

Abschlussbericht

zum Verbundvorhaben : „Steigerung der Biogasausbeute durch den Eintrag von Schallwellen geringer Intensität in den Fermentationsprozess“ – Teilvorhaben 2, Förderkennzeichen: 22015211

für den Zeitraum: 01.08.2012 - 30.04.2014

Bearbeiter: Dipl.-Ing. (FH) Matthias Fischer
Dipl.-Ing. (FH) Uwe Fohry

Ausführende Stelle: *Ernst-Abbe-Fachhochschule Jena,*
Carl-Zeiss-Promenade 2, 07745 Jena

Projektförderung: Zuwendung aus dem Bundeshaushalt, Einzelplan 10 des Bundesministeriums für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz (BMELV), Kapitel 1002, Titel 89388, Haushaltsjahr 2011

Projektpartner: *E.S.C.H. Engineering Service Center und Handels GmbH,*
Maxhüttenstraße 19, 07333 Unterwellenborn

Projektleiter (FH): Prof. Dr.-Ing. Karl-Dietrich Morgeneier

Projektmitarbeiter (FH): Dipl.-Ing. (FH) Matthias Fischer
Dipl.-Ing. (FH) Uwe Fohry

Projektlaufzeit (gefördert): 01.08.2011 - 31.01.2014

Inhaltsverzeichnis

INHALTSVERZEICHNIS	2
ABBILDUNGSVERZEICHNIS	3
TABELLENVERZEICHNIS	3
1 EINFÜHRUNG	4
2 DARSTELLUNG DER DURCHGEFÜHRTEN ARBEITEN UND DER ERZIELTEN ERKENNTNISSE	4
2.1 Erstellung eines Konzeptes und Grundsatzuntersuchungen zur Behandlung des Gärsubstrates mit Schall.....	5
2.2 Erstellung eines Versuchsplans.....	7
2.3 Aufbau und Probetrieb von diskontinuierlichen Versuchseinrichtungen im Labormaßstab	8
2.4 Versuche in diskontinuierlichen Batch-Fermentern und deren Auswertung	10
2.5 Optimierung des Aufwand-Nutzen-Verhältnisses	15
2.6 Anpassung und Probetrieb kontinuierlicher Fermenter entsprechend den Ergebnissen	19
2.7 Durchführung von Versuchen in kontinuierlichen Fermentern unter optimierten Bedingungen und Bildung eines Modells mit der zusätzlichen Einflussgröße des Schalls	19
2.8 Weiterentwicklung des Konzeptes zur Steuerung / Regelung und Optimierung von Biogasanlagen unter Einbeziehung der Einflussgröße des Schalls.....	22
2.9 Erstellung eines Anlagenkonzeptes.....	24
2.10 Zusammenfassung des Projektes und Darstellung von Verwertungsaussichten.....	25
LITERATUR-/ QUELLENVERZEICHNIS	27
ANHANG	28
Anhang 1: Tabellen zur Untersuchung der Schallausbreitung.....	28
Anhang 2: Ergebnisse der Batchversuche	33

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Spektralanalyse im Testraum gemessener Schallsignale.....	7
Abbildung 2: Verlauf der Biogaserzeugung im Varianzversuch	12
Abbildung 3: Relative Abweichungen der Methanausbeute zu den Nullversuchen.....	14
Abbildung 4: Batchversuche mit den 150-Liter-Fermentern	14
Abbildung 5: Kontinuierliche Versuche mit den 150-Liter-Fermentern	20
Abbildung 6: Blockbild zur Erweiterung des Modells.....	21
Abbildung 8: Blockbild zur Berechnung der Zielfunktion	23

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Übersicht der getätigten Batchversuche.....	11
Tabelle 2: Erzeugte Biogasmengen und Variationskoeffizient im Varianzversuch	12
Tabelle 3: Leistung der Baugruppen der Beschallungstechnik für Nominalbetrieb	17
Tabelle 4: Leistung der Beschallungstechnik nach Wirkungsgradoptimierung.....	18
Tabelle 5: Schallwandler (Anzahl, Betriebsweise) in Abhängigkeit der Rührtechnik	24
Tabelle 6: Schallmessungen in Luft	30
Tabelle 7: Schallmessungen in Wasser	31
Tabelle 8: Schallmessungen in typischen Fermenterinhalt	32
Tabelle 9: Ergebnisse aller in die Auswertung einbezogener Batchversuche.....	34

1 Einführung

Das Ziel des Projektes bestand darin die Effizienz des Biogasprozesses durch Eintrag von Schallwellen niedriger Intensität bei Frequenzen kleiner 20 kHz zu erhöhen. Unter Steigerung der Effizienz wird dabei die bessere Ausnutzung der den Substraten inhärenten Energie und/oder eine Beschleunigung der Energiefreisetzung verstanden. Zur Erreichung dieses Zieles wurden umfangreiche theoretische und praktische Untersuchungen durchgeführt.

Im nachfolgenden Abschnitt 2 werden die durchgeführten Arbeiten und die erzielten Ergebnisse dargestellt. Zur Orientierung dient dabei der der Projektplanung zugrunde liegende Arbeitsplan. Zur Einordnung und Beurteilung der Darstellungen in Abschnitt 2 sollen die wesentlichen Projektergebnisse bereits an dieser Stelle genannt werden.

Durch das Projekt konnte ermittelt werden, dass der Eintrag von Schall niedriger Intensität direkt in den Fermenter zu einer Steigerung der Biogasproduktion von ca. 7-10 % führt. Dabei wurde die optimale Frequenz der Schallanregung bei 22 kHz festgestellt. Die Interpretation der Anregungsfrequenz muss jedoch im Zusammenhang mit Ergebnissen der Schallausbreitung bei typischem Fermenterinhalt stattfinden. Aufgrund technischer Schwierigkeiten sind die Ergebnisse für die diskontinuierliche Fermentation nur statistisch gesichert. Praktisch relevant sind die Ergebnisse für kontinuierliche Fermentation. Die in den Biogasprozess eingetragene mechanische Leistung/ Energie lässt aufgrund ihrer Größe nach Einschätzung nur die Wirkung einer Stimulation zu; ein Aufschluss von Substraten wird folglich nur mit äußerst geringer Wahrscheinlichkeit in Erwägung gezogen.

Aufbauend auf das vorgenannte grundlegende Ergebnis wurden wichtige Schritte in Richtung einer technischen Realisierung beschritten. Dazu gehört die Einbindung der neuen Größe zur Beeinflussung des Biogasprozesses in eine Automatisierungslösung. Ferner wurde ein Konzept zur großtechnischen Realisierung ausgearbeitet, welches als Grundlage einer Pilotierung dienen soll.

2 Darstellung der durchgeführten Arbeiten und der erzielten Erkenntnisse

Die nachfolgenden Ausführungen orientieren sich am Arbeitsplan des Projektes.

2.1 Erstellung eines Konzeptes und Grundsatzuntersuchungen zur Behandlung des Gärsubstrates mit Schall

Theoretische Arbeiten

Zu Beginn des Projektes wurden grundlegende bestehende Erkenntnisse zur Schallausbreitung und zur Wirkung des Schalls in Wasser und wässrigen Lösungen mit Schwebstoffen analysiert. Wesentliche Ergebnisse dazu sind im Zwischenbericht [1] enthalten. Nachfolgend sollen neuere Erkenntnisse und eine kurze Zusammenfassung im Kontext zum Projektergebnis gegeben werden.

Umfangreiche Darstellungen zur Ausbreitung und zur Dämpfung von Schall sind für Meerwasser zu finden. Dies liegt an der zivilen und der militärischen Bedeutung der entsprechenden physikalischen Zusammenhänge. Nachfolgende Betrachtungen beziehen sich daher vorerst auf Meerwasser.

Schall wird auf dem Übertragungsweg durch Transmission, Reflexion und Absorption gekennzeichnet. Alle drei Phänomene spielen bei vorliegender Aufgabenstellung eine Rolle. Für ein großes Volumen Wasser kann dominierend mit Transmission gerechnet werden. Der Schall breitet sich also ohne nennenswerte Reflexion und Absorption aus. In einer definierten Entfernung ist die Schallintensität I lediglich durch das Abstandsgesetz herabgesetzt (r - Abstand).

$$I \sim \frac{1}{r^2} \quad (1)$$

Dieses große (ungestörte) Volumen liegt bei vorliegender Aufgabenstellung nicht vor, so dass Reflexionen an der, im Vergleich zum Wasser, schalltechnisch harten Wandung auftritt. Ebenso treten Reflexionen an der Oberfläche des Wassers auf. Durch Reflexion kommt es zu keiner Dämpfung, sondern zu einer „Umlenkung“ der Schallwelle. In der Folge, kann dies je nach Größe des Schallraumes im Vergleich zur Wellenlänge des Schalls zu Interferenzen, d.h. ortsabhängiger Verstärkung oder Dämpfung des Schalls führen.

Von großem Interesse ist auch die Absorption. In Meerwasser wird Absorption durch mehrere Effekte verursacht. Zuerst ist die innere Reibung zu nennen. Der Schall breitet sich durch von ihm bewirkte Geschwindigkeitsunterschiede im Medium aus. Dabei müssen zwangsläufig Anteile des Mediums beschleunigt und verzögert und hierbei die innere Reibung überwunden werden. Diese Art der Absorption bewirkt eine Umwandlung von Schallenergie in thermische Energie. Ein weiterer interessanter Absorptionsanteil wird durch die sogenannte Relaxationsdämpfung beschrieben. Die Absorption entsteht dabei durch druckabhängige chemische Umwandlungsvorgänge. Weiterhin entsteht ein Absorptionseffekt durch Gasblasen im Medium.

Befinden sich im Wasser elastische Schwebstoffe, sind höhere Dämpfungsanteile durch kapillare Oszillation bekannt.

Nach eingehender Recherche wurde klar, dass exakte Angaben für typischen Fermenterinhalt theoretisch nicht verfügbar sind. Bezüglich der Erscheinungen Transmission, Reflexion und Absorption werden vor allem die Transmission und die Absorption als relevant eingestuft. Hinsichtlich der in dem Projekt zugrunde liegenden These, einer Stimulation der Mikroorganismen im Fermenter ist sowohl ein positiver Effekt bei Transmission als auch bei Absorption (Relaxationsdämpfung, kapillare Oszillation) denkbar.

Auf Basis der theoretischen Erkenntnisse und deren Analyse wurden praktische Untersuchungen zur Schallausbreitung durchgeführt.

Praktische Arbeiten

Die Recherche zu theoretischen Ergebnissen der Physik des Schalls in Fermenter für Biogaserzeugung ergab keine Resultate. Es wurde entschieden entsprechende grundlegende Untersuchungen durchzuführen, um vor allem den Grad der Transmission und der Absorption zu ermitteln. Die Ergebnisse dieser Arbeiten sind ausführlich im Zwischenbericht [1] dokumentiert. Die im Anhang 1 beigefügten Tabellen zeigen die Ergebnisse der durchgeführten Messungen und Spektralanalysen. An dieser Stelle sollen die wesentlichen Resultate nochmals zusammengefasst und im Hinblick auf das Projektergebnis interpretiert werden.

Der für das Endergebnis des Projektes relevante Frequenzbereich wird ab 18 kHz definiert. In dem für das Endergebnis des Projektes als nicht relevant herausgestellten Frequenzbereich der Beschallung zeigt sich, dass bereits bei Luft im Testraum¹ dominierende Erscheinungen, wie Resonanzanregung der Testraumwandung auftreten. Die durchgeführten Untersuchungen mit Wasser zeigen eine im interessierenden Frequenzbereich gegenüber Luft ausgeprägte Dämpfung der Anregungsfrequenz, welche auf innere Reibung des Mediums und Relaxationsdämpfung zurückgeführt wird.

Von großem Interesse sind die Ergebnisse zur Schallausbreitung bei typischem Fermenterinhalt im Testraum. Hierbei konnte im relevanten Frequenzbereich ab 18 kHz gegenüber Wasser eine noch deutlichere Dämpfung (ca. Faktor 2) festgestellt werden (vgl. Abbildung 1). Ferner setzt die Dämpfung schon bei wesentlich niedrigeren Frequenzen ab ca. 10 kHz ein. Begründet wird die erhöhte Dämpfung gegenüber Wasser mit zusätzlichen Dämpfungsanteilen, welche durch kapillare Oszillation und durch Deformation elastischer Schwebstoffe entstehen.

¹ Der Testraum ist ein Glasgefäß mit geometrischen Abmessungen in der Größenordnung der 30 Liter- Batch-Fermenter.

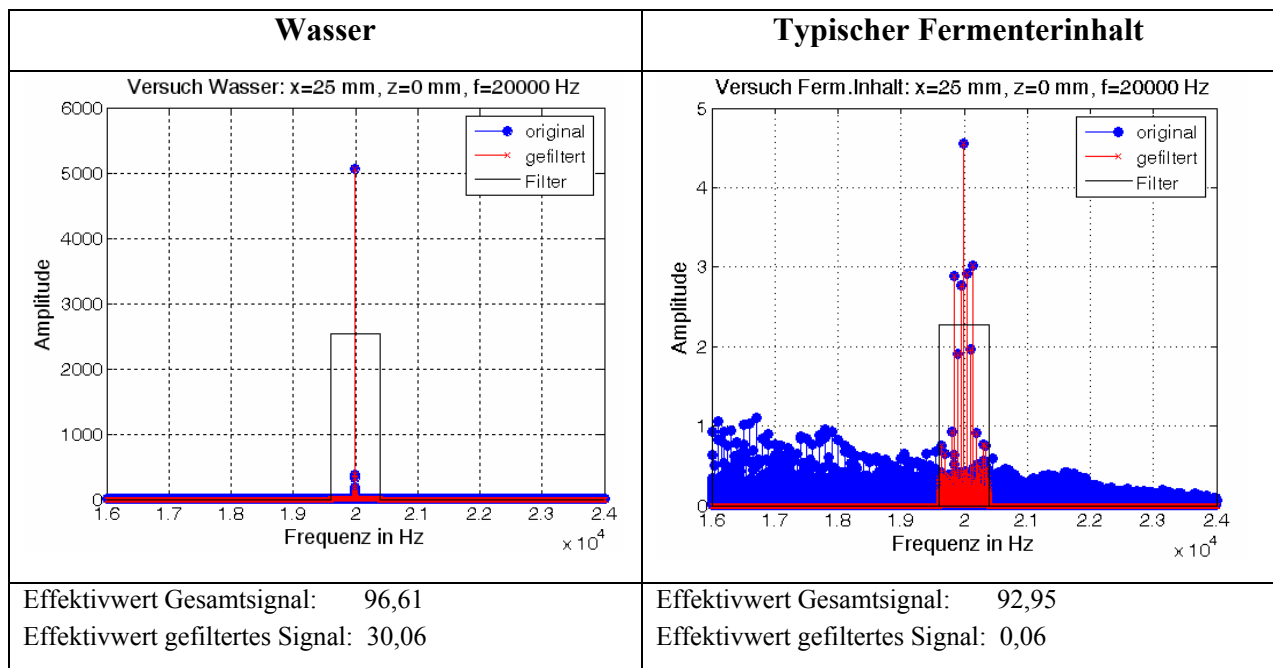


Abbildung 1: Spektralanalyse im Testraum gemessener Schallsignale

Zusammenfassend kann konstatiert werden, dass die Eindringtiefe des Schalls im interessierenden Frequenzbereich ab 18 kHz sehr gering ist. Beim verwendeten Lautsprecher liegt diese im Bereich weniger Zentimeter. Es liegt also dominierend Absorption vor und größere Bereiche des Schallfeldes sind nicht von Transmission beeinflusst.

2.2 Erstellung eines Versuchsplans

Das Arbeitspaket umfasste die Erstellung mehrerer Versuchspläne. Zum einen mussten die Versuche geplant werden, welche in 2.1 schon erläutert und ausgewertet wurden. Sie dienten der Analyse der Schallphysik bei typischem Fermenterinhalt in einem Testraum.

Ein weiterer Versuchsplan wurde für die Untersuchung der Schallphysik in den diskontinuierlichen 30 Liter- Versuchsfermenter erstellt. Hierbei war Zielstellung, die Übertragbarkeit der Ergebnisse aus dem Testraum auf die Fermenter zu prüfen, unzulässige Exemplarstreuungen der Beschallungstechnik auszuschließen und weiterhin die gegenseitige schalltechnische Kopplung der Versuchsfermenter zu untersuchen.

Der hauptsächliche Versuchsplan wurde für die Gärversuche in den diskontinuierlichen 30 Liter- Versuchsfermentern unter Variation der Beschallungsparameter erstellt. Dabei wurde entschieden ein iteratives Vorgehen anzuwenden. Eine Konkretisierung des entsprechenden Versuchsplans wurde nach einer ersten Versuchsreihe vorgesehen, welche zum Ziel hatte, eine Eingrenzung von positiv wirkenden Frequenzen hinsichtlich der Effizienz des Biogasprozesses zu ermitteln. Für die iterative Entwicklung des entsprechenden Versuchsplans wird auf Abschnitt 2.4 verwiesen.

Die Durchführung eines wichtigen Versuchs wurde noch vor Beginn des Betriebes mit Beschallung geplant. Gegenstand dabei war der parallele Betrieb aller Versuchsfermenter unter

gleichen Bedingungen (Temperatur, Substrate, Rührregime) ohne Beschallung. Ziel des als Varianzversuch bezeichneten Versuchs war die Feststellung von durchschnittlicher und maximaler Varianz der Biogaserträge unter gleichen Versuchsbedingungen.

2.3 Aufbau und Probetrieb von diskontinuierlichen Versuchseinrichtungen im Labormaßstab

In diesem Arbeitspaket wurden seitens der EAH Jena hinsichtlich folgender Punkte Arbeiten geleistet:

1. Auswahl und Sicherstellung der Kompatibilität der Beschallungstechnik
 - 1.1. Auswahl der Lautsprecher
 - 1.2. Auswahl der Verstärker
 - 1.3. Auswahl der Frequenzgeneratoren
2. Grundsatzuntersuchungen wichtiger Parameter der Beschallungstechnik
 - 2.1. Frequenzgangmessung der Verstärker
 - 2.2. theoretische Analyse des Frequenzgangs der Lautsprecher
3. Inbetriebnahme der Beschallungstechnik in den Versuchsfermenter
4. Untersuchungen zur Schallphysik in den Versuchsfermenter und der gegenseitigen akustischen Kopplung
 - 4.1. Anwendung und Validierung von Maßnahmen zur akustischen Entkopplung der Versuchsfermenter
5. Entwicklung und Erprobung einer reproduzierbaren Einstellstrategie für Beschallungsparameter

Im Punkt 1 wurden gemeinsam mit dem Projektpartner ESCH am Markt verfügbare Komponenten hinsichtlich ihrer Tauglichkeit für das Projekt untersucht. Dabei mussten Parameter mit den Einsatzbedingungen abgeglichen und in Dokumentationen nicht verfügbare Parameter beim Hersteller eingefordert werden.

Im Punkt 2 wurde der nicht verfügbare Frequenzgang der Verstärker messtechnisch ermittelt. Dabei konnte ein dämpfungsfreier Amplitudengang bis 30 kHz festgestellt und damit die Anwendbarkeit des Verstärkers im Projekt bestätigt werden.

Die Arbeiten im Punkt 3 beinhalteten im Wesentlichen Funktionstests und grundlegende Messungen mittels Messmikrofon.

Aufgrund des zum Testraum abweichenden Wandungsmaterials der Versuchsfermenter sowie der abweichenden Geometrie, wurden Teile der Versuche aus 2.1 des Testraums in den

Versuchsfermenter wiederholt (Punkt 4). Dabei konnten keine wesentlichen Abweichungen festgestellt werden. Dem Umstand Rechnung tragend, dass bei den diskontinuierlichen Versuchen räumlich nahe beieinander platzierte Fermenter gleichzeitig beschallt werden, wurden Messungen hinsichtlich der Einkopplung von Schall in benachbarte Fermenter durchgeführt. Dabei musste festgestellt werden, dass im tieffrequenten Bereich der Beschallung eine Kopplung auftritt, welche sich durch Körperschall überträgt. Zur Ausschaltung dieses Effektes wurden Schwingungsdämpfungselemente für den entsprechenden Frequenzbereich projiziert und montiert. Nachfolgende Messungen bestätigten den Erfolg dieser Maßnahme.

Wesentliche Aufgabe im Punkt 5 war die Entwicklung einer reproduzierbaren Einstellstrategie für die Beschallungstechnik. Hierbei stand vor allem der Parameter der Amplitude der Anregung im Vordergrund, da diese sowohl durch Frequenzgenerator und Verstärker variierbar ist. Eine identische Amplitude ist eine Grundvoraussetzung für vergleichbare Versuche. Als sinnvoll wurde folgende Strategie befunden:

1. Einstellung einer Frequenz von $f = 50$ Hz am Frequenzgenerator.
2. Grobeinstellung der Amplitude des Sinussignals am Frequenzgenerator ohne Messung elektrischer Parameter in einem Bereich, wo eine Übersteuerung des Verstärkers ausgeschlossen ist.
3. Feineinstellung der Amplitude am Verstärker durch Messung des Effektivwertes der Spannung am Lautsprecheranschluss.
4. Einstellung der Frequenz für den entsprechenden Versuch.

Vorstehende Strategie stellt gleiche elektrische Eingangsparameter für die Lautsprecher sicher. Es wurde davon ausgegangen, dass die Lautsprecher als Wandler von elektrischer Energie in Schallenergie keine signifikanten Exemplarstreuungen aufweisen.

2.4 Versuche in diskontinuierlichen Batch-Fermentern und deren Auswertung

In diesem Abschnitt sind die Arbeitspakete zur Durchführung und zur Auswertung der Beschallungsversuche zusammengefasst. Dies entspricht auch dem chronologischen Vorgehen, da die Planungs-, Durchführungs- und Auswertungsphasen der Versuche iterativ in Abhängigkeit der erlangten Erkenntnisse durchgeführt wurden. Ziel dieser Versuche war es in erster Linie festzustellen, ob eine Beeinflussbarkeit des Fermentationsprozesses durch Beschallung des Fermenterinhalt mit geringer Intensität möglich und in welchen Bereichen der Beschallungsparameter ein signifikanter Effekt vorhanden ist. Die variierbaren Beschallungsparameter sind dabei

- Schallfrequenz,
- Schallamplitude,
- Beschallungszeit (Puls/Pause-Zeiten).

Für die restlichen Einflussfaktoren bezüglich

- der verwendeten Substratmischung,
- des Beschickungsregimes,
- des Rührregimes,
- sowie der Temperatur des Fermenterinhalt

wurden typische und robuste Werte festgelegt, welche in der Regel über alle Versuche unverändert blieben. Die Substratmischung wurde auf Basis von Erfahrungen unseres Projektpartners aus typischen Substratarten und Mischungsverhältnissen festgelegt. Da es sich um so genannte Batchversuche handelte, wurde die Beschickung einmalig am Anfang mit der homogenisierten Substratmischung vorgenommen. Die Dauer der Versuche lag im Bereich typischer mittlerer Verweilzeiten. Das Rührregime wurde mit 5 Minuten Rührzeit pro 2 Stunden Betriebszeit festgelegt. Die Temperatur in den Fermentern entsprach mit einem Sollwert von 38° Celsius den Bedingungen einer mesophilen Vergärung.

Die zur Durchführung der Batchversuche von unserem Projektpartner ESCH-GmbH bereitgestellte Versuchstechnik bestand aus acht identischen Fermentern, nachfolgend als 30-Liter-Fermenter bezeichnet, mit einem Bruttovolumen von 30 Litern und einem Fassungsvermögen (Nettovolumen) von 24 Litern. Sechs von diesen Fermentern wurden mit der oben beschriebenen Beschallungstechnik ausgestattet; die restlichen zwei nicht beschallten Fermenter standen zu Vergleichszwecken als so genannte Nullversuche zur Verfügung. Während der Versuchszeiträume wurde mit Milligascountern bzw. Trommelgaszählern der erzeugte Biogasfluss gemessen. In Verbindung mit der Messung des Methananteils konnte somit auf die erzeugte Methanmenge pro Zeiteinheit und demnach bei Berücksichtigung der eingesetzten Masse an organischer Trockensubstanz auch auf die Methanausbeute geschlossen werden. Zur Untersuchung des durch die Schallwirkung beeinflussbaren Volumens wurden zusätzlich zu den geplanten Versuchen auch noch Batchversuche an zwei 150-Liter-Fermentern durchgeführt. Eine

nähere Beschreibung von Versuchstechnik und -durchführung befindet sich im Abschlussbericht unseres Projektpartners ESCH-GmbH. An dieser Stelle soll ein Überblick und eine statistische Gesamtauswertung der Versuche gegeben sowie Schlussfolgerungen gezogen werden.

Tabelle 1 zeigt eine Übersicht der getätigten Batchversuche. Die Versuchsserien V01 bis V10 wurden dabei mit den oben erwähnten 30-Liter-Fermentern durchgeführt. Die Versuchsserie VD bezieht sich auf einen zusätzlichen Batchversuch, welcher an zwei parallelbetriebenen 150-Liter-Fermentern vorgenommen wurde. Aufgrund technischer Probleme mussten einige Versuche abgebrochen und wiederholt werden. In die nachfolgende Auswertung gingen nur die mit * gekennzeichneten Versuche ein.

Versuchserie	Bemerkung
V0.1	Parallelbetrieb aller Fermenter ohne Beschallung (Varianzversuch)
V0.2*	Parallelbetrieb aller Fermenter ohne Beschallung (Varianzversuch)
V1*	Parallelbetrieb bei Beschallung mit unterschiedlichen Frequenzen im hörbaren Frequenzbereich verteilt
V2*	Parallelbetrieb bei Beschallung mit unterschiedlichen Frequenzen unter- und oberhalb des in V1 untersuchten Bereiches
V3	Wiederholung der Versuchsserie V2 zur Bestätigung der Ergebnisse
V4*	Wiederholung der Versuchsserie V2 zur Bestätigung der Ergebnisse
V5	Parallelbetrieb bei Beschallung mit unterschiedlichen Frequenzen bei Konzentration auf den oberen Teil des zu untersuchenden Frequenzbereiches
V6*	Parallelbetrieb bei Beschallung mit unterschiedlichen Frequenzen bei Konzentration auf den oberen Teil des zu untersuchenden Frequenzbereiches
V7	Parallelbetrieb bei Beschallung mit Frequenzen oberhalb von 20 kHz
V8*	Parallelbetrieb bei Beschallung mit Frequenzen oberhalb von 20 kHz
V9*	Parallelbetrieb bei Beschallung mit Frequenzen oberhalb von 20 kHz bei reduzierter Beschallungsdauer
V10*	Parallelbetrieb bei Beschallung mit Frequenzen oberhalb von 20 kHz bei reduzierter Beschallungsdauer
VD*	Batchversuch an zwei 150-Liter-Fermentern zum Test der Beschallung mit 22 kHz bei reduzierter Beschallungsdauer

Tabelle 1: Übersicht der getätigten Batchversuche

Um eventuelle Fehlinterpretationen bei der Auswertung der Versuche zu vermeiden, wurden zunächst alle acht Fermenter in einer definierten Zeitspanne ohne Beschallung betrieben und die

Unterschiede in der erzeugten Gasmenge ermittelt. Ziel dieser so genannten Varianzversuche war es, Abweichungen zwischen den Versuchseinrichtungen zu quantifizieren, welche durch Exemplarstreuungen, Messunsicherheiten oder eventuell fehlerhaften Komponenten verursacht werden. In Tabelle 2 sind die Ergebnisse nach 42 Tagen Laufzeit zusammengefasst. Den zeitlichen Verlauf der Biogaserzeugung zeigt das Diagramm in der Abbildung 2.

Fermenter	Erzeugtes Biogas	Relative Abweichung zum Mittelwert
1	362 NL	-2,0 %
2	371 NL	0,4 %
3	368 NL	-0,4 %
4	372 NL	0,7 %
5	374 NL	1,2 %
6	369 NL	-0,1 %
7	367 NL	-0,7 %
8	373 NL	0,9 %

Laufzeit: 42 Tage
 Mittelwert: 369,5 NL
 Standardabweichung: 3,9 NL
Variationskoeffizient: 1,1 %

Bemerkung:
 Versuch ohne Beschallung zur Feststellung der Varianz

Tabelle 2: Erzeugte Biogasmengen und Variationskoeffizient im Varianzversuch

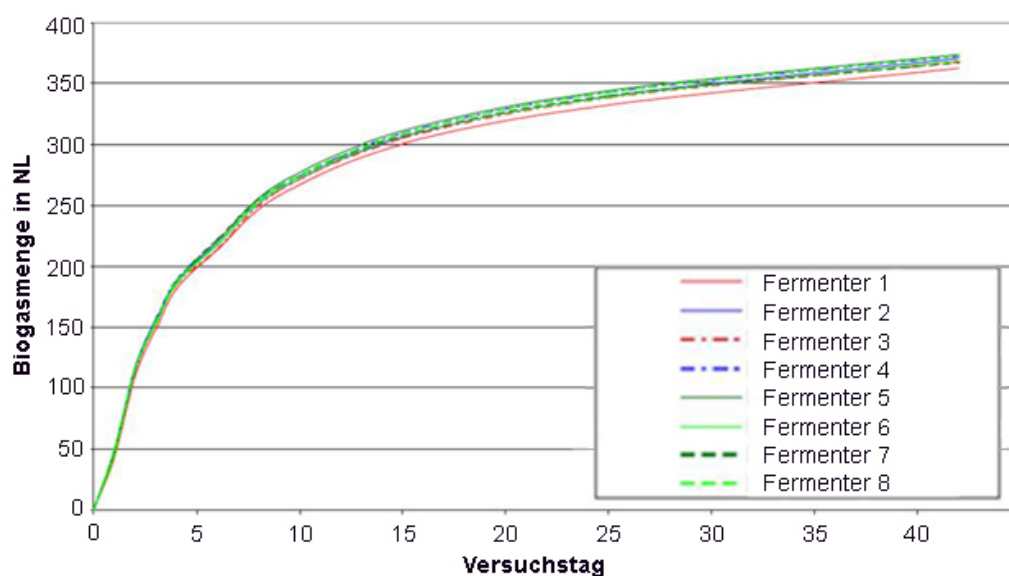


Abbildung 2: Verlauf der Biogaserzeugung im Varianzversuch

Es ist zu erkennen, dass die Abweichungen der Gaserzeugung zwischen den einzelnen Fermentern über die gesamte Versuchszeit relativ gering waren; der empirische Variationskoeffizient bei der Biogaserzeugung lag bei 1,1 %. Ein ganz ähnliches Ergebnis resultiert aus der Betrachtung der spezifischen Methanausbeute, wie im Abschlussbericht der ESCH-GmbH dargestellt. Insgesamt konnte aus den Ergebnissen des Varianzversuches und der im Abschnitt 2.3 beschriebenen Inbetriebnahme und Test der Beschallungstechnik festgestellt werden, dass die durch die Versuchseinrichtung bedingte Varianz geringer ist, als die durch die Schallwirkung erwarteten Änderungen. Somit wurde mit den Beschallungsversuchen fortgesetzt.

Um einen eventuellen Einfluss der Beschallung auf den Biogasprozess experimentell nachzuweisen, wurden bei der Auswertung der Beschallungsversuche für die jeweils zu betrachtende Gütegröße die relativen Abweichungen zum Mittelwert der Nullversuche (Fermenter 7 und 8) berechnet. Durch die Relativierung der Abweichungen wurde eine Vergleichbarkeit zwischen den Versuchsserien erreicht. Bei Betrachtung der Methanausbeute als relevante Gütegröße betrug die maximale Abweichung vom Mittelwert der Nullversuche 2,2%. Bei den Versuchen mit Schalleinfluss wurden daher nur Abweichungen, die diesen Wert übersteigen, als relevante Wirkungen der Beschallung eingestuft.

Ziel war es zunächst festzustellen, ob in einem bestimmten Frequenzbereich eine Schallwirkung detektiert werden kann; veränderlicher Beschallungsparameter war somit die Frequenz der Beschallung. Dabei wurde die Zuordnung zwischen den Fermentern und den Beschallungsfrequenzen im Laufe der Versuchsserien variiert, um exemplarstreuungsbedingte Fehlinterpretationen zu vermeiden. Die Amplituden wurden unter Beachtung des für den Menschen zumutbaren Schallpegels festgelegt und die Beschallungszeiten betrugen 30 min/h in den Versuchsserien V1 bis V8 und 4 min/h (reduzierte Beschallungsdauer) in den Versuchsserien V9, V10 und VD.

Im Anhang 2 befindet sich eine Ergebnisliste aller in die Auswertung einbezogenen Batchversuche. Eine grafische Zusammenfassung der Ergebnisse ist in Abbildung 2 dargestellt. Dort sind für die einzelnen Batchversuche die relativen Abweichungen der Methanausbeuten zu den Nullversuchen über die Frequenz aufgetragen. Die zusätzliche Farbinformation der Ergebnispunkte bezieht sich auf die verwendeten Fermenter. Dabei sind Fermenter F1 bis F6 die oben beschriebenen mit Unterwasserlautsprecher beschallten 30-Liter-Fermenter. Zu Vergleichszwecken wurde in den Versuchsserien V8 bis V10 in einem Fermenter zur Schallerzeugung eine Ultraschallsonotrode verwendet (Fermenter F4S). Der Fermenter FD1 ist der beschallte 150-Liter-Fermenter; auf die Versuche mit den 150-Liter-Fermentern wird später noch eingegangen.

Es ist zu erkennen, dass eine Häufung im Bereich von signifikant höherer Methanausbeute bei Frequenzen im oberen hörbaren Schallbereich und darüber hinaus auftritt. Von den mit Frequenzen über 18 kHz durchgeführten Versuchen lagen 73 % im Bereich der signifikanten Verbesserung mit Schwerpunkt bei 22 kHz / 8 %.

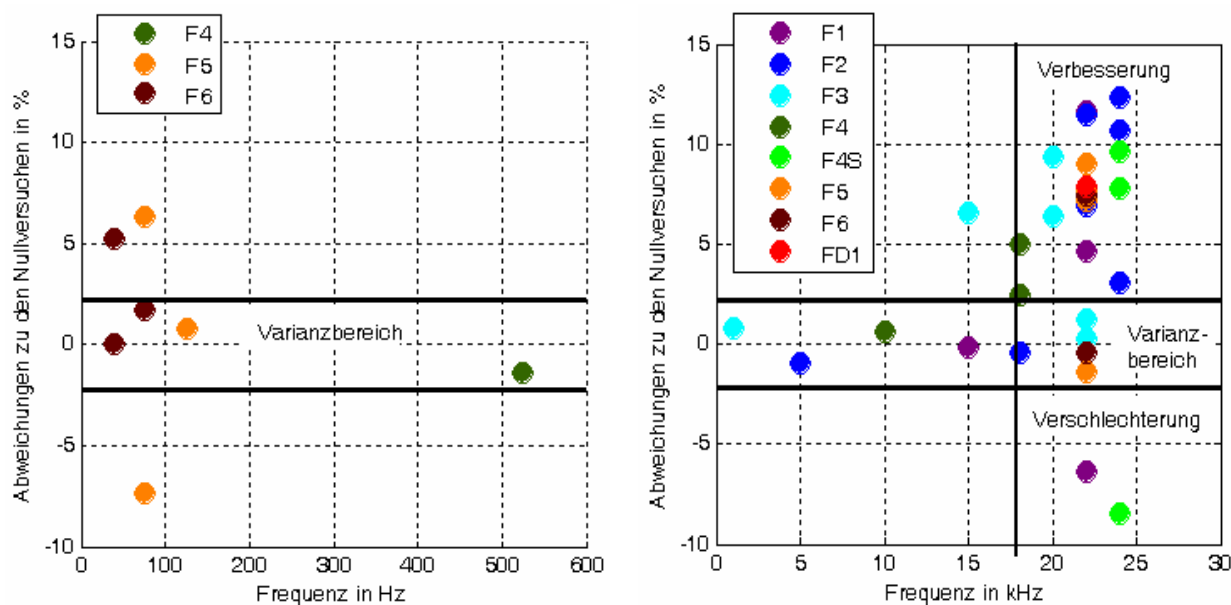


Abbildung 3: Relative Abweichungen der Methanausbeute zu den Nullversuchen

Eine offene Frage im Hinblick einer Betrachtung des Aufwand-Nutzen-Verhältnisses ist jedoch, welches Substratvolumen durch eine Schallquelle bestimmter Leistung wirkungsvoll beeinflusst werden kann. Dazu müsste das Volumen der Versuchsfermenter schrittweise erhöht werden. Aufgrund zweier im Labor der ESCH-GmbH vorhandener 150-Liter-Fermenter konnte ein Schritt in dieser Richtung vorgenommen werden. Die Batchversuche wurden ergänzt durch eine Versuchsserie VD, bei der zwei 150-Liter-Fermenter zum Einsatz kamen, wobei einer mit 22 kHz beschallt wurde und der andere als Nullversuch diente. Abbildung 4 zeigt den Verlauf der erzeugten Methanmenge über die 35 Tage Versuchszeit.

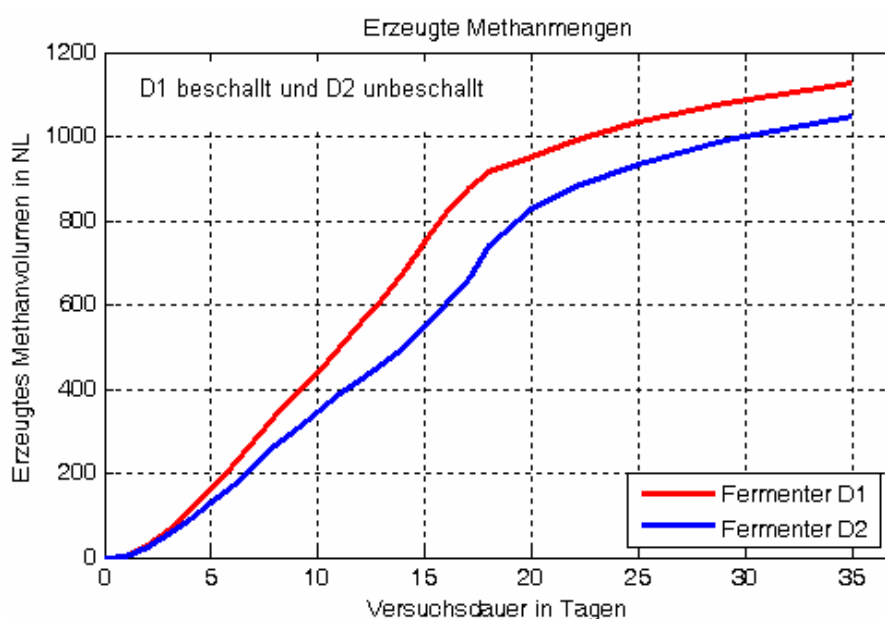


Abbildung 4: Batchversuche mit den 150-Liter-Fermentern

Die relative Erhöhung der Methanausbeute des beschallten Fermenters gegenüber dem Nullversuch betrug am Ende des Versuches 7,9 %, wobei aber auch ein Sättigungseffekt durch das Aufeinanderzulaufen der beiden Kurven erkennbar ist. Insgesamt zeigt das Ergebnis, dass der oben festgestellte Effekt auch nach dieser vorgenommenen Volumenskalierung mit Faktor 5 in gleicher Größenordnung vorhanden ist. Zur Feststellung von Grenzen der Volumenskalierbarkeit wären weitere Versuchsserien an größeren Fermentern notwendig. Bei der Betrachtung des Aufwand-Nutzen-Verhältnisses im folgenden Abschnitt wurde deshalb nur eine Schätzung mithilfe der im Arbeitspaket 1 erlangten Erkenntnissen vorgenommen.

2.5 Optimierung des Aufwand-Nutzen-Verhältnisses

In diesem Arbeitspaket wurden theoretische und praktische Untersuchungen hinsichtlich des Aufwand- Nutzen- Verhältnisses durchgeführt.

Theoretische Arbeiten

Zum einen konzentrierten sich die Betrachtungen auf den Schallwandler. Bekannt ist, dass hinsichtlich der Energie „normale“ elektrodynamische Lautsprecher einen Wirkungsgrad von deutlich $< 1\%$ aufweisen [4]. Sie sind daher energetisch äußerst ineffizient hinsichtlich der Umwandlung elektrischer Energie in mechanische Energie des Schallfeldes.

Die Ableitung der Berechnung des Wirkungsgrades von Breitbandlautsprechern zeigt deutlich, dass der geringe Wirkungsgrad wesentlich eine Konsequenz der Breitbandeigenschaften und der angestrebten Fähigkeit der Wiedergabe möglichst tiefer Frequenzen des Lautsprechers ist [4]. Die vorstehenden Gegebenheiten zeigen das Optimierungspotential im vorliegenden Fall auf. Das Ergebnis der diskontinuierlichen Versuche ist ein Mehrertrag an Biogas von 7-10% bei einer Anregungsfrequenz von $f = 22kHz$. Es ist offensichtlich, dass der Schallwandler für den Einsatzfall der Beschallung im Fermenter lediglich eine Frequenz übertragen muss, d.h. der Wandler kann praktisch für sehr schmalbandigen Betrieb um $f = 22kHz$ optimiert werden. Eine praktische Realisierung eines solchen Schallwandlers ist eine Sonotrode, welche Wirkungsgrade von 80-90% [5] hinsichtlich der Wandlung elektrischer Energie in mechanische Energie des Schallfeldes aufweist. Unter Verwendung letztgenannter Angaben ergibt sich bei Verwendung einer Sonotrode anstatt eines Breitbandlautsprechers eine Effizienzsteigerung um den Faktor 80-150!

Ein weiterer Ansatzpunkt ist mit dem Schallfeld verknüpft. Die theoretischen und praktischen Arbeiten, welche in Abschnitt 2.1 dargestellt sind, zeigen, dass die Eindringtiefe des Schalls im Bereich $f = 20kHz$ sehr gering ist, da offensichtlich der überwiegende Anteil der Schallenergie durch das Medium (typischer Fermenterinhalt) im Schallfeld räumlich nahe der Emission absorbiert wird. Schon eine Messung in 2,5 cm Abstand vom Lautsprecher bei typischem Fermenterinhalt im Schallfeld zeigt keine signifikante messbare Leistung bei der Anregungsfrequenz.

Geht man von der Hypothese einer signifikanten Schallbeeinflussung von maximal 1cm vor der Lautsprechermembran und von einem Membrandurchmesser des verwendeten Lautsprechers von $d = 13\text{cm}$ aus, so ergibt sich ein vom Schall beeinflusstes Volumen von

$$V_{SF} = \frac{\pi}{4} d^2 \cdot x = \frac{\pi}{4} (13\text{cm})^2 \cdot 1\text{cm} = 133\text{cm}^3. \quad (2)$$

Ein 30 Liter-Versuchsfermenter hat ein Nettovolumen von $V_{F30} = 24000\text{cm}^3$. Bei Verwendung der beiden Volumina kann ermittelt werden, dass zu einem Zeitpunkt der Beschallung bei den diskontinuierlich betriebenen Versuchen nur ca. 0,5% des Fermenterinhalt durch den Schall beeinflusst wird. Die Versuchsserien V10 und VD wiesen beispielsweise eine Beschallungszeit von 4min/h auf, d.h.

$$t_B = 24\text{h} \cdot 4\text{min}/\text{h} = 96\text{min}/\text{d}. \quad (3)$$

Beim Betrieb der Versuchsfermenter wird, wie bei einer großtechnischen Anwendung, der Fermenterinhalt homogenisiert, d.h. gerührt. Somit kann davon ausgegangen werden, dass eine fiktive Volumeneinheit eine bestimmte Verweilzeit eines Batchversuchs im vom Schall beeinflussten Volumen hat. Diese berechnet sich für die Versuchsreihe V10 wie folgt:

$$t_{VB30} = \frac{V_{SF}}{V_{F30}} \cdot t_B = \frac{133\text{cm}^3}{24000\text{cm}^3} \cdot 96\text{min}/\text{d} = 0,53\text{min}/\text{d} \quad (4)$$

$$t_{VB30} = 32\text{s}/\text{d}$$

Die Zeit t_{VB} wird an dieser Stelle als *effektive Beschallungsdauer* eingeführt. Die Beziehung (4) zeigt, dass die effektive Beschallungsdauer einerseits von der Fermentergröße und andererseits von der Einschaltzeit des Lautsprechers abhängt. Die Intensität der Beschallung, d.h. die Amplitude findet hier keine Berücksichtigung. Die Versuche VD und VK fanden in 150- Liter-Fermentern mit einem Nettovolumen von 120 Liter und der gleichen absoluten Beschallungsdauer (Einschaltzeit der Lautsprecher) statt. Somit ergibt sich hier eine effektive Beschallungsdauer von

$$t_{VB150} = \frac{V_{SF}}{V_{F150}} \cdot t_B = \frac{133\text{cm}^3}{120 \cdot 10^3\text{cm}^3} \cdot 96\text{min}/\text{d} = 0,106\text{min}/\text{d} \quad (5)$$

$$t_{VB150} = 6,4\text{s}/\text{d}$$

Aufgrund dessen, dass die Beschallungszeit gegenüber den Versuchen in den 30 Liter-Fermentern nicht verändert wurde, ergibt sich eine um den Faktor der Volumenvergrößerung verkleinerte effektive Beschallungszeit¹.

Da die relative Steigerung des Methangasertrages beim Versuch VD der des Versuches V10 entsprach, kann aufgrund der verkleinerten effektiven Beschallungsdauer geschlussfolgert werden, dass ein Sättigungsverhalten hinsichtlich der positiven Wirkung der Einflussgröße Beschallung vorliegt, d.h. der Versuch V10 wurde sicher mit einer unnötig großen effektiven Beschallungsdauer durchgeführt. Zum Versuch VD kann in dieser Hinsicht keine Aussage getroffen werden, da Versuche mit kleinerer effektiver Beschallungsdauer aus Zeitgründen nicht durchgeführt werden konnten.

Praktische Arbeiten

Weiteres Optimierungspotential wird bei der Betrachtung der Energiebilanz der Versuchstechnik offensichtlich, die messtechnisch erfasst wurde.

Baugruppe	Leistung
Verstärker+ Frequenzgenerator (Lautsprecher aus)	11,7 W
Verstärker+ Frequenzgenerator (Lautsprecher an)	15,8W
Lautsprecher	4,1W

Tabelle 3: Leistung der Baugruppen der Beschallungstechnik für Nominalbetrieb

Die Tabelle 3 zeigt die elektrischen Wirkleistungen der Baugruppen der Beschallungstechnik. Dabei fällt auf, dass der Lautsprecher mit den für die Versuche relevanten Einstellungen. Eine Wirkleistung von $P_e = 4,1W$ aufnimmt. Nimmt man einen sehr optimistischen Wirkungsgrad von $\eta_L = 0,01$ an, so ergibt sich eine mechanische Leistung von $P_s = 41 mW$, die an das Schallfeld abgegeben wird.

Der Verstärker besitzt einen Wirkungsgrad von

$$\eta_V = \frac{4,1 W}{11,7 W} = 0,35 \quad . \quad (6)$$

Wie bereits in diesem Abschnitt beschrieben (theoretischen Arbeiten), kann der Schallwandler aufgrund der notwendigen kleinen Bandbreite mit einer Sonotrode ausgeführt werden, welche einen Wirkungsgrad von 80-90% aufweist. Bei einem angenommenen Wirkungsgrad von

¹ Die Abweichungen in den Zahlenwerten sind durch Rundungen verursacht.

$\eta_L = 0,8$ hätte sich für den gleichen Effekt im Prozess eine notwendige elektrische Leistung von $P_e = 51 \text{ mW}$ ergeben.

Zum Wirkungsgrad des Verstärkers ist auszuführen, dass dieser sehr schlecht erscheint, jedoch typisch für Verstärker dieses Bautyps ist. Ein wesentlicher Anteil der Verluste entsteht beim verwendeten Gerät durch den Netztransformator. Die Leistung des Verstärkers ist nur gering belastungsabhängig, was vorstehende Tatsache verdeutlicht.

Für eine wirkungsgradoptimierte Technik wird die Verwendung von Class- D Schaltverstärkern vorgeschlagen. Bei dieser Bauart wird die Verstärkerstufe im Schaltbetrieb mit ausreichend hoher Frequenz betrieben, was die Verluste erheblich reduziert. In Verbindung mit Schaltnetzteilen erreichen Class- D Schaltverstärker Wirkungsgrade von 80- 90%.

$$\eta = \eta_V \cdot \eta_L \quad (7)$$

Mit diesen Angaben und denen des Lautsprechers kann unter Anwendung von (7) ein Gesamtwirkungsgrad hinsichtlich der Umwandlung von elektrischer Energie in mechanische Energie des Schallfeldes von $\eta = 64...81\%$ erreicht werden. Unter Verwendung der unteren Schranken der optimierten Wirkungsgrade ändern sich die entsprechenden Werte der Tabelle 3 zu denen der Tabelle 4.

Baugruppe	Leistung
Verstärker (Lautsprecher aus)	$\ll 64 \text{ mW}$
Verstärker (Lautsprecher an)	64mW
Schallwandler	51mW

Tabelle 4: Leistung der Beschallungstechnik nach Wirkungsgradoptimierung

Bei den Ergebnissen in Tabelle 4 ist die Leistung des Frequenzgenerators nicht berücksichtigt, da dieser lediglich eine Informationselektronik darstellt, welche sehr leistungsarm aufgebaut werden kann.

Szenarien zur quantitativen Betrachtung der Zusammenhänge zwischen Wirkungsgraden der Verstärker, Schallwandler und deren Auswirkung auf die Effizienz der Steigerung der Biogasausbeute bei Beschallung sind im Abschlussbericht des Projektpartners ESCH untersucht und dargestellt.

2.6 Anpassung und Probetrieb kontinuierlicher Fermenter entsprechend den Ergebnissen

Die Versuche mit diskontinuierlicher Fermentation in den 30 Liter-Versuchsfermenter haben gezeigt, dass Parallelversuche notwendig sind. Unter Verwendung lediglich eines Fermenters (wie ursprünglich geplant) können Versuche nur in zeitlicher Sequenz durchgeführt werden, was das Problem unterschiedlicher Versuchsbedingungen hervorrufen kann. Die größte und nie vollkommen einzuhaltende Bedingung ist die der exakten Gleichheit der Substrate. Aus vorgenannten Gründen wurde nach reiflicher Diskussion unter den Projektpartnern entschieden, die bei ESCH vorhandenen zwei 150 Liter-Fermenter für die Beschallungsversuche zu verwenden. Die genannten Fermenter müssen manuell beschickt werden, besitzen ein automatisches Rührwerk mit entsprechender einstellbarer Steuerung und eine automatische Temperaturregelung.

Die Anpassung der Fermenter für die durchzuführenden Versuche bestand darin, einen der beiden Fermenter mit einem Lautsprecher auszustatten. Die gesamte Beschallungstechnik bestehend aus Frequenzgenerator, Verstärker und Lautsprecher wurde von einem 30 Liter-Fermenter übernommen. Für die anschließend durchgeführten Versuche wurden die Einstellungen der Beschallungstechnik vom Versuch V10 übernommen.

Aufgrund der negativen Erfahrungen mit der Durchflussmesstechnik wurde die bewährte Messmethodik von ESCH mittels Auffangen des Gases in Beuteln und nachfolgender indirekter Volumenmessung über Durchflussmessung vorgesehen.

Für die nachfolgend beschriebenen Versuche wurden die Fermenter stets mit exakt gleicher Substratmischung betrieben. Dies wurde durch gemeinsame Homogenisierung des Inhalts beider Fermenter in einem Behälter und anschließende Befüllung erreicht. Ebenso wurden, die für die Versuche zur kontinuierlichen Fermentation benötigten Substratdosierungen auf diese Weise bereitgestellt.

2.7 Durchführung von Versuchen in kontinuierlichen Fermentern unter optimierten Bedingungen und Bildung eines Modells mit der zusätzlichen Einflussgröße des Schalls

Aus den im obigen Abschnitt beschriebenen Gründen wurden auch die kontinuierlichen Gärversuche an den beiden in der Versuchsserie VD verwendeten 150-Liter-Fermentern durchgeführt. Die nach bisherigem Stand der Batchversuche ermittelten optimalen Beschallungsparameter spiegeln sich in den drei letzten Versuchsserien V9, V10 und VD wider und wurden deshalb beibehalten. Es erfolgte also auch beim kontinuierlichen Referenzversuch, mit Versuchsserie VK bezeichnet, eine Beschallung von 22 kHz mit einer Dauer von 4 min/h. Beschickt wurden täglich 4 Liter Rindergülle mit einem Anteil an organischer Trockensubstanz

von ca. 5,4%. Daraus ergibt sich unter Beachtung des Nettovolumens von 120 Liter eine statistische Verweilzeit im Gärbehälter von 30 Tagen und eine Raumbelastung mit organischer Trockensubstanz von ca. 2 kg/(m³ d).

Zur Feststellung von Abweichungen, die durch die Versuchstechnik verursacht werden, wurde zunächst wieder ein so genannter Varianzversuch durchgeführt, bei dem die zwei Fermenter parallel ohne Beschallung betrieben wurden. Abbildung 5 zeigt das täglich erzeugte sowie das über die Versuchszeit kumulierte Methanvolumen, wobei sich der jeweils linke Teil auf den Varianzversuch bezieht. Die Berechnung des maximalen empirischen Variationskoeffizienten bezüglich der erzeugten Methanmenge ergab 1,3% und liegt damit in der gleichen Größenordnung wie beim oben beschriebenen Varianzversuch V02. Somit konnte der Versuch durch Beschallung des Fermenters D1 fortgesetzt werden.

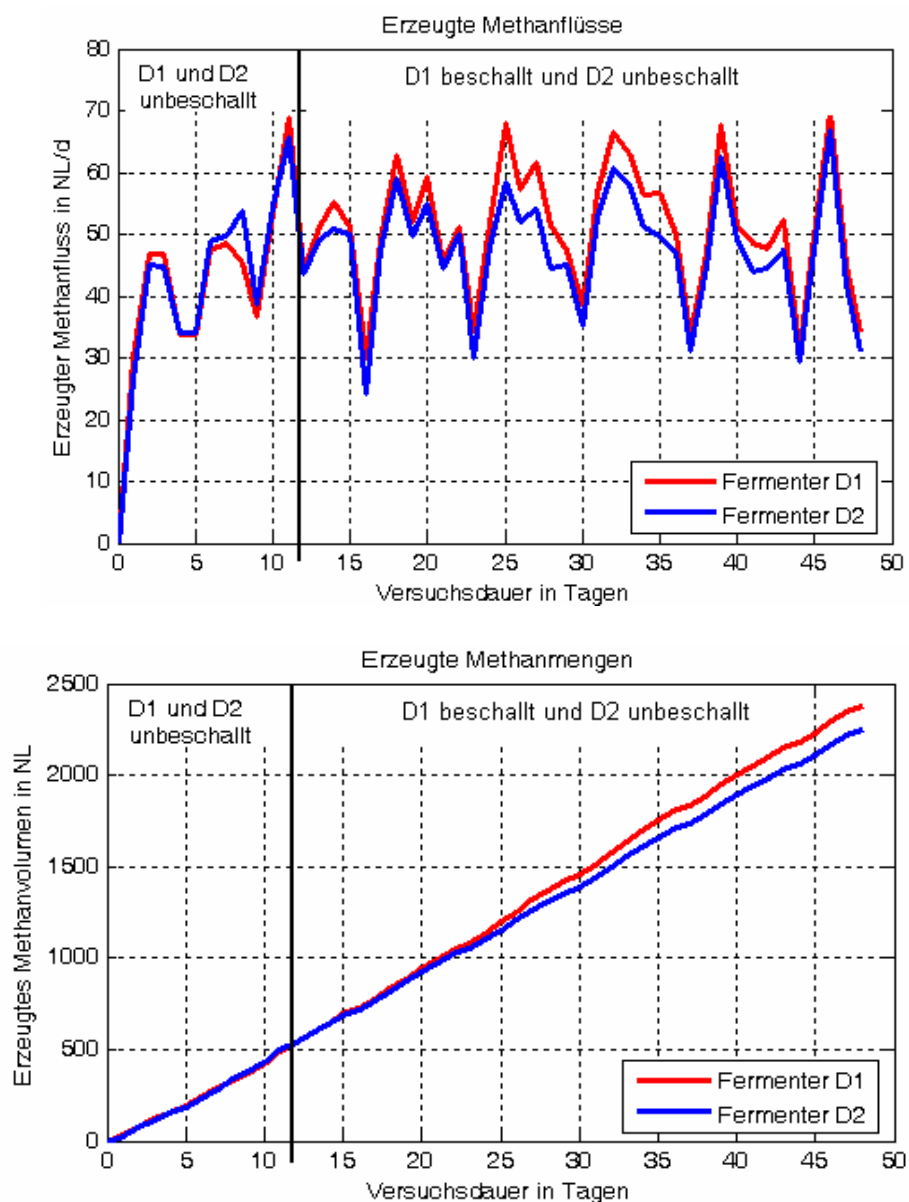


Abbildung 5: Kontinuierliche Versuche mit den 150-Liter-Fermentern

Im unteren Teil der Abbildung 5 ist deutlich eine beschleunigte Methanbildung zu erkennen. Nach 30 Versuchstagen mit Beschallung war die vom Fermenter D1 erzeugte Methanmenge 8,1% höher gegenüber D2 (Nullversuch), was das Ergebnis der Batchversuche bestätigt.

Neben der Untersuchung der Schallwirkung auf den Biogasprozess war ein weiteres Ziel des Projektes, ein Konzept für die Automatisierung von Biogasanlagen unter Einbeziehung der Einflussgröße Beschallung weiterzuentwickeln. Im Ergebnis eines früheren Projektes ist ein kybernetisches Modell des Biogasprozesses vorhanden. Auf der Grundlage dieses Modells ist eine Regelung des Methanflusses mithilfe der Substratzufuhr realisiert. Ein Optimierungsmodul berechnet im laufenden Betrieb auf der Grundlage des Modells und aller weiteren Kosten und Erlöse beeinflussenden Parametern den Methanfluss im Gewinnmaximum und gibt diesen als Sollwert an die Regelung weiter. Für konkretere Ausführungen sei auf [2] verwiesen.

Ein wesentlicher Schritt zur Einbindung der Beschallung in das Automatisierungskonzept einer Biogasanlage ist somit, das in [2] beschriebene empirische Prozessmodell in seinem Eingangsraum mit variierbaren Beschallungsparametern zu erweitern. Die Modellbildung geschieht dabei auf experimentellem Wege auf Basis von aus Versuchen gewonnenen Messdaten. Um das statische und dynamische Verhalten der Schallbeeinflussung quantitativ zu bestimmen, sind jedoch mehr Versuche erforderlich als die im Projektzeitraum durchgeführten. Für die Modellbildung notwendige aber noch unbestimmte Größen beziehen sich auf die Volumenskalierung und die damit verbundenen Sättigungseffekte. Im Abschnitt 2.10 wird auf diese und weitere dafür notwendige aber noch offene Untersuchungspunkte eingegangen.

Aus den oben genannten Gründen, wurde die Erweiterung des Modells mithilfe eines zunächst unbestimmten polynomialen Zusammenhangs vorgenommen und mithilfe der CAE-Software MATLAB[®] umgesetzt. Die Koeffizienten des Polynoms können aus den später vorhandenen Versuchsdaten mithilfe eines Schätzalgorithmus bestimmt werden. Durch diesen modularen Aufbau wird perspektivisch eine fortwährende Einbindung von Modellkorrekturen ermöglicht.

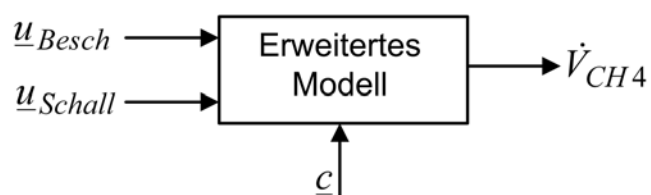


Abbildung 6: Blockbild zur Erweiterung des Modells

Abbildung 6 zeigt das Blockbild zur Modellerweiterung. Dabei ist \dot{V}_{CH_4} die erzeugte Methanmenge pro Zeiteinheit. Die Eingangsvariablen des Modells werden durch die relevanten Parameter von Beschickung und Beschallung gebildet, welche in den Vektoren \underline{u}_{Besch} und \underline{u}_{Schall} zusammengefasst sind. Die Beschickungsparameter \underline{u}_{Besch} bestehen dabei aus den Parametern zur Beschreibung der Substratmischung \underline{u}_{mix} (verwendete Arten und Mischungs-

verhältnis) sowie aus dem Substratfluss in den Fermenter $\dot{V}_{Substrat}$. Die Beschallungsparameter \underline{u}_{Schall} sind im Abschnitt 2.4 aufgeführt. Im Vektor \underline{c} sind die noch unbestimmten Koeffizienten des Polynoms

$$\dot{V}_{CH4} = P(\underline{u}_{Besch}, \underline{u}_{Schall}, \underline{c}) \quad (8)$$

zusammengefasst. Die Modellerweiterung bezieht sich bewusst nicht nur auf die Beschallungsparameter, um auch Korrelationen zwischen Beschallungs- und Beschickungsparametern berücksichtigen zu können.

2.8 Weiterentwicklung des Konzeptes zur Steuerung / Regelung und Optimierung von Biogasanlagen unter Einbeziehung der Einflussgröße des Schalls

Mithilfe des erweiterten Modells ist es möglich, die Wirkung des Schalls in einem automatisierten Anlagenbetrieb zu nutzen, bestehend aus einer Steuerung / Regelung und einer automatisierten Optimierung.

Die vorhandene Regelung benutzt, wie in [2] dargestellt, zur Prozessbeeinflussung den Beschickungsparameter $\dot{V}_{Substrat}$. Eine Möglichkeit, die Beschallung in die Regelung einzubinden, ist eine Erweiterung dieser um eine zweite Stellgröße, im einfachsten Fall Beschallung ein / aus. Die zweite Stellgröße könnte zur Beschleunigung der Prozessdynamik genutzt werden, um beispielsweise schnellen Sollwertänderungen in der abzugebenden Leistung folgen zu können (bedarfsgerechte Energieerzeugung). Aufgrund der fehlenden Informationen über die Wirkung des Schalls auf die Prozessdynamik wurde dieser Ansatz im Projekt nicht weiter verfolgt. Vielmehr wurde eine zweite Möglichkeit betrachtet, für die ein Konzept für die Einbindung der Beschallung in die Optimierung entwickelt und durch eine MATLAB-Funktion vorbereitet wurde.

Die Beschallung kann auch nach derzeitigem Erkenntnisstand bezüglich ihres Effektes ähnlich dem der Einflussgrößen Rühren und Temperatur betrachtet werden und dient deshalb neben diesen Größen einer steuernden Prozessbeeinflussung. Im Unterschied zu den Einflussgrößen Rühren und Temperatur werden in diesem Konzept die Beschallungsparameter aber nicht ausschließlich manuell festgelegt sondern sind Ergebnis einer automatisierten Optimierung, welche den Zusammenhang (8) benötigt. Die Modellerweiterung ist demnach nur als Gleichungsnebenbedingung für die Optimierung relevant, sodass ein statischer Modellansatz, wie das in (8) dargestellte Polynom gerechtfertigt ist. Für die Regelung stellt die Schalleinwirkung eine Prozessstörung dar, welche ausgeglet wird, d.h. falls durch den Schalleintrag ein

Mehrertrag an Methan festgestellt wird, wird der gewünschte Sollwert weiterhin realisiert, indem die Substratzufuhr reduziert wird. Somit wird durch die Regelung ein eventueller Nutzen der Beschallung auf die Einsparung von Substratkosten umgelegt, ohne dass ein vollständiges dynamisches Prozessmodell unter Einbeziehung der Beschallungsparameter vorliegen muss. Für die Regelung ist ausschließlich das ursprünglich vorhandene Prozessmodell relevant.

Das Optimierungsmodul soll sicher stellen, dass durch die Beschallung tatsächlich eine Gewinn-erhöhung erzielt wird. Zu diesem Zweck wurde das erweiterte Modell nach Abbildung 8 zur Berechnung des Gewinns algorithmisch eingebunden.

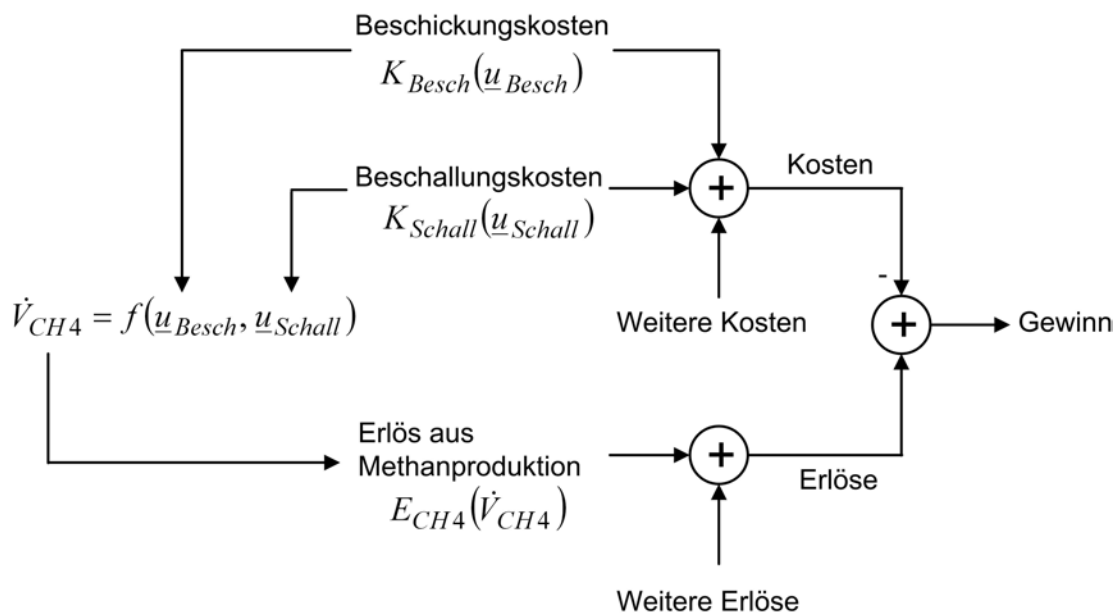


Abbildung 7: Blockbild zur Berechnung der Zielfunktion

Aus diesen Zusammenhängen ist die zu maximierende Zielfunktion des Optimierungsproblems, d.h. der Gewinn $G = f(E, K)$ in Abhängigkeit vom Erlös E und Kosten K , berechenbar. Mit $E(\dot{V}_{CH_4})$, $\dot{V}_{CH_4}(\underline{u}_{Besch}, \underline{u}_{Schall})$ und $K(\underline{u}_{Besch}, \underline{u}_{Schall})$ ergibt sich

$$G = f(\dot{V}_{CH_4}, \underline{u}_{Besch}, \underline{u}_{Schall}) = f(\dot{V}_{CH_4}, \underline{u}_{mix}, \dot{V}_{Substrat}, \underline{u}_{Schall}) \quad (9)$$

Da der Methanfluss \dot{V}_{CH_4} mithilfe der Stellgröße $\dot{V}_{Substrat}$ geregelt wird, verbleibt für die Optimierung die Vorgabe eines Sollwertes $\dot{V}_{CH_4}^{Soll}$. Das vollständige Optimierungsproblem lautet deshalb

$$\max \left\{ G = f(\dot{V}_{CH_4}^{Soll}, \underline{u}_{mix}, \underline{u}_{Schall}) \right\} \quad | \quad \underline{h}(\dot{V}_{CH_4}^{Soll}, \underline{u}_{mix}, \underline{u}_{Schall}) \leq \underline{0} \quad (10)$$

Durch die Ungleichungsnebenbedingungen \underline{h} werden technische und prozessbedingte Restriktionen berücksichtigt.

2.9 Erstellung eines Anlagenkonzeptes

In diesem Arbeitspaket wurden konzeptionelle Arbeiten hinsichtlich der Erstellung einer praxisgerechten Anlagenausführung einer Biogasanlage mit Beschallung durchgeführt. Ziel war es dabei die theoretischen und praktischen Erkenntnisse des Projektes hinsichtlich der Schallbeeinflussung im Fermenter in ein Konzept umzusetzen, welches die Wirtschaftlichkeit der Methodik im großtechnischen Maßstab berücksichtigt.

Als größte Unsicherheit hinsichtlich der Anwendbarkeit des Verfahrens muss die Volumenskalierung angesehen werden. Im Rahmen des Projektes konnte allgemein festgestellt werden (vgl. Abschnitt 2.5), dass sowohl eine zu große effektive Beschallungsdauer keine positive Wirkung mehr erzielt, d.h. es gibt einen Sättigungseffekt, als auch, dass eine Volumenskalierung hin zu größeren Volumen möglich ist. Zwangsläufig muss aber eine Grenze des Fermentervolumens existieren, nach deren Überschreitung der Mehrertrag an Methangas bei Eintrag gleicher Schallenergie wieder zu sinken beginnt. Diese Grenze konnte im Projekt aufgrund der apparativen Ausstattung nicht ermittelt werden. Es ist vorgesehen, diesen Parameter durch Versuche an großtechnischen Anlagen zu ermitteln, denn es ist nicht wirtschaftlich Versuchstechnik in dieser Größenordnung bereitzustellen. Ferner ist hinsichtlich dieser Problematik zu beachten, dass im Rahmen des Projektes noch nicht ausreichende Kenntnisse hinsichtlich Beschallungsdauer und Beschallungsintensität und deren Korrelation gewonnen werden konnten. So muss noch untersucht werden, ob

- eine bestimmte Beschallungsdauer (bei temporär nicht stattfindender Homogenisierung) kontraproduktiv ist,
- allgemein eine bestimmte Beschallungsintensität kontraproduktiv ist,
- bei ständig stattfindender Homogenisierung eine große Beschallungsdauer mit geringer Beschallungsintensität gleichwertig zu einer kleinen Beschallungsdauer mit großer Intensität ist.

Nachfolgend sollen einige Aspekte zur Installation und zum Betrieb der Beschallungstechnik betrachtet werden.

Je nach vorhandener Rührtechnik im Fermenter ist offensichtlich, dass eine unterschiedliche Anzahl an Schallwandlern im Fermenter zu installieren und diese unterschiedlich zu betreiben sind. Qualitativ gilt:

Rührwerk	Anzahl Schallwandler je Volumen- einheit	Einschaltzeit Schallwandler
Langsamläufer, nicht intermittierend	klein	groß - dauernd
Schnellläufer, intermittierend	groß	klein, ggf. beim Rühren

Tabelle 5: Schallwandler (Anzahl, Betriebsweise) in Abhängigkeit der Rührtechnik

Es wird vorgeschlagen die Schallwandler im oberen Bereich der Fermenter (ca. 1m Eintauchtiefe) mit zum Zentrum zeigender maximaler Richtwirkung an der Fermenterwandung über Winkel zu installieren. Eine Konformität der Schallwandler hinsichtlich des Betriebs im Ex-Bereich muss dabei abgesichert werden.

Der Verstärker der Beschallungstechnik soll aus Effizienzgründen als Class- D Schaltverstärker ausgeführt werden; der Frequenzgenerator ist eine unkritische Komponente und bedarf keiner weiteren Betrachtung. Als Schallwandler sollen aus Effizienzgründen Sonotroden eingesetzt werden. Verstärker und Schallwandler werden im Bereich der bestehenden Automatisierungsanlage (Schaltschrank) installiert. Die Leitungen zu den Schallwandlern sind mit entsprechend großen Querschnitten auszuführen, um unzulässige Impedanzanteile zu vermeiden.

Die Einbindung der Einflussgröße Schall in das Automatisierungskonzept erfolgt wie im Abschnitt 2.8 dargestellt.

2.10 Zusammenfassung des Projektes und Darstellung von Verwertungsaussichten

Das Projekt hatte zum wesentlichen Ziel die Steigerung der Biogasausbeute bei anaerober Fermentation durch den Eintrag von Schallwellen im Bereich $f < 20kHz$ zu untersuchen.

Als wesentliches Ergebnis des Projektes kann genannt werden, dass mit Hilfe einer Anregung durch Schall im hörbaren und den sich oberhalb anschließenden Bereich bis $f < 24kHz$ das vorgenannte Ziel erreicht werden kann. Signifikante Steigerungen lassen sich mit sehr tieffrequenter Anregung $f < 60Hz$ oder mit hochfrequenter Anregung $f > 15kHz$ erreichen. Aufgrund dessen, dass die vorhandene Beschallungstechnik im oberen Frequenzbereich effizienter arbeitet und dem Umstand, dass das menschliche Gehör oberhalb 15 kHz praktisch keine Empfindlichkeit aufweist, wurde der obere Frequenzbereich eingehender untersucht. Ein Großteil der Versuche wurde unter Verwendung von $f = 22kHz$ durchgeführt. Die Versuche mit Beschallung bei dieser Frequenz ergaben Mehrerträge für Methan im Bereich 7...10%, sowohl für kontinuierliche als auch für diskontinuierliche Fermentation. Als Substrate wurden dabei Mischungen aus nachwachsenden Rohstoffen und Gülle als auch ausschließlich Gülle verwendet. Die Versuchsumgebung bestand aus 30 Liter-Versuchsfermenter und aus 150 Liter-Versuchsfermenter. Durch die unterschiedlichen Volumina der Fermenter konnte eine Sättigungseigenschaft des Schalleintrags nachgewiesen werden, d.h. eine Steigerung der Schallintensität und der Beschallungsdauer in einer Volumeneinheit führt nicht zwangsläufig zu einer Steigerung des Methanertrags. Für das Ergebnis der durchgeführten Versuche bedeutet dies auch, dass mit der eingetragenen Energie durchaus ein noch größeres Volumen beschallt werden könnte und dabei die gleiche relative Ertragssteigerung erzielt wird. Genauere Erkenntnisse dazu sollen im Anschluss an das Projekt gewonnen werden.

Die verwendete Beschallungstechnik wurde für Versuchszwecke ausgelegt und ist energetisch sehr ineffizient. Untersuchungen bezüglich der Energiebilanz (gewonnene Energie im Bezug zu aufgewendeter Energie) zeigen mit der Versuchstechnik negative Werte. Betrachtet man allerdings speziell abgestimmte effiziente Beschallungstechnik, dann ergibt sich eine äußerst positive Bilanz.

Über den bereits zum Zeitpunkt der Antragstellung vorliegenden Stand der Forschung und Technik hinaus muss hier das FuE-Projekt mit dem Titel „Effizienzsteigerung der Biogaserzeugung durch den Eintrag von Niedrigenergie-Ultraschall“ [6], dessen Ergebnisse auf der DECHEMA 2006 von der CUTEC GmbH veröffentlicht wurden, erwähnt werden. Des Weiteren waren die dort eingebrachten Energiemengen wesentlich größer als bei den hier getätigten Versuchen.

Abschließend sei betont, dass die entscheidende zu klärende Frage im Hinblick auf eine großtechnische Anwendung die Volumenskalierung ist. Damit verbunden sind weitere Fragen hinsichtlich maximaler Schallintensität und maximaler Beschallungsdauer.

Literatur-/ Quellenverzeichnis

- [1] Prof. Dr. K.-D. Morgeneier, M. Fischer, U. Fohry: Zwischenbericht zum Verbundvorhaben *Steigerung der Biogasausbeute durch den Eintrag von Schallwellen geringer Intensität in den Fermentationsprozess*, für den Zeitraum 01.08.2011 - 31.07.2012, FH Jena, 2012
- [2] Prof. Dr. K.-D. Morgeneier, M. Fischer, U. Fohry: Abschlussbericht zum ZIM-Projekt *Verfahrensoptimierung und Automatisierungslösung für Biogasprozesse*, FH Jena, 2011
- [3] E.S.C.H. GmbH, FH-Jena: Projektbeschreibung zum Verbundvorhaben *Steigerung der Biogasausbeute durch den Eintrag von Schallwellen geringer Intensität in den Fermentationsprozess*, FH-Jena, 2011
- [4] Joseph D' Appolito: Lautsprecher- Messtechnik, Elektor- Verlag, 1999
- [5] Internetquelle: <http://www.hielscher.com/de/uip2000hdt-2000-watts-powerful-industrial-ultrasonicator-for-full-process-control.htm>, Zugriff am 08.05.2014
- [6] O. Schläfer, T. Oneyeche, M. Sievers, H. Bormann, CUTEC-Institut GmbH, Effizienzsteigerung der Biogaserzeugung durch den Eintrag von Niedrigenergie-Ultraschall.

Anhang

Anhang 1: Tabellen zur Untersuchung der Schallausbreitung

Die Ergebnisse sind in den folgenden 3 Tabellen aufgeführt. Die Untersuchungen wurden zu Vergleichszwecken in den Medien Luft, Wasser und typischer Fermenterinhalt im gleichen Testraum durchgeführt.

Erläuterung der Spalten:

- Tabelle L (Luft)

Spalte 1: f - Frequenz des gesendeten Signals in Hz

Spalte 2: x - waagerechter Abstand von der Lautsprechermitte in mm

Spalte 3: z - senkrechter Abstand von der Lautsprechermitte in mm

Spalte 4: U_{eff} - Effektivwert des empfangenen Signals (Gesamt signal)

Spalte 5: U_{eff}^* - Effektivwert des gefilterten Signals (Nutzs signal)

- Tabelle W (Wasser)

Spalten 1 – 5: wie Tabelle L

Spalte 6: U_{eff_Luft} - normierter Effektivwert des empfangenen Signals bezogen auf die äquivalenten Werte bei Luft (Tab.L, Spalte 4)

Spalte 7: $U_{eff_Luft}^*$ - normierter Effektivwert des gefilterten Signals bezogen auf die äquivalenten Werte bei Luft (Tab.L, Spalte 5)

- Tabelle F (typischer Fermenterinhalt)

Spalten 1 – 7: wie Tabelle W

Spalte 8: U_{eff_Wasser} - normierter Effektivwert des empfangenen Signals bezogen auf die äquivalenten Werte bei Wasser (Tab.W, Spalte 4)

Spalte 9: $U_{eff_Wasser}^*$ - normierter Effektivwert des gefilterten Signals bezogen auf die äquivalenten Werte bei Wasser (Tab.W, Spalte 5)

Tabelle L (Luft):

f/Hz	x/mm	z/mm	U_{eff}	U_{eff}^*
100	25	0	89,42	8,44
100	125	0	89,35	6,88
100	225	0	89,24	4,46
100	25	70	89,02	3,06
100	125	70	89,36	2,82
100	225	70	89,31	7,05
500	25	0	491,34	482,86
500	125	0	162,06	135,18
500	225	0	353,79	342,13
500	25	70	470,02	461,23
500	125	70	164	137,58
500	225	70	320,89	308,04
1000	25	0	110,91	65,81
1000	125	0	89,27	0,8
1000	225	0	89,11	2
1000	25	70	94,14	30,29
1000	125	70	89	0,59
1000	225	70	89,28	3,13
10000	25	0	99,93	44,86
10000	125	0	91,35	19,51
10000	225	0	90,77	17,19
10000	25	70	89,39	9,17
10000	125	70	89,61	9,24
10000	225	70	89,31	2,89
15000	25	0	89,46	5,61
15000	125	0	89,6	9,42
15000	225	0	89,34	7,42
15000	25	70	89,99	12,96
15000	125	70	89,45	7,71
15000	225	70	89,26	5,47

20000	25	0	89,38	4,25
20000	125	0	89,26	3,05
20000	225	0	89,22	5,34
20000	25	70	89,16	6,17
20000	125	70	89,2	2,59
20000	225	70	89,21	2,25

Tabelle 6: Schallmessungen in Luft

Tabelle W (Wasser):

f/Hz	x/mm	z/mm	U_{eff}	U^*_{eff}	$U_{\text{eff_Luft}}$	$U^*_{\text{eff_Luft}}$
100	25	0	966,24	888,07	10,81	105,21
100	125	0	864,17	846,26	9,67	123,08
100	225	0	576,25	569	6,46	127,5
100	25	70	969,08	889,48	10,89	290,75
100	125	70	888,36	861,49	9,94	305,37
100	225	70	669,81	663,83	7,5	94,11
500	25	0	394,84	383,79	0,8	0,79
500	125	0	182,42	158,28	1,13	1,17
500	225	0	404,74	394,35	1,14	1,15
500	25	70	913	874,83	1,94	1,9
500	125	70	300,61	286,98	1,83	2,09
500	225	70	403,31	393,02	1,26	1,28
1000	25	0	931,11	880,02	8,4	13,37
1000	125	0	471,76	462,48	5,28	580,71
1000	225	0	134,07	99,78	1,5	49,81
1000	25	70	919,65	876,38	9,77	28,94
1000	125	70	371,37	360,41	4,17	607,07
1000	225	70	105,47	56,7	1,18	18,09
10000	25	0	102,24	45,8	1,02	1,02
10000	125	0	91,98	8,03	1,01	0,41
10000	225	0	89,95	3,75	0,99	0,22
10000	25	70	92,98	3,9	1,04	0,43
10000	125	70	89,08	0,71	0,99	0,08
10000	225	70	89,01	0,39	1	0,13
15000	25	0	99,54	34,92	1,11	6,23

15000	125	0	89,79	1,7	1	0,18
15000	225	0	90,03	0,38	1,01	0,05
15000	25	70	93,29	1,02	1,04	0,08
15000	125	70	89	1,57	0,99	0,2
15000	225	70	89,17	3,23	1	0,59
20000	25	0	96,61	30,06	1,08	7,07
20000	125	0	89,63	0,59	1	0,19
20000	225	0	90,78	0,14	1,02	0,03
20000	25	70	100,66	0,14	1,13	0,02
20000	125	70	89,05	0,15	1	0,06
20000	225	70	88,96	0,1	1	0,04

Tabelle 7: Schallmessungen in Wasser

Tabelle F (typischer Fermenterinhalt):

f/Hz	x/mm	z/mm	U_{eff}	U^*_{eff}	$U_{\text{eff_Luft}}$	$U^*_{\text{eff_Luft}}$	$U_{\text{eff_Wasser}}$	$U^*_{\text{eff_Wasser}}$
100	25	0	964,66	887,33	10,79	105,12	1	1
100	125	0	895,34	850,02	10,02	123,63	1,04	1
100	225	0	870,02	849,76	9,75	190,41	1,51	1,49
100	25	70	945,65	885,05	10,62	289,3	0,98	1
100	125	70	897,62	867,1	10,04	307,36	1,01	1,01
100	225	70	848,9	835,03	9,51	118,39	1,27	1,26
500	25	0	875,66	852,86	1,78	1,77	2,22	2,22
500	125	0	111,61	65,91	0,69	0,49	0,61	0,42
500	225	0	231,76	213,58	0,66	0,62	0,57	0,54
500	25	70	878,41	855,28	1,87	1,85	0,96	0,98
500	125	70	139,59	107,56	0,85	0,78	0,46	0,37
500	225	70	194,11	172,15	0,6	0,56	0,48	0,44
1000	25	0	897,37	865,57	8,09	13,15	0,96	0,98
1000	125	0	780,63	775,24	8,75	973,41	1,65	1,68
1000	225	0	224,23	205,2	2,52	102,42	1,67	2,06
1000	25	70	939,53	880,72	9,98	29,08	1,02	1
1000	125	70	752,26	747,76	8,45	1259,5	2,03	2,07
1000	225	70	298,42	284,54	3,34	90,79	2,83	5,02
10000	25	0	92,32	0,69	0,92	0,02	0,9	0,02
10000	125	0	90,49	0,06	0,99	0	0,98	0,01

10000	225	0	90,36	0,05	1	0	1	0,01
10000	25	70	90,76	0,39	1,02	0,04	0,98	0,1
10000	125	70	88,86	0,06	0,99	0,01	1	0,09
10000	225	70	90,09	0,06	1,01	0,02	1,01	0,15
15000	25	0	92,61	0,42	1,04	0,07	0,93	0,01
15000	125	0	90,57	0,06	1,01	0,01	1,01	0,03
15000	225	0	91,2	0,06	1,02	0,01	1,01	0,15
15000	25	70	91,25	0,09	1,01	0,01	0,98	0,09
15000	125	70	88,93	0,06	0,99	0,01	1	0,04
15000	225	70	89,36	0,06	1	0,01	1	0,02
20000	25	0	92,95	0,06	1,04	0,01	0,96	0
20000	125	0	90,78	0,06	1,02	0,02	1,01	0,1
20000	225	0	92,99	0,06	1,04	0,01	1,02	0,42
20000	25	70	90,96	0,06	1,02	0,01	0,9	0,43
20000	125	70	88,79	0,07	1	0,03	1	0,44
20000	225	70	89,4	0,06	1	0,03	1	0,66

Tabelle 8: Schallmessungen in typischen Fermenterinhalt

Anhang 2: Ergebnisse der Batchversuche

Frequenz	Fermenter	Relative Abweichung der Methanausbeute zum Mittelwert der Nullversuche	Versuch
40 Hz	F6	5,21 %	V2
40 Hz	F6	0,06 %	V4
75 Hz	F5	-7,37 %	V2
75 Hz	F5	6,28 %	V4
75 Hz	F6	1,71 %	V6
125 Hz	F5	0,78 %	V1
525 Hz	F4	-1,40 %	V1
1025 Hz	F3	0,77 %	V1
5025 Hz	F2	-0,99 %	V1
10025 Hz	F4	0,63 %	V6
15025 Hz	F1	-0,19 %	V1
15025 Hz	F3	6,53 %	V6
18025 Hz	F4	4,95 %	V2
18025 Hz	F4	2,43 %	V4
18025 Hz	F2	-0,45 %	V6
20025 Hz	F3	6,43 %	V2
20025 Hz	F3	9,32 %	V4
22025 Hz	F2	11,50 %	V2
22025 Hz	F2	6,95 %	V4
22025 Hz	F1	4,60 %	V6
22025 Hz	F5	9,05 %	V6
22025 Hz	F1	11,64 %	V8
22025 Hz	F5	7,21 %	V8

22025 Hz	F6	7,44 %	V8
22025 Hz	F1	-6,36 %	V9
22025 Hz	F3	1,25 %	V9
22025 Hz	F5	7,59 %	V9
22025 Hz	F3	0,27 %	V10
22025 Hz	F5	-1,37 %	V10
22025 Hz	F6	-0,41 %	V10
22025 Hz	FD1	7,9 %	VD
24025 Hz	F1	10,64 %	V2
24025 Hz	F2	12,35 %	V8
24025 Hz	F2	10,64 %	V9
24025 Hz	F2	3,05 %	V10
24025 Hz	F4 Sonotrode	7,83 %	V8
24025 Hz	F4 Sonotrode	-8,51 %	V9
24025 Hz	F4 Sonotrode	9,64 %	V10
Musik	F6	3,03 %	V1

Tabelle 9: Ergebnisse aller in die Auswertung einbezogener Batchversuche