

Entwicklung einer Methode zur Abschätzung der tatsächlichen Restgasbildung von Gärrestlagern und dessen Validierung in der Praxis

Abschlussbericht



Impressum:

Herausgeber: Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft

Vöttinger Straße 38, 85354 Freising

Internet: <http://www.LfL.bayern.de>

Redaktion: Institut für Landtechnik und Tierhaltung

Vöttinger Straße 36, 85354 Freising

E-Mail: TierundTechnik@LfL.bayern.de

Tel.: 08161/71-3450

Dezember 2015

ILT© LfL



- Entwicklung einer Methode zur Abschätzung der tatsächlichen Restgasbildung von Gärrestlagern und dessen Validierung in der Praxis -

Abschlussbericht

Florian Ebertseder

Fabian Lichti

Auftraggeber: Bayerisches Staatsministerium für Ernährung,
Landwirtschaft und Forsten
Ludwigstraße 2
86179 München

Auftragsdatum:

Projektleitung: Dr. agr. Fabian Lichti

Bearbeiter: Dipl. Ing. (FH) Florian Ebertseder, M.Sc. (TUM)

Berichtsabschluss: 01.03.16

Berichtsumfang: 60 Seiten

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	6
Tabellenverzeichnis	8
Zusammenfassung	9
1 Einleitung	11
2 Stand des Wissens	12
3 Zielsetzung	14
4 Material und Methoden	15
4.1 Restgaspotentialbestimmung.....	15
4.2 Auswertung und Laboranalysen.....	17
5 Ergebnisse und Diskussion	20
5.1 Untersuchung der Einflussfaktoren auf die Höhe des Restgaspotentials.....	20
5.1.1 Einfluss der Verweilzeit auf die Höhe des Restgaspotentials.....	20
5.1.2 Einfluss ausgewählter Prozessparameter auf die Höhe des Restgaspotentials	21
5.1.3 Erklärungsanteil der identifizierten Einflussparameter an der Gesamtvariation der Daten des Restgaspotentials	23
5.2 Untersuchung der Reduktionsmöglichkeit des Restgaspotentials durch mechanische Separation	28
5.3 Untersuchung des Einflusses der Versuchsmethode auf das Restgaspotential.....	30
5.4 Ergebnisse der Arbeitsgruppe Restgaspotential von Gärprodukten.....	37
6 Schlussfolgerung.....	39
7 Weiteres Vorgehen	40
8 Veröffentlichungen.....	41
9 Vorträge	42
10 Literaturverzeichnis.....	43

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Versuchsaufbau zur Messung des Restgaspotentials an der LfL und Innenansicht des Wärmeschanks mit den gefüllten Glasfermentern.	16
Abbildung 2: Zusammenhang zwischen der hydraulischen Verweilzeit und dem Restgaspotential des Gärrestes bei 20 bzw. 37 °C für 88 Biogasanlagen.	21
Abbildung 3: Korrelationskoeffizienten der Einflussparameter auf das Restgaspotential bei 37 °C nach statistischer Standardisierung der Daten zu den Hauptkomponenten (PC) 1 und 2. Der Raum zwischen den Kreisen zeigt ein Bestimmtheitsmaß von mehr als 50 % zu den beiden Hauptkomponenten.	25
Abbildung 4: Korrelationskoeffizienten der Einflussparameter auf das Restgaspotential bei 37 °C nach statistischer Standardisierung der Daten zu den Hauptkomponenten (PC) 1 und 2. Zur Plausibilisierung wurden alle Werte der Flüchtigen Fettsäuren unter 300 mg/kg aus der Auswertung genommen. Der Raum zwischen den Kreisen zeigt ein Bestimmtheitsmaß von mehr als 50 % zu den beiden Hauptkomponenten.	26
Abbildung 5: Darstellung der Reduktion des Restgaspotential nach mechanische Separation aus Gärresten von zwei unterschiedlichen Biogasanlagen jeweils „Roh“-Wert für den Gärrest vor und „Flüssige_Phase“ nach der Separation, bei der Versuchstemperatur von 20 °C.	28
Abbildung 6: Darstellung der Reduktion des Restgaspotential nach mechanische Separation aus Gärresten von zwei unterschiedlichen Biogasanlagen jeweils „Roh“-Wert für den Gärrest vor und „Flüssige_Phase“ nach der Separation, bei der Versuchs-temperatur von 37 °C.	29
Abbildung 7: Darstellung der Vergleichsvariationskoeffizienten der vier Restgaspotential-Ringversuche des AQU an der LfL, jeweils der nach 10 Tagen, 20 Tagen und nach Abbruchkriterium erzielten Gasmenge über alle teilgenommenen Labore.	31
Abbildung 8: Darstellung der Vergleichsvariationskoeffizienten der zwei Restgaspotential-Ringversuche des KTBL und des VDLUFA, bei 20 °C und 37 °C jeweils als Restgas- sowie Methangaspotential über alle teilgenommenen Labore.	32
Abbildung 9 Zusammenhang zwischen der hydraulischen Verweilzeit und der Höhe des Restgaspotentials sowie die Vergleichbarkeit der Ergebnisse bei Versuchen mit 20 °C und 37 °C (n=96).	33
Abbildung 10: Vergleich der Laborergebnisse für die FFS-Konzentration nach einer Versuchsdauer von 60 Tagen zu Versuchsbeginn und nach Versuchsende für zwei Vergärungstemperaturen (20 und 37 °C) im Batchversuch.	34
Abbildung 11: Verlauf der Biogasproduktion über die Versuchsdauer von 60 Tagen bei der Vergärungstemperaturen 37 °C (Effizienzparameter) im Batchversuch (3 Wiederholungen).	35

Abbildung 12: Verlauf der Biogasproduktion über die Versuchsdauer von 60 Tagen bei der Vergärungstemperatur 20 °C (Emissionspotential) im Batchversuch einer Biogasanlage mit thermophiler Betriebstemperatur (3 Wiederholungen).....	36
Abbildung 13: Verlauf der Biogasproduktion über die Versuchsdauer von 60 Tagen bei der Vergärungstemperaturen 20 °C (Emissionspotential) im Batchversuch einer Biogasanlage mit mesophiler Betriebstemperatur (3 Wiederholungen).....	36

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Übersicht der Methoden zur Analyse der Gärreste im Labor	17
Tabelle 2: Korrelationsmatrix der zu Beginn ausgewählten Prozessparameter zur Bestimmung des Einflusses auf die Höhe des Restgaspotentials (37 °C) (n=96).....	22
Tabelle 3: Prüfung des Einflusses der gewählten Parameter auf die Höhe des Restgaspotentials bei einer Versuchstemperatur von 20 °C und 37 °C in der Einzelfaktoranalyse.	23

Zusammenfassung

Biogasanlagen sollten im Hinblick auf den Klimaschutz und die Wirtschaftlichkeit möglichst emissionsarm und effizient betrieben werden. Eine wesentliche Einflussgröße hinsichtlich der Effizienz des Gesamtprozesses ist die Biogas- und Methanausbeute der verwendeten Substrate. Diese hängt maßgeblich von der inhaltlichen Zusammensetzung der Einsatzstoffe ab und wird durch verschiedene Faktoren der Verfahrens- und Prozesstechnik beeinflusst. Als ein wesentlicher Parameter zur Beurteilung der Prozesseffizienz sowie des Emissionspotentials (je nach Versuchstemperatur) der offenen Gärresteläger gilt das Restgaspotential. Dieses beschreibt die Menge an Biogas bzw. Methan, welche nach dem Übertritt des Fermenterinhalt in das Gärrestlager potenziell noch gebildet werden kann. Generell unterscheidet man bei der Betrachtung des Restgaspotentials die beiden Ansätze zur Bewertung der Effizienz- sowie Emissionspotentials.

Durch die VDI-Richtlinie 3475 Blatt 4 wird bisher genehmigungsrechtlich die Emissionsminderung aus Biogasanlagen bzw. Gärrestlagern geregelt. Die Richtlinie beschreibt den Stand der Technik von Anlagen zur Biogaserzeugung hinsichtlich der Emissionsminderung und enthält bisher als einziges Regelwerk nur grob methodische Vorgaben, sowie die in der Wissenschaft umstrittene Annahme die Verweilzeit als einzigen Einflussparameter aufzuführen. Zur Messung des Effizienzpotentials fehlen festgeschriebene Methoden bisher gänzlich.

Ziel dieser Arbeit ist es zum einen den Zusammenhang zwischen Verweilzeit eines Substrats in der Biogasanlage und dessen Restgaspotential zu überprüfen sowie mögliche weitere Einflussgrößen zu identifizieren. Des Weiteren sollen auf dieser Basis auch Rückschlüsse und Ansatzmöglichkeiten für eine in wissenschaftlichen Arbeitsgruppen abgestimmte einheitliche Messmethode abgeleitet bzw. erarbeitet werden.

Den Ergebnissen liegen nach der statistischen Plausibilitätsanalyse Daten aus 96 Bestimmungen des Restgaspotentials von Gärresten zugrunde. Die 60-tägigen Gärversuche wurden nach den Vorgaben der VDI-Richtlinie 3475, Blatt 4 und in Anlehnung an die VDI 4630 bei 20°C (bildet das Emissionspotential ab) und 37°C (dient als Effizienzparameter) Gärtemperatur durchgeführt. Die Gärreste werden vor und nach dem Versuchsansatz nasschemisch (TS, oTS, FOS/TAC und das Spektrum an Flüchtigen Fettsäuren) untersucht, um diese zusammen mit den technische Prozessparameter der jeweiligen Biogasanalgen in einer Sensitivitätsanalyse bewerten zu können.

Bei der Auswertung der Daten mithilfe einer einfachen linearen Regression zeigte sich, dass keiner der untersuchten Anlagenparameter (Verweilzeit, der Gehalt der flüchtigen Fettsäuren (FFS), die Raumbelastung, der Gehalt an organischer Trockensubstanz (oTS) im Gärrest und der Wirtschaftsdüngeranteil am Einsatzstoffmix) alleine die Variation im Restgaspotential ausreichend erklärt. Die durchgeführte multiple lineare Regressionsanalyse nutzte die Raumbelastung, den Gehalt der organischen Trockensubstanz im Gärrest

sowie den Gülleanteil am Einsatzstoffmix um den Einfluss auf das Restgaspotential mit 63 % zu erklären.

Um diese Erkenntnisse in einer neuen standardisierten Methode in Zukunft zu berücksichtigen, wurden in einer wissenschaftliche Arbeitsgruppe die identifizierten Einflussparameter mit den bereits vorhandenen Daten abgeprüft und zwei gesonderte Ringversuche durchgeführt. Auffällig waren dabei vor allem die Ergebnisse der Restgasuntersuchungen bei 20 °C, die mit einem Variationskoeffizient von 47 % eine sehr hohe Sensibilität in der Methode verdeutlichten. Überprüft man in diesem Zusammenhang den Einfluss der vorgegebenen Versuchstemperatur auf das Restgaspotential mit dem vorliegenden Datensatz, so wird deutlich, dass die Ergebnisse bei 20 °C und 37 °C nicht zwingend zur selben Aussage führen und daher getrennt voneinander betrachtet werden müssen.

Diese neuen Erkenntnisse wurden in einer nationalen Arbeitsgruppe (KTBL-VDLUFA) diskutiert und als Basis für eine gemeinsame Stellungnahme zur Novelle der VDI-Richtlinie 4630 verwendet. In dieser Richtlinie wird es erstmals ein Kapitel zur Methodik der Restgaspotentialmessung (Effizienzparameter) geben. Die Festlegung einer standardisierten Messmethode zum Emissionspotential steht jedoch noch aus.

Erste Ergebnisse zur Reduktion des Restgaspotentials durch eine mechanische Separation der Gärreste, lassen eine positive jedoch anlagenspezifische Tendenz erkennen. Aus diesem Grund und vor dem Hintergrund des Klimaschutzvohabens wurde am Institut für Landtechnik und Tierhaltung der Bayerischen Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL) eine ergänzende Kurzstudie beantragt. Dessen Ziel ist es, Messverfahren zur Quantifizierung der Verluste aus dem Lager zu etablieren sowie die Prüfung von Maßnahmen oder technischen Möglichkeiten zur Minderung dieser Emissionen.

1 Einleitung

Im Sinne einer nachhaltigen Landwirtschaft muss auch an die Biogasanlagen der Anspruch gestellt werden, dass diese im Hinblick auf den Klimaschutz und der Wirtschaftlichkeit so effizient und emissionsneutral wie möglich zu betreiben sind. Um Erkenntnisse und Optimierungsmöglichkeiten darüber zu erlangen, wurde bereits 2006 am Institut für Landtechnik und Tierhaltung der Bayerischen Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL) mit dem wissenschaftlichen Monitoring landwirtschaftlicher Biogasanlagen begonnen. Dabei zeigte sich, dass die erzielbare Biogas- und Methanausbeute maßgeblich von der Zusammensetzung der Einsatzstoffe abhängt sowie durch verschiedene Faktoren der Verfahrens- und Prozesstechnik beeinflusst wird. Ein wesentlicher Parameter zur Beurteilung der Prozesseffizienz sowie des Emissionspotentials aus den offenen Gärrestelägern ist das Restgaspotential. Dieses beschreibt die Menge an Biogas bzw. Methan, welche nach dem Übertritt des Fermenterinhalt in das Gärrestlager potenziell noch gebildet werden kann (VDI, 2011).

Durch die VDI-Richtlinie 3475 Blatt 4, wird bisher in Deutschland für das Genehmigungsverfahren für die Bewertung zur Emissionsminderung aus Biogasanlagen bzw. Gärrestlagern geregelt sowie ein grober Rahmen für eine Methodik zur Abschätzung dieser Emissionen vorgeschlagen. Zusätzlich wird beim Neubau von Biogasanlagen eine Mindestverweilzeit von 150 Tagen im gasdichten und an eine Gasverwertung angeschlossenen System gefordert. Mit Inkrafttreten des EEG 2012 wurde die Einhaltung dieser Vorgaben auch für die Vergütung bindend und wurde auch so in das EEG 2014 aufgenommen. Zur Bestimmung des Restgaspotentials gibt es bisher jedoch keine exakt standardisierte Messmethode. Auch ist wissenschaftlich in Frage zu stellen, inwiefern mit den dort festgelegten Versuchsbedingungen zur Messung des Emissionspotentials (20 °C) eine realistische Abschätzung der tatsächlich anfallenden Gasmenge möglich ist.

Brisanz bekommt dieses Thema für die Praxis zusätzlich, da Vollzugsbehörden die genannte VDI-Richtlinie 3475-4 als Grundlage für das Genehmigungsverfahren auch bei Erweiterungen verwenden (Ebetseder und Preißler, 2011).

2 Stand des Wissens

Um die Wirkungen von Biogasanlagen hinsichtlich des Klimaschutzes einordnen zu können, postulieren Gioelli et al. (2011) ein Emissionspotential von 19,5 Normkubikmeter Biogas pro Megawatt installierte elektrische Leistung. Nach Liebetrau et al. (2010) ist das Emissionspotential aus offenen Gärrestlagern sehr schwer zu messen und deren Höhe wird durch eine Wechselwirkung von Faktoren wie Substratart, Temperatur, Wetter und Rührintervall beeinflusst. Dabei wurden bei zehn Biogasanlagen Maximalwerte für Methanemissionen im Sommer von 18,5 g CH₄/kWh sowie von 6,4 g CH₄/kWh gemessen, was wiederum den starken Einfluss der Temperatur deutlich macht. Diese Jahreszeitlichen Schwankungen der Methanemissionen aus der Lagerung von flüssigen Düngern weisen auch Rodhe und Nordberg (2011) nach, sehen jedoch auch den Gehalt an Flüchtigen Fettsäuren sowie den Ammoniumgehalt im Wirtschaftsdünger als wesentliche Einflussfaktoren (Rodhe et al., 2009).

In Deutschland wurde hierzu bereits 2009 im Rahmen des Biogas-Messprogramms II unter der Leitung des Thünen Instituts im größeren Maßstab Biogasanlagen hinsichtlich des Restgaspotentials untersucht (FNR, 2009). Dabei zeigte sich, dass mehrstufige Anlagen im Durchschnitt weniger als die Hälfte des Restgaspotentials im Vergleich zu einstufigen Anlagen erreichten. Eine Veröffentlichung von Vogtherr et al. (2007), welche auf Untersuchungen von 34 Biogasanlagen im Rahmen des BMP II im Batchverfahren bei 37 °C und 60 Tagen basiert, weist in Übereinstimmung mit diesem Ergebnissen ein sinkendes Restgaspotential aus, je mehr Gärbehälter vorhanden waren und je länger die Verweilzeit im Prozessverlauf war.

Andere Arbeiten wie Kohlhase et al. (2010) sowie Reinhold et al. (2013), die anhand 17 Biogasanlagen bei drei Temperaturstufen (10 °C, 25 °C und 37 °C) die Einflüsse auf das Restgaspotential getestet haben, sowie Paduch (2007) und Oechsner (2015) legen ebenfalls diesen Zusammenhang nahe, zeigen aber auch Einschränkungen dieser monokausalen Betrachtung. Auch Menardo et al. (2011) zeigen auf, dass mit steigender Verweilzeit das Restgaspotential sinkt, wobei in dieser Arbeit auch für die Parameter Raumbelastung, TS- und oTS-Gehalt in den Gärresten ein signifikanter Einfluss auf die Höhe des Restgaspotential nachgewiesen wurde.

Angelidaki et al. (2006) untersuchten, welchen Einfluss eine Absenkung der Prozesstemperatur auf die relative biologische Aktivität im Fermenter hat. Dabei wurde festgestellt, dass die Methanbildung stärker durch einen Temperaturrückgang gehemmt wird als die Hydrolyse. Am stärksten ist dies bei Biogasanlagen im thermophilen Temperaturbereich ausgeprägt.

Auch Linke et al. (2012) sowie Linke und Muha (2015) haben versucht aus der Differenz zwischen maximaler Methanausbeute und der Methanausbeute aus dem Fermenter bzw. Nachgärer auf das noch vorhandene Restgaspotential im Modellansatz zu schließen. Dabei wurde auch ein Temperaturterm berechnet, der die Temperatur und Füllstandsschwankun-

gen im Endlager berücksichtigen soll. Linke und Muha (2015) postulieren darin, dass mit diesem Modell bei Rindergülle eine Methanfreisetzungsrates aus dem Endlager von 20 l/kg FM nach 60 Tagen berechnet wurde, was in diesem Ansatz 10 % der maximal möglichen Methanausbeute entsprach. Bei der Modellierung für Gärreste aus Rindergülle und Maissilage wird eine Spanne für die benötigte Verweilzeit von 65 bis 125 Tagen angegeben, um 80 % des Methanpotenzials auszuschöpfen. Auch Kube (2013) hat versucht über ein kinetisches Modell den Abbaugrad im Fermenter als Funktion der Aufenthaltszeit vorherzusagen, wobei temperatur- und substratspezifische Wechselwirkungen noch gewisse Ungenauigkeiten hervorrufen. Dies zeigt auf, dass nach wie vor Gärtests zur Beurteilung des Restgaspotentials von Praxis-Biogasanlagen notwendig sind.

Vor diesem Hintergrund ist anzumerken, dass die Angaben in der Literatur gezeigt haben, dass nicht alle diese Untersuchungen mit einer einheitlichen Methode durchgeführt wurden. Gerade Holmgren et al. (2015) geben in ihrer Arbeit einen Überblick über die Höhe der Emission aus Biogasanlagen in verschiedenen Staaten Europas und weisen daher national wie international einen großen Unterschied in den verwendeten Messmethoden nach. Dies erweist sich hinsichtlich der Vergleichbarkeit bei unterschiedlichen Versuchstemperaturen, Versuchsdauern sowie Rahmenbedingungen als kritisch. In diesem Zusammenhang führten bereits Reinhold et al. (2013) eine Methodendiskussion zur Bestimmung des Restgaspotentials. Dabei wurde die starke Abhängigkeit des Restgaspotentials zu verfahrenstechnischen Parametern insbesondere von der Temperatur im Gärrestlager bestätigt.

Trotz der Vorgaben in der VDI 3475-Blatt 4 gibt es bis heute keine standardisierte Methode zur Messung des Restgaspotentials. Angaben zur Genauigkeit und Variation der Messung und der Bedeutung einzelner Faktoren fehlen weitgehend.

3 Zielsetzung

Ziel dieses Projektes ist es zum einen den Zusammenhang zwischen Verweilzeit und Restgaspotential anhand eines umfangreichen Datensatzes aus dem Monitoring der bayerischen Pilotanlagen und bayerischer Anlagen aus dem BMP II zu überprüfen sowie mögliche weitere Einflussgrößen zu identifizieren. Des Weiteren sollen auf dieser Basis auch Rückschlüsse und Ansatzmöglichkeiten für eine in wissenschaftlichen Arbeitsgruppen abgestimmte einheitliche Messmethode abgeleitet bzw. erarbeitet werden.

4 Material und Methoden

Den Ergebnissen liegen Daten aus 102 Bestimmungen des Restgaspotentials zugrunde. Diese stammen zum einem von bayerischen Biogasanlagen aus Untersuchungen im Rahmen des BMP II und zum anderen aus dem seit 2006 durchgeführten Biogas-Monitoring der LfL (Effenberger et al., 2010; Lehner et al., 2010; Bachmaier et al. 2011; Ebertseder et al., 2012 b; Kissel et al. 2015 und Streicher et al. 2015).

4.1 Restgaspotentialbestimmung

Die Messungen im Labor stützen sich auf die Vorgaben der VDI-Richtlinie 3475 Blatt 4 (VDI, 2010), da diese die Grundlage für den Genehmigungsprozess in der Praxis darstellt sowie durch die Vorgaben in den Ringversuchen, welche in den Laboren als Standardmethode angesehen wird. Dies wird auch immer unter der Berücksichtigung der VDI-Richtlinie 4630 (VDI, 2006) nach den dort aufgeführte Versuchsgrundlagen bei Gärtests im Batch-Verfahren durchgeführt. Dabei wird der Gärrest aus dem Überlauf der letzten Fermenterstufe bei 37 °C (Effizienzparameter) und 20 °C (Emissionsparameter) bis 60 Tage vergoren. Der VDI liegt die Annahme zu Grunde, dass 20 °C die mittlere Temperatur eines unbeheizten offenen Gärrestlagers übers Jahr widerspiegelt.

Beim Ansatz wurde der Gärrest ohne Zugabe von Impfmateriale oder sonstigen Substraten in Glasflaschen mit zwei Liter Fassungsvermögen gegeben, wobei pro Biogasanlage und Versuchstemperatur (20 °C und 37 °C) drei Wiederholungen angesetzt wurden. Die Glasflaschen wurden in Wärmeschränken inkubiert und mit Deckeln verschlossen, an denen ein Schlauchsystem zur Gaserfassung befestigt ist (Abbildung 1). Die gebildete Gasmenge jeder Wiederholung wurde mittels Gaszähler erfasst. Zur Darstellung der Gasproduktionsverläufe wurde jede Stunde der Zählerstand per Datenlogger dokumentiert. Nach dem Zähler wurde das Biogas in einem Gasbeutel zwischengespeichert und nach jeweils 1,5 Liter Gasmenge von einem Gasanalysegerät der Firma AWITE[®] auf deren Zusammensetzung untersucht. Da die absolut produzierte Biogasmenge einer Flasche oft zu gering für eine ausreichende Anzahl an Gasanalysen war, wurde das Mischgas aus den drei Wiederholungen der jeweiligen Anlage analysiert. Dabei war zu beachten, dass das Luftgemisch im Kopfraum zur Verfälschung der ersten Messungen führte. Dies machte eine Korrektur bei der Auswertung der Ergebnisse nötig. Die Details des technischen Aufbaus der Batchversuchsanlage am Institut für Landtechnik und Tierhaltung der LfL sind bei Kaiser (2007) beschrieben. Im Unterschied zu dessen Beschreibung werden inzwischen stündlich kumulierte Daten aufgezeichnet und ausgewertet sowie prinzipiell nur drei Parallelen für eine Versuchsvariante angesetzt.



Abbildung 1: Versuchsaufbau zur Messung des Restgaspotentials an der LfL und Innenansicht des Wärmeschanks mit den gefüllten Glasfermentern.

4.2 Auswertung und Laboranalysen

Alle Angaben zu Gasausbeuten im vorliegenden Bericht beziehen sich auf Normvolumen. Die Normierung ist erforderlich, da sich das Volumen von Gasen in Abhängigkeit von Druck und Temperatur verändert. Mit zunehmender Gastemperatur vergrößert sich das Volumen bei konstantem Druck. Je größer der Druck, desto kleiner ist das Gasvolumen bei konstanter Temperatur. Um Volumenangaben (Biogaserträge) vergleichen zu können, werden die Angaben deshalb auf den Normzustand (Normtemperatur T: 273,15 K (0 °C); Normdruck p: 1013,25 hPa (mbar); trockenes Gas: Gasfeuchte 0 %) bezogen. Dabei wurde zunächst die Berechnung des Normvolumens des in den einzelnen Zeitabschnitten entwickelten Biogases durchgeführt. Parallel wurde der Wasserdampfgehalt des Biogases herausgerechnet und das trockene Gasvolumen ermittelt.

Stellt das Gasvolumen in der Gärtestapparatur zu Beginn des Gärtests (Kopfraum) eine relevante Größe im Vergleich zum gebildeten Biogasvolumen dar, müssen die gemessenen Konzentrationen der Biogaskomponenten einer Kopfraumkorrektur unterzogen werden, da das zu Beginn des Gärtests im Kopfraum vorliegende Gas- / Luftgemisch eine Verdünnung der Biogaskomponenten bewirkt (VDI 2006).

Alle Ergebnisse zur Methanausbeute bzw. Restgaspotentialen werden in Normliter Methanvolumen bzw. Biogas pro Kilogramm Frischmasse bzw. als Vergleich pro Kilogramm organische Trockenmasse angegeben. Jeweils vor dem Versuchsansatz sowie und nach Versuchende wurden die Gärreste nasschemisch untersucht. Die bei der Analyse der Proben angewandten Methoden sind in Tabelle 1 aufgelistet und kurz beschrieben.

Tabelle 1: Übersicht der Methoden zur Analyse der Gärreste im Labor

Parameter	Methode	Enthalten in	Kurze Beschreibung
TS	DIN 12880	Handbuch der Boden-	Trocknung bei (105±2)°C
	DIN 38414-S2	untersuchung; DEWAS*	bis zur Gewichtskonstanz,
oTM	DIN 12879	Handbuch der Boden-	Veraschung der TS bei
	DIN 38414-S3	untersuchung; DEWAS	550°C, TS – Asche = oTM
pH	DIN 38404-C5	DEWAS	Elektrode
	DIN 12176		
TAC	DIN 38409 H7	DEWAS	Titration
FOS/TAC		Nordmann (1977)	Titration
FFS-GC	Hausmethode, verändert nach Methode der SCHMACK BIOGAS AG		Gas-Chromatograph
FFS	DIN 38414-19	DEWAS	Titration
NH ₄ ⁺	verändert nach DIN 38406 E5-2	DEWAS	Wasserdampfdestillation, anschließende Titration
ADL	VDLUFA 6.5.3	VDLUFA M.Band III	

*) Deutsche Einheitsverfahren zur Wasser-, Abwasser- und Schlammuntersuchung

Die statistische Auswertung erfolgte mit der Software The Unscrambler X[®] (CAMO Software) sowie mit SAS 9.3 (SAS Institute). Als Signifikanzniveau wurde $p \leq 5\%$ gewählt.

Die Daten wurden im ersten Schritt mit Hilfe des Kolmogorov-Smirnov-Tests bei einem Signifikanzniveau von $p \leq 5\%$ auf Normalverteilung getestet. Des Weiteren wurden diese auf Plausibilität überprüft, in dem der Rahmen der zu verwendenden Daten auf 5 % und 95 % der Streuung begrenzt wurden.

Um die Zusammenhänge sowie die Erklärungsanteile für die Höhe des Restgaspotentials innerhalb und zwischen den Prozessparametern zu untersuchen, wurde neben der deskriptiven Statistik (Einzelfaktoranalyse) auch eine Hauptkomponentenanalyse im Englischen *Principal Component Analysis* (PCA) durchgeführt. Ziel dabei ist die Datenreduktion der miteinander verbundenen Wirkung der Variablen, unter Beibehaltung der maximal möglichen Variation. Die Hauptkomponenten (PC) besitzen keine Einheit und sind nicht mit einer anderen PC korreliert (orthogonal) sowie rein mathematisch gewertet eine Linearkombination der ursprünglichen Merkmal bzw. Variablen. Dabei setzen sich diese aus einer linearen Summe der unterschiedlich gewichteten Originalvariablen zusammen (Kessler, 2007; Dandikas et al., 2015). Jeder dieser Eigenwerte und der dazugehörige Eigenvektor bildet die Hauptkomponente. Der Eigenwert bestimmt dabei, wie viel Anteil dieser Faktor (PC) an der Gesamtvarianz der Ursprungsdaten hat. Dies bedeutet je höher der Eigenwert ist, desto mehr Gesamtvarianz wird erklärt und desto wichtiger ist der Faktor um die Originaldaten zu beschreiben (Kessler, 2007; Næs et al., 2002).

Darüber hinaus wurde eine multiple lineare Regression (MLR) durchgeführt, um die Möglichkeit zu testen, ein Modell zur Vorhersage der Höhe des Restgaspotentials zu entwickeln. Die Parameter, Bestimmtheitsmaß (R^2) (Gleichung 1), der mittlere quadratische Fehler (RMSE) (Gleichung 2) und der Variationskoeffizient der RMSE (CVRMSE) (Gleichung 3) wurden für die Auswertung und zur Überprüfung der Aussagekraft sowie der Robustheit des Modells verwendet.

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y}_i)^2}$$

Gleichung 1

y_i : gemessener Referenzwert

\hat{y}_i : vorhergesagter Wert

\bar{y}_i : Mittelwert der y-Werte

n: Anzahl der Beobachtungswerte

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - y_i)^2}{n}}$$

Gleichung 2

y_i : gemessener Referenzwert

\hat{y}_i : vorhergesagter Wert

n: Anzahl der Beobachtungswerte

$$CVRMSE = \frac{RMSE}{\bar{y}}$$

Gleichung 3

\bar{y}_i : Mittelwert der y-Werte

5 Ergebnisse und Diskussion

5.1 Untersuchung der Einflussfaktoren auf die Höhe des Restgaspotentials

Seit 2006 wurden an der LfL jedes Jahr die Gärreste von Biogasanlagen hinsichtlich des Restgaspotentials untersucht. Dieser Datensatz umfasst nunmehr 102 Untersuchungen von 45 unterschiedlichen Biogasanlagen, wobei einzelne Anlagen über mehrere Jahre aufgrund deren baulichen und prozesstechnischen Veränderungen getestet wurden. Dabei variierte die Raumbelastung der untersuchten Anlagen von 0,7 bis 5,9 kg oTS (m³ d)⁻¹ (Mittelwert 2,3 kg oTS (m³ d)⁻¹). Die rechnerisch ermittelten hydraulischen Verweilzeiten lagen zwischen 8,2 und 218 Tagen (Mittelwert 116 Tage). Durch diese sehr breite Datenbasis war somit eine erste Grundlage zur Identifizierung und Beurteilung der Einflussparameter gegeben.

5.1.1 Einfluss der Verweilzeit auf die Höhe des Restgaspotentials

Im Ersten Schritt wurde der in vielen Arbeiten aufgestellten Hypothese nachgegangen, ob die Verweilzeit die Höhe des Restgaspotentials ausreichend erklärt. Dabei zeigte die einfache lineare Regression für beide Vergärungstemperaturen nur einen schwachen Zusammenhang (Abbildung 2 und Tabelle 3). Neben Biogasanlagen, welche die These stützen, dass kurze Verweilzeiten zu höheren Restgaspotentials führen, sind auch eine große Anzahl an Anlagen im Datensatz, die trotz kurzer Verweilzeiten von unter 80 Tagen ähnlich geringe Restgaspotentials aufweisen. Zusätzlich gibt es Biogasanlagen, die mit einer Verweilzeit von weit über 100 Tagen, ein noch sehr hohes Restgaspotential erzielten. Der gesamte vorliegende Datensatz zeigt somit nur eine geringe Abhängigkeit zwischen Gesamtverweilzeit und Restgaspotential (Abbildung 2). Als Konsequenz für die Praxis würde damit ein Großteil der untersuchten Anlagen in Bezug auf die Bewertung der Abbauleistung benachteiligt, wenn diese allein an einer Mindestverweilzeit im gasführenden System bemessen würden.

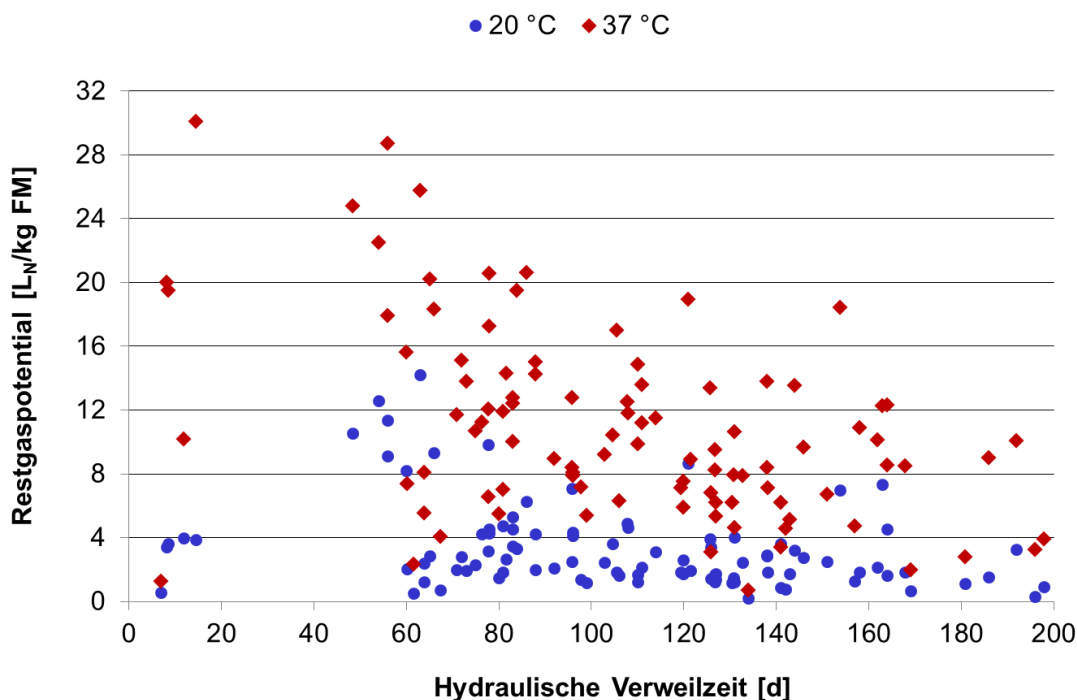


Abbildung 2: Zusammenhang zwischen der hydraulischen Verweilzeit und dem Restgaspotential des Gärrestes bei 20 bzw. 37 °C für 88 Biogasanlagen.

5.1.2 Einfluss ausgewählter Prozessparameter auf die Höhe des Restgaspotentials

Da der statistische Zusammenhang zwischen der Verweilzeit und dem Restgaspotential als alleiniger Erklärungsansatz zu schwach war, wurden weitere mögliche Einflussfaktoren wie die Konzentration flüchtiger Fettsäuren (FFS) in den Gärresten, die Raumbelastung (RB), der Anteil an organischer Trockensubstanz (oTS) sowie an Trockensubstanz im Gärrest und der Wirtschaftsdünger- und Gülleanteil am Einsatzstoffmix in die statistische Auswertung mit aufgenommen und auf mögliche Zusammenhänge überprüft.

Zu Beginn wurde der Datensatz auf Repräsentativität sowie Plausibilität getestet. Dabei wurde für die Werte der Flüchtigen-Fettsäuren im Gärrest die Hypothese aufgestellt, dass nach Effenberger und Lebuhn (2008) bei Gesamtsäure-Werten kleiner 4000 mg/kg FM im Fermenter sowie kleiner 2000 mg/kg FM im Nachgärer von einem stabilen, nicht gestörten Biogasprozess auszugehen ist. Als Untergrenze wurde unter Berücksichtigung der Bestimmungsgrenzen im Labor 300 mg/kg FM definiert. Werte des Datensatzes welche außerhalb diese Bereiches lagen, wurden nicht in die weitere Auswertung mit aufgenommen, um mögliche Scheinkorrelationen zu vermeiden. Dies verkleinerte den Datensatz auf 96 Stichproben, welche in die weiteren Analysen gingen.

Als nächster Schritt wurden die Daten der einzelnen Parameter mit Hilfe des Kolmogorov-Smirnov-Tests bei einem Signifikanzniveau von $p \leq 5\%$ auf Normalverteilung getestet.

Dabei zeigte sich, dass keiner dieser ausgewählten Einflussparameter in den Daten Normalverteilt ist. Ausgenommen davon sind die Ergebnisse des Restgaspotentials bei beiden Versuchstemperaturen (20 °C und 37 °C) als die abhängigen Variablen, was eine Grundvoraussetzung für eine weitere statistische Auswertung war.

Als nächster Schritt wurde auf Basis der 96 Untersuchungen die Einzelkomponentenanalyse (Korrelationskoeffizienten) der ausgewählten Prozessparameter als Einflussfaktoren auf die Höhe des Restgaspotentials berechnet (Tabelle 2). Dabei bestätigt auch der erweiterte Datensatz die Ergebnisse vorangegangener Untersuchungen, wonach die hydraulische Verweilzeit nur sehr gering mit dem Restgaspotential korreliert (-0,498) (Ebertseder et al., 2012 a).

Des Weiteren erklärt keiner dieser gewählten Anlagenparameter alleine ausreichend die Variation in der Höhe des Restgaspotentials (Tabelle 3). Diese Ergebnisse werden anhand des Bestimmtheitsmaßes für alle gewählten Parameter bei beiden Versuchstemperaturen (20 °C und 37 °C) in Tabelle 3 zusammengefasst dargestellt.

Tabelle 2: Korrelationsmatrix der zu Beginn ausgewählten Prozessparameter zur Bestimmung des Einflusses auf die Höhe des Restgaspotentials (37 °C) (n=96)

	FFS	HVZ	RB	TS	oTS	WD	G	RGP _{37 °C}
FFS	1,000							
HVZ	-0,268	1,000						
RB	0,292	-0,683	1,000					
TS	0,229	-0,148	0,346	1,000				
oTS	0,274	-0,175	0,410	0,982	1,000			
WD	-0,026	-0,097	-0,338	-0,199	-0,240	1,000		
G	0,061	-0,203	-0,222	-0,403	-0,413	0,867	1,000	
RGP _{37 °C}	0,549	-0,498	0,671	0,494	0,587	-0,086	-0,031	1,000

FFS: Flüchtige Fettsäuren im Gärrest; HVZ: Hydraulische Verweilzeit; RB: Raumbelastung; WD: Wirtschaftsdüngeranteil im Einsatzstoffmix (Gülle und Mist); G: Gülleanteil am Einsatzstoffmix; RGP 37 °C: Restgaspotential mit der Versuchstemperatur von 37 °C

Tabelle 3: Prüfung des Einflusses der gewählten Parameter auf die Höhe des Restgaspotentials bei einer Versuchstemperatur von 20 °C und 37 °C in der Einzelfaktoranalyse.

n=96	Bestimmtheitsmaß, R ²	
	20 °C	37 °C
Raumbelastung (RB)	0.40	0.44
organische Trockensubstanz (oTS)	0.39	0.33
Flüchtige Fettsäuren (FFS)	0.26	0.31
Verweilzeit (HVZ)	0.19	0.24
Trockensubstanz (TS)	0.33	0.24
Wirtschaftsdüngeranteil (WD)	0.01	0.01
Gülleanteil (G)	0.01	0.01

5.1.3 Erklärungsanteil der identifizierten Einflussparameter an der Gesamtvariation der Daten des Restgaspotentials

Um nun zu prüfen, ob eine Kombination aus mehreren Parametern für eine Korrelation in Frage kommt, wurden diese mit einer multiplen linearen Regressionsanalyse (Vorwärtsverfahren) verrechnet. Hierbei wurde der Trockensubstanzgehalt (TS) aus der Auswertung genommen, da die Korrelation mit dem Gehalt der organischen Trockensubstanz (oTS) sehr hoch ist (Korrelationskoeffizient: 0,982) und die oTS im Gegensatz zu dem TS-Gehalt ein höheres Bestimmtheitsmaß im Zusammenhang mit dem Restgaspotential aufweist (Tabelle 2 und Tabelle 3).

Dabei zeigte sich, dass das Modell nur die FFS-Konzentration im Gärrest, die Raumbelastung, den Anteil an oTS im Gärrest sowie den Gülleanteil im Einsatzstoffmix als signifikante Parameter für die Erklärung des Restgaspotentials nutzte ($p > 0,05$).

Da der Signifikanzindikator nichts über die Wertigkeit des Einflusses der vier Parameter aussagt, wurde eine Hauptkomponentenanalyse durchgeführt. Eine solche Analyse gibt Auskunft darüber, wie stark die einzelnen Parameter untereinander korrelieren und wie hoch der Erklärungsanteil an der Gesamtvarianz durch die einzelnen Parameter für den Datensatz ist. Hierbei liegt den Hauptkomponenten keine Einheit zu Grunde, sondern nur die Höhe und Wertigkeit der Erklärungsparameter für das Modell.

Da die Messwerte der Testparameter, vor allem der Flüchtigen-Fettsäuren (Mittelwert: 523 mg/kg; Standardabweichung: 777 mg/kg), nicht gleich verteilt sind und unterschiedliche Standardabweichungen aufweisen, wurde eine Standardisierung durchgeführt, um diese Messwerte in einer multivariaten Datenanalyse vergleichen zu können. Dabei wurden die Differenzen der Messwerte von ihrem Mittelwert (arithmetisches Mittel) in Einheiten ihrer Standardabweichung umgewandelt, was rechnerisch eine Division dieser Differenzen durch die Standardabweichung bedeutet.

In der üblichen zweidimensionalen graphischen Darstellung der Ergebnisse einer Hauptkomponentenanalyse, werden die jeweils betrachteten Hauptkomponenten (principal component, PC) in Form der x-Achse und der y-Achse dargestellt (Abbildung 3 und Abbildung 4). Die Hauptkomponenten fließen entsprechend ihres Anteils an der Gesamtvarianz in das Modell ein. Alle Parameter, deren Werte zwischen den beiden eingezeichneten Ellipsen/Kreise liegen, haben den größten relevanten Einfluss auf die Gesamtvarianz (Bestimmtheitsmaß zwischen 50 und 100 %) und sind stark mit beiden jeweils dargestellten Hauptkomponenten korreliert. Zusätzlich sind die in der gleichen Richtung angeordneten Variablen positiv miteinander korreliert, während Variablen, die gegenüberliegend angeordnet werden negativ korreliert sind. Dies wird anhand ihrer Korrelationskoeffizienten zu den jeweils dargestellten Hauptkomponenten bestimmt, so dass deren Wertebereich zwischen -1 und 1 liegt (Kessler, 2007).

So liegt der Erklärungsanteil der Parameter in Summe an der Gesamtvariation des standardisierten Datensatzes zu 42 % auf PC1 und mit 26 % auf PC2 (Abbildung 3) sowie zu 17 % auf PC3 (nicht dargestellt).

Des Weiteren zeigt diese Hauptkomponentenanalyse, wie viele Erklärungsanteile die einzelnen Parameter an der Gesamtvariation des Datensatzes haben (Abbildung 3). Dabei ist die Raumbelastung stark mit den beiden ersten Hauptkomponenten korreliert und erklärt 40 % (PC 1: 70 von 42 = 29 %; PC 2: 42 von 26 = 11 %) der Gesamtvariation. Des Weiteren zeigt der hohe Korrelationskoeffizient der hydraulischen Verweilzeit, oTS und des Gülleanteils zur PC1 und 2, dass die Variation der Messdaten von diesen Parametern abhängt. Wobei die organische Trockensubstanz und die Verweilzeit nur 35 % zur Variation beitragen und sich darin unterscheiden, dass oTS stärker mit der Hauptkomponente 1 (PC 1: 82 von 42 = 34 %; PC 2: 5 von 26 = 1 %) und die Verweilzeit stärker mit der Hauptkomponente 2 (PC 1: 32 von 42 = 13 %; PC 2: 78 von 26 = 20 %) korreliert. Der Gülleanteil am Einsatzstoffmix bestimmt mit 42 % die Gesamtvariation im Datensatz mit, was sich mit 25 % und 17 % auf die beiden ersten Hauptkomponenten verteilt. Dies erklärt warum die multiple lineare Regressionsanalyse die Raumbelastung, den Anteil an oTS im Gärrest sowie den Gülleanteil im Einsatzstoffmix als signifikante Parameter identifizierte. Der Gehalt an Flüchtigen Fettsäuren liefert hingegen in der Hauptkomponentenanalyse nur den geringsten Erklärungsanteil für die Variation der Daten und war auch nicht signifikant mit den beiden ersten Hauptkomponenten korreliert, was auch die Lage in der Grafik verdeutlicht (Abbildung 3 und Abbildung 4). Daher wurden zur Plausibilisierung alle Werte der Flüchtigen Fettsäuren unter 300 mg/kg aus der Auswertung genommen und die

Hauptkomponentenanalyse erneut gerechnet. Dabei erhöhte sich der Erklärungsanteil der Parameter an der Gesamtvariation der Daten durch die beiden ersten Hauptkomponenten (PC 1: 51 % und PC 2: 24) (Abbildung 4). Die Flüchtigen Fettsäuren waren jedoch weiterhin nicht signifikant in der Korrelation zu den beiden Hauptkomponenten (Abbildung 4). Dies ist auch der Tatsache geschuldet, dass die Gehalte nicht normalverteilt waren und der größte Anteil der Stichproben in einem Konzentrationsbereich lag, in welchen keine Prozessstörung zu erwarten war (Schieder et al., 2010; Effenberger und Lebuhn, 2008). Aus diesem Grund erweisen sich die Flüchtigen Fettsäuren als Erklärungsparameter für die Höhe des Restgaspotentials bezogen auf diesen Datensatz als ungeeignet.

Die Hauptkomponentenanalyse mit den Daten der Versuche bei 20 °C kommt für die Wertigkeit der Einflussparameter auf ein ähnliches Ergebnis.

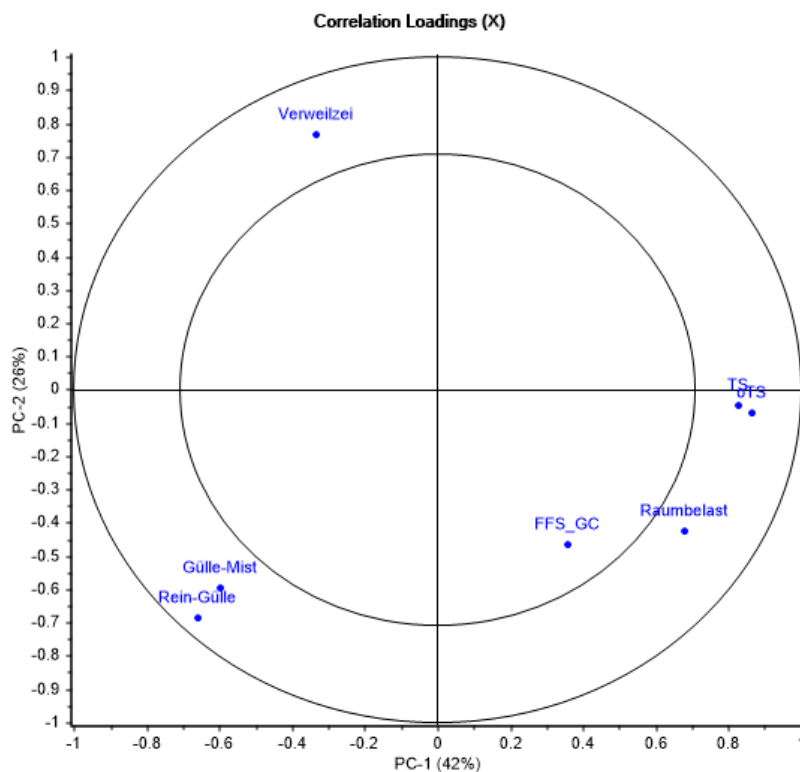


Abbildung 3: Korrelationskoeffizienten der Einflussparameter auf das Restgaspotential bei 37 °C nach statistischer Standardisierung der Daten zu den Hauptkomponenten (PC) 1 und 2. Der Raum zwischen den Kreisen zeigt ein Bestimmtheitsmaß von mehr als 50 % zu den beiden Hauptkomponenten.

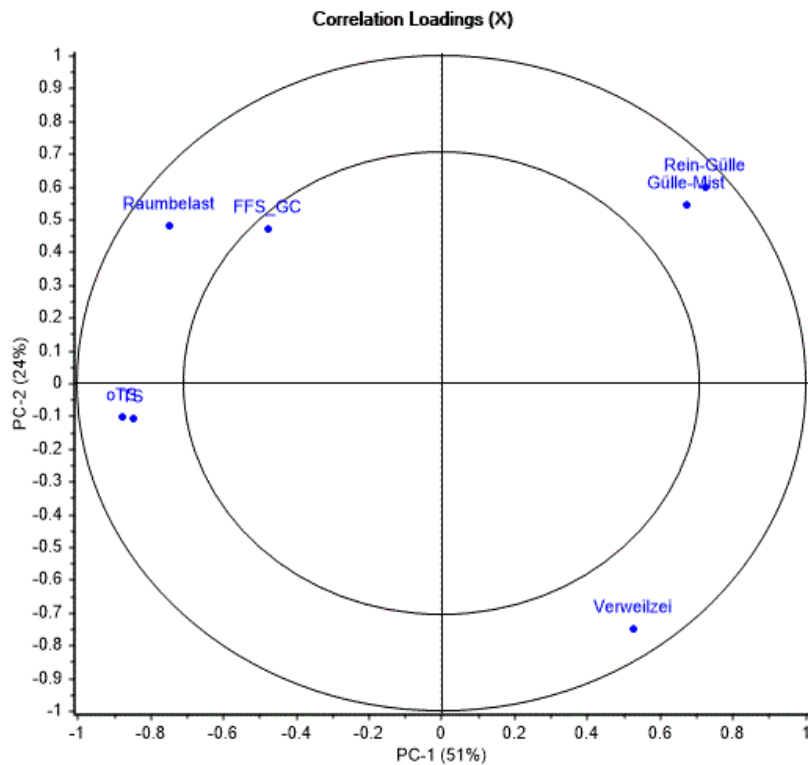


Abbildung 4: Korrelationskoeffizienten der Einflussparameter auf das Restgaspotential bei 37 °C nach statistischer Standardisierung der Daten zu den Hauptkomponenten (PC) 1 und 2. Zur Plausibilisierung wurden alle Werte der Flüchtigen Fettsäuren unter 300 mg/kg aus der Auswertung genommen. Der Raum zwischen den Kreisen zeigt ein Bestimmtheitsmaß von mehr als 50 % zu den beiden Hauptkomponenten.

Ein Vergleich der Ergebnisse der Hauptkomponentenanalyse (PCA) mit der zuvor durchgeführten multiplen linearen Regressionsanalyse lassen somit die Flüchtigen Fettsäuren als einen geeigneten Einflussparameter zur Erklärung des Restgaspotentials mit diesem Datensatz ausscheiden. Eine erneute Verrechnung in einem multiplen linearen Regressionsmodell identifizierte die Raumbelastung, die organische Trockensubstanz und den Gülleanteil im Einsatzstoffmix als signifikante Erklärungsparameter für das Restgaspotential. Wobei damit 63 % der Variation im Restgaspotential erklärt werden können, in dem die Raumbelastung 44,3 %, die organische Trockensubstanz 11,9 % und der Gülleanteil am Einsatzstoffmix 6,9 % des Erklärungsanteils in das Modell einbrachten (Formel: Restgaspotential $37\text{ }^{\circ}\text{C} = -5,79 + 2,915 \text{ Raumbelastung} + 1,279 \text{ oTS} + 0,070 \text{ Gülleanteil}$). Dies ist in der statistischen Betrachtung nicht ausreichend für ein solides und belastbares Modell, was sich auch im sehr hohen mittleren quadratischen Fehler (RMSE) von 4,34 sowie einem Variationskoeffizienten des mittleren quadratischen Fehlers (CVRMSE) von 42 % zeigt. Jedoch wird die Hypothese widerlegt, wonach das Restgaspotential alleine durch die hydraulische Verweilzeit bestimmt wird.

5.2 Untersuchung der Reduktionsmöglichkeit des Restgaspotentials durch mechanische Separation

Einige Biogasanalgenbetreiber sind in den letzten Jahren wieder verstärkt dazu übergegangen, aus Gründen der Prozessstabilisierung (Rezirkulation der flüssigen Phase) sowie um die Lagerkapazität zu erhöhen, Separationstechniken an ihren Anlagen zu installieren (Ebertseder et al. 2015). Im Zuge des Projektes zu Erfassung der Einflussparameter auf die Höhe des Restgaspotentials wurden in einem darin integrierten Versuch die Reduktionsmöglichkeiten mechanischer Separationstechniken auf das Restgaspotential untersucht. Dabei wurden zwei Gärreste von zwei unterschiedlichen Biogasanlagen vor und nach der mechanischen Aufbereitung mit zwei baugleichen Pressschneckenseparatoren untersucht.

Abbildung 5 zeigt die Ergebnisse der Restgaspotentialuntersuchung des Ansatzes mit 20 °C als Versuchstemperatur der Gärreste vor („Roh“) und nach der Separation („Flüssige Phase“). Dabei wird deutlich, dass die Flüssige Phase des Gärrests der Anlage 16 um 22 % weniger Restgaspotential produzierte als vor der Separation (Differenz von 0,7 L_N/kg FM). Im Ansatz mit dem Gärrest der Anlage 15 wurde 36 % des Restgaspotentials durch die mechanische Aufbereitung reduziert (Differenz von 5,1 L_N/kg FM).

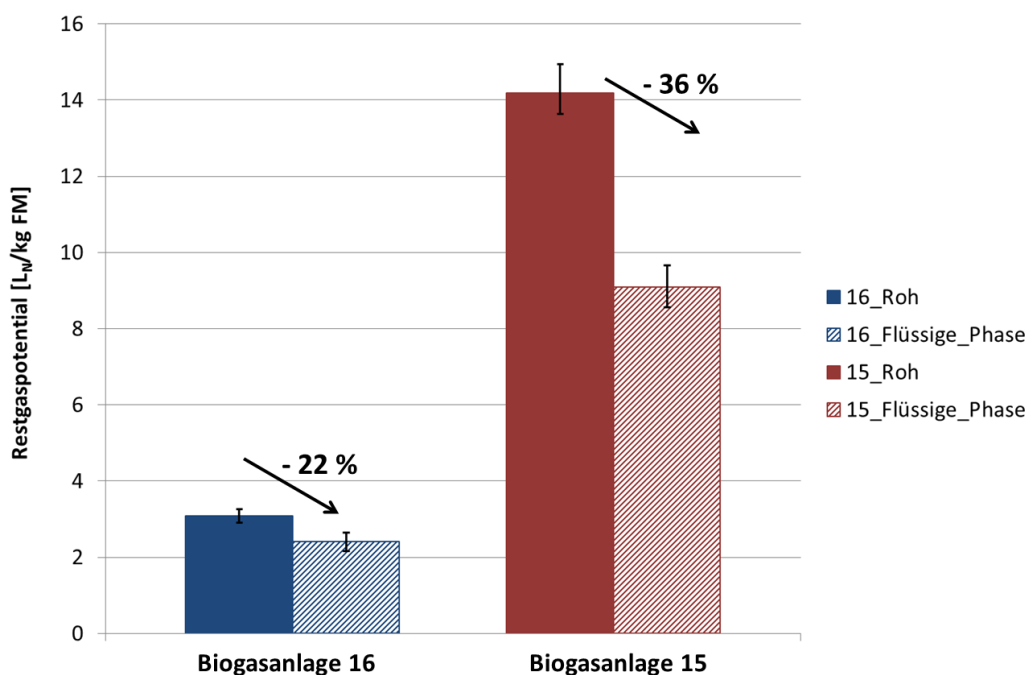


Abbildung 5: Darstellung der Reduktion des Restgaspotential nach mechanische Separation aus Gärresten von zwei unterschiedlichen Biogasanlagen jeweils „Roh“-Wert für den Gärrest vor und „Flüssige_Phase“ nach der Separation, bei der Versuchstemperatur von 20 °C.

Betrachtet man die Ergebnisse des Versuchs mit 37 °C als Inkubationstemperatur, so zeigt sich, dass bei insgesamt höheren Restgaspotentialwerten auch die relative Reduktion je Ausgangspotential höher war als nach dem Ansatz mit 20 °C für beide Gärreste aus den zwei untersuchten Biogasanlagen (Abbildung 6). Diese Reduktion der Restgaswerte nach der Separation stellte sich für die Biogasanlage 16 mit 50 % (Differenz von 5,8 L_N/kg FM) und für Biogasanlage 15 mit 38 % (Differenz von 9,7 L_N/kg FM) im Vergleich zum nicht separierten Ausgangsgärrest dar.

Da in dieser Arbeit nur anhand zweier Gärreste aus zwei unterschiedlichen Biogasanlagen die Reduktionsmöglichkeiten des Restgaspotentials durch mechanische Aufbereitung mit Hilfe von marktgängigen Pressschneckenseparatoren bewertet werden konnte, sind die Ergebnisse nur als erster Trend anzusehen. Diese zeigen jedoch eine deutliche Verringerung des Restgaspotentials vor allem bewertet nach dem Effizienzparameter.

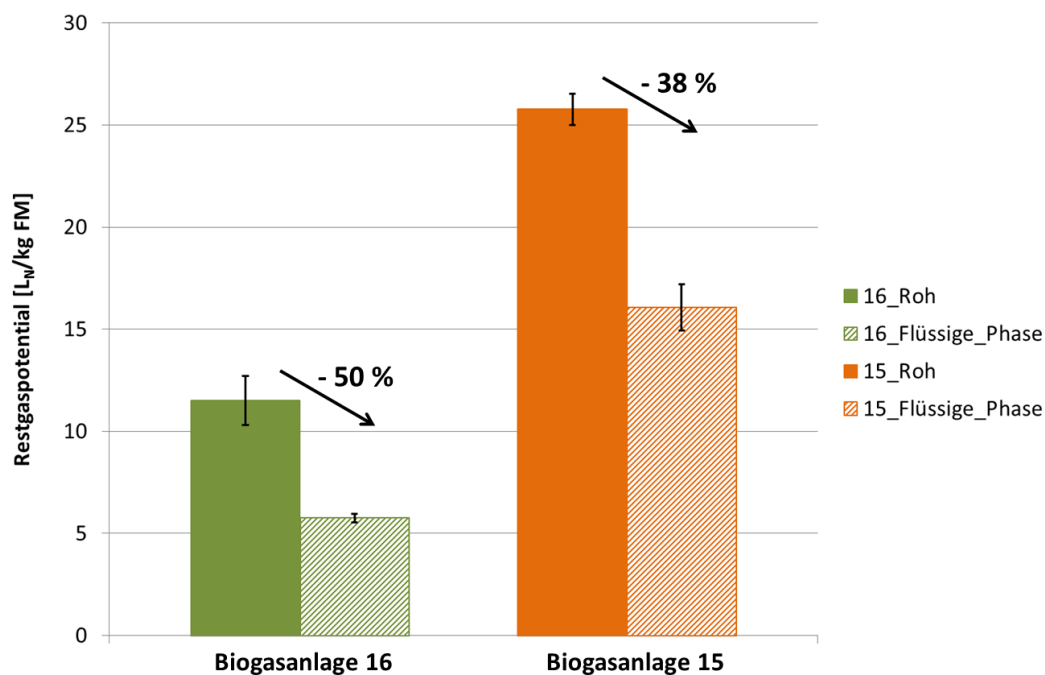


Abbildung 6: Darstellung der Reduktion des Restgaspotential nach mechanische Separation aus Gärresten von zwei unterschiedlichen Biogasanlagen jeweils „Roh“-Wert für den Gärrest vor und „Flüssige_Phase“ nach der Separation, bei der Versuchstemperatur von 37 °C.

5.3 Untersuchung des Einflusses der Versuchsmethode auf das Restgaspotential

Aufgrund des Fehlens einer standardisierten Messmethode und aus Erfahrungen der Restgasversuche der letzten Jahre die an der LfL durchgeführt wurden, zeigten sich immer wieder Diskrepanzen zu anderen Untersuchungen sowie starke Einflüsse hinsichtlich der Betriebstemperatur der Biogasanlagen (Ebertseder et al., 2012 b; Bachmaier et al., 2011; Effenberger et al., 2010; Lehner et al., 2010; FNR, 2009). Auch die Diskussionen und Hinweise innerhalb wissenschaftlicher Arbeitsgruppen über ähnliche Erfahrungen ließen den Bedarf zur Untersuchung des Einflusses der Versuchsmethode auf das Restgaspotential erkennen (Reinhold et al., 2013). Dieses wurden zum Anlass genommen, die Restgaspotentialuntersuchung in den Laboringversuch der Abteilung Qualitätssicherung und Untersuchungswesen (AQU) an der LfL aufzunehmen, um die Streubreite der Versuchsmethoden in den Laboren einschätzen zu können (Henkelmann et al., 2014). Die vier bisher mit dem Parameter Restgaspotential durchgeführten Ringversuche, wiesen über die Jahre und nach den unterschiedlich definierten Abbruchzeitpunkten sehr hohe Vergleichskoeffizienten (Messergebnisunschärfe) auf (Abbildung 7). Hierzu muss jedoch angemerkt werden, dass keine Vorgaben zur Methode im Ringversuch eingefordert wurden, da die Erfassung der Variation der verwendeten Methoden über die einzelnen Labore das Ziel war. Diese zeigte, dass es eine breite Streuung hinsichtlich Vergärungstemperatur, Versuchsdauer, Fermentergröße und Probenansatz über die Labore gibt, was sich mit Erfahrungen anderer Arbeiten aus der Literatur decken (Holmgren et al. 2015).

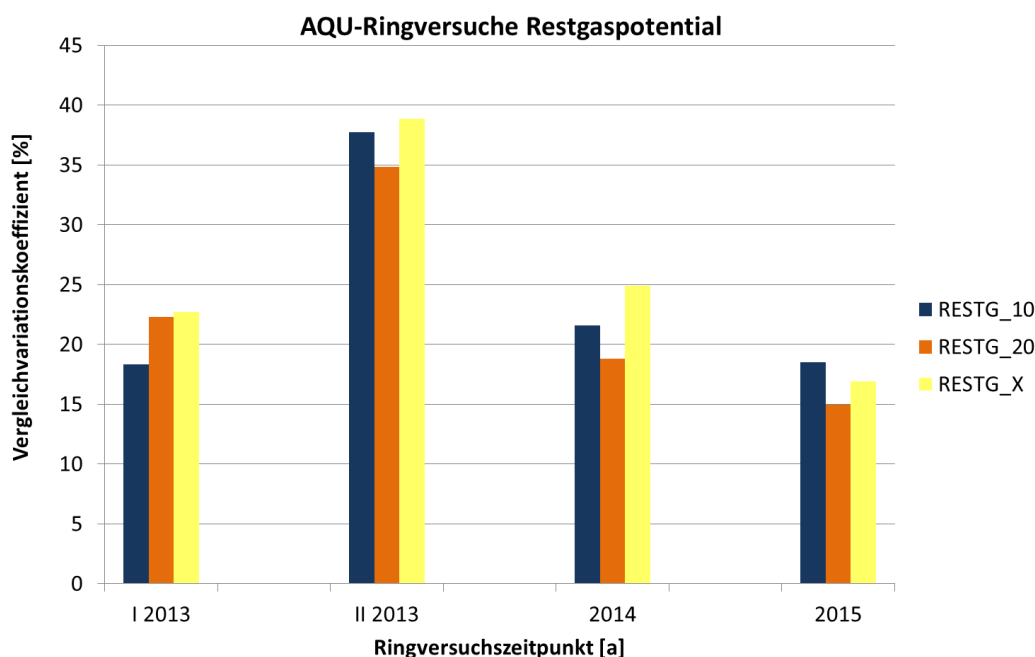


Abbildung 7: Darstellung der Vergleichskoeffizienten der vier Restgaspotential-Ringversuche des AQU an der LfL, jeweils der nach 10 Tagen, 20 Tagen und nach Abbruchkriterium erzielten Gasmenge über alle teilgenommenen Labore.

Um dies mit einer standardisierten Methode in Zukunft auszuschließen, wurde eine Arbeitsgruppe „Ringversuch Biogas“ bestehend aus nationalen Wissenschaftlern aus verschiedenen Instituten durch das KTBL gegründet und jährliche Treffen organisiert. Dabei wurden die aus den Erkenntnissen der AQU-Ringversuche sowie der einzelnen Institute identifizierten Parameter für die Methode mit den bereits vorhandenen Daten abgeprüft sowie zwei gesonderte Ringversuche der VDLUFA-NIRS GmbH durchgeführt. Dabei wurden die Versuchsbedingungen für alle Labore klar definiert, wobei zwei Ansätze (37 °C und 20 °C) bei dreifacher Wiederholung und 60 Tage Versuchsdauer ohne Zugabe von Impfschlamm gefordert wurden.

Auffällig waren dabei die Ergebnisse der Restgasuntersuchungen bei 20 °C. Hier wurde über die 27 teilnehmenden Labore und in beiden Ringversuchen ein sehr hoher Variationskoeffizient von 47 % für das Methangaspotential erreicht, was zeigt, dass diese Methode zur Emissionspotentialbestimmung zumindest Laborübergreifend unzureichend ist um die tatsächliche Gasbildung bei 20 °C abzubilden (Abbildung 8). Jedoch ist der Variationskoeffizient des Restgaspotentials bei 20 °C im zweiten Ringversuch deutlich niedriger als im ersten. Dies wird zum einem der Sensibilität der Messmethode zur Emissionspotentialbestimmung (20 °C) zugeschrieben und zum anderen der Schwierigkeit die oft sehr geringen Gasmengen repräsentativ analysieren zu können. Grundsätzlich stellt sich daher auch die Frage inwiefern beide methodischen Ansätze vergleichbar sind.

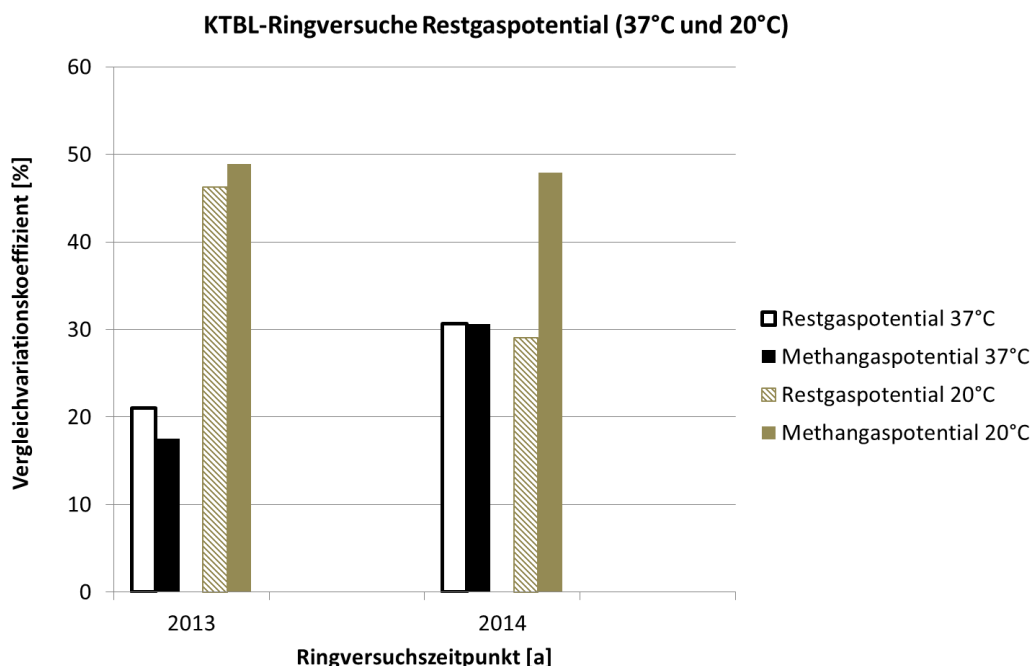


Abbildung 8: Darstellung der Vergleichskoeffizienten der zwei Restgaspotential-Ringversuche des KTBL und des VDLUFA, bei 20 °C und 37 °C jeweils als Restgas- sowie Methangaspotential über alle teilgenommenen Labore.

Überprüft man in diesem Zusammenhang den Einfluss der vorgegebenen Versuchstemperatur auf das Restgaspotential mit dem LfL eigenen Datensatz, so wird deutlich, dass die höhere Gärtemperatur von 37 °C im Vergleich zu den Gärtests bei 20 °C zu einer deutlich höheren Biogas- und Methanproduktion führt. Insgesamt differenzierten die Proben untereinander (laborintern) bei der höheren Gärtemperatur deutlich stärker.

In Abbildung 9 wurden die Ergebnisse aller untersuchter Anlagen nach der Höhe des Restgaspotentials bei 37 °C geordnet. Dabei zeigte sich zusätzlich zum schwachen Zusammenhang zwischen hydraulischer Verweilzeit und dem Restgaspotential, dass die Ergebnisse bei 20 °C und 37 °C nicht zwingend zur selben Aussage führen und daher getrennt voneinander betrachtet werden müssen.

Diese klare Trennung zwischen Effizienzpotential und Emissionspotential ging auch in die Stellungnahme der AG „Restgaspotential von Gärprodukten“ zur Methodenverfeinerung der VDI-Richtlinie 4630 ein, wie später noch erläutert wird.

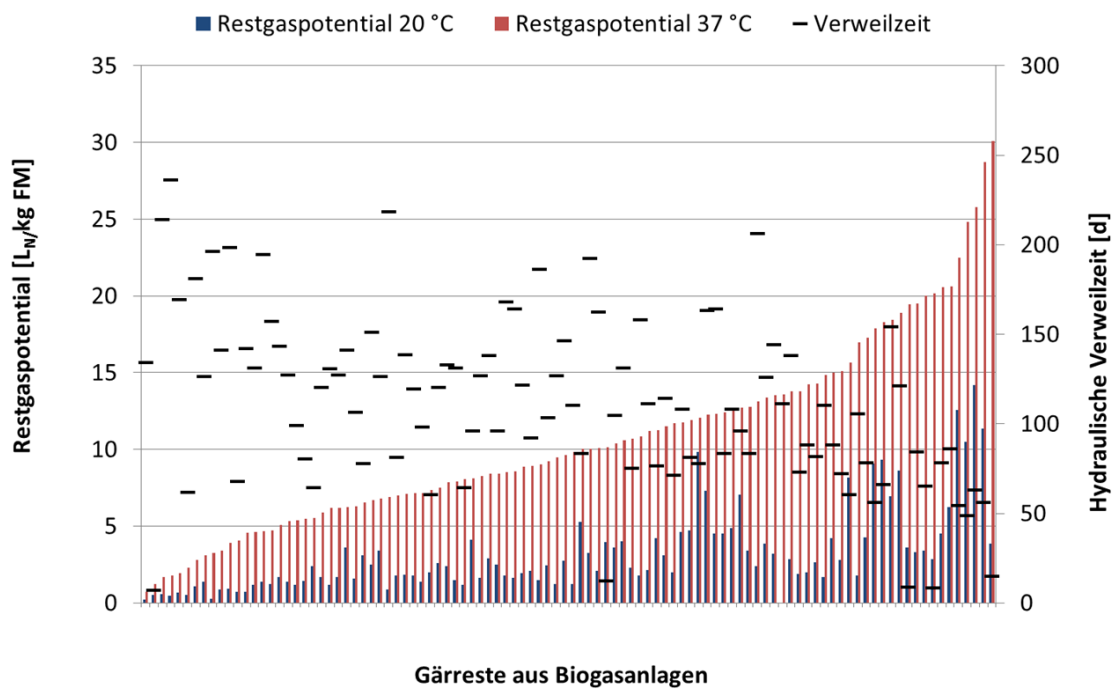


Abbildung 9 Zusammenhang zwischen der hydraulischen Verweilzeit und der Höhe des Restgaspotentials sowie die Vergleichbarkeit der Ergebnisse bei Versuchen mit 20 °C und 37 °C (n=96).

Bereits in den Zwischenberichten zu diesem Projekt sowie aus den Erkenntnissen der Arbeitsgruppen wurde der Hypothese nachgegangen, ob Gärreste aus thermophil betriebenen Biogasanlagen beim Ansatz mit 20 °C eine Prozesshemmung durch das große Temperaturgefälle erfahren und somit in Folge die Säuren ansteigen, was zu einer vorübergehenden Prozesshemmung führen würde und somit die Methode nicht repräsentativ für alle Biogasanlagen erscheinen lässt (Angelidaki et al., 2006). Betrachtet man in Abbildung 10 die Gegenüberstellung der Laborergebnisse der FFS-Konzentration zu Versuchsbeginn und Versuchsende für beide Temperaturansätze, so ist zu erkennen, dass es Gärreste von Anlagen gibt, die nach der Versuchsdauer von 60 Tagen beim Ansatz mit 20 °C einen starken Anstieg der FFS-Konzentration aufweisen.

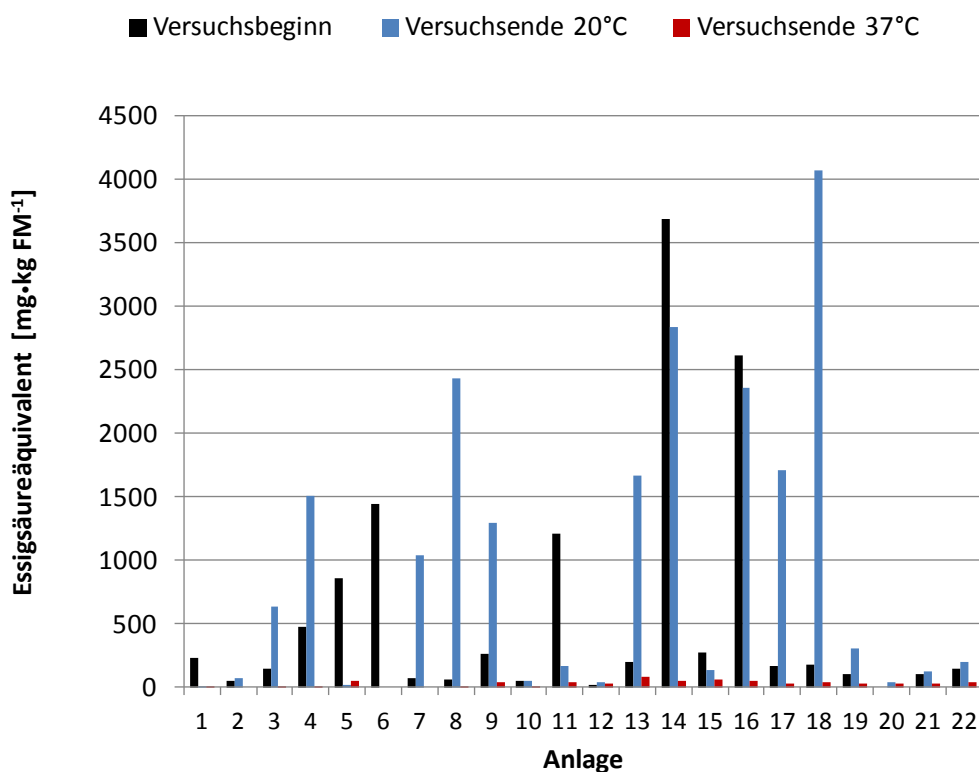


Abbildung 10: Vergleich der Laboregebnisse für die FFS-Konzentration nach einer Versuchsdauer von 60 Tagen zu Versuchsbeginn und nach Versuchsende für zwei Vergärungstemperaturen (20 und 37 °C) im Batchversuch.

Vergleicht man vor diesem Hintergrund den mittleren Verlauf der Biogasproduktion in Normliter über die Versuchsdauer von 60 Tagen der beiden Ansätze mit 20 °C und 37 °C, so zeigen sich deutliche Unterschiede (Abbildung 12, Abbildung 11 und Abbildung 13). Die Biogasproduktion ist beim Ansatz mit 37 °C nach einer kurzen Adaptionsphase zu Versuchsbeginn am höchsten und nimmt mit fortschreitender Zeit sowie Abbau weiter ab (Abbildung 11). Hingegen ist die Produktion der Ansätze unter 20 °C mit Gärresten einer Biogasanlage die thermophil betrieben wird, zu Versuchsbeginn sehr niedrig und erreicht im Mittel nach 42 Tagen erst den Höhepunkt (Abbildung 12). Zusätzlich zeigt der Vergleich des Verlaufs der Biogasproduktion einer mesophil betriebenen Anlage, dass hierbei eine deutlich konstantere Abnahme der Produktion ähnlich dem Ansatz bei 37 °C zu erkennen ist (Abbildung 13). Dies würde ebenfalls auf eine Prozesshemmung bei der Messung des Emissionspotentials (20 °C) von Gärresten aus thermophilen Anlagen hindeuten, was auch die Versuchsdauer von 60 Tagen in Frage stellt um diese Ergebnisse mit anderen Anlagen vergleichen zu können. Hierzu schafft auch die Verwendung des Gärrestes aus dem Endlager keine Abhilfe, da der Zulauf aus der Vergärungsstufe sowie der Füllstand über das Jahr, bedingt durch die landwirtschaftlichen Produktionsabläufen nicht konstant gehalten werden können. Des Weiteren ist in den meisten Endlagern der Biogasanlagen keine Rührtechnik vorhanden, die eine Homogenität gewährleisten würde.

Ebenfalls macht die Betrachtung deutlich, warum bei gleichem Gärrest mit unterschiedlichen Versuchstemperaturen, wie nach der gängigen Methode vorgegeben, nicht unbedingt dieselbe Aussage über das Restgaspotential getroffen werden kann.

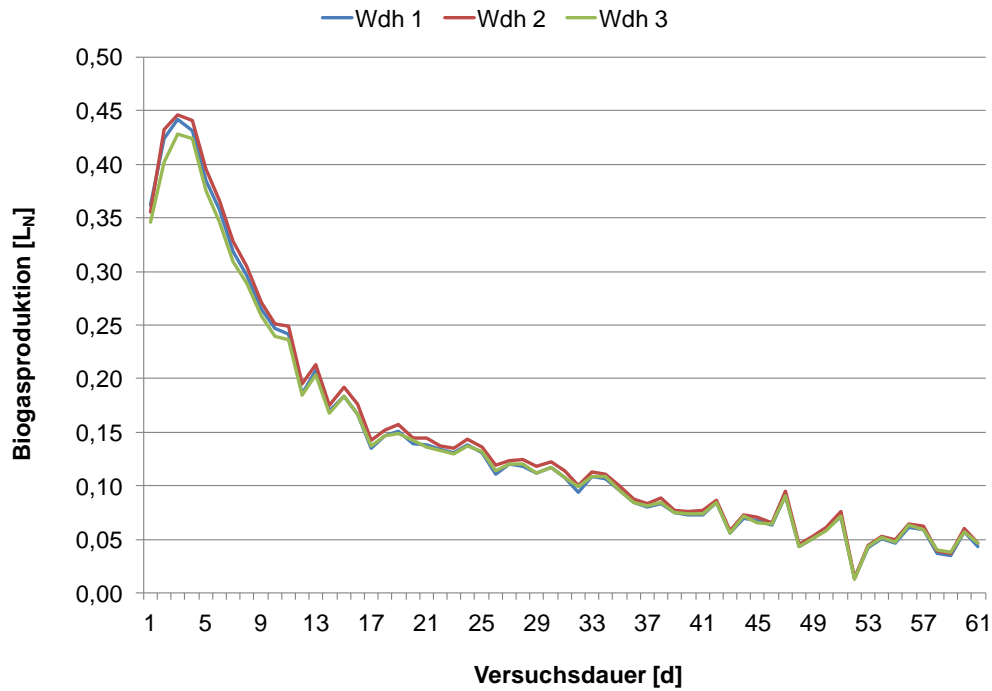


Abbildung 11: Verlauf der Biogasproduktion über die Versuchsdauer von 60 Tagen bei der Vergärungstemperaturen 37 °C (Effizienzparameter) im Batchversuch (3 Wiederholungen).

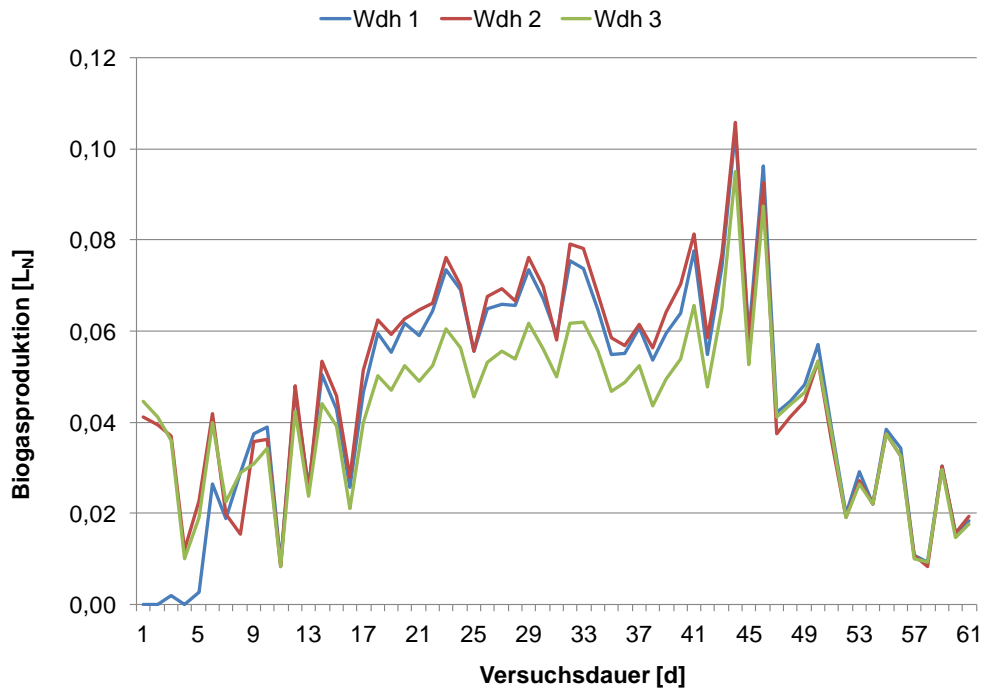


Abbildung 12: Verlauf der Biogasproduktion über die Versuchsdauer von 60 Tagen bei der Vergärungstemperatur 20 °C (Emissionspotential) im Batchversuch einer Biogasanlage mit thermophiler Betriebstemperatur (3 Wiederholungen).

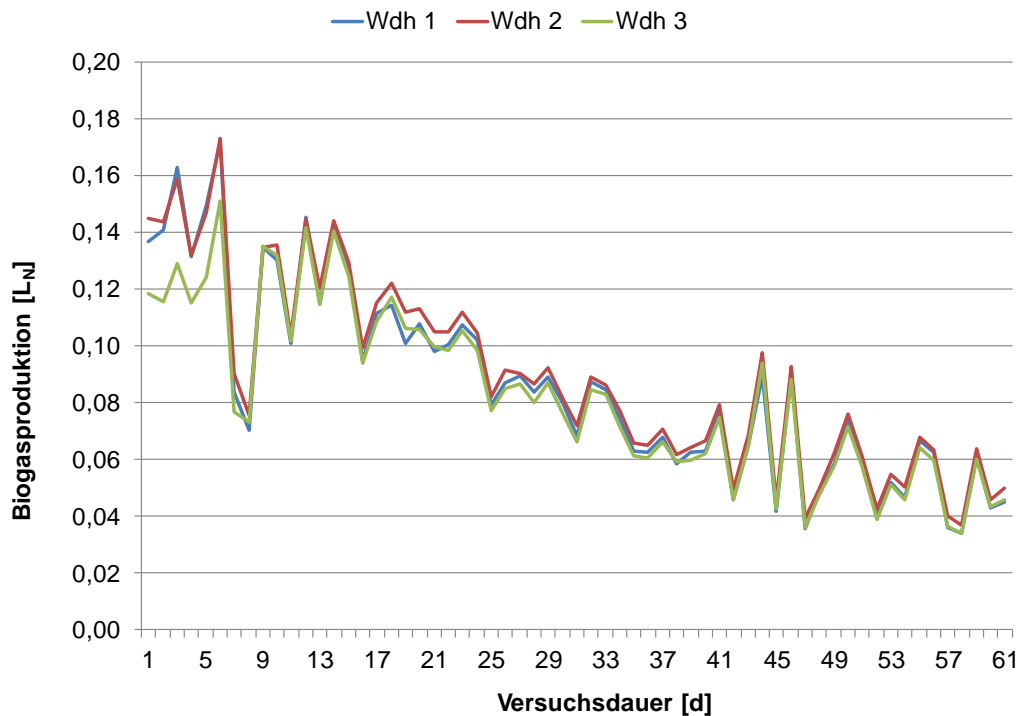


Abbildung 13: Verlauf der Biogasproduktion über die Versuchsdauer von 60 Tagen bei der Vergärungstemperaturen 20 °C (Emissionspotential) im Batchversuch einer Biogasanlage mit mesophiler Betriebstemperatur (3 Wiederholungen).

5.4 Ergebnisse der Arbeitsgruppe Restgaspotential von Gärprodukten

Aufgrund der neuen wissenschaftlichen Erkenntnisse, dass die Höhe des Restgaspotential nicht nur von einem Einflussparameter bestimmt wird sowie durch die Defizite der Methode welche in der VDI-Richtlinie 3475-4 gefordert wird, machten eine neue Methodenvorschrift notwendig. Daher entschied sich ein Gremium im Verein-Deutscher-Ingenieure (VDI) dazu ein Kapitel zur Bestimmung des Restgaspotentials von Gärresten in der zur Novellierung anstehenden VDI-Richtlinie 4630 (VDI, 2006) neu aufzunehmen.

Um in diesen Novellierungsprozess die neuen Erkenntnisse einfließen zu lassen, wurde am 24.06.2014 aus bundesweiten Vertretern der Wissenschaft, Industrie und dem Fachverband Biogas e.V. die Arbeitsgruppe „Restgaspotentiale von Gärprodukten“ in Fulda gegründet.

Ziele des Treffens:

- Abstimmung zu den aktuellen gesetzlichen Entwicklungen in Bezug auf die Restgaspotentiale
- Diskussion der 150-Tage-Regelung bzw. alternativer Regelungen: 1,5 % Restgaspotential (ab EEG 2012 und VDI 3475-4)
- Abstimmung von labortechnischen Vorgaben (Temperatur des Gärtestes usw.)
- Entwicklung einer gemeinsamen Strategie und Positionierung in Vorbereitung auf die anstehenden Biogasanlagenverordnung und Novellierung der VDI 4630
- Vorbereitung auf weitere Diskussionen hinsichtlich der Klimawirkung der Landwirtschaft (BMUB)

Im Anschluss an das Treffen und einer Telefonkonferenz wurde aus den Erkenntnissen und Kompromissen eine gemeinsame Stellungnahme zur Novellierung der VDI-Richtlinie 4630 verfasst und dem zuständigen Gremium im VDI übergeben (siehe Stellungnahme im Anhang).

Anlässlich der Einspruchssitzung wurden die wesentlichen Punkte des gemeinsamen Konsenses dem Ausschuss zur Novellierung der VDI 4630 “Vergärung organischer Stoffe” dargelegt.

Als erster und zentraler Einspruch wird gefordert, den Sachverhalt aufzunehmen, nachdem die Verweilzeit nicht als der alleiniger und größter Einflussfaktor auf die Höhe des Restgaspotentials gesehen werden kann, was im Wesentlichen auf die vorgenannten Arbeiten von Ebertseder et al. (2012a) und Reinhold et al. (2013) zurückgeht.

Des Weiteren wird gefordert, die beiden Ansätze des Restgaspotentials nach Effizienz- und Emissionsparameter klar zu trennen und in der VDI-Richtlinie 4630 nur die Methode des Effizienzansatzes zu definieren. Dies hätte den Vorteil, die hohe methodische Unsicherheit bei der Messung des Restgaspotentials nach VDI 3475-4 (20 °C) bei der nächsten

Novellierung dieser Richtlinie berücksichtigen zu können. Hierbei wurde auch die Unzuverlässigkeit der Versuchsdurchführung bei 20 °C und insbesondere die hohe Sensibilität der Prozessbiologie in Kombination mit dem dort zulässigen breiten Temperaturbereich von 17 °C bis 23 °C angemahnt (Reinhold et al., 2013).

Grundsätzlich war sich die Arbeitsgruppe auch darüber einig, dass für den Effizienzparameter die anlagenspezifische Vergärungstemperatur zur Messung des Restgaspotentials zu verwenden ist, um auch thermophil betriebene Anlagen richtig bewerten zu können (siehe Kapitel 5.3).

In Anlehnung an die Formulierung in der VDI-Richtlinie 3475-4 sollte der stündliche oder tägliche Methanbildungswert der Biogasanlage als Monatsmittelwert erfasst werden.

Als ein weiterer Punkt wurde die Restgasuntersuchung der festen Phase von Gärresten nach einer Separation diskutiert. Dies soll nach Definition weiterhin möglich sein, jedoch muss darauf geachtet werden, dass keine Suspension mit Leitungswasser oder mit destilliertem Wasser zur Anwendung kommt. Die Mischung mit Wasser verändert das Gärverhalten der Gärreste.

Der Bezug der Gasausbeute für das Restgaspotential sollte auf alle Fälle auf die Frischmasse ($L_N/\text{kg FM}$) erfolgen, da die Bestimmung der organischen Trockenmasse, insbesondere der unterschiedlichen Einsatzstoffe, viel zu aufwändig ist und bei dem Bezug auf oTS die flüchtigen Bestandteile nicht mitberücksichtigt werden. Außerdem wird somit der Vergleich mit der täglichen/stündlichen Ausbeute erleichtert. Dies ermöglicht dann auch den Bezug zur Methanausbeute, der sich aus der Umrechnung aus der BHKW-Arbeit ergibt. Die Methode der Umrechnung der Methanausbeute aus der BHKW-Arbeit ist zwar mit Fehlern behaftet, aber oftmals in der Praxis zuverlässiger als die Gasmengenmessung und Gasanalyse (Methangehalt).

6 Schlussfolgerung

Die Korrelationsanalyse der aus einem Datensatz von 96 Untersuchungen ausgewählten Anlagenparameter (Vergärungstemperatur, Konzentration flüchtiger Fettsäuren im Gärrest, Hydraulische Verweilzeit, Wirtschaftsdüngeranteil im Einsatzstoffmix und der organische Trockensubstanzgehalt im Fermenterinhalt) zeigte, dass keiner die Variation im Restgaspotential ausreichend erklärte. Eine multiple lineare Regression (Hauptkomponentenanalyse) nutzte für beide Versuchstemperaturansätze die Raumbelastung, den oTS-Gehalt im Gärrest sowie den Gülleanteil im Einsatzstoffmix um 63 % des Einflusses auf das Restgaspotential zu erklären. Damit ist der oftmals angeführte enge Zusammenhang zwischen Verweilzeit und Restgaspotential auf Basis des hier vorgestellten Datensatzes in Frage zu stellen. Dies bedeutet für die Praxis, dass somit Biogasanlagen in Bezug auf die Bewertung der Abbauleistung und Entwicklungsfähigkeit benachteiligt werden, wenn diese allein an einer Mindestverweilzeit im gasführenden System bemessen würden.

Zusätzlich zeigte sich, dass die Ergebnisse bei 20 °C (Emissionsparameter) und 37 °C (Effizienzparameter) nicht zwingend zur selben Aussage führen und daher getrennt voneinander betrachtet werden müssen.

Eine Untersuchung über die Streuung der Messmethoden der Labore in der Praxis, führte zur Erkenntnis, dass die Vorgaben zur Bestimmung des Restgaspotentials derzeit noch nicht ausreichend sind, um vergleichbare und zuverlässige Ergebnisse zu gewährleisten. Jedoch zeigten sich auch trotz eines einheitlichen Datensatzes und definierter Methode Unsicherheiten im Vergleich zwischen thermophil und mesophil betriebenen Anlagen bei der Messung des Emissionspotentials.

Um in Zukunft eine vergleichbare und repräsentative Messung erreichen zu können, wurde in der Novelle der VDI-Richtlinie 4130 ein Kapitel zur Methodik der Restgaspotentialmessung (Effizienzparameter), basierend auf diesen neun Erkenntnissen, in einer Arbeitsgruppe erarbeitet. Damit soll unter anderem der Einfluss der Diskrepanz zwischen Versuchs- und Betriebstemperatur berücksichtigt werden. Die Festlegung einer standardisierten Messmethode zum Emissionspotential steht jedoch noch aus.

Erste Ergebnisse zur Reduktion des Restgaspotentials durch eine mechanische Separation der Gärreste, lassen eine positive jedoch anlagenspezifische Tendenz erkennen.

7 Weiteres Vorgehen

Da in der Praxis, gerade vor dem Hintergrund der Novellierung der Düngeverordnung sowie eines gewissen Strukturwandels in der Landwirtschaft, die Separierung (Fest-Flüssigtrennung) von Gärresten immer mehr eine Rolle spielt, soll diese Technik auch mit Hilfe des Restgaspotentials bewertet werden. Dazu wurde am Institut für Landtechnik und Tierhaltung der Bayerischen Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL) eine ergänzende Kurzstudie beantragt

Ziel dieses weiteren Vorhabens ist die Planung und Durchführung von Messverfahren zur Quantifizierung der Verluste sowie die Prüfung von Maßnahmen oder technischen Möglichkeiten zur Minderung der Emissionen. Dabei sollen in geeigneten Versuchscontainern verschiedene Verfahren der Lagerung von separiert festen Biogasgärresten geprüft werden.

Die Ergebnisse dienen somit auch der Umsetzung des Klimaschutzprogrammes der Bundesrepublik, welches eine deutliche Verringerung der Treibhausgasemissionen vorsieht.

8 Veröffentlichungen

Stand: März 2016

MACIEJCZYK, M., EBERTSEDER, F., REINHOLD, G., PLÖCHL, M., PRÖTER, J., RÜCKERT, C., SCHMIED, M., VEEES, W., HELM, M.(2014): Stellungnahme zum Entwurf der VDI-Richtlinie 4630 Vergärung organischer Stoffe - Substratcharakterisierung, Probenahme, Stoffdatenerhebung, Gärversuche vom April 2014; 1. Sitzung AG „Restgaspotenzial von Gärprodukten“ am 24.06.2014 in Fulda.

EBERTSEDER, F., LICHTI, F.. (2014) Untersuchung der Variation des Restgaspotentials von Gärresten aus landwirtschaftlichen Biogasanlagen. In: VDLUFA-Mitteilungen 02/2014, S. 10 - 11; Hrsg.: Verband Deutscher Landwirtschaftlicher Untersuchungs- und Forschungsanstalten e. V. (VDLUFA), VDLUFA-Verlag, Darmstadt.

EBERTSEDER, F., KRAPF, C., HEUWINKEL, H. (2014) Welche Einflussfaktoren bestimmen das Restgaspotential von Gärresten?-Ergebnisse aus dem Monitoring der Bayerischen Pilotbiogasanlagen. Vortrag und elektronischer Tagungsbandbeitrag. In: 23. Jahrestagung Fachverband Biogas e.V. mit Biogas-Fachmesse, Nürnberg, 14. – 16.01.2014.

EBERTSEDER, F., HEUWINKEL, H., KRAPF, C., EFFENBERGER, M. (2012): Was bestimmt das Restgaspotential von Gärresten? -Ergebnisse aus dem Monitoring der Bayerischen Pilotbiogasanlagen. VDLUFA-Schriftenreihe 68, S. 307 – 314, Kongressband 2012 Passau, VDLUFA-Verlag, Darmstadt.

EBERTSEDER, F., PREIBLER, D., (2011): Abschätzung des Methangaspotentials in Gärresten, in Biogas Forum Bayern Nr.III 5/2011, Hrsg. ALB Bayern e.V. http://www.biogas-forum-bayern.de/publikationen/Abschätzung_des_Methangaspotentials_in_Garresten_2011.pdf, Stand 22.02.16

9 Vorträge

EBERTSEDER, F. (2016): Energie- und Nährstoffeffizienter Einsatz von Wirtschaftsdüngern; Vortrag am Betreiberseminar der Projektgruppe Biogas-Monitoring ILT 2c, am 25.02.2016 in Freising.

EBERTSEDER, F. (2015): Ergebnisse des KTBL/VDLUFA Ringversuch Biogas 2014; Vortrag vom Projekttreffen der KTBL-Arbeitsgruppe „Ringversuch Biogaserträge“ in Fulda am 10.05.2015 in Freising.

EBERTSEDER, F. (2014): Ergebnisse des KTBL/VDLUFA Ringversuch Biogas 2013; Vortrag vom Projekttreffen der KTBL-Arbeitsgruppe „Ringversuch Biogaserträge“ in Fulda am 14.05.2014 in Freising.

EBERTSEDER, F. (2013): Ergebnisse und Methodik zur Bestimmung des Restgaspotentials von Gärresten! - Status Quo, Vorgehen, Aussichten ...; Vortrag am 7. Betreiberseminar der Projektgruppe Biogas-Monitoring ILT 2c, am 21.11.2013 in Freising.

EBERTSEDER, F., SCHRAML, M., WEBER, A. (2013): Wodurch wird das Restgaspotential von Gärresten bestimmt? - Ergebnisse aus dem Monitoring der Bayerischen Pilotbiogasanlagen -; Vortrag am Landesamt für Umwelt (LfU) am 19.08.2013 in Augsburg.

EBERTSEDER, F., SCHRAML, M., WEBER, A. (2013) Wodurch wird das Restgaspotential von Gärresten bestimmt? Projekt „Restgaspotential“ Status Quo, Ziele, Vorgehen, Aussichten; Vortrag am Projekttreffen am 21.06.2013 in Freising.

EBERTSEDER, F., KRAPF, C., HEUWINKEL, H. (2013): Welche Einflussfaktoren bestimmen das Restgaspotential von Gärprodukten? - Ergebnisse aus dem Monitoring der Bayerischen Pilotbiogasanlagen -; Vortrag an der 23. Jahrestagung des Fachverband Biogas e.V. 14. – 16. Januar 2014 in Nürnberg.

EBERTSEDER, F., HEUWINKEL, H., KRAPF, C., EFFENBERGER, M. (2012): Was bestimmt das Restgaspotential von Gärresten? -Ergebnisse aus dem Monitoring der Bayerischen Pilotbiogasanlagen. Vortrag am 124. VDLUFA-Kongress „Nachhaltigkeitsindikator für die Landwirtschaft: Bestimmung und Eignung“ 18. - 21. September 2012 in Passau.

10 Literaturverzeichnis

- ANGELIDAKI, I., HEINFELT, A., ELLEGAARD, L. (2006): Enhanced biogas recovery by applying post-digestion in large-scale centralized biogas plants, *Water Science & Technology*, IWA Publishing. Vol. 54 No 2, S. 237-244
- BACHMAIER H., EBERTSEDER, F., EFFENBERGER, M., KISSEL, R., RIVERA-GRACIA, E., GRONAUER, A. (2011): Wissenschaftliche Begleitung der Pilotbetriebe zur Biogasproduktion in Bayern – Fortsetzung 2008 - 2010. LfL-Schriftenreihe 5/2011, Freising, ISSN: 1611-4159
- DANDIKAS, V., HEUWINKEL, H., LICHTI, F., DREWES, J. E., KOCH, K. (2015): Correlation between Biogas Yield and Chemical Composition of Grassland Plant Species. *Energy Fuels* 29, 7221-7229
- EBERTSEDER F., PREIBLER, D., (2011): Abschätzung des Methangaspotentials in Gärresten, in *Biogas Forum Bayern Nr.III 5/2011*, Hrsg. ALB Bayern e.V. http://www.biogas-forum-bay-ern.de/publikationen/Abschätzung_des_Methangaspotentials_in_Garresten_2011.pdf, Stand 22.02.16
- EBERTSEDER F., HEUWINKEL, H., KRAPP, C., EFFENBERGER, M. (2012 a): Was bestimmt das Restgaspotential von Gärresten? -Ergebnisse aus dem Monitoring der Bayerischen Pilotbiogasanlagen. *VDLUFA-Schriftenreihe* 68, S. 307 – 314, Kongressband 2012 Passau, VDLUFA-Verlag, Darmstadt.
- EBERTSEDER F., KISSEL, R., RIVERA-GRACIA, E., LEHNER, A., BACHMAIER, H., EFFENBERGER, M. (2012 b): Monitoring und Dokumentation von Praxis-Biogasanlagen – Abschlussbericht. LfL-Schriftenreihe /2012, Freising, ISSN: 1611-4159
- EBERTSEDER F., SCHOBER, J., OCHSENBAUER, M., LICHTI, F. (2015): Neue Techniken zur Wirtschaftsdüngerbereitung und -ausbringung. In: Tagungsband „Milchviehhaltung nachhaltig und zukunftsorientiert“ Landtechnisch-bauliche Jahrestagung am 26. November 2015 in Marktoberdorf des Instituts für Landtechnik und Tierhaltung der Bayerischen Landesanstalt für Landwirtschaft. LfL-Schriftenreihe, ISSN 1611-4159, S. 91-101
- EFFENBERGER, M., BACHMAIER, H., KRÄNSEL, E., LEHNER, A., GRONAUER, A. (2010): Wissenschaftliche Begleitung der Pilotbetriebe zur Biogasproduktion in Bayern – Abschlussbericht. LfL-Schriftenreihe 1/2010, Freising, ISSN: 1611-4159
- EFFENBERGER, M., LEBUHN, M. (2008): Biologie der Methangärung – Die Belastungsgrenzen erkennen. *Mais* 2/2008, mais special 2008, 4-7.
- FNR (2009): Biogas-Messprogramm II – 61 Biogasanlagen im Vergleich. Fachagentur für Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR) (Hrsg.), Gülzow, 2009, ISBN 978-3-9803927-8-5

- GIOELLI, F., DINUCCIO, E., BALSARI, P. (2011): Residual bigas potential from the storage tanks of non-separated digestate and digested liquid fraction. *Bioresource Technology* 102, 10248-10251
- HENKELMANN G., FISCHER-KAISER, K., MÜLLER, M. (2014): Entwicklung und Umsetzung eines Qualitätsmanagement-Systems für die Anbieter von Labordienstleistungen für die Biogasproduktion in Bayern, *Biogas Forum Bayern*, Hrsg. ALB Bayern e.V. <http://www.biogas-forum-bayern.de/labor/projektbeschreibung-2>, Stand 11.08.13
- HOLMGREN M. A., HANSEN, M. N., REINELT, T., WESTERKAMP, T., JORGENSEN, L., SCHEUTZ, C., DELRE, A., (2015): Measurements of methane emissions from biogas production – Data collection and comparison of measurement methods. In: *Energiforsk REPORT 2015:158*; ISBN 978-91-7673-158-1.
- KAISER, F.L. (2007): Einfluss der stofflichen Zusammensetzung auf die Verdaulichkeit nachwachsender Rohstoffe beim anaeroben Abbau in Biogasreaktoren. Dissertation, TU München.
- KESSLER, W. (2007): Multivariate Datenanalyse für die Pharma-, Bio- und Prozessanalytik. Wiley-VCH Verlag, Weinheim, ISBN: 978-3-527-31262-7
- KISSEL, R., ADIKARAM, K.K.L.B., POHL, A., RIVERA-GRACIA, E., EFFENBERGER, M. (2015): Betriebs-Monitoring: Vergleichende Untersuchung für die Einwerbung und Vergärung von Grünlandaufwüchsen -Abschlussbericht- Schwerpunkt Biogasanlagen. LfL-Schriftenreihe /2015, Freising, (in Vorbereitung).
- KOHLHASE, M., REINHOLD, G., GÖDEKE, K. (2010): Restgaspotential von Gärresten verschiedener Biogasanlagen. *VDLUFA-Schriftenreihe* 66, S. 437 – 444, Kongressband 2010 Kiel, VDLUFA-Verlag, Darmstadt.
- KUBE, J. (2013): Vorhersage der Gaserträge und des Restgaspotentials in technischen Anlagen auf der Basis von Laborversuchen mit der neuen VDI 4630; Vortrag an der 23. Jahrestagung des Fachverband Biogas e.V. 14. – 16. Januar 2014 in Nürnberg.
- LIEBETRAU, J., CLEMENS, J., CUHLS, C., HAFERMANN, C., FRIEHE, J., WEILAND, P., DANIEL-GROMKE, J. (2010): Methane emissions from biogas-producing facilities within the agricultural sector. *Engineering in Life Sciences*, 10, No. 6, 595-599.
- LEHNER, A., EFFENBERGER, M., GRONAUER, A. (2010): Optimierung der Verfahrenstechnik landwirtschaftlicher Biogasanlagen - Abschlussbericht. LfL-Schriftenreihe 2/2010, Freising, ISSN: 1611-4159
- LINKE, B., MUHA, I. (2015): Modell zur Ermittlung von Methanausbeuten aus Biogasanlagen in der Prozesskette Fermenter-Nachgärer-Endlager. In: *Biogas in der Landwirtschaft –Stand und Perspektiven*. KTBL-Schrift 508, S. 182-194.
- LINKE, B., MUHA, I., WITTUM, G., PLOGSTIES, V. (2012): Mesophilic anaerobic co-digestion of cow manure and biogas crops in full scale German biogas plants: A model for calculating the effect of hydraulic retention time and VS crop proportion in the mixture on methane yield from digester and from digestate storage at different temperatures. *Bioresource Technology* 130, 689-695.

- MENARDO, S., GIOELLI, F., BALSARI, P. (2011): The methane yield of digestate: Effect of organic loading rate, hydraulic retention time, and plant feeding. *Bioresource Technology* 102, 2348-2351.
- NÆS, T., ISAKSSON, T., FEARN, T., DAVIS, T. (2002): *Multivariate Calibration and Classification*. NIR Publications, Chichester, ISBN: 0 9528666 2 5
- OECHSNER, H., RUILE, S., SCHMITZ, S. (2015): Abbauleistung von landwirtschaftlichen Biogasanlagen – Restgaspotenzialuntersuchung an 25 Anlagen. In: *Biogas in der Landwirtschaft –Stand und Perspektiven*. KTBL-Schrift 508, S. 172-181.
- PADUCH, M. (2007): Emissionen minimieren, *Biogas Journal* 1/07, S.22-24.
- REINHOLD, G., GÖDEKE, K., HENGELHAUPT, F. (2013): Methodendiskussion zur Bestimmung des Restgaspotenzials von Gärresten. *VDLUFA-Schriftenreihe* 69, S. 854 – 861, Kongressband 2013 Berlin, VDLUFA-Verlag, Darmstadt.
- RODHE, L., NORDBERG, A. (2011): Greenhouse gas emission from the storage of liquid and solid manure and abatement strategies. In: *Emissionen der Tierhaltung – Treibhausgase, Umweltbewertung, Stand der Technik*. KTBL-Schrift 491, S. 206-216.
- RODHE, L., ASCUE, J., NORDBERG, A. (2009): Emission of greenhouse gases (methan and nitrous oxide) from cattle slurry storage in North Europe. *IOP Conf. Series: Earth Environmental Science*. 8, 012019. doi: 10.1088/1755-1315/8/1/012019.
- SCHIEDER, D., GRONAUER, A., LEBUHN, M., BAYER, K., BECK, J., HIEPP, G., BINDER, S. (2010): Prozessmodell Biogas. In: *Biogas Forum Bayern Nr. III-03/2010*, Hrsg. ALB Bayern e. V., <http://www.biogas-forum-bayern.de/fachinformationen/prozessbiologie-bewertung-und-analytik/3>, Stand 29.02.2016.
- STREICHER, G., KLICHE, R., BUSCHMANN, A., POHL, A., EFFENBERGER, M. (2015): *Monitoring von Biogasanlagen – Diversifizierung der Einsatzstoffe und Verfahrenstechnik -Abschlussbericht-*. LfL-Schriftenreihe /2015, Freising, (in Vorbereitung).
- VDI (2006): *Vergärung organischer Stoffe, Substratcharakterisierung, Probenahme, Stoffdatenerhebung, Gärversuche*. VDI Richtlinie 4630, Verein Deutscher Ingenieure 2006
- VDI (2010): *Maßnahmen zur Emissionsminderung - Biogasanlagen in der Landwirtschaft - Vergärung von Energiepflanzen und Wirtschaftsdünger*. VDI Richtlinie 3475 Blatt 4, Verein Deutscher Ingenieure 2010
- VDI (2011): *Gütekriterien für Biogasablagen*. VDI Richtlinie 4631, Verein Deutscher Ingenieure 2011
- VOGTHERR J., OECHSNER H. (2007): Jedem Pott seinen Deckel, *Joule* 4.2007, S. 23-25

Tab.-A 1: Zusammenstellung der Verfahrenstechnischen Parameter und der Ergebnisse der Restgaspotentialuntersuchung für das Jahr 2007

ID	FFS	HVZ	RB	TS	oTS	WD	G	Methangaspotential	Methangaspotential	Restgaspotential	Restgaspotential
								20 °C	37 °C	20 °C	37 °C
–	[mg/kg FM]	[d]	[kg oTS/(m ³ d)]	[%]	[%]	[%]	[%]	[L CH ₄ /kg FM]	[L CH ₄ /kg FM]	[L /kg FM]	[L /kg FM]
10	1081.9	83.0	2.8	8.0	6.7	27	27	3.0	5.4	5.3	10.0
8	1390.0	192.0	1.3	8.1	6.6	16	16	2.0	6.2	3.2	10.1
2	160.9	141.0	2.9	7.2	5.6	17	0	2.1	3.8	3.6	6.2
5	290.4	126.8	1.9	6.2	4.8	0	0	1.1	4.8	1.6	8.2
7	312.9	120.0	2.0	7.1	5.5	7.4	6.2	1.0	3.3	1.7	5.9
9	585.2	125.8	2.1	13.0	9.8	0	0	2.1	7.7	3.9	13.4
3	193.5	110.0	2.6	7.3	5.9	0	0	0.8	8.7	1.7	14.9
4	965.5	77.7	2.7	9.7	7.9	25	0	6.1	7.3	9.8	12.0
ILT 03	191.0	75	2.7	6.4	5.2	48	48	1.2	6.2	2.3	10.7
ILT 12	263.1	80	3.4	6.6	5.3	31.8	31.8	0.8	3.3	1.4	5.5
ILT 25	647.8	163	1.9	8.7	7.1	0	0	4.3	7.4	7.3	12.3
ILT 27	1693.8	108	3.0	7.5	6.0	0	0	3.0	7.2	4.6	11.8
ILT 30	342.9	126	2.0	6.0	4.4	32	30.7	0.8	1.7	1.4	3.1
ILT 33	3403.7	138	2.0	8.1	6.7	0	0	1.6	8.9	2.8	13.8
ILT 41	320.5	164	1.8	6.9	5.5	11.7	11.7	0.9	5.4	1.6	8.5

ID: Bezeichnung der Gärreste; FFS: Flüchtige Fettsäuren im Gärrest; HVZ: Hydraulische Verweilzeit; RB: Raumbelastung; TS: Gehalt der Trockensubstanz; oTS: Gehalt an organischer Trockensubstanz WD: Wirtschaftsdüngeranteil im Einsatzstoffmix (Gülle und Mist); G: Gülleanteil am Einsatzstoffmix

Tab.-A 2: Zusammenstellung der Verfahrenstechnischen Parameter und der Ergebnisse der Restgaspotentialuntersuchung für das Jahr 2008

ID	FFS	HVZ	RB	TS	oTS	WD	G	Methangaspotential	Methangaspotential	Restgaspotential	Restgaspotential
								20 °C	37 °C	20 °C	37 °C
–	[mg/kg FM]	[d]	[kg oTS/(m3 d)]	[%]	[%]	[%]	[%]	[L CH4/kg FM]	[L CH4/kg FM]	[L /kg FM]	[L /kg FM]
10	0.0	83	2.8	7.0	5.5	27.0	27.0	2.0	7.3	3.4	12.8
8	436.0	131	2.0	6.3	5.0	16.0	16.0	0.8	4.4	1.5	7.9
2	27.0	141	2.9	5.5	4.3	17.0	0.0	0.3	1.0	0.9	3.4
5	369.9	127	1.9	7.7	5.9	0.0	0.0	0.7	5.4	1.2	9.5
6	811.3	96	3.3	5.0	3.8	32.0	32.0	1.5	4.9	2.5	8.4
3	0.0	110	2.6	6.9	5.2	0.0	0.0	0.7	5.9	1.2	9.9
4	495.4	78	2.7	6.5	4.5	25.0	0.0	1.8	3.7	3.1	6.5
1	383.7	130	1.9	6.9	5.1	38.8	35.0	0.6	3.4	1.2	6.2
ILT 20	0.0	99	1.9	5.2	3.9	42.2	42.2	0.6	2.9	1.2	5.4
ILT 23	626.9	78	4.0	8.3	6.8	5.4	0.0	2.3	9.2	4.3	17.3
ILT 35	807.7	131	2.8	6.2	4.7	47.1	35.0	2.4	6.3	4.0	10.6
ILT 42	417.4	144	2.1	7.0	5.7	7.1	6.9	1.9	7.8	3.2	13.5
ILT 49	415.6	127	1.6	6.9	5.2	26.4	26.4	0.7	2.8	1.4	5.3
ILT 50	568.7	78	4.8	12.2	10.0	0.7	0.0	2.7	12.5	4.5	20.6
ILT 51	0.0	64	2.6	5.9	4.4	58.2	55.8	0.7	4.5	1.2	8.1

ID: Bezeichnung der Gärreste; FFS: Flüchtige Fettsäuren im Gärrest; HVZ: Hydraulische Verweilzeit; RB: Raumbelastung; TS: Gehalt der Trockensubstanz; oTS: Gehalt an organischer Trockensubstanz WD: Wirtschaftsdüngeranteil im Einsatzstoffmix (Gülle und Mist); G: Gülleanteil am Einsatzstoffmix

Tab.-A 3: Zusammenstellung der Verfahrenstechnischen Parameter und der Ergebnisse der Restgaspotentialuntersuchung für das Jahr 2009

ID	FFS	HVZ	RB	TS	oTS	WD	G	Methangaspotential	Methangaspotential	Restgaspotential	Restgaspotential
								20 °C	37 °C	20 °C	37 °C
–	[mg/kg FM]	[d]	[kg oTS/(m ³ d)]	[%]	[%]	[%]	[%]	[L CH ₄ /kg FM]	[L CH ₄ /kg FM]	[L /kg FM]	[L /kg FM]
10	236.0	83	2.8	7.5	6.0	38.7	38.7	2.9	7.3	4.5	12.4
8	55.2	131	2.0	5.3	4.0	4.4	4.4	0.6	2.6	1.2	4.6
7	150.1	120	2.0	8.8	7.1	34.6	33.3	1.5	4.4	2.6	7.5
6	473.8	96	3.3	4.9	3.9	45.7	44.9	2.5	4.9	4.1	8.1
9	860.0	126	2.1	13.6	9.9	0.0	0.0	2.1	3.8	3.4	6.8
15	1441.9	56	4.7	14.6	10.6	1.3	0.0	5.0	9.9	9.1	17.9
13	74.5	198	1.1	5.2	3.9	49.9	45.3	0.4	2.3	0.9	3.9
12	57.0	162	1.9	6.3	5.1	7.4	0.0	1.1	6.0	2.1	10.1
11	261.2	81	2.5	7.3	5.5	50.8	48.4	1.1	4.4	1.8	7.0
14	52.2	106	1.2	6.8	5.0	77.0	67.1	1.0	3.6	1.6	6.3

ID: Bezeichnung der Gärreste; FFS: Flüchtige Fettsäuren im Gärrest; HVZ: Hydraulische Verweilzeit; RB: Raumbelastung; TS: Gehalt der Trockensubstanz; oTS: Gehalt an organischer Trockensubstanz WD: Wirtschaftsdüngeranteil im Einsatzstoffmix (Gülle und Mist); G: Gülleanteil am Einsatzstoffmix

Tab.-A 4: Zusammenstellung der Verfahrenstechnischen Parameter und der Ergebnisse der Restgaspotentialuntersuchung für das Jahr 2010

ID	FFS	HVZ	RB	TS	oTS	WD	G	Methangaspotential	Methangaspotential	Restgaspotential	Restgaspotential
								20 °C	37 °C	20 °C	37 °C
–	[mg/kg FM]	[d]	[kg oTS/(m ³ d)]	[%]	[%]	[%]	[%]	[L CH ₄ /kg FM]	[L CH ₄ /kg FM]	[L /kg FM]	[L /kg FM]
10	1214.86	88	2.22	6.08	4.77	38.7	34.7	2.6	8.7	4.2	15.0
8	18.62	111	2.44	6.42	5.10	4.4	4.6	1.3	6.5	2.1	11.2
7	202.98	88	2.80	7.70	6.19	34.6	32.5	1.2	8.3	2.0	14.3
6	3688.42	86	3.28	6.08	4.87	45.7	44.5	4.1	12.5	6.2	20.6
9	276.24	157	1.78	9.75	6.83	0.0	0.0	0.6	2.7	1.2	4.7
15	2613.48	121	2.20	14.96	11.66	1.2	0.0	5.0	11.0	8.6	18.9
13	166.35	218	0.90	6.35	4.79	52.9	48.1	0.3	4.0	0.9	6.9
12	177.76	158	1.80	6.81	5.55	8.0	0.0	0.7	6.6	1.8	10.9
11	106.29	71	2.30	6.16	4.57	56.3	52.7	1.1	6.9	2.0	11.7
14	0.00	119	0.80	6.56	5.04	82.6	72.2	1.1	3.3	1.8	7.1
106	105.09	186	1.69	8.91	6.98	32.7	0.0	0.8	5.2	1.5	9.0
16	141.72	153	1.50	12.07	9.28	33.0	0.0	4.1	10.4	6.9	18.4

ID: Bezeichnung der Gärreste; FFS: Flüchtige Fettsäuren im Gärrest; HVZ: Hydraulische Verweilzeit; RB: Raumbelastung; TS: Gehalt der Trockensubstanz; oTS: Gehalt an organischer Trockensubstanz WD: Wirtschaftsdüngeranteil im Einsatzstoffmix (Gülle und Mist); G: Gülleanteil am Einsatzstoffmix

Tab.-A 5: Zusammenstellung der Verfahrenstechnischen Parameter und der Ergebnisse der Restgaspotentialuntersuchung für das Jahr 2011

ID	FFS	HVZ	RB	TS	oTS	WD	G	Methangaspotential	Methangaspotential	Restgaspotential	Restgaspotential
								20 °C	37 °C	20 °C	37 °C
–	[mg/kg FM]	[d]	[kg oTS/(m ³ d)]	[%]	[%]	[%]	[%]	[L CH ₄ /kg FM]	[L CH ₄ /kg FM]	[L /kg FM]	[L /kg FM]
10	1060.53	81	3.01	6.03	4.79	34.7	34.7	3.0	7.7	4.7	11.9
8	0.00	127	2.10	6.39	4.95	4.6	4.6	0.8	3.8	1.7	6.2
7	604.13	72	3.40	8.28	6.64	33.7	32.5	1.9	8.8	2.8	15.1
6	902.59	84	4.30	7.22	5.86	45.2	44.5	1.8	11.2	3.3	19.5
9	87.08	143	2.18	9.26	6.39	0.0	0.0	0.8	3.1	1.7	5.1
15	601.73	48	5.90	14.05	10.81	1.5	0.0	5.7	13.8	10.5	24.8
13	283.45	168	1.30	6.45	5.29	52.9	41.7	1.1	5.0	1.8	8.5
12	60.05	138	2.30	8.93	6.87	4.3	0	1.5	5.1	2.9	8.4
11	225.80	73	2.40	7.77	6.10	52.8	47.2	0.9	8.1	1.9	13.8
14	412.56	105	1.10	7.46	5.59	78.0	72.0	2.2	6.5	3.6	10.4
16	234.80	151	1.60	10.27	7.69	33.0	0.0	2.0	4.2	2.5	6.7

ID: Bezeichnung der Gärreste; FFS: Flüchtige Fettsäuren im Gärrest; HVZ: Hydraulische Verweilzeit; RB: Raumbelastung; TS: Gehalt der Trockensubstanz; oTS: Gehalt an organischer Trockensubstanz WD: Wirtschaftsdüngeranteil im Einsatzstoffmix (Gülle und Mist); G: Gülleanteil am Einsatzstoffmix

Tab.-A 6: Zusammenstellung der Verfahrenstechnischen Parameter und der Ergebnisse der Restgaspotentialuntersuchung für das Jahr 2012

ID	FFS	HVZ	RB	TS	oTS	WD	G	Methangaspotential	Methangaspotential	Restgaspotential	Restgaspotential
								20 °C	37 °C	20 °C	37 °C
–	[mg/kg FM]	[d]	[kg oTS/(m ³ d)]	[%]	[%]	[%]	[%]	[L CH ₄ /kg FM]	[L CH ₄ /kg FM]	[L /kg FM]	[L /kg FM]
14	517.65	108	1.13	7.48	5.52	81.0	74.0	2.9	7.7	4.9	12.5
15	1704.29	54	5.10	17.35	11.70	2.4	0.0	6.6	14.4	12.6	22.5
16	52.25	133	1.80	11.05	8.26	33.0	0.0	1.2	4.8	2.4	7.9
17	643.76	142	2.06	15.09	10.25	33.3	0.0	0.4	3.0	0.7	4.6
18	130.31	67	3.05	9.81	6.73	30.8	30.8	0.4	2.5	0.7	4.0
19	186.76	195	0.93	4.83	3.20	40.2	40.2	0.6	3.1	1.4	4.7
20	56.45	169	0.74	8.21	5.52	42.3	42.3	0.3	1.0	0.7	1.9
21	38.43	76	2.02	9.72	6.56	34.6	29.8	2.4	7.3	4.2	11.2
23 n N	4113.59	65	1.60	6.86	5.11	83.5	83.5	1.8	13.6	3.4	20.0
Alk	261.83	206	1.18	8.94	7.28	33.5	33.5	1.4	7.9	2.4	13.1
Nem	246.82	82	3.30	7.58	6.33	37.7	37.7	1.3	9.0	2.6	14.3

ID: Bezeichnung der Gärreste; FFS: Flüchtige Fettsäuren im Gärrest; HVZ: Hydraulische Verweilzeit; RB: Raumbelastung; TS: Gehalt der Trockensubstanz; oTS: Gehalt an organischer Trockensubstanz WD: Wirtschaftsdüngeranteil im Einsatzstoffmix (Gülle und Mist); G: Gülleanteil am Einsatzstoffmix

Tab.-A 7: Zusammenstellung der Verfahrenstechnischen Parameter und der Ergebnisse der Restgaspotentialuntersuchung für das Jahr 2013

ID	FFS	HVZ	RB	TS	oTS	WD	G	Methangaspotential	Methangaspotential	Restgaspotential	Restgaspotential
								20 °C	37 °C	20 °C	37 °C
–	[mg/kg FM]	[d]	[kg oTS/(m ³ d)]	[%]	[%]	[%]	[%]	[L CH ₄ /kg FM]	[L CH ₄ /kg FM]	[L /kg FM]	[L /kg FM]
8	19.22	122	2.54	7.60	5.79	0.0	0.0	1.5	5.7	1.9	8.9
17	116.50	146	0.73	17.52	11.77	69.2	0.0	2.1	6.5	2.7	9.7
18	1870.63	60	3.20	9.33	6.93	33.0	33	4.7	9.9	8.2	15.6
19	197.57	196	0.95	2.99	1.97	40.0	40	0.1	2.3	0.3	3.2
20	60.65	236	0.7	6.94	4.57	42.0	42	0.4	1.3	0.5	1.8
21	64.26	92	2.00	9.59	6.49	32.5	29	1.5	5.8	2.1	8.9
24	0.00	138	2.4	5.99	4.22	9.2	9.2	1.2	4.3	1.8	7.1
25	1.20	98	1.93	5.94	4.53	37.0	37	0.9	4.6	1.4	7.1
ILT 41	43.84	106		9.60	7.62	30.9	30.9	1.3	10.2	1.8	17.0

ID: Bezeichnung der Gärreste; FFS: Flüchtige Fettsäuren im Gärrest; HVZ: Hydraulische Verweilzeit; RB: Raumbelastung; TS: Gehalt der Trockensubstanz; oTS: Gehalt an organischer Trockensubstanz WD: Wirtschaftsdüngeranteil im Einsatzstoffmix (Gülle und Mist); G: Gülleanteil am Einsatzstoffmix

Tab.-A 8: Zusammenstellung der Verfahrenstechnischen Parameter und der Ergebnisse der Restgaspotentialuntersuchung für das Jahr 2015

ID	FFS	HVZ	RB	TS	oTS	WD	G	Methangaspotential	Methangaspotential	Restgaspotential	Restgaspotential
								20 °C	37 °C	20 °C	37 °C
–	[mg/kg FM]	[d]	[kg oTS/(m ³ d)]	[%]	[%]	[%]	[%]	[L CH ₄ /kg FM]	[L CH ₄ /kg FM]	[L /kg FM]	[L /kg FM]
Leitl	1288.12	56	4.5	9.90	8.17	36.1	36.1	7.0	16.8	11.3	28.7
Grub	0.00	60	1.7	5.32	3.93	94.0	74.0	1.3	4.7	2.0	7.3
16	75.07	114	2.2	9.80	7.12	33.3	0.0	2.1	7.2	3.1	11.5
17	383.13	111	2.5	16.77	11.60	35.6	0.0		8.9		13.6
15	1112.77	63	5.1	13.38	10.23	5.5	0.0	8.3	15.4	14.2	25.8
25	56.45	103	2.4	6.65	5.05	36.2	36.2	1.6	5.8	2.4	9.2
20	61.85	214	0.9	7.62	5.13	43.7	0.7	0.3	1.2	0.6	1.7
18	2179.90	66	3.1	10.63	8.32	32.5	32.5	6.2	11.7	9.3	18.3
12	66.66	181	1.7	4.60	3.40	4.5	0.0	0.7	1.9	1.1	2.8
St. n N	0.00	62	2.0	3.03	2.07	1.8	0.0	0.3	1.5	0.5	2.3
23 n N	253.42	64	1.5	3.79	2.54	77.3	76.7	1.9	3.6	2.4	5.5
St. n NGGL	0.00	134	0.9	2.60	1.65	1.8	0.0	0.3	0.3	0.2	0.7

ID: Bezeichnung der Gärreste; FFS: Flüchtige Fettsäuren im Gärrest; HVZ: Hydraulische Verweilzeit; RB: Raumbelastung; TS: Gehalt der Trockensubstanz; oTS: Gehalt an organischer Trockensubstanz WD: Wirtschaftsdüngeranteil im Einsatzstoffmix (Gülle und Mist); G: Gülleanteil am Einsatzstoffmix

Abb.-A 1: Stellungnahme der Arbeitsgruppe „Restgaspotential von Gärprodukten“ zur Novelle der VDI-Richtlinie 4630, Seite 1/7

Formblatt für Stellungnahmen zu VDI-Richtlinien-Entwürfen

Richtlinien-Nr.	Datum:	ID:	Firma (bei Privatperson Eintrag 'privat')	E-Mail-Adresse	Telefonnr.
VDI 4630	29.09.2014	956	Fachverband Biogas e.V.	steffi.kleeberg@biogas.org	030 - 27 58 179-0

Vorname	Name	Titel	Straße / Hausnummer	PLZ	Ort
Steffi	Kleeberg		Angerbrunnenstr. 12	85356	Freising

1*	2	3*	4*	5
Abschnitt/ Anhang (z.B. 03.01)	Absatz/Bild/ Tabelle/ Anmerkung	Kommentar art**	Kommentar (Begründung für Änderung)	Vorgeschlagene Textänderung
0=Sonstiges	(z.B. Bild 1)			
8. Bestimmung Restgaspotenzi al	1. Absatz	fachl.	Grundsätzlich kann die Verweilzeit nicht als der alleinige und größte Einflussfaktor auf die Höhe des Restgaspotenzials gesehen werden. Vielmehr kann nur eine Kombination aus Parametern (wie z.B. Anteil der flüchtigen Fettsäuren, Raumbelastung und oTS im Gärrest, TS und Fließfähigkeit, Gärtemperatur) eine Erklärung bieten. Dies sollte im ersten Absatz des Kapitels 8 berücksichtigt werden. (Vgl. VDLUFA-Schriftenreihe 68: „Was bestimmt das Restgaspotenzial von Gärresten? - Ergebnisse aus dem Monitoring der bayrischen Pilotbiogasanlagen“, F. Ebertseder, H.Heuwinkel, C.Krapf, M. Effenberger, Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft Institut für Landtechnik).	

Abb.-A 2: Stellungnahme der Arbeitsgruppe „Restgaspotential von Gärprodukten“ zur Novelle der VDI-Richtlinie 4630, Seite 2/7

<p>8. Bestimmung Restgaspotential</p>	<p>4. Absatz</p>	<p>fachl.</p>	<p>Die Umweltrelevanz und potentielle Emissionsgefahren von Methan lassen sich problemloser und mit höherer Relevanz aus den Versuchen mit 37°C (mesophile Vergärung) bzw. 55 °C (thermophile Vergärung) ableiten. (Vgl. REINHOLD,G.; GÖDEKE, K. Untersuchungen zum Restgaspotential landwirtschaftlicher Biogasanlagen - Wissensforum Spezialtag „Emissionsminderung bei Biogasanlagen“ im Rahmen der VDI Tagung Biogas 2013 – Tagungsunterlagen). Besonders unter Beachtung des sehr breiten angegebenen Temperaturbereichs von 20 °C ± 3°C (entspricht 17°C bis 23 °C) sind hier kaum vergleichbare und reproduzierbare Ergebnisse zu erwarten. Hierzu wären Ergebnisse wie sich dieser tolerierenden 6 °C auswirken erforderlich. Als alleinige Temperaturstufen sollten 37°C ± 2°C (bei mesophilen Verfahren) und 55 °C ± 1°C (bei thermophilen Verfahren) gewählt werden, da in Untersuchungen der Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft eine gute Beziehung zwischen den Werten für 37 und 20 °C besteht ($R^2 > 0,9$). Wenn dann z.B. ggf. 50 % Abschlag zu dem gemessenen Wert eingesetzt wird, brauchen die 1,5 % in der 3475 Blatt 4 nicht angegriffen zu werden. Die Werte wären schneller verfügbar (30 statt 60 Tage) und könnten parallel zur Effizienz- und Umweltkontrolle dienen.</p>	<p>Die gesamte Restgasmessung bei 20 °C sollte grundlegend überdacht werden, da sie keine reproduzierbaren Ergebnisse liefert und die doppelte Kapazität verbraucht.</p>
<p>8.1 Probenahme aus der Biogasanlage und Datenerfassung</p>	<p>1. Absatz</p>	<p>fachl.</p>	<p>Die Entnahme der Proben aus der letzten Fermentationstufe ist nicht exakt definiert, da die Einordnung des gasdicht abgedeckten Gärrestlager (GRL) - z.T. auch beheizt - unklar bleibt. Besser wäre hier den Überlauf aus dem letzten gasdicht abgedeckten Behälter zu wählen. Die Aufteilung aus drei Einzelproben ist hier wenig hilfreich. Wir empfehlen die Anlehnung an die VDLUFA – Methode Probenahme von Fermenter-Inhalten und Entnahme aus dem GRL.</p>	<p>Wir empfehlen die Anlehnung an die VDLUFA – Methode Probenahme von Fermenter-Inhalten und Entnahme aus dem GRL.</p>

Abb.-A 3: Stellungnahme der Arbeitsgruppe „Restgaspotential von Gärprodukten“ zur Novelle der VDI-Richtlinie 4630, Seite 3/7

<p>8.1 Probenahme aus der Biogasanlage und Datenerfassung</p>	<p>2. Absatz</p>	<p>fachl.</p>	<p>„Sollte sie [die Sammelprobe] Faserbestandteile enthalten, kann eine grobe Zerkleinerung dafür sorgen, dass für den Gärrest eine homogene und repräsentative Probe zur Verfügung steht.“ Die Zerkleinerung des Probenmaterials für den Gärversuch hat Einfluss auf den Gasertrag und Gärverlauf. Bei sehr grobem Material sollten deshalb größere Versuchsansätze gemacht werden.</p>	
<p>8.1 Probenahme aus der Biogasanlage und Datenerfassung</p>	<p>3. Absatz</p>	<p>fachl.</p>	<p>„Da das Restgaspotential in der Regel auf die an der Biogasanlage in dem jeweiligen Betriebszustand täglich/stündlich gebildete Biogasmenge bezogen wird, sind auch die Werte zur Biogas-/ Methanausbeute der Biogasanlage zu erfassen.“ Für die täglich/stündlich gebildete Biogasmenge ist ein Zeitbezug festzulegen.</p>	<p>Unser Vorschlag ist für die täglich/stündlich gebildete Biogasmenge, den Monatsmittelwert anzuwenden.</p>

Abb.-A 4: Stellungnahme der Arbeitsgruppe „Restgaspotential von Gärprodukten“ zur Novelle der VDI-Richtlinie 4630, Seite 4/7

8.2 Gäransatz	1. Absatz	fachl.	<p><i>„Falls Gärrest aus Feststofffermentierungsanlagen und Feststoff nach Separierung untersucht werden soll, ist dessen Vermischung mit Leitungswasser erforderlich, um in der Mischung einen Trockenrückstand (TR) von weniger als 10% zu erhalten.“</i></p> <p>Die grundsätzliche Notwendigkeit der Zugabe von Wasser ist nicht gegeben. Praxiserfahrungen der Bayerischen Landesanstalt für Landwirtschaft Institut für Landtechnik zeigen, dass nunmehr seit 2007 Restgaspotentiale von Gärresten, die auch einen Trockenmassegehalt von 10% überschreiten, bestimmt werden können. Diese Formulierung im VDI-Entwurf mag für bestimmte Messsysteme erforderlich sein, kann jedoch so allgemeingültig nicht in einer Richtlinie postuliert werden. Des Weiteren wird die geforderte Zugabe von „Leitungswasser“ in Frage gestellt. Unter Laborbedingungen, insbesondere, wenn noch Analysen durchgeführt werden, ist auf die Verwendung von destilliertem Wasser zu achten, damit eine Verschleppung / Interaktion mit Mineralien / Nährstoffen ausgeschlossen werden kann.</p> <p>Bei der Nutzung von Geflügelkot oder Abfällen kann es zum Beispiel zu einer beginnenden Hemmung im Gärsystem kommen. Durch die Zugabe von Wasser verändern sich die biologischen Rahmenbedingungen und es wird mehr Biogas freigesetzt. Das würde die tatsächlichen Verfahrenszustände verfälschen.</p>	
8.2 Gäransatz	1. Absatz	fachl.	<p><i>„Daher sollte der Gärtest [beim Batch-Gärtest] für die Bestimmung des Restgaspotenzials über eine festgelegte Dauer von 60 Tagen erfolgen (siehe VDI 3475 Blatt 4)“.</i></p> <p>Die Festlegung des Abbruchkriteriums von 60 Tagen würde dann auch für 37°C (mesophil) bzw. für 55°C (thermophil) gelten und wäre somit völlig überzogen (siehe Ausführungen zu Kapitel 8.1).</p>	

Abb.-A 5: Stellungnahme der Arbeitsgruppe „Restgaspotential von Gärprodukten“ zur Novelle der VDI-Richtlinie 4630, Seite 5/7

8.3 Auswertung	1. Absatz	fachl.	<p>Die Messgrößen im Labor sind Gas- und Gärrestvolumen bzw. -masse. Der Bezug auf „l N / kg oTM“, nur weil dies bisher bei Substratproben so erfolgte, ist nicht zielführend. Hier sind besonders Verwechslungen mit der auf „m³/kg oTS“ eingeführte Gasausbeute für Substrate und somit Fehlinterpretationen zu erwarten. Besser wäre ein Bezug auf die Substratmasse „l N / kg FM“. Damit würden auch alle aus den Probenahmen rührenden Unsicherheiten und Fehler der TM-Bestimmung eliminiert. Die Auswertung sollte mit Bezug zur Frischmasse des Gärsubstrates erfolgen um kontinuierliche und Batch-Ansätze vergleichbar zu gestalten. Die Verwendung und Sinnhaftigkeit der Bezugseinheit sollte klargestellt werden. Dabei ist zu beachten, wie bei Reinhold et al 2013 ja auch schon diskutiert, dass die Einheit „Normliter pro Kilogramm oTM“ zum Beispiel den Verlust der flüchtigen (noch vergärbaren) Anteile wie Fettsäuren unberücksichtigt lässt und somit ein Vergleich zu den flüchtigen Fettsäuren nicht ermöglicht. Hierzu wäre zusätzlich die Einheit „lN/kg FM“ anzuraten.</p>	Wir empfehlen Bezug auf die Substratmasse „l N / kg FM“.
----------------	-----------	--------	--	--

Abb.-A 6: Stellungnahme der Arbeitsgruppe „Restgaspotential von Gärprodukten“ zur Novelle der VDI-Richtlinie 4630, Seite 6/7

8.3 Auswertung	2. Absatz	fachl.	Die Bezugnahme zur täglichen Gasproduktion und die Errechnung dieser durch die Strommenge über den Wirkungsgrad ist kritisch einzustufen. Zum einen werden dabei etwaige Verluste wie z.B. über die Gasfackel nicht berücksichtigt. Zum anderen haben langjährige Messungen an verschiedenen BHKW nachgewiesen, dass die Herstellerangaben zum Wirkungsgrad und die tatsächlichen Wirkungsgrade eine erhebliche Differenz von bis zu 5% aufweisen. Das würde den Fehler der errechneten Bezugsgröße Gas potenzieren und eine Aussage damit nicht mehr seriös machen. Des Weiteren sollte bezüglich des heranzuziehenden Wirkungsgrads des BHKW noch ein Verweis eingefügt werden, dass dieser beim anlagenspezifischen CH4-Wert des Biogases zu Grunde zu legen ist. Anlagen, die Nachwachsende Rohstoffe vergären, haben in der Regel einen CH4-Wert von 50-55%. Datenblätter der BHKW-Lieferanten geben meistens entweder einen Wert von 60% oder von 50% an, was einen Unterschied von ca. 1% zur Folge hätte.	
8.3 Auswertung	2. Absatz	fachl.	Regelungen zu Gasproduktionsermittlung bei Biogas-Einspeiseanlagen fehlen gänzlich.	Die eichfähige Messung in der Biogaseinspeiseanlage als Datengrundlage sollte mit dem Methanschluß der Biogasaufbereitungsanlage gemäß Datenblatt des Lieferanten verrechnet werden.
8.3 Auswertung	3. Absatz	fachl.	Bei der Berechnung der täglichen Gärrestmenge (Gleichung 12) wird die Masse des täglich entstehenden Biogases ($m_{BG} = V_{BG} \cdot \rho_{BG}$) herangezogen. Welche Dichte des Biogases wird der Berechnung zugrunde gelegt?	

Abb.-A 7: Stellungnahme der Arbeitsgruppe „Restgaspotential von Gärprodukten“ zur Novelle der VDI-Richtlinie 4630, Seite 7/7

8.3 Auswertung	4. Absatz	fachl.	<p>Die Gleichung 13 ist inhaltlich falsch. Hier wäre eine Multiplikation richtig. Insgesamt könnte mit folgender Berechnung das Ergebnis jedoch einfacher (ohne TS Bezug) und somit auch fehlerfreier und besser übertragbar ermittelt werden. Durch den Bezug der im Labor gemessenen Gasmenge auf das Volumen des Gärsubstrates und der in der Praxisanlage produzierten Gasmenge auf die täglich anfallende Gärrestmenge (die nach Gleichung 12 ermittelbar ist) entfällt die Ermittlung der TS-Gehalte, was besonders bei kleinen Probemengen im HBT (Hohenheimer Biogasertragstest) kritisch zu bewerten ist. Zusätzlich ließe sich jeweils wählen, ob die Ebene Methan oder Biogas gewählt wird. Grundsätzlich müssen die Berechnungen auf die tatsächlich in flüssiger Form vorliegende Substratmenge bezogen werden und nicht, wie zum Teil üblich, auf die zugeführte Biomasse. Weiterhin werden separierte Gärreste oft vor den Lagerbehälter entnommen und verändern somit die Bezugsmasse. Dies sollte für Aufbereitungsverfahren von Gärresten erwähnt und berücksichtigt werden.</p>	$V_{RG} \left[\frac{m^3}{d} \right] = V_{SRG} \left[\frac{m^3_{Methan}}{m^3_{GR}} \right] * m_{GR} \left[\frac{m^3_{GR}}{d} \right]$
Anhang 1 Biogas- und Stromproduktion der Biogasanlage zur Bestimmung des Restgaspotenzials	Bild I 1. Bestimmung und Bewertung des Restgaspotenzials	fachl.	<p>Die Beispieltabelle in Anhang I zur Erhebung verfahrenstechnischer Daten der Biogasanlage ist unserer Auffassung nach nicht praktikabel und fehlerhaft. Um Fehler zu vermeiden muss die Tabelle ergänzt und angepasst werden. Zur Erhebung der verfahrenstechnischen Anlagen-Daten erachten wir eine Liste als dienlicher, die die Messzeitpunkte, entsprechende Messwerte und definierte Messstellen eindeutig vorgibt.</p>	<p>Die durchschnittliche Gastemperatur ist am Gasmengenzähler zu messen und die Messstelle eindeutig zu benennen. Beim Gasverbrauch [m³] muss ein zeitlicher Bezug hinzugefügt werden. Die Stromproduktion am BHKW ist in die Einheit „kWh“ zu berichtigen. Der Begriff Faulsubstratmenge ist nicht eindeutig und auch in den Begriffsbestimmungen nicht definiert. Ist hier Gärsubstrat oder Gärrest gemeint? Flüssige Substrate sollten üblicherweise in „m³“ und feste in „t“ angegeben werden.</p>