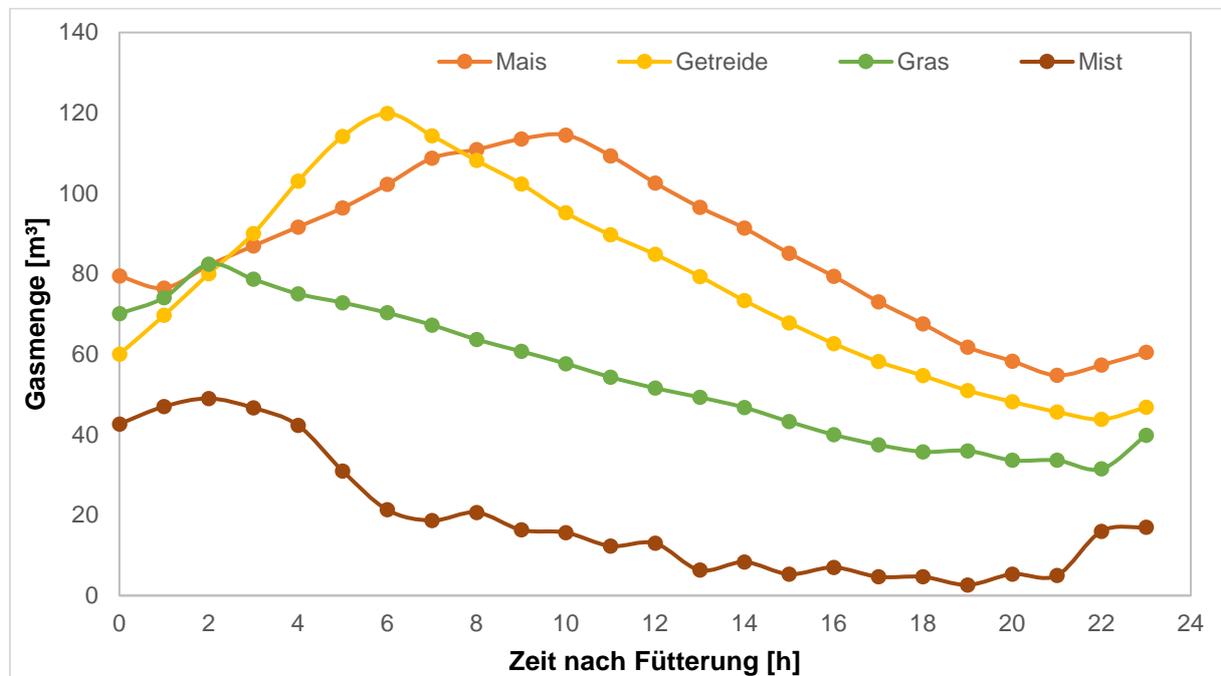


Abbildung 27: Übersicht aller Substrate bei flexibler Fütterung

Die in Abbildung 27 dargestellten Kurven sind Summenkurven aller Versuchstage. Auf Grund von Problemen bei der Dosierung ist die Kurve aus Mist lediglich aus Fermenter 2 ohne Aufbereitung. Bei Fermenter 1 mit Aufbereitung traten erhebliche Probleme bei der Dosierung von reinem Mist auf, sodass diese Variante nicht vollzogen werden konnte. Bei Fermenter 2 konnte der reine Mist gefüttert werden, wobei auch hier zu Beginn kleine Störungen zu beseitigen waren. Eindeutig ersichtlich ist, dass mit Mist keine flexible Fütterung stattfinden kann. Die Bestandteile aus welchen Pferdemist besteht, zum Großteil Stroh, ist nicht für den schnellen Abbau geeignet. Ebenso zeigte sich, dass Grassilage im Rahmen dieses Versuches nur geringe Eigenschaften für die flexible Anlagenfahrweise aufzeigt. Maisilage sowie Getreideschrot sind hierfür entsprechend besser geeignet. Die in diesem Versuch erzeugte Anhebung der Gasmenge von $40\text{-}60\text{m}^3/\text{h}$ in einem Zeitraum von 6-7 Stunden nach der Fütterung und einem konstanten Niveau von bis zu 4 Stunden zeigt, dass im Rahmen eines Substratmix und entsprechender Fütterung eine flexible Gasproduktion für einen Tagesverlauf erzeugt werden können.

Weiterführend wurde im Anschluss an die Versuchsphase Substrateinfluss eine 4monatige Versuchsphase mit Wohnendsimulationen angeschlossen. Hierbei wurde die Fütterung über 2 Tage ausgesetzt.

Hierfür wurde am Freitag eine flexible Gasproduktion angestrebt und die Fütterung bis Montag 0 Uhr ausgesetzt. Im Anschluss an diese Pause wurde die Fütterung kontinuierliche alle 2 Stunden weitergeführt.

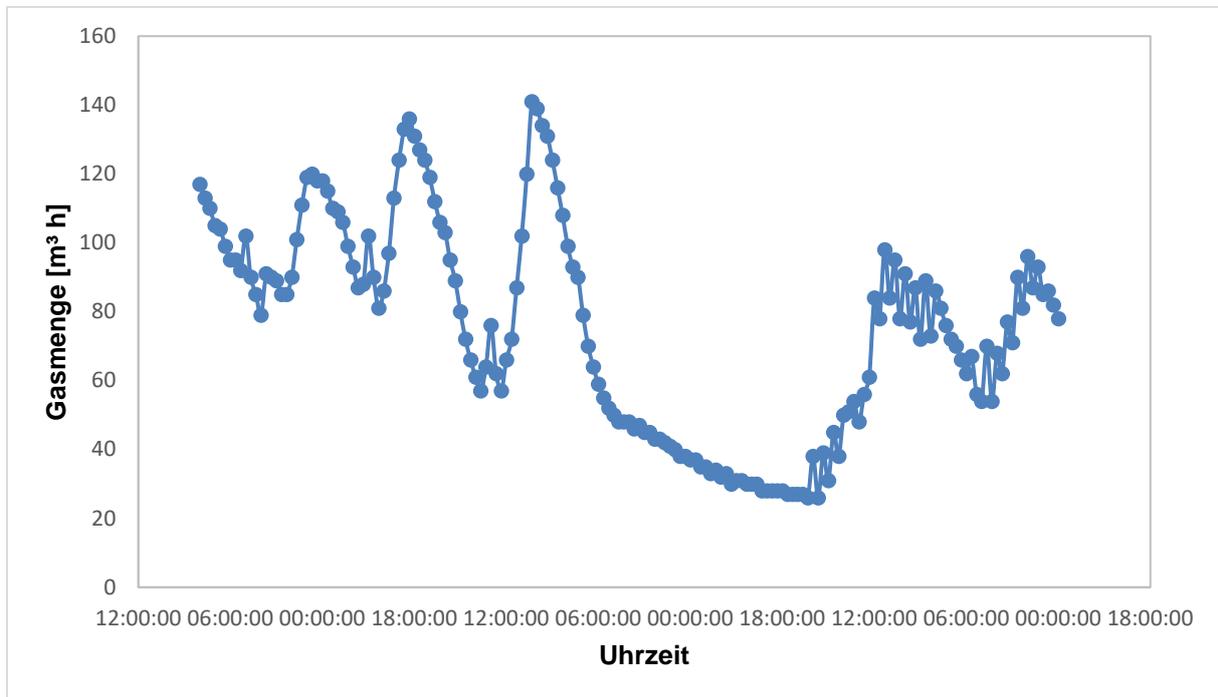


Abbildung 28: Stündliche Gasmenge über 7 Tage hinweg inklusive Wochenendsimulation

Nach der zweitägigen Fütterungspause konnte die Gaserzeugung innerhalb von 6 Stunden auf das Niveau gebracht werden, welches mittels der Substratzufuhr möglich ist (Abbildung 28). Die Fütterung wurde nachts um 0 Uhr am Montag wieder eingeschaltet. Für eine gleichbleibende Gasproduktion wurde die Fütterung alle 2 Stunden eingestellt. Gegen 12 Uhr mittags regelt sich die Gasmenge wieder auf einem konstanten Niveau ein. Über den Versuchszeitraum wurde die Wochenendsimulation aus unterschiedlichen Substratmischen heraus getestet. Je nach Substrat welches am Freitag gefüttert wurde, stellt sich die reduzierte Gasmenge früher oder später ein. Unter das Niveau von 20m³/h sank die Gasproduktion jedoch nicht. Mit Beginn der Fütterung am Montag konnte mit Substratmix aus Maissilage, Grassilage sowie Pferdemist annähernd über dem gesamten Versuchszeitraum die Gasproduktion gleich schnell wieder auf ein konstantes Niveau gebracht werden.

Für die Simulation von kritischen Zuständen wurde an verschiedenen Versuchstagen die Fütterungsmenge entsprechend angehoben. Stellenweise wurde die Gesamtmenge um 100% auf bis zu 15t am Tag angehoben. Hierbei zeigte sich, dass die Einbringtechnik sowie die Rührorgane an Ihre Grenzen stoßen. Die Einbringtechnik schaffte es nicht, die angehobene Menge entsprechend schnell zu dosie-

ren. Bei einer Fütterung von über 3 Stunden ist dies für die Fahrweise nach einem Fahrplan stellenweise zu lange. Sodass hierbei eine Grenze erreicht ist, welche mit der aktuell verbauten Technik realisierbar ist. Abhilfe könnte hierbei der aktuell geplante Umbau des Feststoffeintrages an Fermenter 2 schaffen. Hierbei wurde darauf geachtet, dass die Dosierschneckendurchmesser entsprechend groß dimensioniert sind, sodass bei der Fütterung entsprechend viel Substrat pro Minute dosiert werden kann. Ebenfalls bei diesen erhöhten Fütterungsmengen zeigte sich, dass die Rührorgane es nicht schafften die dosierten Substrat entsprechend einzurühren. Es traten lokale Schwimmschichten auf, in welchen das frische Substrat aufschwamm. Bis diese Schwimmsicht eingerührt wurde dauert es stellenweise bis zu 3 Stunden. Auch dies ist für eine flexible Fahrweise negativ zu betrachten, da durch eine nicht vollständige Durchmischung das Substrat nicht abgebaut werden kann. Wenn jedoch ein entsprechender Gaspeak zu einer geplanten Uhrzeit erforderlich ist, kann dieser dadurch nicht erreicht werden. In wie weit andere Rührwerkstypen Abhilfe schaffen können, konnte in diesem Projekt nicht geklärt werden. Lediglich die Aufbereitung in Fermenter 1 konnte bei dieser Problematik zeigen, dass Schwimmschichten nicht im selben Ausmaß entstehen als in Fermenter 2.

Sämtliche prozessbiologischen Parameter, welche über den gesamten Versuchszeitraum aufgenommen wurden, zeigten keine Prozessstörung auf. So lag das Essigsäureäquivalent im Mittel bei $0,33 \pm 0,22$. Sowie FOS/TAC bei $0,252 \pm 0,023$. Bei Trockenmassegehalt konnten maximal Werte von 16,4 % in Fermenter 1 sowie 12,6 % in Fermenter 2 ermittelt werden.

II.2 Verwertbarkeit der Ergebnisse im Sinne des Verwertungsplans

Die Aufgabenstellung der Universität Hohenheim bei dem Verbundprojekt beinhaltet die Identifizierung der Intermediate in der räumlichen Verteilung, die Inhaltstoffmessung der Inputsubstrate sowie das gezielte Fütterungsmanagement für eine bedarfsgerechte Gasproduktion. Die wichtigsten Erkenntnisse für eine weitere Entwicklung und technische Umsetzung die bei den Untersuchungen im Rahmen des Projektes gewonnen wurden, betrifft die Tatsache, dass eine Biogasbildung aus erneuerbaren Rohstoffen auch im lastflexiblen Anlagenbetrieb realisierbar ist. Auch im Hinblick auf die Verteilung der Intermediate in Abhängigkeit der Rührdauer, Rührwerktyp und Substratzusammensetzung ist es möglich Biogasanlagen lastabhängig zu betreiben. Zur Realisierung einer ausreichenden Substratvermischung ist eine Anpassung der einzusetzenden Rührtechnik und der zu wählenden Prozessparameter an die vorliegenden Substrateigenschaften vorzunehmen. Für diesen weiteren Schritt wurde ein Folge Kooperationsprojekt (OptiFlex) beim BMEL im Rahmen eingereicht und bereits bewilligt. Für eine Verwertbarkeit im wirtschaftlichen Sinne sind noch weitere Untersuchungen zum lastflexiblen Betrieb mit unterschiedlichsten Substraten und Zyklen durchzuführen. Da im Rahmen dieses Projektes keine Untersuchungen über einen Zeitraum von 6 – 12 Monaten stattfinden konnten, welche jedoch für eine genauere Betrachtung erforderlich wäre.

II. 3 Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

Erkenntnisse zu der Biogasbildung aus erneuerbaren Rohstoffen im lastflexiblen Anlagenbetrieb an einer Praxisbiogasanlage durch andere Arbeitsgruppen außer den Projektpartnern sind und nicht bekannt.

II. 4 Erfolgte und geplante Veröffentlichungen

Universitäre Abschlussarbeiten

- Kolb, B.: Messung der Strömungsgeschwindigkeit und Erstellung eines Strömungsprofils in Abhängigkeit der Viskosität für einen Biogasfermenter an der Forschungsbiogasanlage „Unterer Lindenhof“
- Ruile, S.: Mischgüte von Gärsubstrat im Biogasfermenter in Abhängigkeit der Rührintensität: Untersuchungen im Praxismaßstab an der Forschungsbiogasanlage Unterer Lindenhof
- Debera, I.: Strömungsgeschwindigkeitsprofile im mechanisch durchmischten Praxis-Biogasfermenter: Evaluation eines magnetisch-induktiven Messverfahrens.

Publikationen

- Kress, P.; Nägele, H.-J.; Oechsner, H.; Ruile, S.: Effect of agitation time on nutrient distribution in full-scale CSTR biogas digesters. 2018, Bioresource Technology, 247, S. 1-6, doi.org/10.1016/j.biortech.2017.09.054

Tagungsbesuche

- Kress, P.: Strömungsverhalten von Gärsubstraten in Abhängigkeit der Rührwerkstechnik & Einfluss einer flexiblen Fütterung auf Gasproduktion und Gasqualität. 7. Triesdorfer Biogastag, 16.01.2017, Triesdorf
- Kress, P.: Flexibilisierung und Rühren des Fermenterinhalts. Biogas-Infotage 2017, renergie Allgäu e.V., 18.01.2017, Ulm
- Kress, P.; Nägele, H.-J.; Oechsner, H.: Flow velocity in CSTR biogas digesters: a full-scale study. Internationale Konferenz "Progress in Biogas IV" 8.- 11.03.2017, Universität Hohenheim, Stuttgart
- Kress, P.: Neues aus der Biogasforschung: Effizienzsteigerung durch Optimierung der Rührtechnik & Flexible Stromerzeugung durch flexible Fütterung. Biogasstammtisch Kupferzell, Kupferzell, 14.12.2016. Vortrag

III. Erfolgskontrollbericht

1. Beitrag des Ergebnisses zu den förderpolitischen Zielen des Förderprogramms

Im Rahmen des Forschungsprojektes erfolgte der Austausch mit anderen Forschungseinrichtungen sowohl über die Statuskonferenzen des BMWi-Förderprogramms als auch über eine Vielzahl von bilateralen Treffen mit direkten Forschungspartnern der Förderinitiative. Der Austausch mit Forschungseinrichtung sowie die Netzwerkbildung konnten damit erheblich verbessert werden.

2. Wissenschaftlich-technische Ergebnisse

- **Arbeitspaket 1:** Identifikation der kritischen Zonen im Biogasfermenter
- ✓ Auswahl der Messsysteme, Inbetriebnahme vorhandener Messsysteme
- ✓ Einfluss der Rührdauer auf die Nährstoffverteilung im Fermenter
- ✓ Strömungsgeschwindigkeit und Strömungsprofil im Biogasfermenter
- ✓ Charakterisierung der rheologischen Eigenschaften
- ✓ Einsatz von Tracern zur Bestimmung der Durchmischung

- **Arbeitspaket 2:** Installation und Validierung des akustischen Wellenleiters und der Nahinfrarotspektroskopie
- ✓ Erfassung vorhandener Messsysteme, Bauteilen und Software
- ✓ Versuche mit dem akustischen Wellenleiter abgeschlossen
- ✓ Test und Auswahl eines Nahinfrarotspektroskopes und Erarbeitung eines Messkonzeptes
- ✓ Langzeitdatenaufnahme der Inputsubstrate mittels Nahinfrarotspektroskopie

- **Arbeitspaket 3:** Überprüfung der entwickelten Modelle in den Großmaßstab
- ✓ Vorbereitungen zur flexiblen Fahrweise an der Biogasanlage
- ✓ Untersuchung der Rührwerksmodelle mittels Prozesstomographie
- ✓ Datenaufnahme zur Modellentwicklung
- ✓ Langzeit-Datenaufnahme zur Modellanpassung bei flexibler Fahrweise

3. Fortschreibung des Verwertungsplans

a. Erfindungen und Schutzrechtsanmeldungen

Erfindungen und Schutzrechtsanmeldungen wurde keine durchgeführt.

b. Wirtschaftlicher Erfolg

Die Verwertbarkeit der Erkenntnisse des Projektes kann weiterhin als sehr hoch eingestuft werden, weil das Verfahren der flexible Substratbeschickung prinzipiell bei den existierenden konventionellen Biogasanlagen umgesetzt werden kann. Voraussetzung ist lediglich die Möglichkeit, das BHKW flexibel betreiben zu können sowie ein geändertes Fütterungsregime einzustellen. So kann lokal der Strom entsprechend dem Bedarf produziert werden und könnte dazu zur Netzstabilität beitragen.

Die nachgewiesene, außerordentlich hohe Prozessstabilität des Verfahrens belegt dessen prinzipielle Praxistauglichkeit.

Voraussetzung für eine technische Umsetzung des Verfahrens ist jedoch, dass politisch geeignete Rahmenbedingungen geschaffen werden. Ab einem Anteil der erneuerbaren Energien an der Stromerzeugung von ca. 80% wird der Regelenergiebedarf erheblich gegenüber der derzeitigen Situation ansteigen.

c. Wissenschaftlich-technischer Erfolg sowie Wissenstransfer

Wissenschaftlich-technisches Ziel des Projektes war die Schaffung von Know-how zur Steigerung der wissenschaftlichen Konkurrenzfähigkeit sowie der Transfer des Wissens zu den Nutzergruppen. Unter beiden Gesichtspunkten war das vorgestellte Forschungsprojekt sehr erfolgreich.

Folgende Publikation entstand auf Basis der im Rahmen des Projektes durchgeführten Untersuchungen. Weitere Publikationen sind in der Fertigstellung und befinden sich kurz vor der Abgabe bei entsprechenden Zeitschriften. Sämtliche Publikationen erfolgen in hochrangigen, international sehr anerkannten wissenschaftlichen Zeitschriften:

- Kress, P.; Nägele, H.-J.; Oechsner, H.; Ruile, S.: Effect of agitation time on nutrient distribution in full-scale CSTR biogas digesters. 2018, *Bioresource Technology*, 247, S. 1-6, doi.org/10.1016/j.biortech.2017.09.054

Zudem wurden die Ergebnisse auf nationalen und internationalen Tagungen präsentiert. Als Beispiel hierfür ist der Vortrag am Triesdorfer Biogastag zu nennen. Auf dieser sehr praxisnahen Tagung konnten die Ergebnisse sowohl interessierten Firmen als auch potenziellen Anwendern präsentiert werden.

- Kress, P.: Strömungsverhalten von Gärsubstraten in Abhängigkeit der Rührwerkstechnik & Einfluss einer flexiblen Fütterung auf Gasproduktion und Gasqualität. 7. Triesdorfer Biogastag, 16.01.2017, Triesdorf

Ebenso wurden in das Projekt eine Bachelor-Arbeit sowie zwei Masterarbeiten eingebunden, sodass eine Qualifizierung des wissenschaftlichen Nachwuchses gewährleistet ist.

- Kolb, B.: Messung der Strömungsgeschwindigkeit und Erstellung eines Strömungsprofils in Abhängigkeit der Viskosität für einen Biogasfermenter an der Forschungsbiogasanlage „Unterer Lindenhof“
- Ruile, S.: Mischgüte von Gärsubstrat im Biogasfermenter in Abhängigkeit der Rührintensität: Untersuchungen im Praxismaßstab an der Forschungsbiogasanlage Unterer Lindenhof
- Debera, I.: Strömungsgeschwindigkeitsprofile im mechanisch durchmischten Praxis-Biogasfermenter: Evaluation eines magnetisch-induktiven Messverfahrens.

Aus wissenschaftlicher Sicht konnte mit dem Projekt die Kompetenz der Landesanstalt wesentlich ausgebaut und die wissenschaftliche Konkurrenzfähigkeit erheblich gesteigert werden.

Aus Sicht des wissenschaftlichen Erfolges sollten das generierte Wissen dazu genutzt werden, Nachfolgeprojekte zu akquirieren. Dies ist teilweise bereits gelungen. Mit dem Zeithorizont von 1-5 Jahre nach Projektende sollten weitere Forschungsprojekte, ggfs. auch auf weiteren Biogasanlagen folgen.

d. Wissenschaftliche und wirtschaftliche Anschlussfähigkeit

Die gesamten wirtschaftlichen Erfolgsaussichten hängen, maßgeblich von den zukünftigen Entwicklungen der Energiesysteme in Deutschland, dem weiteren Ausbau der erneuerbaren Energien zur Stromerzeugung sowie den politischen Zielsetzungen ab.

Mit dem von der FNR geförderten Forschungsprojekt „Optimierung des Betriebs und Designs von Biogasanlagen für eine bedarfsgerechte, flexibilisierte und effiziente Biogasproduktion unter Berücksichtigung der Prozessstabilität als Post-EEG Strategie (OptiFlex); Teilvorhaben 1: Großtechnische Validierung (FKZ: 22402716)“ konnte bereits ein erstes Nachfolgeprojekt akquiriert werden, das u.a. auf den Forschungsergebnissen dieses Projektes aufbaut.

Ebenso sollen die Ergebnisse des Projektes sowie die entwickelte Versuchsanlage in neue Projektanträge einfließen.

Aus wissenschaftlicher Sicht sollte in nachfolgenden Projekten eine automatisierte Steuerung für den flexiblen Anlagenbetrieb entwickelt werden. Nach erfolgter Implementierung bedarf es einer Versuchsphase von mehreren Verweilzeiten um den Einfluss der flexiblen Fütterung auf die Fermenterbiologie sowie auch auf das Abgasverhalten des BHKWs hin zu untersuchen. Aktuell kann seitens der

BHKW-Hersteller keine genaue Aussage getroffen werden wie sich ein entsprechender Teillastbetrieb auf die Standfestigkeit des BHKWs verhält. Auch fehlen Untersuchungen zum Ab-gasverhalten eines BHKWs welches sich über den Tag verteilt in unterschiedlichen Leistungsstufen befindet. Hinsichtlich der Fermenterbiologie konnte aufgezeigt werden, dass eine flexible Fütterung grundsätzlich problemlos möglich ist. Jedoch fehlen Langzeiterfahrungen, welche mögliche Prozessstörungen aufzeigen könnten.

4. Arbeiten, die zu keiner Lösung geführt haben

Im Rahmen der Untersuchungen konnte die Machbarkeit der flexiblen Fütterung im Biogasfermenter erfolgreich nachgewiesen werden und entscheidende Ansätze zur Optimierung des Verfahrens abgeleitet werden. Damit wurden die Projektziele vollumfänglich erreicht. Sämtliche gewählten Ansätze zeigten interessante und zielführende Ergebnisse. Diese sollten lediglich in weiterführenden Projekten vertiefend untersucht werden.

5. Präsentationsmöglichkeiten für mögliche Nutzer - z.B. Anwenderkonferenzen

Wie im Kapitel II. dargestellt wurden die Ergebnisse bereits im Projektablauf, sobald diese validiert waren, auf Konferenzen und über wissenschaftliche Publikationen, veröffentlicht. Zudem wird der Endbericht über die Homepage der Universität Hohenheim veröffentlicht werden. Eine Kurzfassung des Projektes und der Ergebnisse wurde und wird seit Projektbeginn über den Jahresbericht der Landesanstalt für Agrartechnik und Bioenergie präsentiert.

<https://www.uni-hohenheim.de/organisation/einrichtung/landesanstalt-fuer-agrartechnik-und-bio-energie>

Im Jahresbericht sind für zukünftige Nutzer zudem die direkten Ansprechpartner des Projektes inklusive der Kontaktdaten hinterlegt.

Eine gezielte Anwenderkonferenz wurde dagegen bisher nicht durchgeführt.

6. Einhaltung der Ausgaben-/Kosten- und Zeitplanung

Das Vorhaben wurde im Vergleich zur ursprünglichen Planung kostenneutral um 18 Monate verlängert. Der Kostenplan wurde eingehalten.