



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Abschlussbericht Juni 2013

Methanverluste bei landwirtschaftlichen Biogasanlagen



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Auftraggeber:

Bundesamt für Energie BFE
Forschungsprogramm CH-3003 Bern
www.bfe.admin.ch

Auftragnehmer:

Agroscope Reckenholz-Tänikon ART
Forschungsgruppe Bau, Tier und Arbeit
Tänikon 1
CH-8356 Ettenhausen
www.agroscope.ch

Autoren:

Markus Sax, Markus.Sax@agroscope.admin.ch
Matthias Schick, Matthias.Schick@agroscope.admin.ch
Simon Bolli
Alina Soltermann-Pasca
Ludo Van Caenegem

Agroscope Reckenholz-Tänikon ART

BFE-Bereichsleiter: Sandra Hermle

BFE-Programmleiter:

BFE-Vertrags- und Projektnummer: 154361 / 103310

Für den Inhalt und die Schlussfolgerungen ist ausschliesslich der Autor dieses Berichts verantwortlich.



Inhaltsverzeichnis

1	Problemstellung und Projektübersicht	10
1.1	Ziele	10
1.2	Methodik	10
1.2.1	Fragebogen	10
1.2.2	Auswahl der Betriebe für den CH ₄ Messungen	10
1.2.3	Identifikation der Methanverlustquellen	11
1.2.4	Entwicklung einer Messmethode für Gärrestemissionen	11
1.2.5	Quantitative Erfassung der Gärrestmethanemissionen	11
1.2.6	Hohenheimer Restpotentialtest	11
1.2.7	Massnahmen zur Reduktion der Methanverluste	11
2	Literatur	11
2.1	Emissionsquellen	11
2.1.1	Vorgrube	11
2.1.2	Über-/Unterdrucksicherung	12
2.1.3	Stützluftsystem	12
2.1.4	Membrandächer	12
2.1.5	Behälterkrone	13
2.1.6	Rührwerke	14
2.1.7	Eintragssysteme	15
2.1.8	Seildurchführungen	15
2.1.9	Offene Gärrestlager	15
2.1.10	Blockheizkraftwerk	16
2.1.11	Aufbereitung Biogas auf Erdgasqualität	16
2.2	Relative Bedeutung der Emissionsquellen	16
3	Versuche	18
3.1	Befragung	18
3.1.1	Methoden	18
3.1.2	Ergebnisse	18
3.2	Auswahl der untersuchten Biogasanlagen zur qualitativen und quantitativen Erfassung	22
3.2.1	Qualitative Erfassung	22
3.2.2	Quantitative Erfassung	25
3.3	Methoden der qualitativen Erfassung der Methanemissionen	28

3.3.1	Optische Erfassung mit der GasCam-Methode	28
3.3.2	Versuchsergebnisse der qualitativen Erfassung.....	29
3.3.3	Diskussion - Relative Bedeutung der qualitativ erfassten Emissionsquellen	50
3.4	Methoden der Quantitativen Erfassung der Gärrestemissionen	51
3.4.1	Messkonzept.....	51
3.4.2	Versuchsergebnisse der quantitativen (Durchflussskammer) Erfassung.....	56
3.4.3	Emissionen in der Durchflussskammer im Vergleich zum Restgaspotential	69
3.4.4	Trendanalyse	75
3.5	Quantitative Erfassung der Emissionen aus der Vorgrube	78
3.5.1	Methode	78
3.5.2	Versuchsergebnisse der quantitativen Emissionen aus der Vorgrube	79
4	Diskussion - Relative Bedeutung der Emissionen aus Gärresten und der Vorgrube	82
4.1	Massnahmen zur Reduktion der Emissionen.....	85
4.1.1	Bauliche Massnahmen.....	85
4.1.1	Organisatorische Massnahmen (Wartung)	85
4.1.2	Verfahrenstechnische Massnahmen	87
4.1.3	Klimatische Massnahmen	87
5	Schlussfolgerung.....	88
5.1	Methanemissionen aus Gärresten	88
5.2	Methanemissionen aus der Vorgrube	89
5.3	Messmethodik.....	90
5.4	Bedeutung für die Praxis	91
5.5	Ausblick und weiterer Forschungsbedarf	91
6	Literatur	92

Zusammenfassung

Methanverluste belasten nicht nur die Umwelt, sie erhöhen auch das Sicherheitsrisiko der Biogasanlage und bedeuten wirtschaftliche Verluste. Ihre Reduktion ist das Ziel dieser Arbeit im Auftrag des Bundesamts für Energie. Der Bericht dokumentiert aufgrund einer Befragung die technischen und verfahrenstechnischen Merkmale von 38 landwirtschaftlichen Biogasanlagen. Weiterhin werden Methanverlustquellen bei 12 Biogasanlagen evaluiert. Ferner liefert der Bericht quantitative Angaben zu Methanemissionen aus Gärresten bei drei Betrieben sowie punktuell von einer Vorgrube, unter Praxis- und Laborbedingungen. Einflussgrößen wurden analysiert und Massnahmen zur Verlustminderung abgeleitet.

Eine Befragung auf 38 landwirtschaftlichen Biogasanlagen zeigt die bauliche, technische und verfahrenstechnische Heterogenität dieser Anlagen auf. Lediglich in 15 Fällen handelt es sich um mehrstufige Anlagen mit Fermenter und Nachgärer. Die erhobenen Daten aus der Befragung dienten als Grundlage für die Auswahl von zwölf repräsentativen Biogasanlagen, die mit einer Gas-Kamera (GasCam) auf Methanverluste untersucht wurden. Bei allen ausgewählten Biogasanlagen konnten Gasleckagen gefunden werden. Die Anzahl Leckagen pro Anlage war jedoch sehr unterschiedlich. Fast die Hälfte der Anlagen wiesen Methanverluste im Bereich des Übergangs der Gashaube zur Behälterkrone auf. Zwei Drittel der untersuchten Betriebe haben bereits Erfahrungen mit Gasverlusten wegen beschädigter Membrane oder deren Ablösung von der Behälterwand gemacht. Ebenfalls traten oft Methanverluste bei Wanddurchdringungen oder Aussparungen auf. Die meisten festgestellten Verluste sind auf konstruktive Mängel oder unzureichende Wartung zurückzuführen.

Mit der GasCam-Methode können Emissionsquellen auf 12 Betrieben detektiert, jedoch nicht quantifiziert werden. Die relative Bedeutung einzelner Emissionsquellen lässt sich mit Hilfe einer punktuellen Methankonzentrationsbestimmung vor Ort sowie einer Leckvermessung beurteilen. Besonders gross ist das Emissionspotential bei der Gashaube und dem Überdruckventil. Bei einer Membranbeschädigung, oder deren Ablösung von der Behälterkrone, können grosse Biogasmengen freigesetzt werden. Bei Überdruckventilen können neben betriebsbedingten Verlusten infolge einer Biogasüberproduktion auch noch erhebliche Methanverluste durch Funktionsstörungen im Ventil auftreten.

Neben diesen punktuellen Emissionsquellen, sind Flächenquellen wie Gärrestlager und Vorgrube, hinsichtlich Methanemissionen von grosser Bedeutung. Zur Quantifizierung der Gärrestemissionen, nach den Vergärungs- oder Behandlungsstufen Fermenter, Nachgärer und Separator (Auftrennung in flüssige und feste Gärreste), wurde die Methode der dynamischen Durchflussskammer verwendet. Die Messungen fanden unter praxisnahen Bedingungen bei drei Biogasanlagen während je vier Jahreszeiten statt. Parallel zu den Messungen wurde von jeder Gärrestprobe das Methanrestpotential mit Hilfe des Hohenheimer Biogasertragstests (HBT) unter Laborbedingungen bestimmt. Die in der Durchflussskammer gemessenen Emissionen betrugen bei den Fermenter-Gärresten 2 bis 37 %, bei den Gärresten aus dem Nachgärer 2 bis 24 %, bei den separierten flüssigen Gärresten 3 bis 37 % und bei den separierten festen Gärresten 0 bis 20 % des Methanrestpotentials. Die Emissionen aus den Fermenter-Gärresten belaufen sich auf etwa 2 % der gesamten Gasproduktion der Anlage. Bei den Gärresten aus dem Nachgärer waren es etwa 0.5 %, bei den separierten flüssigen Gärresten ebenfalls 0.5 % und bei den separierten festen Gärresten weniger als 0.1 %. Die Methanemissionen wurden erwartungsgemäss von der Gärresttemperatur beeinflusst. Bei den separierten festen Gärresten konnten im Winter keine Emissionen gemessen werden. Die Gärresttemperatur alleine kann die grossen Unterschiede der Emissionsraten innerhalb derselben Anlage und zwischen den Anlagen nicht erklären. Zwischen den Methanemissionen und dem organischen Trockensubstanzgehalt der Gärreste konnte keine eindeutige Beziehung festgestellt werden.

Messungen an einer zwangsentlüfteten Vorgrube während einzelner Sommertage zeigten sehr unterschiedliche Emissionswerte. Die Bandbreite betrug 1 bis 18 Nm³ Methan pro Tag. Der Mittelwert

entsprach 0.4 % der gesamten Methan-Tagesproduktion. Besonders hoch war die Methankonzentration in der Abluft aus der Vorgrube, während dem Rühren. Eine Hochrechnung der Emissionen auf Jahresbasis ist aufgrund der beschränkten Messdauer, dem sehr unterschiedlichen Substrateinsatz und der einen gemessenen Anlage derzeit nicht möglich.

Die häufigsten punktuellen Methanverlustquellen bei Biogasanlagen, können durch eine sorgfältige Planung und Ausführung sowie auch durch eine angemessene Wartung der Anlage reduziert werden. Insbesondere ist die Dauerhaftigkeit der Verbindung zwischen Gashaube und Behälterkrone optimiert auszuführen. Da Beton nicht widerstandsfähig gegen Schwefelsäure ist, sind im Gasbereich Bauteilschutzmassnahmen vorzusehen. Die wirksamste Massnahme zur Reduktion der Methanemissionen aus Gärresten ist die Verringerung des Methanrestpotentials. Lange Verweilzeiten und zweistufige Anlagen mit Fermenter und Nachgärer ermöglichen eine grössere Methanausbeute bei der Vergärung. Durch eine gasdichte Abdeckung des flüssigen Gärrestlagers mit Nutzung des anfallenden Biogases, lassen sich Methanemissionen während der Lagerung vermeiden. Eine Verringerung der gesamten Methanemissionen der Gärreste, durch eine Separierung in eine flüssige und feste Phase, konnte nicht festgestellt werden. Emissionen aus festen Gärresten lassen sich nur wirksam verhindern, wenn diese in einer geschlossenen und zwangsentlüfteten Halle gelagert werden. Angesichts des geringen Anteils der festen Gärreste an den gesamten Methanemissionen, ist diese Massnahme jedoch nicht als prioritär zu betrachten.

Methanemissionen aus der Vorgrube lassen sich weitgehend durch eine Zwangsentlüftung und die Rückführung der Abluft an das BHKW verhindern. Da zurzeit die Emissionsrate von Vorgruben auf Jahresbasis nicht bekannt ist und eine solche Abgas-Rückführung mit erheblichem technischem Aufwand und Sicherheitsrisiken verbunden ist, kann der Gesamtnutzen dieser Massnahme momentan nicht beurteilt werden.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung. 1: Vorgehen und Kriterien für die Typisierung der Biogasanlagen (Bolli <i>et al.</i> , 2010).....	22
Abbildung 2: Übersicht der zehn meist eingesetzten Substrate auf den 38 untersuchten Biogasanlagen (Bolli <i>et al.</i> , 2010)	26
Abbildung 3: Anteil der Einzelkomponenten in % an der Jahresmischung (2009) bei der Biogasanlage 5 im Vergleich zum durchschnittlichen Komponentenanteil aller Betriebe (Bolli <i>et al.</i> , 2010).....	27
Abbildung 4: Anteil der Einzelkomponenten in % der Jahresmischung (2009) bei der Biogasanlage 13 im Vergleich zum durchschnittlichen Komponentenanteil aller Betriebe (Bolli <i>et al.</i> , 2010).....	27
Abbildung 5: Anteil der Einzelkomponenten in % der Jahresmischung (2009) bei der Biogasanlage 21 im Vergleich zum durchschnittlichen Komponentenanteil aller Betriebe (Bolli <i>et al.</i> , 2010).....	28
Abbildung 6: GasCam in Einsatz bei einer Biogasanlage.	29
Abbildung 7: Aussagen der befragten Anlagenbetreiber zu Erfahrungen mit Membranbeschädigungen durch Risse oder Löcher je nach Art der Membran	41
Abbildung 8: Schematische Darstellung der Vorgehensweise bei der Probenahme von Gärresten ...	51
Abbildung 9: Schematische Darstellung des Versuchsaufbaus zur Messung der Methanemissionen aus Gärresten (dynamische Durchflussskammer).....	52
Abbildung 10: Gesamte Messeinrichtung zur Quantifizierung der Methanemissionen aus Gärresten	53
Abbildung 11: Messgeräteaufbau im Innern des Messwagens	54
Abbildung 12: Glaskolben-Fermenter im Batch-Verfahren: 1) Glasspritze; 2) Stopfen; 3) Gärsupstrat; 4) Öffnung zur Gasanalyse; 5) Schlauchklemme; 6) Graduierung 1/1; 7) Gasraum; 8) Gleit und Dichtmittel.....	55
Abbildung 13: Rotoraufbau im Trockenschrank des HBT.....	56
Abbildung 15: Methanemissionen im Sommer 2011 gemessen in der dynamischen Durchflussskammer, Biogasanlage 21, Gärrestproben separiert flüssig und fest.....	57
Abbildung 16: Methanemissionen im Sommer 2011 gemessen in der dynamischen Durchflussskammer Biogasanlage 13, Gärrestproben aus dem Fermenter und Nachgärer	58
Abbildung 17: Methanemissionen im Sommer 2011 gemessen in der dynamischen Durchflussskammer, Biogasanlage 13, Proben separiert flüssig und fest	58
Abbildung 18: Methanemissionen im Sommer 2011 gemessen in der dynamischen Durchflussskammer Biogasanlage 5, Proben aus dem Fermenter und Nachgärer	59
Abbildung 19: Methanemissionen im Sommer 2011 gemessen in der dynamischen Durchflussskammer, Biogasanlage 5, Proben separiert flüssig und fest	60
Abbildung 20: Methanemissionen im Herbst 2011 gemessen in der dynamischen Durchflussskammer , Biogasanlage 21, Proben aus dem Fermenter und Nachgärer	60
Abbildung 21: Methanemissionen im Herbst 2011 gemessen in der dynamischen Durchflussskammer, Biogasanlage 21, Proben separiert flüssig und fest	61
Abbildung 22: Methanemissionen im Herbst 2011 gemessen in der dynamischen Durchflussskammer, Biogasanlage 13, Proben aus dem Fermenter und Nachgärer	61
Abbildung 23: Methanemissionen im Herbst 2011 gemessen in der dynamischen Durchflussskammer, Biogasanlage 13, Proben separiert flüssig und fest	62
Abbildung 24: Methanemissionen im Winter 2012 gemessen in der dynamischen Durchflussskammer , Biogasanlage 13, Proben aus dem Fermenter und Nachgärer	63
Abbildung 25: Methanemissionen im Winter 2012 gemessen in der dynamischen Durchflussskammer, Biogasanlage 13, Proben separiert flüssig und fest	63
Abbildung 26: Methanemissionen im Winter 2012 gemessen in der dynamischen Durchflussskammer, Biogasanlage 5, Proben aus dem Fermenter und Nachgärer	64

Abbildung 27: Methanemissionen im Winter 2012 gemessen in der dynamischen Durchflussskammer, Biogasanlage 5, Proben separiert flüssig und fest	64
Abbildung 28: Methanemissionen im Winter 2012 gemessen in der dynamischen Durchflussskammer, Biogasanlage 13, Proben aus dem Fermenter und Nachgärer	65
Abbildung 29: Methanemissionen im Winter 2012 gemessen in der dynamischen Durchflussskammer, Biogasanlage 13, Proben separiert flüssig und fest	65
Abbildung 30: Methanemissionen im Frühling 2012 gemessen in der dynamischen Durchflussskammer, Biogasanlage 5, Proben aus dem Fermenter und Nachgärer	66
Abbildung 31: Methanemissionen im Frühling 2012 gemessen in der dynamischen Durchflussskammer, Biogasanlage 5, Proben separiert flüssig und fest	66
Abbildung 32: Methanemissionen im Frühling 2012 gemessen in der dynamischen Durchflussskammer, Biogasanlage 21, Proben aus dem Fermenter und Nachgärer	67
Abbildung 33: Methanemissionen im Frühling 2012 gemessen in der dynamischen Durchflussskammer, Biogasanlage 21, Proben separiert flüssig und fest	67
Abbildung 34: Methanemissionen im Frühling 2012 gemessen in der dynamischen Durchflussskammer , Biogasanlage 5, Proben aus dem Fermenter und Nachgärer	68
Abbildung 35: Methanemissionen im Frühling 2012 gemessen in der dynamischen Durchflussskammer, Biogasanlage 5, Proben separiert flüssig und fest	68
Abbildung 36: Beziehung zwischen den CH ₄ -Emissionen und der Gärresttemperatur für die Fermenter-, Nachgärer-, separierte flüssige und feste Gärrestprobe	76
Abbildung 37: Beziehung zwischen den CH ₄ -Emissionen und der Aussentemperatur für die Fermenter-, Nachgärer-, separierte flüssige und feste Gärrestprobe	77
Abbildung 39: Schematische Darstellung der Messeinrichtung zur Quantifizierung der Methanemissionen aus der belüfteten Vorgrube.	78
Abbildung 40:a) Methankonzentration in der Abluft der Vorgrube. Wegen des beschränkten Messbereichs des NDIRs konnten die Spitzenwerte (>3700 ppm) nicht aufgezeichnet werden. b) Die Methankonzentration in der Abluft der Vorgrube steigt nach Einschalten des Rührwerks innerhalb einer Minute auf Werte über 3700 ppm.	80
Abbildung 41: Am 29.07. und 30.07.2011 wurde mehrmals pro Tag gerührt, was zu höheren Methankonzentrationen führte.	80
Abbildung 42: Verlauf der Methankonzentration in der Abluft der Vorgrube. Die Spitzenwerte wurden mit einem Handgerät aufgezeichnet.	81

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Zusammenfassung der Literaturdaten bezüglich CH ₄ -Emissionen (Verweis Kap. 3.1.1 bis 3.1.9)	17
Tabelle. 2: Überblick über technische und verfahrenstechnische Daten der befragten Biogasanlagen (Bolli <i>et al.</i> , 2010)	20
Tabelle. 3: Überblick über Gasspeichersysteme und sonstige verfahrenstechnische Daten der befragten Biogasanlagen (Bolli <i>et al.</i> , 2010)	21
Tabelle 4: Übersicht über technische und verfahrenstechnische Angaben der Versuchsanlagen für die qualitativen Messungen mit der GasCam® (Bolli <i>et al.</i> , 2010)	24
Tabelle 5: Übersicht der technischen Daten und Fermentationsparameter ausgewählter Biogasanlagen (Bolli <i>et al.</i> , 2010)	25
Tabelle 6: Übersicht über die Anzahl eingesetzter Substrate aus der Liste der zehn häufigsten Substrate. Der prozentuale Anteil bezieht sich auf die Jahresmischung (Bolli <i>et al.</i> , 2010).	26
Tabelle 7: Überblick über die detektierten Emissionsquellen der zwölf untersuchten BGA mit Hilfe der GasCam® unterteilt in Kategorien (Bolli <i>et al.</i> , 2010)	30
Tabelle 8: Schwachstellen- und Ursachenanalyse der detektierten Verlustquellen im Bereich der Behälterkrone	32
Tabelle 9: Schwachstellen- und Ursachenanalyse der detektierten Verlustquellen im Bereich von Rohrdurchführungen in Gärbehälter	36
Tabelle 10: Schwachstellen- und Ursachenanalyse der detektierten Verlustquellen im Bereich der Rührwerksverstellung	38
Tabelle 11: Schwachstellen- und Ursachenanalyse der detektierten Verlustquellen im Bereich von offenen Fermenterüberläufen	39
Tabelle 12: Schätzung der Methanverluste über offene Fermenterüberläufe der untersuchten BGAs aufgrund der gemessenen CH ₄ -Konzentrationen und der Abluftströme (Q)	40
Tabelle 13: Schwachstellen- und Ursachenanalyse der detektierten Verlustquellen im Bereich der Schaugläser	42
Tabelle 14: Schwachstellen- und Ursachenanalyse der detektierten Verlustquellen im Bereich des Rührwerkes	43
Tabelle 16: Geschätzte Methanverluste über die Doppelmembranen der untersuchten Biogasanlagen aufgrund der gemessenen CH ₄ -Konzentrationen und der Luftumwälzung Q	45
Tabelle 17: Schwachstellen- und Ursachenanalyse der detektierten Verlustquellen im Bereich des Überdruckventils	46
Tabelle 18: Schwachstellen- und Ursachenanalyse der detektierten Verlustquellen im Bereich des Feststoffeintrags	48
Tabelle 19: Schwachstellen- und Ursachenanalyse der detektierten Verlustquellen im Bereich der Revisionsöffnung	49
Tabelle 20: Relative Bedeutung der mit der GasCam erfassten Emissionsquellen	50
Tabelle 21: TS- und oTS-Gehalte der Gärreste aus den Sommermessungen der BGA 21	58
Tabelle 22: TS- und oTS-Gehalte der Gärreste aus den Sommermessungen der BGA 13	59
Tabelle 23: TS- und oTS-Gehalte der Gärreste aus den Sommermessungen der BGA 5	60
Tabelle 24: TS- und oTS-Gehalte der Gärreste aus den Herbstmessungen der BGA 21	61
Tabelle 25: TS- und oTS-Gehalte der Gärreste aus den Herbstmessungen der BGA 13	62
Tabelle 26: TS- und oTS-Gehalte der Gärreste aus den Wintermessungen der BGA 13	63
Tabelle 27: TS- und oTS-Gehalte der Gärreste aus den Wintermessungen der BGA 5	64
Tabelle 28: TS- und oTS-Gehalte der Gärreste aus den Wintermessungen der BGA 13	65

Tabelle 29: TS- und oTS-Gehalte der Gärreste aus den Frühlingmessungen der BGA 5	66
Tabelle 30: TS- und oTS-Gehalte der Gärreste aus den Frühlingmessungen der BGA 21	67
Tabelle 31: TS- und oTS-Gehalte der Gärreste aus den Frühlingmessungen der BGA	68
Tabelle 32: Vergleich der Mittelwerte der spezifischen Methanemissionen pro Kilogramm organischer Trockensubstanz der BGA 21 aus der Durchflussskammer und im Labor (HBT).....	69
Tabelle 33: Vergleich der Mittelwerte der spezifischen Methanemissionen pro Kilogramm organischer Trockensubstanz der BGA 13 aus der Durchflussskammer und im Labor (HBT).....	70
Tabelle 34: Vergleich der Mittelwerte der spezifischen Methanemissionen pro Kilogramm organischer Trockensubstanz der BGA 5 aus der Durchflussskammer und im Labor (HBT).....	70
Tabelle 35: Vergleich der Mittelwerte der spezifischen Methanemissionen pro Kilogramm organischer Trockensubstanz der BGA 21 aus der Durchflussskammer und im Labor (HBT).....	71
Tabelle 36: Vergleich der Mittelwerte der spezifischen Methanemissionen pro Kilogramm organischer Trockensubstanz der BGA 13 aus der Durchflussskammer und im Labor (HBT).....	71
Tabelle 37: Vergleich der Mittelwerte der spezifischen Methanemissionen pro Kilogramm organischer Trockensubstanz der BGA 21 aus der Durchflussskammer und im Labor (HBT).....	72
Tabelle 38: Vergleich der Mittelwerte der spezifischen Methanemissionen pro Kilogramm organischer Trockensubstanz der BGA 13 aus der Durchflussskammer und im Labor (HBT).....	72
Tabelle 39: Vergleich der Mittelwerte der spezifischen Methanemissionen pro Kilogramm organischer Trockensubstanz der BGA 5 aus der Durchflussskammer und im Labor (HBT).....	73
Tabelle 40: Vergleich der Mittelwerte der spezifischen Methanemissionen pro Kilogramm organischer Trockensubstanz der BGA 13 aus der Durchflussskammer und im Labor (HBT).....	73
Tabelle 41: Vergleich der Mittelwerte der spezifischen Methanemissionen pro Kilogramm organischer Trockensubstanz der BGA 5 aus der Durchflussskammer und im Labor (HBT).....	74
Tabelle 42: Vergleich der Mittelwerte der spezifischen Methanemissionen pro Kilogramm organischer Trockensubstanz der BGA 21 aus der Durchflussskammer und im Labor (HBT).....	74
Tabelle 43: Vergleich der Mittelwerte der spezifischen Methanemissionen pro Kilogramm organischer Trockensubstanz der BGA 5 aus der Durchflussskammer und im Labor (HBT).....	75
Tabelle 44: CH ₄ -Emissionen aus der Vorgrube an 19 auf einander folgenden Tagen (27.07. – 14.08.2011).	79
Tabelle 45: CH ₄ -Emissionen aus der Vorgrube an fünf Tagen in 2012.....	81
Tabelle 46: Biogasproduktion, Fermentervolumen und hydraulische Verweilzeit pro Biogasanlage ...	82
Tabelle 47: Anteil der gemessenen Methanemissionen aus den Fermenter-Gärresten an der gesamten Methanproduktion während der verschiedenen Messperioden.	83
Tabelle 48: Anteil der gemessenen Methanemissionen aus den Nachgärer-Gärresten an der gesamten Methanproduktion während der verschiedenen Messperioden.	83
Tabelle 49: Anteil der gemessenen Methanemissionen aus den flüssigen Gärresten nach Separierung an der gesamten Methanproduktion während der verschiedenen Messperioden.....	84
Tabelle 50: Anteil der gemessenen Methanemissionen aus den festen Gärresten nach Separierung an der gesamten Methanproduktion während der verschiedenen Messperioden.....	84
Tabelle 51: Anteil der Methanemissionen (Mittelwert) aus der Vorgrube an der gesamten Methanproduktion während einzelner Tage in Juli/August 2011 und 2012.....	85
Tabelle 52: Bauliche und technische Massnahmen	86
Tabelle 53: Technische Massnahmen (Wartung)	86
Tabelle 54: Verfahrenstechnische Massnahmen.....	87
Tabelle 55: Klimatische Massnahmen	87
Tabelle 56: Methanemissionen aus Gärresten. Messergebnisse und Angaben aus der Literatur.....	89

Tabelle 57: Methanemissionen aus der Vorgrube. Messergebnisse und Angaben aus der Literatur.. 90

Abkürzungsverzeichnis

ART	Agroscope Reckenholz Tänikon
BFE	Bundesamt für Energie
BGA	Biogasanlage
BHKW	Blockheizkraftwerk
CO ₂ -Äqu/kWh	CO ₂ Äquivalent/ Kilowattstunde
DIN	Deutsches Institut für Normung
DFK	Durchflussskammer
EPDM	Ethylen-Propylen-Dien-Monomer
HBT	Hohenheimer Biogasertragstest
HL	Halbleiter
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
IR	Infrarot
KEV	Kostendeckende Einspeisevergütung
KWK	Kraft-Wärme-Kopplung
LW-Bonus	Landwirtschaftsbonus (im Rahmen der KEV)
NDIR	Nichtdispersiver Infrarot (-Sensor)
PE	Polyethylen
PVC	Polyvinylchlorid
UEG	Untere Explosionsgrenze
Vol.-%	Volumenprozent
d.h.	Das heisst
O ₂	Sauerstoff
m ³	Kubikmeter
CH ₄	Methan
Nm ³	Normal Cubic Meter
h ⁻¹	Wasserstoff Isotop
TS	Trockensubstanz
oTS	Organische Trockensubstanz
ppm	Parts Per Million

1 Problemstellung und Projektübersicht

Methanverluste belasten nicht nur die Umwelt, sie erhöhen auch das Sicherheitsrisiko der Biogasanlage und führen zu wirtschaftlichen Verlusten.

Methanverlustquellen, punktuell und flächenmässig, sind wegen der Komplexität der Anlagen und der Lagerung von Substraten und Gärresten im Freien nicht einfach zu lokalisieren. Noch schwieriger ist die Quantifizierung der Emissionen bei stark wechselnden Produktions- und Klimabedingungen. Damit Massnahmen zur Verhinderung oder Reduktion der Emissionen nach ihrem Kosten-Nutzen-Verhältnis priorisiert werden können, sind die einzelnen Verlustquellen in Relation zur gesamten produzierten Methanmenge zu setzen.

1.1 Ziele

- Relevante Methanverlustquellen bei landwirtschaftlichen Biogasanlagen sind identifiziert und das Verlustpotential näherungsweise bestimmt.
- In Abhängigkeit von der Relevanz der einzelnen Methanverlustquellen ist eine der nachfolgenden Quellen systematisch quantifiziert:
 - o Flächenquellen (Vorgrube, Gärrestlager, Substratlager)
 - o Leckagen innerhalb der Biogasprozesskette
 - o Methanschlupf bei der Verwertung von Biogas in einem BHKW und/oder bei der Gasaufbereitung zu Biomethan
- Bauliche, verfahrenstechnische, organisatorische und klimatische Parameter sind als Einflussgrössen auf die Methanverluste erhoben.
- Bauliche, verfahrenstechnische und organisatorische Massnahmen zur Minderung von Methanverlusten sind abgeleitet und daraus Empfehlungen für die Praxis formuliert.

1.2 Methodik

1.2.1 Fragebogen

Zur Kategorisierung der Biogasanlagen in der Schweiz wurde eine detaillierte Datenaufnahme auf 38 landwirtschaftlichen Biogasanlagen durchgeführt. Die Befragung von Biogasanlagebetreibern in der Schweiz hatte folgende Ziele:

- Überblick über landwirtschaftliche Biogasanlagen in der Schweiz in Bezug auf Dimension der Anlage, Verfahrenstechnik, Anlagen- und Substratmanagement
- Kategorisierung der Anlagen aufgrund der erhobenen Daten
- Sammeln von Erfahrungen der Anlagenbetreiber bezüglich Gasverlusten in Biogasanlagen
- Auswahl von geeigneten Messbetrieben auf Basis der Kategorisierung

1.2.2 Auswahl der Betriebe für den CH₄ Messungen

Als Grundlage für die Auswahl der Betriebe dienten die erhobenen Daten aus der Befragung. Die Betriebe wurden in sechs Grundtypen eingeteilt. Von jedem Typ wurde 2010 und 2011 jeweils ein Betrieb auf Gasverluste untersucht (qualitative Erfassung). Für die quantitative Erfassung der Methanverluste wurden drei vergleichbare Betriebe ausgewählt.

1.2.3 Identifikation der Methanverlustquellen

Zur Identifikation der verschiedenen Emissionsquellen wurde eine Gas-Kamera, basierend auf der Infrarot-Spektro-Radiometrie, eingesetzt. Mit dieser Kamera können aus relativ grosser Distanz und mit angemessenem Zeitaufwand, die Emissionen sichtbar gemacht werden. Auch schwer zugängliche Orte wie Behälterabdeckungen lassen sich untersuchen. Die emittierte Methanmenge kann mit dieser Methode nicht quantifiziert werden.

1.2.4 Entwicklung einer Messmethode für Gärrestemissionen

Eine Quantifizierung der Methanemissionen bedingt neben der Messung der Methankonzentration auch die Bestimmung des Volumenstroms des Gasgemisches. Um den Volumenstrom zuverlässig zu messen, müssen zwei Bedingungen erfüllt sein: die Emissionsquelle muss ganz genau lokalisiert und von der Umgebung abgeschirmt werden. Da das Abschirmen der meisten Punktquellen, ohne die Ergebnisse stark zu fälschen, aus praktischen Gründen nicht möglich war, wurde darauf verzichtet und die Quantifizierung lediglich bei den Flächenquellen mit Gärresten und bei der Vorgrube durchgeführt. Für die Bestimmung der Gärrestemissionen unter möglichst praxisnahen Bedingungen wurde eine dynamische Durchflussskammer entwickelt. Die Messungen unter kontrollierten Bedingungen erlauben, die Emissionen in mathematischen Modellen zu parametrisieren.

1.2.5 Quantitative Erfassung der Gärrestmethanemissionen

Die Gärrestemissions- Messungen fanden auf drei Biogasanlagen während vier Jahreszeiten statt. Im Sommer 2011 und 2012 wurden während einer kurzen Zeit die Methanemissionen von einer zwangsentlüfteten Vorgrube bei einer 4. Biogasanlage erfasst

1.2.6 Hohenheimer Restpotentialtest

Parallel zu den Messungen in der dynamischen Durchflussskammer, wurde an der Universität Hohenheim mit Hilfe des Hohenheimer Biogasertragstests (HBT), von jeder Gärrestprobe das Restgaspotential bestimmt. Der HBT basiert auf einem Batch-Verfahren, wobei die Gärreste erneut einer Vergärung unter optimalen Bedingungen ausgesetzt werden. Dabei wird der Gärprozess möglichst praxisgetreu unter Laborbedingungen nachempfunden.

1.2.7 Massnahmen zur Reduktion der Methanverluste

Aus den Erkenntnissen des Gascam-Screenings von 12 Biogasanlagen und der Gärrestemissionsmessungen in der Durchflussskammer sowie auch unter Laborbedingungen wurden bauliche, technische und verfahrenstechnische Massnahmen zur Reduktion der Methanverluste abgeleitet.

2 Literatur

2.1 Emissionsquellen

Die Verlustquellen von Biogasanlagen werden sowohl als Emissionen als auch als Methanschluß bezeichnet. Der Gesamtschluß „setzt sich zu 88% aus Verlusten des Produktionsprozesses und zu 10 bzw. 2 % in Folge von Aus und Anfahrvorgängen zusammen“ (Baum et al., 2008).

2.1.1 Vorgrube

Laut Hafermann *et al.* (2009) können in offenen Vorgruben, beim Anmischen von festen und flüssigen Substraten mit Hofdünger und Rezirkulat aus dem Fermenter, bereits nennenswerte

Methanemissionen auftreten. Im Mittel wurden Emissionen von 22.3 g min^{-1} gemessen. Emissionspeaks sind bei der Zugabe von Gülle und/oder Rezirkulat zum Behälter und beim Anschalten des Rührwerks zu erwarten. Ein Vergleich zwischen einerseits "Anmaischen mit Hofdünger" ($0\text{--}375 \text{ mg CH}_4 \text{ kWh}^{-1}$) und andererseits "Anmaischen mit Rezirkulat aus Fermenter oder Nachgärer" ($15\text{--}1700 \text{ mg CH}_4 \text{ kWh}^{-1}$) zeigt, dass beim Anmaischen mit Rezirkulat die Methanemissionen um ein Vielfaches höher sind als jene mit reinem Hofdünger.

2.1.2 Über-/Unterdrucksicherung

Gemäss allgemeingültiger Sicherheitsvorschriften für Biogasanlagen müssen Gärbehälter mit jederzeit wirksamen Sicherheitseinrichtungen (Unter-/ Überdrucksicherungen), die eine unzulässige Änderung des Innendrucks unabhängig von der Aussentemperatur verhindern, versehen sein (Stachowitz, 2008). Die Funktionstüchtigkeit von Über-/Unterdrucksicherungen kann jedoch oftmals durch die Bildung von Schwimmschichten und Schaum beeinträchtigt werden. Auch das Einfrieren des Wassers beim Wassertassensystem im Winter, kann die Funktion des Ventils behindern (SUVA, 1993). Ebenso können im Bereich des Vakuumbrechers starke Verschmutzungen, die sich durch die oben genannten Schwimmschichten und Schaumbildungen im Übergangsstück nach aussen absetzen können, zu Störungen führen (Lange, 2007).

Auch der Wartungszustand des Ventils, insbesondere der Füllstand der oberen und unteren Flüssigkeitsvorlage bei Wassertassensystemen, beeinflusst den Ansprechdruck des Ventils. Unter Umständen kann so ein zu grosser Über- oder Unterdruck im Gasspeichersystem entstehen (Lange, 2007). Dies kann wiederum zu Membranbeschädigungen sowie deren Ablösung aus dem Halterungssystem führen.

Lehner *et al.* (2009) zeigten, dass auch im Regelbetrieb teilweise erhebliche Methanverluste aus Überdrucksicherungen entstehen können. In der Fachliteratur werden solche Verluste auch als betriebsbedingte Verlustquellen oder sekundäre Verlustquellen bezeichnet (Bolli *et al.*, 2010). In einem Zeitraum zwischen 400 und 500 Tagen wurden an sieben Biogasanlagen die Überdrucksicherungen überwacht. Dabei zeigte sich, dass während der Messperiode bei drei Anlagen, das Überdruckventil an drei bis sechs Tagen zum Einsatz kam. Hierbei schlug das Ventil teilweise bis zu 130-mal pro Tag an. In einem Extremfall kam das Ventil sogar an insgesamt 70 Tagen zum Einsatz. Aufgrund der registrierten Überdruckereignisse, war die Quantifizierung der entweichende Menge an Biogas problematisch (Lehner *et al.*, 2009).

2.1.3 Stützluftsystem

Das Stützluftsystem dient der Aufrechterhaltung der Stützwirkung des Tragluftdachs sowie der Betriebsdruckregulierung des Gasspeichers. Infolge einer Leckage in der Gasspeichermembran kann Biogas in den Zwischenraum zum Tragluftdach austreten. Normalerweise wird das austretende Gas gleich wieder nach aussen abgeführt. Wird aufgrund technischer Probleme des Überdruckventils der Biogasdruck zu hoch, kann das Gas nicht mehr vollständig nach aussen abgeleitet werden. Falls die Verbindungsleitung zwischen dem Luftraum des Tragluftdaches und dem Stützluftgebläse im Betriebsraum, weder durch eine Rückschlag- noch durch eine Absperrarmatur abgesichert ist, kann unter Umständen Biogas unkontrolliert in den Betriebsraum austreten (Lange, 2007).

2.1.4 Membrandächer

Bachmeier und Gronauer (2007) gehen von der Annahme aus, dass rund 1 % der gesamten Methanproduktion über die natürliche Permeabilität der Membran verloren geht. Die Angabe der Gasdurchlässigkeit erfolgt in $\text{m}^3 \text{ Gas pro m}^2 \text{ Membranfläche pro Zeiteinheit (Tag)}$ und Methan-Partialdruck (bar) (Johann und Konrad, 2010b). Laut den geforderten Sicherheitsregeln durch die Landwirtschaftliche Berufsgenossenschaft Deutschland darf die Methandurchlässigkeit einer Gasspeichermembran maximal $10^{-3} \text{ m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ Tag}^{-1} \text{ bar}^{-1}$ betragen (Stachowitz 2008; Johann und

Konrad, 2010a). Bei einem Membrandach von 260 m^2 darf sie beispielsweise nicht höher als 0.26 m^3 pro Tag sein. In der Praxis variiert sie sehr stark in Abhängigkeit des verwendeten Materials (Johann und Konrad, 2010a). Überprüfen lässt sich die Methandurchlässigkeit unter Laborbedingungen anhand der DIN-Norm 53380. Die Untersuchung im Labor erfolgt mit trockenem Gas im Temperaturbereich 10 bis 40°C .

Die DIN-Norm wird den Anforderungen an Biogasspeichermembranen in der Praxis nur teilweise gerecht. Die Biogastemperatur im Innern des Gasspeichers sowie die Aussentemperatur (v.a. bei Einfachmembranen) und Sonneneinstrahlung, haben einen entscheidenden Einfluss auf die Gasdurchlässigkeit. Die Gastemperatur unter der Membran kann im Sommer bis zu 70°C erreichen. Typischerweise verdoppelt sich die Gasdurchlässigkeit alle 10 bis 20 K Temperaturerhöhung. Auch die relative Luftfeuchtigkeit des Biogases im Fermenter hat einen Einfluss. Sie kann nahezu 100 % betragen (Johann und Konrad, 2010b). Zusätzlich erfolgt mit der Zeit unter Praxisbedingungen eine Materialermüdung infolge von Witterungseinflüssen und durch das Biogas selbst. Folglich erhöht sich mit dem Alter die Gasdurchlässigkeit und verringert sich die Reissfestigkeit der Membran (Johann und Konrad, 2010a).

Das Einhalten der Vorschrift bezüglich der maximal zulässigen Gasdurchlässigkeit lässt sich bei Doppelmembranen überprüfen. Ist die Luftumwälzungsrate sowie die Methankonzentration am Austrittsort der Abluft bekannt, kann die Verlustrate bestimmt werden. Bei der Berechnung der Oberfläche geht man davon aus, dass die innere Membran nicht exakt einer Halbkugel entspricht, sondern nur 60 bis 90 %. Die Membranfläche beträgt folglich:

$$A_{HK} = 2\pi r^2 \cdot \alpha$$

A_{HK} : Oberfläche der inneren Membran [m^2]

r: Radius des Behälters [m]

α : Beiwert (0.9 – 0.6)

Ist die Luftrate Q des Stützluftgebläses bekannt, kann unter Berücksichtigung der maximal erlaubten Methanpermeabilität ($10^{-3} \text{ m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ Tag}^{-1}$) die maximal erlaubte Methankonzentration in der Abluft berechnet werden.

$$[\text{CH}_4]_{zul} = \frac{10^{-3}}{24 \cdot Q} \cdot A_{HK} \cdot 100$$

CH_4_{zul} : maximal zulässige CH_4 -Konzentration in der Abluft [Vol.-%]

Q: Luftrate des Stützluftgebläses [$\text{m}^3 \text{ h}^{-1}$]

A_{HK} : Oberfläche der inneren Membran [m^2]

Mit dieser Vorgehensweise lässt sich überprüfen, ob die gemessene Methankonzentration ausschliesslich auf die natürliche Permeabilität der Membrane zurückzuführen ist. Übertrifft die Konzentration um ein Mehrfaches die erlaubte, kann davon ausgegangen werden, dass sich in der inneren Membran ein Leck befindet.

2.1.5 Behälterkrone

Hafermann *et al.* (2009) wiesen teilweise erhebliche Methan-Emissionen an Verbindungsstellen zwischen Gashaube und Fermenter nach. Es wurden bis zu 20 Leckagen pro Anlage ausfindig gemacht. Die Emissionswerte an den vereinzelt Leckagen lagen im Bereich von 0 bis 66 mg CH_4

kWh⁻¹. Bei Anlagen mit massiver Betondecke konnten keine Emissionen an den Auflagestellen zwischen Behälterkrone und Betondecke, sowie durch die eigentliche Betondecke festgestellt werden.

Formel zur Berechnung des austretenden Gasstroms aus Leckagen:

$$Q = A \cdot v \cdot \Delta t$$

Q: Gasstrom [m³ h⁻¹]

A: Querschnitt der Leck Öffnung [m²]

v: Gasgeschwindigkeit im Leck [m s⁻¹]

Δt: Zeitdauer [h]

Die Gasgeschwindigkeit hängt von der Druckdifferenz innen-aussen, der Biogasdichte und dem Widerstandsbeiwert ab.

$$v = \sqrt{2 \frac{\Delta p}{\rho \cdot k}}$$

v: Gasgeschwindigkeit im Leck [m s⁻¹]

Δp: Druckdifferenz innen – aussen [Pa]

ρ: Biogasdichte [kg m⁻³]

k: Widerstandsbeiwert der Öffnung

Bei direkten Gasverlusten in die Aussenluft, z. B. durch Leckagen in der Einfachmembran, nähert sich der Widerstandsbeiwert der Grösse 1. Nimmt die Weglänge zu, beispielsweise im Leck durch Betonrisse, kann der Widerstandsbeiwert ein Mehrfaches betragen. Die Quantifizierung der Methanverluste aus Leckagen ist nicht nur wegen des unbekannten Widerstandsbeiwertes problematisch, sondern auch wegen der Ungenauigkeit der Konzentrationsmessung vor Ort. Kann die Öffnung nicht hermetisch abgeschirmt werden, was vielfach der Fall ist, treten Verdünnungseffekte durch die mitgeschleppte Umgebungsluft auf. Dies ist insbesondere der Fall, wenn die Ansaugleistung des Methanmessgerätes grösser als der Leakage Strom ist. Es sollte deshalb möglichst nahe am Austrittsort gemessen werden, um den Einfluss der Umgebungsluft gering zu halten, ohne aber dabei einen Unterdruck auf die Leckagen Öffnung zu erzeugen.

2.1.6 Rührwerke

Grundsätzlich bietet jedes System, das von aussen in den Behälter (anaerober Bereich) ragt, eine potentielle Quelle für Gasverluste. In der Literatur lassen sich einige grundsätzliche Aussagen zur Vermeidung von Gasverlusten finden. So sollten Rührwerksdurchführungen, wenn immer möglich, getaucht (d.h. Durchführung unterhalb des Substratspiegels) sein (Stachowitz 2008). Es kann jedoch vorkommen, dass aufgrund von Wartungsarbeiten oder Störungen am Fermenter der Substratspiegel abgesenkt werden muss. Um die Dichtigkeit von Rührwerken zu gewährleisten, sollten diese gegen Schwingungen, welche durch die Hebelwirkungen entstehen, gesichert sein (Naeve, 2008). An Rührwerken mit Aussenmotor (Längsachs- oder Axialrührwerke) konnten keine Emissionen detektiert werden (Hafermann *et al.*, 2009).

2.1.7 Eintragssysteme

Aufgrund ihrer Konstruktions- bzw. Funktionsweise, stellt der Eintrag mit Stopfschnecken in den Fermenter immer eine potentielle Gasverlustquelle dar. Grundsätzlich gelten hier die gleichen technischen und baulichen Prinzipien wie beim Rührwerk. Das bedeutet, dass die Einführung des Schneckenförderers stets unterhalb des Substratniveaus erfolgen soll. Da das Schneckengewinde selbst mit der Wand des Führungsrohrs nicht in Kontakt kommt, kann Biogas, welches aus dem restlichen Gärgut im Durchführungsrohr produziert wird, ungehindert entweichen. Andererseits kann der Gasaustritt durch einen Restpfropfen Substrat in der Pressschnecke verhindert werden (Stachowitz, 2008). Dennoch konnten in der Studie von Hafermann *et al.* (2009) an Förderschnecken Methanemissionen in Höhe von 0 bis 12 mg CH₄ kWh⁻¹ gemessen werden.

2.1.8 Seildurchführungen

Im Vergleich zu den oben genannten Typen von Rührwerken mit Aussenmotor (Längsachs- oder Axialrührwerke), sind die Tauchrührwerke komplett im geschlossenen System des Gärbehälters integriert. Sie stehen lediglich durch eine Seildurchführung sowie Stromversorgung mit der Umgebung in Verbindung. Als typische Schwachstellen in Bezug auf Biogasverluste konnten vor allem unregelmässig gewartete Seildurchführungen für Tauchmotor-Propellerrührwerke identifiziert werden (Hafermann *et al.*, 2009).

2.1.9 Offene Gärrestlager

In der Vergangenheit wurden diverse Forschungsarbeiten zum Thema Methanemissionen aus nicht abgedeckten Gärrestlagern durchgeführt. Sowohl Amon *et al.* (2006), Bachmaier und Gronauer (2007) als auch Heinrich (2011) erwähnen, dass bei der Lagerung von Gärresten noch erhebliche Methanmengen in die Atmosphäre entweichen können, wenn das Lager über keine Abdeckung verfügt. Nach Postel (2008) sind die Emissionen bei der offenen Lagerung im Sommerhalbjahr temperaturbedingt höher als im Winter. Jedoch hat nicht nur die Lagertemperatur, sondern auch die Lagerdauer einen wesentlichen Einfluss auf das Emissionspotential der Gärreste (Reitberger, 2002).

Bedeutsam für die Emissionen sind die effektive Verweilzeit der Substrate im Fermenter sowie der dadurch erzielte Abbaugrad der organischen Substanz (Postel, 2008). Insbesondere bei einstufigen Anlagen besteht die Möglichkeit, dass durch eine hohe Raumbelastung sowie Kurzschlussströmungen wenig oder nicht vergorenes Material aus dem Fermenter in das Gärrestlager gelangt, was zu Restausgasungen führen kann (Ebertsch, 2011, Postel 2008; Woesch und Galasch, 2007, Reitberger 2002). Je geringer der Abbaugrad des Gärsubstrates aus dem Fermentationsprozess ist, desto mehr organische Substanz bleibt im Gärsubstrat enthalten. Dies wiederum erhöht das Methan-Emissionspotential der Gärreste (Hafermann *et al.*, 2002, Reitberger, 2002). Bei einer durchschnittlichen Lagertemperatur von 20°C sind Methanverluste von teilweise mehr als 20 % in Bezug auf die Gasproduktion im Fermenter zu erwarten (Amon, 2005). Nach Oechsner *et al.* (2006) liegt das durchschnittliche Restgaspotential von flüssigen Gärresten aus Biogasanlagen, mit einer Verweilzeit von 40 bis 60 Tagen, bei 15 % des Gesamtpotentials. Laut einer Studie der Fachagentur für Nachwachsende Rohstoffe (FNR, 2005) liegen die Methanemissionen aus Gärresten in einer Bandbreite von 2.5 % bis 15 % des vorangehend produzierten Methans. Nach Hub (2007) verbleiben in den Gärresten sogar 10 % bis 25 % des Methan-Restgaspotentials in Bezug auf die gesamte Methanausbeute.

Hafermann *et al.* (2009) bewerteten die Lagerung von Gärresten als bedeutendste Emissionsquelle, hierbei wurden Methanemissionen zwischen 730 und 3'700 mg CH₄ kWh⁻¹ gemessen. Zudem konnten beim Aufrühren des Gärrestlagers Spitzenwerte von bis zu 6.4 g kWh⁻¹ gemessen werden. In der Untersuchung von Bachmaier und Gronauer (2007) wurden Emissionen aus Gärresten mit 44 g CO₂-Äqu. kWh⁻¹ ausgewiesen.

Woesch-Gallasch *et al.* (2007) haben in einem offenen und einem geschlossenen Gärrestlager Methanemissionen während eines Jahres gemessen. Die Mengen lagen beim offenen Lager im Bereich von 25 t a^{-1} , während die Emissionen im geschlossenen Gärrestlager mit 10 t a^{-1} wesentlich tiefer lagen. In derselben Studie wird zudem erwähnt, dass im Gärrestlager unter gewissen Umständen mehr Methan pro Jahr erzeugt wird als im Haupt Fermenter.

2.1.10 Blockheizkraftwerk

Bei der Verwertung des Biogases im Blockheizkraftwerk (BHKW) entstehen durch unvollständige Verbrennung Methanemissionen. Die Höhe der Emissionen wird durch die Motorenart, die Regeltechnik, die Motorenwartung und die Biogaszusammensetzung beeinflusst. Zündstrahlmotoren emittieren mehr Methan als Gas-Ottomotoren. Nur wenn der Motor auf den momentanen Methangehalt im Biogas abgestimmt ist, können die Emissionsgrenzwerte eingehalten werden (LfU, 2006). Dies bedingt eine möglichst gleichmässige Biogaszusammensetzung. Eine optimale Motorabstimmung reduziert nicht nur die Methanemissionen, sondern auch den Ausstoss von CO , NO_x , SO_2 , Formaldehyden, sonstigen Kohlenwasserstoffen und Partikeln. Die periodische Motorenwartung soll sich vor allem auf die Prüfung der Zündkerzen, des Ventilspiels, der Lambdasonde, des Luftfilters und des Motorenöls beziehen.

Die Angaben zum Methanschluß in BHKW's weisen einen grossen Schwankungsbereich auf. Messungen des Bayerischen Landesamtes für Umweltschutz ergaben für Gas-Ottomotoren Methanverluste von 0.5 % und für Zündstrahlmotoren von 0.9 % des Methaninputs (LfU, 2006). In einer österreichischen Studie lag der Methanschluß zwischen 0.5 und 3.8 % des Methaninputs (Woess-Gallasch *et al.*, 2007). In einer Messstudie an der Bayerischen Landesanstalt für Landwirtschaft betrug der Methanschluß für Gas-Ottomotoren zwischen 0.12 % und 0.23 %, bezogen auf den Methaninput. Bei Zündstrahlmotoren war er mit 1.4 % um ein Vielfaches höher (LfU, 2008). Durch den Einsatz eines Oxidationskatalysators könnten die Methankonzentrationen im Abgas drastisch gesenkt werden. Solche Katalysatoren bedingen jedoch eine weitgehende vorgängige Entschwefelung des Biogases.

2.1.11 Aufbereitung Biogas auf Erdgasqualität

Bei der Regenerierung des Waschmittels oder des Absorbers kommt es bei allen zurzeit verfügbaren Aufbereitungsverfahren zu Methanemissionen. Gemäss Untersuchungen des Fraunhofer-Instituts ist der Methanschluß bei der chemischen Wäsche am geringsten, gefolgt von der Druckwasserwäsche, Druckwechseladsorption (PSA-Verfahren) und Glykolwäsche (Baum *et al.*, 2008). Nach dem EEG 2011 wird der Technologiebonus für die Biogasaufbereitung nur gewährt, wenn der hiermit verbundene Methanschluß weniger als 0.5 % beträgt. Bei genauen Untersuchungen an einer Biogasaufbereitungsanlage mit Druckwechseladsorptionsverfahren wurde ein Methanschluß von 2.6 % gemessen (Baum *et al.*, 2008). Massnahmen zur Verringerung der Emissionen beziehen sich einerseits auf technologische Verbesserungen der Aufbereitungsanlage und andererseits auf eine thermische (Schwachgasverbrennung) oder katalytische Nachbehandlung der Abluft bei der CO_2 -Abscheidung.

2.2 Relative Bedeutung der Emissionsquellen

Die Bandbreite der CH_4 -Emissionen ist laut Literatur sehr gross (Tabelle 1). Die auf die Leistung des BHKWs bezogenen potentiellen Verlustmengen sind bei den offenen Gärrestlagern und der Vorgrube am höchsten. Sie übertreffen im Normalfall die Flächenemissionen durch die Membran sowie auch die diversen Punktemissionen um ein Vielfaches. Sind Punktemissionen in der Regel auf bauliche und technische Mängel zurückzuführen und deshalb grundsätzlich zu vermeiden, ist es bei der Vorgrube und Gärresten wesentlich kostenaufwendiger, die Emissionen zu reduzieren.

Tabelle 1: Zusammenfassung der Literaturdaten bezüglich CH₄-Emissionen (Verweis Kap. 3.1.1 bis 3.1.9)

Emissionsquelle	CH ₄ -Emissionen mg kWh ^{-1**}	CH ₄ -Emissionen % CH ₄ -Jahresproduktion**
Vorgrube	15-1700	0.05- 0.95
Drucksicherung Fermenter	keine Angaben	keine Angaben
Membrandach erlaubt*	90	0.05
Behälterkrone pro Leck	bis 66	0.04
Eintrag Systeme	0-12	0.01
Offene Gärrestlager (Restpotential)		10 - 25
Offene Gärrestlager (Praxis)		2.5 - 15

* Die maximal erlaubte Gaspermeabilität von Membranen beträgt nach der Landwirtschaftlichen Berufsgenossenschaft Deutschland 10⁻³ Nm³ Tag⁻¹ m⁻² Membranfläche.

** Umrechnung für 300 m² Membranfläche und 100 kW BHKW-Leistung.

3 Versuche

3.1 Befragung

3.1.1 Methoden

Die gesamtschweizerische Erhebung erfolgte im Zeitraum von Juni bis August 2010 auf 38 Betrieben. 35 Adressen wurden vom Bundesamt für Energie zur Verfügung gestellt. Weitere 28 Adressen wurden über Internetrecherchen ermittelt. Nach telefonischem Erstkontakt mit den Anlagebetreibern stellten sich davon 38 für eine ausführliche Erhebung zur Verfügung. Die Erhebung erfolgte über eine direkte Befragung mit Hilfe eines Fragebogens vor Ort. Die Ausarbeitung des Fragebogens entstand in Zusammenarbeit mit dem ART-Projektteam "Geruchsquellen bei Biogasanlagen". Neben allgemeinen technischen und verfahrenstechnischen Fragen wurden auch projektspezifische Fragen zur Geruchsproblematik sowie zu Gasverlusten gestellt. Die Fragen wurden in folgende Themen unterteilt:

- Allgemeine Betriebsdaten
- Allgemeine Fragen zu Anlagekomponenten (Dimensionierung, Rühr- und Mischtechnik)
- Substrateinsatz und Management (eingesetzte Substrattypen, Lagerung, Verarbeitung, Aufbereitung)
- Abluftreinigung
- Fermentationsparameter
- Separierung und Behandlung von Gärresten
- Biogas (Produktion, Aufbereitung und Nutzung)
- Spezifische Fragen zu Erfahrungen mit Gasverlusten
- Störungen und Reparaturen
- Tierhaltung
- Weitere spezifische Fragen zum Thema Geruch

3.1.2 Ergebnisse

Rund 42 % der besuchten Anlagen waren vom Hersteller A (Tabelle 2). Bei vier Betrieben bestand die Anlage teilweise aus Komponenten mehrerer Hersteller. Bei den Anlagen handelt es sich vorwiegend um neuere Anlagen. 26 Anlagen entstanden zwischen den Jahren 2000 und 2009. Sieben Anlagen wurden seit ihrer Erstellung baulich erweitert oder einer Totalrevision unterzogen. Erweiterungen einer Anlage können unter Umständen Hinweise für bauliche Schwachstellen und potentielle Gasverluste sein.

Die mittlere Nennleistung der Blockheizkraftwerke (BHKW) lag bei 90 kW (Median = 98 kW), das Maximum bei 526 kW, das Minimum bei 12 kW. Die enormen Schwankungen widerspiegeln die grosse Leistungsheterogenität der besuchten Anlagen. Zehn Betriebe besaßen zusätzlich ein zweites BHKW (Mittelwert = 61 kW; Median = 51 kW), drei Betriebe ein drittes BHKW. Das zweite oder dritte BHKW wird oftmals nur dann in Betrieb genommen, wenn eine Revision oder Störungen des Haupt-BHKWs anstehen (Risikoverteilung). Bei 21 Biogasanlagen wurde der Strom mittels Gasmotoren produziert. Vergleichbar sind die Anlagen hinsichtlich der Jahresproduktion in kWh. Der Mittelwert lag hier bei 561'037 kWh (Median = 480'000 kWh), wobei der Schwankungsbereich mit einer Standardabweichung von 470'638 kWh relativ hoch war. Teilweise handelt es sich bei den Angaben der Anlagenbetreiber um Schätzwerte, da entweder noch keine Zahlen vorhanden waren (BGA noch kein Jahr in Betrieb), oder im Jahre 2010 ein unterdurchschnittliches Stromproduktionsjahr aufgrund vieler technischer Ausfälle oder geringer Biogasproduktion unter dem langfristigen Mittel lag.

Mit einer Ausnahme basierten alle Anlagen auf einem einstufigen Vergärungsprozess. In einem Fall wurden Enzyme in der Vorgrube eingesetzt, um eine vorgängige Hydrolyse einzuleiten. In 23 Fällen

wurde die Vergärung lediglich im Fermenter durchgeführt. Bei diesem Verfahren handelt es sich um ein sogenanntes Einfaches-Durchflussverfahren. Die grosse Mehrheit der Anlagen wurde im Mesophyllen Temperaturbereich gefahren. Im Mittel waren dies 42.4 °C. Bei zwei Anlagen lag die Fermentationstemperatur bei 50 °C und darüber, was einer thermophilen Vergärung gleichzusetzen ist. In 15 Fällen war dem Fermenter ein Nachgärer angeschlossen. Dabei handelte es sich in den meisten Fällen um gasdicht abgedeckte Gärrestlager, welche jedoch nicht beheizt wurden. Da die Behälter jedoch meist isoliert waren und die Gasentnahme für das BHKW mehrheitlich über das Gas Lager auf dem Gärrestlager erfolgte, wurde dennoch der Begriff des Nachgärer verwendet. In neun Fällen war dem Nachgärer zusätzlich ein offenes oder abgedecktes Gärrestlager angeschlossen.

Der durchschnittliche Co-Substratanteil lag bei 31 % (Median = 25 %), wobei 18 Betriebe einen Co-Substratanteil von maximal 20 % aufwiesen. Von den 18 Anlagen profitierten elf Anlagen von der KEV und somit auch vom LW-Bonus. Bis auf drei Ausnahmen zählen diese Anlagen zu jenen, welche nach 2000 errichtet wurden.

Im Hinblick auf Gasverluste im eigentlichen Biogasprozess waren primär Kenntnisse zu den einzelnen Gasspeichersystemen von Interesse (Tabelle 3). 16 Betriebe nutzten lediglich den Raum über dem Fermenter als Gasspeicher. Anlagen, die aufgrund der baulichen Ausführung (z.B. Beton Fermenter mit Betondeckel) keine Gasspeichermöglichkeiten hatten, nutzten meist ein externes Gasspeicherkissen als Gas Lager. Je nach Anlagensystem gab es aber auch Beton Fermenter, die einen kleinen Gas Raum unter der Betonabdeckung aufwiesen. Eine alternative Variante zeigte in fünf Fällen die Gasspeicherung ausschliesslich im Nachgärer, teilweise kombiniert mit einem externen Gaskissen für Notfälle. Die Kombination eines Gasspeichers im Fermenter sowie auch im Nachgärer, trat insgesamt fünfmal auf. Das Gasspeichersystem im Fermenter entsprach in 15 Fällen einer Einfachmembran basierend auf einer EPDM-Membran. In halb so vielen Anlagen waren die Fermenter mit einer Doppelmembran abgedeckt, welche aus einer gasdichten PE-Membran und einer Gewebemembran als Deckmembran aufgebaut sind. Anlagen, welche vor 2005 gebaut wurden, besaßen nur dann eine Doppelmembran, wenn im Rahmen einer Membranerneuerung von einer Einfachmembran zu einer Doppelmembran gewechselt wurde. Die Membranen sind bis auf eine Ausnahme (Klemmsystem) mit einem Seeger-Verschluss an der Behälterkrone befestigt. Bei den Nachgärern waren sechs Fermenter mit einer Einfachmembran (EPDM) bzw. mit einer Doppelmembran (PE + Gewebemembran) ausgerüstet. Die Membranen waren jeweils zu 50 % mit einem Seeger Verschluss und zu 50 % mit einem Klemmsystem am Fermenter befestigt. Drei unterirdische Nachgärer besaßen keinen eigenen Gasspeicher.

25 Anlagebetreiber (rund 66 %) gaben bei der Befragung an, bereits Erfahrungen mit Gasverlusten durch Membranbeschädigungen oder Ablösungen gemacht zu haben. In den meisten Fällen handelte es sich hierbei um gerissene Membranen, wobei in 20 von 26 Fällen, unabhängig ob Fermenter oder Nachgärer, eine EPDM-Einfachmembran als Gasspeicher diente. Nach Aussagen der Anlagenbetreiber waren die Membranrisse auf diverse Gründe zurückzuführen. Darunter fallen primär Beschädigungen der Membran durch Altersschwäche, welche durch Einflussgrößen wie Überdruck des Gasspeichers und Wettereinflüsse (Sonne, Schnee, Sturm) zusätzlich begünstigt wurden, aber auch Montagefehler und Beschädigungen bei Wartungsarbeiten wurden als Ursache genannt.

Tabelle 2: Überblick über technische und verfahrenstechnische Daten der befragten Biogasanlagen (Bolli *et al.* 2010)

Allgemeine Daten zur BGA								
Hersteller	[n]	Hersteller A	Hersteller B	Hersteller C	Hersteller D	Sonstige Hersteller	Eigenbau	Hersteller unbekannt
		16	4	2	2	6	4	4
Jahr der Inbetriebnahme	[n]	bis 1989	1990 - 1994	1995 - 1999	2000 - 2005	> 2006		
		4	4	4	10	16		
Anzahl Anlagen mit baulichen Erweiterungen seit Inbetriebnahme	[n]	Total	Abdeckung bestehendes Gärrestlager	Bau eines Nachgärers	Totalrevision			
		8	5	1	2			
Gasverwertungsprinzip	[n]	Strom und Wärme	Wärme	Gasaufbereitung				
		35	2	1				
Technische Daten								
Motortyp BHKW	[n]	Zündstrahlmotor	Gasmotor	Totem	andere			
		10	21	3	2			
Nennleistung BHKW	[kWel.]	Mittelwert	Median	min	max	Std.abw.		
		98	90	12	526	85		
Nutzvolumen Fermenter	[m³]	Mittelwert	Median	min	max	Std.abw.		
		523	432	50	2'000	379		
Nutzvolumen Nachgärer	[m³]	Mittelwert	Median	min	max	Std.abw.		
		1'182	1'100	250	3'500	888		
Produktions-Daten								
Jahresproduktion Biogas	[m³/a]	Mittelwert	Median	min	max	Std.abw.	ka	
		313'073	287'333	26'000	1'000'000	222'858	4	
Stromproduktion 2010	[kWh/a]	Mittelwert	Median	min	max	Std.abw.	ka	
		561'037	480'000	43'500	2'500'000	470'638	7	
Fermentationsparameter								
Anzahl Prozessstufen	[n]	einstufig	zweistufig					
		37	1					
Durchflussverfahren	[n]	Einfaches Durchflussverfahren (ohne Nachgärer)	Komb. Durchflussspeicherverfahren (mit Nachgärer)					
		23	15					
Prozesstemperatur Fermenter	[C°]	Mittelwert	min	max	Std.abw.	>52° C		
		42,4	38	52	3,6	2		
hydraulische Verweilzeit	[d]	Mittelwert	min	max				
		35	18	100				
Nachgärer vorhanden	[n]	ja	nein					
		15	23					
Nachgärer beheizt	[n]	ja	nein					
		1	14					
Nachgärer = Gärrestlager	[n]	ja	nein					
		9	6					
Co- Substratanteil	[%]	Mittelwert	Median	oberes Quartil	unteres Quartil	ka		
		31	25	46	18	2		

Tabelle 3: Überblick über Gasspeichersysteme und sonstige verfahrenstechnische Daten der befragten Biogasanlagen (Bolli *et al.* 2010)

Gasspeichersystem								
Ort der Gasspeicherung	[n]	NUR Fermenter	Fermenter UND Nachgärer	NUR Nachgärer	Fermenter UND externer Gasspeicher	Nachgärer UND externer Gasspeicher	Fermenter UND Nachgärer UND externer Gasspeicher	NUR externer Gasspeicher
		16	5	5	2	1	1	8
Gasspeichersystem Fermenter	[n]	Einfachmembran	Doppelmembran	Beton-Abdeckung	sonstiges System	kein Speichervolumen		
		15	7	1	1	14		
Gasspeichersystem Nachgärer	[n]	Einfachmembran	Doppelmembran	Beton-Abdeckung	kein Speichervolumen			
		6	6	0	26			
Folienbefestigungssystem Fermenter	[n]	Seeger-Verschluss	Klemmsystem	Sonst. System				
		21	1	1				
Folienbefestigungssystem Nachgärer	[n]	Seeger-Verschluss	Klemmsystem					
		6	7					
Gasverluste durch Folienbeschädigung	[n]	Erfahrungen	keine Erfahrungen	gerissene Folie	abgelöste Folie			
		25	13	24	15			
Sonst. Verfahrenstechn. Daten								
Separierung der Gärreste	[n]	ja	nein					
		19	19					
Anmischung mit Gärrest aus Fermenter	[n]	ja	nein					
		11	27					

3.2 Auswahl der untersuchten Biogasanlagen zur qualitativen und quantitativen Erfassung

3.2.1 Qualitative Erfassung

Als Datengrundlage für die Auswahl der Betriebe, die mit der GasCam® gescreent wurden, dienten die erhobenen Daten aus der Befragung. In einem ersten Schritt wurden die Anlagen aufgrund ihres Gasspeicherverfahrens eingeteilt (Abbildung 1). Die Abdeckungssysteme der Fermenter oder Nachgärer, können in folgende drei Kategorien eingeteilt werden: "Einfachmembran", "Doppelmembran" und "Betonabdeckung". Die jeweiligen Speicherverfahren wurden hinsichtlich Durchflussverfahren weiter unterteilt in "Einfaches Durchflussverfahren" (d.h. ohne Nachgärer) sowie "Kombiniertes Durchfluss-Speicherverfahren" (mit Nachgärer). Ein Spezialfall wurde mit der Variante einer Betonabdeckung ohne Nachgärer mit „externem Gas Lager“ berücksichtigt. Die Überlegung einer weiteren Einteilung nach dem Durchflussverfahren war, dass dadurch direkt Systeme mit verschiedener Verweilzeit der Substrate miteinander verglichen werden konnten. Dies beeinflusst auch die nachgelagerten Prozesse wie Separierung und die Gärrestlagerung.

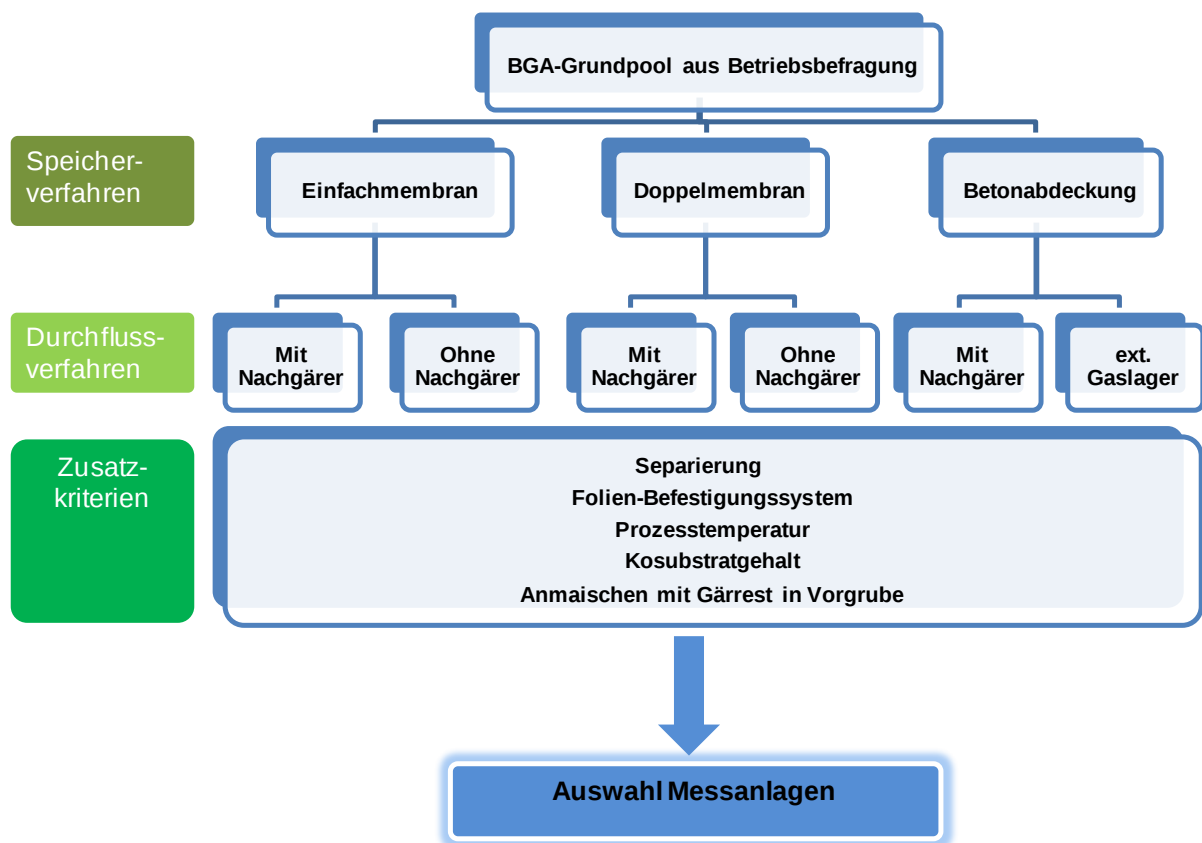


Abbildung 1: Vorgehen und Kriterien für die Typisierung der Biogasanlagen (Bolli *et al.* 2010)

Die zur Auswahl stehenden Anlagen wurden in einem ersten Schritt den beiden oben beschriebenen Kriterien zugeteilt. Ziel war es, aus jedem dieser sechs Grundtypen eine Anlage auf Gasverluste zu untersuchen. Für eine weitere Einteilung waren zusätzliche Kriterien nötig. Zu diesen Zusatzkriterien gehörten das Membran-Befestigungssystem und die Frage nach der technischen Erneuerung oder der baulichen Erweiterung der Anlage (technische Komponente), der Co-Substratanteil in der Gesamtmischung sowie die Prozesstemperatur (Fermentationsparameter), die Anmaischung der

Substrate mit Gärresten in der Vorgrube (vorgelagerte Prozesse) und die Separierung der Gärreste aus dem Fermenter oder Nachgärer (nachgelagerte Prozesse).

Die daraus folgende Auswahl der Betriebe erfolgte nach einem Punktesystem. Erfüllte eine Anlage aus dem Grundpool die Kriterien eines Szenarios, wurde dies mit einem Punkt bewertet. Die Anlagen wurden rund 30 verschiedenen Szenarien unterstellt. Die Betriebe mit den meisten Punkten wurden anschliessend in einen Pool für Messbetriebe überführt. Daraus folgte eine Auswahl an möglichst heterogenen Anlagen in Bezug auf die oben erwähnten Kriterien. Die restlichen Betriebe wurden in einem Ersatzpool als Reserve zurückgestellt. Im September 2010 wurden die ersten sechs Anlagen überprüft. Weitere sechs Anlagen aus dem Ersatzpool folgten bis September 2011. Somit wurden im Verlaufe der gesamten Messkampagne insgesamt zwölf Anlagen optisch auf ihre Leckagen hin überprüft (Tabelle 4).

Tabelle 4: Übersicht über technische und verfahrenstechnische Angaben der Versuchsanlagen für die qualitativen Messungen mit der GasCam® (Bolli *et al.* 2010)

Biogasanlage	01	56	12	54	22	05	21	13	29	44	08	16
Allgemeine Daten												
Anlagenbauer	E	A	A	A	B	A	B	A	D	A	A	A
Inbetriebnahmejahr	2006	2003	2006	2004	2008	2004	2008	2006	2000	2004	2005	2006
Erweiterungs-/Erneuerungsjahr	-	2009	-	2006	-	2009	-	-	2006	-	2011	-
Technische Daten												
Nennleistung BHKW [kW]	100	140	100	150	90	100	140	100	50	80	100	100
Nutzvolumen Fermenter [m³]	730	400	500	580	850	470	700	580	300	450	413	490
Nutzvolumen Nachgärer [m³]	-	450	-	1'200	1'100	1'600	1'400	650	250	670	k.A.	-
Produktions-Daten												
Jahresproduktion el. [kW/h pro a]	525'000	550'000	750'321	1'114'142	600'000	ka	844'000	650'000	263'013	473'000	653'000	622'222
Jahresproduktion Biogas [m³/a]	350'000	225'000	448'886	686'485	360'000	477'000	562'666	351'351	165'074	333'000	355'000	415'600
Fermentationsparameter												
Durchflussverfahren	einfaches	kombiniertes	einfaches	kombiniertes	kombiniertes	kombiniertes	kombiniertes	kombiniertes	kombiniertes	kombiniertes	kombiniertes	einfaches
Prozesstemperatur Fermenter [C°]	38.5	40	40	52	41	42	42.5	44	42	45	47	45.5
Hydr. Verweilzeit Fermenter [d]	30	30	35	30	60	35	25	30	30	30	40	35
Nachgärer vorhanden	nein	ja	nein	ja	ja	ja	ja	ja	ja	ja	ja	nein
Nachgärer beheizt	-	nein	-	nein	nein	nein	nein	ja	nein	nein	k.A.	-
Nachgärer = Gärrestlager	-	ja	-	ja	nein	ja	ja	nein	nein	ja	nein	-
durchschn. Kosubstratanteil [%]	47	17	18	19	18	19	20	18	16	50	39	50
Gasspeichersystem												
Gasspeicherverfahren Fermenter	Doppelmembran	Doppelmembran	Einfachmembran	Einfachmembran	Betonabdeckung	Einfachmembran	Betonabdeckung	Einfachmembran	Doppelmembran	Einfachmembran	Doppelmembran	Doppelmembran
Gasspeicherverfahren Nachgärer	-	Doppelmembran	-	Einfachmembran	Doppelmembran	Einfachmembran	Doppelmembran	Einfachmembran	Betonabdeckung	Einfachmembran	Doppelmembran	-
Folienbefestigungssystem	Seeger-Verschluss	Seeger-Verschluss	Seeger-Verschluss	Seeger-Verschluss	Klemmsystem	Seeger-Verschluss / Klemmsystem	Klemmsystem	Seeger-Verschluss	Seeger-Verschluss	Seeger-Verschluss / Klemmsystem	Klemmsystem	Klemmsystem
Sonst. Verfahrenstech. Daten												
Anmischen mit Gärresten	ja	nein	ja	nein	nein	nein	nein	nein	ja	ja	nein	nein
Feststoff-Separation	nein	ja	ja	ja	nein	ja	ja	ja	nein	ja	ja	ja

3.2.2 Quantitative Erfassung

Für die Auswahl der Anlagen für die quantitativen Messungen standen jene Betriebe zur Verfügung, die über ein kombiniertes Durchfluss-Speicherverfahren verfügten. Sieben von 14 Anlagen verfügten über eine Separierung (

Tabelle 5). Alle Anlagen ohne Separierung schieden aus.

Tabelle 5: Übersicht der technischen Daten und Fermentationsparameter ausgewählter Biogasanlagen (Bolli et al. 2010)

BGA Nr.	Nutzvolumen Fermenter [m ³]	Nutzvolumen Nachgärer [m ³]	Prozesstemp. Fermenter [C°]	Nachgärer beheizt	Hydr. Verweilzeit Ferm. [d]	Hydr. Verweilzeit NG [d]	Separierung
2	600	350	47.0	nein	30	40	Nein
5	470	1'600	42.0	nein	35	100	Ja
13	580	650	44.0	ja	30	60	Ja
21	700	1'400	42.5	nein	25	50	Ja
22	850	1'100	41.0	nein	60	80	Nein
25	550	1'600	50.0	nein	21	90	Ja
26	1'100	1'375	43.0	nein	45	90	Nein
27	260	620	38.0	nein	25	50	Nein
29	300	250	42.0	nein	30	25	Nein
36	1'000	2'500	42.0	nein	21	k.A.	Nein
39	2'000	3'500	38.0	nein	60	k.A.	Nein
44	450	670	45.0	nein	30	30	Ja
46	50	460	48.0	nein	18	90	Nein
54	580	1'200	52.0	nein	30	90	Ja
56	400	450	40.0	nein	30	k.A.	Ja
Mittelwert	659	1'182	43.6	-	32.7	66.3	-
Mittelwert (alle)	523	1'182	42.2	-	35.3	66.3	-
Median	580	1'100	42.5	-	30.0	70.0	-
Median (alle)	432	1'100	42.0	-	30.0	70.0	-
Max.	2'000	3'500	52.0	-	60.0	100.0	-
Max. (alle)	2'000	250	52.0	-	100.0	100.0	-
Min.	50	3'500	38.0	-	18.0	25.0	-
Min. (alle)	50	250	38.0	-	18.0	25.0	-

Methanemissionen aus Gärresten sind im Wesentlichen vom Abbaugrad der Substrate abhängig. Darunter versteht sich der Anteil an unvergorenem oder teilweise abgebautem organischem Material aus dem Fermenter (Reitberger, 2002). Die Höhe des in den Gärresten noch enthaltenen Gärrestpotentials ist im Wesentlichen von folgenden Einflussgrößen abhängig:

- **Verweilzeit** im Fermenter und im Nachgärer
- **Gärtemperatur** im Fermenter und im Nachgärer (psychrophil, mesophil, thermophil)
- **Substratmischung** (leicht und schwer vergärbare Substrate)
- **Biologische Aktivität** (Abbaueffizienz) der Mikroorganismen im Fermenter oder Nachgärer
- **Kurzschlussströme** im Fermenter (frisches Substrat, welches aufgrund des Überlaufsystems gleich wieder aus dem Fermenter ausgeströmt wird)

Da in dieser Arbeit weder die biologische Aktivität noch die Kurzschlussströme im Fermenter explizit untersucht wurden, erfolgte die Auswahl lediglich nach den ersten drei Einflussgrößen.

Neben den Hofdüngern wie Rinder- und Schweinegülle wird häufig Getreidestaub eingesetzt (Abbildung 2). Unter die zehn meist eingesetzten Substrate, fallen auch mistartige Hofdünger (Rind, Geflügel, Pferd) sowie Grün Gut und Rasenschnitt. Das energiereichste Substrat stellt das Glycerin dar. In welchem Verhältnis diese Substrate jeweils in der Gesamtmischung eingesetzt wurden, ist in der Abbildung nicht zu erkennen, da dies aus folgenden zwei Gründen keinen Sinn machen würde: Erstens können aufgrund der Datenerhebung lediglich Aussagen zu den Jahresmischungen (basierend auf Jahresmengen) erfolgen und zweitens können die Mischungen unter Umständen in der

Praxis von Woche zu Woche ändern. Aus diesem Grund war die Jahresmischung, nur ein Auswahlkriterium (Tabelle 6).

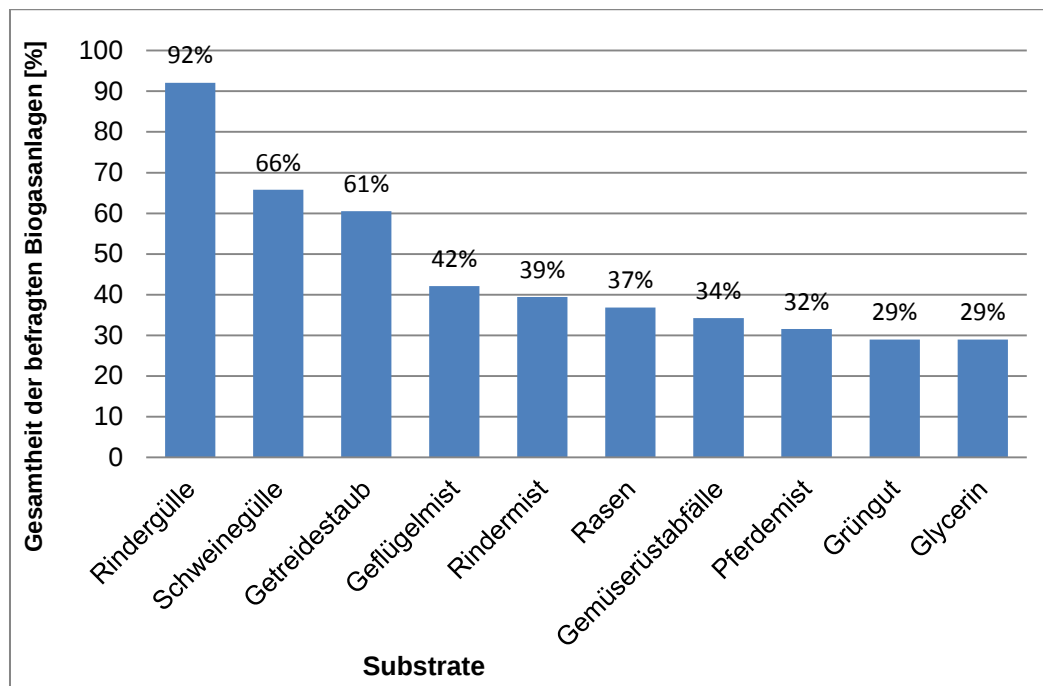


Abbildung 2: Übersicht der zehn meist eingesetzten Substrate auf den 38 untersuchten Biogasanlagen (Bolli et al. 2010)

Tabelle 6: Übersicht über die Anzahl eingesetzter Substrate aus der Liste der zehn häufigsten Substrate. Der prozentuale Anteil bezieht sich auf die Jahresmischung (Bolli et al. 2010).

Betrieb-Nr.	Substrate aus Top 10	%-Anteil der Top 10 Substrate an Gesamt Mischung
5	3	60
13	5	71
21	6	67
25	5	50
44	4	44
54	6	42
56	7	70

Neben den Fermentationsbedingungen und dem Substrateinsatz, flossen auch die Eignung zur Probenahme der Gärreste vor Ort sowie die Möglichkeit zur Positionierung der gesamten Messeinrichtung in das Auswahlverfahren mit ein. Aufgrund der erläuterten Vorgehensweise fiel die Wahl der Messbetriebe auf folgende drei Anlagen:

BGA 5 kann aufgrund der Fermentergrösse (470 m^3 ; durchschnittliche Fermentergrösse aller Anlagen mit einfachem Durchflussverfahren (ohne Nachgärer) $\bar{x} = 434 \text{ m}^3$, $\bar{x}_{\text{med}} = 400 \text{ m}^3$) sowie der hydraulischen Verweilzeit (35 Tage; $\bar{x} = 37 \text{ d}$; $\bar{x}_{\text{med}} = 33 \text{ d}$) als Beispiel für eine Anlage ohne Nachgärer verwendet werden. Zudem besteht über 60 % der Gesamt Mischung aus den zehn am häufigsten genutzten Substraten. Mit Schweinegülle, Getreideabgang und Grün Gut werden weitverbreitete Substrate abgedeckt.

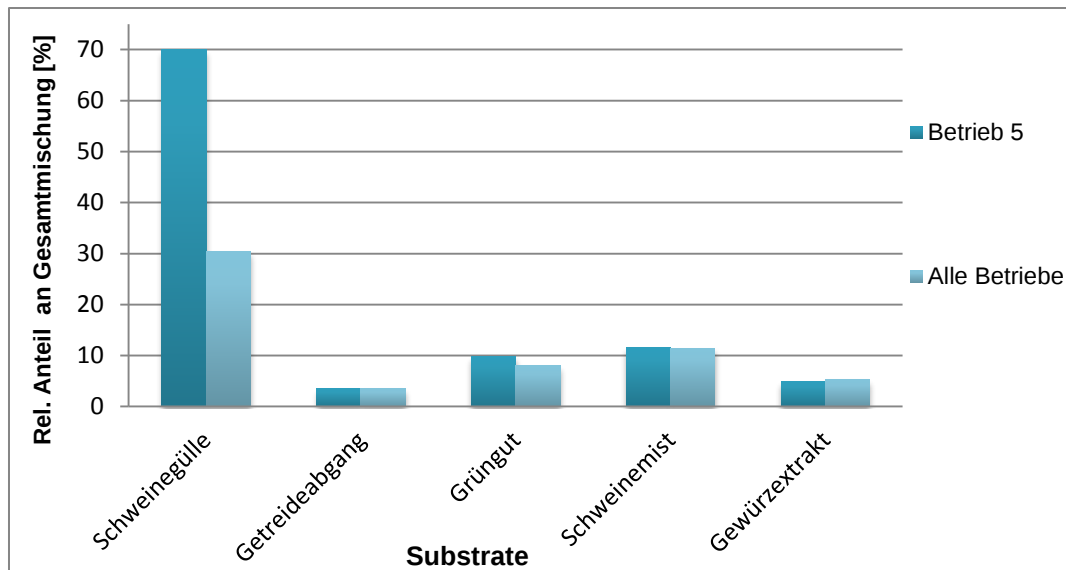


Abbildung 3: Anteil der Einzelkomponenten in % an der Jahresmischung (2009) bei der BGA 5 im Vergleich zum durchschnittlichen Komponentenanteil aller Betriebe (Bolli *et al.* 2010).

BGA 13 bietet die Möglichkeit, die Auswirkungen eines beheizten Nachgärers auf das Emissionspotential hin zu untersuchen. Die Jahresmischung besteht zu 71% aus den zehn am häufigsten eingesetzten Substraten (Abbildung 4). Die theoretische hydraulische Verweilzeit ist aufgrund leicht verdaulicher Abfälle aus der Gastronomie mit 30 Tagen tief ($\bar{x} = 35$ d).

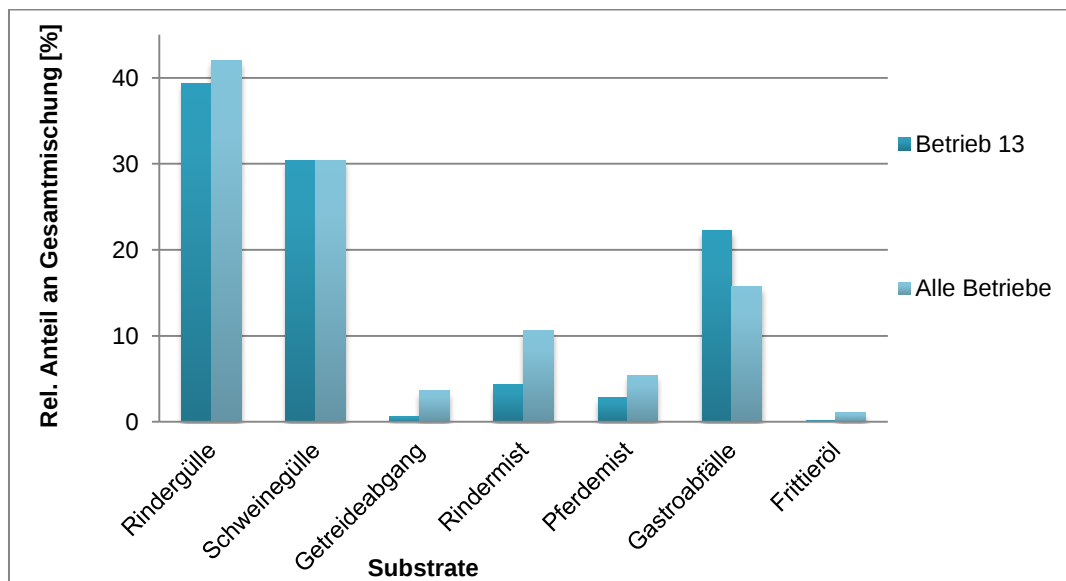


Abbildung 4: Anteil der Einzelkomponenten in % der Jahresmischung (2009) bei der Biogasanlage 13 im Vergleich zum durchschnittlichen Komponentenanteil aller Betriebe (Bolli *et al.* 2010).

BGA 21 wurde primär aufgrund der sehr kurzen theoretischen Verweilzeit von 25 Tagen im Fermenter ausgewählt. Zudem verwertet der Anlagenbetreiber sechs Substrate aus den zehn am häufigsten verwendeten Substraten, was rund 67 % der Jahresmischung entspricht. Neben diversen Hofdüngern aus der Region (Rindergülle, Schweinegülle, Geflügelmist, Pferdemist) werden auch Gemüseabfälle aus der Landwirtschaft verwertet (Abbildung 5).

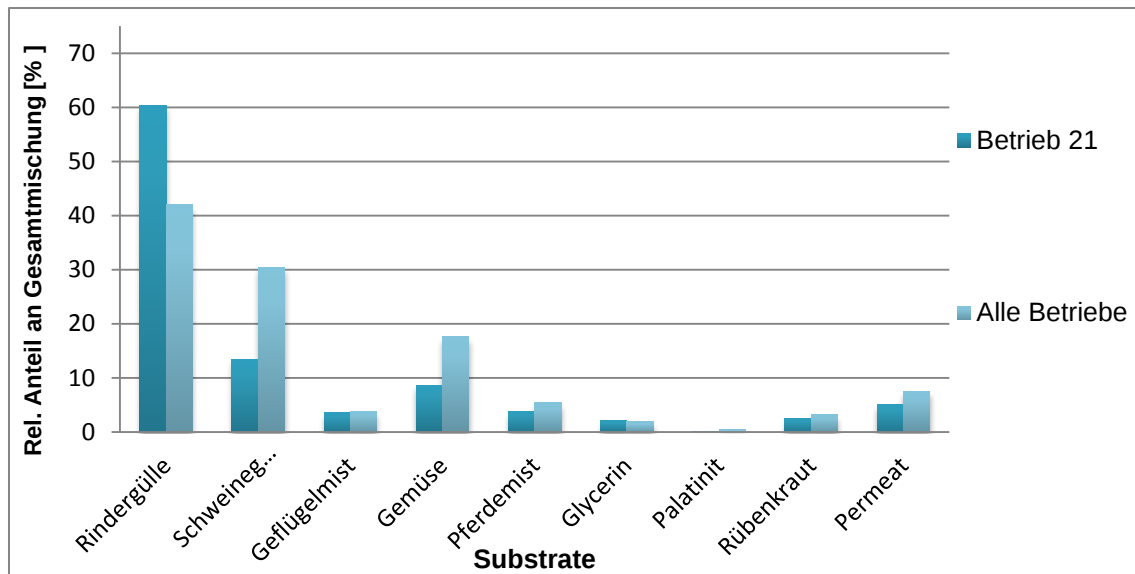


Abbildung 5: Anteil der Einzelkomponenten in % der Jahresmischung (2009) bei der Biogasanlage 21 im Vergleich zum durchschnittlichen Komponentenanteil aller Betriebe (Bolli *et al.* 2010).

3.3 Methoden der qualitativen Erfassung der Methanemissionen

3.3.1 Optische Erfassung mit der GasCam-Methode

Mit Hilfe einer "Gas-Kamera" basierend auf der Infrarot-Spektro-Radiometrie ist es möglich, austretende Gase im freien Raum schnell und effektiv aufzuspüren. Gegenüber alternativen optischen Messverfahren auf Basis von Infra-Rot hat die GasCam® den Vorteil, dass es nur eine IR-Empfangeinheit und keinen zusätzlichen IR-Sender benötigt. Das System ist somit räumlich flexibel einsetzbar. Bewegende Gaswolken im freien Raum lassen sich in Echtzeit visualisieren und Emissionsquellen entlang der gesamten Biogas-Prozesskette präzise und effizient orten. Die GasCam® ist eine gemeinsame Entwicklung der Firma Esders in Deutschland und der Universität Hamburg. Zur Ausstattung gehören ein High-Performance Notebook, eine digitale Videokamera und spezielle Software, um das Filter-System und die Infrarot-Optik zu steuern. Ein Stativ erlaubt eine optimale Ausrichtung der Kamera. Zwei Lithium-Ionen-Akkus ermöglichen eine Aufnahme von etwa sechs Stunden.

Das Detektionssystem der Kamera baut auf einem Focal-Plane-Array auf. Dies ist eine Anordnung von lichtempfindlichen Detektorelementen, die im infraroten Frequenzbereich die Charakteristik von Methangas erkennen können. Das Kernstück misst bei sehr niedrigen Temperaturen den Photonenfluss dieser Wellenlänge. Die ausgewerteten Daten werden anschliessend in Form eines Falschfarben-Bildes auf einem Bildschirm visualisiert. Durch mehrmaliges Erfassen einer Gaswolke pro Sekunde, können bewegte Bilder der Gaswolke in Echtzeit dargestellt werden. Parallel zur IR-Aufnahme wird dem Falschfarbenbild ein digitales Videobild überlagert, um eine Darstellung der Gaswolke vor einem realen Hintergrund zu erreichen. Mit Hilfe dieses Funktionsprinzips ist es möglich Methanverluste aus einer Entfernung von bis zu 200 Metern zu erkennen (Abbildung 6).



Abbildung 6: GasCam in Einsatz bei einer Biogasanlage.

3.3.2 Versuchsergebnisse der qualitativen Erfassung

Zehn Kategorien von Emissionsquellen konnten gebildet werden (ohne die untersuchten diffusen Quellen aus Vorgruben, Gärrestlagern und Abluftemissionen aus Doppelmembranen (natürliche Permeabilität) (Tabelle 7). Dabei unterscheidet sich die Anzahl Quellen pro BGA teilweise stark. So konnte bei der Anlage L eine Leckage mit Hilfe des GasCam® detektiert werden, während bei Anlage B neun Verlustquellen festgestellt wurden. 42.6% der oben aufgeführten Verlustquellen konnten im Bereich des Übergangs von der Behälterkrone zur Membran ermittelt werden. Ebenfalls traten oft Verluste aus Rohr- und Rührwerksdurchführungen sowie Rührwerksverstellungen auf.

Bei allen untersuchten BGA zeigten sich Schwachstellen. Anhand der qualitativen Emissionsmessungen lassen sich jedoch keinerlei Aussagen zu den austretenden Verlustmengen aus den jeweiligen Quellen machen. Lediglich die Emissionspotentiale einzelner Quellen können durch Konzentrationsmessungen vor Ort geschätzt werden.

Tabelle 7: Überblick über die detektierten Emissionsquellen der zwölf untersuchten BGA mit Hilfe der GasCam® unterteilt in Kategorien (Bolli *et al.* 2010) ¹

Emissionsquelle	Folienrand/ Fermenterkrone	Rohrdurchführung in Ferm/NG	Rührwerksver- stellung	offener Fermenterüber- lauf	Schaugläser	Rührwerk	Membran	Überdruckventil	Feststoffeintrag	Revisions- öffnung	Folienzwischen- raum	Vorgrube	Gärrestlager festflüssig
	Anzahl Quellen	Anzahl Quellen	Anzahl Quellen	Anzahl Quellen	Anzahl Quellen	Anzahl Quellen	Anzahl Quellen	Anzahl Quellen	Anzahl Quellen	Anzahl Quellen	Anzahl Quellen	Anzahl Quellen	Anzahl Quellen
Anlage A	1	x	x	1	x	1	x	x	n.v.	x	1	1	1
Anlage B	5	3	x	1	x	x	x	x	n.v.	x	1	1	x
Anlage C	1	x	2	n.v.	x	x	x	x	x	x	n.v.	1	1
Anlage D	1	1	1	n.v.	x	1	x	1	n.v.	x	n.v.	keine Messungen *	x
Anlage E	1	x	1	n.v.	x	x	x	1	n.v.	x	1	1	x
Anlage F	3	x	x	1	2	x	x	x	1	x	n.v.	x	x
Anlage G	1	1	x	n.v.	x	x	x	x	x	x	1	1	keine Messungen
Anlage H	4	x	x	1	2	x	x	x	n.v.	x	n.v.	1	n.v.
Anlage I	x	1	x	1	x	x	1	x	n.v.	x	1	2	keine Messungen
Anlage J	2	x	x	n.v.	x	1	2	x	n.v.	x	n.v.	1	n.v.
Anlage K	3	1	1	x	x	x	x	x	n.v.	1	2	1	1
Anlage L	1	n.v.	n.v.	n.v.	x	x	x	x	x	x	1	n.v.	1
%-Anteil *	42.6	13.0	9.3	9.3	7.4	5.6	5.6	3.7	1.9	1.9			

* %-Anteil an sämtlicher aufgeführter Verlustquellen

¹ Ausschiesslich universeller Verlustquellen aus Vorgruben, Gärrestlagern und Doppelmembranen (Permeabilität)

3.3.2.1 Fermenterkrone

Die häufigsten Verlustquellen konnten im Bereich der Fermenterkrone am Übergang zur Gasspeichermembran nachgewiesen werden. Die hauptsächlichen Ursachen für die Verluste waren Baumängel im Bereich der Montage und Verarbeitung der Klemmschienen im Beton (Tabelle 8). Besonders zu beachten sind die mangelhaft verarbeiteten Stossverbindungen zwischen den Seegerschienen. Das Biogas tritt häufig durch Bauteilanschlüsse unter oder zwischen den Seegerschienen aus. Risse in der Behälterkrone führten dazu, dass Biogas ungehindert diffundieren konnte. Durch den Kontakt mit der Schwefelsäure im Biogas wird der Beton allmählich spröde und gasdurchlässig. Hiervon zeugten die Schwefel- und Rostablagerungen (korrodierte Bewehrung) auf der Behälterkrone. Die untersuchten Klemmsysteme von Doppelmembranen waren ebenfalls nicht vollständig dicht. Teilweise wurden entlang der gesamten Betonkrone Schwefelablagerungen gefunden (Anlage G). Den Verlusten konnten jedoch selten eindeutige Quellen zugeordnet werden. Falls doch, zeigte sich, dass die Verluste auf eine mangelnde Klemmwirkung der Schiene zurückzuführen waren (Anlage K und L). Die Leckagen wiesen grosse Unterschiede hinsichtlich gemessener Methankonzentration auf.

Obwohl Methanverluste entlang der Behälterkronen am häufigsten auftraten, wird deren individuelles Emissionspotential im Vergleich zu den anderen Verlustquellen als relativ gering eingeschätzt. Dennoch können mehrere Quellen, unter Umständen in der Summe, nicht zu unterschätzende Verluste verursachen.

Tabelle 8: Schwachstellen-und Ursachenanalyse der detektierten Verlustquellen im Bereich der Behälterkrone

Emissions- quelle	Folienrand/ Fermenterkrone					Geschätztes Em issionspotential
	Messkonzentration		Ursachenanalyse			
	min	max	Fehlerquellen-Typ	Detailbeschreibung		
Anlage A	x	350 ppm	Konstruktionsmängel	Als Verlustquelle konnte die Stelle ausfindig gemacht werden, an welcher das Seil für die Gas-Füllstandsüberwachung durch die Klemmschiene (Seegerschiene) für das Foliendach geführt war. Dadurch konnte der Druckschlauch im Bereich um das Seil herum seine Abdichtungsfunktion nicht vollumfänglich gewährleisten.		gering
Anlage B	x	5 Vol.-%	Baumängel	Poröse Stelle im Beton im Bereich der Klemmschiene.		gering
	x	16.8 Vol.-%	Baumängel	Poröse Stelle im Beton im Übergangsbereich zweier Seegerschienen.		gering
	x	16.5 Vol.-%	Baumängel	Poröse Stelle im Beton im Bereich der Seegerschiene		gering
	x	11 Vol.-%	Baumängel	Ungenau verarbeiteter Übergang der Seegerschienen.		gering
	x	20 Vol.-%	Baumängel	Ungenau verarbeiteter Übergang der Seegerschienen.		gering
Anlage C	x	10 ppm	Baumängel	Ungenauere Stossverbindung zwischen zwei Klemmschienen.		sehr gering
Anlage D	x	0.47 Vol.-%	Baumängel	Stark poröse Stelle im Beton im Bereich der Seegerschiene an Fermenterkrone.		 gering

Emissions- quelle	Folienrand/ Fermenterkrone					Geschätztes Emissionspotential
	Messkonzentration		Ursachenanalyse			
	min	max	Fehlerquellen-Typ	Detailbeschreibung		
Anlage E	100 ppm	0.25 Vol.-%	unklar	Keine eindeutige Lokalisierung der Emissionsquelle mittels Konzentrationsmessungen vor Ort möglich.		sehr gering
Anlage F		15 Vol.-%	Montagefehler	Verbindungsstelle von der Stahlwand des Endlagers zur Gasspeicherfolie. Die genaue Leckagestelle konnte mittels Konzentrationsmessungen vor Ort nicht geortet werden. Aufgrund der Materialbeschaffenheit des Stahlbehälters müssen die Verluste auf einen Montagefehler zurückzuführen sein.		gering - mittel
		45 ppm	unklar	Keine eindeutige Lokalisierung der Emissionsquelle mittels Konzentrationsmessungen vor Ort möglich.		sehr gering
		31 Vol.-%	Baumängel	Riss in der Krone der Betonwand lokalisiert.		gering - mittel
Anlage G	50	350 ppm	Montagefehler	Keine eindeutige Lokalisierung der Emissionsquelle mittels Konzentrationsmessungen vor Ort möglich. Schwefelablagerungen entlang der gesamten Fermenterkrone wiesen auf Gasverluste hin (s. Abbildung). Es ist daher davon auszugehen, dass das Klemmsystem der Doppelmembranfolie grundsätzlich nicht vollständig dicht ist.		sehr gering
Anlage H		10 Vol.-%	Baumängel	Stossverbindung zwischen zwei Seegerschienen. Rost- und Schwefelablagerungen weisen auf regelmässige Gasverluste hin.		gering
		2.8 Vol.-%	Baumängel	Stossverbindung zwischen zwei Seegerschienen. Rost- und Schwefelablagerungen weisen auf regelmässige Gasverluste hin.		gering
		75 ppm	Baumängel	Stossverbindung zwischen zwei Seegerschienen.		sehr gering
		4 Vol.-%	unklar	Keine eindeutige Lokalisierung der Emissionsquelle mittels Konzentrationsmessungen vor Ort möglich. Schwefelablagerungen auf der Fermenterkrone wiesen auf Gasverluste hin.		sehr gering*

Emissions- quelle	Folienrand/ Fermenterkrone					
	Messkonzentration		Ursachenanalyse			Geschätztes Emissionspotential
	min	max	Fehlerquellen-Typ	Detailbeschreibung		
Anlage J	300 ppm	400 ppm	Baumängel / Installationsmängel	Keine eindeutige Ursache der Leckage trotz Lokalisierung der Emissionsquelle möglich.Dennoch Schwefelablagerungen auf der Fermenterkrone. Laut Aussagen des Betreibers kann die Leckage aufgrund eines Montagemängels entstanden sein.		gering
		70 ppm	Montagemängel	Übergang von Dichtungsfolie zu Dichtungsfolie		sehr gering
Anlage K	80 ppm	0.1 Vol.-%	Montagemängel			gering
	150	0.22 Vol.-%	Montagefehler			gering
		100 ppm	Montagefehler			sehr gering
Anlage L	50 ppm	100 ppm	Montagemängel			sehr gering
				Gasaustritt im Bereich Übergang von Klemmschiene zu Klemmschiene aufgrund einer fehlenden Verschraubung		

3.3.2.2 Rohrdurchführung

Sämtliche Emissionsquellen an Rohrdurchführungen konnten auf Bau- sowie Montage- und Installationsmängel zurückgeführt werden (Tabelle 9). Baulich unsachgemäss ausgeführte Abdichtungen können erhebliche Biogasverluste verursachen. Bei den Anlagen B und D entstanden die Leckagen durch die nachträglich in Eigenleistung installierten Rohrdurchführungen. Bei der Anlage B ist davon auszugehen, dass die unsachgemässe Ausführung zu einem zusätzlichen Riss in der Betonwand und somit zu weiteren Methanverlusten führte. Die erheblichen Verluste bei Anlage D verursachten in unmittelbarer Umgebung Methankonzentrationen im explosiven Bereich sowie deutlich wahrnehmbare Geruchsemissionen. Bei den Anlagen I und K kann davon ausgegangen werden, dass bei der Installation der Messkomponenten die Rohrdurchführung nicht sauber abgedichtet wurde. Bei Anlage I befand sich das Leck im Maschinenraum des BHKWs. Die Verluste im geschlossenen Raum führten zu CH₄-Konzentrationen, die stellenweise nahe der Unteren Explosionsgrenze (UEG) gemessen werden konnten. Bei der Anlage K konnte der Rohrdeckel nachträglich mit Silikon abgedichtet werden, so dass die Methan- und Geruchsemissionen weitgehend verhindert werden konnten. Obwohl bei Anlage G die CH₄-Konzentration im Rohrstutzen bis 0.3 Vol.-% betrug, wurde das Emissionspotential als niedrig eingestuft. Die Lufrate im Rohr war sehr gering. Am Austrittsort verdünnte sich demnach die Methankonzentration weitgehend, so dass optisch keine Emissionen mehr ersichtlich waren. Es ist anzunehmen, dass sich über die Zeit im Rohr eine feste Schichtung aus alten Gärresten gebildet hat, welche nicht mehr aktiv gärt. Das Emissionspotential bei Rohrdurchführungen kann als mittelgross eingestuft werden.

3.3.2.3 Rührwerksverstellung

Die Einrichtungen zur Verstellung von Tauchrührwerken wiesen bei einzelnen Biogasanlagen Schwachstellen auf (Tabelle 10). Die Gasverluste waren hauptsächlich auf die Seildurchführungen von aussen in den Gas Raum zurückzuführen. Die genauen Ursachen waren schwer zu eruieren, da die in den Behälterwänden fest verbauten Anlagenkomponenten nicht zugänglich waren. Da alle Rührwerksverstellungen drehende Komponenten enthalten, kann davon ausgegangen werden, dass die Gasverluste hauptsächlich über die entsprechende Lagerung der drehenden Elemente entstanden. Drehende Elemente sollten permanent mit Fett abgedichtet werden, damit Gasverluste durch allfällige Freiräume verhindert werden. Werden diese Wartungsarbeiten vernachlässigt, kann es zu Gasverlusten kommen. Bei Anlage E als auch bei Anlage K gelang es, die Gasverluste lediglich durch das Einfetten der Seildurchführung, stark zu reduzieren bzw. zu verhindern. Ein Teil der Verluste könnte auch auf Abnutzungerscheinungen der drehenden Elemente im Verlaufe der Zeit zurückzuführen sein. Rein mechanische Abnutzungerscheinungen können durch die korrosive Wirkung des Biogases zusätzlich verstärkt worden sein.

Das Emissionspotential der Rührwerksverstellungen, mit Ausnahme der Anlage E, wird grundsätzlich als gering angesehen. Die einzelnen Verlustquellen liessen sich mit vergleichsweise wenig Aufwand verhindern oder zumindest deutlich reduzieren.

3.3.2.4 Offener Fermenterüberlauf

Der offene Fermenterüberlauf ist bis heute bei landwirtschaftlichen Biogasanlagen noch weitverbreitet und beruht auf dem Massenverdrängungsprinzip. Durch die Beschickung des Fermenters mit frischem Substrat wird eine äquivalente Masse an Gärsubstrat aus dem Fermenter gedrückt, welche über einen Überlauf passiv in den Gärrestbehälter oder den Nachgärer fliesst. Somit entfällt für diesen Bereich die teure und energieintensive Pumpentechnik. Durch die offene Verbindung des Überlaufrohrs mit dem Gärraum sowie die ständige Flutung (mindestens zweimal am Tag) mit frischem Gärsubstrat aus dem Fermenter, kann Methan jedoch ungehindert entweichen und ist somit nachteilig. Teilweise wurden erhebliche Methanverluste gemessen (Tabelle 11).

Tabelle 9: Schwachstellen- und Ursachenanalyse der detektierten Verlustquellen im Bereich von Rohrdurchführungen in Gärbehälter

Emissions- quelle	Rohrdurchführung in Fermenter/Nachgärer					Geschätztes Emissionspotential
	Messkonzentration		Ursache n a n a l y s e		Detailbeschreibung	
	min	max	Fehlerquellen-Typ			
Anlage B	14.8 Vol.-%	19.8 Vol.-%	Baumängel	Loch und Riss am Eintrittsort der nachträglich installierten Verbindungsleitung vom Separator in den Nachgärer. Rissbildung in der Betonwand bis hin zur Krone.		mittel
	x	3.0 Vol.-%	Baumängel	Poröse Stelle im Beton im Bereich der Durchführung der Substratbeschickungsleitung in den Fermenter.		gering - mittel
	x	0.5 Vol.-%	technischer Mängel / Konstruktionsmängel	Durchführung der alten Gasentnahme (nach Stilllegung)		gering
Anlage D	x	54 Vol.-%	Baumängel	Loch in der lediglich mit Isolierschaum abgedichteten Rohrdurchführung vom Separator in den Nachgärer.		gross - sehr gross

Emissions- quelle	Rohrdurchführung in Fermenter/Nachgärer					Geschätztes Emissionspotential
	Messkonzentration		Ursachenanalyse			
	min	max	Fehlerquellen-Typ	Detailbeschreibung		
Anlage G		0.3 Vol.-%	Konstruktionsmängel / Installationsmängel	Ausser Betrieb genommener offener Rohrstutzen (ehemaliger Rücklauf vom Separator) auf dem Fermenterdach		gering
Anlage I	x	17 Vol.-%	Installationsmängel	Undichte Rohreinführung des Sauerstoffeintrags in den Fermenter		mittel - gross
Anlage K	16 Vol.-%	50 Vol.-%	Installationsmängel / Montagemängel	Undichte Abdeckung der Rohrdurchführung für die Gassfüllstandssonde sowie den Temperaturfühler.		mittel - gross

Tabelle 10: Schwachstellen- und Ursachenanalyse der detektierten Verlustquellen im Bereich der Rührwerksverstellung

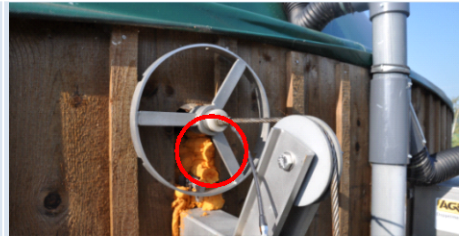
Emissions- quelle	Rührwerksverstellung					Geschätztes Em issionspotential
	Messkonzentration		Ursachenanalyse			
	min	max	Fehlerquellen-Typ	Detailbeschreibung		
Anlage C	0.73 Vol.-%	0.87 Vol.-%	Vernachlässigung Wartungsarbeiten / Abnutzungserscheinung	Undichte Stelle am Kugellager der Welle zur Winkelverstellung.		gering
		170 ppm	Vernachlässigung Wartungsarbeiten / Abnutzungserscheinung	Undichte Stelle am Kugellager der Welle zur Winkelverstellung.		sehr gering
Anlage D	x	4.8 Vol.-%	Vernachlässigung Wartungsarbeiten / Abnutzungserscheinung	Undichte Stelle am Kugellager der Welle zur Winkelverstellung.		gering - mittel
Anlage E	0.1 Vol.-%	29 Vol.-%	Wartung	Undichte Seildruchführung des Tauchrührwerkes sowie Verluste über die Rohrdurchführung der Welle für die Winkelverstellung.		mittel
Anlage K	x	12 Vol.-%	Vernachlässigung Wartungsarbeiten / Abnutzungserscheinung	Verluste über die Seildurchführung des Tauchrührwerks.		gering - mittel
	400 ppm	0.1 Vol.-%		Verluste nach dem Abfetten der Seildurchführung		gering

Tabelle 11: Schwachstellen- und Ursachenanalyse der detektierten Verlustquellen im Bereich von offenen Fermenter überlaufen

Emissions- quelle	Offener Fermenterüberlauf					Geschätztes Emissionspotential
	Messkonzentration		Ursachenanalyse			
	min	max	Fehlerquellen-Typ	Detailbeschreibung		
Anlage A	x	0.22 Vol.-%	Konstruktionsmängel	Methanemissionen durch offenen Überlauf vom Fermenter ins unterirdische Gärrestlager.		gering - mittel
Anlage B	x	0.13 Vol.-%	Konstruktionsmängel	Methanemissionen durch offenen Überlauf vom Fermenter in den Nachgärer.		gering - mittel
Anlage F	x	1.18 Vol.-%	Konstruktionsmängel	Methanemissionen über die Füllstandsüberwachung des Fermenters (gleiches Funktionsprinzip wie Fermenterüberlauf in den Nachgärer)		mittel
Anlage H	800 ppm	0.13 Vol.-%	Konstruktionsmängel	Methanemissionen durch offenen Überlauf vom Fermenter in den Nachgärer.		gering - mittel
Anlage I	x	0.6 Vol.-%	Konstruktionsmängel	Stellenweise Methanemissionen durch ungenügend abgedichteten Überlauf vom Fermenter in den Nachgärer.		gering - mittel

Mit Hilfe eines Hitzdraht-Anemometers gelang es, die Geschwindigkeit des aufsteigenden Biogases zu erfassen. Parallel dazu wurde die Methankonzentration im Überlaufrohr selbst gemessen. Um Verdünnungen mit der Umgebungsluft zu verhindern, wurden die Methankonzentrationen ca. 20 cm im Rohrrinnern gemessen. Da Methan leichter als Luft ist, kann davon ausgegangen werden, dass im Rohr selbst keine Aufkonzentrierung des Methans stattfand.

Die berechneten Emissionen liegen im Bereich zwischen $0.01 \text{ Nm}^3 \text{ h}^{-1}$ und $0.25 \text{ Nm}^3 \text{ h}^{-1}$ (Tabelle 12). Eine Hochrechnung auf Emissionen pro Tag ist aufgrund dieser Momentaufnahme nicht möglich. Wird der Überlauf mit frischem Substrat gespült (wie im Beispiel der Anlage A), steigen die Methanemissionen für eine kurze Zeit stark an, bis sich das Substrat in der Leitung ein wenig abgekühlt hat und die Methanproduktion zunehmend gehemmt wird. Das Emissionspotential von offenen Fermenter überlaufen kann allgemein als mittel eingestuft werden.

Tabelle 12: Schätzung der Methanverluste über offene Fermenter Überläufe der untersuchten BGAs aufgrund der gemessenen CH_4 -Konzentrationen und der Abluftströme (Q)

Anlage	CH_4 [vol%]	Q [$\text{m}^3 \text{ h}^{-1}$]	M_{CH_4} [$\text{Nm}^3 \text{ h}^{-1}$]
A	0.22	48.5	0.09
B	0.04	19.4	0.01
	0.13	19.4	0.02
F	1.18	24.3	0.25
H	0.08	63.1	0.04
	0.13	63.1	0.07
Mittelwert	0.3	39.6	0.08
Median	0.1	36.4	0.06
Stabw.	0.4	21.1	0.09

3.3.2.5 Schauglas

Bei zwei Anlagen konnten Gasverluste im Bereich der Schaugläser ausfindig gemacht werden (Tabelle 13). Bei der Anlage F konnte der Verlust des einen Fensters eindeutig auf zwei ungenügend angezogene Schraubenmutter zurückgeführt werden. Wodurch das Leck beim zweiten Fenster entstand, konnte nicht abschliessend geklärt werden. Die Vermutung liegt jedoch nahe, dass auch hier eine mangelhafte Abdichtung zu den Verlusten führte.

Bei der Anlage H wurden sowohl beim Fermenter sowie auch beim Nachgärer Risse in der Betonwand zwischen der Behälterkrone und dem Schaufenster entdeckt. Die gemessenen Methankonzentrationen reichten bis zu 10 Vol.-%. Es wird vermutet, dass die Bewehrung um das Sichtfenster unzureichend ist. Das Methanverlustpotential über die Schaufenster wird aufgrund der qualitativen Untersuchungen als gering bis mittel geschätzt.

3.3.2.6 Rührwerk

Methanverluste über Rührwerke konnten an drei von zehn Anlagen mit Langachs- oder Zentralrührwerken detektiert werden (Tabelle 14). Die Ursachen für die Verluste waren verschieden. Bei Anlage J führte eine unvollständige Abdichtung der Flanschverbindung des Rührwerkes an der Fermenter Wand zu Verlusten. Aufgrund der sehr geringen Methankonzentrationen konnten die Verluste nicht mit der Kamera detektiert werden.

Die Verluste bei Anlage A und D sind vermutlich auf die gleichen Ursachen wie bei den Rührwerksverstellungen zurückzuführen. Wie bereits beschrieben wurde, können sich drehende Komponenten in Bezug auf die Gasdichtigkeit als Schwachstelle erweisen. Obwohl die

Rohrdurchführung der Rührwerke unter dem Flüssigkeitsniveau im Behälter zu liegen kommt, kann aufgrund des Restmaterials im Führungsrohr Methan entlang der Antriebswelle gegen aussen entweichen. Dies bedingt jedoch, dass Undichtheiten auf Höhe des Drehlagers in der Fermenter Wand vorkommen. Je nachdem, ob sich das Rührwerk bewegte oder nicht, konnten sowohl optische Unterschiede in den Verlusten, als auch deutliche Unterschiede in den Konzentrationen vor Ort gemessen werden.

Die Verluste durch Rührwerke werden als mittel eingestuft.

3.3.2.7 Membranfolie

Risse in der Gasspeichermembran treten in der Praxis gelegentlich auf. 24 der 38 befragten Betriebsleiter gaben an, bereits Erfahrungen mit Membranschäden/-rissen gemacht zu haben. In elf Fällen trat dies erst einmal auf, in neun Fällen bereits zweimal und in zwei Fällen bereits mehr als zweimal. Aus der Befragung geht hervor, dass Membranbeschädigungen häufig bei Einfachmembranen auftreten. Diese bestehen aus dem Material EPDM und sind elastischer und wetterbeständiger als die Gasspeichermembranen (PE) der Doppelmembrandächer. Die EPDM-Membranen sind direkt der Witterung ausgesetzt, was den Alterungsprozess gegenüber den PE-Membranen beschleunigen kann. Die genauen Ursachen der Membranbeschädigungen wurden in dieser Arbeit nicht eruiert. Ob Leckagen in den PE-Membranen durch die Verdeckung mit der wetterbeständigen Deckmembran (PVC) in der Vergangenheit nicht beachtet wurden, lässt sich aufgrund der Aussagen der Anlagenbetreiber nicht herausfinden. Aus den Aussagen geht jedoch hervor, dass einige Betreiber aufgrund ihrer negativen Erfahrung mit EPDM-Membranen, im Hinblick auf Beschädigungen und Ablösungen, auf das Doppelmembransystem gewechselt haben. Beim Screening der Anlagen konnten Risse festgestellt werden (Tabelle 15). Das Emissionspotential von Rissen wie bei der Anlage J ist gross.

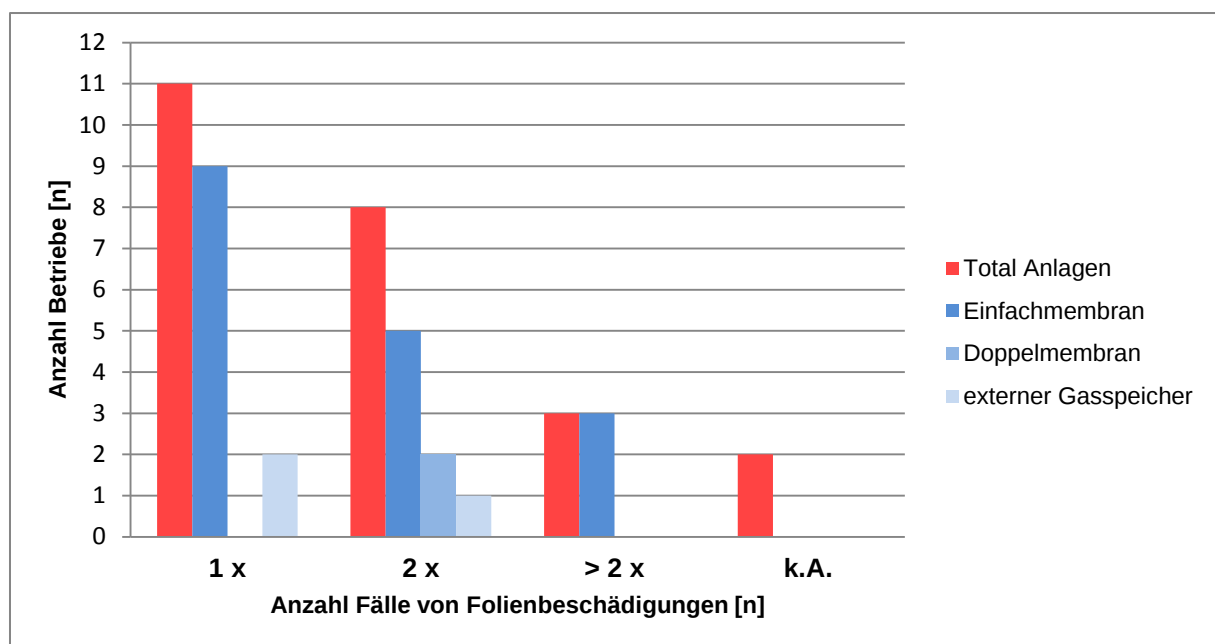


Abbildung 7: Aussagen der befragten Anlagenbetreiber zu Erfahrungen mit Membranbeschädigungen durch Risse oder Löcher je nach Art der Membran

Tabelle 13: Schwachstellen- und Ursachenanalyse der detektierten Verlustquellen im Bereich der Schaugläser

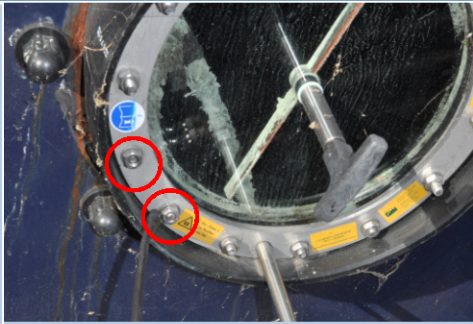
Emissions- quelle	Schaugläser					Geschätztes Emissionspotential	
	Messkonzentration		Ursachenanalyse				
	min	max	Fehlerquellen-Typ	Detailbeschreibung			
Anlage F	x	0.6 Vol.-%	Vernachlässigung Wartungsarbeiten	Gasverluste an den Schaugläsern des Gärrestlagers. Am rechten Fenster (östlich) konnte eine Leckage auf der rechten Seite entdeckt werden. Am linken Fenster (westlich) war unten links eine Glas-Befestigungsschraube locker.			gering - mittel
	x	0.6 Vol.-%	unklar				gering - mittel
Anlage H	0.83 Vol.-%	10 Vol.-%	Baumängel	Gasverluste am oberen Rand des Schaufensters, vermutlich hervorgerufen durch einen Riss in der Betonwand bis hin zur Fermenterkrone.			mittel
	x	0.43 Vol.-%	Baumängel	Gasverluste am oberen Rand des Schaufensters, vermutlich hervorgerufen durch einen Riss in der Betonwand bis hin zur Krone des Nachgärers.			gering - mittel

Tabelle 14: Schwachstellen- und Ursachenanalyse der detektierten Verlustquellen im Bereich des Rührwerkes

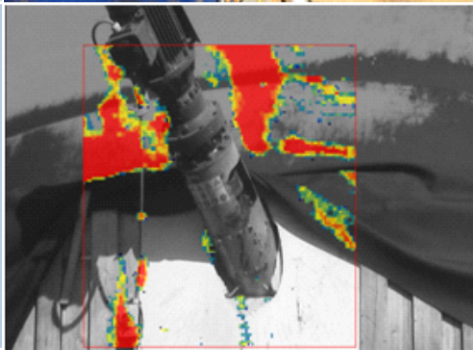
Emissions- quelle	Rührwerk					Geschätztes Emissionspotential
	Messkonzentration		Ursachenanalyse			
	min	max	Fehlerquellen-Typ	Detailbeschreibung		
Anlage A	0.35 Vol.-%	0.6 Vol.-%	Vernachlässigung der Wartungsarbeiten	Gasverluste im Bereich der Antriebswelle des Rührwerks unterhalb des Motors.		mittel
	50 ppm (abgefettet)	0.2 Vol.-% (abgefettet)	technische Mängel / Konstruktionsmängel	Um die Verluste einzudämmen wurde das Rührwerk neu abgefettet und erneut gefilmt.		gering - mittel
Anlage D	7 Vol.-%	15 Vol.-%	Vernachlässigung der Wartungsarbeiten / Technischer Mängel / Konstruktionsmängel	Gasverluste im Bereich der Antriebswelle des Rührwerks unterhalb des Motors. Während des Rührvorgangs war mehr Gas ersichtlich als zwischen den Rührintervallen. Die Konzentrationsmessungen an dieser Stelle hingegen zeigten während des Rührvorgangs tiefere Konzentrationen.		mittel - gross
Anlage J	14 ppm	55 ppm	Installation	Flanschverbindung vom Fermenterrührwerk undicht.		gering

Tabelle 15: Schwachstellen- und Ursachenanalyse der detektierten Verlustquellen im Bereich der Membran

Emissions- quelle	Membranfolie					Geschätztes Emissionspotential
	Messkonzentration		Ursachenanalyse			
	min	max	Fehlerquellen-Typ	Detailbeschreibung		
Anlage I	0.6 Vol.-%	2.2 Vol.-%	Konstruktionsmängel	Konzentrationsmessungen am Austrittsort der Füllstandsanzeige der inneren Membran liessen auf eine Leckage an der Membrane schliessen. Wie sich zu einem späteren Zeitpunkt herausstellte, wies die innere Membran auf einer Seite im Bereich der Fermenterkrone einen ca. 10 cm langen Riss auf.		gering - mittel
Anlage J	49 Vol.-%	60 Vol.-%	Materialermüdung / mech. Beschädigung	Ca. 5 cm langer Riss in EPDM-Folie Quer zur Foliennaht.		sehr gross
	7 ppm	175 ppm	Materialermüdung	Spröde Dichtungsfolie am Rand des Nachgärers.		sehr gering - gering

3.3.2.8 Membranzwischenraum

Risse oder sonstige Membranbeschädigungen an Doppelmembransystemen können aufgrund des Tragluftdaches optisch nicht erkannt werden. Dennoch lassen sich Membranbeschädigungen anhand von Konzentrationsmessungen am Austrittsort der Tragluft erkennen. Im Fall von Anlage I konnten Methankonzentrationen von bis zu 0.2 Vol.-% gemessen werden (Tabelle 16). Aufgrund solch hoher Konzentrationen ist davon auszugehen, dass die Methanverluste nicht ausschliesslich auf die natürliche Permeabilität der Gasspeichermembrane zurückzuführen sind, sondern zusätzlich Leckagen in der Gasspeichermembrane vorhanden sein müssen. Tabelle 16 zeigt einen Überblick der Methanverluste über die Doppelmembranen der untersuchten Biogasanlagen. Berücksichtigt wurden lediglich jene Anlagen, welche keinen intervallgesteuerten Lüfter am Tragluftdach einsetzten. Grund hierfür ist, dass die Luftumwälzung nur bei permanentem Betrieb geschätzt werden kann.

Tabelle 16: Geschätzte Methanverluste über die Doppelmembranen der untersuchten Biogasanlagen aufgrund der gemessenen CH₄-Konzentrationen und der Luftumwälzung Q

Anlage	CH ₄ [vol%]	Q [m ³ h ⁻¹]	V _{CH4} [Nm ³ d ⁻¹]	Membran- fläche [m ²]	V _{CH4} % des erlaubten
A	0.005	99.0	0.104	133.0	78
B	0.009	99.0	0.187	89.1	210
I	0.200	10.7	0.452	89.1	507
K	0.070	45.2	0.666	133.0	500
	0.094	45.2	0.889	133.0	668
L	0.001	28.3	0.008	158.3	5
	0.005	28.3	0.030	158.3	19
Mittelwert	0.055	50.81	0.33		
Median	0.009	45.24	0.19		
Stabw.	0.074	34.93	0.34		

Die Methanverluste lagen zwischen 0.008 Nm³ d⁻¹ und 0.89 Nm³ d⁻¹. Unter Berücksichtigung der Membranfläche lässt sich errechnen, wie sich die Verluste zu den gesetzlich erlaubten Emissionen verhalten (siehe Kapitel 2.1.4). Die Emissionen bei den Anlagen I und K übertreffen die zulässigen Werte um ein Vielfaches. Daher kann davon ausgegangen werden, dass in beiden Fällen Leckagen an der inneren Gasspeichermembran vorhanden waren.

3.3.2.9 Überdruckventil

Die Funktion des Überdruckventils besteht darin, Überdrücke im Gasspeicher zu vermeiden, indem überschüssiges Gas kontrolliert aus dem Speicher abgelassen wird. Das Ventil ist somit eine erwünschte Emissionsquelle im Interesse des Anwenderschutzes. In zwei Fällen konnten an den untersuchten Biogasanlagen Leckagen im Bereich der Überdruckventile gefunden werden (Tabelle 17). Dabei handelte es sich nicht um betriebsbedingte Verluste, welche direkt auf den Anlagenbetreiber sowie dessen Betriebsweise zurückzuführen sind.

Die Verluste bei Anlage D können auf grobe Konstruktionsmängel zurückgeführt werden. Durch die Senkung der Holzaussenfassade wurde das Überdruckventil aus seiner ursprünglichen Position verschoben. Dies führte dazu, dass ein Leck am Verbindungsstück mit dem Gas Raum im Fermenter entstand. Aufgrund der direkten Verbindung des Überdruckventils mit dem Gas Raum wird das Emissionspotential als gross eingeschätzt.

Beim mechanischen Überdruckventil der Anlage E konnten weit geringere Verluste entdeckt werden. Aufgrund einer deformierten Gummiabdichtung konnte Biogas in geringen Mengen entweichen, da die Verluste mit der Kamera nicht entdeckt werden konnten, wird das Emissionspotential als gering eingestuft.

Tabelle 17: Schwachstellen- und Ursachenanalyse der detektierten Verlustquellen im Bereich des Überdruckventils

Emissions- quelle	Überdruckventil					Geschätztes Em issionspotential	
	Messkonzentration		Ursachenanalyse				
	min	max	Fehlerquellen-Typ	Detailbeschreibung			
Anlage D	x	31.4 Vol.-%	Baumängel \ Konstruktionsmängel	Nach Aussagen des Betreibers senkte sich im Verlaufe der Zeit die Holzverkleidung des Fermenters, an welcher auch die Konstruktion des Ventils befestigt ist. Dies hatte wiederum zur Folge, dass sich zwischen der Verbindungsmuffe und der Fermenterwand eine undichte Stelle bildete. Des Weiteren war vermutlich die Funktionsfähigkeit des Überdruckventils durch dessen schräge Lage beeinträchtigt, so dass dort ebenfalls Gas ausströmen konnte.			gross - sehr gross
Anlage E	x	3.5 Vol.-%	technischer Mängel	Da der Dichtungsgummi des mechanischen Überdruckventils um die Plexiglasscheibe herum an zwei Stellen Unebenheiten aufwies, bildeten sich in diesem Bereich kleinere Leckstellen.			gering

3.3.2.10 Feststoffeintrag

Im Bereich der Feststoffbeschickung konnte lediglich eine Anlage gefunden werden, die Leckagen aufwies (Tabelle 18). Bei diesem Beschickungssystem führt ein Förderband die Substratmischung direkt aus dem Mischwagen über die Stopfschnecke. Das Substrat fällt anschliessend in den Schneckenförderer und wird durch diesen in den Fermenter befördert. Stopfschnecken sollten, um Gasverluste aus dem Gas Raum des Behälters zu verhindern, unterhalb des Flüssigkeitsniveaus liegen. Dennoch kann sich bei entleerter Schnecke das Durchführungsrohr mit Gärsubstrat füllen. Da die Schnecke das Rohr nicht vollständig abdichtet, kann das aus diesem Gärsubstrat entstehende Gas entweichen. Bei zu geringem Niveaustand im Behälter steht das Durchführungsrohr in direkter Verbindung mit dem Gas Raum. Zwar sollte die Regeltechnik der Anlage dies verhindern, dennoch kann dieser Fall nicht gänzlich ausgeschlossen werden. Wegen der permanenten Gasproduktion des Gärsubstrats im Durchführungsrohr sowie der grossen Undichtigkeit zwischen Rohr und Schneckenförderer wurde das Emissionspotential als gross geschätzt.

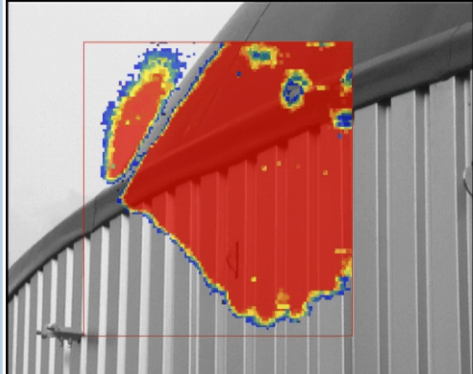
3.3.2.11 Revisionsöffnung

Serviceöffnungen in einem Gärbehälter dienen dazu, die Behälter bei den Wartungsarbeiten einfach betreten und/oder allfällig notwendige Gerätschaft für die Innenreinigung (z.B. Kompaktlader) in das Innere befördern zu können (z. B. bei Fermenter Dächern aus Beton). Grundsätzlich befinden sich solche, meist manngrossen Einstiegslöcher, unter dem Flüssigkeitsniveau. Somit können Gasverluste erst gar nicht auftreten. Unter gewissen Umständen, kann der Füllstand jedoch schwanken und unter der Öffnung zum Liegen kommen. Dies kann zum Beispiel im Nachgärer, welcher als Gärrestlager dient, der Fall sein, wenn aufgrund der Jahreszeit viel Gärrest zur Düngung entnommen wird. Im beobachteten Fall der Anlage K war der tiefe Niveaustand darauf zurückzuführen, dass der Nachgärer erst zwei Tage zuvor in Betrieb genommen wurde (Tabelle 19). Somit lag das Flüssigkeitsniveau weit unten und der Methangehalt im Biogas betrug lediglich rund 20 Vol.-%. Aufgrund der Kamerabilder war zu erkennen, dass es sich um einen erheblichen Verlust handelte. Bei einer nachträglichen Kontrolle wurde die entsprechende Blindplatte nochmals mit Dichtmasse abgedichtet, was zu einer Reduktion der Emissionen führte. Das Emissionspotential kann als hoch eingestuft werden.

Tabelle 18: Schwachstellen- und Ursachenanalyse der detektierten Verlustquellen im Bereich des Feststoffeintrags

Emissions- quelle	Feststoffeintrag					Geschätztes Em issionspotential
	Messkonzentration		Ursachenanalyse			
	min	max	Fehlerquellen-Typ	Detailbeschreibung		
Anlage F	x	7.8 Vol.-%	Konstruktionsmängel / Technischer Mängel	Da direkte Gasverluste über die Stopfschnecke aus dem Gasraum des Fermenters ausgeschlossen werden können (Eintrag unter Substratniveau), liegt die Erklärung nahe, dass es sich dabei um Emissionen aus dem sich in der Leitung der Stopfschnecke befindlichen Gärsubstrates handelt. Dieses Gas konnte aufgrund von Undichtigkeiten (s. roter Kreis) in der Schnecke entweichen.	 	gross

Tabelle 19: Schwachstellen- und Ursachenanalyse der detektierten Verlustquellen im Bereich der Revisionsöffnung

Emissions- quelle	Revisionsöffnung					Geschätztes Emissionspotential	
	Messkonzentration		Ursache n a n a l y s e				
	min	max	Fehlerquelle n -Typ	Detailbeschreibung			
Anlage K	5.9 Vol.-%	20 Vol.-%	Installationsmängel	Mangelnde Abdichtung einer Revisionsöffnung des Nachgärers. Durch den tiefen Pegelstand des Substrates im Nachgärer befand sich die Öffnung zur Zeit der Messung im Gasraum.			gross - sehr gross

3.3.3 Diskussion - Relative Bedeutung der qualitativ erfassten Emissionsquellen

Es ist aufgrund der GasCam-Daten nicht möglich die Methanverluste genau zu quantifizieren. Dennoch kann deren relative Bedeutung beurteilt werden (Tabelle 20). Besonders gross ist das Emissionspotential bei Membranen und Überdruckventilen. Die Emissionen durch die natürliche Permeabilität der Membran sollten weniger als 0.05 % der gesamten produzierten Methanmenge betragen. Im Falle einer Membranbeschädigung, die sich auf zwei Drittel der untersuchten Betriebe mindestens einmal ereignet hat, können die Emissionen um ein Vielfaches höher liegen. Bei Überdruckventilen summieren sich die konstruktionsbedingten Verluste, zu den betriebsbedingten (beispielsweise bei Überproduktion von Biogas, Stilllegung der Anlage) hinzu. Einzelne Quellen emittieren permanent, andere wie Rührwerke und Beschickungsanlagen zeitlich begrenzt.

Tabelle 20: Relative Bedeutung der mit der GasCam erfassten Emissionsquellen

Emissionsquelle	Häufigkeit	Ursache	Emissionspotential
Behälterkrone	sehr hoch	Baumängel	pro Leck gering, gesamthaft gross
Rohrdurchführung	hoch	Baumängel	gross
Rührwerkverstellung	hoch	Fehlende Wartung	gering
Offener Fermenterüberlauf	hoch	Konstruktionsmängel	mittel
Schauglas	mittel	Baumängel	gering
Rührwerk	mittel	Fehlende Wartung	mittel
Membran	mittel	Materialermüdung	sehr gross
Überdruckventil	gering	Konstruktionsmängel	sehr gross
Feststoffeintrag	sehr gering	Konstruktionsmängel	gross
Revisionsöffnung	sehr gering	Konstruktionsmängel	gross

3.4 Methoden der Quantitativen Erfassung der Gärrestemissionen

3.4.1 Messkonzept

Die quantitative Erfassung der Methanverluste aus Gärresten wurde auf drei landwirtschaftlichen Biogasanlagen während der vier Jahreszeiten durchgeführt. Die Probenahme der Gärreste erfolgte nach folgenden vier Vergärungs- bzw. Behandlungsstufen (**Abbildung 8**):

1. Fermenter
2. Nachgärer
3. Feste Gärreste nach der Separierung aus dem Nachgärer
4. Flüssige Gärreste nach der Separierung aus dem Nachgärer

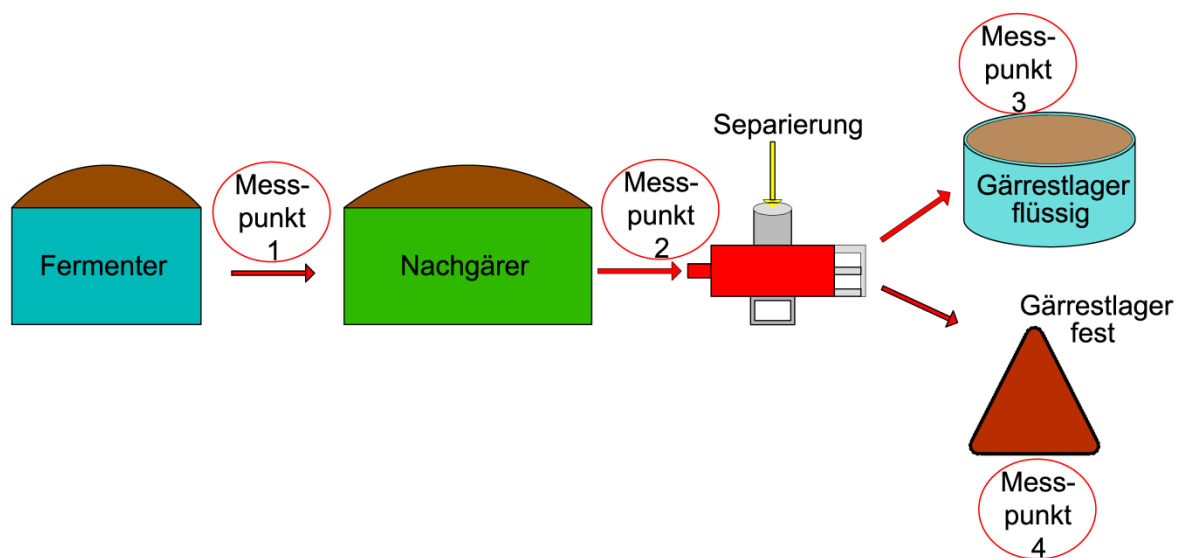


Abbildung 8: Schematische Darstellung der Vorgehensweise bei den Probenahmen von Gärresten

Mit dieser Vorgehensweise soll aufgezeigt werden, inwiefern jede Vergärungs- bzw. Behandlungsstufe zur Reduktion der Methanemissionen im Gärrest beiträgt. Quervergleiche zwischen den einzelnen Anlagen zeigen die Auswirkungen unterschiedlicher Betriebseinflüsse.

Bei den Probenahmen der Gärreste wurde wie folgt vorgegangen:

- Das Rührwerk im Fermenter beziehungsweise Nachgärer war vorgängig während 15 Minuten im Betrieb, um eine homogene und repräsentative Probe zu erhalten.
- Vor der Probeentnahme wurde das Probenahmerohr durchgespült, um alte Ablagerungen zu entfernen.
- Das Probenahmerohr wurde so lange gespült, bis die Temperatur des austretenden Substrats jener des Gärbehälters entsprach oder zumindest konstant blieb (das Substrat kann sich beim Pumpvorgang leicht abkühlen).

Falls es die technischen Möglichkeiten erlaubten, wurde die Probe direkt von der Entnahmeleitung in die dynamische Durchflussskammer eingefüllt. Ansonsten wurde das Substrat in kürzester Zeit aus einem Zwischenbehälter in der Durchflussskammer geschöpft. Bei der Befüllung wurde zusätzlich das Gewicht der Probe bestimmt. Die Messdauer betrug für jede Probe fünf Tage.

Durch das Messen unter „kontrollierten Bedingungen“ stört man unvermeidlich die Quelle selber und beeinflusst in gewissem Masse die Emissionsrate. Mit der dynamischen Durchflussskammer wurde versucht, die Praxisbedingungen so realitätsnahe wie möglich zu simulieren. Frisches Material wurde in beträchtlicher Menge (0.24 m^3) verwendet. Die Luftgeschwindigkeit über den Gärresten entsprach der mittleren Windgeschwindigkeit. Die Lufttemperatur entsprach der Aussentemperatur. Um die Lagersituation der festen Gärreste am Haufen besser simulieren zu können, wurde die Probe bei der Befüllung schichtweise manuell verdichtet. Vorversuche hatten gezeigt, dass bei loser Befüllung teilweise nur aerobe Prozesse im Innern der Durchflussskammer stattfinden. Bei Probemessungen an Gärresthaufen auf Praxisbetrieben wurde jedoch festgestellt, dass durch Verdichtungen und feuchte Milieubedingungen im Innern des Haufens stellenweise anaerobe Prozesse neu in Gang kommen, welche zu Methanemissionen führen.

3.4.1.1 Dynamische Durchflussskammer - Funktionsprinzip

In der Durchflussskammer strömt ein deformierter Luftstrom über die Gärrestprobe. Die Methanemissionen aus der Probe werden kontinuierlich und kontrolliert abgeführt. Dabei wird sowohl die Gaskonzentration der Zuluft als auch jene der Abluft gemessen. Aus der Lufrate und der Differenz der Gaskonzentrationen der Zu- und Abluft kann die Emissionsrate berechnet werden. Neben der Luftgeschwindigkeit und der Gaskonzentration wird ebenfalls die Temperatur und relative Feuchtigkeit der Zu- und Abluft gemessen (Abbildung 9). Die Gärreste werden direkt nach der Entnahme auf ihre Trockensubstanz (TS) sowie organische Trockensubstanz (oTS) überprüft. Der Temperaturverlauf der Gärreste in der Kiste wird während der Messperiode kontinuierlich mit zwei Temperatursensoren registriert.

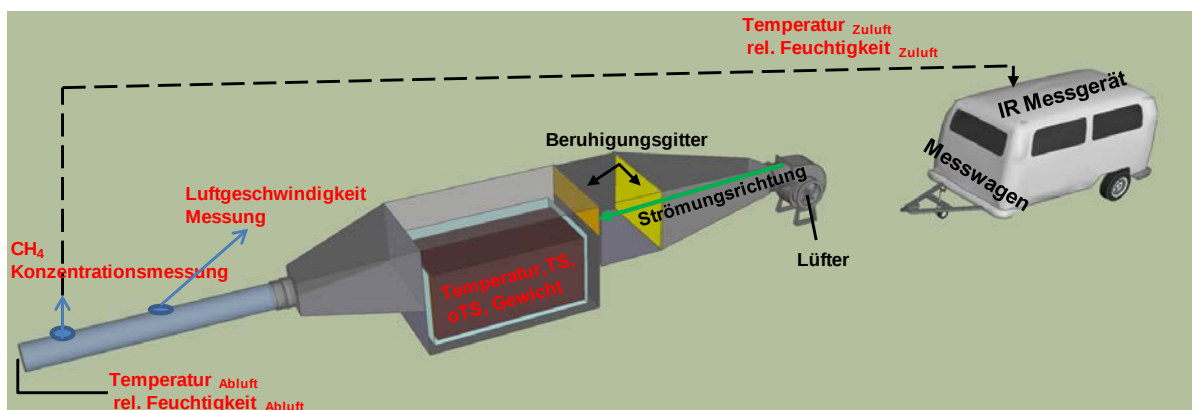


Abbildung 9: Schematische Darstellung des Versuchsaufbaus zur Messung der Methanemissionen aus Gärresten (dynamische Durchflussskammer)

Die Durchflussskammer besteht aus Fahrzeugbauplatten. In der Mitte der Kammer befindet sich ein Behälter aus Polyethylen mit einem Volumen von 0.24 m^3 ($0.8 \text{ m} \times 0.3 \text{ m} \times 1.0 \text{ m}$), was einer Gärrestmenge von etwa 115 kg Feststoffen und 240 kg Flüssigsubstraten entspricht. Auf der Zuluftseite befindet sich ein frequenzgesteuerter Radiallüfter mit einem regelbaren Luftvolumenstrom von 100 bis $1400 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ und einer maximalen Druckerhöhung von 800 Pa. Der Lüfter ermöglicht eine regelbare Luftgeschwindigkeit von $0,1$ bis $2,0 \text{ m s}^{-1}$ über dem Substrat. Diese entspricht in etwa der mittleren Windgeschwindigkeit über Gärrestlagern im Freien (Aschwanden *et al.*, 1996). Durch einen ca. 8 m langen Ansaugschlauch am Ventilator, kann der Ort für die Entnahme der Zuluft variiert werden. So kann gewährleistet werden, dass die Zuluft stets aus einem durch Methan unbelasteten Umfeld und in Bodennähe (Methan ist leichter als Luft) angesaugt wird. Dennoch wurde die Hintergrundkonzentration von Methan in der Zuluft täglich während rund einer halben Stunde gemessen.

Um eine homogen verteilte Luftgeschwindigkeit über der Gärrestprobe zu erreichen, sind zwei Beruhigungsgitter vor dem Substratlager in der Kammer eingebaut. Die Abluft fließt durch ein 3.2 m

langes Polyethylen Rohr mit einem Innendurchmesser von 148 mm (Abbildung 10). Ein explosionsgeschütztes Flügelrad-Anemometer zeichnet alle 30 Sekunden den Mittelwert der Luftgeschwindigkeit auf. Am Ende des Rohres werden zudem mit einem Testo Messsensor alle 30 Sekunden die Temperatur und die relative Feuchtigkeit der Abluft aufgezeichnet.

Die Probenahme für die Methankonzentrationsmessung der Abluft erfolgt hinter dem Anemometer. Dabei wird die Probe mittels einer Pumpe mit konstanter Förderrate im Messwagen über einen Teflon Schlauch ($\varnothing$ 5 mm) angesaugt. Die Probe wird anschließend zu einem Non Dispersiv Infrarot (NDIR) Messgerät zur Bestimmung der Methankonzentration geleitet. Die Messwerte des NDIRs werden alle 30 Sekunden in einem Logger gespeichert.

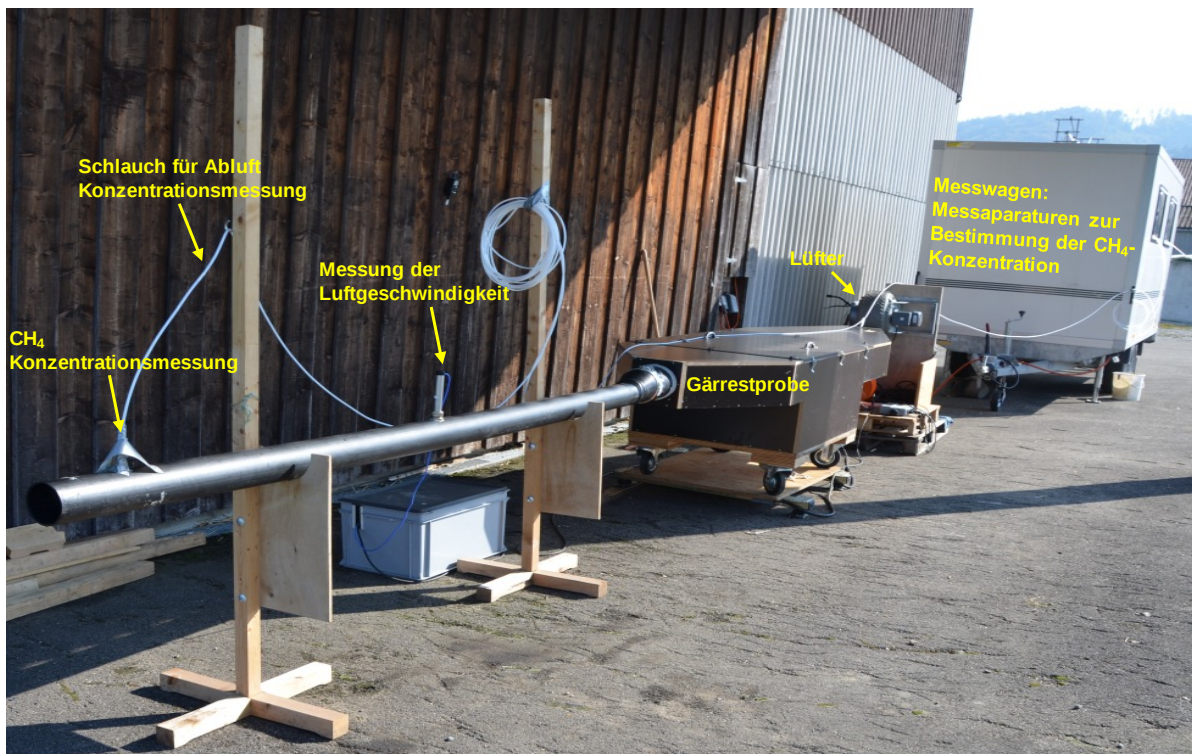


Abbildung 10: Gesamte Messeinrichtung zur Quantifizierung der Methanemissionen aus Gärresten

3.4.1.2 NDIR Messapparatur

Dem NDIR liegt als Messprinzip die Absorption elektromagnetischer Strahlung zugrunde. Jedes Gas verursacht bei bestimmten Wellenlängenbereichen im Infrarot-Bereich eine Strahlungsabsorption, die zum Nachweis des entsprechenden Gases herangezogen wird. Die Wellenlänge der Absorptionsbande charakterisiert dabei die Gas Art, während die Stärke der Absorption ein Mass für die Konzentration der Messkomponente ist. Am Detektor erhält man zeitlich aufeinanderfolgende Signale, wobei immer ein konzentrationsabhängiges auf ein konzentrationsunabhängiges Signal folgt. Die Differenz beider Signale ist ein Mass für die Methankonzentration.

Abbildung 11 gibt einen Einblick in das Innenleben des Messwagens. In der Mitte ist das NDIR-Messgerät (grau-blau) zu sehen. Mit Hilfe einer Pumpe wird die Methan-belastete Probe aus dem Abgasrohr angesaugt und anschliessend über einen Gaswäscher sowie einen Gaskühler dem NDIR-Gerät zugeführt.



Abbildung 11: Messgeräteaufbau im Innern des Messwagens

3.4.1.3 Berechnungsmodell

Der Luftvolumenstrom ist das Produkt der mittleren Luftgeschwindigkeit im Abluftrohr sowie dessen Querschnitt:

[Formel 1]

$$Q = A_{\text{Rohr}} \cdot v_{\text{Rohr,mittel}} \cdot 3600 \quad [\text{m}^3 \text{h}^{-1}]$$

Q:	Luftvolumenstrom im Abluftrohr [$\text{m}^3 \text{h}^{-1}$]
A:	Rohrquerschnitt [m^2]
$v_{\text{Rohr,mittel}}$:	mittlere Luftgeschwindigkeit im Rohr [m s^{-1}]

Die mittlere Luftgeschwindigkeit beträgt im turbulenten Bereich etwa 0.82 der gemessenen Geschwindigkeit in Rohrmitte [Käppeli, 1983].

Der CH_4 -Volumenstrom in $\text{Nm}^3 \text{ h}^{-1}$ ($\text{Nm}^3 \text{ h}^{-1}$) berechnet sich aus dem Produkt des Luftvolumenstroms und der Differenz der Methankonzentration zwischen Zu- und Abluft:

$$V_{\text{CH}_4} = ([\text{CH}_4]_{\text{Abluft}} - [\text{CH}_4]_{\text{Zuluft}}) \cdot 10^{-6} \cdot Q \cdot \rho_{\text{Luft}} / 1.29 \quad [\text{Formel 2}]$$

V_{CH_4} :	CH_4 -Volumenstrom [$\text{Nm}^3 \text{ h}^{-1}$]
$[\text{CH}_4]_{\text{Abluft}}/[\text{CH}_4]_{\text{Zuluft}}$:	CH_4 -Konzentration in der Abluft/Zuluft [ppm]
Q :	Luftvolumenstrom [$\text{m}^3 \text{ h}^{-1}$]
ρ_{Luft} :	Luftdichte [kg m^{-3}]
1.29:	Luftdichte bei 101300 Pa und 273.15 K [kg m^{-3}]

Der CH_4 -Volumenstrom lässt sich in CH_4 -Massenstrom umrechnen:

$$M_{\text{CH}_4} = V_{\text{CH}_4} \cdot 16.04 / 22.41 \quad [\text{Formel 3}]$$

M_{CH_4} :	CH_4 -Massenstrom [kg h^{-1}]
V_{CH_4} :	CH_4 -Volumenstrom [$\text{Nm}^3 \text{ h}^{-1}$]
16.04:	CH_4 -Molekulargewicht [kg kmol^{-1}]
22.41:	CH_4 -Molvolumen [$\text{Nm}^3 \text{ kmol}^{-1}$]

3.4.1.4 Hohenheimer Biogasertragstest

Parallel zu den Messungen in der dynamischen Durchflusskammer wurde an der Universität Hohenheim von jeder Gärrestprobe das Restgaspotential mit Hilfe des Hohenheimer Biogasertragstests (HBT) bestimmt. Der HBT basiert auf einem Batch-Verfahren, wobei die Gärreste erneut einer Vergärung unter optimalen Bedingungen ausgesetzt werden. Dabei wird der Gärprozess möglichst praxisgetreu unter Laborbedingungen nachempfunden. Glaskolben mit einem Fassungsvermögen von 100 ml dienen als Fermenter (Abbildung 12). Die Kolben-Fermenter werden mit jeweils 50 ml des jeweiligen Digestats befüllt und anschliessend mit einem Stopfen, mit Hilfe von Fett luftdicht abgeschlossen. Das Volumen des über die Zeit entstandenen Biogases, kann direkt anhand der Unterkannte des sich bewegenden Stopfens abgelesen werden. Zur regelmässigen Entnahme des Biogases ist am oberen Ende der Glasspritze ein Kapillarschlauch befestigt, welcher mit Hilfe einer Schlauchklemme abgedichtet wird.

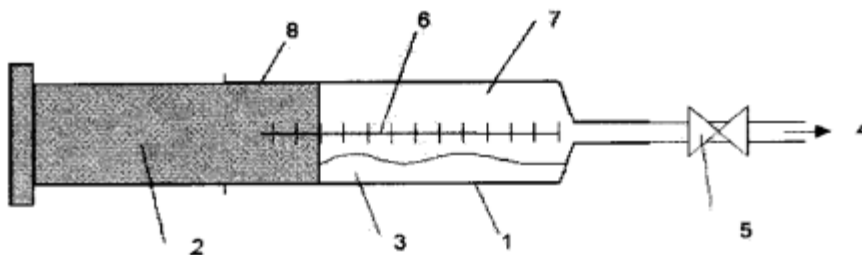


Abbildung 12: Glaskolben-Fermenter im Batch-Verfahren: 1) Glasspritze; 2) Stopfen; 3) Gärsubstrat; 4) Öffnung zur Gasanalyse; 5) Schlauchklemme; 6) Graduierung 1/1; 7) Gas Raum; 8) Gleit und Dichtmittel

Um eine kontinuierliche Durchmischung des Gärsubstrates und eine gleichmäßige Umlagerung der Dichtpaste zu gewährleisten, werden die befüllten Kolben-Fermenter an einem langsam drehenden Rotor befestigt (Abbildung 13). Der Rotoraufbau befindet sich in einem Trockenschrank, so dass für die gesamte Versuchsdauer von 60 Tagen eine konstante Gärtemperatur eingehalten werden kann.



Abbildung 13: Rotoraufbau im Trockenschrank des HBT

Durch die langsam wieder einsetzende Aktivität der Mikroorganismen kommt es zur Biogasbildung. Das entstehende Biogas drückt den Stopfen allmählich heraus und der Füllstand des Kolbens kann über die Graduierung abgelesen werden. Bei einem ausreichend hohen Gasvolumen wird, nach dessen Erfassen, das Gas über das Schlauchstück einem externen Analysegerät zur Bestimmung der Gasqualität zugeführt. Dabei wird das gesamte Biogas herausgedrückt und die Schlauchklemme anschließend wieder verschlossen (Hengelhaupt, 2005-2008). Für die Gasanalyse kommt ein externes Messgerät zum Einsatz, das nach der IR-Methode arbeitet. Voraussetzung für eine repräsentative Messung ist ein Mindestvolumen von 25 - 30 ml Biogas im Kolben-Fermenter (Hengelhaupt, 2005).

Von jeder Gärrestprobe werden drei Wiederholungen durchgeführt. Nach DIN-Norm 38414 wird die Gasausbeute so lange gemessen, bis die tägliche Zunahme der Gasmenge unter 1 % (absolut) fällt. Somit wird eine hohe Gasausbeute (gegen 100 %) der eingewogenen Trockenmasse erreicht. Mit Hilfe dieses Vorgehens können abschliessend Aussagen zum gesamten Restgaspotential der Gärrestproben gemacht werden. Neben der Biogas Ausbeute wird die Trockensubstanz (TS) sowie die organische Trockensubstanz (oTS) bestimmt. Linke et al. (2005) konnten den Einfluss der oTS auf die Methan ausbeute im Fermenter nachweisen. Ein Vergleich der Daten mit jenen aus den Emissionsmessungen soll Rückschlüsse über den Einfluss des Restgaspotentials auf die Methanemissionen in der Praxis zulassen.

3.4.2 Versuchsergebnisse der quantitativen (Durchflussskammer) Erfassung

Die Messungen fanden im Sommer und Herbst 2011, im Winter 2011-2012 und im Frühling 2012 statt. Die Sommermessungen wurden von Anfang Juni bis Mitte September, die Herbstmessungen von Mitte September bis Mitte Dezember, die Wintermessungen von Mitte Dezember bis Ende März und die Frühlingsmessungen von April bis Juni bei den landwirtschaftlichen Biogasanlagen 21, 13 und 5 durchgeführt.

3.4.2.1 Sommermessungen

3.4.2.1.1 BGA 21

Die durchschnittlich aus der Fermenterprobe emittierte Methanmenge pro Tag betrug 18.1 g, bei einer mittleren Aussentemperatur von 16.5 °C und einer durchschnittlichen Gärresttemperatur von 25 °C. (Abbildung 14). Der Durchschnittswert der Probe aus dem Nachgärer lag bei 25.1 g CH₄ Tag⁻¹, bei einer mittleren Aussentemperatur von 12.5 °C sowie einer mittleren Gärresttemperatur von 21 °C. Die Emissionsrate betrug am fünften Tag bei der Fermenterprobe noch lediglich ein Drittel jener am ersten Tag, bei der Nachgärerprobe war dies noch etwa ein Viertel. Bei beiden Proben sank die Gärresttemperatur stark ab.

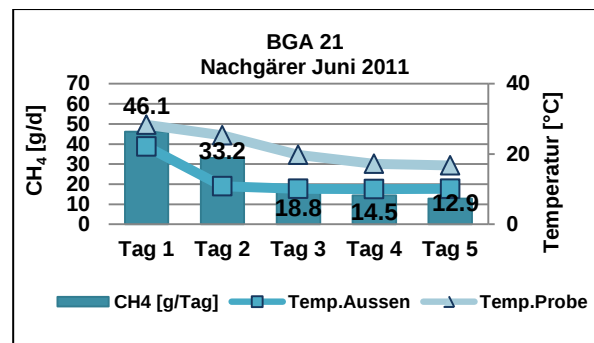
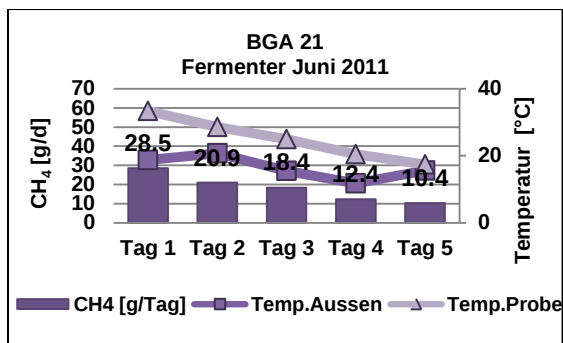


Abbildung 14: Methanemissionen im Sommer 2011 gemessen in der dynamischen Durchflussskammer, Biogasanlage 21, Gärrestproben aus dem Fermenter und Nachgärer

Bei den separierten flüssigen Gärresten betrug die durchschnittlich emittierte Methanmenge 17,4 g Tag⁻¹, bei den separierten festen Gärresten 2,5 g CH₄ Tag⁻¹ (Abbildung 15). Die mittlere Aussentemperatur während der 5 Messtage war bei den flüssigen Gärresten 14,5 °C und bei den festen 17,4 °C. Die mittlere Gärresttemperatur betrug bei den flüssigen Gärresten 18,6 °C, bei den festen 45,9 °C. Bei den flüssigen Gärresten betrugen die Emissionen am zweiten Tag noch lediglich 43% jener am ersten Tag. Am fünften Tag lagen sie noch bei etwa 12 %. Bei den festen Gärresten waren die Emissionen am zweiten Tag (4,0 g Tag⁻¹) mehr als doppelt so hoch im Vergleich zum ersten Tag (1,7 g Tag⁻¹). Die Steigung ging mit einer starken Temperaturerhöhung, die sich durch exotherme aerobe Reaktionen im Gärrest erklären lassen, einher. Die steigende Temperatur erhöht zugleich die Aktivität der weiterhin stellenweise aktiven anaeroben Prozesse, was die Emissionen erhöht. Die separierten festen Gärreste emittierten fast um einen Faktor 10 weniger Methan im Vergleich zu den flüssigen.

Der Trockensubstanz-Gehalt der Fermenterproben war höher als jener der Nachgärerproben (Tabelle 21). Die durchschnittlich aus der Fermenterprobe emittierte Methanmenge pro Tag betrug 20,5 g bei einer mittleren Aussentemperatur von 19,9 °C und einer durchschnittlichen Gärresttemperatur von 24,3 °C (Abbildung 16). Die Methanemissionen der Fermenterprobe nahmen innerhalb der ersten 48 Stunden um rund 70 % von 68,1 g Tag⁻¹ auf 19,7 g Tag⁻¹ ab. Am dritten Tag betrugen sie noch 11,6% der Emissionen am ersten Tag. Der Mittelwert der CH₄-Emissionen aus der Nachgärerprobe lag bei 3,5 g Tag⁻¹ bei einer mittleren Aussentemperatur von 20,1 °C und einer Gärresttemperatur von 25,2 °C. Die Emissionen fielen am zweiten Tag auf etwa die Hälfte zurück. Nach fünf Messtagen betrugen sie noch etwa 22 % der Emissionen am ersten Tag.

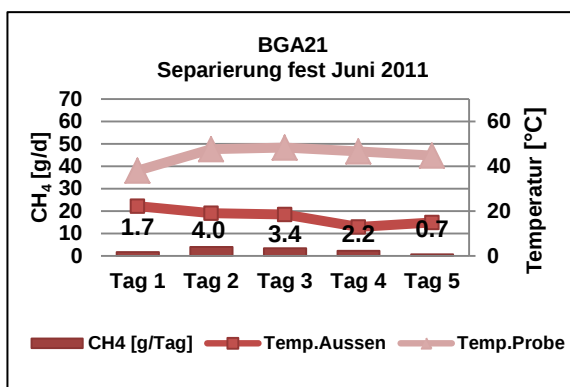
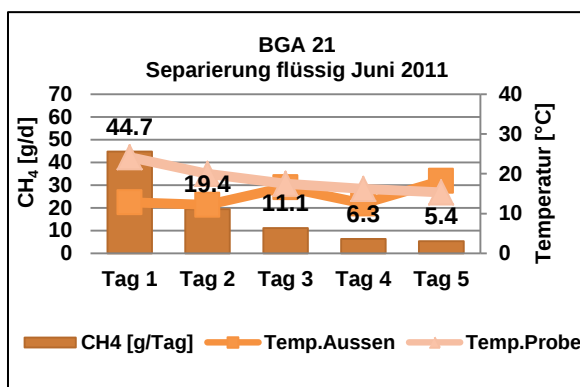


Abbildung 15: Methanemissionen im Sommer 2011 gemessen in der dynamischen Durchflussskammer, Biogasanlage 21, Gärrestproben separiert flüssig und fest

Tabelle 21: TS- und oTS-Gehalte der Gärreste aus den Sommermessungen der BGA 21

Probetyp BGA 21	Trockensubstanz-Gehalt (TS) [%]	davon organische Trockensubstanz (oTS) [%]
Fermenter	7.8	68.3
Nachgärer	4.7	62.6
Separiert flüssig	6.2	59.6
Separiert fest	31.3	86.7

3.4.2.1.2 BGA 13

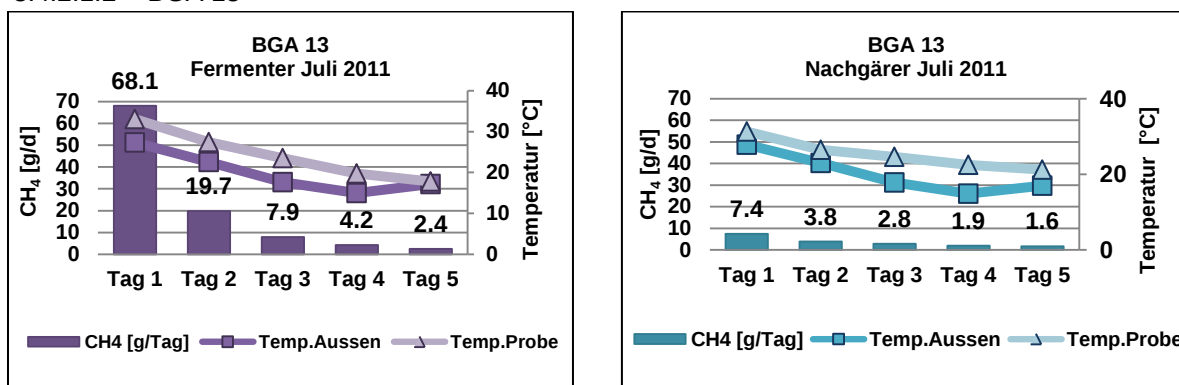


Abbildung 16: Methanemissionen im Sommer 2011 gemessen in der dynamischen Durchflussskammer Biogasanlage 13, Gärrestproben aus dem Fermenter und Nachgärer

Bei den separierten flüssigen Gärresten betrug die durchschnittlich emittierte Methanmenge 3.1 g Tag⁻¹, bei den separierten festen Gärresten 2.0 g Tag⁻¹ (Abbildung 17). Die mittlere Aussentemperatur während der 5 Messtage war bei den flüssigen Gärresten 18.6 °C und bei den festen 20 °C. Die mittlere Gärresttemperatur betrug bei den flüssigen Gärresten 22.8 °C, bei den festen 51.0 °C.

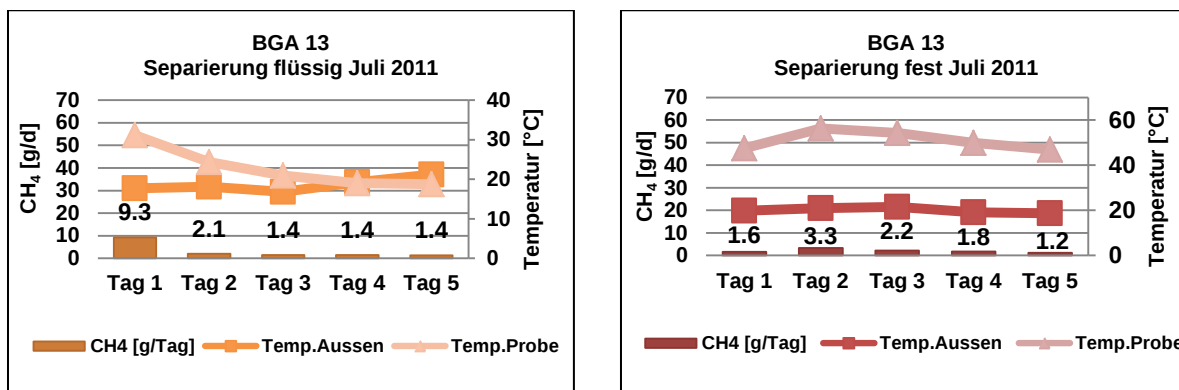


Abbildung 17: Methanemissionen im Sommer 2011 gemessen in der dynamischen Durchflussskammer, Biogasanlage 13, Proben separiert flüssig und fest

Bei den separierten flüssigen Gärresten reduzierten sich die CH₄-Emissionen, ähnlich wie bei der BGA 21, am zweiten Tag sehr stark. Gleichzeitig nahm die durchschnittliche Gärresttemperatur von 31.2 °C auf 24.3 °C ab. Die Emissionen betrugen am dritten Tag nur noch etwa 15.4 % jener am ersten Tag. Bei den separierten festen Gärresten verdoppelten sich die Emissionen vom ersten auf den zweiten Messtag und erreichten 3.3 g Tag⁻¹. Gleichzeitig nahm die Gärresttemperatur um fast 10 °C auf 56.4 °C zu. Nach fünf Messtagen betrugen die Emissionen 1.2 g Tag⁻¹, was 76.6 % der Menge am ersten Tag entspricht. Die Probetemperatur ist mit 47 °C gleich hoch wie am ersten Tag. Der

Trockensubstanzgehalt der Fermenter-, Nachgärer- und separierten flüssigen Gärresten war im Vergleich zur BGA 11 gering (Tabelle 22).

Tabelle 22: TS- und oTS-Gehalte der Gärreste aus den Sommermessungen der BGA 13

Probetyp BGA 13	Trockensubstanz-Gehalt (TS) [%]	davon organische Trockensubstanz (oTS) [%]
Fermenter	3.8	66.1
Nachgärer	3.7	66.5
Separiert flüssig	3.2	62.2
Separiert fest	31.1	86.2

3.4.2.1.3 BGA 5

Der Durchschnitt der täglich emittierten Methanmenge aus der Fermenterprobe ergibt 32.9 g bei einer durchschnittlichen Aussentemperatur von 22.8 °C und einem Mittelwert der Gärresttemperatur von 28.5 °C (Abbildung 18). Der Mittelwert der Temperatur in der dynamischen Durchflussskammer war 21.6 °C. Die Methanemissionen der Fermenterprobe nahmen innerhalb der ersten 48 Stunden um rund 48 % von 71.9 g Tag⁻¹ auf 37.4 g Tag⁻¹ ab. Nach fünf Tagen konnten noch 17 % der ursprünglichen Emissionen gemessen werden. Der Durchschnittswert der Emissionen aus der Nachgärerprobe lag bei 8.3 g Tag⁻¹, bei einer mittleren Aussentemperatur von 20.4 °C. Der Mittelwert der Temperatur in der dynamischen Durchflussskammer war 21.6 °C. Die Methanemissionen der Nachgärerprobe nahmen während der Messperiode von 3.9 g Tag⁻¹ am ersten bis auf 11.7 g Tag⁻¹ am fünften Tag zu. Die Temperatur der Gärrestprobe lag nach fünf Tagen bei 19.3 °C, was 7.5 °C weniger als am ersten Tag war.

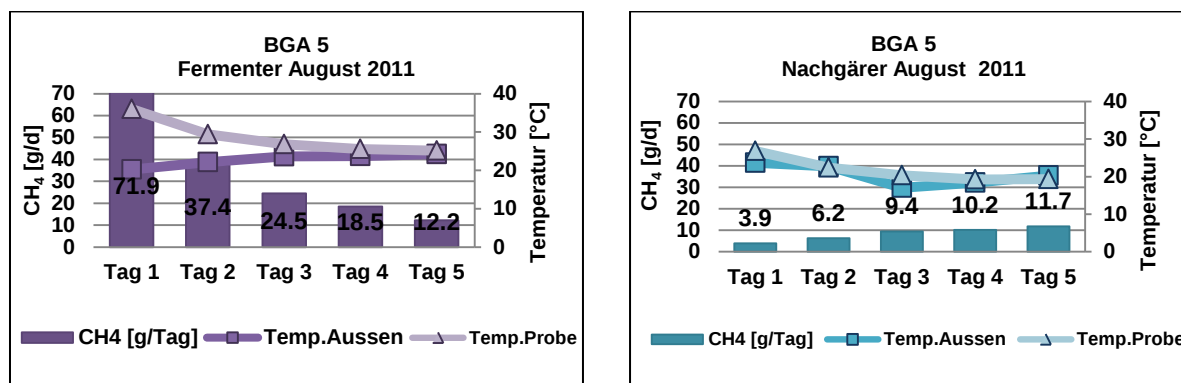


Abbildung 18: Methanemissionen im Sommer 2011 gemessen in der dynamischen Durchflussskammer Biogasanlage 5, Proben aus dem Fermenter und Nachgärer

Die separierten flüssigen Gärreste emittierten durchschnittlich 7.3 g CH₄ Tag⁻¹ bei einer Aussentemperatur von 18.9 °C, die separierten festen Gärreste 17.3 g CH₄ Tag⁻¹ bei einer Aussentemperatur von 23.4 °C (Abbildung 19). Die mittlere Gärresttemperatur betrug für die flüssigen Gärreste 19.6 °C, für die festen 55.0 °C. Die CH₄-Emissionen nahmen bei den flüssigen Gärresten bis zum dritten Tag von 9.0 g Tag⁻¹ bis 6.3 g Tag⁻¹ ab, und stiegen nachher wieder leicht an. Die Probetemperatur reduzierte sich von 26.4 °C am ersten Tag bis 19.9 °C am dritten Tag. Sie blieb nachher etwa konstant. Bei den separierten festen Gärresten stiegen die Emissionen bis zum vierten Tag. Der TS- und oTS-Gehalt der Fermenterprobe war höher als jener der Nachgärerprobe (Tabelle 23).

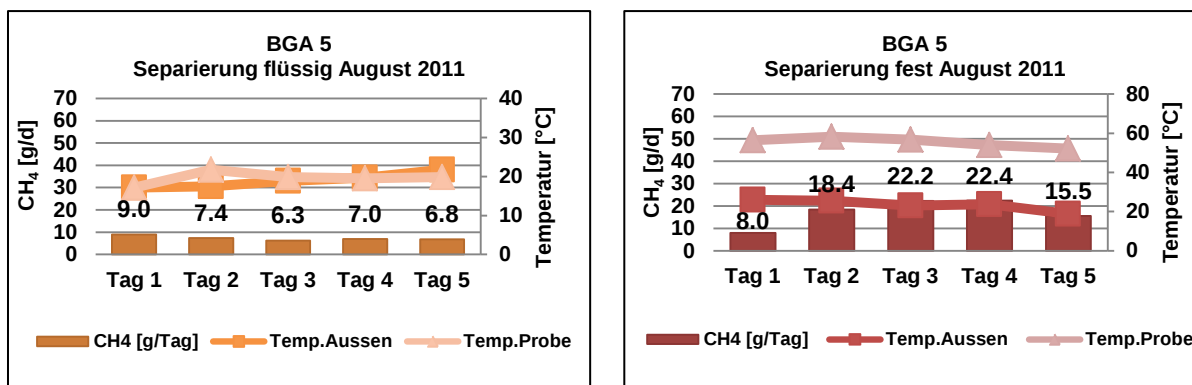


Abbildung 19: Methanemissionen im Sommer 2011 gemessen in der dynamischen Durchflussskammer, Biogasanlage 5, Proben separiert flüssig und fest

Tabelle 23: TS- und oTS-Gehalte der Gärreste aus den Sommermessungen der BGA 5

Probetyp BGA 5	Trockensubstanz-Gehalt (TS) [%]	davon organische Trockensubstanz (oTS) [%]
Fermenter	7.1	74.3
Nachgärer	6.2	66.5
Separiert flüssig	4.7	56.8
Separiert fest	29.1	88.9

3.4.2.2 Herbstmessungen

3.4.2.2.1 BGA 21

Der Durchschnitt der emittierten Methanmenge aus dem Fermenter betrug 14.6 g Tag^{-1} bei einer mittleren Aussentemperatur von 17.3 °C und einer durchschnittlichen Gärresttemperatur von 25.1 °C (Abbildung 20). Der Durchschnittswert der Probe aus dem Nachgärer lag bei $1.0 \text{ g CH}_4 \text{ Tag}^{-1}$, bei einer mittleren Aussentemperatur von 12.8 °C sowie einer durchschnittlichen Gärresttemperatur von 17.1 °C . Die Emissionsrate nahm bei der Fermenterprobe kontinuierlich ab, bei der Nachgärerprobe stieg sie leicht an, allerdings auf sehr niedrigem Niveau.

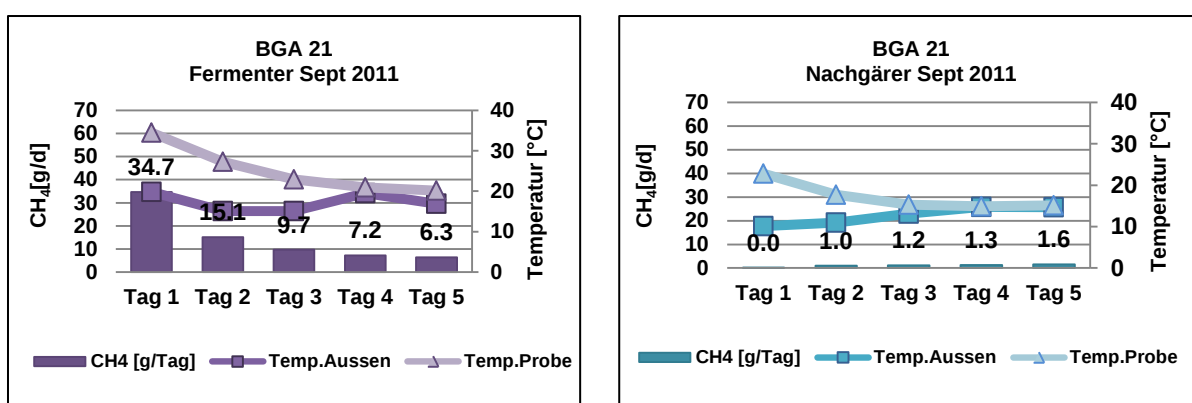


Abbildung 20: Methanemissionen im Herbst 2011 gemessen in der dynamischen Durchflussskammer, Biogasanlage 21, Proben aus dem Fermenter und Nachgärer

Die separierten flüssigen Gärreste emittierten durchschnittlich $10.7 \text{ g CH}_4 \text{ Tag}^{-1}$ bei einer Aussentemperatur von 13.7 °C , die separierten festen Gärreste $5.7 \text{ g CH}_4 \text{ Tag}^{-1}$ bei einer Aussentemperatur von 16.1 °C (Abbildung 21). Die mittlere Temperatur betrug bei den flüssigen Gärresten 20.1 °C , bei den festen 46.1 °C .

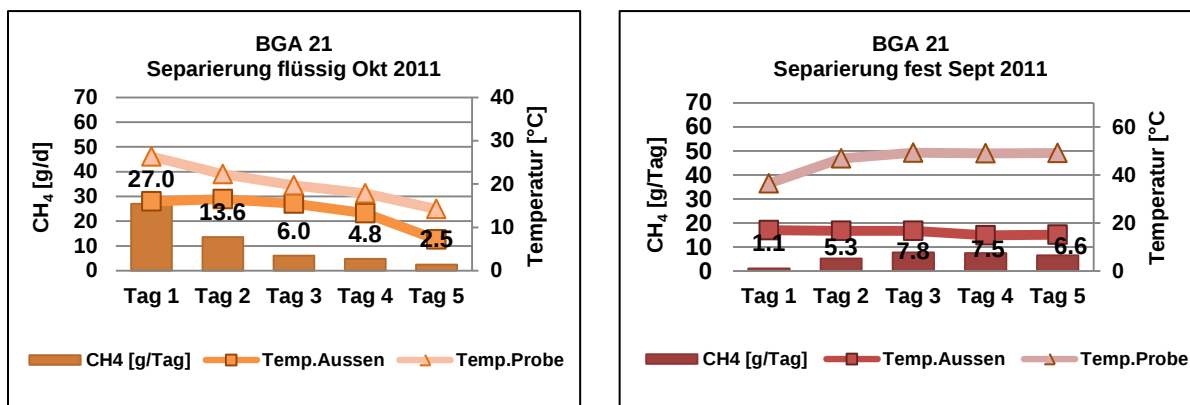


Abbildung 21: Methanemissionen im Herbst 2011 gemessen in der dynamischen Durchflussskammer, Biogasanlage 21, Proben separiert flüssig und fest

Die Emissionen bei den flüssigen separierten Gärresten nahmen während der Messperiode stark ab, jene der festen Gärresten erhöhten sich bis zum dritten Tag. Nach fünf Messtagen betrugen die Emissionen bei den festen Gärresten noch immer 85 % des Maximalwertes. Der Trockensubstanzgehalt der Fermenterprobe war höher als jener der Nachgärerprobe (Tabelle 24).

Tabelle 24: TS- und oTS-Gehalte der Gärreste aus den Herbstmessungen der BGA 21

Probetyp BGA 21	Trockensubstanz-Gehalt (TS) [%]	davon organische Trockensubstanz (oTS) [%]
Fermenter	6.2	70.1
Nachgärer	5.2	68.5
Separiert flüssig	4.7	61.6
Separiert fest	29.9	88.8

3.4.2.2.2 BGA 13

Der Mittel der emittierten Methanmenge aus der Fermenterprobe lag bei 14.5 g Tag⁻¹ bei einer durchschnittlichen Aussentemperatur von 11.4 °C und einer mittleren Gärresttemperatur von 20.7 °C (Abbildung 22). Die durchschnittlichen Methanemissionen aus der Nachgärerprobe betrugen 1.1 g Tag⁻¹, bei einer mittleren Aussentemperatur von 13.2 °C und einer mittleren Gärresttemperatur von 18.6 °C. Nach fünf Tagen war die Emissionsrate der Fermenterprobe nur noch 12.3 % der ursprünglichen Emissionen. Die Methanemissionen der Nachgärerprobe waren nach 5 Messtagen praktisch gleich wie am ersten Tag. Die Aussentemperatur nahm während dieser Zeit stark zu.

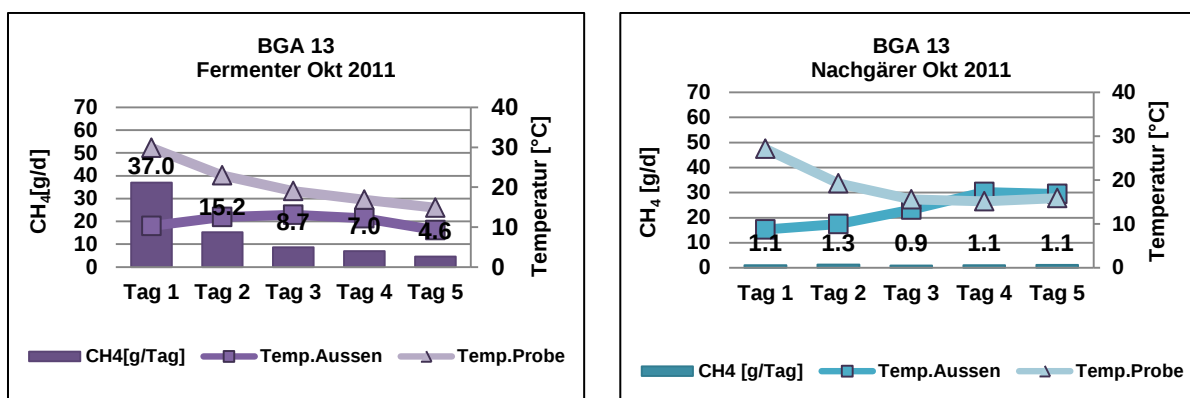


Abbildung 22: Methanemissionen im Herbst 2011 gemessen in der dynamischen Durchflussskammer, Biogasanlage 13, Proben aus dem Fermenter und Nachgärer

Die separierten flüssigen Gärreste emittierten im Mittel 1.8 g CH₄ Tag⁻¹ bei einer Aussentemperatur von 10.1 °C, die separierten festen Gärreste 0.0 g Tag⁻¹ bei einer Aussentemperatur von 2.7 °C (Abbildung 23). Die mittlere Temperatur betrug 18.4 °C bei der flüssigen Probe und 25.8 °C bei der festen. Die Emissionen der flüssigen Gärresten hörten nach fünf Tagen praktisch auf. Bei den festen Gärresten kamen sie wegen der tiefen Aussentemperatur nicht in Gang. Die TS-Gehalte der Proben waren wie schon bei den Sommermessungen eher gering (Tabelle 25).

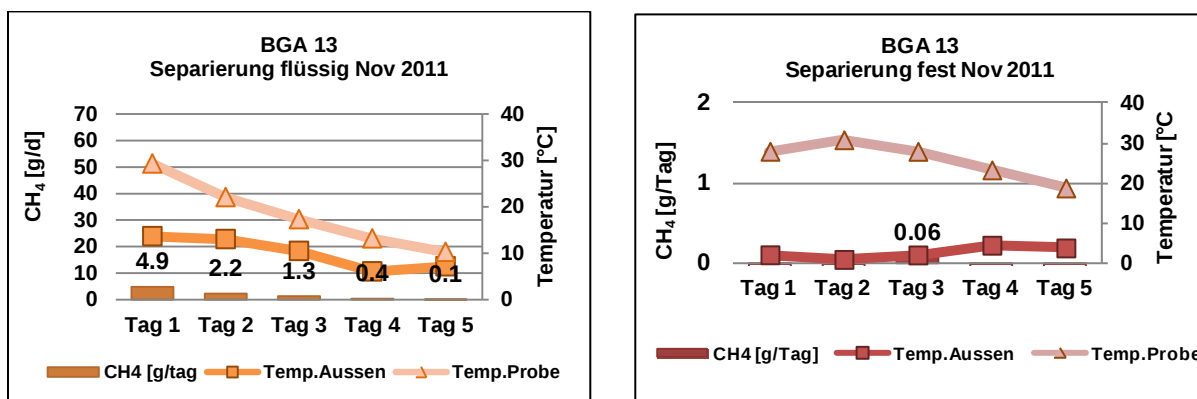


Abbildung 23: Methanemissionen im Herbst 2011 gemessen in der dynamischen Durchflussskammer, Biogasanlage 13, Proben separiert flüssig und fest

Tabelle 25: TS- und oTS-Gehalte der Gärreste aus den Herbstmessungen der BGA 13

Probetyp BGA 13	Trockensubstanz-Gehalt (TS) [%]	davon organische Trockensubstanz (oTS) [%]
Fermenter	4.1	70.1
Nachgärer	3.2	63.0
Separiert flüssig	2.9	62.3
Separiert fest	30.1	88.8

3.4.2.2.3 BGA 5

Aufgrund eines Rührwerkdefektes im Fermenter der Anlage 5 konnten die geplanten Herbstmessungen Mitte November 2011 nicht durchgeführt werden. Die Messungen an der Anlage 5 während der Übergangszeit wurden im Frühling nachgeholt. Als Ersatz im Herbst wurden weitere Messungen an der BGA 21 durchgeführt.

3.4.2.3 Wintermessungen

Das BGA 13 wurde zweimal gemessen, das 1. Mal im Januar 2012, das 2. Mal im März 2012.

3.4.2.3.1 BGA 13

Der Mittelwert der emittierten Methanmenge aus dem Fermenter pro Tag betrug 4.6 g bei einer mittleren Aussentemperatur von 3.1 °C und einer mittleren Gärresttemperatur von 16.5 °C (Abbildung 24). Der Durchschnittswert der Probe aus dem Nachgärer lag bei 2.2 g CH₄ Tag⁻¹, bei einer mittleren Aussentemperatur von 1.7 °C sowie einer durchschnittlichen Gärresttemperatur von 11.6 °C. Bei beiden Proben war die Emissionsrate am fünften Messtag praktisch null. Die durchschnittliche Probetemperatur sank bei beiden Proben sehr stark ab. Die separierten flüssigen Gärresten emittierten durchschnittlich 6.4 g CH₄ Tag⁻¹ bei einer mittleren Aussentemperatur von 2.1 °C, die separierten festen Gärresten 0 g CH₄ Tag⁻¹ bei einer mittleren Aussentemperatur von 2.2 °C (Abbildung 25). Die mittlere Temperatur der Gärreste betrug bei den flüssigen 9.1 °C, bei den festen 22.3 °C.

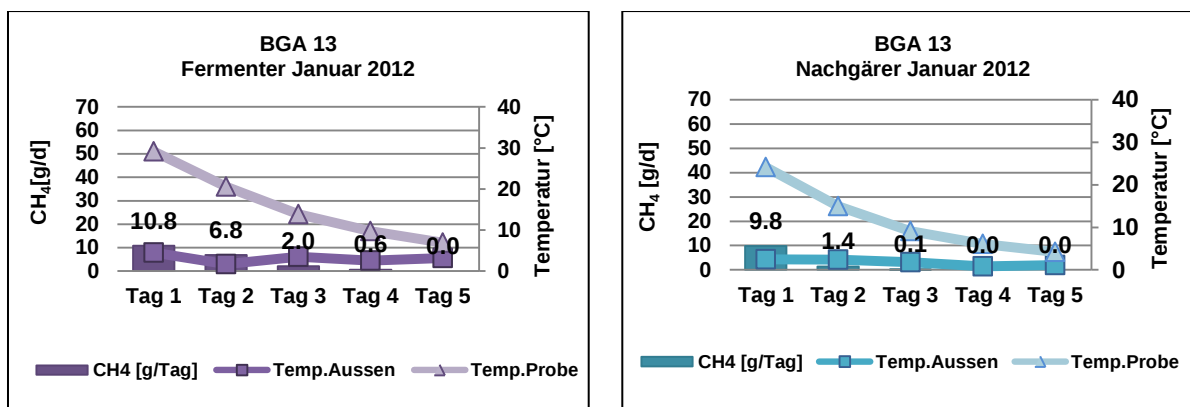


Abbildung 24: Methanemissionen im Winter 2012 gemessen in der dynamischen Durchflussskammer , Biogasanlage 13, Proben aus dem Fermenter und Nachgärer

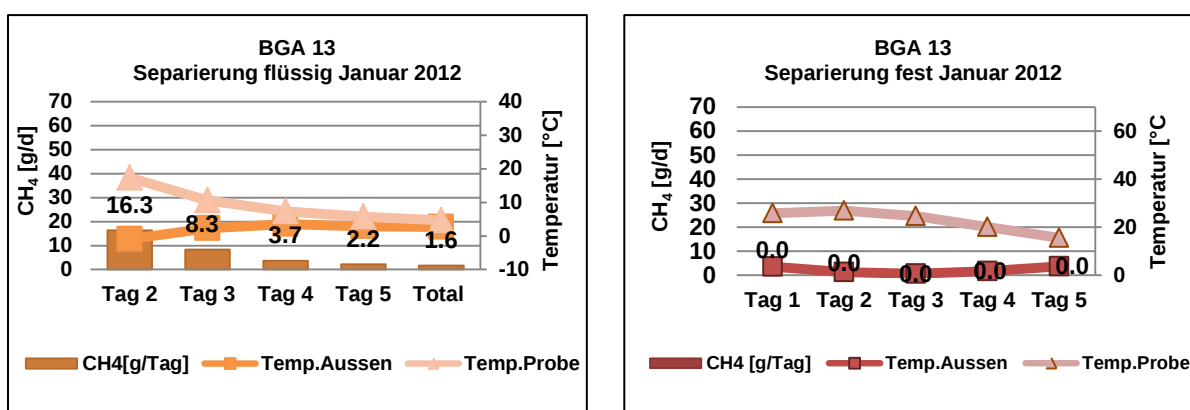


Abbildung 25: Methanemissionen im Winter 2012 gemessen in der dynamischen Durchflussskammer, Biogasanlage 13, Proben separiert flüssig und fest

Die CH₄-Konzentration war bei den festen Gärresten während der ganzen Messperiode Null. Die Temperatur der Probe stieg am zweiten Tag leicht an, sank jedoch bereits am dritten Tag unter den Wert am ersten Tag. Am 5. Tag betrug sie nur noch 15 °C, was wahrscheinlich die methanbildenden Bakterien inhibiert hat. Wie schon bei den Sommer- und Herbstmessungen war der TS-Gehalt der Fermenter, Nachgärer und separierten flüssigen Gärresten tief (Tabelle 26).

Tabelle 26: TS- und oTS-Gehalte der Gärreste aus den Wintermessungen der BGA 13

Probtyp BGA 13	Trockensubstanz-Gehalt (TS) [%]	davon organische Trockensubstanz (oTS) [%]
Fermenter	3.6	67.4
Nachgärer	3.0	62.2
Separiert flüssig	3	61.7
Separiert fest	27.9	87

3.4.2.3.2 BGA 5

Der Durchschnitt der emittierten Methanmenge aus der Fermenterprobe lag bei 17.5 g Tag⁻¹ bei einer durchschnittlichen Aussentemperatur von -6.7 °C und einem Mittelwert der Gärresttemperatur von 11.0 °C (Abbildung 26). Die durchschnittlichen Methanemissionen aus der Nachgärerprobe betrugen 0.6 g Tag⁻¹, bei einer mittleren Aussentemperatur von -0.0 °C und einer mittleren Gärresttemperatur von 0.9 °C. Bei der Fermenterprobe fanden mehr als 80 % der Emissionen am ersten Tag statt. Die

durchschnittliche Temperatur der Fermenterprobe sank am fünften Tag unter 0° C. Da der Nachgärer nicht beheizt und nicht isoliert ist, war die Probetemperatur am Anfang sehr tief (2.9 °C). Weder bei den flüssigen noch bei den festen separierten Gärresten konnten Methanemissionen gemessen werden (Abbildung 27). Die mittlere Aussentemperatur betrug bei den separierten flüssigen Gärresten 7.0 °C und bei den festen 3.2 °C. Die mittlere Temperatur der flüssigen Probe lag bei 7.7 °C, jene der festen bei 5.9 °C. Die mittlere Aussentemperatur hat relativ stark variiert und ist bei beiden Proben am Ende gestiegen. Der TS-Gehalt der Fermenter- und Nachgärerproben war bei der BGA 5 mehr als doppelt so hoch im Vergleich zur BGA 13 (Tabelle 27).

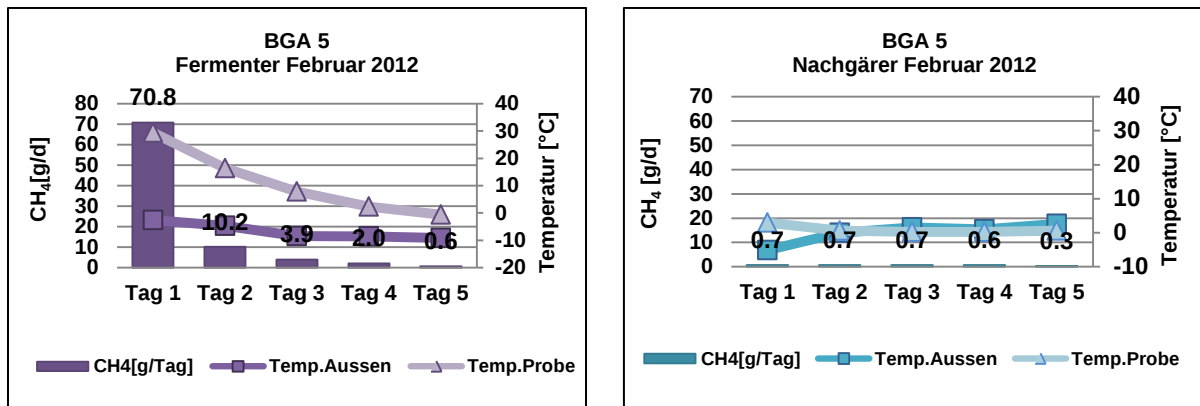


Abbildung 26: Methanemissionen im Winter 2012 gemessen in der dynamischen Durchflusskammer, Biogasanlage 5, Proben aus dem Fermenter und Nachgärer

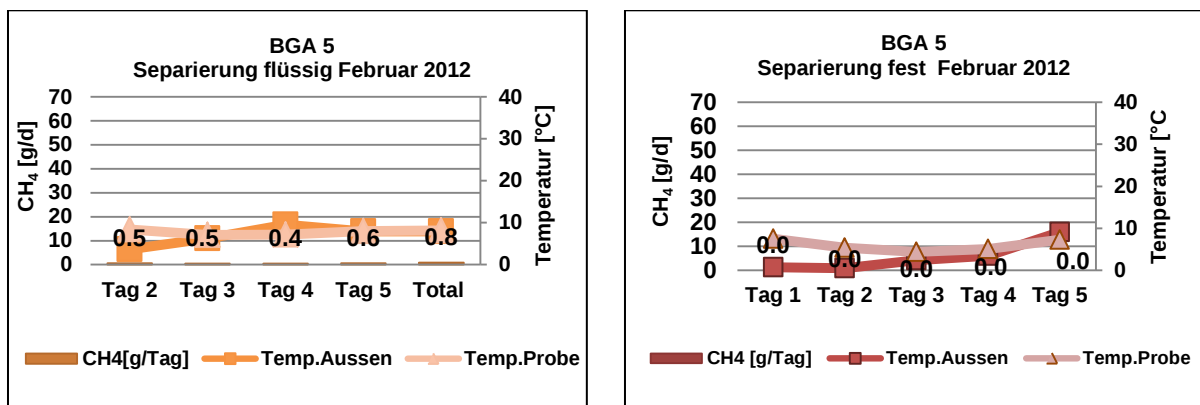


Abbildung 27: Methanemissionen im Winter 2012 gemessen in der dynamischen Durchflusskammer, Biogasanlage 5, Proben separiert flüssig und fest

Tabelle 27: TS- und oTS-Gehalte der Gärreste aus den Wintermessungen der BGA 5

Probetyp BGA 5	Trockensubstanz-Gehalt (TS) [%]	davon organische Trockensubstanz (oTS) [%]
Fermenter	10.7	67.9
Nachgärer	8.2	64.6
Separiert flüssig	6.2	56.9
Separiert fest	27.1	87.2

3.4.2.3.3 BGA 13 (zweite Messung)

Als Ersatz für die BGA 5, die wegen eines defekten Rührwerks im November 2011 nicht zur Verfügung stand, wurden an der BGA 13 die Wintermessungen im März wiederholt. Der Durchschnitt der emittierten Methanmenge aus dem Fermenter pro Tag betrug 17.6 g bei einer mittleren Aussentemperatur von 6.2 °C und einer durchschnittlichen Gärresttemperatur von 14.0 °C (Abbildung

28). Der Durchschnittswert der Probe aus dem Nachgärer lag bei $1.7 \text{ g CH}_4 \text{ Tag}^{-1}$, bei einer mittleren Aussentemperatur von 12.7 °C sowie einer durchschnittlichen Gärresttemperatur von 16.5 °C . Die Emissionsrate der Fermenterprobe sank von $63.9 \text{ g CH}_4 \text{ Tag}^{-1}$ am ersten Tag bis auf 1.6 g Tag^{-1} am fünften Tag. Die separierten flüssigen Gärresten emittierten durchschnittlich $2.3 \text{ g CH}_4 \text{ Tag}^{-1}$ bei einer mittleren Aussentemperatur von 11.5 °C , die separierten festen Gärresten $6.2 \text{ g CH}_4 \text{ Tag}^{-1}$, bei einer mittleren Aussentemperatur von 15.2 °C (Abbildung 29). Die mittlere Temperatur betrug bei den flüssigen Gärresten 17.7 °C , bei den festen bei 39.5 °C . Die Emissionsrate lag am dritten Tag bei den flüssigen Gärresten unter 1% der Anfangsrate. Der TS-Gehalt der verschiedenen Proben lag im ähnlichen Bereich wie bei der Messung im Januar (Tabelle 28).

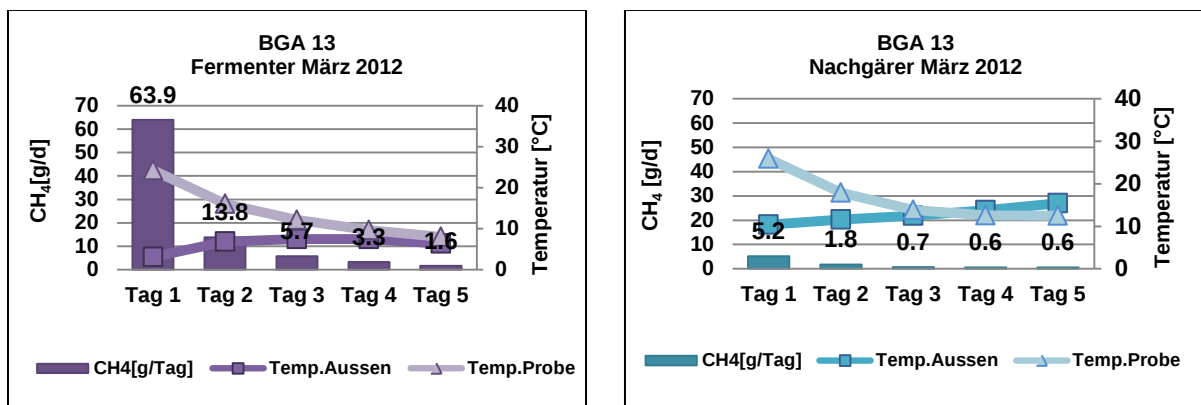


Abbildung 28: Methanemissionen im Winter 2012 gemessen in der dynamischen Durchflusskammer, Biogasanlage 13, Proben aus dem Fermenter und Nachgärer

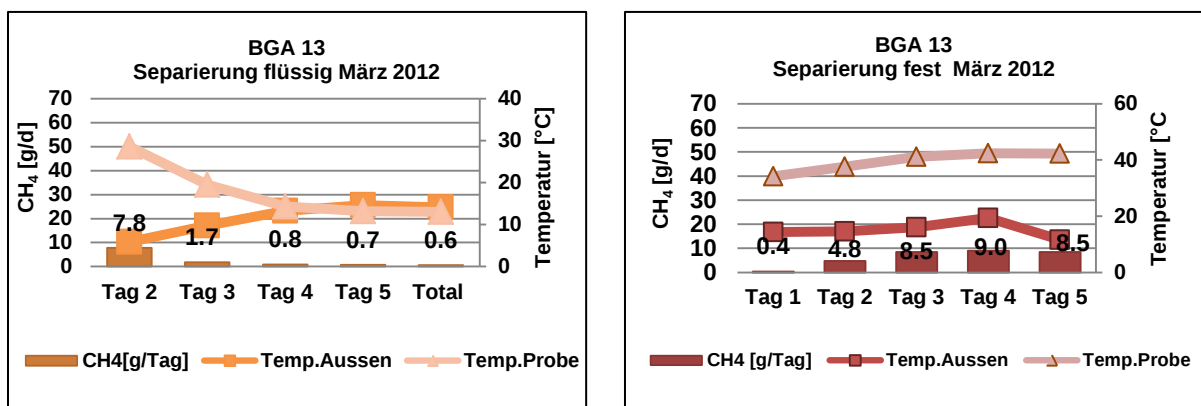


Abbildung 29: Methanemissionen im Winter 2012 gemessen in der dynamischen Durchflusskammer, Biogasanlage 13, Proben separiert flüssig und fest

Tabelle 28: TS- und oTS-Gehalte der Gärreste aus den Wintermessungen der BGA 13

Probetyp BGA 13	Trockensubstanz-Gehalt (TS) [%]	davon organische Trockensubstanz (oTS) [%]
Fermenter	3.2	66.2
Nachgärer	3.0	62.6
Separiert flüssig	2.5	61.0
Separiert fest	27.6	84.6

3.4.2.3.4 Frühlingsmessungen BGA 5 (wurde zweimal gemessen, das 1. Mal im April 2012 und das 2. Mal im Juni 2012)

Der Durchschnitt der emittierten Methanmenge aus dem Fermenter pro Tag betrug 21.0 g bei einer mittleren Aussentemperatur von 7.4 °C und einer durchschnittlichen Gärresttemperatur von 16.2 °C (Abbildung 30). Der Durchschnittswert der Probe aus dem Nachgärer lag bei 1.7 g CH₄ Tag⁻¹, bei einer mittleren Aussentemperatur von 12.1 °C sowie einer durchschnittlichen Gärresttemperatur von 12.5 °C. Für die Fermenterprobe war die Emissionsrate am dritten Tag viermal geringer als am ersten Tag. Die Nachgärerprobe hat kaum Emissionen verursacht, die Methanmenge lag unter 2 g Tag⁻¹. Die separierten flüssigen Gärreste emittierten durchschnittlich 1.7 g CH₄ Tag⁻¹ bei einer Aussentemperatur von 9 °C, die separierten festen Gärreste 0.4 g CH₄ Tag⁻¹, bei einer Aussentemperatur von 10.4 °C (Abbildung 31). Die mittlere Temperatur der Gärreste, betrug bei den flüssigen 12.7 °C, bei den festen 25.7 °C. Der TS-Gehalt war bei allen Proben hoch (Tabelle 29).

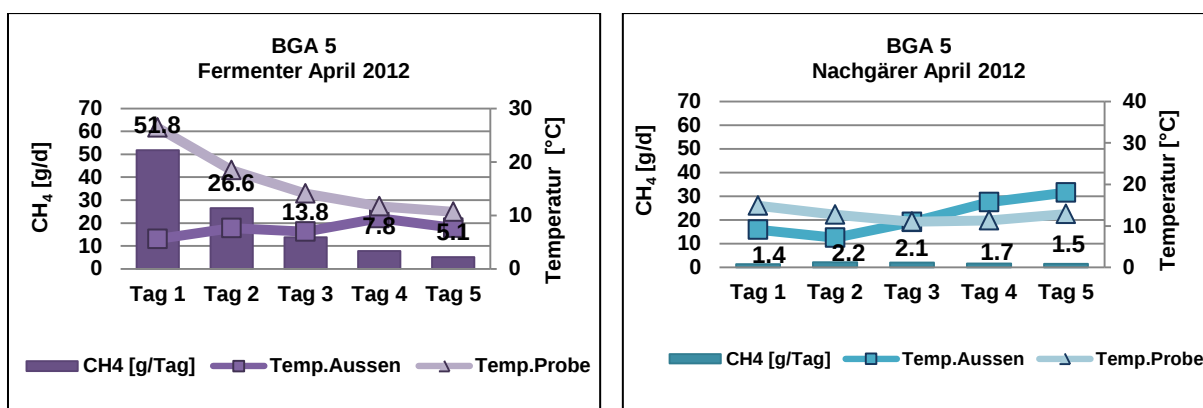


Abbildung 30: Methanemissionen im Frühling 2012 gemessen in der dynamischen Durchflusskammer, Biogasanlage 5, Proben aus dem Fermenter und Nachgärer

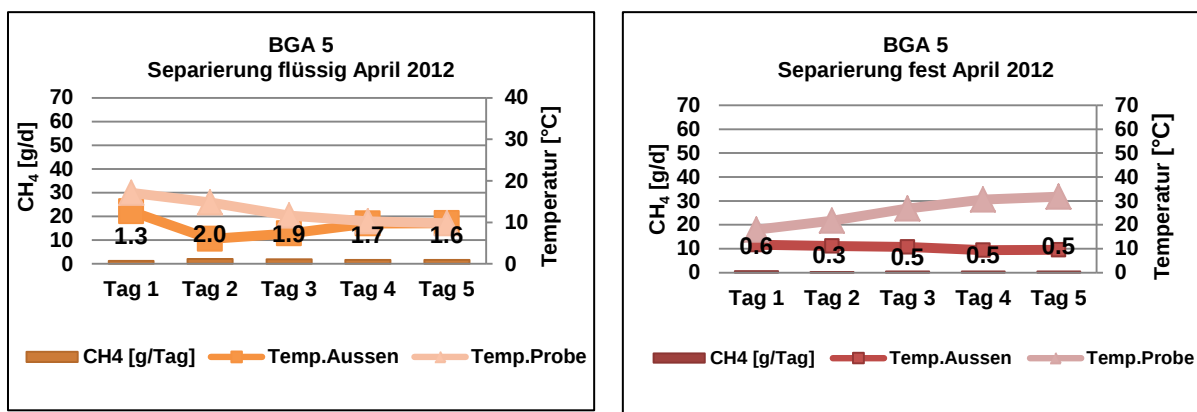


Abbildung 31: Methanemissionen im Frühling 2012 gemessen in der dynamischen Durchflusskammer, Biogasanlage 5, Proben separiert flüssig und fest

Tabelle 29: TS- und oTS-Gehalte der Gärreste aus den Frühlingsmessungen der BGA 5

Probetyp BGA 5	Trockensubstanz-Gehalt (TS) [%]	davon organische Trockensubstanz (oTS) [%]
Fermenter	8.6	71.0
Nachgärer	8.4	65.8
Separiert flüssig	6.8	55.2
Separiert fest	29.9	86.7

3.4.2.3.5 BGA 21

Der Durchschnitt der emittierten Methanmenge aus der Fermenterprobe lag bei 43.8 g Tag^{-1} bei einer durchschnittlichen Aussentemperatur von 17.5 °C und einem Mittelwert der Gärresttemperatur von 23.5 °C . Die durchschnittlichen Methanemissionen aus der Nachgärerprobe lagen bei 4.7 g Tag^{-1} , bei einem Mittelwert der Aussentemperatur von 17.4 °C und einem Mittelwert der Gärresttemperatur von 20.3 °C . Die CH_4 -Verluste der Fermenterprobe waren im Vergleich zur Nachgärerprobe am ersten Tag besonders hoch. Die separierten flüssigen Gärresten emittierten durchschnittlich $14.8 \text{ g CH}_4 \text{ Tag}^{-1}$ bei einer Aussentemperatur von 10.7 °C , die separierten festen Gärresten $0.0 \text{ g CH}_4 \text{ Tag}^{-1}$ bei einer Aussentemperatur von 14.7 °C . Die mittlere Temperatur betrug 15.6 °C bei der flüssigen Probe und bei 35.1 °C bei der festen Probe. Der TS-Gehalt der Fermenterprobe war höher als jener der Nachgärerprobe (Tabelle 30).

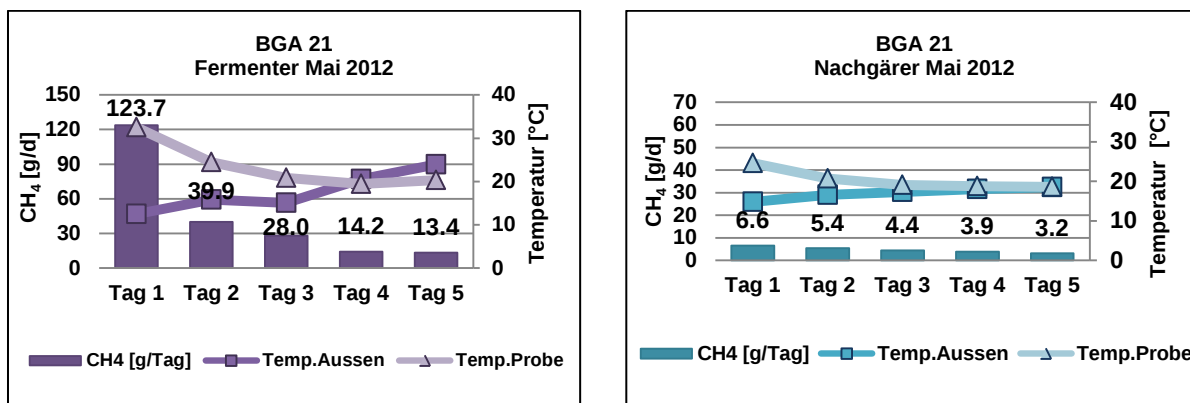


Abbildung 32: Methanemissionen im Frühling 2012 gemessen in der dynamischen Durchflussskammer, Biogasanlage 21, Proben aus dem Fermenter und Nachgärer

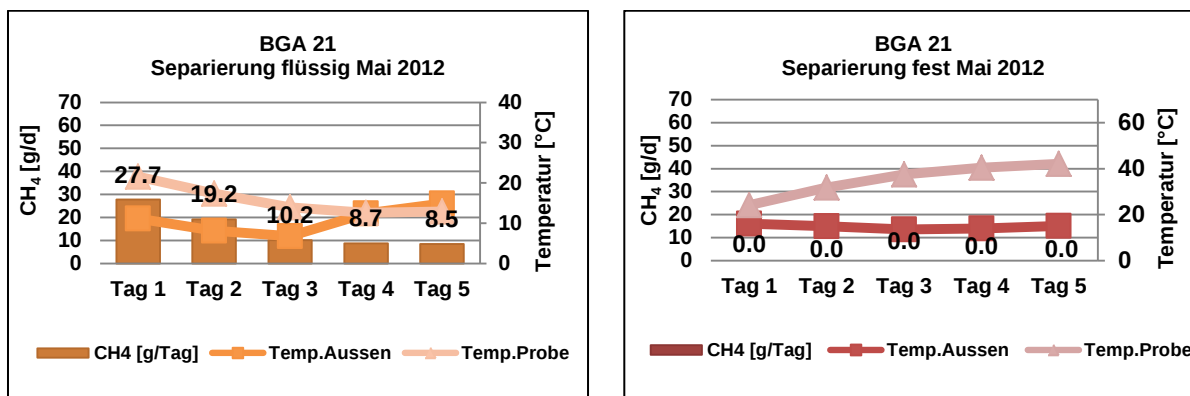


Abbildung 33: Methanemissionen im Frühling 2012 gemessen in der dynamischen Durchflussskammer, Biogasanlage 21, Proben separiert flüssig und fest

Tabelle 30: TS- und oTS-Gehalte der Gärreste aus den Frühlingmessungen der BGA 21

Probetyp BGA 21	Trockensubstanz-Gehalt (TS) [%]	davon organische Trockensubstanz (oTS) [%]
Fermenter	7.1	72.2
Nachgärer	5.8	71.0
Separiert flüssig	5.5	70.0
Separiert fest	30.6	89.9

3.4.2.3.6 BGA 5 (zweite Messung)

Der Durchschnitt der emittierten Methanmenge aus dem Fermenter betrug 31.7 g Tag^{-1} bei einer mittleren Aussentemperatur von $19.0 \text{ }^{\circ}\text{C}$ und einer durchschnittlichen Gärresttemperatur von $25.3 \text{ }^{\circ}\text{C}$ (Abbildung 34). Der Durchschnittswert der Probe aus dem Nachgärer lag bei $2.6 \text{ g CH}_4 \text{ Tag}^{-1}$, bei einer mittleren Aussentemperatur von $15.8 \text{ }^{\circ}\text{C}$ sowie einer durchschnittlichen Gärresttemperatur von $19.3 \text{ }^{\circ}\text{C}$. Die Emissionsrate der Fermenterprobe war im Vergleich zur Nachgärerprobe besonders am ersten Tag hoch. Die separierten flüssigen Gärreste emittierten durchschnittlich $2.9 \text{ g CH}_4 \text{ Tag}^{-1}$ bei einer mittleren Aussentemperatur von $15.8 \text{ }^{\circ}\text{C}$, die separierten festen Gärreste $2.8 \text{ g CH}_4 \text{ Tag}^{-1}$ bei einer Aussentemperatur von $21.3 \text{ }^{\circ}\text{C}$ (Abbildung 35). Die mittlere Temperatur der Gärreste betrug bei den flüssigen $18.7 \text{ }^{\circ}\text{C}$, bei den festen $42.0 \text{ }^{\circ}\text{C}$. Der TS-Gehalt der Fermenter- und Nachgärerprobe waren nahezu identisch (Tabelle 31).

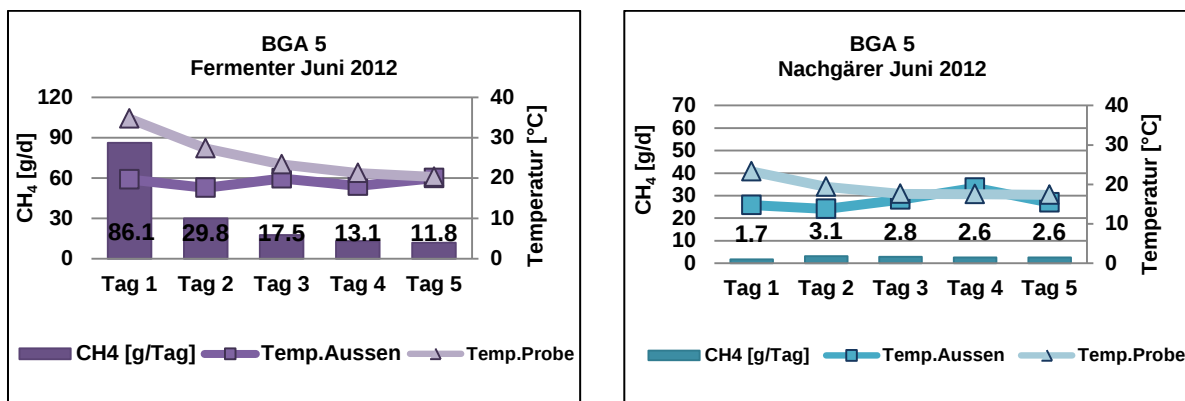


Abbildung 34: Methanemissionen im Frühjahr 2012 gemessen in der dynamischen Durchflusskammer, Biogasanlage 5, Proben aus dem Fermenter und Nachgärer

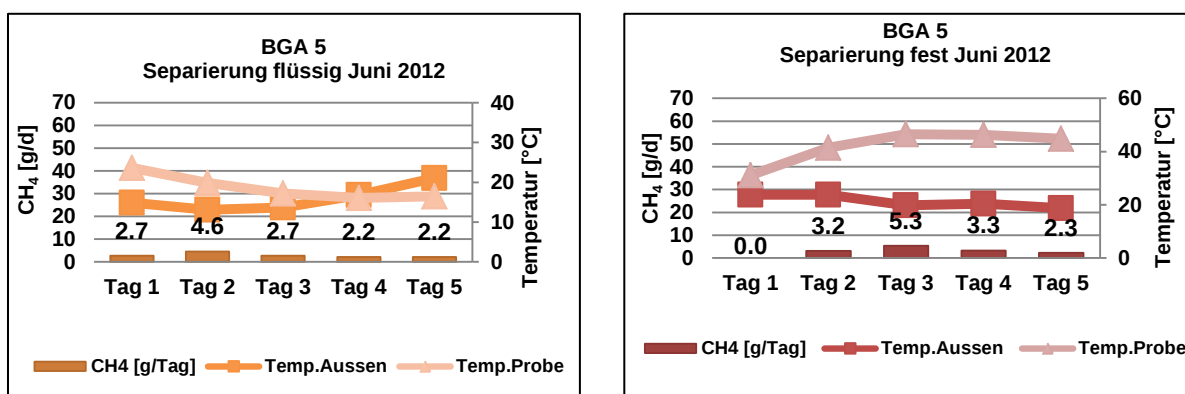


Abbildung 35: Methanemissionen im Frühjahr 2012 gemessen in der dynamischen Durchflusskammer, Biogasanlage 5, Proben separiert flüssig und fest

Tabelle 31: TS- und oTS-Gehalte der Gärreste aus den Frühlingmessungen der BGA

Probetyp BGA 5	Trockensubstanz-Gehalt (TS) [%]	davon organische Trockensubstanz (oTS) [%]
Fermenter	7.1	69.3
Nachgärer	7.0	63.2
Separiert flüssig	5.5	56.0
Separiert fest	26.4	87.0

3.4.3 Emissionen in der Durchflussskammer im Vergleich zum Restgaspotential

Um die Ergebnisse der dynamischen Durchflussskammer mit jenen des Hohenheimer Biogastests (HBT) vergleichen zu können, wurden die Messwerte der Durchflussskammer mit einer Regressionsgleichung auf 60 Tage hochgerechnet. Die Emissionen wurden in Nm^3 pro kg organische Trockensubstanz umgewandelt.

3.4.3.1 Sommermessungen

3.4.3.1.1 BGA 21

Die Emissionen in der dynamischen Durchflussskammer betrugen zwischen 11.0 und 24.2 % des Restgaspotentials (Tabelle 32). Es fällt auf, dass die Fermenterproben und die Nachgärerproben die gleichen Restpotentiale aufweisen. In der dynamischen Durchflussskammer wurden bei der Nachgärerprobe deutlich höhere Emissionen als bei der Fermenterprobe gemessen. Ein sehr geringes Restpotential wies die separierte feste Probe auf. Dies entsprach den Messwerten in der dynamischen Durchflussskammer.

Tabelle 32: Vergleich der Mittelwerte der spezifischen Methanemissionen pro Kilogramm organischer Trockensubstanz der BGA 21 aus der Durchflussskammer und im Labor (HBT).

Probetyp BGA 21	Restgaspotential CH ₄ -Ertrag aus HBT (60d) [Nm ³ kg ⁻¹ oTS]	CH ₄ -Emissionen * DFK (5d) [Nm ³ kg ⁻¹ oTS]	Mittelwert Probetemp. [°C]	CH ₄ -Emissionen **extrapoliert 60d [Nm ³ kg ⁻¹ oTS]	Anteil DFK (5d) [% Restgas- potential]	Anteil DFK (60d extrapoliert) [% Restgas- potential]
Fermenter	0.151	0.0120	24.9	0.017	7.9	11.0
Nachgärer	0.151	0.0300	21.5	0.036	20.0	24.2
Separiert flüssig	0.124	0.0160	18.6	0.016	12.6	12.9
Separiert fest	0.004	0.0005	45.1	0.001	13.1	14.6

* Messwerte aus der dynamischen Durchflussskammer (5 Tage unter Praxisbedingungen)

** Extrapolierte Messdaten aufgrund von fünf Messtagen unter Praxisbedingungen

HBT: Hohenheimer Biogasertragstest (60 Tage im Labor)

DFK: dynamische Durchflussskammer

3.4.3.1.2 BGA 13

Das Restgaspotential der Fermenterprobe war fast doppelt so hoch wie jenes aus der Nachgärerprobe (Tabelle 33). Obwohl das Restgaspotential der festen separierten Gärresten etwa gleich hoch war als jenes der Nachgärerproben und die mittlere Gärresttemperatur 51 °C betrug, konnten in der Durchflussskammer praktisch keine Methanemissionen gemessen werden.

Tabelle 33: Vergleich der Mittelwerte der spezifischen Methanemissionen pro Kilogramm organischer Trockensubstanz der BGA 13 aus der Durchflussskammer und im Labor (HBT).

Probetyp BGA 13	Restgaspotential CH ₄ -Ertrag aus HBT (60d) [Nm ³ kg ⁻¹ oTS]	CH ₄ -Emissionen * DFK (5d) [Nm ³ kg ⁻¹ oTS]	Mittelwert Probetemp. [°C]	CH ₄ -Emissionen **extrapoliert 60d [Nm ³ kg ⁻¹ oTS]	Anteil DFK (5d) [% Restgas- potential]	Anteil DFK (60d extrapoliert) [% Restgas- potential]
Fermenter	0.140	0.0248	24.3	0.027	17.7	18.9
Nachgärer	0.078	0.0073	25.2	0.009	9.4	10.9
Separiert flüssig	0.093	0.0051	22.8	0.008	5.5	8.6
Separiert fest	0.070	0.0004	51.0	0.001	0.5	0.6

* Messwerte aus der dynamischen Durchflussskammer (5 Tage unter Praxisbedingungen)

** Extrapolierte Messdaten aufgrund von fünf Messtagen unter Praxisbedingungen

HBT: Hohenheimer Biogasertragstest (60 Tage im Labor)

DFK: dynamische Durchflussskammer

3.4.3.1.3 BGA 5

Das Restgaspotential der separierten festen Gärresten war nahezu gleich gross wie bei den Fermenterproben (Tabelle 34). Etwa die Hälfte des Methanrestpotentials emittierte in der Durchflussskammer. Im Vergleich zu den andern BGA waren die Methanemissionen der separierten festen Gärreste sehr hoch. Für die Nachgärerproben, konnten keine extrapolierten Werte über die folgenden 55 Tage berechnet werden, da die Methanemissionen trotz abnehmender Gärresttemperatur weiterhin zunahmen.

Tabelle 34: Vergleich der Mittelwerte der spezifischen Methanemissionen pro Kilogramm organischer Trockensubstanz der BGA 5 aus der Durchflussskammer und im Labor (HBT).

Probetyp BGA 5	Restgaspotential CH ₄ -Ertrag aus HBT (60d) [Nm ³ kg ⁻¹ oTS]	CH ₄ -Emissionen * DFK (5d) [Nm ³ kg ⁻¹ oTS]	Mittelwert Probetemp. [°C]	CH ₄ -Emissionen **extrapoliert 60d [Nm ³ kg ⁻¹ oTS]	Anteil DFK (5d) [% Restgas- potential]	Anteil DFK (60d extrapoliert) [% Restgas- potential]
Fermenter	0.162	0.0180	28.6	0.021	11.4	12.7
Nachgärer	0.100	0.0060	21.6	-	5.9	-
Separiert flüssig	0.079	0.0080	21.5	0.029	10.4	37.3
Separiert fest	0.140	0.0040	55.5	0.007	30.0	4.9

* Messwerte aus der dynamischen Durchflussskammer (5 Tage unter Praxisbedingungen)

** Extrapolierte Messdaten aufgrund von fünf Messtagen unter Praxisbedingungen

HBT: Hohenheimer Biogasertragstest (60 Tage im Labor)

DFK: dynamische Durchflussskammer

3.4.3.2 Herbstmessungen

3.4.3.2.1 BGA 21

Die Emissionen in der dynamischen Durchflussskammer betrugen zwischen 1.7 und 20.0 % des Restgaspotentials (Tabelle 35). Auffallend ist der geringe Anteil der DFK-Messwerte am Restpotential bei den Nachgärerproben. Bemerkenswert ist auch das geringe Restpotential der separierten festen Gärrestprobe.

Tabelle 35: Vergleich der Mittelwerte der spezifischen Methanemissionen pro Kilogramm organischer Trockensubstanz der BGA 21 aus der Durchflussskammer und im Labor (HBT).

Probetyp BGA 21	Restgaspotential CH ₄ -Ertrag aus HBT (60d) [Nm ³ kg ⁻¹ oTS]	CH ₄ -Emissionen * DFK (5d) [Nm ³ kg ⁻¹ oTS]	Mittelwert Probetemp. [°C]	CH ₄ -Emissionen **extrapoliert 60d [Nm ³ kg ⁻¹ oTS]	Anteil DFK (5d) [% Restgas- potential]	Anteil DFK (60d extra poliert) [% Restgas- potential]
Fermenter	0.094	0.0103	25.1	0.012	11.0	12.4
Nachgärer	0.069	0.0007	17.1	0.001	1.0	1.7
Separiert flüssig	0.070	0.0126	20.0	0.013	18.0	18.9
Separiert fest	0.021	0.0013	46.1	0.004	6.1	20.0

* Messwerte aus der dynamischen Durchflussskammer (5 Tage unter Praxisbedingungen)

** Extrapolierte Messdaten aufgrund von fünf Messtagen unter Praxisbedingungen

HBT: Hohenheimer Biogasertragstest (60 Tage im Labor)

DFK: dynamische Durchflussskammer

3.4.3.2.2 BGA 13

Das Restgaspotential der Fermenterprobe war mehr als doppelt so hoch wie jenes der Nachgärerprobe (Tabelle 36). Das Restpotential und die DFK-Emissionen der Nachgärerprobe und der separierten flüssige Gärrestprobe waren nahezu gleich. Die festen Gärresten haben trotz relativ hohem Restgaspotential keine Emissionen in der Durchflussskammer produziert. Ihre mittlere Temperatur war mit 25.8 °C deutlich geringer als bei den vorherigen Messungen.

Tabelle 36: Vergleich der Mittelwerte der spezifischen Methanemissionen pro Kilogramm organischer Trockensubstanz der BGA 13 aus der Durchflussskammer und im Labor (HBT).

Probetyp BGA 13	Restgaspotential CH ₄ -Ertrag aus HBT (60d) [Nm ³ kg ⁻¹ oTS]	CH ₄ -Emissionen * DFK (5d) [Nm ³ kg ⁻¹ oTS]	Mittelwert Probetemp. [°C]	CH ₄ -Emissionen **extrapoliert 60d [Nm ³ kg ⁻¹ oTS]	Anteil DFK (5d) [% Restgas- potential]	Anteil DFK (60d extra poliert) [% Restgas- potential]
Fermenter	0.126	0.0153	20.7	0.017	12.1	13.3
Nachgärer	0.057	0.0024	18.6	0.003	4.2	4.4
Separiert flüssig	0.065	0.0030	18.4	0.003	4.6	5.2
Separiert fest	0.074	0.0000	25.8	-	-	-

* Messwerte aus der dynamischen Durchflussskammer (5 Tage unter Praxisbedingungen)

** Extrapolierte Messdaten aufgrund von fünf Messtagen unter Praxisbedingungen

HBT: Hohenheimer Biogasertragstest (60 Tage im Labor)

DFK: dynamische Durchflussskammer

3.4.3.2.3 BGA 21

Das Restgaspotential in den separierten flüssigen Gärresten und in der Nachgärerprobe war fast gleich gross (Tabelle 37). Der Anteil der gemessenen DFK-Emissionen am Restpotential war für alle Proben relativ gering (zwischen 3.2 und 6.6 %). Die separierten festen Gärresten haben bei einer mittleren Gärresttemperatur von 8.9 °C keine Methanemissionen freigesetzt.

Tabelle 37: Vergleich der Mittelwerte der spezifischen Methanemissionen pro Kilogramm organischer Trockensubstanz der BGA 21 aus der Durchflussskammer und im Labor (HBT).

Probetyp BGA 21	Restgaspotential CH ₄ -Ertrag aus HBT (60d) [Nm ³ kg ⁻¹ oTS]	CH ₄ -Emissionen * DFK (5d) [Nm ³ kg ⁻¹ oTS]	Mittelwert Probetemp. [°C]	CH ₄ -Emissionen **extrapoliert 60d [Nm ³ kg ⁻¹ oTS]	Anteil DFK (5d) [% Restgas- potential]	Anteil DFK (60d extra poliert) [% Restgas- potential]
Fermenter	0.094	0.0030	14.5	0.003	3.2	3.2
Nachgärer	0.058	0.0011	11.6	0.004	1.9	6.6
Separiert flüssig	0.056	0.0016	11.4	0.002	2.9	3.0
Separiert fest	0.038	0.0000	8.9	-	-	-

* Messwerte aus der dynamischen Durchflussskammer (5 Tage unter Praxisbedingungen)

** Extrapolierte Messdaten aufgrund von fünf Messtagen unter Praxisbedingungen

HBT: Hohenheimer Biogasertagstest (60 Tage im Labor)

DFK: dynamische Durchflussskammer

3.4.3.3 Wintermessungen

3.4.3.3.1 BGA 13

Die Emissionen in der dynamischen Durchflussskammer betrugen zwischen 6.4 und 37.4 % des Restgaspotentials (Tabelle 39). Das Restgaspotential der Fermenterprobe ist mit 0.156 Nm³ kg⁻¹ oTS mehr als doppelt so hoch wie jenes der Nachgärerprobe, übersteigt jedoch nur unwesentlich jenes der separierten flüssigen Gärrestprobe. Die separierten festen Gärresten haben bei einer mittleren Gärresttemperatur von 22.6 °C keine Methanemissionen freigesetzt.

Tabelle 38: Vergleich der Mittelwerte der spezifischen Methanemissionen pro Kilogramm organischer Trockensubstanz der BGA 13 aus der Durchflussskammer und im Labor (HBT).

Probetyp BGA 13	Restgaspotential CH ₄ -Ertrag aus HBT (60d) [Nm ³ kg ⁻¹ oTS]	CH ₄ -Emissionen * DFK (5d) [Nm ³ kg ⁻¹ oTS]	Mittelwert Probetemp. [°C]	CH ₄ -Emissionen **extrapoliert 60d [Nm ³ kg ⁻¹ oTS]	Anteil DFK (5d) [% Restgas- potential]	Anteil DFK (60d extra poliert) [% Restgas- potential]
Fermenter	0.156	0.0023	16.1	0.058	1.5	37.4
Nachgärer	0.066	0.0037	11.7	0.004	5.6	6.4
Separiert flüssig	0.145	0.0106	9.1	0.011	7.3	7.6
Separiert fest	0.062	0.0000	22.6	-	-	-

* Messwerte aus der dynamischen Durchflussskammer (5 Tage unter Praxisbedingungen)

** Extrapolierte Messdaten aufgrund von fünf Messtagen unter Praxisbedingungen

HBT: Hohenheimer Biogasertagstest (60 Tage im Labor)

DFK: dynamische Durchflussskammer

3.4.3.3.2 BGA 5

Das grösste Restgaspotential zeigten mit 0.150 Nm³ kg⁻¹ oTS die festen Gärresten (Tabelle 39). In der Durchflussskammer hat nur die Fermenterprobe Emissionen produziert. Bei Gärresttemperaturen unter 10 °C konnten weder bei der Nachgärerprobe, noch bei den separierten flüssigen und festen Gärresten Methanemissionen gemessen werden.

Tabelle 39: Vergleich der Mittelwerte der spezifischen Methanemissionen pro Kilogramm organischer Trockensubstanz der BGA 5 aus der Durchflusskammer und im Labor (HBT).

Probetyp BGA 5	Restgaspotential CH ₄ -Ertrag aus HBT (60d) [Nm ³ kg ⁻¹ oTS]	CH ₄ -Emissionen * DFK (5d) [Nm ³ kg ⁻¹ oTS]	Mittelwert Probetemp. p. [°C]	CH ₄ -Emissionen **extrapoliert 60d [Nm ³ kg ⁻¹ oTS]	Anteil DFK (5d) [% Restgas- potential]	Anteil DFK (60d extrapoliert) [% Restgas- potential]
Fermenter	0.141	0.0075	11.1	0.008	5.3	5.3
Nachgärer	0.122	0.0000	0.9	-	-	-
Separiert flüssig	0.125	0.0000	7.8	-	-	-
Separiert fest	0.150	0.0000	5.9	-	-	-

* Messwerte aus der dynamischen Durchflusskammer (5 Tage unter Praxisbedingungen)

** Extrapolierte Messdaten aufgrund von fünf Messtagen unter Praxisbedingungen

HBT: Hohenheimer Biogasertragstest (60 Tage im Labor)

DFK: dynamische Durchflusskammer

3.4.3.3.3 BGA 13

Das Restpotential der Fermenterprobe ist mit 0.132 Nm³ kg⁻¹ oTS etwa 2.5-mal höher als jenes der Nachgärerprobe. (Tabelle 40). Der Anteil der DFK-Emissionen am Restpotential ist bei der Fermenterprobe deutlich am höchsten. Obwohl die mittlere Gärresttemperatur 39.5 °C betrug, konnten bei den separierten festen Gärresten keine Methanemissionen in der Durchflusskammer gemessen werden.

Tabelle 40: Vergleich der Mittelwerte der spezifischen Methanemissionen pro Kilogramm organischer Trockensubstanz der BGA 13 aus der Durchflusskammer und im Labor (HBT).

Probetyp BGA 13	Restgaspotential CH ₄ -Ertrag aus HBT (60d) [Nm ³ kg ⁻¹ oTS]	CH ₄ -Emissionen * DFK (5d) [Nm ³ kg ⁻¹ oTS]	Mittelwert Probetemp. [°C]	CH ₄ -Emissionen **extrapoliert 60d [Nm ³ kg ⁻¹ oTS]	Anteil DFK (5d) [% Restgas- potential]	Anteil DFK (60d extrapoliert) [% Restgas- potential]
Fermenter	0.132	0.0255	14.0	0.047	19.3	35.6
Nachgärer	0.054	0.0029	16.5	0.006	5.4	10.4
Separiert flüssig	0.083	0.0047	17.7	0.006	5.7	7.1
Separiert fest	0.041	0.0000	39.5	-	-	-

* Messwerte aus der dynamischen Durchflusskammer (5 Tage unter Praxisbedingungen)

** Extrapolierte Messdaten aufgrund von fünf Messtagen unter Praxisbedingungen

HBT: Hohenheimer Biogasertragstest (60 Tage im Labor)

DFK: dynamische Durchflusskammer

3.4.3.4 Frühlingsmessungen

3.4.3.4.1 BGA 5

Das grösste Restpotential hat die Fermenterprobe mit 0.198 Nm³ kg⁻¹ oTS. (Tabelle 41). Die separierten festen Gärresten haben bei einer mittleren Gärresttemperatur von 25.8 °C keine Methanemissionen freigesetzt. Es liegt kein Restpotentialwert vor.

Tabelle 41: Vergleich der Mittelwerte der spezifischen Methanemissionen pro Kilogramm organischer Trockensubstanz der BGA 5 aus der Durchflusskammer und im Labor (HBT)

Probetyp BGA 5	Restgaspotential CH ₄ -Ertrag aus HBT (60d) [Nm ³ kg ⁻¹ oTS]	CH ₄ -Emissionen * DFK (5d) [Nm ³ kg ⁻¹ oTS]	Mittelwert Probetemp. [°C]	CH ₄ -Emissionen **extrapoliert 60d [Nm ³ kg ⁻¹ oTS]	Anteil DFK (5d) [% Restgas- potential]	Anteil DFK (60d extrapoliert) [% Restgas- potential]
Fermenter	0.198	0.0205	16.3	0.021	10.4	10.7
Nachgärer	0.119	0.0019	12.6	0.004	1.6	3.4
Separiert flüssig	0.097	0.0027	12.7	0.009	2.8	9.0
Separiert fest	-	0.0000	25.8	-	-	-

* Messwerte aus der dynamischen Durchflusskammer (5 Tage unter Praxisbedingungen)

** Extrapolierte Messdaten aufgrund von fünf Messtagen unter Praxisbedingungen

HBT: Hohenheimer Biogasertragstest (60 Tage im Labor)

DFK: dynamische Durchflusskammer

3.4.3.4.2 BGA 21

Neben den Fermenter-Gärresten weisen auch die separierten flüssigen Gärreste ein relatives grosses Restgaspotential auf (Tabelle 42). Für die separierten festen Gärreste war es nicht möglich, die Messwerte der Durchflusskammer auf 60 Tage zu extrapolieren, da die Emissionen im Laufe der Messperiode kontinuierlich anstiegen.

Tabelle 42: Vergleich der Mittelwerte der spezifischen Methanemissionen pro Kilogramm organischer Trockensubstanz der BGA 21 aus der Durchflusskammer und im Labor (HBT)

Probetyp BGA 21	Restgaspotential CH ₄ -Ertrag aus HBT (60d) [Nm ³ kg ⁻¹ oTS]	CH ₄ -Emissionen * DFK (5d) [Nm ³ kg ⁻¹ oTS]	Mittelwert Probetemp. [°C]	CH ₄ -Emissionen **extrapoliert 60d [Nm ³ kg ⁻¹ oTS]	Anteil DFK (5d) [% Restgas- potential]	Anteil DFK (60d extrapoliert) [% Restgas- potential]
Fermenter	0.210	0.0287	23.5	0.031	13.7	14.5
Nachgärer	0.063	0.0037	20.3	0.010	5.9	16.0
Separiert flüssig	0.178	0.0107	15.7	0.024	6.0	13.6
Separiert fest	0.014	0.0000	35.2	-	-	-

* Messwerte aus der dynamischen Durchflusskammer (5 Tage unter Praxisbedingungen)

** Extrapolierte Messdaten aufgrund von fünf Messtagen unter Praxisbedingungen

HBT: Hohenheimer Biogasertragstest (60 Tage im Labor)

DFK: dynamische Durchflusskammer

3.4.3.4.3 BGA 5

Die Emissionen in der dynamischen Durchflusskammer betrugen zwischen 4.1 und 16.4 % des Restgaspotentials (Tabelle 43). Das grösste Restgaspotential hat die Fermenterprobe mit 0.130 Nm³ kg⁻¹ oTS. Wie bei den beiden anderen BGA war das Restgaspotential der separierten festen Gärresten sehr gering. Entsprechend tief waren auch die DFK-Emissionen.

Tabelle 43: Vergleich der Mittelwerte der spezifischen Methanemissionen pro Kilogramm organischer Trockensubstanz der BGA 5 aus der Durchflusskammer und im Labor (HBT)

Probetyp BGA 5	Restgaspotential CH ₄ -Ertrag aus HBT (60d) [Nm ³ kg ⁻¹ oTS]	CH ₄ -Emissionen * DFK (5d) [Nm ³ kg ⁻¹ oTS]	Mittelwert Probetemp. [°C]	CH ₄ -Emissionen **extrapoliert 60d [Nm ³ kg ⁻¹ oTS]	Anteil DFK (5d) [% Restgas- potential]	Anteil DFK (60d extrapoliert) [% Restgas- potential]
Fermenter	0.130	0.0196	25.4	0.021	15.1	16.4
Nachgärer	0.109	0.0017	19.0	0.009	1.6	7.9
Separiert flüssig	0.085	0.0027	18.7	0.006	3.2	6.7
Separiert fest	0.017	0.0004	42.0	0.001	2.4	4.1

* Messwerte aus der dynamischen Durchflusskammer (5 Tage unter Praxisbedingungen)

** Extrapolierte Messdaten aufgrund von fünf Messtagen unter Praxisbedingungen

HBT: Hohenheimer Biogasertagstest (60 Tage im Labor)

DFK: dynamische Durchflusskammer

3.4.4 Trendanalyse

Die Messergebnisse zeigen im Sommer deutlich höhere Methanemissionen als im Winter. Die Freisetzung der Emissionen ist multifaktoriell bedingt. Nicht bei jeder Gärrestprobe kann ein eindeutiger Zusammenhang zwischen den einzelnen Einflussgrößen und den Emissionen festgestellt werden. Da eine multivariate Analyse den Rahmen dieser Arbeit zu umfangreich wäre, beschränkt sich dieser Bericht auf eine univariate Analyse einzelner Parameter. Dem Einfluss der stark unterschiedlichen organischen Trockensubstanzgehalte der einzelnen Proben wird Rechnung getragen, indem die Emissionen pro kg organischer Trockensubstanzgehalt dargestellt werden.

3.4.4.1 Beziehung Emissionen – Gärresttemperatur

Die Aktivität der methanbildenden Bakterien hängt von der Temperatur im Gärrest ab. Steigt diese, sollten die Emissionen erwartungsgemäss zunehmen. Dies ist bei den BGA 21 und 5 sowohl bei der Fermenter- und Nachgärerprobe sowie auch bei den Gärresten nach der Separierung tendenziell zu erkennen (Abbildung 36). Bei der BGA 21 sind jedoch teilweise gegenläufige Tendenzen zu beobachten. Bemerkenswert ist, dass der Trockensubstanzgehalt der BGA 13 Proben nur etwa die Hälfte, der Proben der anderen beiden Biogasanlagen betrug. Die Probetemperatur ist die mittlere Temperatur während der fünftägigen Messperiode. Die Emissionen sind die kumulierten Messwerte während der gleichen Periode.

Bei den festen separierten Gärresten kann man die Temperaturabhängigkeit der Emissionen am deutlichsten erkennen. Allerdings ist die Emissionsrate pro kg organischer Trockensubstanzgehalt um etwa einen Faktor 10 geringer. Die Ordinatenskala in der Grafik wurde entsprechend angepasst.

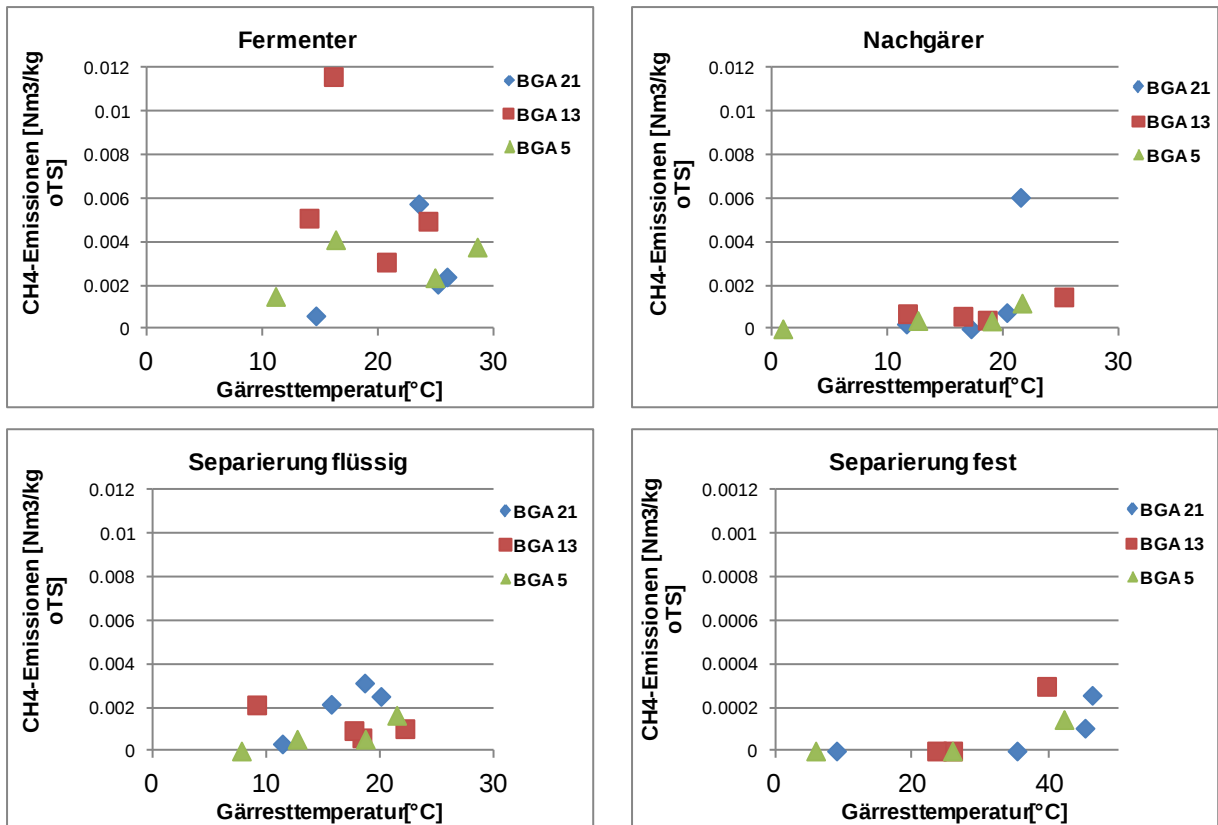
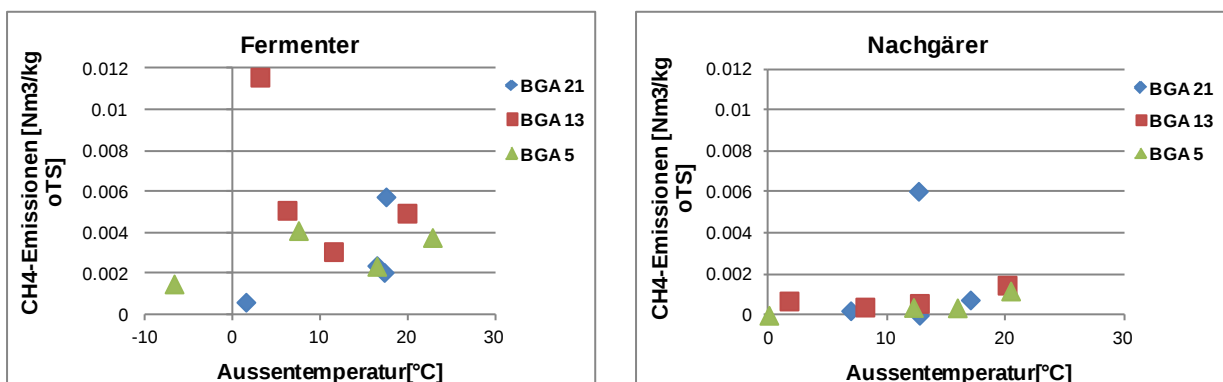


Abbildung 36: Beziehung zwischen den CH₄-Emissionen und der Gärresttemperatur für die Fermenter-, Nachgärer-, separierte flüssige und feste Gärrestprobe.

3.4.4.2 Beziehung Emissionen – Aussentemperatur

Die Aussentemperatur ist die mittlere Umgebungstemperatur während der Messperiode. Sie hat einen Einfluss auf den Verlauf der Gärresttemperatur. Wegen des Wärmeaustausches der Probe einerseits durch direkten Kontakt mit dem Luftstrom und andererseits durch die Hülle der Durchflussskammer wird dem Gärrest Wärme entzogen. Bei niedrigen Aussentemperaturen hat sich die Probe in der Durchflussskammer schneller abgekühlt. Folglich wurden weniger Emissionen produziert. Ausser bei den Proben der BGA 13 nahmen die Emissionen tendenziell mit steigender Aussentemperatur zu (Abbildung 37).



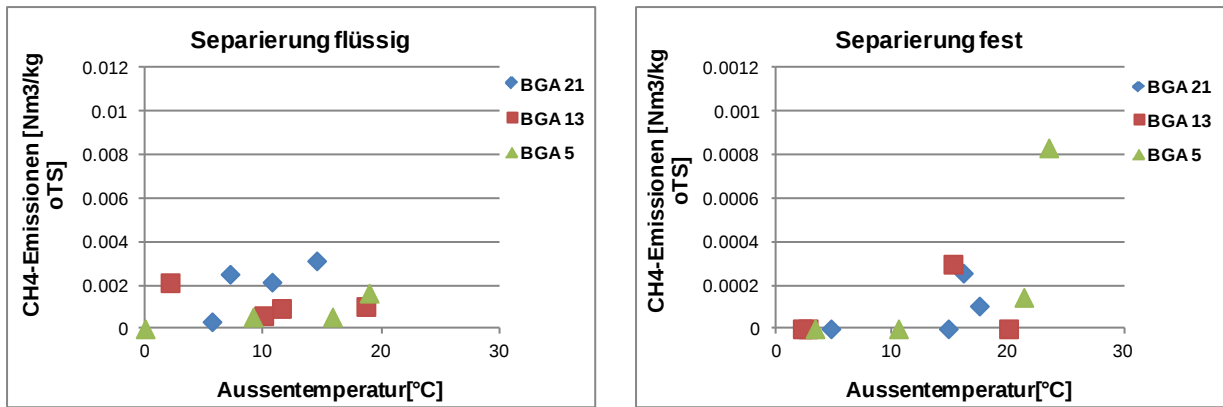


Abbildung 37: Beziehung zwischen den CH₄-Emissionen und der Aussentemperatur für die Fermenter-, Nachgärer-, separierte flüssige und feste Gärrestprobe.

3.4.4.3 Beziehung Emissionen – Organischer Trockensubstanzgehalt

Nur bei den Fermenterproben der BGA 21 und 5 nehmen die Methanemissionen mit steigendem organischem Trockensubstanzgehalt leicht zu (Abbildung 38). Bei den anderen Proben ist keine eindeutige Tendenz zu erkennen.

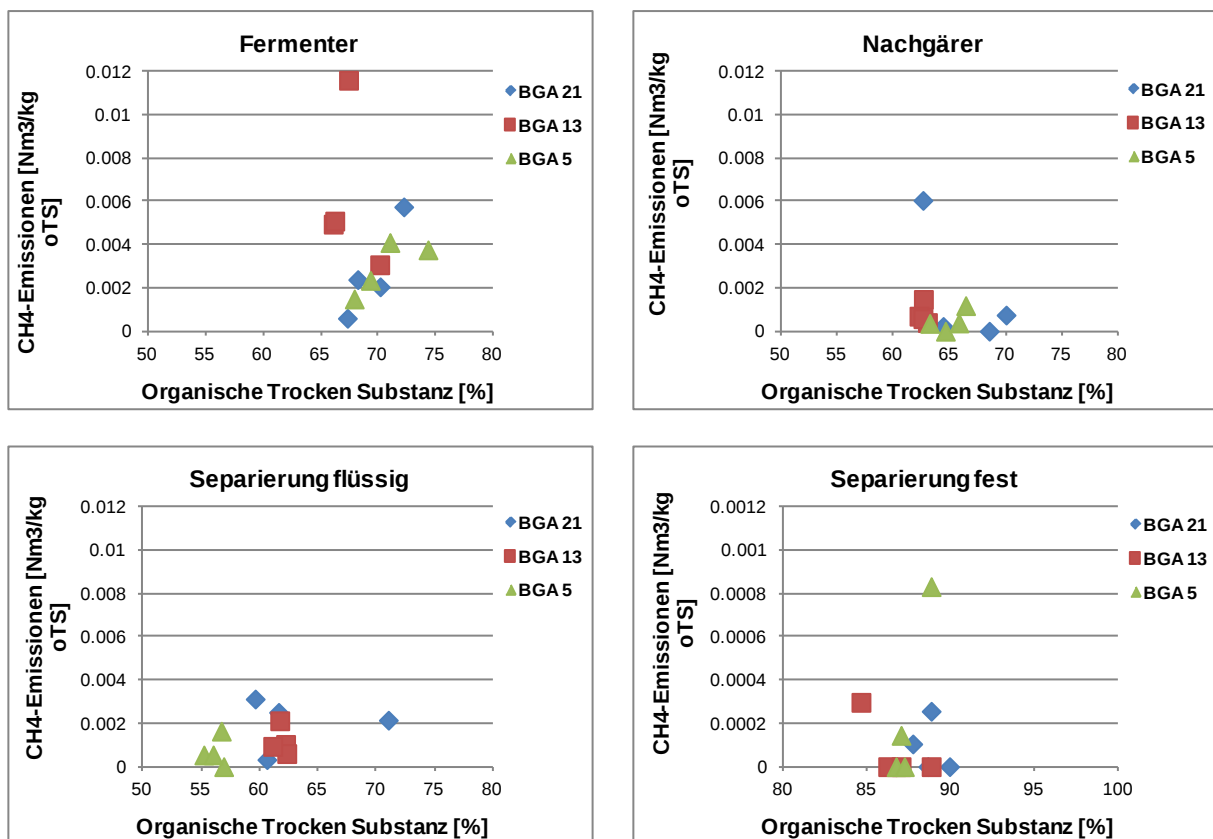


Abbildung 38: Beziehung zwischen den CH₄-Emissionen und dem organischen Trockensubstanzgehalt für die Fermenter-, Nachgärer-, separierte flüssige und feste Gärrestprobe.

3.5 Quantitative Erfassung der Emissionen aus der Vorgrube

3.5.1 Methode

Die Messungen wurden an einer Vorgrube, die bereits im Vorfeld über eine mechanische Entlüftung mit einem Radialventilator verfügte (Abbildung 39), durchgeführt. Die Abluft aus dieser Vorgrube wird über ein 32 m langes unterirdisches Rohr ins nahe gelegene Feld abgeführt. Die Luftrate im PE Rohr mit Innendurchmesser 146 mm beträgt 180 bis 220 Nm³ h⁻¹. Die Vorgrube hat ein Nutzvolumen von 55 m³ und eine Grundfläche von 20 m². Sie wird durch eine Öffnung von ca. 1.2 m² mit Feststoffen beschickt. Die durchschnittliche Mixtur bestand während der Messperiode aus ca. 30 m³ separiertem Flüssiggärrest und ca. 10 m³ Grün Gut. Der Fermenter wurde zweimal pro Tag aus der Vorgrube mit frischem Substrat gefüllt. Das Substrat wird mittels eines Rührwerks homogenisiert. Die Rührzeit betrug pro Mal rund 15 Minuten. An einzelnen Tagen war das Rührwerk über mehrere Stunden in Intervallbetrieb geschaltet.

Die Quantifizierung der CH₄-Emissionen erfolgte wie bei den Gärresten über die Konzentration und die Luftrate. Die Luftgeschwindigkeit im Rohr wurde mit Hilfe eines explosionsgeschützten Flügelrad-Anemometers ermittelt. Die Konzentrationsmessung erfolgte durch das NDIR-Messgerät.

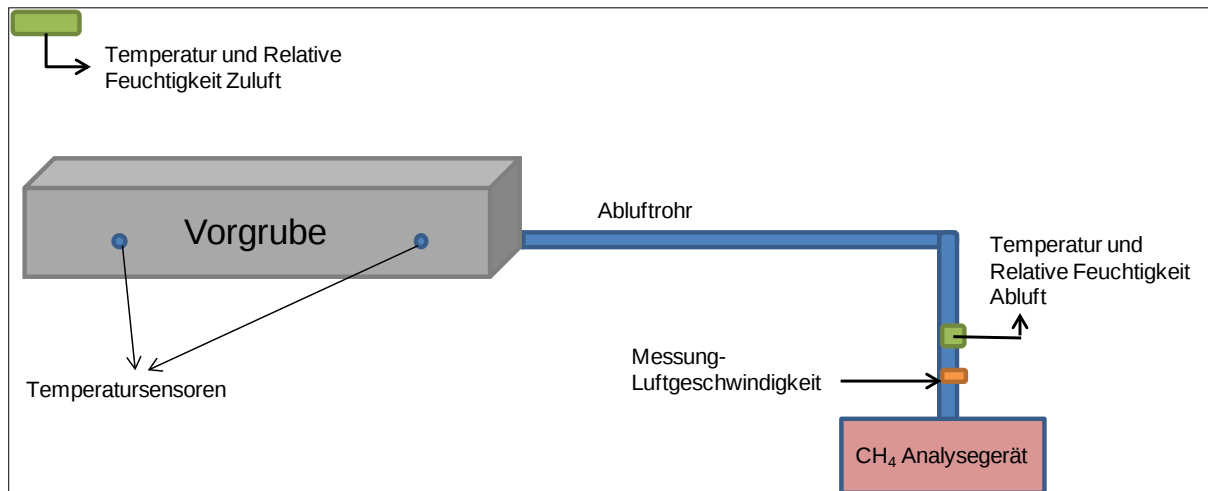


Abbildung 39: Schematische Darstellung der Messeinrichtung zur Quantifizierung der Methanemissionen aus der belüfteten Vorgrube.

Die Substrattemperatur in der Vorgrube wurde mit Hilfe von zwei Temperatursensoren (1 m sowie 2 m über Boden) alle 30 Minuten gemessen. Ebenfalls wurden die Temperatur der Zu- und Abluft erfasst. 2011 konnte die Konzentration während 19 aufeinander folgenden Tage alle 30 Sekunden gemessen werden. Nachher mussten die Messungen wegen der hohen Feuchtigkeit und Korrosivität der Abgase, welche die Messapparatur beeinträchtigt haben, eingestellt werden. Ein weiteres Problem war der grosse Schwankungsbereich der CH₄-Konzentration. Während dem Rühren überstieg die Konzentration den Messbereich des NDIRs (0-3700 ppm), sodass die Spitzenwerte nicht erfasst werden konnten. 2012 wurden die Messungen an einzelnen Tagen wiederholt und die Werte über 3700 ppm mit Hilfe von zwei Handgeräten (Polytector und Goliath) aufgezeichnet. Die beiden Handgeräte, die ebenfalls auf Strahlenabsorption im IR-Bereich beruhen, erreichen nicht die Genauigkeit des NDIRs, sind jedoch laut Herstellerangaben für die Bestimmung der Grössenordnung der Spitzenwerte geeignet. Der Polytector hat einen Messbereich von 1-100 % UEG (440 – 44000 ppm), der Goliath von 0 – 100 vol-%.

3.5.2 Versuchsergebnisse der quantitativen Emissionen aus der Vorgrube

3.5.2.1 2011

Die mittleren Methanemissionen, ohne Berücksichtigung der Werte über 3600 ppm, betrugen in der Periode 27.07.2011-14.08.2011 etwa 3.5 kg d⁻¹ (Tabelle 44). Der Schwankungsbereich zwischen den einzelnen Tagen war sehr gross (Minimalwert 1.02 kg d⁻¹, Maximalwert 9.09 kg d⁻¹).

Eine Beziehung zwischen der Temperatur in der Vorgrube, die zwischen 21.3 und 28.3 °C schwankte, und den CH₄-Emissionen konnte nicht festgestellt werden. Die Emissionsunterschiede sind vermutlich auf die Diversität der Substrate und den unterschiedlichen Befüllungsgrad der Grube zurückzuführen. Die Aussentemperatur betrug in dieser Periode durchschnittlich 21.4 °C.

Tabelle 44: CH₄-Emissionen aus der Vorgrube an 19 aufeinander folgenden Tagen (27.07. – 14.08.2011).

Tag	Temperatur Vorgrube [°C]	CH ₄ Emissionen [Nm ³ d ⁻¹]	CH ₄ Emissionen [kg d ⁻¹]
27.07.2011	22.3	3.51	2.51
28.07.2011	23.6	6.94	4.97
29.07.2011	25.3	3.51	2.51
30.07.2011	27.5	4.01	2.87
31.07.2011	24.1	2.19	1.57
01.08.2011	21.3	2.12	1.52
02.08.2011	22.5	2.41	1.72
03.08.2011	26.9	7.48	5.36
04.08.2011	26.7	5.70	4.08
05.08.2011	27.4	4.96	3.55
06.08.2011	28.3	6.91	4.95
07.08.2011	27.7	4.83	3.46
08.08.2011	23.6	1.43	1.02
09.08.2011	24.8	6.07	4.35
10.08.2011	24.2	2.49	1.78
11.08.2011	23.3	3.19	2.29
12.08.2011	24.4	7.33	5.25
13.08.2011	28.2	12.70	9.09
14.08.2011	26.5	5.32	3.81
Mittelwert	25.2	4.9	3.5
Minimum	21.3	1.4	1.0
Maximum	28.3	12.7	9.1

Während dem Rühren stieg die CH₄-Konzentration über 3700 ppm (Abbildung 40). Da der Messbereich des NDIRs auf diesen Wert begrenzt ist, war es nicht möglich, die maximale Konzentration zu messen. Der Konzentrationsanstieg von 100-500 ppm auf über 3700 ppm erfolgte innerhalb einer Minute, was sich durch die schlagartige Freisetzung des im Substrat gelösten Methans erklären lässt. Bei einer Löslichkeit von 2 bis 3 % kann sich beispielsweise in einem Substratgemisch von 50 m³ bis 1.5 m³ Methangas ansammeln, das beim Rühren teilweise freigesetzt wird. Nach dem Rühren sank die CH₄-Konzentration in kurzer Zeit ab und erreichte Werte, die erheblich tiefer lagen als vor dem Rühren. In der Periode zwischen dem morgendlichen und abendlichen Rühren stieg die Konzentration in der Abluft allmählich wieder an. An Tagen an denen intervallmässig gerührt wurde, war die mittlere Methankonzentration in der Abluft höher als an Tagen, wo nur morgens und abends gerührt wurde. Ob die Gesamtemissionen pro Tag auch entsprechend höher lagen, konnte leider wegen des begrenzten Messbereichs des NDIRs nicht überprüft werden. Deutlich ist der regelmässige Verlauf der Methankonzentration beim Intervallmässigen Rühren am 30.07.2011 (Abbildung 41).

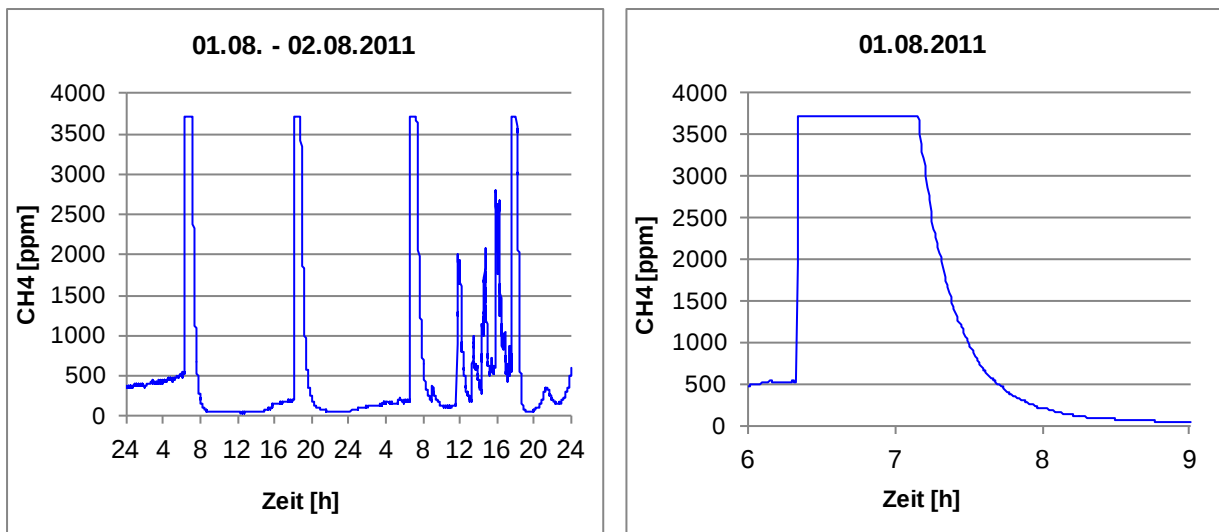


Abbildung 40: a) Methankonzentration in der Abluft der Vorgrube. Wegen des beschränkten Messbereichs des NDIRs konnten die Spitzenwerte (>3700 ppm) nicht aufgezeichnet werden. b) Die Methankonzentration in der Abluft der Vorgrube steigt nach Einschalten des Rührwerks innerhalb einer Minute auf Werte über 3700 ppm.

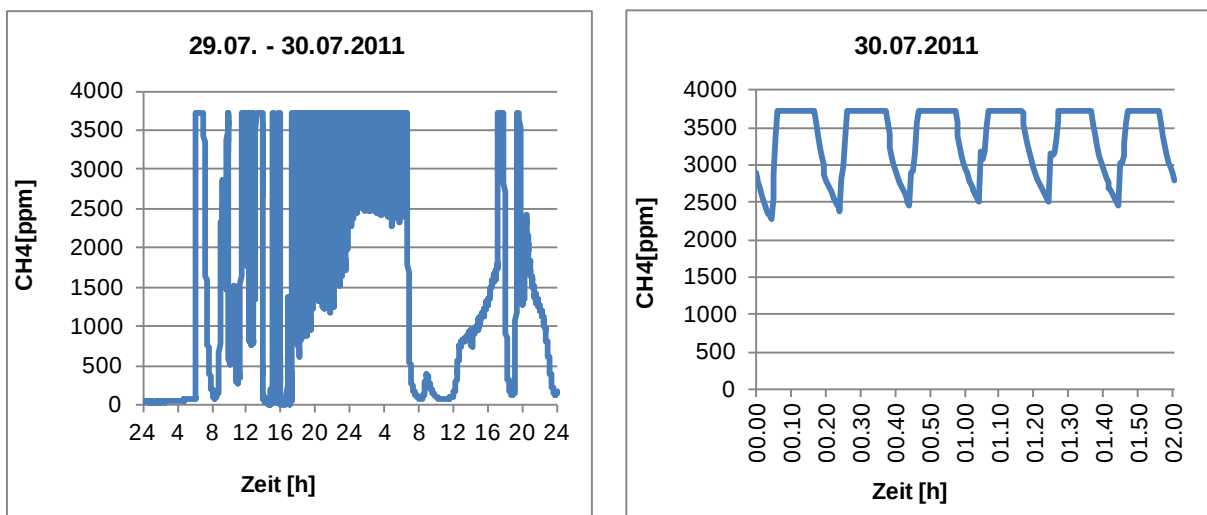


Abbildung 41: Am 29.07. und 30.07.2011 wurde mehrmals pro Tag gerührt, was zu höheren Methankonzentrationen führte.

3.5.2.2 2012

Im Juli 2012 wurden die Messungen an derselben Vorgrube wiederholt (Tabelle 45). Dank dem größeren Messbereich der zwei Handgeräte konnten im Gegensatz zu 2011 auch die CH₄-Konzentrationen oberhalb des NDIR-Messbereichs (0-3700 ppm) aufgezeichnet werden. Die maximal gemessene Konzentration betrug etwa 29'000 ppm (Abbildung 42). Der geringste Wert während dem Rühren wurde mit 1550 ppm am 18.07.2012 registriert. Der Maximalwert wurde stets innerhalb weniger Minuten nach Einschalten des Rührwerks erreicht. Nach Abschalten des Rührwerks verringerte sich die Konzentration auf tiefere Werte als vor dem Rühren.

Tabelle 45: CH₄-Emissionen aus der Vorgrube an fünf Tagen in 2012.

Tag	Temperatur Vorgrube [°C]	CH ₄ Emissionen [Nm ³ d ⁻¹]	CH ₄ Emissionen [kg d ⁻¹]
11.07.2012	26.6	6.64	4.75
16.07.2012	22.7	3.54	2.53
17.07.2012	24.2	3.13	2.24
18.07.2012	24.9	1.23	0.88
19.07.2012	24.1	1.99	1.42
Mittelwert	24.5	3.3	2.4
Minimum	22.7	1.2	0.9
Maximum	26.6	6.6	4.8
Summe		16.5	11.8

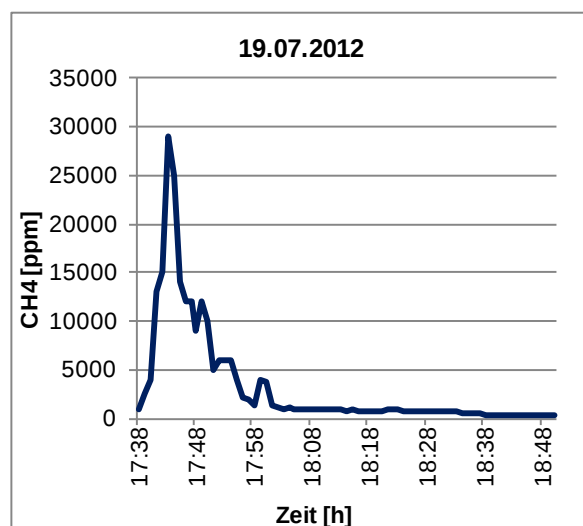
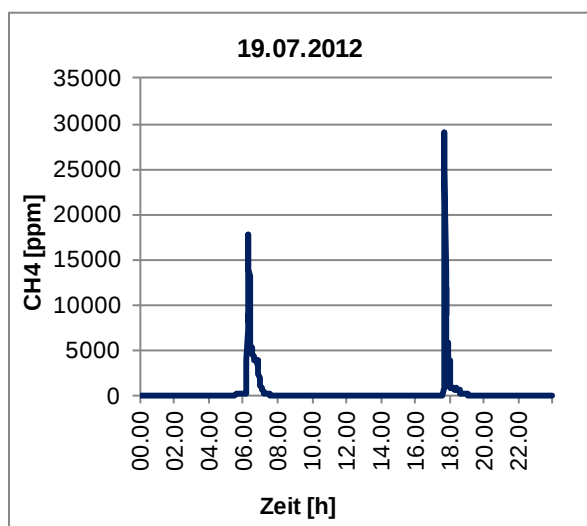


Abbildung 42: Verlauf der Methankonzentration in der Abluft der Vorgrube. Die Spitzenwerte wurden mit einem Handgerät aufgezeichnet.

Ohne Berücksichtigung der Spitzenwerte betrugen die gesamten CH₄-Emissionen am 19.07.2012 0.95 kg d⁻¹. Mit Einbezug der Werte über dem Messbereich des NIDRs (3700 ppm) lagen sie um etwa 50 % höher und erreichten 1.42 kg d⁻¹. An den anderen Tagen war der Anteil der Konzentrationswerte über 3700 ppm an den Gesamtemissionen etwas geringer. Korrigiert man aufgrund dieser Erkenntnis die Ergebnisse von 2011 mit einem Faktor 1.5, lässt sich aus den Daten von 2011 und 2012 eine Bandbreite von 1 bis 13 kg Methanemissionen pro Tag aus der Vorgrube ableiten. Dies entspricht an den gemessenen Tagen 0.4 bis 5.4 g kWh⁻¹.

Die ermittelten Werte beziehen sich auf Messungen an einer einzigen Biogasanlage während der warmen Jahreszeit. Eine Hochrechnung auf Jahresemissionen ist nicht möglich, da die Substratmischung sich saisonal stark ändern kann und nicht bekannt ist, wie sich die Temperatur in der Vorgrube während der anderen Jahreszeiten verhält.

Um fundierte Daten zu erhalten, sind Messungen über ein ganzes Jahr an verschiedenen Biogasanlagen notwendig.

4 Diskussion - Relative Bedeutung der Emissionen aus Gärresten und der Vorgrube

Die in der Durchflussskammer ermittelten Methanemissionen lassen sich theoretisch „ceteris paribus“ auf die gesamte Gärrestmenge aus dem Fermenter, Nachgärer und Separator umrechnen. Da die Versuchsbedingungen jedoch nur annähernd jenen in der Praxis entsprechen, sind die aus dieser Hochrechnung ermittelten Werte als Richtwert zu betrachten.

Bei der Hochrechnung wurde wie folgt vorgegangen. Die Menge an flüssigen Gärresten in der Durchflussskammer betrug 0.24 m^3 , jene an festen Gärresten 116 kg . Aus dem Fermenter Volumen und der hydraulischen Verweilzeit wird die mittlere Menge an Gärresten pro Tag bestimmt. (Tabelle 46). Aus den TS-Gehalten der Gärreste vor der Separierung und nach der Separierung (flüssiger und fester Teil) lässt sich der Anteil der flüssigen und festen Phase nach Separierung ableiten. Der feste Anteil schwankte zwischen 2 und 9 %. Die relativen CH_4 -Verluste errechnen sich aus dem Quotient der auf die gesamte Gärrestmenge umgerechneten CH_4 -Emissionen und der täglich produzierten Methanmenge.

Tabelle 46: Biogasproduktion, Fermentervolumen und hydraulische Verweilzeit pro Biogasanlage

	Biogasproduktion	Fermentervolumen	Hydraul. Verweilzeit
	$\text{Nm}^3 \text{ a}^{-1}$	m^3	Tage
BGA21	562666	700	25
BGA13	351351	580	30
BGA5	477000	470	35

$$\text{Gesamte Gärrestmenge/Tag} = \frac{\text{Fermentervolumen}}{\text{Hydraulische Verweilzeit}} [\text{m}^3 \text{ d}^{-1}] \quad [\text{Formel 4}]$$

$$\text{Anteil feste Gärreste} = 100 \cdot \frac{a - b}{c - b} [\%]$$

a = TS-Gehalt der Gärrestprobe vor der Separierung [%]

b = TS-Gehalt der flüssigen Gärrestprobe nach der Separierung [%]

c = TS-Gehalt der festen Gärrestprobe nach der Separierung [%]

[Formel 5]

$$\text{Gesamte } \text{CH}_4 - \text{Emissionen} = \frac{\text{CH}_{4\text{Durchflussskammer } 60\text{d}} \cdot \text{Gesamte Gärrestmenge pro Tag}}{\text{Gärrestmenge}_{\text{Durchflussskammer}}} [\text{Nm}^3 \text{ d}^{-1}]$$

$\text{CH}_{4\text{ Durchflussskammer } 60\text{d}}$: CH_4 -Emissionen aus der Durchflussskammer auf 60 Tage hochgerechnet

[Formel 6]

$$\text{Gesamte } \text{CH}_4 - \text{Emissionen relativ} = 100 \frac{\text{Gesamte } \text{CH}_4 - \text{Emissionen pro Tag}}{\text{Produzierte Methanmenge pro Tag}} [\%]$$

Das Emissionspotential der Gärreste nach dem Fermenter ist etwa dreimal höher als jenes nach dem Nachgärer (Tabelle 47,

Tabelle 48). Die Unterschiede zwischen den drei untersuchten Biogasanlagen sind beträchtlich. Nach Separierung emittieren vor allem die flüssigen Gärreste (Tabelle 49). Bei den festen Gärresten konnten im Winter keine Emissionen gemessen werden (Tabelle 50). Die Methanemissionen sind erwartungsgemäss in der kalten Jahreszeit viel geringer als während der warmen. Wie viel CH_4 -

Emissionen aus den Gärresten im Gärrestlager in Wirklichkeit entstehen, hängt stark von der Temperatur in diesem Behälter ab. Diese wird bei einem unterirdischen Behälter im Winter höher sein als in einem (nicht wärmegeprägten) Überflurbehälter. Andererseits ist die Temperatur im Überflurbehälter im Sommer höher. In der warmen Jahreszeit betrugen die Methanemissionen aus der Vorgube etwa 0.4 % der gesamten Methanproduktion (Tabelle 51). Dieser Wert ist mit Vorsicht zu betrachten, da er auf wenigen Messungen an einer einzigen Vorgube beruht.

Tabelle 47: Anteil der gemessenen Methanemissionen aus den Fermenter-Gärresten an der gesamten Methanproduktion während der verschiedenen Messperioden.

Fermenter	CH ₄ -Emissionen		CH ₄ -Produktion	CH ₄ -Emissionen	Temperatur °C	
	Nm ³ Probe (60d)	Nm ³ d ⁻¹ Fermenter	Nm ³ d ⁻¹	% CH ₄ -Prod.	Aussen	Gärreste
	BGA 21					
Juni 2011	0.176	20.5	925	2.2	16.5	25.0
Sept. 2011	0.116	13.6	925	1.5	17.3	25.1
Dez. 2011	0.033	3.9	925	0.4		
Mai 2012	0.326	38.1	925	4.1	17.5	23.5
	BGA 13					
Juli 2011	0.153	12.3	578	2.1	19.9	24.3
Okt. 2011	0.110	8.9	578	1.5	11.4	20.7
Jan. 2012	0.028	2.2	578	0.4	3.1	16.5
März 2012	0.230	18.5	578	3.2	6.2	14.0
	BGA 5					
August 2011	0.258	14.4	784	1.8	22.8	28.5
Febr. 2012	0.123	6.9	784	0.9	-6.7	11.0
April 2012	0.152	8.5	784	1.1	7.7	16.2
Juni 2012	0.241	13.5	784	1.7	19.0	25.3
Mittelwert	0.162	13.4		1.8		

Tabelle 48: Anteil der gemessenen Methanemissionen aus den Nachgärer-Gärresten an der gesamten Methanproduktion während der verschiedenen Messperioden.

Nachgärer	CH ₄ -Emissionen		CH ₄ -Produktion	CH ₄ -Emissionen	Temperatur °C	
	Nm ³ Probe (60d)	Nm ³ d ⁻¹ Fermenter	Nm ³ d ⁻¹	% CH ₄ -Prod.	Aussen	Gärreste
	BGA 21					
Juni 2011	0.212	24.7	925	2.7	12.5	21.0
Sept. 2011	0.010	1.1	925	0.1	12.8	17.1
Dez. 2011	0.031	3.6	925	0.4		
Mai 2012	0.056	6.5	925	0.7	17.4	20.3
	BGA 13					
Juli 2011	0.028	2.3	578	0.4	20.1	25.2
Okt. 2011	0.011	0.9	578	0.2	13.2	18.6
Jan. 2012	0.018	1.4	578	0.3	1.7	11.6
März 2012	0.024	2.0	578	0.3	12.7	16.5
	BGA 5					
August 2011*	0.058	3.2	784	0.4	20.4	21.6
Febr. 2012	0.000	0.0	784	0.0	0.0	0.9
April 2012	0.026	1.5	784	0.2	12.1	12.5
Juni 2012	0.075	4.2	784	0.5	15.8	19.3
Mittelwert	0.046	4.3		0.5		

* Emissionen der Probe nach 5 Tagen. Hochrechnung auf 60 Tage nicht möglich.

Tabelle 49: Anteil der gemessenen Methanemissionen aus den flüssigen Gärresten nach Separierung an der gesamten Methanproduktion während der verschiedenen Messperioden.

Sep. flüss. Gärreste	CH ₄ -Emissionen		CH ₄ -Produktion	CH ₄ -Emissionen	Temperatur °C	
	Nm ³ Probe (60d)	Nm ³ d ⁻¹ Fermenter	Nm ³ d ⁻¹	% CH ₄ -Prod.	Aussen	Gärreste
	BGA 21					
Juni 2011	0.124	13.7	925	1.5	14.5	18.6
Okt. 2011	0.080	8.8	925	1.0	13.7	20.1
Dez. 2011	0.011	1.2	925	0.1		
Mai 2012	0.128	14.2	925	1.5	10.7	15.6
	BGA 13					
Juli 2011	0.033	2.5	578	0.4	18.6	22.8
Nov. 2011	0.014	1.1	578	0.2	10.1	18.4
Jan. 2012	0.047	3.6	578	0.6	2.1	9.1
März 2012	0.031	2.3	578	0.4	11.5	17.7
	BGA 5					
August 2011	0.183	9.7	784	1.2	18.9	19.6
Febr. 2012	0.000	0.0	784	0.0	7.0	7.7
April 2012	0.038	2.0	784	0.3	9.0	12.7
Juni 2012	0.026	1.4	784	0.2	15.8	18.7
Mittelwert	0.060	5.1		0.6		

Tabelle 50: Anteil der gemessenen Methanemissionen aus den festen Gärresten nach Separierung an der gesamten Methanproduktion während der verschiedenen Messperioden.

Sep. feste Gärreste	CH ₄ -Emissionen		CH ₄ -Produktion	CH ₄ -Emissionen	Temperatur °C	
	Nm ³ Probe (60d)	Nm ³ d ⁻¹ Fermenter	Nm ³ d ⁻¹	% CH ₄ -Prod.	Aussen	Gärreste
	BGA 21					
Juni 2011	0.018	0.2	925	0.0	17.4	45.9
Sept. 2011	0.136	1.6	925	0.2	16.1	46.1
Dez. 2011	0.000	0.0	925	0.0		
Mai 2012	0.000	0.0	925	0.0	14.7	35.1
	BGA 13					
Juli 2011	0.026	0.2	578	0.0	20.0	51.0
Nov. 2011	0.000	0.0	578	0.0	2.7	25.8
Jan. 2012	0.000	0.0	578	0.0	2.2	22.3
März 2012 *	0.000	0.0	578	0.0	15.2	39.5
	BGA 5					
August 2011	0.200	1.1	784	0.1	23.4	55.0
Febr. 2012	0.000	0.0	784	0.0	3.2	5.9
April 2012	0.000	0.0	784	0.0	10.4	25.7
Juni 2012	0.021	0.1	784	0.0	21.3	42.0
Mittelwert	0.033	0.3		0.0		

* Emissionen der Probe nach 5 Tagen. Hochrechnung auf 60 Tage nicht möglich.

Tabelle 51: Anteil der Methanemissionen (Mittelwert) aus der Vorgrube an der gesamten Methanproduktion während einzelner Tage in Juli/August 2011 und 2012.

	CH ₄ -Emissionen	CH ₄ -Produktion	CH ₄ -Emissionen
Vorgrube	Nm ³ d ⁻¹	Nm ³ d ⁻¹	% CH ₄ -Prod.
Juli/August 2011/2012	3.31	738	0.4

4.1 Massnahmen zur Reduktion der Emissionen

Viele CH₄ Verlustquellen sind auf bauliche Mängel zurückzuführen, andere sind durch fehlende Wartung verursacht. Einerseits sind Massnahmen zur Behebung bestehender Lecken erforderlich, andererseits sollte Verlustquellen bei neuen Anlagen vorgebeugt werden.

4.1.1 Bauliche Massnahmen

Viele Verlustquellen lassen sich durch relativ einfache bauliche Massnahmen verhindern oder beheben. Alle Bauwerksteile sind nach den Regeln der Baukunde und den technischen Schweizernormen auszuführen. Diese beziehen sich vor allem auf Verbindungsstellen, insbesondere zwischen der Gashaube (Membran) und der Behälterkrone, Wanddurchbohrungen und – Aussparungen sowie auch auf Membranabdeckungen beim Fermenter, Nachgärer und Gärrestlager (Tabelle 52). Einzelne Massnahmen sind nur bei neuen Anlagen möglich.

Die Untersuchungen zeigen dass eine zweistufige Anlage (Fermenter/Nachgärer) zu bedeutend geringeren Gärrestemissionen führt als eine einstufige. Aus diesem Grunde ist ein Nachgärer zusätzlich zum Fermenter zu empfehlen. Wird darauf verzichtet, ist der Fermenter auf längere Verweilzeiten auszulegen.

Eine gasdichte Abdeckung des Gärrestlagers mit energetischer Nutzung des anfallenden Biogases führt zu einer weiteren Reduktion der Methanverluste. In diesem Falle sind die gleichen Sicherheitsvorkehrungen (explosionsgeschütztes Rührwerk, Überdrucksicherung) wie beim Fermenter oder Nachgärer zu treffen.

Es kann zurzeit nicht beurteilt werden, ob eine Abdeckung der festen Gärreste nach Separierung zu einer wesentlichen Reduktion der CH₄ Emissionen führt. Eine (relativ kostengünstige) Membranabdeckung kann dazu führen, dass höhere Temperaturen und eher anaerobe Bedingungen in den Gärresten entstehen, welche die Methanbildung fördern. Die Lagerung in einer geschlossenen Lagerhalle mit kontrollierter Entlüftung und Verbrennung des Schwachgases kann angesichts der hohen Kosten und der relativ geringen Emissionsrate der festen Gärreste nicht als prioritäre Massnahme betrachtet werden.

Eine mögliche Massnahme zur weitgehenden Verhinderung von CH₄ Emissionen bei der Vorgrube ist die Zwangsentlüftung der Grube und Rückführung der Abluft in das BHKW. In diesem Fall muss die Luftrate dem stöchiometrischen Luftbedarf des BHKWs angepasst werden. Sicherheitsrisiken und der Bedarf einer vorgängigen Reinigung der Vorgruben-Abluft müssen abgeklärt werden. Da zurzeit die Emissionsrate der Vorgrube auf Jahresbasis nicht bekannt ist, kann nicht abgeschätzt werden, ob eine solche Rückführung wirtschaftlich vertretbar ist.

4.1.1 Organisatorische Massnahmen (Wartung)

Neben einer baulichen Optimierung ist eine fachgerechte Wartung der Biogasanlage für die Minimierung der Methanverluste unerlässlich. Durch regelmässige Kontrolle können Leckagen, die oft durch Schwefelabdeckungen oder Spuren von Kondenswasser ersichtlich sind, frühzeitig erkannt werden. Die Funktionalität von Überdruckventilen ist periodisch zu prüfen. Bewegliche Teile in Wanddurchbohrungen sind regelmässig durch Einfetten abzudichten. Membranen sind in

Abhängigkeit der Alterung auszuwechseln. Die Anschaffung und Anwendung eines einfachen Methan-Leckage Detektors (Handgerät) ist empfehlenswert.

Tabelle 52: Bauliche und technische Massnahmen

Emissionsquelle	Bauliche und technische Massnahmen
Verbindung Gashaube – Behälterkrone	Fachgerechte Ausführung der Verbindung. Betonkorrosion vorbeugen durch säureresistente Abdeckung oder Beschichtung der Wandinnenseite. Rissbreite beschränken durch eine ausreichende Bewehrung der Betonwand.
Wanddurchbohrungen (Rohre, Seile)	Dauerhafte säureresistente Abdichtungen.
Fermenterüberlauf	Überläufe siphonieren.
Wandaussparungen (Schaugläser, Revisionsöffnungen)	Säureresistente Abdichtungen. Betonbewehrung auf Rissbreitenbeschränkung im Bereich der Wandaussparungen auslegen.
Gashaube (Fermenter, Nachgärer)	Dickere Einfachmembran oder Doppelmembran (bei neuen Anlagen). Membran bei Beschädigung und Alterung austauschen.
Gärreste	Mehrstufige Anlagen (Fermenter, Nachgärer) zur Verringerung des Methanrestpotentials in den Gärresten.
Lager flüssige Gärreste	Gasdichte Abdeckung des flüssigen Gärrestlagers. Im Falle einer Abdeckung ist der Beton vor Schwefelkorrosion zu schützen. Rührwerke müssen explosionsgeschützt sein. Wie beim Fermenter ist eine Über-/ Unterdrucksicherung erforderlich. Das anfallende Biogas energetisch nutzen oder abfackeln.
Lager feste Gärreste (nach Separierung)	Lagerung der Gärreste in einer geschlossenen Halle mit kontrollierter Entlüftung und Methanverbrennung im Abluftstrom. Diese Massnahme ist angesichts des relativ geringen Anteils der festen Gärreste an den gesamten Methanverlusten aus Kostengründen umstritten. Eine Verbrennung des „Schwachgases“ ist ökologisch bedenklich, wenn bei zu geringem Methangehalt Biogas oder Erdgas im Abluftstrom dazugegeben werden muss.
Vorgrube	Kontrollierte Zwangsentlüftung der Vorgrube und Verwertung des Abgasstromes durch das BHKW. Die Machbarkeit und Wirtschaftlichkeit dieser Massnahme ist wegen der häufig tiefen Methankonzentration in der Abluft zu prüfen.

Tabelle 53: Technische Massnahmen (Wartung)

Emissionsquelle	Technische Massnahmen
Befestigung Membran an der Behälterkrone	Dichtigkeit der Klemmschienen prüfen. Schwefelablagerungen deuten auf Undichtigkeiten.
Wanddurchbohrungen (Rohre, Seile)	Bewegliche Teile (Lager) in Wanddurchbohrungen regelmässig mit Fett abdichten.
Schaugläser	Schaufenster regelmässig aussen auf Schwefelablagerungen kontrollieren. Gegebenenfalls Leckagen abdichten.
Membran	Membran auf Risse und Löcher kontrollieren und in Abhängigkeit der Alterung auswechseln.
Überdruckventil	Funktionalität regelmässig überprüfen.
Feststoffeintrag	Einträge sollen grundsätzlich unter dem Flüssigkeitsniveau erfolgen.
Revisionsöffnung	Abdichtungen regelmässig kontrollieren und bei Bedarf austauschen. Manchmal lässt sich die Verlustquelle bereits durch das Anziehen der Schrauben ausschalten.

4.1.2 Verfahrenstechnische Massnahmen

Eine optimale Steuerung von Biogasanlagen muss zum Ziel haben, die Gasausbeute während der Vergärung im Fermenter/Nachgärer zu maximieren. Je geringer das Restgaspotential im Gärrest, desto geringer sind die nachgelagerten unkontrollierten Methanverluste. Die Prozessoptimierung erfordert eine hohe Fachkompetenz des Betreibers.

Eine Biogasüberproduktion, die mit Verlusten über das Überdruckventil verbunden ist, lässt sich durch eine genaue Abstimmung der Fermenter Beschickung auf die Verwertungskapazität des BHKWs vermeiden. Bei längerdauernden Störfällen und Wartungen am BHKW, die über das Zeitfenster der Gas-Speicherkapazität hinausgehen, soll ein zusätzliches BHKW zur Verfügung stehen. Auf Massnahmen zur Minimierung der nachgelagerten Methanemissionen bei der Ausbringung aufs Feld wird in dieser Arbeit nicht eingegangen.

Tabelle 54: Verfahrenstechnische Massnahmen

Emissionsquelle	Verfahrenstechnische Massnahmen
Gärreste	Möglichst geringes Methanrestpotential in den Gärresten. Die Substratausbeute durch Optimierung verfahrenstechnischer Parameter wie Substratzusammensetzung, Verweilzeit, Faulraumbelastung, Temperatur maximieren.
Überdruckventil	Überdruck im Gasspeicher, der zu Emissionen über das Überdruckventil führt, durch eine angepasste Beschickung des Fermenters vermeiden. Zusätzliches BHKW für den Fall von Störungen und längeren Wartungszeiten des Haupt-BHKWs bereithalten.

4.1.3 Klimatische Massnahmen

Während der Vergärung im Fermenter/Nachgärer soll die Temperatur möglichst stabil gehalten werden. Temperaturschocks durch Zugabe von kalten Substraten in grosser Menge sind zu vermeiden. Die Gärresttemperatur soll nach dem Ausbringen aus dem Fermenter/Nachgärer schnell absinken, um die methanbildenden Bakterien in ihrer Aktivität zu bremsen. Eine Beschattung von sonnenexponierten Gärrestlagern ist anzustreben.

Tabelle 55: Klimatische Massnahmen

Emissionsquelle	Klimatische Massnahmen
Gärreste	Möglichst stabile Temperaturen während der Vergärung. Diese sind eine Voraussetzung für eine kontinuierliche hohe Gasausbeute und ein geringes Methanrestpotential in den Gärresten.
Gärrestlager (flüssig/fest)	Beschattung von flüssigen und festen Gärrestlagern. Eine schnelle Abkühlung der Gärreste nach Ausbringung aus dem Fermenter/Nachgärer bremsst die Aktivität der methanbildenden Bakterien.

5 Schlussfolgerung

Aufgrund der vorliegenden Untersuchungen können folgende Schlussfolgerungen gezogen werden.

Die anlagenbedingten Methanverlustquellen entlang der Biogasproduktionskette sind heterogen und auf diverse Ursachen zurückzuführen.

Die Messungen mit der GasCam® zeigen, dass die Methanemissionen aus Leckagen teilweise schubweise auftreten. Die CH₄ Konzentrationen sind von diversen physikalischen Parametern in der Anlage selbst, sowie in deren unmittelbarer Umgebung abhängig.

Am häufigsten wurden folgende anlagenbedingte CH₄ Emissionsquellen festgestellt²:

- Übergang Gärbehälterkrone zum Membranrand
- Rührwerke und Rührwerksverstellungen
- Rohrdurchführungen in den Gärbehälter
- Offener Fermenterüberlauf
- Membranen

Die Emissionsquellen mit dem höchsten Verlustpotential sind:

- Gärrestlager / Vorgruben
- Gasspeichermembrane (aufgrund von Beschädigungen und Permeabilität)
- Überdruckventile
- Rohrdurchführungen in den Gärbehälter
- Feststoffeintrag
- Serviceöffnungen

Die meisten punktuellen Verlustquellen sind auf bauliche Mängel oder fehlende Wartung zurückzuführen und sind deshalb vermeidbar.

Neben anlagenbedingten, fallen auch betriebsbedingte Emissionen an. Letztere können die anlagenbedingten quantitativ übersteigen. Ein Beispiel sind die Verluste über das Überdruckventil bei Biogas-Überproduktion. Deshalb muss der erste Schritt zur Verringerung der Emissionen die Optimierung der Betriebsabläufe sein.

5.1 Methanemissionen aus Gärresten

Die Emissionsunterschiede zwischen den drei untersuchten Biogasanlagen waren beträchtlich.

Je höher die Gärresttemperatur war, desto höher waren in der Regel die CH₄ Emissionen. Die Gärresttemperatur wurde von der Anfangstemperatur, der Wärmeabgabe an die Umgebung und von exogenen Reaktionen im Gärrest selber bestimmt. Je tiefer die Umgebungstemperatur war, desto schneller kühlten die Gärreste nach Austrag aus dem Fermenter (Nachgärer) ab und reduzierten die Emissionen. Bei festen Gärresten entstand am zweiten Tag eine aerobe Wärmeentwicklung, die zu einem Anstieg der Gärresttemperatur und Methanemissionen führte.

² Von dieser Betrachtung ausgenommen sind universelle Verlustquellen wie Vorgruben und Gärrestlager sowie betriebsbedingte Verluste über das Überdruckventil.

Mit der Gärresttemperatur können die grossen Unterschiede der Methanemissionen nicht erklärt werden. Neben unterschiedlichen organischen Trockensubstanzgehalten stellte auch die Art des Substrats möglicherweise einen Einfluss dar.

Die Methanemissionen waren, bezogen auf die organische Trockensubstanz, bei den Gärresten aus dem Fermenter bedeutend höher als bei jenen aus dem Nachgärer.

Nach der Separierung emittierten vor allem die flüssigen Gärreste. Bezogen auf die organische Trockensubstanz war die Emissionsrate der Gärreste vor und nach der Separierung etwa gleich gross.

Bei den separierten festen Gärresten wiesen die einzelnen Proben unterschiedliche Werte auf. Im Winter konnten aufgrund des niedrigen Emissionsniveaus keine Emissionen gemessen werden.

Die gesamten Emissionen der Gärreste aus dem Fermenter betrugen bei den drei Biogasanlagen etwa 2 % der gesamten jährlichen Methanproduktion. Beim Nachgärer und den flüssigen Gärresten nach Separierung waren es etwa 0.5 %, bei den festen Gärresten weniger als 0.1 %.

Das Methan-Restgaspotential war bei den Gärrestproben aus dem Fermenter am höchsten. Beim Fermenter lag es zwischen 8.2 und 30.4 %, beim Nachgärer zwischen 3.8 und 14.5 %, bei den separierten flüssigen Gärresten zwischen 3.3 und 13.5 % und bei den festen separierten Gärresten zwischen 0.4 und 3 % der gesamten jährlichen Methanproduktion.

Die in der Durchflussskammer gemessenen Emissionen betrugen bei den Fermenter-Gärresten zwischen 2 und 37 %, bei den Nachgärer-Gärresten zwischen 2 und 24 %, bei den separierten flüssigen Gärresten zwischen 3 und 37 % und bei den separierten festen Gärresten zwischen 0 und 20 % des Methan-Restpotentials.

Die Hypothese, dass durch die Separierung die Methanemissionen der Gärreste (flüssig und fest) bei der Lagerung verringert werden, kann aufgrund der Auswertung der bisherigen Daten nicht bestätigt werden.

Tabelle 56: Methanemissionen aus Gärresten. Messergebnisse und Angaben im Literaturvergleich

Emissionsquelle	Bedingungen	CH ₄ -Emissionen % CH ₄ -Jahresproduktion	Literaturquelle
Gärreste	Restpotential Restpotential Offenes Lager 20 °C Offenes Lager	bis 15 % 10 - 25 % >20 % 2.5 - 15 %	Oechsner et al 2006 Hub 2007 Amon 2005 FNR 2005
Gärreste	< Fermenter < Nachgärer	1.8 % 0.5 %	Messungen ART 2011-12
Separierte Gärreste	Flüssig Fest	0.6 % < 0.1%	Messungen ART 2011-12

5.2 Methanemissionen aus der Vorgrube

Die Temperatur in der Vorgrube lag während des kurzen Messzeitraums zwischen 21 und 28 °C. In diesem engen Temperaturbereich liess sich keine Beziehung zwischen der Temperatur in der Vorgrube und den CH₄-Emissionen feststellen. Die teilweise grossen Emissionsunterschiede waren vermutlich auf die Diversität der Substrate und den unterschiedlichen Befüllungsgrad der Grube zurückzuführen.

Die Messungen im Sommer zeigten eine Bandbreite von 1 bis 18 Nm³ CH₄ d⁻¹. Der Mittelwert der gemessenen Methanemissionen entsprach etwa 0.4 % der Methan-Tagesproduktion.

Während dem Rühren erreichte die Methankonzentration in der Abluft der Vorgrube kurzzeitig bis zu 3 Vol.-%.

Eine Hochrechnung der Emissionen auf Jahresbasis ist aufgrund der beschränkten Datengrundlage (auf einem Betrieb während der Sommersituation) momentan nicht möglich.

Tabelle 57: Methanemissionen aus der Vorgrube. Messergebnisse und Angaben im Literaturvergleich

Emissionsquelle	Bedingungen	CH ₄ -Emissionen g CH ₄ kWh ⁻¹	Literaturquelle
Vorgrube	Anmaischen mit Rezirkulat aus Fermenter	0.015 -1.7	Hafermann et al 2009
Vorgrube	Zwangsentlüftet	0.4 - 3.9	Messungen ART Sommer 2011 und 2012

5.3 Messmethodik

Die optische Erfassung von Methanemissionen ist eine effiziente Methode zur qualitativen Detektion von Verlustquellen und hat sich in der Praxis bewährt. Die Detektionsgenauigkeit ist hoch und der Zeitaufwand ist gering.

Eine Quantifizierung von Methanemissionen mittels der optischen Erfassung ist bis anhin noch nicht möglich. Eine punktgenaue Lokalisierung der Emissionsquelle ist mit Hilfe des optischen Verfahrens ebenfalls nicht möglich. Hierfür sind weiterhin Konzentrationsmessungen vor Ort nötig.

Für die quantitative Erfassung der Emissionen muss neben der Konzentration, auch der Gasvolumenstrom bekannt sein. Hierzu muss die Emissionsquelle abgeschirmt werden, was oft mit sehr grossem Aufwand verbunden, oder gar unmöglich ist. Durch das Abschirmen werden die Ergebnisse verfälscht. Die Fälschung ist besonders gross, wenn der Gasstrom geringer als die Förderrate des Messgerätes ist.

Die Emissionen treten oft schubweise auf. Aus diesem Grunde sind Langzeitmessungen unter kontrollierten Bedingungen erforderlich, um zuverlässige Aussagen hinsichtlich des Emissionspotentials machen zu können. Der technische und der zeitliche Aufwand hierfür sind hoch.

Die Emissionsrate der Gärreste kann in einer dynamischen Durchflussskammer unter realitätsnahen Bedingungen vergleichend bestimmt werden, vorausgesetzt die Probemenge ist relativ gross, die Messungen erstrecken sich über mehrere Tage und die klimatischen Bedingungen des Luftstroms entsprechen den Aussenbedingungen. Der „Nicht Dispersiver Infrarotsensor (NDIR)“ eignet sich mittels regelmäßiger Kalibrierung für eine genaue und kontinuierliche Aufzeichnung der Methankonzentration im Luftstrom.

Wegen des beschränkten Messbereichs und der ungenügenden Korrosionsbeständigkeit ist das NDIR-Gerät nicht für Langzeitmessungen bei der Vorgrube geeignet.

5.4 Bedeutung für die Praxis

Die Vermeidung von Methanemissionen leistet einen nicht unerheblichen Beitrag zum Klimaschutz.

Die Aufdeckung von technischen und betrieblichen Schwachstellen ist der Schlüssel zu einer effektiven und nachhaltigen Vermeidung von Methanemissionen. Eine periodische Prüfung mit einer Gaskamera ist zu empfehlen.

Grössere Biogasverluste konnten bereits durch Biogasgeruch teilweise deutlich wahrgenommen werden. Dennoch waren sich die Anlagenbetreiber ihrer Verluste oftmals nicht vollumfänglich bewusst. Ein Grossteil der Methanverluste entlang der gesamten Biogasprozesskette, insbesondere betriebsbedingte Verluste, wäre durch eine professionelle Schulung sowie eine entsprechende Sensibilisierung der Anlagenbetreiber zukünftig vermeidbar.

Massnahmen zur Reduktion von Methanverlusten sind auch unter Berücksichtigung wirtschaftlicher Aspekte (Kosten-Nutzen-Analyse) zu betrachten.

5.5 Ausblick und weiterer Forschungsbedarf

Nicht alle CH₄ Emissionsquellen konnten gänzlich untersucht werden. Insbesondere ist die Datengrundlage der Methanverluste der Vorgrube wegen der beschränkten Messdauer und der fehlenden Wiederholung an mehreren Biogasanlagen noch unzureichend. Die CH₄ Emissionen am Substratlager konnten in dieser Arbeit nicht berücksichtigt werden.

Die untersuchten Einflussgrössen, Gärresttemperatur, Aussentemperatur, Trocken- und organischer Trockensubstanz reichen nicht aus, um die grosse Variabilität der Gärrestemissionen vollumfänglich zu erklären. Weitere Parameter wie die biochemische Zusammensetzung der Gärreste und die genauen Vergärungsbedingungen sind in späteren Untersuchungen mit einzubeziehen.

Die technische und wirtschaftliche Praxistauglichkeit einzelner Massnahmen zur Reduktion der Methanemissionen ist zu prüfen. Innovative Lösungsansätze sind zu entwickeln.

6 Literatur

Amon T. (2005): Das Methanbildungsvermögen und die Biogasqualität bei der Vergärung von Energiepflanzen. Forschungsbericht, Universität für Bodenkultur Wien, Departement für Nachhaltige Agrarsysteme, Institut für Landtechnik, Wien

Amon B., V. Kryvoruchko, Amon T. und Zechmeister-Boltenstern S. (2006): Methane, nitrous oxide and ammonia emissions during storage and after application of dairy cattle slurry and influence of slurry treatment. *Agriculture, ecosystems and environment* 112, 153-162, Oktober 2005

Aschwanden A., Beck M., Häberli Ch., Haller G., Keine M., Roesch A., Sie R. und Stutz M. (1996): *Klimatologie 1961-1996*, Heft 2, Band 4 von 4, herausgegeben von der Schweizerischen Meteorologischen Anstalt, Zürich 1996

Bachmaier J. und Gronauer A. (2007): Klimabilanz von Biogasstrom. Bayrische Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL)

Baum S., Baier U., Judex J. und Biollaz S. (2008): Methanverluste bei der Biogasaufbereitung. Studie im Auftrag des Bundesamtes für Energie (BFE).

Bolli S., Soltermann-Pasca A. und Van Caenegem L. (2010): Methanverluste bei landwirtschaftlichen Biogasanlagen. Jahres-Zwischenbericht an Schweizerische Bundesamt für Energie (BFE). Ettenhausen.

Daniel J., Postel J., Scholwin F. und Vogt R. (2008): Materialband C, Biogasanlagen: Technik und Betrieb, Im Rahmen des BMU Forschungsvorhabens „Optimierungen für einen nachhaltigen Ausbau der Biogaserzeugung und –nutzung in Deutschland“ FKZ: 0327544

DIN 38414 DIN 38414-8 : (1985) Deutsche Einheitsverfahren zur Wasser-, Abwasser- und Schlammuntersuchung - Schlamm und Sedimente (Gruppe S) - Bestimmung des Faulverhaltens

Ebertsch G., Fiedler A., Aiblinger-Madersbacher K., Beck R., Karrasch T. und Zell B. (2011): *Biogashandbuch Bayern*, Materialienband, Kap. 2.2.2, Immissionsschutz, einschliesslich Klimaschutz, Stand März 2011

EEG 2011. Gesetz für den Vorrang Erneuerbarer Energien (Erneuerbare-Energie-Gesetz, EEG, von 25. Oktober 2008 (BGBl. IS. 2074), zuletzt durch Artikel 1 des Gesetzes vom 12. April 2011 (BGBl. IS. 619) geändert. Ein Service des Bundesministeriums der Justiz in Zusammenarbeit mit der Juris GmbH-[www.juris.de].

FNR 2005 (Hrsg.): *Ergebnisse des Biogas-Messprogramms*. Erstellt durch die Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft (FAL), herausgegeben von der Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe eV (FNR). Gülzow, 2005

Hafermann C., Clemens J., Cuhls C., Friehe J., Weiland P., Liebetrau J. und Daniel J. (2009): Untersuchungen zu Treibhausgasemissionen bei der Biogaserzeugung aus nachwachsenden Rohstoffen. In: Internationale Wissenschaftstagung Biogas Science 2009, Band 2, Schriftenreihe ISSN 1611-4159

Heinrich J. (2011): *Landbauforschung VTI Agriculture and Forestry Research Vol.61 No. 2 06.2011*. Thünen Institut, Hamburg, Germany

Hengelhaupt F. und Gödeke K: (2008): *Tätigkeitsbericht 2008 Arbeitsgruppe Biogas, Abschlussbericht Teilprojekt 1, 2005 - 2008*

Hub M. (2007): Erneuerbare Energien – der Königsweg aus der Klimakatastrophe? In: Forum GeoÖkologie, 18 (2), 2007

Johann J. und Konrad A. (2010a): Wie gasdurchlässig sind Foliendächer? In: Der fortschrittliche Landwirt – Fachzeitschrift für die bäuerliche Familie, Nr. 8, April 2010

Johann J. und Konrad A. (2010b): Biogasspeicher: Wie gasdurchlässig sind Foliendächer? In: LZ Rheinland, 19, S. 35 – 37

Lange R. (2007): Auswertung von Schäden an Biogasanlagen – Explosionsereignisse und Unfälle durch Gase. Ingenieurconsult Rostock (Hrsg.)

Lehner A., Effenberger M. und Gronauer A. (2009): Optimierung der Verfahrenstechnik landwirtschaftlicher Biogasanlagen – Abschlussbericht. Bayerisches Staatsministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten LfL, München, 2009.

(LfU 2006) Bayerisches Landesamt für Umwelt, 2006 . Emissions- und Leistungsverhalten von Biogas-Verbrennungsmotoren in Abhängigkeit von der Motorenwartung, Augsburg, 2006.

(LfL 2008) Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft, 2008 . Fachbeiträge aus dem Institut für Tier und Technik: Effizienzsteigerung, Emissionsminderung und CO₂-Einsparung durch optimierte Motoreinstellung bei Biogas-Blockheizkraftwerken zur dezentralen Stromerzeugung.

Linke B. und Mähnert P. (2005): Einfluss der Raumbelastung auf die Gasausbeute von Gülle und Nachwachsenden Rohstoffen, Institut für Agrartechnik Bornim, ATB, Abteilung Bioverfahrenstechnik Potsdam, De.

Naeve J., DAS – IB GmbH (2008) (Hrsg.): Schadensschwerpunkte an und Probleme mit der Anlagentechnik bei Biogasanlagen. Präsentation an der Bio- und Deponiegas Fachtagung in Dessau. 23.04.2008

Oechsner H., Helffrich D. und Schmidt M. (2006): Bestimmung des Restgaspotentials im Substratauslauf landwirtschaftlicher Biogasanlagen. Tagungsband, KTBL-Tagung "Emissionen der Tierhaltung – Sektion Biogas" vom 5. Bis 7. Dez. 2006, Kloster Banz

Postel J., Jung U., Fischer E. und Scholwin F. (2008): Stand der Technik beim Bau und Betrieb von Biogasanlagen, Deutsches Biomasse Forschung Zentrum gemeinnützige GmbH, Leipzig

Reitberger F. (2002): Emissionsminderungsmöglichkeiten bei Biogasanlagen entlang der Prozesskette der Biogaserzeugung, von Biogasanlagen-Anforderungen zur Luftreinhaltung. Bayerisches Landesamt für Umweltschutz, Augsburg 2002, ISBN 3-936385-13-0

Stachowitz, W.H. (2008) (Hrsg.) DAS – IB GmbH: Sicherheitsregeln für Biogasanlagen auf Basis der BetrSichV. [http://www.hs-owl.de/fb8/fileadmin/download_autoren/immissionsschutz/Arbeitsschutz/Biogas/Vorschlag_Sicherheit_sregeln_BGA.pdf]

SUVA (Greminger, U., Reminger, D., Scheller, F.) 1993 Sichere Biogasanlagen. Schweizerische Unfallversicherungsanstalt, Luzern.

Woesch-Gallasch S., Enzinger P., Jungmeier G. und Padinger R. (2007): Treibhausgas-Emissionen aus Biogasanlagen – Endbericht. Joanneum Research – Institut für Energieforschung, Im Auftrag des Landesenergievereines Steiermark, Bericht Nr. IEF-B-10/06, Graz, 2007