E.S.C.H.
Engineering Service Center und Handel GmbH

Schlussbericht

zum Verbundvorhaben

„Steigerung der Biogasausbeute durch den Eintrag von Schallwellen geringer Intensität in den Fermentationsprozess“

Förderkennzeichen: 22018509

Projektlaufzeit (gefördert):	01.08.2011 - 31.01.2014
Berichtszeitraum:	01.08.2012 - 30.04.2014
Zuwendungsempfänger:	E.S.C.H. Engineering Service Center und Handel GmbH, Maxhüttenstraße 19, 07333 Unterwellenborn
Ausführende Stelle:	E.S.C.H. Verfahrensentwicklung, Wittmannsgereuther Straße 101, 07318 Saalfeld
Projektförderung:	Zuwendung aus dem Bundeshaushalt, Einzelplan 10 des Bundesministeriums für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz (BMELV), Kapitel 1002, Titel 89388, Haushaltsjahr 2011
Projektpartner:	*Ernst-Abbe-Fachhochschule Jena,* Carl-Zeiss-Promenade 2, 07745 Jena
Projektleiter:	Dr. Frank Splittgerber

INHALTSVERZEICHNIS

INHALTSVERZEICHNIS 2

VERZEICHNIS DER TABELLEN 3

VERZEICHNIS DER ABBILDUNGEN 4

DURCHGEFÜHRTE ARBEITEN UND ERGEBNISSE 5

Arbeitspaket 1: Erstellung eines Konzeptes und Grundsatzuntersuchungen zur Behandlung des Gärsubstrates mit Schall 5
Arbeitspaket 2: Erstellung eines Versuchsplanes 9
Arbeitspaket 3: Aufbau und Probebetrieb von diskontinuierlichen Versuchseinrichtungen im Labormaßstab 10
Arbeitspakete 4 und 5: Versuche in diskontinuierlichen Batchfermentern 13
Arbeitspaket 6: Optimierung des Aufwand-Nutzen-Verhältnisses 22
Arbeitspaket 6: Anpassung und Probebetrieb kontinuierlicher Fermenter entsprechend den Ergebnissen 24
Arbeitspaket 8: Durchführung von Referenzversuchen im kontinuierlichen Fermenter unter optimierten Bedingungen und Bildung eines Modells mit der zusätzlichen Einflussgröße Schall 24
Arbeitspaket 9: Weiterentwicklung des Konzeptes zur Steuerung/Regelung und Optimierung von Biogasanlagen unter Einbeziehung der Einflussgröße des Schalls 28
Arbeitspaket 10: Erstellung eines Anlagenkonzeptes 29

ZUSAMMENFASSUNG DER PROJEKTERGEBNISSE 31

ANHANG

VERZEICHNIS DER TABELLEN

Tabelle 1: Zusammensetzung des Substratgemisches 9

Tabelle 2: Spezifische Methanmehr- bzw. Methanminderausbeuten bezogen auf den Nullversuch (Versuchsserie 1) 15

Tabelle 3: Spezifische Methanmehr- bzw. Methanminderausbeuten bezogen auf den Nullversuch (Versuchsserie 2) 15

Tabelle 4: Versuchsergebnisse der Beschallungsversuche mit reiner Rindergülle 16

Tabelle 5: Ergebnisse der Gensonden-Analyse an ausgewählten Proben aus den Batchversuchen 21

Tabelle 6: Aufwand-Nutzen-Verhältnisse der Beschallung für verschiedenen Versuchsserien mit eine Beschallungsfrequenz von 22 kHz 22

Tabelle 7: Ergebnisse der Gensonden-Analyse an den Proben aus den kontinuierlichen Versuchen 27

Tabelle 8: Vergleich der Aufwand-Nutzen-Verhältnisse der Beschallung der 150-Liter-Batchversuche (Versuchsserie D) und der kontinuierlichen Versuche in den 150-Liter-Fermentern (Versuchsserie K) 28

VERZEICHNIS DER ABBILDUNGEN

Abbildung 1: R+I-Schema eines Batchfermenter-Moduls 6

Abbildung 2: Versuchsstand zur Untersuchung der Schallausbreitung im Gärgut 8

Abbildung 3: Prototyp des Batchfermenters im Funktionstest 10

Abbildung 4: 8 Batchfermenter im Versuchsbetrieb 11

Abbildung 5: Trommelgaszähler zur kontinuierlichen Bestimmung der gebildeten Biogasmenge 12

Abbildung 6: Natürliche Schwankungsbreiten der Methanausbeuten nach einer Versuchsdauer von 35 Tagen 14

Abbildung 7: 150-Liter-Fermenter im Batchbetrieb 17

Abbildung 8: Vergleich der kumulierten Methanvolumina der Versuchsserie D 18

Abbildung 9: Vergleich der in den Batchversuchen ermittelten mittleren Methanausbeuten für die einzelnen Beschallungsfrequenzen bezogen auf die jeweiligen Nullversuche 19

Abbildung 10: Beispiele für Ergebnisse der Gensondenanalyse (links: Phasenkontrastaufnahme, Mitte: Nachweis aller lebenden Bacteria und Archaea, rechts: spezifischer Nachweis der Methanbakterien) 21

Abbildung 11: Vergleich der im kontinuierlichen Betrieb gebildeten Methanvolumenströme im beschallten und nicht beschallten Fermenter 25

Abbildung 12: Entwicklung der pH- und FOS/TAC-Werte des Gärgutes während der kontinuierlichen Versuche 26

Abbildung 13: Blockbild zur Erweiterung des Modells 29

Abbildung 14: Schematische Darstellung der möglichen Anordnung der Schallquellen in einem Fermenter mit zentralem Rührwerk 30

Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

Arbeitspaket 1: Erstellung eines Konzeptes und Grundsatzuntersuchungen zur Behandlung des Gärsubstrates mit Schall

Anlagenkonzept

Ziel Projektes war die Untersuchung des Einflusses von Schallwellen auf den Gärprozess. Dazu sollten zunächst Bachversuche durchgeführt werden. Die Versuchstechnik sollte es ermöglichen, die Beschallungsparameter systematisch zu variieren und die dadurch hervorgerufene zeitliche Veränderung der Methanbildung messtechnisch zu erfassen.

Bei den Tastversuchen, welche die Grundlage für die Durchführung des FuE-Projektes bildeten, wurde der Schall mittels einer Ultraschall-Sonotrode in das Gärgut eingetragen. Der Nachteil dieser Art des Schalleintrages besteht insbesondere darin, dass die Schwingfrequenz einer solchen Sonotrode praktisch nicht veränderbar ist und somit für jede zu realisierende Frequenz eine separate Sonotrode zum Einsatz kommen müsste, welche zudem verschiedene Geometrien aufweisen würden, wodurch wiederum Einflüsse auf die Durchmischung des Fermenterinhalts möglich wären.

Deshalb wurde entschieden, Lautsprecher als Schallquelle einzusetzen und die einzustellenden Schallfrequenzen und -pegel mittels einer Frequenzgenerator-Verstärker-Kombination zu generieren.

Um möglichst viele Versuche parallel durchführen zu können, sollten insgesamt 8 baugleiche Batchfermenter installiert werden. Die folgenden Anforderungen wurden für die Versuchstechnik definiert:

- ausreichende Behältergröße zur Verarbeitung von in der Biogasanlagenpraxis üblichen Gärsubstraten, wie zum Beispiel Rinder- oder Schweinegülle oder auch Silage ohne eine vorherige Zerkleinerung bei einer akzeptablen Dosiergenauigkeit
- vollautomatische Regelung der der Fermentertemperatur auf einstellbare Werte zwischen 20 und 60 °C
- flexibel einstellbares Rührregime mit Drehzahlen zwischen 10 und 100 min^{-1}
- automatische Beschallung des Fermenterinhalts nach einem zuvor definierten Regime im Frequenzbereich von 40 Hz bis 22 kHz

- vollautomaische kontinuierliche Erfassung der gebildeten Biogasmenge im Messbereich zwischen 0 und 4 l/min bei einer Messunsicherheit von maximal 3 % bezogen auf den Maximalwert

Abbildung 1 zeigt die konzeptionelle Umsetzung eines Batchfermenter-Moduls in einem R+I-Schema.

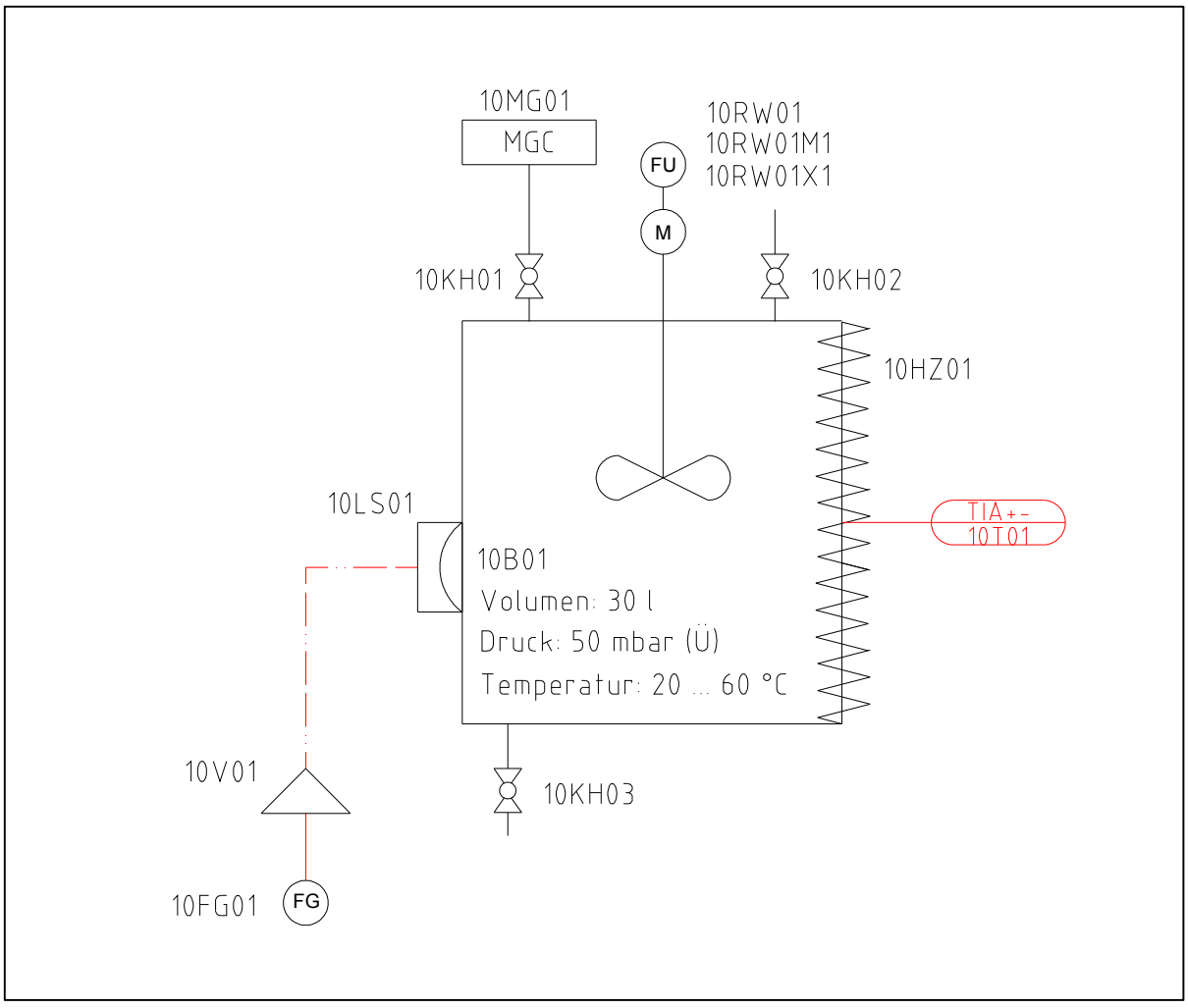


Abbildung 1: R+I-Schema eines Batchfermenter-Moduls

Auswahl der Komponenten

Für die Größe der Batchfermenter wurde ein Volumen von 30 Litern festgelegt. Sie wurden als zylindrische Gefäße mit einem Verhältnis von Höhe zu Durchmesser von etwa 1 konzipiert. Als Material wurde wegen der aggressiven Medien Edelstahl gewählt. Den oberen Abschluss des Gärraumes der Batchfermenter bildet ein Flanschdeckel, welcher mit einer zentral angeordneten Wellendurchführung für das auf dem Deckel befestigte Rührwerk sowie einem Austrittsstutzen für das gebildete Biogas ausgestattet ist. Die Wellendurchführung ist mittels einer Lippendichtung gasdicht verschlossen. Als Rührwerke kommen Schrägblatt-Rührer zum Einsatz. Die Drehzahl kann mittels der installierten Frequenzumrichter flexibel eingestellt werden. In Bodennähe hat der Fermenter einen 2-Zoll-Ablassstutzen, welcher mit einem Handkugelhahn verschlossen wird.

Die in den Fermentern gebildete Biogasmenge wird kontinuierlich in Kippzählern gemessen und anschließend in Gasbeuteln aufgefangen, was eine Messung der Gaszusammensetzung sowie eine Verifizierung der Gasmengenmessung mit einem anderen Messverfahren ermöglicht.

Die Fermenter werden mittels an den zylindrischen Mänteln angebrachten Heizbändern beheizt. Die Temperaturregelung der einzelnen Fermenter sowie die Steuerung der Rührwerke sollten in einer zentralen Steuereinheit realisiert werden.

Für den Schalleintrag sollte in der Wand von 6 der 8 Fermenter jeweils ein Unterwasserlausprecher eingebaut werden. Für jeden zu beschallenden Fermenter sollte ein separater Frequenzgenerator das Beschallungssignal liefern. Auf die gewünschte Amplitude sollte das Signal dann in einem Verstärker skaliert werden. In den 2 Fermentern ohne Beschallungstechnik sollten parallel zu den beschallten Gärversuchen Nullversuche mit identischen Substraten und Versuchsabläufen, aber ohne Beschallung durchgeführt werden. Dadurch sollte der Einfluss der Substratzusammensetzung auf die Versuchsergebnisse eliminiert werden.

Auf der Basis des R+I-Schemas wurden die Funktionspläne für die Versuchsanlagen erstellt, die Komponenten ausgewählt und das Anlagenkonzept mit einer Übersichtszeichnung sowie den für die Fertigung notwendigen Detailzeichnungen konstruktiv umgesetzt.

Voruntersuchungen zum Schallausbreitung im Gärgut

Nach der Beschaffung eines Testexemplars eines Unterwasserlautsprechers wurde an einem zu diesem Zweck aufgebauten Versuchsstand (Abbildung 2) Voruntersuchungen zur Schallausbreitung in einem typischen Gärsubstrat durchgeführt.

Dazu wurden Testsignale über den Lautsprecher in das Medium eingetragen und mittels eines Mikrofons in verschiedenen Abständen zum Lautsprecher wieder erfasst und aufgezeichnet.

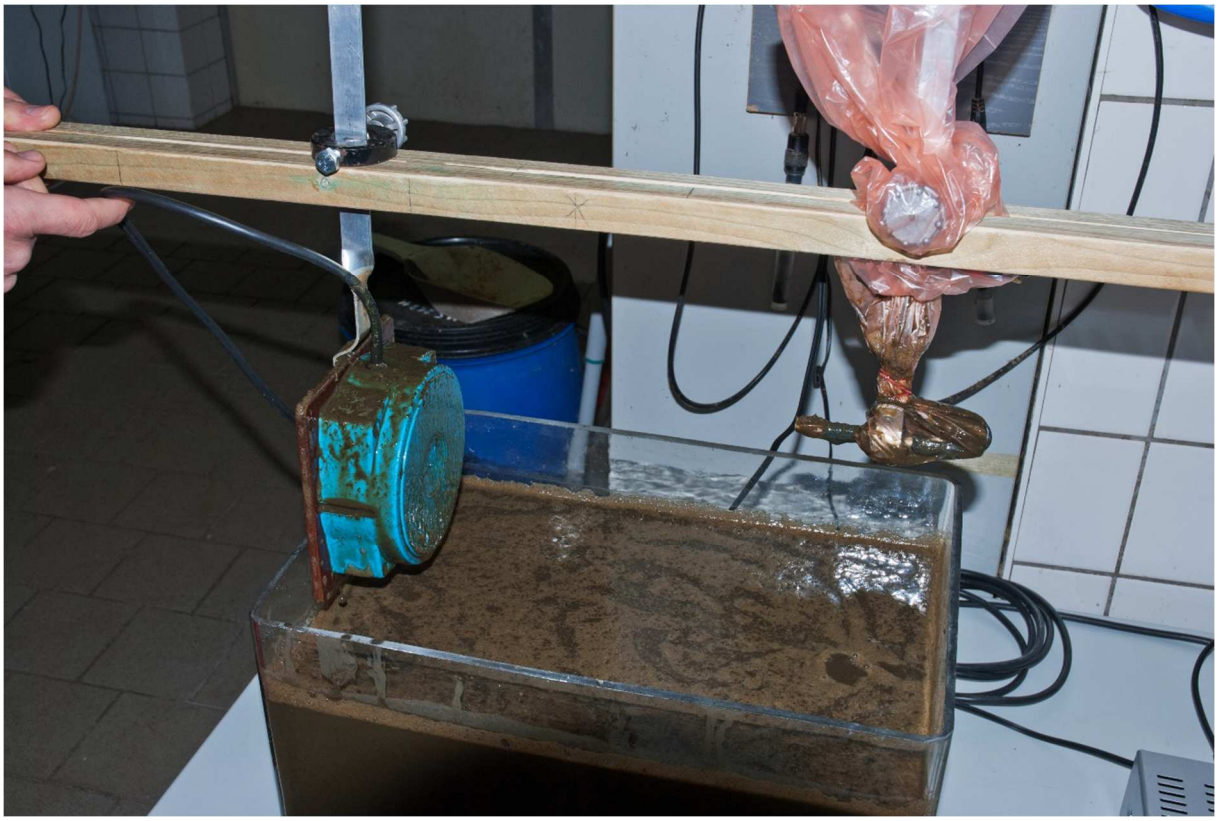


Abbildung 2: Versuchsstand zur Untersuchung der Schallausbreitung im Gärgut

Vergleichend wurde die Ausbreitung der gleichen Signale in Wasser und Luft ermittelt.

Die aufgezeichneten Signale wurden durch den Projektpartner messtechnisch weiterverarbeitet und mathematisch ausgewertet. Dabei konnte festgestellt werden, dass bei dem Gärsubstrat die Eindringtiefe relativ gering ist. Jedoch konnte im Frequenzbereich oberhalb von 10 kHz eine gegenüber Wasser deutlich stärkere Dämpfung im Amplitudenspektrum festgestellt werden, was eine frequenzselektive Anregung erschwert.

Arbeitspaket 2: Erstellung eines Versuchsplanes

Bei der Erarbeitung des Versuchsplanes wurden zunächst die Substratzusammensetzung, das Beschickungsregime, die Gärtemperatur und das Rührregime als konstant zu haltende Größen festgelegt. Für diese Parameter wurden Werte eingestellt, in deren Umgebung der Einfluss auf die Biogasbildung als gering eingeschätzt wird.

Als Gärsubstrat kam zunächst eine Mischung aus Schweinegülle, Rindergülle und Maissilage zum Einsatz, deren Zusammensetzung bezogen auf den jeweiligen Anteil an organischer Trockensubstanz (oTS) in der Mischung in Tabelle 1 dargestellt ist. Durch den Bezug auf den Anteil an oTS kann der Einfluss der oTS-Gehalte der Substrate auf die gebildete Biogasmenge gering gehalten werden.

Tabelle 1: Zusammensetzung des Substratgemisches

Substratkomponente	Anteil an oTS der Mischung
Maissilage	50 Ma.-%
Rindergülle	25 Ma.-%
Schweinegülle	25 Ma.-%

Ab Versuchsserie 8 wurde als Gärsubstrat reine Rindergülle eingesetzt. Das Rührregime wurde auf eine Rührzeit von 5 Minuten alle 2 Stunden festgelegt. Die Gärraumtemperatur wurde mit 38 °C auf mesophile Bedingungen eingestellt.

Um die natürlichen Schwankungen der Biogasbildung ohne Beschallung zu ermitteln und so Fehlinterpretationen zum Einfluss der Beschallung zu vermeiden sollten zunächst Varianzversuche ohne Schalleintrag in allen 8 Batchfermentern durchgeführt werden.

Als primär zu variierenden Einflussgrößen bei den durchzuführenden Beschallungsversuchen wurden die Beschallungsparameter festgelegt. Für die Versuchsserien wurden 13 verschiedene Beschallungsfrequenzen im Frequenzbereich von 40 Hz bis 26 kHz gewählt. Die Amplitude wurde unter Berücksichtigung des für den Menschen zumutbaren Schallpegels festgelegt und konstant gehalten.

Die Beschallungszeit wurde zunächst auf 30 Minuten pro Stunde eingestellt, um eventuelle Effekte deutlich erkennen zu können. Ab Versuchsserie 10 wurde die Beschallungsdauer deutlich reduziert und betrug nur noch 4 Minuten pro Stunde.

Als Kenngröße für die Beurteilung des Einflusses der Beschallung auf die Biogasbildung soll der spezifische Methanertrag in Abhängigkeit von der Versuchsdauer dienen. Dieser kann als das Methanvolumen in Normlitern, das pro kg zugeführter organischer Trockensubstanz aus den Gärsubstraten nach einer bestimmten Versuchsdauer entstanden ist, berechnet werden. Dabei wird das Methanvolumen aus dem kontinuierlich gemessenen Biogasvolumen und dem diskontinuierlich gemessenen Methangehalt des Biogases berechnet.

Arbeitspaket 3: Aufbau und Probebetrieb von diskontinuierlichen Versuchseinrichtungen im Labormaßstab

Für die Überprüfung der Funktionalität und der grundsätzlichen Eignung der konzipierten Batchfermenter wurde zunächst ein Prototyp (Abbildung 3) gefertigt.

Abbildung 3: Prototyp des Batchfermenters im Funktionstest

Nach den Funktionstests wurden einige konstruktive Veränderungen am Fermentermodul selbst sowie an der geplanten Anordnung der Module in einem Stahlgestell vorgenommen.

Beispielsweise wurde die Übertragung von Körper und Luftschall untersucht. Im Ergebnis dieser Untersuchungen wurden die Fermenter mittels an den Standfüßen angebrachter Schwingungsdämpfer vom Stahlgestell entkoppelt.

Unter Berücksichtigung der vorgenommenen konstruktiven Veränderungen wurden 7 weitere Batchfermenter gefertigt, montiert und im April 2012 im Biogaslabor der E.S.C.H. GmbH in Betrieb (Abbildung 4) genommen.

Abbildung 4: 8 Batchfermenter im Versuchsbetrieb

Trotz der hier dargestellten Vorgehensweise und der Verwendung von Komponenten von namhaften Herstellern traten auch während der durchgeführten Gärversuche einige nicht vorhersehbare technische Probleme auf, welche die Arbeiten bis zum Projektende erschwerten und eine Durchführung von zusätzlichen Versuchsserien erforderten und so zu einem erheblichen Mehraufwand bei der Versuchsdurchführung und -auswertung führten.

Probleme traten beispielsweise hinsichtlich Stabilität der Wellendurchführungsdichtungen auf.

In der Folge wurden die Fermenter vor jeder Versuchsserie durch eine Druckbeaufschlagung auf Gasdichtheit geprüft. Zudem wurden die Dichtlaternen dahingehend geändert, dass durch eine zusätzliche Wassersäule ein Gasaustritt während der Versuchsserie verhindert oder zumindest identifiziert werden kann.

Weiterhin traten massive Probleme bei der Gasmengenmessung auf. Obwohl Milligascounter der Firma Ritter bereits vielfach auch in anderen Biogaslabors im Einsatz sind, zeigten die Geräte des für die Batchfermenter erworbenen Typs zum Teil Messungenauigkeiten zwischen 10 und 30 % bezogen auf den wahren Wert.

Abbildung 5: Trommelgaszähler zur kontinuierlichen Bestimmung der gebildeten Biogasmenge

Offenbar waren Konstruktionsfehler an diesem neuen Gerätetyp für die Fehlmessungen verantwortlich. Die Geräte wurden vom Hersteller mehrfach getauscht und konstruktiv angepasst, jedoch konnten die Probleme während der Projektlaufzeit nicht gelöst werden. Die Geräte wurden daraufhin vom Hersteller ab der Versuchsserie 8 durch Trommelgaszähler (Abbildung 5) ersetzt, welche dann weitgehend zuverlässig arbeiteten. Bei der Auswertung der Versuchsergebnisse bis einschließlich Versuchsserie 7 wurden nicht die mit den Milligascountern gemessenen Biogasmengen verwendet, sondern die parallel mittels Durchflussmessgerät bestimmten Volumina des in Gassäcken gesammelten Biogases.

Insgesamt mussten mehrere Versuchsserien aufgrund technischer Probleme abgebrochen werden oder waren nur eingeschränkt aussagekräftig. Für den Nachweis der Fehlmessungen bei der Gasmenge mussten aufwendige Vergleichsmessungen mit anderen Messmethoden durchgeführt werden.

Bei der Darstellung der Versuchsergebnisse im folgenden Abschnitt wird ggf. nochmals auf die bei der jeweiligen Versuchsserie aufgetretenen technischen Probleme hingewiesen und versucht, deren Einflüsse auf das Ergebnis zu bewerten.

Abweichend vom ursprünglichen Versuchsplan wurden die Batchversuche in den 30-Liter-Fermentern parallel zu den Batchversuchen und den kontinuierlichen Versuchen in den größeren Fermentern bis über das Ende der Förderzeitraums hinaus weitergeführt.

Arbeitspakete 4 und 5: Versuche in diskontinuierlichen Batchfermentern

Versuchsserien 0.1 und 0.2 (Varianzversuche)

Die Versuchsserien 0.1 und 0.2 wurden jeweils an allen 8 Batchfermentern ohne Beschallung und unter sonst gleichen Prozessbedingungen durchgeführt.

Bei Versuchsserie 0.1 traten unerwartet deutliche Unterschiede zwischen den einzelnen Fermentern auf mit Abweichungen vom Mittelwert von bis zu 7,5 %. Die Versuchsserie wurde deshalb nach 20 Tagen beendet und neu angesetzt, wobei unmittelbar vor Versuchsbeginn alle Fermenter nochmals auf Gasdichtheit geprüft wurden.

Das Ergebnis von Versuchsserie 0.2 zeigt Abbildung 6. Die Säulen zeigen für jeden Fermenter die ermittelte spezifische Methanausbeute. Die Zahlen an den Säulen geben die jeweilige prozentuale Abweichung zum Mittelwert aus allen 8 Versuchen, welchen die horizontale Linie repräsentiert, an. Bei einem Variationskoeffizienten von 1,2 % beträgt die maximale Abweichung vom Mittelwert 2,1 % und liegt in der Größenordnung der für die Gasmesseinrichtungen

angegebenen Messunsicherheiten und deutlich unter den Mehrerträgen von mindestens 10%, welche durch den Einfluss der Beschallung erwartet werden.

Somit erwiesen sich der Versuchsaufbau und die verwendete Messtechnik grundsätzlich geeignet, den Einfluss der Beschallung auf die gebildete Methanmenge experimentell nachzuweisen.

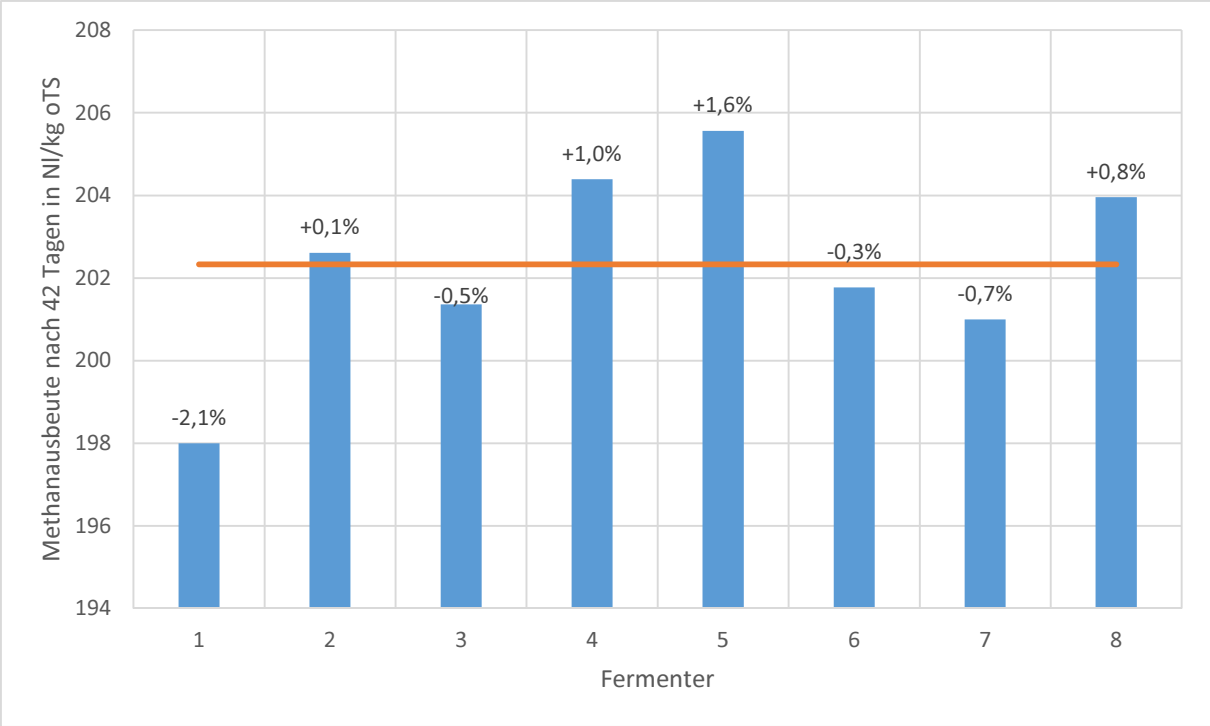


Abbildung 6: Natürliche Schwankungsbreiten der Methanausbeuten nach einer Versuchsdauer von 35 Tagen

Versuchsserie 1

Ab Versuchsserie 1 wurden jeweils 6 der 8 Batchfermenter beschallt. In den 2 verbleibenden Fermentern wurden Referenzversuche ohne Beschallung durchgeführt. Der Mittelwert der spezifischen Methanausbeuten der zugehörigen Referenzversuche dient jeweils als Bezugsbasis für die an den beschallten Fermentern ermittelten Mehr- bzw. Mindererträge. Da die absoluten Werte der spezifischen Methanausbeuten maßgeblich von den verwendeten Substraten und deren Verweilzeit im Fermenter abhängig sind, werden in der Folge nur noch deren prozentuale Abweichungen vom Mittelwert der beiden Nullversuche angegeben.

In Versuchsserie 1 wurden die Fermenter 1 bis 5 mit Frequenzen zwischen 125 und 15.025 Hz beschallt, Fermenter 6 mit einem klassischen Musikstück.

Wie Tabelle 2 zeigt, liegen alle gemessenen Methanausbeuten im Bereich der natürlichen Schwankungsbreite der Nullversuche. Lediglich bei dem mit einem Musikstück beschallten Fermenter 6 ist eine leichte Erhöhung von 3 % nachweisbar.

Tabelle 2: Spezifische Methanmehr- bzw. Methanminderausbeuten bezogen auf den Nullversuch (Versuchsserie 1)

Fermenter	Beschallung	± CH_4
1	15.025 Hz	-0,2 %
2	5.025 Hz	-1,0 %
3	1.025 Hz	+0,8 %
4	525 Hz	-1,4 %
5	125 Hz	+0,8 %
6	Musik	+3,0 %

Versuchsserie 2

In Versuchsserie 2 wurden die Fermenter 1 bis 4 mit hohen Frequenzen von 18.025 Hz bis 26.025 Hz beschallt, die Fermenter 5 und 6 mit 75 bzw. 40 Hz. Die Ergebnisse sind in Tabelle 3 zusammengefasst.

Tabelle 3: Spezifische Methanmehr- bzw. Methanminderausbeuten bezogen auf den Nullversuch (Versuchsserie 2)

Fermenter	Beschallung	± CH_4
1	26.025 Hz	+10,6 %
2	22.025 Hz	+11,5 %
3	20.025 Hz	+6,4 %
4	18.025 Hz	+4,9 %
5	75 Hz	-7,4 %
6	40 Hz	+5,2 %

Die Verringerung der Methanausbeute bei der Beschallungsfrequenz von 75 Hz erscheint nicht plausibel und wurde bei weiteren Versuchen mit dieser Frequenz nicht bestätigt. Wahrscheinlich ist das Ergebnis auf Undichtigkeiten am Versuchsfermenter zurückzuführen. Deshalb wurde der Versuch als Fehlversuch eingestuft.

Alle anderen beschallten Fermenter zeigten eine gegenüber den Nullversuchen erhöhte Methanausbeute, welche mit steigender Beschallungsfrequenz zuzunehmen scheint.

Versuchsserien 3 bis 7

In den folgenden Versuchsserien sollte versucht werden, die zuvor gewonnenen Ergebnisse zu reproduzieren. Dabei traten jedoch zunehmend die in Arbeitspaket 3 beschriebenen Probleme auf, die dazu führten dass mehrere Versuche als Fehlversuche eingestuft werden mussten. Eine eindeutige Identifizierung der Fehlversuche war jedoch nur bei deutlichen Methan-Minderausbeuten möglich.

Versuchsserien 8 bis 10

Ab Versuchsserie 8 wurde als Gärsubstrat reine Rindergülle eingesetzt. Der Hintergrund dieser Maßnahme bestand in der Überlegung, dass die Gülle gegenüber der Maissilage als schwerer vergärbar gilt sowie längere Verweilzeiten benötigt und deshalb bei diesem Substrat Effekte durch eine Schallanregung der Bakterien möglicherweise deutlicher sichtbar würden.

Im Ergebnis der bereits durchgeführten Versuche wurden lediglich Beschallungsfrequenzen von 22 und 24 kHz verwendet. Die Frequenz von 24 kHz wurde dabei an einem Batchfermenter mittels Frequenzgenerator und Unterwasserlautsprecher realisiert, an einem zweiten Batchfermenter mittels einer Ultraschall-Sonotrode. Die mit diesen beiden Beschallungsaggregaten erzielten Ergebnisse waren dabei unter Berücksichtigung der natürlichen Schwankungsbreite gleich.

Tabelle 4: Versuchsergebnisse der Beschallungsversuche mit reiner Rindergülle

Beschallung	Anzahl der Versuche	Mittelwert ± CH_4	Variationskoeffizient
22.025 Hz	7	+10,5 %	0,35
24.025 Hz	5	+8,8 %	0,26

Die Ergebnisse der Gärversuche mit Rindergülle (Tabelle 4) bestätigen weitgehend die bereits zuvor gewonnenen Erkenntnisse, dass bei einer Beschallung mit Frequenzen oberhalb von 20 kHz mit deutlichen Methanmehrausbeuten zu rechnen ist.

Wie die Variationskoeffizienten zeigen ist auch hier die Streuung der Einzelwerte um den Mittelwert recht hoch.

Versuchsserie D

Versuchsserie D wurde ebenfalls als Batchversuch durchgeführt. Als Gärbehälter kamen zwei 150-Liter-Fermenter zum Einsatz (Abbildung 7), von denen einer beschallt und der zweite ohne Beschallung als Nullversuch betrieben wurde.

Abbildung 7: 150-Liter-Fermenter im Batchbetrieb

Für die Beschallung wurde die gleiche Frequenzgenerator-Verstärker-Unterwasserlautsprecher-Kombination verwendet wie bei den 30-Liter-Fermentern. Dazu wurde ein Unterwasserlautsprecher aus den 30-Liter-Batchfermentern in einen der 150-Liter-Fermenter eingebaut. Auch das Beschallungsregime wurde von den Versuchsserien 9 und 10 in den 30-Liter-Batchfermentern übernommen. Als Beschallungsfrequenz wurden 22 kHz gewählt. Durch die Beibehaltung der Beschallungsparameter bei gleichzeitiger Vergrößerung des Gärraums auf das Fünffache wurde gleichzeitig der erste Schritt zur Volumenskalierung der Beschallung realisiert.

Abbildung 8 zeigt die kumulierten Methanvolumina der Batchversuche in den 150-Liter-Fermentern.

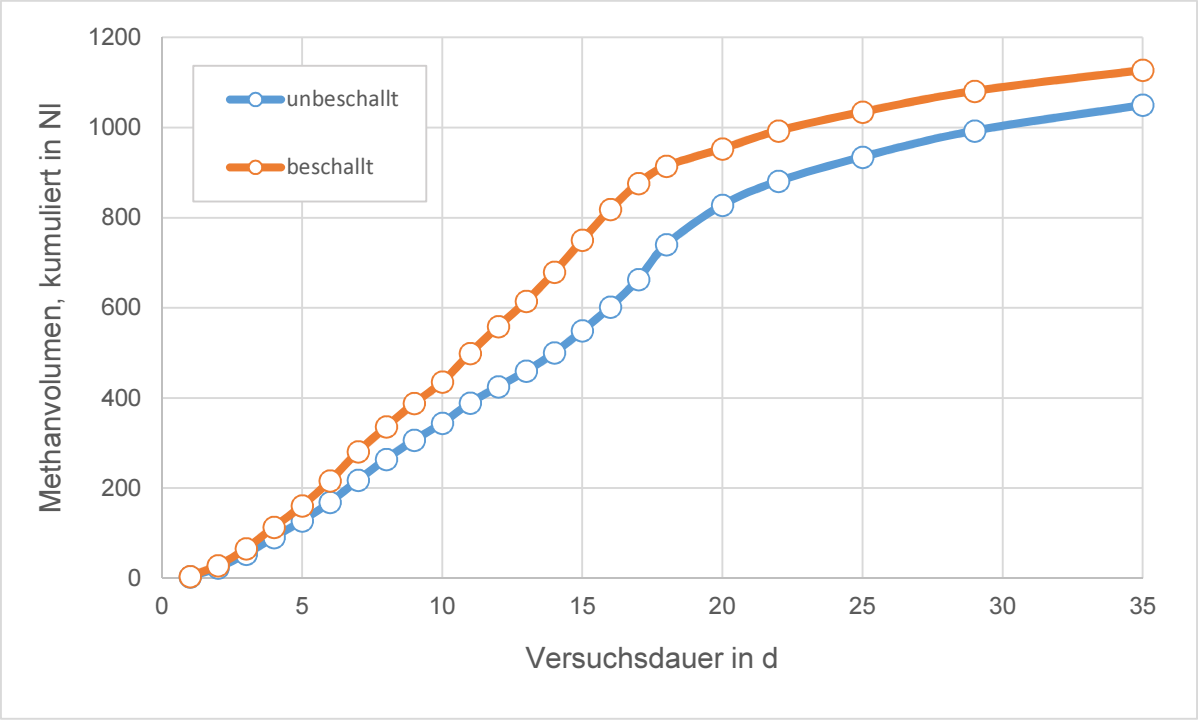


Abbildung 8: Vergleich der kumulierten Methanvolumina der Versuchsserie D

Es ist deutlich erkennbar, dass in dem beschallten Fermenter bereits ab dem ersten Versuchstag mehr Methan gebildet wurde. Die maximale Differenz der täglich gebildeten Methanmengen wird dabei am 12. Tag erreicht, an dem, bezogen auf den unbeschallten Fermenter, im beschallten Fermenter 67% mehr Methan gebildet wurden. Danach wird die Differenz geringer, und ab dem 17 Tag wurde in dem unbeschallten Fermenter mehr Methan gebildet.

Daraus kann geschlussfolgert werden, dass der größte Teil der vergärbaren organischen Substanz in dem beschallten Fermenter lediglich schneller umgesetzt wurde und beide Kurven sich einem gleichen Endwert annähern.

Nach einer Verweilzeit von 35 Tagen war in dem beschallten Fermenter der spezifische Methanertrag, also das auf die eingesetzte Masse an organischer Trockensubstanz bezogene Methanvolumen, um 7,9% höher als im unbeschallten Fermenter. Wäre der Versuch nach 12 Tagen beendet worden, hätte die Differenz 31,5% betragen.

Zusammenfassung der Batchversuche

Abbildung 9 zeigt zusammenfassend die durch die Beschallung erzielten mittleren Methanausbeuten bezogen auf die Nullversuche der jeweiligen Versuchsserie.

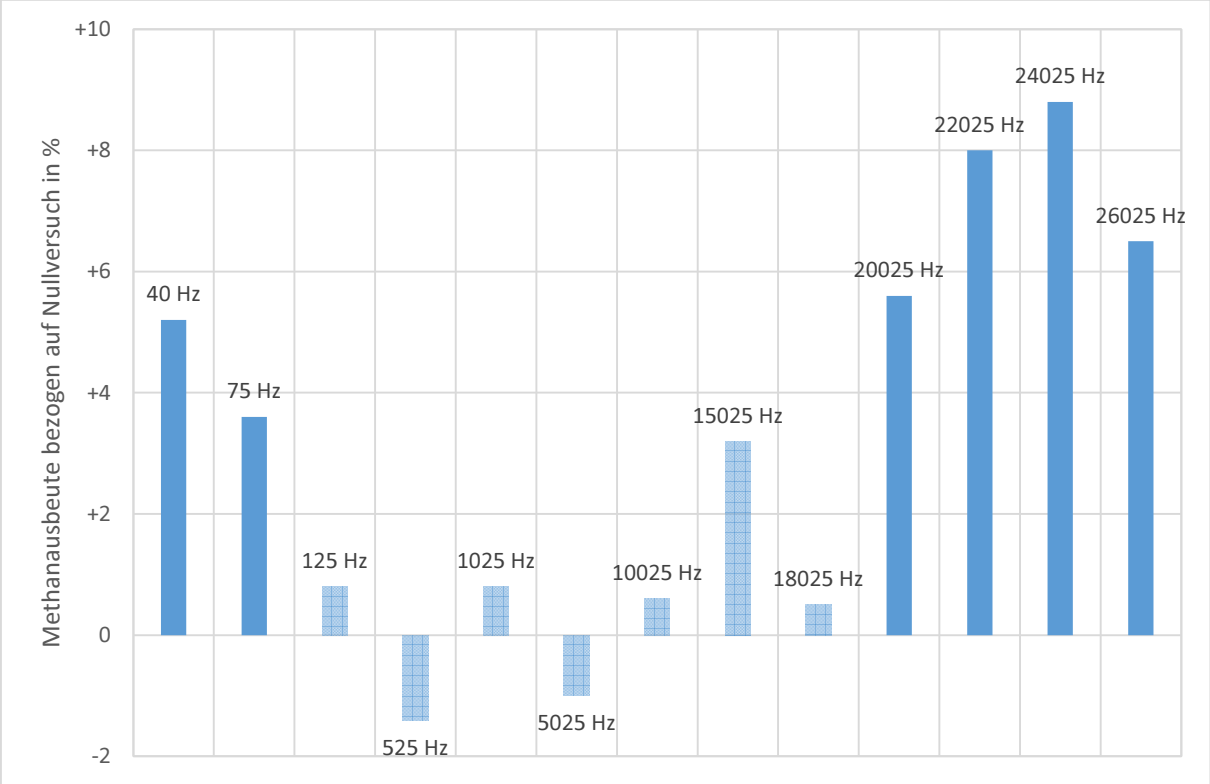


Abbildung 9: Vergleich der in den Batchversuchen ermittelten mittleren Methanausbeuten für die einzelnen Beschallungsfrequenzen bezogen auf die jeweiligen Nullversuche

Diese Ergebnisse bestätigen die Annahme, dass durch eine Beschallung des Gärsubstrates im Fermenter eine Mehrausbeute an Methan erzielt wird. Ebenfalls kann angenommen werden, dass der Zuwachs an gebildetem Methan bei Beschallungsfrequenzen oberhalb von 20 kHz größer ist, als bei niedrigeren Frequenzen. Insbesondere die Ergebnisse bei den mittleren Beschallungsfrequenzen von 100 Hz bis 18 kHz können nicht als gesichert angesehen werden, da die Anzahl der Versuche zu gering war.

Gensonden-Analyse

Um einen möglichen Zusammenhang zwischen den Unterschieden in der gebildeten Methanmenge und der vorhandenen Population an Methanbakterien zu untersuchen, wurden ausgewählte Proben aus den Batchversuchen mittels VIT® Gensonden-Technologie analysiert.

Diese molekularbiologische Analysenmethode ermöglicht es, Mikroorganismen spezifisch, individuell und kultivierungsunabhängig direkt in der Untersuchungsprobe (in situ) zu visualisieren, zu identifizieren und zu quantifizieren. Der große Vorteil der Methode liegt dabei darin, dass die Identifizierung auf dem Nachweis der Erbsubstanz beruht und damit nicht von phänotypischen Merkmalen abhängt, die bei vielen Bakterien sehr variabel sein können. Damit lassen sich mikrobielle Charakteristika von unterschiedlichen Proben und einzelne Populationsveränderungen sehr exakt analysieren. Die vitale Gesamtpopulation in der Probe wird durch den Einsatz einer Kombination aus einer umfassenden Bacteria-spezifischen Gensonde und einer umfassenden Archaea-spezifischen Gensonde ermittelt. Die hiermit nachgewiesenen Organismen stellen den allgemein gültigen Maßstab für den Anteil an nachweisbaren, lebensfähigen Bakterien in Anaerob-Reaktoren dar. Die Nachweisgrenze dieser Methode entspricht in etwa 1.000 Zellen/ml.

Zudem lassen sich Schlüsse über die Aktivität der nachgewiesenen Mikroorganismen ziehen: Die durch die Gensonden erhaltenen Fluoreszenzsignale spiegeln den physiologischen Zustand der nachgewiesenen Zellen wider. Je aktiver eine Zelle ist, desto mehr Zielstellen befinden sich in der Zelle und desto mehr Gensonden können in der Zelle binden. Umso heller erscheint die nachgewiesene Zelle unter dem Fluoreszenzmikroskop.

In einer ersten Analysestufe wurde an Proben der Versuchsserie 10 sowie der Versuchsserie D der jeweilige Anteil Methanbakterien an der lebenden Gesamtpopulation bestimmt.

Beispiele für die bildanalytisch auszuwertenden Aufnahmen zeigt Abbildung 10.

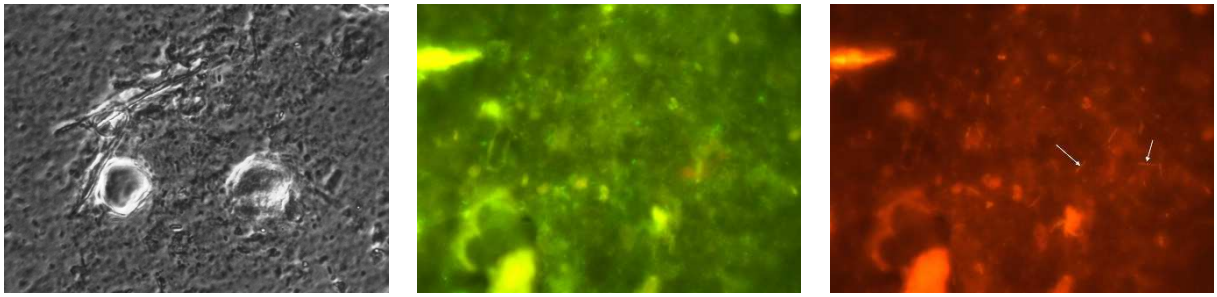


Abbildung 10: Beispiele für Ergebnisse der Gensondenanalyse (links: Phasenkontrastaufnahme, Mitte: Nachweis aller lebenden Bacteria und Archaea, rechts: spezifischer Nachweis der Methanbakterien)

Die Ergebnisse sind in Tabelle 5 zusammengefasst. Die vollständigen Laborberichte der Firma Vermicon sind diesem Schlussbericht als Anlagen beigefügt.

Tabelle 5: Ergebnisse der Gensonden-Analyse an ausgewählten Proben aus den Batchversuchen

Probe	**Anteil der Methanbakterien an der lebenden Gesamtpopulation**
Ausgangsmaterial Versuchsserie 10 (Rindergülle)	<< 1%
Ausgangsmaterial Versuchsserie D (Rindergülle)	<< 1%
Fermenter 2, beschallt, Sonotrode, 24.000 Hz	82%
Fermenter 4, beschallt, Lautsprecher, 24.025 Hz	79%
Fermenter 7, nicht beschallt	84%
Fermenter 8, nicht beschallt	75%
Fermenter D1, beschallt, Lautsprecher, 22.025 Hz	50%
Fermenter D2, nicht beschallt	52%

Es wird deutlich, dass die Ausgangsproben keine signifikanten Anteile an Methanbakterien aufweisen. Bei den Proben, welche den Batchfermentern nach dem Gärprozess entnommen wurden, ist hinsichtlich des Anteils von Methanbakterien an der lebenden Gesamtpopulation ein deutlicher Unterschied zwischen den 30-Liter-Gärversuchen und den 150-Liter-Gärversuchen zu erkennen. Da beide Gärversuche mit vergleichbaren Substraten und unter ähnlichen Versuchsbedingungen durchgeführt wurden, konnte bisher keine Erklärung für den höheren Anteil der Methanbakterien in den 30-Liter-Fermentern gefunden werden. Unter Berücksichtigung der Tatsache, dass in den 150-Liter-Batchfermentern insgesamt die Konzentration an

lebenden Mikroorganismen deutlich höher war, könnte die Volumenskalierung der Beschallung eine Ursache für die Unterschiede sein, wobei sich eine intensive Beschallung dann hemmend auf die übrigen Mikroorganismen auswirken müsste.

Arbeitspaket 6: Optimierung des Aufwand-Nutzen-Verhältnisses

Optimierung der Beschallungstechnik

Das Aufwand-Nutzen-Verhältnis der Beschallung kann zunächst rein energetisch als Verhältnis zwischen der zur Beschallung eingesetzten Elektroenergie und der Energie, welche sich aus dem mehr gebildeten Methan gewinnen lässt, dargestellt werden. Der einfachste Weg zur Ermittlung der eingesetzten Elektroenergie besteht darin, die Leistungsaufnahme des Beschallungsaggregates zu messen und diese mit der Beschallungszeit zu multiplizieren.

So betrug beispielsweise die gemessene Leistungsaufnahme der Verstärker/Frequenzgenerator-Unterwasserlautsprecher-Kombination bei der Beschallung 15,8 Watt.

Im ungünstigsten Fall kann von der in dem zusätzlich erzeugten Methan gespeicherten Energie lediglich der Teil genutzt werden, welche in einem Blockheizkraftwerk in Elektroenergie umgewandelt werden kann. Ausgehend von einem typischen elektrischen Wirkungsgrad von 40 % entspricht das einer Energiemenge von etwa 4 kWh pro Normkubikmeter Methan.

Tabelle 6 zeigt die Aufwand-Nutzen-Verhältnisse, welche sich für die Beschallungsversuche mit einer Frequenz von 22 kHz aus den Versuchsserien 8, 10 und D aus dem Verhältnis der mit der Beschallung eingesetzten Elektroenergie und der aus dem zusätzlich gebildeten Methan herstellbaren Elektroenergie ergeben sowie das Potential, welches eine Optimierung der Beschallungstechnik bietet.

Tabelle 6: Aufwand-Nutzen-Verhältnisse der Beschallung für verschiedenen Versuchsserien mit eine Beschallungsfrequenz von 22 kHz

	VS 8	**VS 10**	**VS D**
Beschallung mit Lautsprecher, Versuch (elektrischer Wirkungsgrad: 26%, mechanischer Wirkungsgrad Schallwandlung: 1%)	1%	8%	37%
Beschallung mit Lautsprecher, optimiert (elektrischer Wirkungsgrad: 80%, mechanischer Wirkungsgrad Schallwandlung: 8%)	30%	200%	914%
Beschallung mit Sonotrode, optimiert (elektrischer Wirkungsgrad: 80%, mechanischer Wirkungsgrad Schallwandlung: 90%)	336%	2.246%	10.286%
Beschallung, verlustfrei (Gesamtwirkungsgrad: 100%)	467%	3.120%	14.286%

Um eine maximale Flexibilität bei der Versuchsdurchführung zu gewährleisten, wurde bei den Versuchen (Zeile 1) mit der Kombination aus Frequenzgenerator und Unterwasserlautsprecher eine Beschallungstechnik eingesetzt, die einen geringen Wirkungsgrad bei der Schallwandlung aufweist. Die Standby-Leistung des Verstärkers wurde mit 11,7 Watt gemessen, so dass die den Lautsprechern real zugeführte elektrische Leistung nur 4,1 Watt betrug, also 26% der elektrischen Gesamtleistung. Weiterhin kann davon ausgegangen werden, dass der mechanische Wirkungsgrad der verwendeten Lautsprecher bei einer Schallfrequenz von über 22 kHz etwa bei 1% der elektrischen Leistung liegt. d. h. dass nur 1% der elektrischen Energie in Schallwellen umgewandelt wird, der Rest wird als Wärme abgegeben. Der sich daraus ergebende geringe Gesamtwirkungsgrad des Beschallungssystems führt dazu, dass die aus dem mehr gebildeten Methan erzeugbare Elektroenergie die für die Beschallung eingesetzte Elektroenergie nicht kompensieren kann.

Bei einer entsprechend skalierten Frequenzgenerator-Lautsprecher-Kombination (Zeile 2) dürfte die Standby-Leistung etwa bei 20% der Gesamtleistung liegen. Ebenfalls sollte es durch eine Optimierung des Lautsprechers auf eine Zielfrequenz möglich sein, den mechanischen Wirkungsgrad des Lautsprechers auf 8% zu erhöhen. Damit ergeben sich für die Versuchsserien 10 und D bereits deutliche Mehrerträge an Elektroenergie aus dem Methan gegenüber der zur Beschallung eingesetzten Elektroenergie.

Eine weitere deutliche Effizienzsteigerung wäre durch den Einsatz eine Sonotrode anstelle des Lautsprechers möglich (Zeile 3). Sonotroden schwingen in Resonanz und arbeiten deshalb besonders verlustarm. Sie weisen in der Regel mechanische Wirkungsgrade von mehr als 80% auf.

Die in Zeile 4 angegebenen Werte für das Aufwand-Nutzen-Verhältnis, stellen gewissermaßen die Grenzwerte dar, die sich bei einer verlustfrei arbeitenden Beschallungstechnik ergeben würden.

Optimierung durch Volumenskalierung der Beschallung

Bei der Beschallung der Batchfermenter, wie sie in den Versuchen durchgeführt wurde, handelt es sich um einen nicht optimierten Prozess, das heißt die Beschallungsdauer und auch die Beschallungsintervalle wurden willkürlich gewählt. Da das Verhältnis zwischen Energieertrag und Energieverbrauch sowohl mit einer reduzierten Beschallungsdauer (Versuchsserie 8: 30 min/h, Versuchsserie 10: 4 min/h) als auch mit einem erhöhten beschallten Volumen (Versuchsserie 8 und 10: 30 Liter, Versuchsserie D: 150 Liter) deutlich größer wurde, kann auf der

Grundlage der bisherigen Versuche vermutet werden, dass es für ein zu beschallendes Substratvolumen offenbar eine optimale Beschallungsdauer geben muss, bei dem das Verhältnis zwischen Energieertrag und Energieverbrauch maximal ist.

Arbeitspaket 6: Anpassung und Probebetrieb kontinuierlicher Fermenter entsprechend den Ergebnissen

Ursprünglich war geplant, die kontinuierlichen Gärversuche mit Beschallung in dem 500-Liter-Fermenter im Biogaslabor der E.S.C.H. GmbH durchzuführen. Dies hätte jedoch erfordert, den Nullversuch ohne Beschallung und den Beschallungsversuch nacheinander durchzuführen. Da durch die bei der Darstellung der Ergebnisse von Arbeitspaket 3 beschriebenen technischen Probleme der ursprüngliche Arbeitsplan nicht mehr einzuhalten war, wurde von den Projektpartnern beschlossen, den Nullversuch und den Beschallungsversuch parallel in zwei baugleichen 150-Liter-Fermentern durchzuführen. Diese waren bereits in der Versuchsserie D als Batchfermenter betrieben worden. Neben dem Zeitgewinn bestand ein weiterer Vorteil der gewählten Variante darin, dass es sich bei den 150-Liter-Reaktoren um eine langjährig erprobte solide Versuchstechnik handelt, bei welcher keine technischen Probleme zu erwarten waren. Ein Nachteil der gewählten Variante besteht darin, dass die 150-Liter-Fermenter nicht automatisiert betrieben werden können. Die Entnahme von Garrückstand und die Beschickung mit Substrat wurden einmal täglich manuell durchgeführt. Die gebildete Gasmenge sowie die Gaszusammensetzung wurden mittels Durchflussmessgerät an dem in Gasbeuteln aufgefangenen Biogas bestimmt.

Die Beschallungsparameter wurden im Vergleich zum 150-Liter-Batchversuch (Versuchsserie D) nicht verändert.

Arbeitspaket 8: Durchführung von Referenzversuchen im kontinuierlichen Fermenter unter optimierten Bedingungen und Bildung eines Modells mit der zusätzlichen Einflussgröße Schall

Versuchsserie K

Als Substrat diente ebenfalls Rindergülle. Um die Starphase zu verkürzen, wurde die Versuchsserie mit einer Substratzusammensetzung von 80 Ma.-% vergorener Rindergülle aus den vorher durchgeführten Batchversuchen und 20 Ma.-% Rinderrohgülle angesetzt. Dazu

wurde die vergorene Rindergülle aus beiden Batchversuchen zunächst in einem Gefäß vereinigt und homogenisiert. Anschließend wurden von dieser Charge jeweils 96 Liter in jeden der beiden Gärbehälter gefüllt und 24 Liter Rinderrohgülle hinzugefügt. In der Folge wurden täglich 4 Liter Rinderrohgülle zugegeben, was einer statistischen Verweilzeit im Gärbehälter von 30 Tagen und eine Raumbelastung mit organischer Trockensubstanz von 2 kg/(m³ d) entspricht. Hier zeigt sich auch ein weiterer Vorteil der Parallelversuche. Nur so ist es möglich, wirklich identische Substrate in beiden Fermentern einzusetzen.

Das Ergebnis der Versuche im kontinuierlichen Betrieb zeigt Abbildung 11.

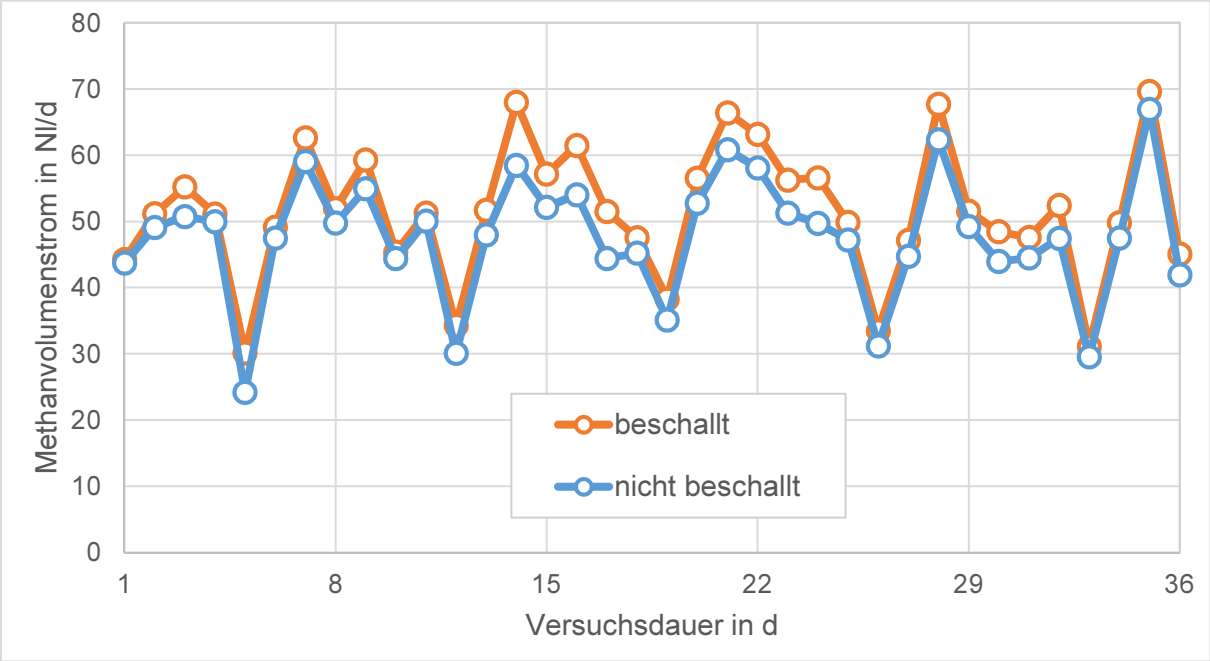


Abbildung 11: Vergleich der im kontinuierlichen Betrieb gebildeten Methanvolumenströme im beschallten und nicht beschallten Fermenter

Es ist erkennbar, dass das täglich gebildete Methanvolumen im beschallten Fermenter während der gesamten Versuchsdauer von 36 Tagen stets größer ist. Nach einer Phase von etwa 10 Tagen hat sich in beiden Fermentern ein Gleichgewicht eingestellt. Die Gasbildungsrate ist nun annähernd konstant. Die auftretenden periodischen Schwankungen lassen sich damit begründen, dass es aus organisatorischen Gründen nicht möglich war, die täglich gebildeten Gasmengen immer zur gleichen Tageszeit zu messen. Das im beschallten Fermenter mehr gebildete Gasvolumen liegt in der Gleichgewichtsphase zwischen 4 und 16% bezogen auf das

im nicht beschallten Fermenter gebildete Gasvolumen. Der Mittelwert wurde mit 8,1% ermittelt und bestätigt damit das Resultat des 150-Liter-Batchversuches, bei dem nach einer Verweilzeit von 30 Tagen die ermittelte Differenz der gebildeten Methanmengen zwischen beschalltem und nicht beschalltem Fermenter 8,9% betrug.

Die in Abbildung 12 für den Versuchszeitraum dargestellten pH- und FOS/TAC-Werte lassen keinen signifikanten Unterschied zwischen dem beschallten und dem nicht beschallten Gärgut erkennen.

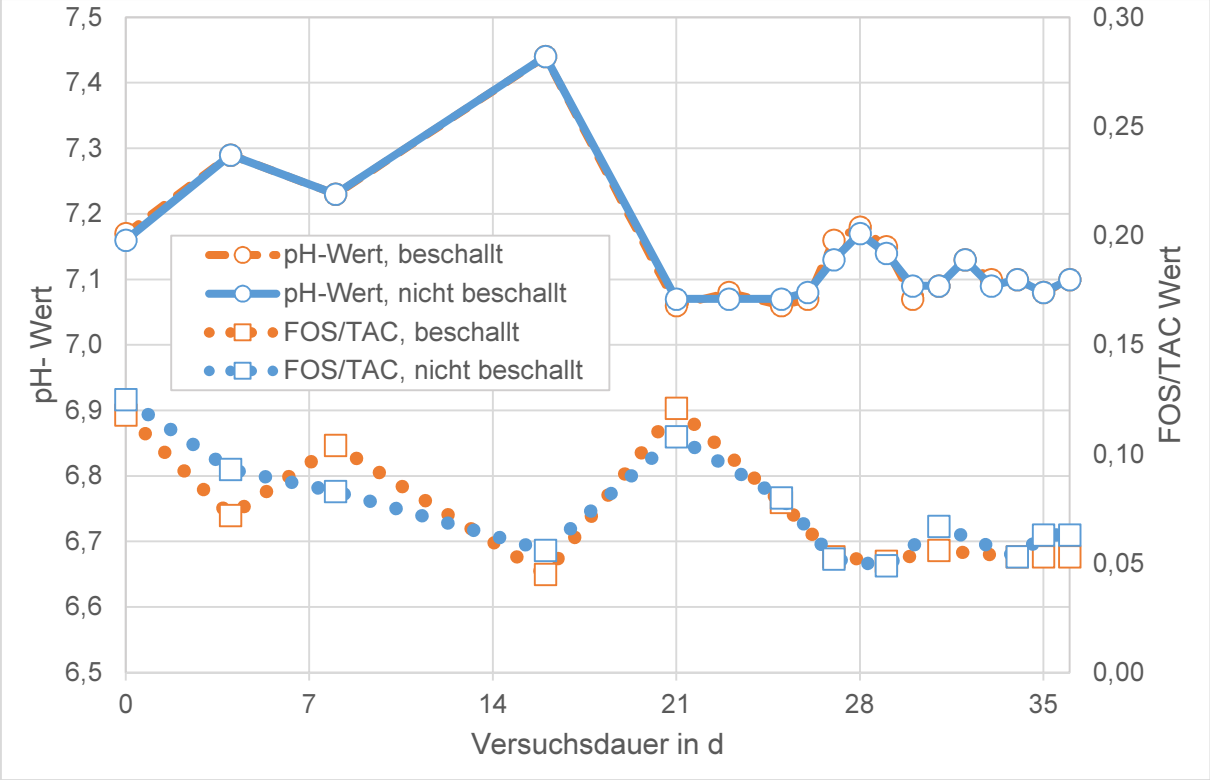


Abbildung 12: Entwicklung der pH- und FOS/TAC-Werte des Gärgutes während der kontinuierlichen Versuche

Gensonden-Analyse

Wie bei den Batchversuchen wurde auch der Fermenterinhalt der kontinuierlichen Beschallungsversuche mittels Gensonden analysiert. Ergänzend zur Bestimmung des Anteils der Methanbakterien an der lebenden Gesamtpopulation wurden an der beschallten Probe der Versuchsserie K sowie an der nicht beschallten Probe des zugehörigen Nullversuches auch die

Konzentrationen an Zellen insgesamt, an lebenden Zellen sowie an lebenden Methanbakterien bestimmt.

Wie Tabelle 7 zeigt, ist in der beschallten Probe die Anzahl der lebenden Zellen um 21% höher und die Anzahl der lebenden Methanbakterien um 17% höher als in der nicht beschallten Probe. Dieses Ergebnis korreliert in gewisser Weise mit den gemessenen Methanmengen wenngleich dort der prozentuale Unterschied nur etwa halb so groß ist.

Tabelle 7: Ergebnisse der Gensonden-Analyse an den Proben aus den kontinuierlichen Versuchen

Probe	**Zellen insgesamt pro ml**	**lebende Zellen insgesamt pro ml**	**lebende Methan-bakterien pro ml**	**Anteil Methanbakterien an lebender Gesamtpopulation**
Fermenter K1, beschallt, Lautsprecher, 22.025 Hz	2,53E+09	2,42E+08	1,09E+08	45%
Fermenter K2, nicht beschallt	2,68E+09	2,00E+08	9,29E+07	47%

Aufwand-Nutzen-Verhältnis

Analog zur Beurteilung des Aufwand-Nutzen-Verhältnisses für die Batchversuche (siehe Tabelle 6) kann diese Betrachtung auch für die kontinuierliche Beschallung angestellt werden. Während wegen der sich zeitlich verändernden Gasbildung als Bezugszeitraum bei den Batchversuchen der gesamte Versuchszeitraum betrachtet werden muss, ist die Biogasbildung bei den kontinuierlichen Versuchen nach der Startphase stationär, so dass ein beliebiger Zeitraum ausgewertet werden kann. Tabelle 8 zeigt, dass sich das Aufwand-Nutzenverhältnis des kontinuierlichen Beschallungsversuches gegenüber dem 150-Liter-Batchversuch praktisch verdoppelt hat.

Zwar wurde mit der verwendeten Beschallungstechnik dem Prozess immer noch mehr Elektroenergie zugeführt, als aus dem mehr gebildeten Biogas erzeugt werden könnte, aber es zeigt sich auch, dass bereits durch ein Optimierung der Beschallungstechnik und die damit verbundene Veränderung der Wirkungsgrade aus dem mehr gebildeten Biogas mehr als 20mal so viel Elektroenergie erzeugbar wäre, wie durch die Beschallung verbraucht wird.

Tabelle 8: Vergleich der Aufwand-Nutzen-Verhältnisse der Beschallung der 150-Liter-Batchversuche (Versuchsserie D) und der kontinuierlichen Versuche in den 150-Liter-Fermentern (Versuchsserie K)

	VS D	VS K
Beschallung mit Lautsprecher, Versuch (elektrischer Wirkungsgrad: 26%, mechanischer Wirkungsgrad Schallwandlung: 1%)	37%	67%
Beschallung mit Lautsprecher, optimiert (elektrischer Wirkungsgrad: 80%, mechanischer Wirkungsgrad Schallwandlung: 8%)	914%	1.641%
Beschallung mit Sonotrode, optimiert (elektrischer Wirkungsgrad: 80%, mechanischer Wirkungsgrad Schallwandlung: 90%)	10.286%	18.465%
Beschallung, verlustfrei (Gesamtwirkungsgrad: 100%)	14.286%	25.646%

Arbeitspaket 9: Weiterentwicklung des Konzeptes zur Steuerung/Regelung und Optimierung von Biogasanlagen unter Einbeziehung der Einflussgröße des Schalls

Zu Beginn des FuE-Projektes BioSonic existierte bereits ein Konzept zur Regelung und Optimierung von Biogasanlagen auf der Basis eines experimentellen Modells. Dieses Modell besitzt mit dem der Biogasanlage zugeführten Massenstrom an organischer Trockensubstanz eine Eingangsgröße. Ausgangsgröße ist der Methanfluss. Auf der Basis dieses Modells arbeitet eine Regelung des Methanflusses, welche im Rahmen eines früheren Projektes an der Versuchsanlage im E.S.C.H.-Biogaslabor bereits erfolgreich getestet wurde. Ein Optimierungsmodul, welches für eine Biogasanlage den Methanfluss ermittelt, bei dem sie mit maximalem wirtschaftlichen Gewinn betrieben werden kann, verwendet das Modell zur Berechnung der durchsatzabhängigen Substratkosten und ggf. zur Optimierung der Substratzusammensetzung.

Ziel der im Rahmen von Arbeitspaket 9 durchgeführten Arbeiten war es, das Modell um die Eingangsgröße Schall zu erweitern um damit den Prozess flexibel beeinflussen zu können.

Für die Erweiterung des Modells wurde eine modulare Struktur in Form eines unbestimmten polynomialen Zusammenhangs gewählt, was eine Einbindung von Modellkorrekturen zu einem späteren Zeitpunkt erleichtert (Abbildung 13).

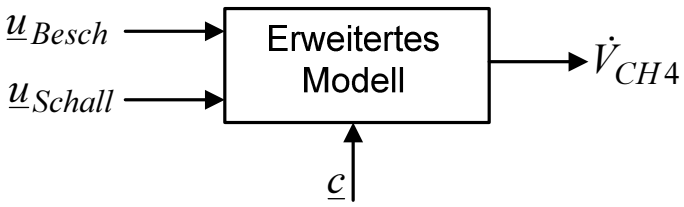


Abbildung 13: Blockbild zur Erweiterung des Modells

Für eine detaillierte Darstellung der Modellstruktur und der Einbindung in den Optimierungsalgorithmus sei auf den Schlussbericht des Projektpartners EAH Jena verwiesen.

Arbeitspaket 10: Erstellung eines Anlagenkonzeptes

Zum Zeitpunkt der Erstellung dieses Berichtes kann aufgrund der Projektergebnisse lediglich ein vorläufiges Anlagenkonzept zur Beschallung erstellt werden, da die Grenzen der Skalierung des beschallten Raumes mit der im Projekt eingesetzten Versuchstechnik nicht ermittelt werden konnten.

Da zukünftig, insbesondere in Deutschland, der Focus mehr auf der Effizienzsteigerung von bestehenden Biogasanlagen denn auf dem Anlagenneubau liegend dürfte, muss das Hauptziel des Anlagenkonzeptes zur Beschallung des Gärgutes in einem modularen Aufbau bestehen, wodurch auch bestehende Anlagen nachgerüstet werden können. Jedoch kann bereits zu diesem Zeitpunkt abgesehen werden, dass eine Nachrüstung im laufenden Betrieb der Biogasanlage nicht möglich sein wird, da zum Befestigen der Schallquellen im Inneren des Fermenters zumindest der Gasspeicher entleert werden muss. Jedoch sollte es möglich sein, die Schallquellen zu installieren, ohne den flüssigen Fermenterinhalt entleeren zu müssen.

Da die Beschallung direkt im Fermenter durchgeführt werden soll gilt es, die Schallquellen innerhalb des Gärraumes zu installieren. Dabei muss beachtet werden, dass sie nicht zu nahe an den Rührwerken angeordnet sind, um sowohl ein Beschädigung der Schallwandler als auch eine ungewünschte Beeinflussung der Umwälzung des Gärgutes zu vermeiden. Die Entscheidung fiel deshalb auf eine kreisförmige Anordnung mehrerer Schallquellen innerhalb des Fermenters entweder direkt an der Innenwand oder mit einem geringen Abstand von dieser.

Eine mögliche Lösung zur Anordnung der Schallquellen zeigt schematisch Abbildung 14.

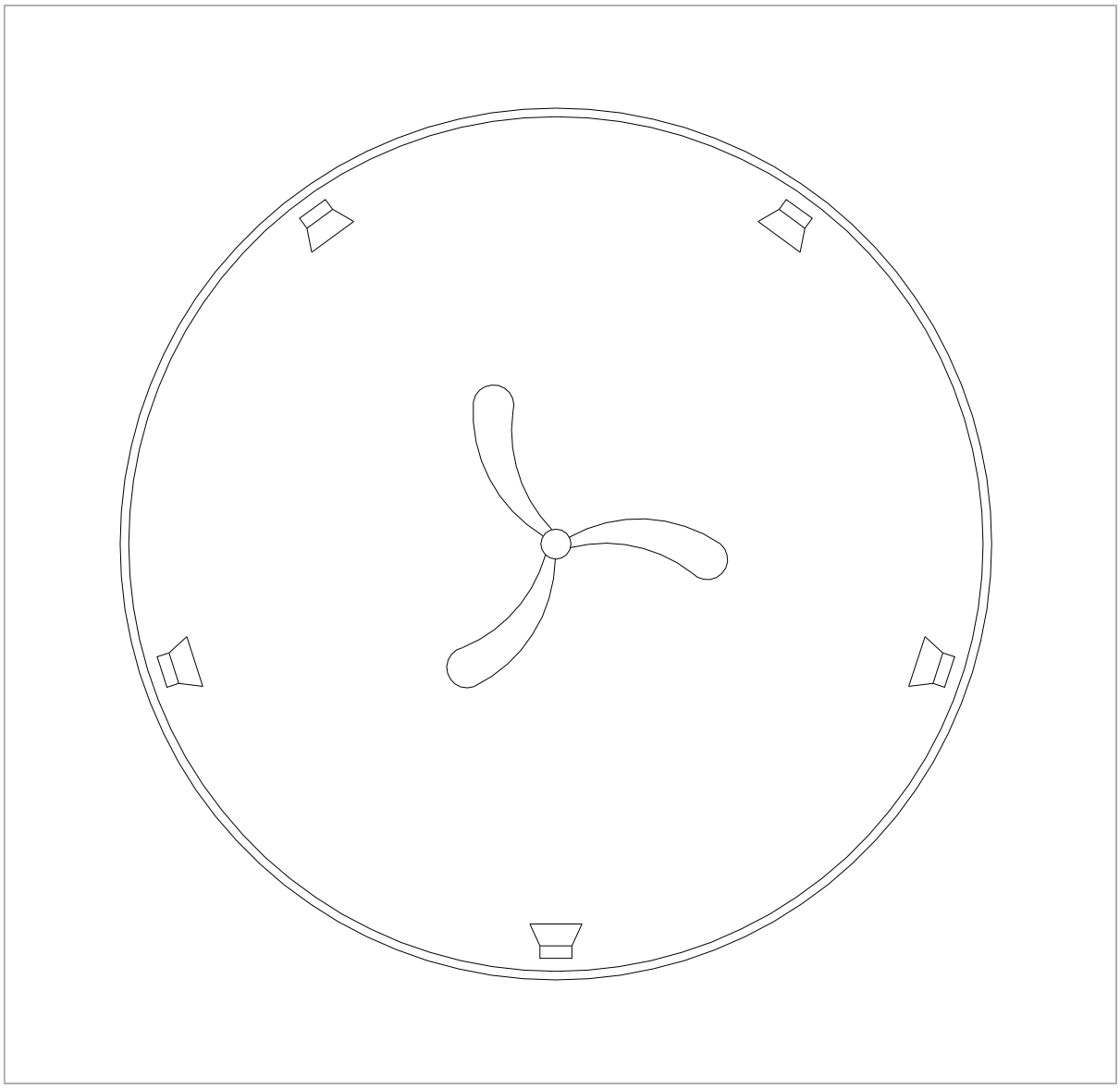


Abbildung 14: Schematische Darstellung der möglichen Anordnung der Schallquellen in einem Fermenter mit zentralem Rührwerk

Als Schallquellen wird wegen ihrer deutlich höheren Energieeffizienz auf Sonotroden orientiert.

Zusammenfassung der Projektergebnisse

Ziel des Projektes war es zu untersuchen, ob durch einen Schalleintrag in den Fermenter der Methanertrag pro Zeiteinheit bei einer anaeroben Vergärung von organischen Stoffen signifikant gesteigert werden kann. Dabei sollte der Effekt der Beschallung nicht in einem Aufschluss der Gärsubstrate durch Kavitationseffekte bestehen, sondern es war das erklärte Ziel, die Methanbakterien mit geringen Schallintensitäten und dementsprechend kleinen eingetragenen Energiemengen anzuregen und so die Abbauleistung von organischer Substanz zu Methan zu erhöhen. Hinsichtlich der Schallfrequenzen sollte der gesamte hörbare Bereich sowie der untere Ultraschallbereich untersucht werden. Zu Beginn des Projektes wurde zunächst die Schallausbreitung in typischem Gärgut untersucht, um Erkenntnisse über die Eindringtiefe des Schalls zu gewinnen.

Anschließend wurden Gärversuche im Batchmaßstab durchgeführt, um den Effekt in Abhängigkeit von der Schallfrequenz zu quantifizieren. Dazu wurden im Biogaslabor der E.S.C.H. GmbH acht 30-Liter-Batchfermenter installiert, mit denen eine flexible Beschallung des Gärsubstrates während des Gärprozesses möglich ist. Auf der Grundlage der Ergebnisse der Batchversuche wurde dann mit den optimierten Beschallungsparametern ein kontinuierlich arbeitender 150-Liter-Versuchsfermenter betrieben. Ein baugleicher Fermenter ohne Beschallung diente als Referenz. Die als FuE-Fremdleistung geplante Analyse der vorhandenen Bakterienpopulationen mittels Gensonden sollten ggf. Rückschlüsse auf die wirkenden Mechanismen zulassen.

Für den Fall, dass die angenommenen positiven Auswirkungen der Beschallung auf die pro Zeiteinheit gebildete Methanmenge durch die Versuche bestätigt würden, sollte die Beschallung als zusätzliche Eingangsgröße in eine vorhandene Regelungs- und Optimierungsstrategie für Biogasanlagen mit dem Ziel integriert werden, die Flexibilität und Effizienz des Biogasprozesses zu erhöhen.

Als Vorbereitung für eine praktische Umsetzung wurde ein Vorschlag erarbeitet, wie die Beschallungstechnik als separates Modul in das Konzept der E.S.C.H. Biogasanlagen integriert werden kann.

In den Batchversuchen konnte nachgewiesen werden, dass durch eine Beschallung des Fermenterinhalts die zeitlich gebildete Methanmenge gesteigert werden kann. Die erreichbaren Mehrausbeuten liegen, bezogen auf den unbeschallten Betrieb, bei etwa 8%. Dabei stellte sich

heraus, dass Schallfrequenzen im oberen hörbaren Bereich oder im Ultraschallbereich bis 24 kHz am wirksamsten sind. Die Voruntersuchungen zur Schallausbreitung ergaben, dass die Eindringtiefe dort sehr gering ist. Auch die effektiv eingetragenen Energiemengen sind äußerst gering, so dass Desintegrationseffekte als Ursache für die Erhöhung der gebildeten Methanmenge praktisch ausgeschlossen werden können. Vielmehr muss eine Anregung der Methanbakterien als Ursache für die vermehrte Methanbildung vermutet werden. Die durchgeführten Untersuchungen mittels Gensondenanalyse konnten hierzu jedoch keine eindeutige Erklärung liefern. In der beschallten Probe des kontinuierlichen Referenzversuches im 150-Liter-Versuchsfermenter wurde eine um 17% höhere Methanbakterienpopulation bestimmt als in der unbeschallten Probe. Das steht in einem gewissen Widerspruch zu der These, dass die Methanbakterien durch die Schallanregung aktiver werden und somit mehr organische Substanz pro Zeiteinheit in Methan umwandeln. Möglicherweise wirkt sich die Anregung auch auf die Vermehrung der Methanbakterien aus und führt somit indirekt zu einer verstärkten Biogasproduktion.

Anhand einer ersten Skalierung des beschallten Volumens auf das Fünffache wurde zudem festgestellt, dass hinsichtlich der pro Volumeneinheit eingebrachten Schallenergie offenbar eine Grenze existiert, bei deren Überschreitung die gebildete Methanmenge nicht weiter zunimmt. Unabhängig von der Möglichkeit einer weiteren Verringerung der pro Volumeneinheit Gärsubstrat zugeführten Schallenergie kann bei Verwendung einer energieoptimierten Beschallungstechnik bereits auf der Basis der Versuchsergebnisse des kontinuierlichen Referenzversuches davon ausgegangen werden, dass die aus dem Methan-Mehrertrag erzeugbare Elektroenergiemenge die zur Beschallung eingesetzte Energiemenge deutlich übersteigt. Hinsichtlich der Anwendung der Technologie wurde die Einflussgröße der Beschallung in eine vorhandene Regelungs- und Optimierungsstrategie für Biogasanlagen integriert.

E.S.C.H.
Engineering Service Center und Handel GmbH

Anhang

Anhang 1: Analysenbericht P1401110 Gensondenanalyse Fa. Vermicon

Anhang 2: Analysenbericht P1401110_02 Gensondenanalyse Fa. Vermicon

Anhang 3: Analysenbericht P1401110_03 Gensondenanalyse Fa. Vermicon

vermicon
solutions for microbiology

Spezifische Quantifizierung von Methanbakterien in Fermenterproben

KUNDE:	E.S.C.H. GmbH	KONTAKT:	Herr Dipl. Ing. Wersch
KUNDEN-NR:	K111410	REFERENZ/AUFTRAGS-NR:	162 08 100
PROBENBEZEICHNUNG:	s. u.	PROJEKT:	P1401110
PROBENEINGANG:	28.01.2014	ANZAHL DER PROBEN:	2

A. PROJEKT

In der vorliegenden Analyse sollen Biogas-Fermenterproben hinsichtlich ihres Gehaltes an Methanbakterien untersucht werden. Die Untersuchung wird mittels der VIT® Gensondentechnologie unter Verwendung spezifischer Gensonden durchgeführt.

B. VIT® GENSONDENTECHNOLOGIE

Das Prinzip der VIT® Gensondentechnologie basiert darauf, dass fluoreszenzmarkierte Gensonden in die morphologisch intakten Bakterien eindringen und diese anschließend fest an ihre spezifischen Zielstellen innerhalb der Zellen binden. Eine Identifizierung und Quantifizierung findet nach Anregung des an die Gensonden gekoppelten Fluoreszenzfarbstoffes unter dem Fluoreszenzmikroskop statt. Diese molekularbiologische Analysenmethode ermöglicht es, Mikroorganismen spezifisch, individuell und kultivierungsunabhängig direkt in der Untersuchungsprobe (in situ) zu visualisieren, zu identifizieren und zu quantifizieren. Der große Vorteil der Methode liegt dabei darin, dass die Identifizierung auf dem Nachweis der Erbsubstanz beruht und damit nicht von phänotypischen Merkmalen abhängt, die bei vielen Bakterien sehr variabel sein können. Es lassen sich damit mikrobielle Charakteristika von unterschiedlichen Proben und einzelne Populationsveränderungen sehr exakt analysieren. Die vitale Gesamtpopulation in der Probe wird durch den Einsatz einer Kombination aus einer umfassenden *Bacteria*-spezifischen Gensonde und einer umfassenden *Archaea*-spezifischen Gensonde ermittelt. Die hiermit nachgewiesenen Organismen stellen den allgemein gültigen Maßstab für den Anteil an nachweisbaren, lebensfähigen Bakterien in Anaerobreaktoren dar. Die Nachweisgrenze dieser Methode entspricht in etwa 1.000 Zellen / ml.
Zudem lassen sich Schlüsse über die Aktivität der nachgewiesenen Mikroorganismen ziehen: Die durch die Gensonden erhaltenen Fluoreszenzsignale spiegeln den physiologischen Zustand der nachgewiesenen Zellen wider. Je aktiver eine Zelle ist, desto mehr Zielstellen befinden sich in der Zelle und desto mehr Gensonden können in der Zelle binden. Umso heller erscheint die nachgewiesene Zelle unter dem Fluoreszenzmikroskop.

C. DURCHFÜHRUNG

Im Einzelnen wurden folgende Arbeiten durchgeführt:

- Aufbereitung der Proben „MP1 30 Fe“ und „MP2 150 Fe“
- Analyse der Methanbakterien mit Hilfe einer spezifischen Gensonde für die methanogenen *Archaea*: Quantifizierung der Population in Relation zur lebenden Gesamtpopulation (*Bacteria* und *Archaea*) mit Hilfe eines Fluoreszenzmikroskops (s. Tabelle 1)
- Dokumentation repräsentativer Ergebnisse

vermicon
solutions for microbiology

D. ERGEBNISSE

Tabelle 1: Zusammenfassung der Analysenergebnisse

Probenbezeichnung	Methanbakterien % Anteil an der lebenden Gesamtpopulation
MP1 30 Fe	<<1%
MP2 150 Fe	<<1%

In beiden Proben wurden Methanbakterien nur sehr vereinzelt als stäbchenförmige Einzelzellen nachgewiesen.

E. ANHANG

Bilddokumentation der Ergebnisse

vermicon AG, München, 29.01.2014

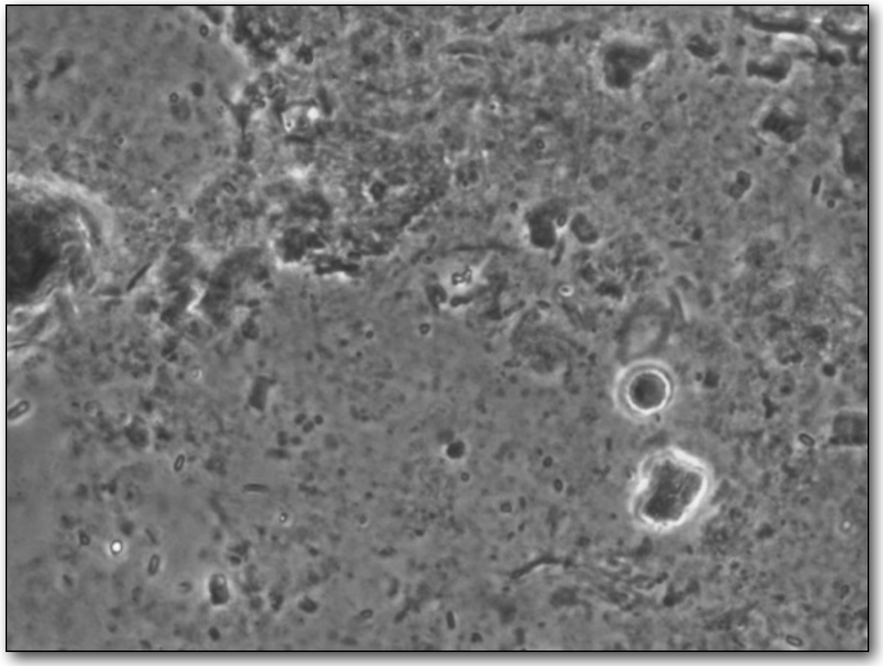
Dr. Claudia Beimfohr

P1401110_1

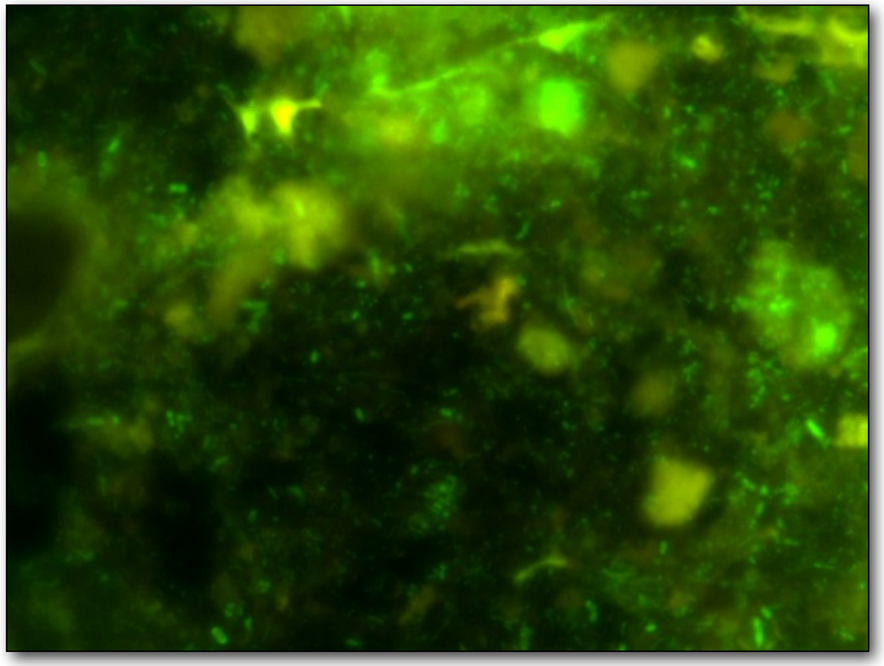
Spezifische Analyse von Methanbakterien: Probe - MB1 30 Fe

vermicon
solutions for microbiology

A



B



C

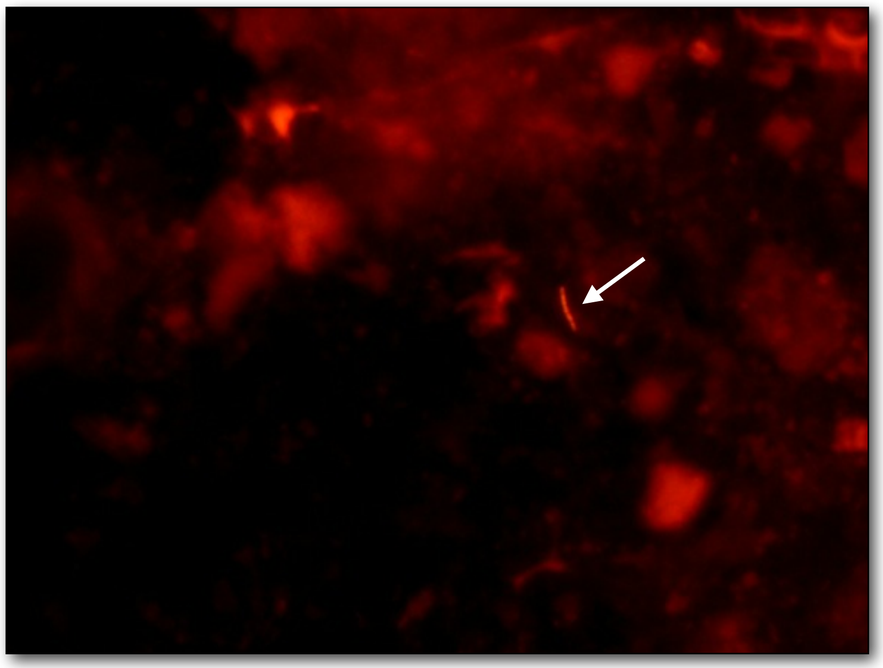


Bild A:

Phasenkontrastaufnahme

Bild B:

Nachweis aller lebenden Bacteria und Archaea

Bild C:

Spezifischer Nachweis der Methanbakterien (weißer Pfeil)

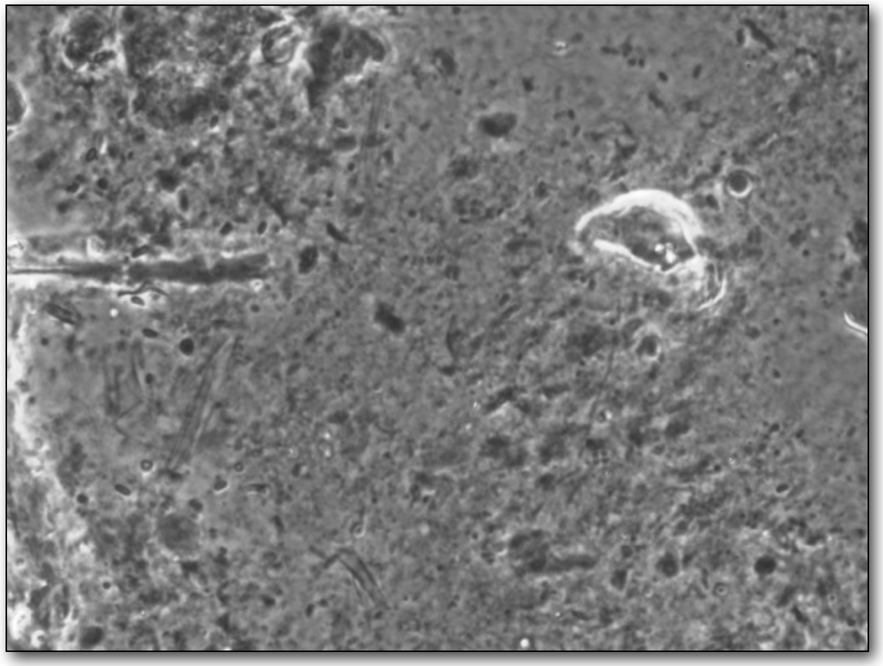
Gesamtvergrößerung der mikroskopischen Aufnahmen: 1000-fach

P1401110_2

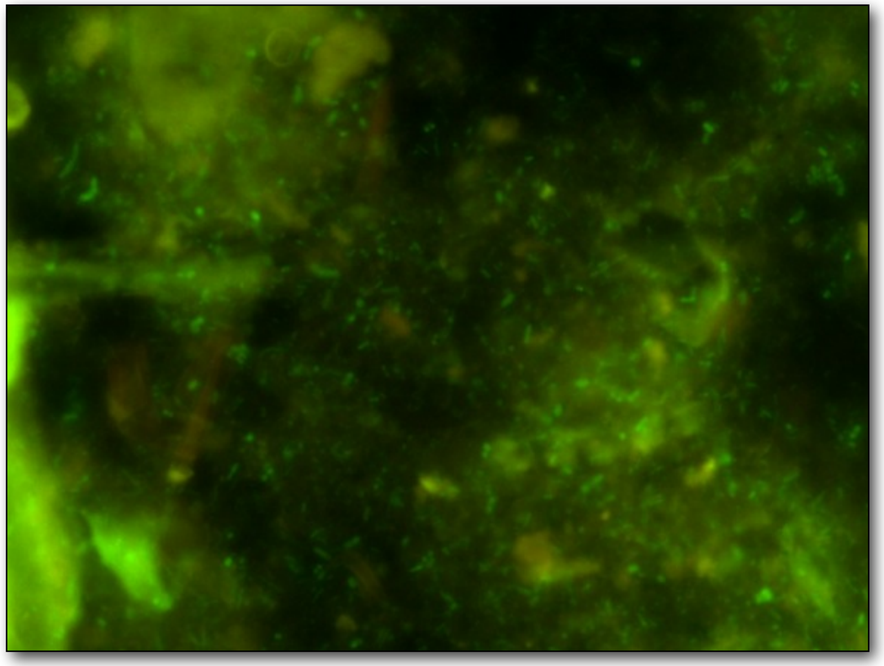
Spezifische Analyse von Methanbakterien: Probe - MP2 150 Fe

vermicon
solutions for microbiology

A



B



C

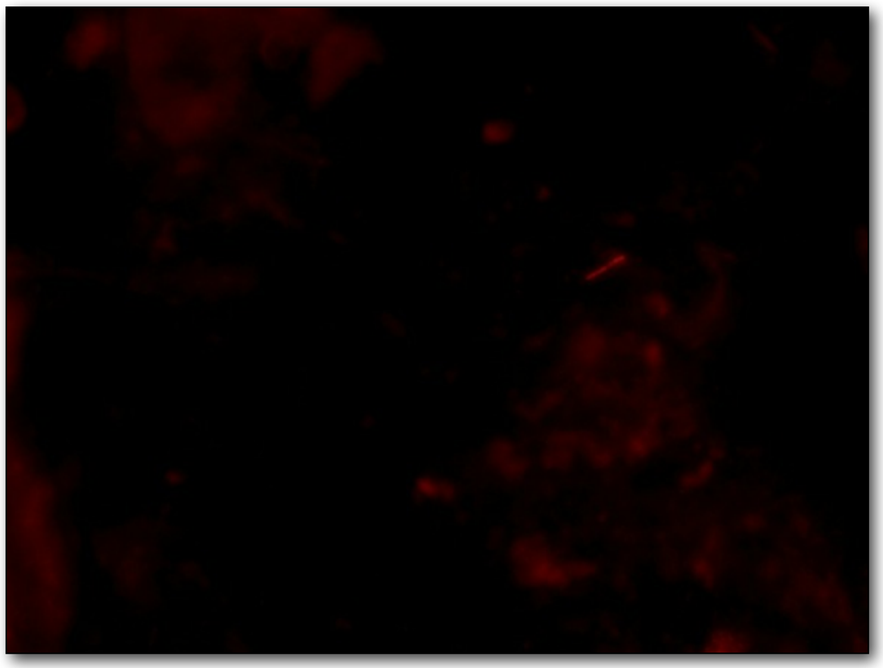


Bild A:

Phasenkontrastaufnahme

Bild B:

Nachweis aller lebenden Bacteria und Archaea

Bild C:

Spezifischer Nachweis der Methanbakterien

Gesamtvergrößerung der mikroskopischen Aufnahmen: 1000-fach

vermicon
solutions for microbiology

Spezifische Quantifizierung von Methanbakterien in Fermenterproben

KUNDE:	E.S.C.H. GmbH	KONTAKT:	Herr Dipl. Ing. Wersch
KUNDEN-NR:	K111410	REFERENZ/AUFTRAGS-NR:	-
PROBENBEZEICHNUNG:	s. u.	PROJEKT:	P1401110_02
PROBENEINGANG:	12.03.2014	ANZAHL DER PROBEN:	6

A. PROJEKT

In der vorliegenden Analyse wurden Biogas-Fermenterproben hinsichtlich ihres Gehaltes an Methanbakterien untersucht. Die Untersuchung wurde mittels der VIT® Gensondentechnologie unter Verwendung spezifischer Gensonden durchgeführt.

B. VIT® GENSONDENTECHNOLOGIE

Das Prinzip der VIT® Gensondentechnologie basiert darauf, dass fluoreszenzmarkierte Gensonden in die morphologisch intakten Bakterien eindringen und diese anschließend fest an ihre spezifischen Zielstellen innerhalb der Zellen binden. Eine Identifizierung und Quantifizierung findet nach Anregung des an die Gensonden gekoppelten Fluoreszenzfarbstoffes unter dem Fluoreszenzmikroskop statt. Diese molekularbiologische Analysenmethode ermöglicht es, Mikroorganismen spezifisch, individuell und kultivierungsunabhängig direkt in der Untersuchungsprobe (in situ) zu visualisieren, zu identifizieren und zu quantifizieren. Der große Vorteil der Methode liegt dabei darin, dass die Identifizierung auf dem Nachweis der Erbsubstanz beruht und damit nicht von phänotypischen Merkmalen abhängt, die bei vielen Bakterien sehr variabel sein können. Es lassen sich damit mikrobielle Charakteristika von unterschiedlichen Proben und einzelne Populationsveränderungen sehr exakt analysieren. Die vitale Gesamtpopulation in der Probe wird durch den Einsatz einer Kombination aus einer umfassenden *Bacteria*-spezifischen Gensonde und einer umfassenden *Archaea*-spezifischen Gensonde ermittelt. Die hiermit nachgewiesenen Organismen stellen den allgemein gültigen Maßstab für den Anteil an nachweisbaren, lebensfähigen Bakterien in Anaerobreaktoren dar. Die Nachweisgrenze dieser Methode entspricht in etwa 1.000 Zellen / ml.
Zudem lassen sich Schlüsse über die Aktivität der nachgewiesenen Mikroorganismen ziehen: Die durch die Gensonden erhaltenen Fluoreszenzsignale spiegeln den physiologischen Zustand der nachgewiesenen Zellen wider. Je aktiver eine Zelle ist, desto mehr Zielstellen befinden sich in der Zelle und desto mehr Gensonden können in der Zelle binden. Umso heller erscheint die nachgewiesene Zelle unter dem Fluoreszenzmikroskop.

C. DURCHFÜHRUNG

Im Einzelnen wurden folgende Arbeiten durchgeführt:

- Aufbereitung der Proben
- Analyse der Methanbakterien mit Hilfe einer spezifischen Gensonde für die methanogenen *Archaea*: Quantifizierung der Population in Relation zur lebenden Gesamtpopulation (*Bacteria* und *Archaea*) mittels Fluoreszenzmikroskopie (s. Tabelle 1)
- Dokumentation repräsentativer Ergebnisse

vermicon
solutions for microbiology

D. ERGEBNISSE

Tabelle 1: Zusammenfassung der Analysenergebnisse

Interne Probennr.:	Probenbezeichnung	Nachweis der Methanbakterien % Anteil an der lebenden Gesamtpopulation
01	Fe 2; Proben 30 l Fe, 07.03.2014	82 %
02	Fe 4; Proben 30 l Fe, 07.03.2014	79 %
03	Fe 7; Proben 30 l Fe, 07.03.2014	84 %
04	Fe 8; Proben 30 l Fe, 07.03.2014	75 %
05	D1; Proben 150 l Fe, 10.03.2014	50 %
06	D2; Proben 150 l Fe, 10.03.2014	52 %

In den 30 l Proben (01-04) wurden insgesamt sehr wenige lebende Zellen nachgewiesen. Neben vielen anderen Bestandteilen wurden selten einzelne Zellen und Zellansammlungen (Cluster) nachgewiesen. Im Vergleich der 4 Proben wurden in der Probe 03 am meisten Methanbakterien nachgewiesen. Sie hatten einen Anteil an der lebenden Gesamtpopulation von 83 %. Hier wurden stäbchenförmige Einzelzellen und auch kompakte Cluster der Methanbakterien nachgewiesen.
In der Probe 04 waren insgesamt am wenigsten Methanbakterien vorhanden. Sie strahlten zudem die schwächsten Fluoreszenzsignale im Vergleich der vier Proben aus, was auf eine vergleichsweise schwächere Aktivität der Zellen in dieser Probe hindeutet. Die Proben 01 und 02 lagen quantitativ in Bezug auf die Methanbakterien zwischen den Proben 03 und 04.

In den 150 l Proben waren insgesamt deutlich mehr unterschiedliche lebende Zellen vorhanden und die Methanbakterien waren in beiden Proben mit recht vergleichbaren Anteilen und auch ähnlichen Zellmorphologien vorhanden. Sie kamen als stäbchenförmige Einzelzellen, in Form von Kurzfilamenten und verstärkt auch in kompakten Clusterformationen vor. In der Probe 05 hatten die Methanbakterien einen Anteil an der lebenden Gesamtpopulation von 50%, in der Probe D2 etwas höher mit 52%.
Zu beachten ist, dass obwohl die relativen Werte in diesen Proben niedriger waren, die absoluten Zellzahlen der Methanbkaterien in diesen beiden Proben deutlich höher lagen als in den Proben 01-04, in der vergleichsweise nur wenige lebende Zellen nachweisbar waren.

E. ANHANG

Bilddokumentation repräsentativer Ergebnisse

vermicon AG, München, 24.03.2014

C. Beimfohr

Dr. Claudia Beimfohr

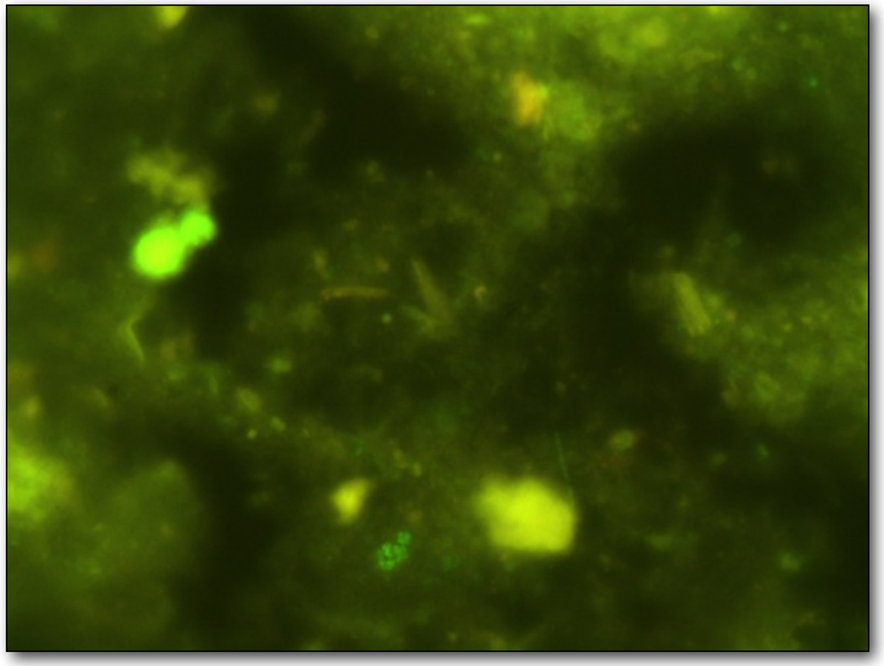
P1401110_02_1

Spezifische Analyse von Methanbakterien: 30 l Fe, Fe 2, 07.03.2014

vermicon
solutions for microbiology

A

B



C

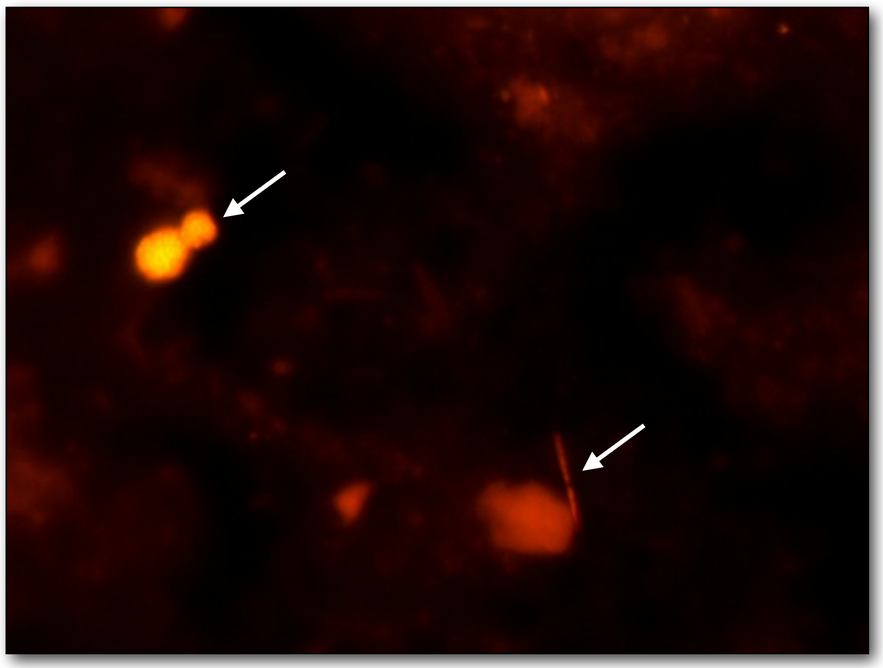


Bild A:

Phasenkontrastaufnahme

Bild B:

Nachweis lebende Bacteria und Archaea

Bild C:

Spezifischer Nachweis Methanbakterien (weiße Pfeile)

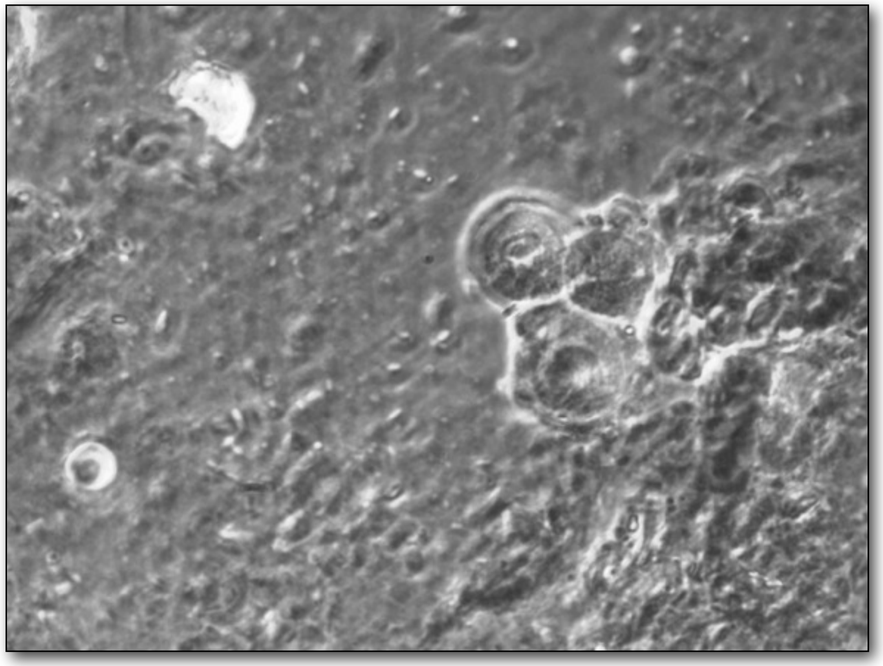
Gesamtvergrößerung der mikroskopischen Aufnahmen: 1000-fach

P1401110_02_2

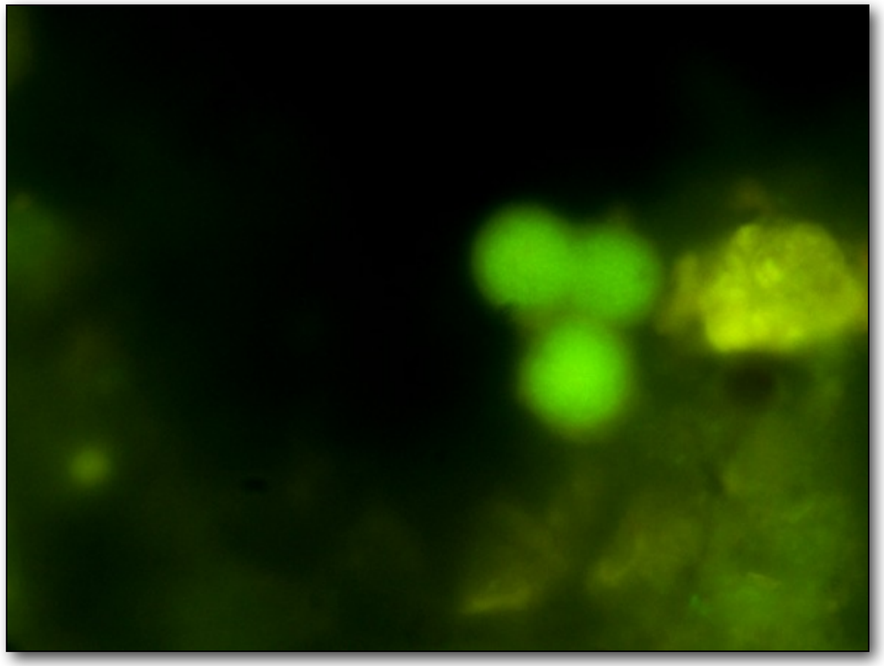
Spezifische Analyse von Methanbakterien: 30 l Fe, Fe 7, 07.03.2014

vermicon
solutions for microbiology

A



B



C

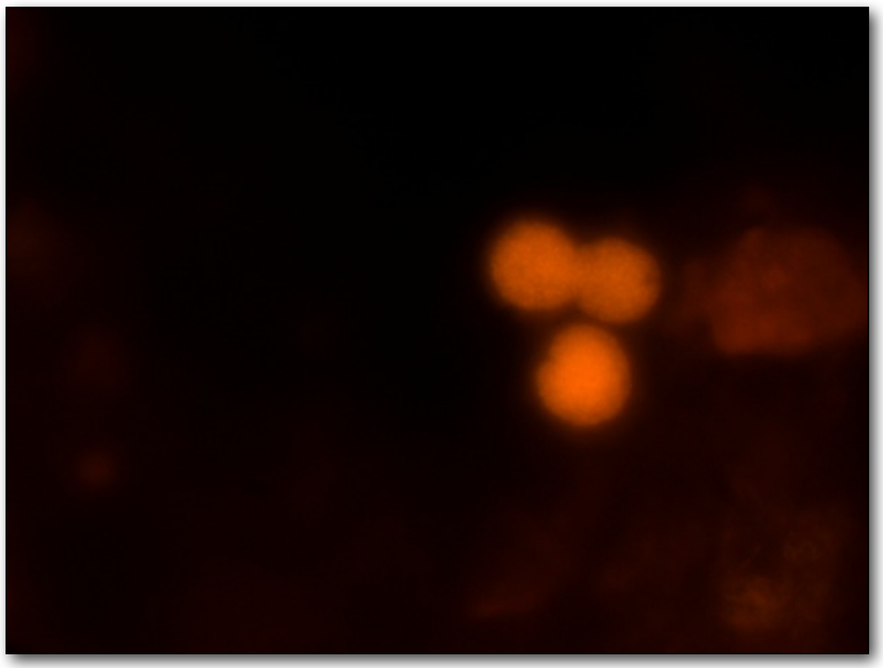


Bild A:

Phasenkontrastaufnahme

Bild B:

Nachweis lebende Bacteria und Archaea

Bild C:

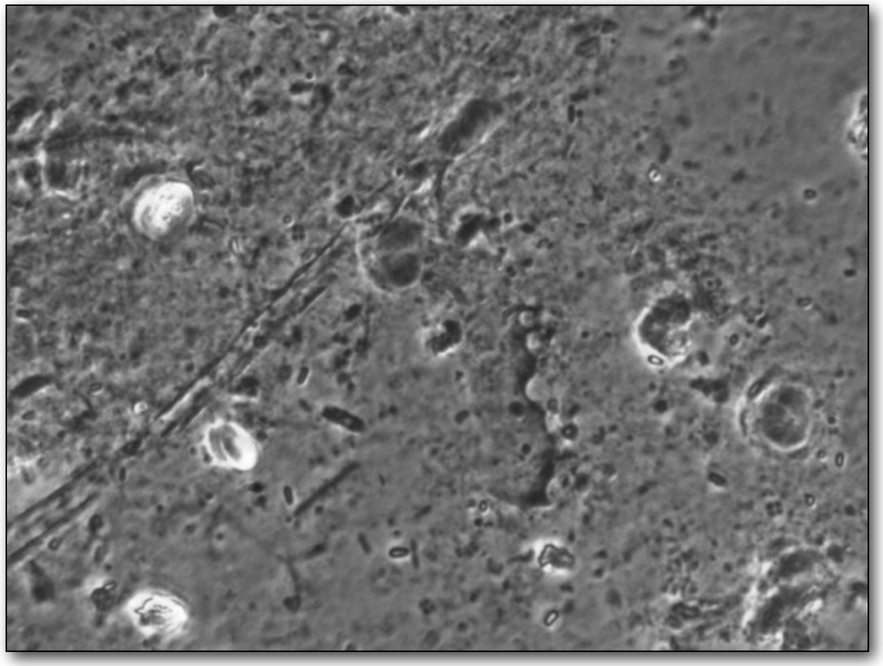
Spezifischer Nachweis Methanbakterien

Gesamtvergrößerung der mikroskopischen Aufnahmen: 1000-fach

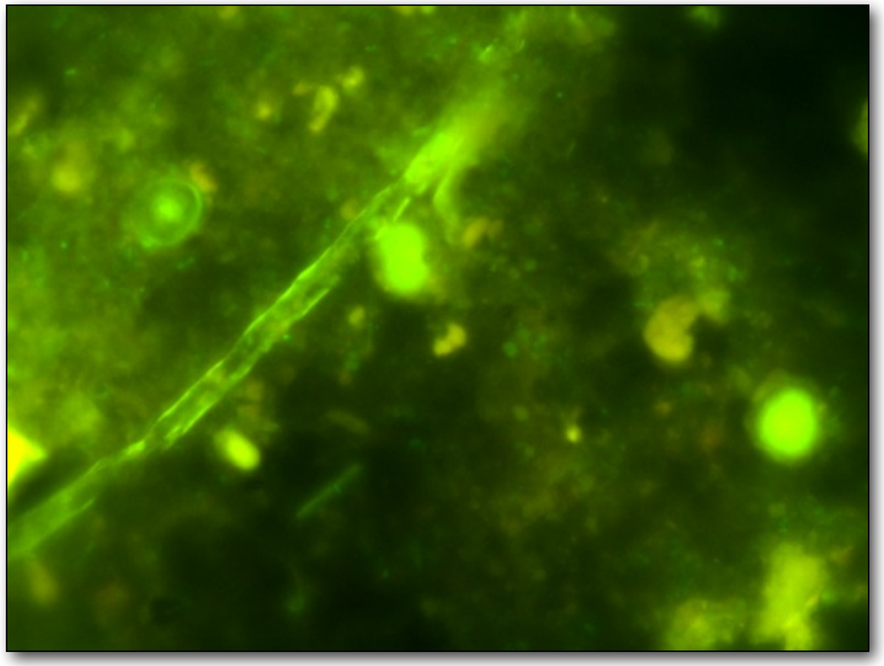
P1401110_02_3

Spezifische Analyse von Methanbakterien: 150 l Fe, D1, 10.03.2014

A



B



C

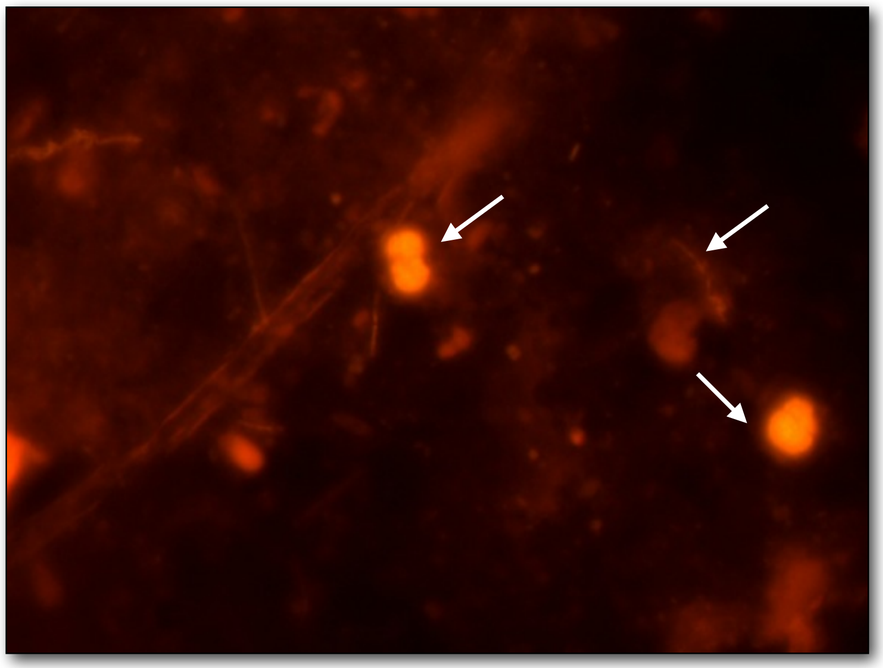


Bild A:

Phasenkontrastaufnahme

Bild B:

Nachweis lebende Bacteria und Archaea

Bild C:

Spezifischer Nachweis Methanbakterien (weiße Pfeile)

Gesamtvergrößerung der mikroskopischen Aufnahmen: 1000-fach

vermicon
solutions for microbiology

Spezifische Quantifizierung von Methanbakterien in Fermenterproben

KUNDE:	E.S.C.H. GmbH	KONTAKT:	Herr Dipl. Ing. Wersch
KUNDEN-NR:	K111410	REFERENZ/AUFTRAGS-NR:	-
PROBENBEZEICHNUNG:	s. u.	PROJEKT:	P1401110_03
PROBENEINGANG:	04.04.2014	ANZAHL DER PROBEN:	2

A. PROJEKT

In der vorliegenden Analyse wurden zwei Biogas-Fermenterproben hinsichtlich ihres absoluten Gehaltes an Methanbakterien untersucht. In dieser Analyse wurde eine genaue Zellzahlbestimmung pro ml Untersuchungsprobe durchgeführt. Hierfür wurden die Proben filtriert und mit entsprechenden VIT® Gensonden zur Bestimmung der Lebendzellzahl und der Methanbakterien untersucht. Zusätzlich wurde eine Gesamtzellzahlbestimmung durchgeführt, die alle lebenden und toten Zellen beinhaltet.

B. VIT® GENSONDENTECHNOLOGIE

Das Prinzip der VIT® Gensondentechnologie basiert darauf, dass fluoreszenzmarkierte Gensonden in die morphologisch intakten Bakterien eindringen und diese anschließend fest an ihre spezifischen Zielstellen innerhalb der Zellen binden. Eine Identifizierung und Quantifizierung findet nach Anregung des an die Gensonden gekoppelten Fluoreszenzfarbstoffes unter dem Fluoreszenzmikroskop statt. Diese molekularbiologische Analysenmethode ermöglicht es, Mikroorganismen spezifisch, individuell und kultivierungsunabhängig direkt in der Untersuchungsprobe (in situ) zu visualisieren, zu identifizieren und zu quantifizieren. Der große Vorteil der Methode liegt dabei darin, dass die Identifizierung auf dem Nachweis der Erbsubstanz beruht und damit nicht von phänotypischen Merkmalen abhängt, die bei vielen Bakterien sehr variabel sein können. Es lassen sich damit mikrobielle Charakteristika von unterschiedlichen Proben und einzelne Populationsveränderungen sehr exakt analysieren. Die vitale Gesamtpopulation in der Probe wird durch den Einsatz einer Kombination aus einer umfassenden *Bacteria*-spezifischen Gensonde und einer umfassenden *Archaea*-spezifischen Gensonde ermittelt. Die hiermit nachgewiesenen Organismen stellen den allgemein gültigen Maßstab für den Anteil an nachweisbaren, lebensfähigen Bakterien in Anaerobreaktoren dar. Die Nachweisgrenze dieser Methode entspricht in etwa 1.000 Zellen / ml.
Zudem lassen sich Schlüsse über die Aktivität der nachgewiesenen Mikroorganismen ziehen: Die durch die Gensonden erhaltenen Fluoreszenzsignale spiegeln den physiologischen Zustand der nachgewiesenen Zellen wider. Je aktiver eine Zelle ist, desto mehr Zielstellen befinden sich in der Zelle und desto mehr Gensonden können in der Zelle binden. Umso heller erscheint die nachgewiesene Zelle unter dem Fluoreszenzmikroskop.

C. DURCHFÜHRUNG

Im Einzelnen wurden folgende Arbeiten durchgeführt:

- Aufbereitung der Proben
- Filtration eines Aliquots der Proben auf Bakterien-dichte Filter (0,2 µm Porengröße)
- Analyse der filtrierten Zellen mit spezifischen Gensonden für die methanogenen *Archaea (Methanbakterien),* und alle lebenden Zellen *(Bacteria* und *Archaea).* Bestimmung der Gesamtzellzahlen (lebend und tot) durch Verwendung eines DNA-Farbstoffes. Quantifizierung der einzelnen Populationen mittels Fluoreszenzmikroskopie und Berechnung der einzelnen Zellzahlen pro ml unfixierte Probe.
- Dokumentation repräsentativer Ergebnisse

vermicon
solutions for microbiology

D. ERGEBNISSE

Tabelle 1: Zusammenfassung der Analysenergebnisse

Probenbezeichnung	Gesamtzellzahl pro ml	Lebendzellzahl pro ml	Methanbakterien pro ml	% Anteil der Methanbakterien an der lebenden Gesamtpopulation
D1; Proben 150l Fe, 01.04.2014	2,53E+09	2,42E+08	1,09E+08	45 %
D2; Proben 150l Fe, 01.04.2014	2,68E+09	2,00E+08	9,29E+07	47 %

In beiden Proben Einzelzellen und unterschiedlich große Zellansammlungen (Cluster) vorhanden.
Beide Proben enthielten ähnliche absolute Zellzahlen für die Methanbakterien. Da jedoch die Lebendzellzahl in Probe D1 etwas höher lag als in Probe D2, war der relative Anteil der Methanbakterien mit 47% leicht höher als der Anteil in Probe D1 mit 45%.

E. ANHANG

Bilddokumentation repräsentativer Ergebnisse

vermicon AG, München, 11.04.2014

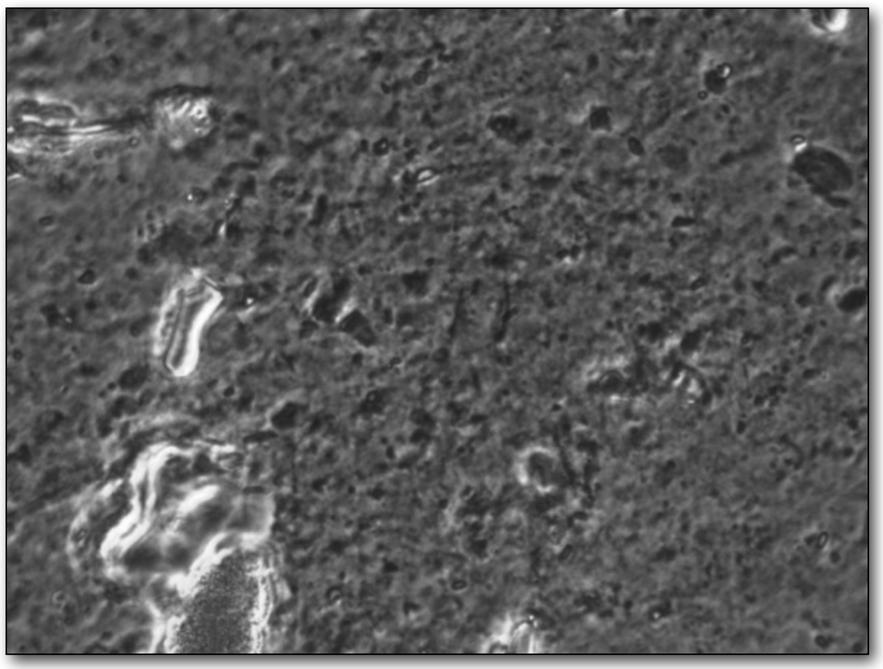
Dr. Claudia Beimfohr

P1401110_03_1

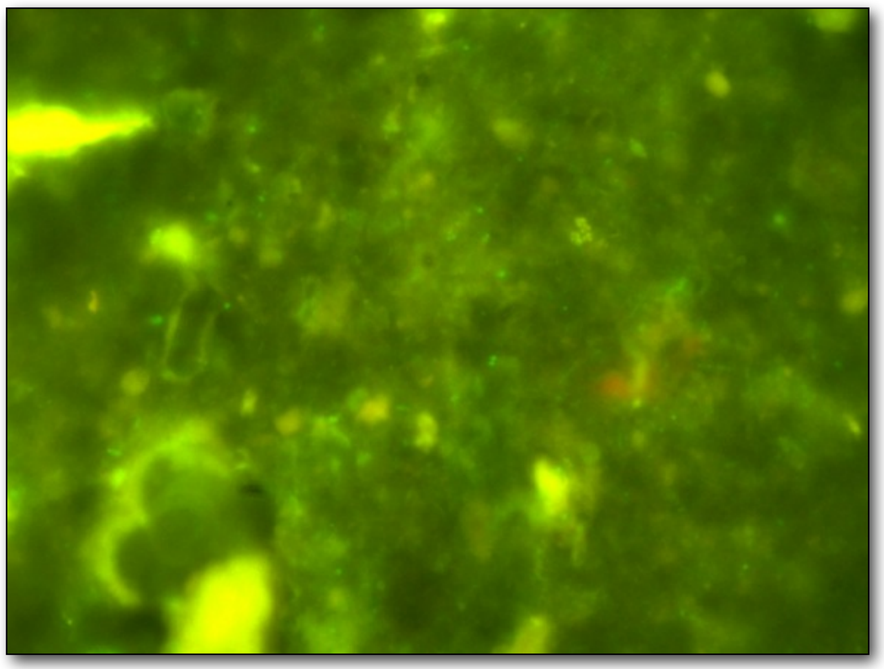
Spezifische Analyse von Methanbakterien: 150l Fe, D1, 01.04.2014

vermicon
solutions for microbiology

A



B



C

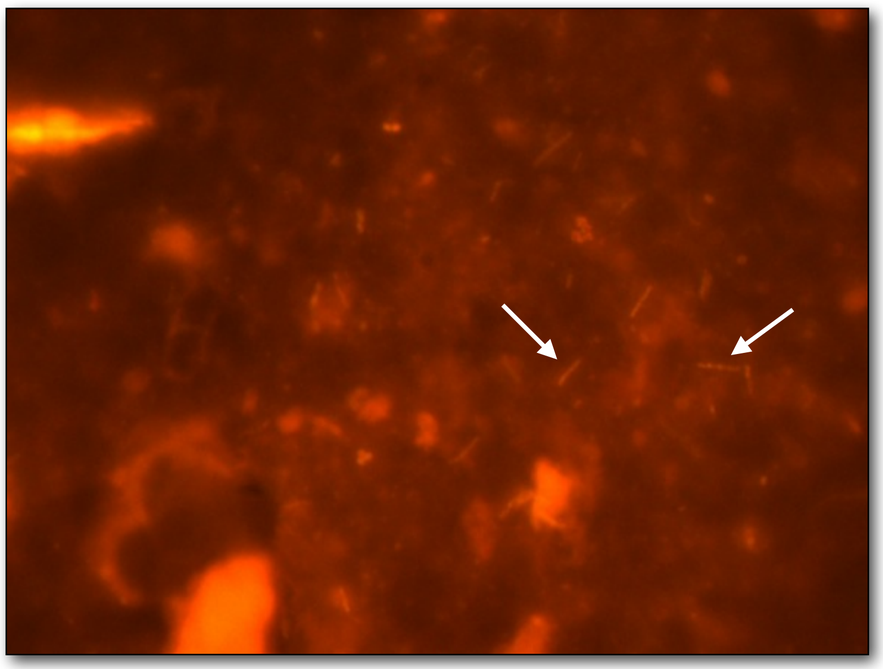


Bild A:

Phasenkontrastaufnahme

Bild B:

Nachweis lebende Bacteria und Archaea

Bild C:

Spezifischer Nachweis Methanbakterien (weiße Pfeile)

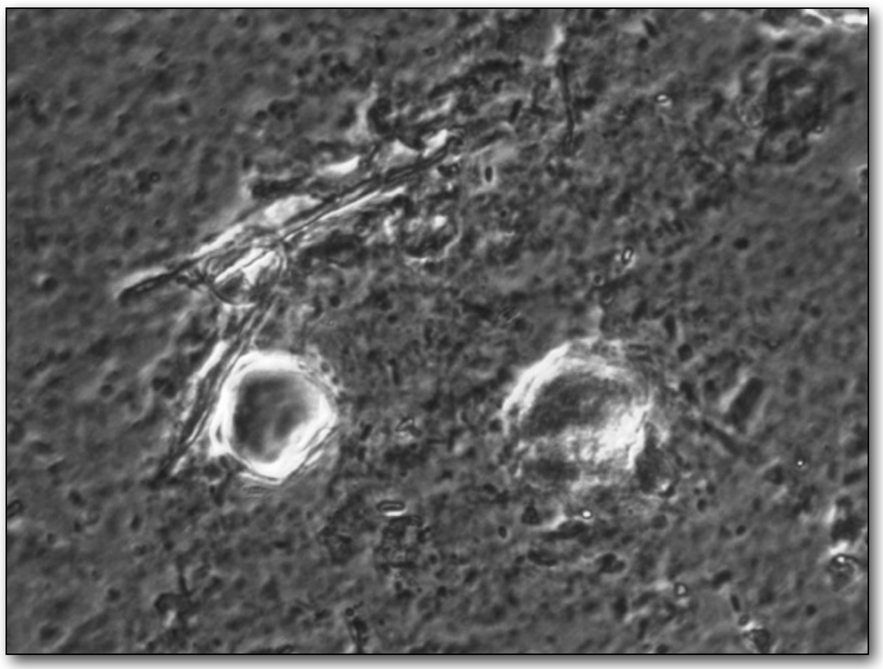
Gesamtvergrößerung der mikroskopischen Aufnahmen: 1000-fach

P1401110_03_2

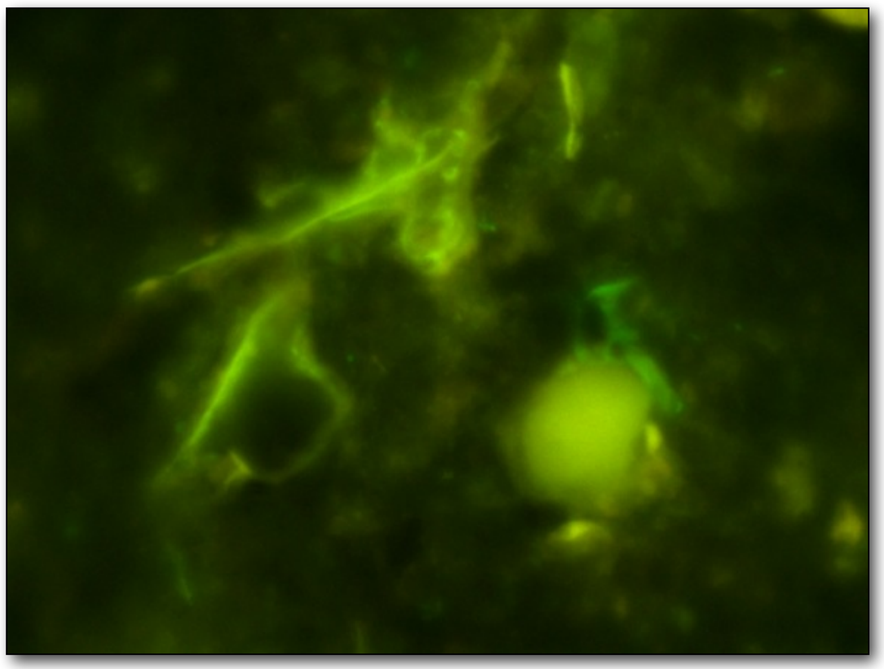
Spezifische Analyse von Methanbakterien: 150l Fe, D1, 01.04.2014

vermicon
solutions for microbiology

A



B



C

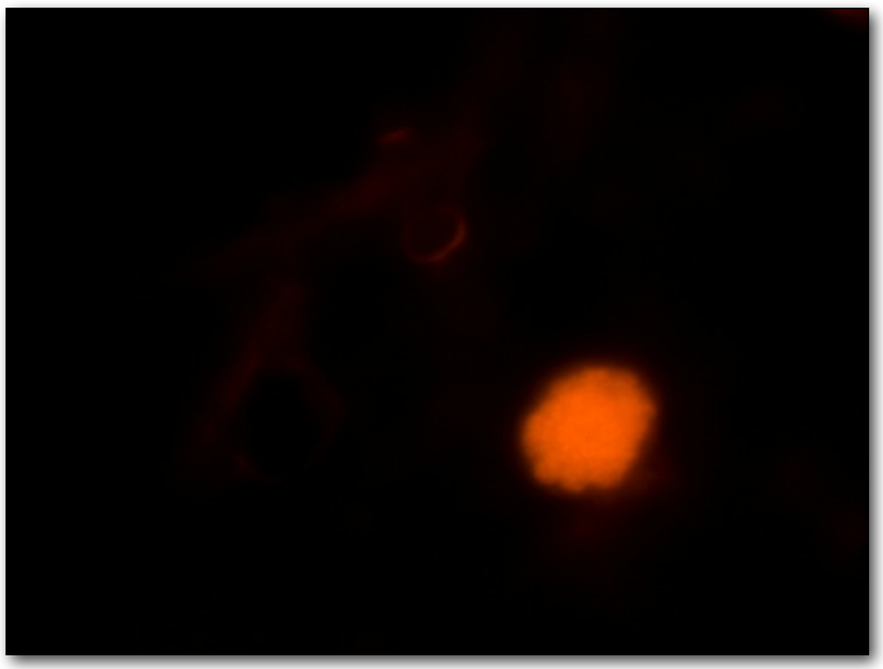


Bild A:

Phasenkontrastaufnahme

Bild B:

Nachweis lebende Bacteria und Archaea

Bild C:

Spezifischer Nachweis Methanbakterien

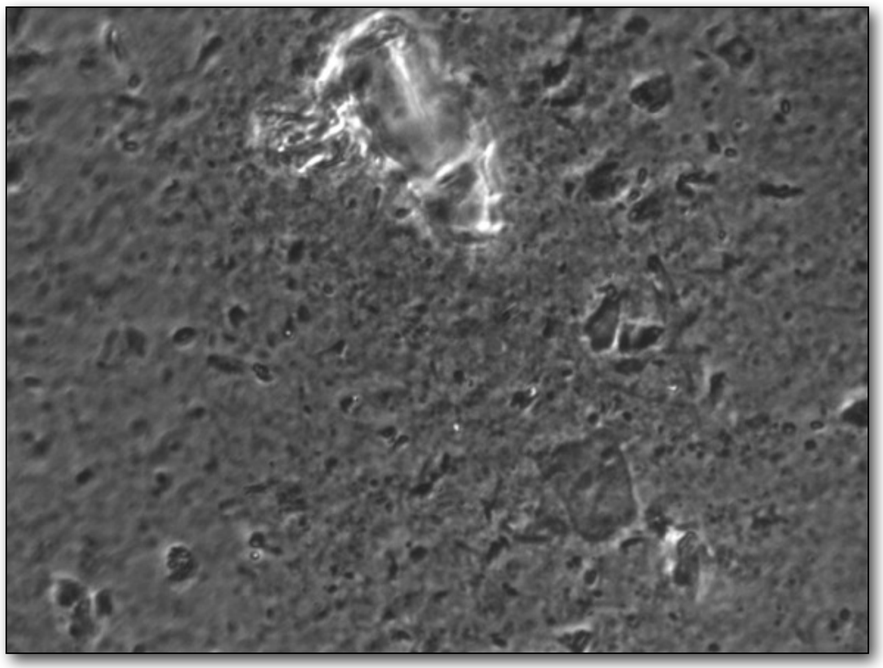
Gesamtvergrößerung der mikroskopischen Aufnahmen: 1000-fach

P1401110_03_3

Spezifische Analyse von Methanbakterien: 150l Fe, D2, 01.04.2014

vermicon
solutions for microbiology

A



B

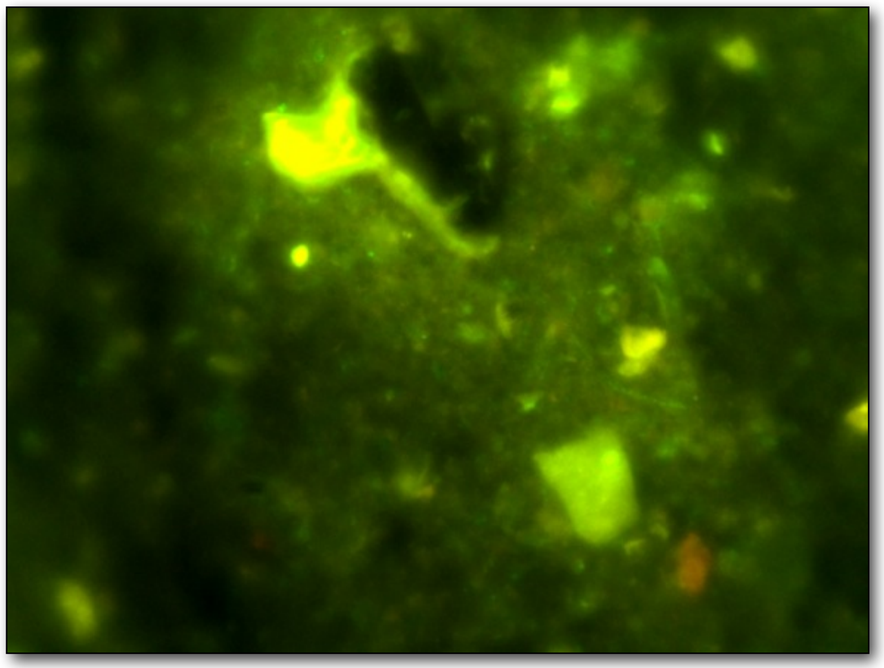
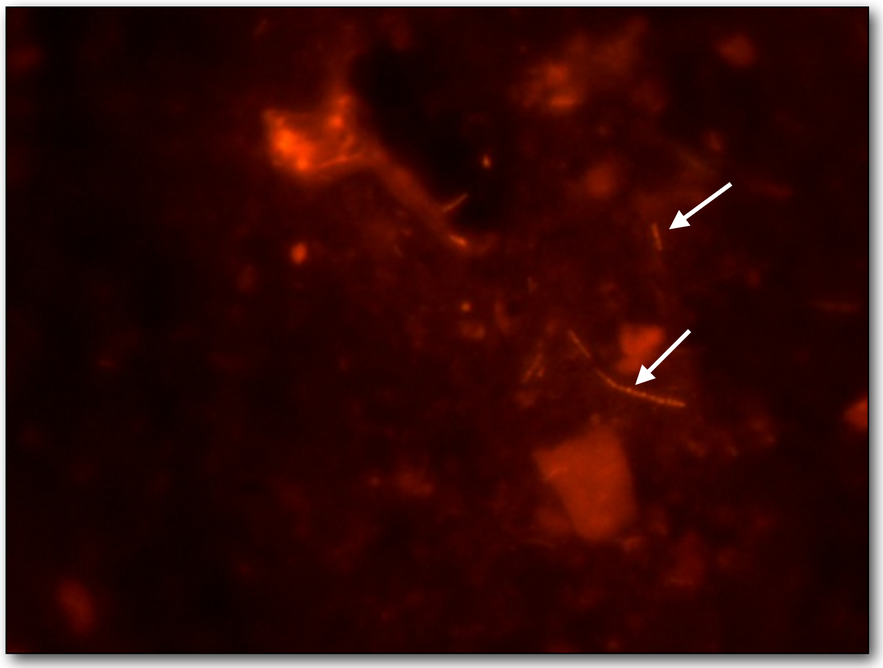


Bild A:

Phasenkontrastaufnahme

Bild B:

Nachweis lebende Bacteria und Archaea



C

Bild C:

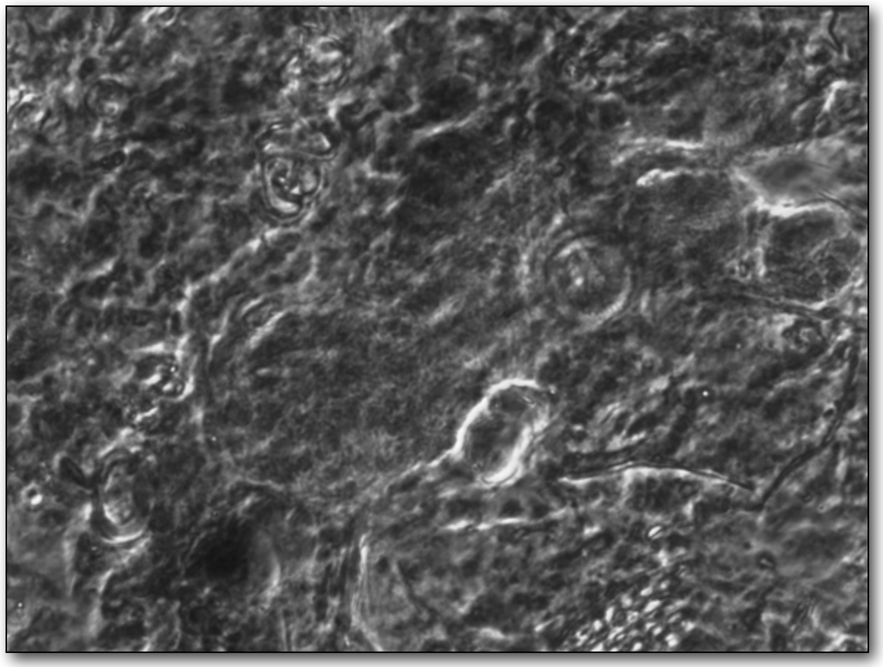
Spezifischer Nachweis Methanbakterien (weiße Pfeile)

Gesamtvergrößerung der mikroskopischen Aufnahmen: 1000-fach

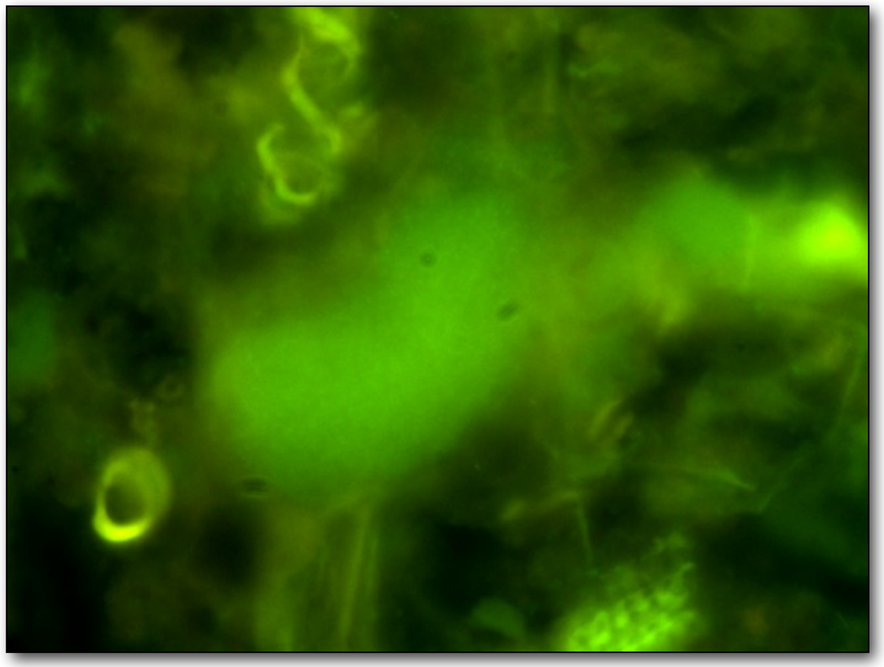
P1401110_03_4

Spezifische Analyse von Methanbakterien: 150l Fe, D2, 01.04.2014

A



B



C

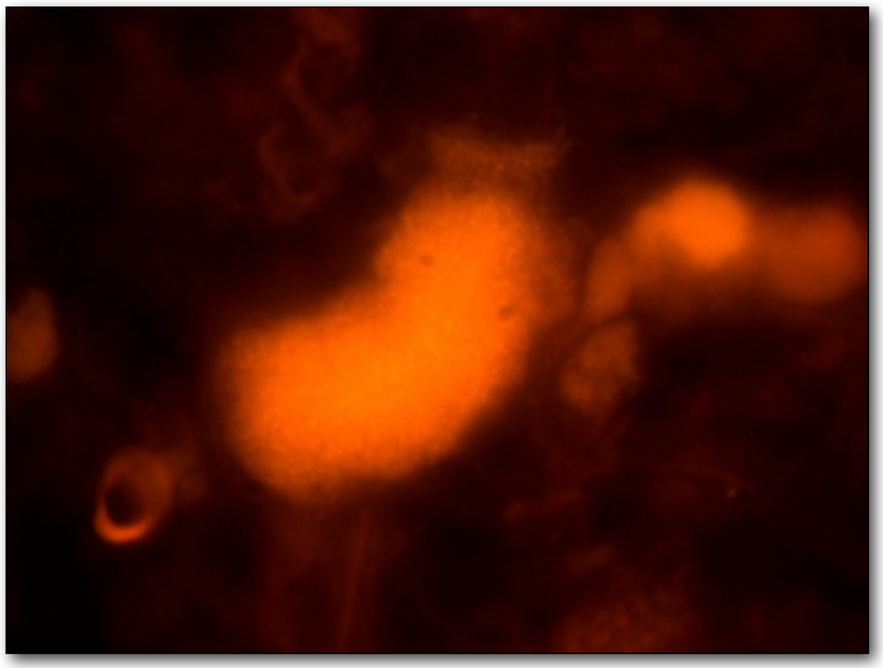


Bild A:

Phasenkontrastaufnahme

Bild B:

Nachweis lebende Bacteria und Archaea

Bild C:

Spezifischer Nachweis Methanbakterien

Gesamtvergrößerung der mikroskopischen Aufnahmen: 1000-fach