

**Universität Stuttgart**

Endbericht zur Vorlage beim



**Baden-Württemberg**

MINISTERIUM FÜR UMWELT, KLIMA UND ENERGIEWIRTSCHAFT

zum Projekt

**Untersuchungen zu klimarelevanten Emissionen  
bei Anlagen zur Bioabfallbehandlung  
als Kriterium einer hochwertigen Verwertung**

**[UTE B.]**

Erstellt von

Dipl.-Met. Angela Vesenmaier, M.Sc. und Dr.-Ing. Martin Reiser

Dezember 2016

**Institut für Siedlungswasserbau, Wassergüte- und Abfallwirtschaft**

Lehrstuhl für Abfallwirtschaft und Abluft

Prof. Dr.-Ing Martin Kranert





## Inhaltsverzeichnis

1. Zusammenfassung.....	5
2. Aufgabenstellung .....	8
3. Beschreibung der Ausgangssituation.....	9
4. Beschreibung des Lösungsweges .....	11
4.1. Konzentrationsmessung.....	12
4.2. Windmessung .....	12
4.3. Quelltermberechnung.....	12
4.3.1. Beschreibung der Quelltermbestimmung.....	13
5. Ergebnisse aus den Arbeitspaketen des Vorhabens .....	16
5.1. Ermittlung der Methan-Gesamtfracht .....	16
5.1.1. Vergärungsanlage A.....	16
5.1.2. Vergärungsanlage B.....	20
5.1.3. Vergärungsanlage C.....	24
5.1.4. Kompostierungsanlage A.....	28
5.1.5. Kompostierungsanlage B.....	32
5.1.6. Weitere Kompostierungsanlagen.....	33
5.2. Bewertung der Methanemissionen aus den Anlagen.....	34
5.3. Weitere klimarelevanter Gase .....	40
6. Abschlussbemerkungen und Ausblick.....	43
7. Literatur .....	44

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 3.1: Das System der Bio- und Grünabfallbehandlung im Überblick .....	9
Abbildung 4.1: Komponenten der Quantifizierungsmethode für Methanfrachten.....	11
Abbildung 4.2: Schematische Darstellung des bLS Modells .....	13
Abbildung 5.1: CH <sub>4</sub> -Emissionsrate über die Zeit am 06.05.2015 .....	17
Abbildung 5.2: CH <sub>4</sub> -Emissionsrate über die Zeit am 02.06.2015 .....	18
Abbildung 5.3: CH <sub>4</sub> -Emissionsrate über die Zeit am 22.12.2015 .....	19
Abbildung 5.4: CH <sub>4</sub> -Emissionsrate über die Zeit am 29.10.2015 .....	21
Abbildung 5.5: CH <sub>4</sub> -Emissionsrate über die Zeit am 21.01.2016 .....	22
Abbildung 5.6: CH <sub>4</sub> -Emissionsrate über die Zeit am 16.02.2016 .....	23
Abbildung 5.7: CH <sub>4</sub> -Emissionsrate über die Zeit am 17.12.2015 .....	26
Abbildung 5.8: CH <sub>4</sub> -Emissionsrate über die Zeit am 26.01.2016 .....	27
Abbildung 5.9: CH <sub>4</sub> -Emissionsrate über die Zeit am 17.02.2016 .....	27
Abbildung 5.10: CH <sub>4</sub> -Emissionsrate über die Zeit am 16.09.2015 .....	30
Abbildung 5.11: CH <sub>4</sub> -Emissionsrate über die Zeit am 01.10.2015 .....	30
Abbildung 5.12: CH <sub>4</sub> -Emissionsrate über die Zeit am 14.03.2016 .....	31
Abbildung 5.13: Klimabilanz der Anlagen in [kg CO <sub>2</sub> -Äq / Mg Input].....	39
Abbildung 5.14: Konzentrationen weiterer Abgaskomponenten an KPA A.....	41

## **Tabellenverzeichnis**

Tabelle 1.1: Mittlere Emissionsraten aller Anlagen .....	5
Tabelle 1.2: Einstufung der Klimarelevanz .....	6
Tabelle 5.1: Informationen zu den einzelnen Messtagen der VGA A .....	16
Tabelle 5.2: Mittlere Emissionsraten VGA A, inkl. Emissionsfaktoren .....	20
Tabelle 5.3: Informationen zu den einzelnen Messtagen der VGA B .....	20
Tabelle 5.4: Mittlere Emissionsraten VGA B, inkl. Emissionsfaktoren .....	24
Tabelle 5.5: Informationen zu den einzelnen Messtagen der VGA C .....	25
Tabelle 5.6: Mittlere Emissionsraten VGA C, inkl. Emissionsfaktoren.....	28
Tabelle 5.7: Informationen zu den einzelnen Messtagen der KPA A .....	29
Tabelle 5.8: Mittlere Emissionsraten KPA A, inkl. Emissionsfaktoren .....	32
Tabelle 5.9: Informationen zu den einzelnen Messtagen der KPA B .....	33
Tabelle 5.10: Emissionsfaktoren aus der Literatur .....	34
Tabelle 5.11: Wichtige Betriebsmerkmale der untersuchten Anlagen .....	35
Tabelle 5.12: Mittlere Emissionsraten aller Anlagen, inkl. Emissionsfaktoren .....	36
Tabelle 5.13: Mittlere Emissionsraten NawaRo-Anlagen .....	37
Tabelle 5.14: Mittlere Frachten aus Fernerkundung, Reingas und Rohgas der KPA A .....	41

## Abkürzungsverzeichnis

BGA .....	<i>Biogasanlage</i>
BHKW .....	<i>Blockheizkraftwerk</i>
bLS .....	<i>backwards Lagrangian Stochastic</i>
CORINE .....	<i>Coordination of Information on the Environment</i>
FID .....	<i>Flammenionisationsdetektor</i>
FT-IR .....	<i>Fourier-Transformations-Infrarotspektrometer</i>
IPCC .....	<i>Intergovernmental Panel on Climate Change</i>
NawaRo .....	<i>Nachwachsende Rohstoffe</i>
TDLAS .....	<i>tunable diode laser absorption spectrometry</i>
THG .....	<i>Treibhausgas</i>
USA .....	<i>Ultraschall-Anemometer</i>

## Definitionen

CH <sub>4</sub> .....	<i>Summenformel Methan</i>
N <sub>2</sub> O .....	<i>Summenformel Lachgas</i>
NH <sub>3</sub> .....	<i>Summenformel Ammoniak</i>

## Kurztitel Projekte

UTE B .....	<i>„Untersuchungen zu klimarelevanten Emissionen bei Anlagen zur Bioabfallbehandlung als Kriterium einer hochwertigen Entsorgung“</i>
QuantiSchluMBF .....	<i>„Messung von Methanemissionen an Biogasanlagen mit Lasertechnik und Modellierung zur Bestimmung der Methanfracht“</i>

## 1. Zusammenfassung

Im Forschungsvorhaben wurden mittels einer Kombination aus Messungen und Modellierung Daten zur THG-Gesamtemission (gefasste und diffuse Quellen, Methan und andere klimarelevante Gase) aus Anlagen zur Bioabfallverwertung gewonnen. Auf Basis dieser emittierten Frachten wurde eine Bewertung der Hochwertigkeit der unterschiedlichen Technologien zur Verwertung von Bioabfall vor dem Hintergrund der Klimarelevanz durchgeführt. Dabei wurde ein Vergleich zu Literaturwerten und den Ergebnissen aus dem Projekt „QuantiSchluMBF“ [1] vorgenommen.

In Tabelle 1.1 sind die Ergebnisse aus den Arbeitspaketen zusammengestellt. Die Bewertung der Quellstärke und der Vergleich der Klimarelevanz wurden mit Hilfe von einschlägigen Emissionsfaktoren untersucht.

**Tabelle 1.1: Mittlere Emissionsraten aller Anlagen, inkl. Emissionsfaktoren**

Anlage	Mittlere Emissionsrate [g CH <sub>4</sub> /s]	Kuh-äquivalente [Kuh]	Emissionsfaktor [% C <sub>CH<sub>4</sub></sub> /P <sub>CH<sub>4</sub></sub> ]	Emissionsfaktor [g CH <sub>4</sub> /Mg Input]
VGA A	0,2 ± 0,2	60	0,3	191
VGA B	1,0 ± 0,3	290	3,4	1796
VGA C	1,3 ± 0,7	380	1,8	988
KPA A	0,3 ± 0,2	90	-	136
KPA B	-	-	-	-
Kuh	0,003	1	-	5.500

Als weitere Vergleichsgröße zur Einordnung der Emissionen in eher alltägliche Dimensionen wurden die Methanemissionen von Kühen herangezogen. Kühe „verarbeiten“ ebenfalls organische Masse und erzeugen dabei als Nebenprodukt Methan. Diese „Kuhäquivalente“ geben an, wie viele Kühe, bezogen auf ein Jahr, die gleiche mittlere Emissionsrate aufweisen wie eine untersuchte Anlage. Ausgegangen wird dabei von einem jährlichen Ausstoß an Methan einer Kuh von etwa 100 kg CH<sub>4</sub>/a [2].

Dieser Vergleich bezieht sich auf die absoluten Methanemissionen, weist damit nicht auf die Verwertungskapazität von organischem Material einer Anlage hin.

Die untersuchte Kompostierungsanlage, an der eine Auswertung möglich war (siehe 5.1.4 und 5.1.5), emittiert im Jahr genauso viel Methan wie etwa 90 Kühe. Die Kompostierungsanlage verarbeitet jedoch auch mehr als das 35-fache an organischem Material als 90 Kühe. Bezogen auf die Inputmenge, emittiert die Kompostierungsanlage nur 136 g CH<sub>4</sub>/Mg Input, eine Kuh dagegen 5.500 g CH<sub>4</sub>/Mg Input.

Bei der Vergärungsanlage VGA A verhält es sich ähnlich. Diese emittiert hochgerechnet im Jahr genauso viel Methan wie 60 Kühe. Diese Emissionsrate entspricht aber nur etwa 0,3 % der Methanmenge, die die Anlage durch die Vergärung von Bioabfall produziert. Die absolute Methanemissionsrate der Vergärungsanlage VGA B liegt etwas unterhalb der Fracht von Vergärungsanlage VGA C. So emittiert VGA B im Jahr in etwa so viel Methan wie 290 Kühe und VGA C wie 380 Kühe. VGA C hat eine höhere Behandlungskapazität für Bioabfälle. Dadurch geht relativ betrachtet an der VGA C nur 1,8 % des produzierten Methans verloren. An der VGA B sind es 3,4 %.

Laut Statistischem Bundesamt Baden-Württemberg betrug der Rinderbestand in Baden-Württemberg im Jahr 2015 etwa 1 Mio. Rinder [3]. Die Methanemissionen aus der Bioabfallbehandlung entsprechen somit nur wenige Promille der aus der Rinderhaltung stammenden Methanemissionen.

**Tabelle 1.2: Einstufung der Klimarelevanz**

Anlage	Emissionsfaktor [% c <sub>CH4</sub> /P <sub>CH4</sub> ]	Klimarelevanz nach [4] und [5]	Klimabilanz [kg CO <sub>2</sub> -Äq/ Mg Input]
VGA A	0,3	minimal	- 223
VGA B	3,4	gering	- 218
VGA C	1,8	moderat	- 139
KPA A	~ 100	minimal	- 32

In Tabelle 1.2 sind die Einstufungen der Klimarelevanz der untersuchten Bioabfallbehandlungsanlagen durch den Vergleich mit Literaturwerten gegeben. Im direkten Vergleich der Emissionsraten mit Literaturwerten ([4], [5]), kann die Klimarelevanz bezüglich der Methanemissionen der untersuchten Bioabfallbehandlungsanlagen als minimal bis moderat eingestuft werden. An der Kompostierungsanlage KPA A wurden an

einem Tag zusätzlich die Lachgasemissionen, als ein weiteres klimarelevantes Gas, quantifiziert (siehe 5.3). Des Weiteren ist die Klimabilanz in Tabelle 1.2 angegeben, die sich aus den gemessenen Methanemissionsraten als Belastung (+) und der Gutschrift aus Kompost-, Dünger- und Biogasgewinnung als Einsparung (-) berechnen. Aufgrund der hohen Gutschrift aus den Biogaserträgen der Vergärungsanlagen können im Vergleich zu Kompostierungsanlagen pro Tonne verwertetem Bioabfall sehr viel mehr CO<sub>2</sub>-Äquivalente eingespart werden. Die untersuchten Bioabfallvergärungsanlagen weisen in etwa eine ähnliche Klimabilanzierung auf. Eine Kaskadennutzung aus Vergärung und Kompostierung von Bioabfällen daher einer reinen Kompostierung vor zu ziehen.

Die im Forschungsprojekt „QuantiSchluMBF“ [1] untersuchten landwirtschaftlichen Biogasanlagen wiesen ähnliche Ergebnisse auf, wie die hier untersuchten Vergärungs- und Kompostierungsanlagen. Eine „klassische“ Einteilung, wie bei den NawaRo-Anlagen aus „QuantiSchluMBF“ [1] konnte an den Bioabfallvergärungsanlagen nicht verifiziert werden. An der VGA A, die zwei geschlossene aber nicht gasdicht verschlossene Gärrestlager besitzt, wurden die geringsten Emissionsraten bestimmt. Die VGA B besitzt einen gasdichten Gärrestbehälter, weist aber deutlich höhere Methanemissionsraten auf. Zudem verfügt VGA B nur über ein Satelliten-BHKW außerhalb des Messbereiches. Die dort entstehenden Methanemissionen wurden somit nicht berücksichtigt. VGA A besitzt zwei Gasmotoren direkt am Standort. Außerdem wird der feste Gärrest an VGA A und VGA B direkt am Standort nachkompostiert. An VGA C entfällt diese stoffliche Nutzung des Gärrests.

Durch Bioabfallvergärungs- und Kompostierungsanlagen wird eine ökologisch sinnvolle Verwertung von Bioabfällen ermöglicht. Organische Abfälle werden unter Nutzung ihres Energiegehalts biologisch behandelt und die Reststoffe als Dünger und Humuslieferant in den Naturkreislauf zurückgeführt. Durch die Vergärung von Bioabfall kann zusätzlich Biogas gewonnen werden um z. B. thermische und elektrische Energie zu gewinnen und so fossile Energieträger einzusparen.

## 2. Aufgabenstellung

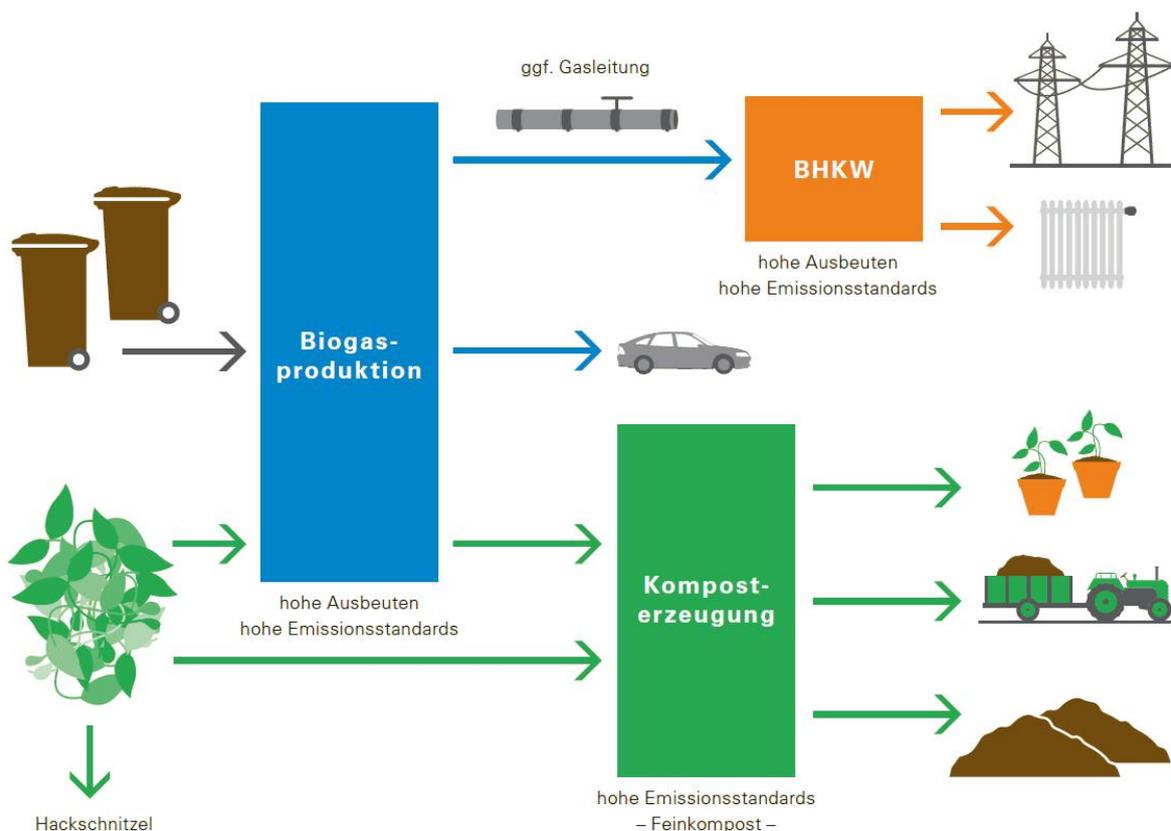
Die Universität Stuttgart, Institut für Siedlungswasserbau, Wassergüte- und Abfallwirtschaft (ISWA), soll die zur Quantifizierung von Methanfrachten aus Flächenquellen bei Deponien entwickelte und bei landwirtschaftlichen Biogasanlagen weiter optimierte Methode an die bei Bioabfallbehandlungsanlagen vorherrschenden Randbedingungen anpassen und an verschiedenen Bioabfallvergärungsanlagen und Kompostierungsanlagen erproben. Dabei sollen in dem Forschungsvorhaben mittels einer Kombination aus Messungen und Modellierungen Daten zur THG-Gesamtemission (gefasste und diffuse Quellen, Methan und ggf. andere klimarelevante Gase) aus Anlagen zur Bioabfallverwertung gewonnen werden. Auf Basis dieser emittierten Frachten soll die Hochwertigkeit der unterschiedlichen Technologien zur Verwertung von Bioabfall vor dem Hintergrund der Klimarelevanz bewertet werden.

Das Projekt gliedert sich in zwei Arbeitsschritte. Arbeitspaket 1: Ermittlung der Methan-Gesamtfracht von drei Kompostierungsanlagen und drei Bioabfallvergärungsanlagen; Arbeitspaket 2: Bewertung der Quellstärken sowie Ermittlung und Vergleich der Klimarelevanz von Bioabfallvergärungsanlagen und Kompostierungsanlagen.

Die angewendete Methode kombiniert eine „open-path“-Konzentrationsmessung und eine mikrometeorologische Ausbreitungsmodellierung. Für letzteres wird die frei verfügbare Software WindTrax von Thunderbeach Scientific verwendet. Das darin implizierte Model beruht auf eine rückwärtsgerichtete Lagrange'sche Stochastik (bLS). Die Methankonzentration wird mit dem GasFinder von Boreal Laser Inc. gemessen. Das Fernerkundungssystem basiert auf der Messung der Absorption von infrarotem Licht in einer für Methan spezifischen Wellenlänge. Mit der im Lee einer Anlage gemessenen Methankonzentration, abzüglich der im Luv gemessenen Hintergrundkonzentration, und den vorherrschenden Windkonditionen, simuliert WindTrax die Gasausbreitung zeitlich zurück um die Emissionsrate der Anlage zu bestimmen.

### 3. Beschreibung der Ausgangssituation

Durch die Einführung der Pflicht zur getrennten Sammlung von Bioabfall ab dem 01.01.2015 steigt auch in Baden-Württemberg der Bedarf an Behandlungskapazität. Zur Anwendung kommen dabei überwiegend die Techniken der aeroben Kompostierung und der anaeroben Vergärung (siehe Abbildung 3.1). Aufgrund der Randbedingungen der beiden Technologien lassen sich unterschiedliche Kriterien definieren. Als hochwertigste Verwertung gilt nach dem Stand der Technik eine Kombination aus Vergärung und Nachkompostierung der Gärreste, die sogenannte Kaskadennutzung.



**Abbildung 3.1: Das System der Bio- und Grünabfallbehandlung im Überblick [6]**

Als ein wichtiges Kriterium für die *Hochwertigkeit eines Behandlungsverfahrens* kann die *Klimarelevanz* herangezogen werden. Für einen Vergleich ist eine Quantifizierung der Treibhausgasemissionen (hauptsächlich Methanemissionen) beider Behandlungsprozesse (Kompostierung und Vergärung) unerlässlich. Bei der anaeroben Vergärung entsteht zwangsläufig Methan, das hauptsächlich gesammelt und beispielsweise in einem BHKW nutzbar gemacht wird. Dennoch können an solchen Anlagen unerwünschte Methanaustritte erfolgen, z. B. durch Leckagen, nicht gasdichte Gärrestbehälterabdeckungen, geöffnete Wartungseinstiege oder während einzelner Prozessschritte (Separation und Bereitstellung des Gärrückstandes sowie die Emissionen aus der Nachrotte). Aerobe Kompostierung wird in erster Linie nicht mit Methan in Verbindung gebracht. Durch ungleichmäßige Belüftung oder partielle Vernässung

können aber anaerobe Bereiche in einer Miete auftreten, in denen Methan entstehen kann. Dieses wird dann zum Teil in den aeroben Bereichen wieder oxidiert. Daraus resultiert eine Vielzahl an Quellen, die unterschiedliche Größe, Detektierbarkeit oder Zugänglichkeit aufweisen. Dies bewirkt die Notwendigkeit einer einfachen und generell verfügbaren Methode zur Ermittlung der Gesamtmethanemissionen an Anlagen zur Bioabfallverwertung.

Derzeit steht noch keine standardisierte Messmethode zur Quantifizierung von Gesamtemissionen an solchen Anlagen zur Verfügung. Allein über eine Quantifizierung der gefassten Quellen ist keine ausreichend genaue Bestimmung möglich.

Bei Vergärungsanlagen aus dem landwirtschaftlichen Bereich wird in der Literatur über nennenswerte diffuse Methanemissionen ([7], [8], [9]) berichtet. Im Rahmen des im Auftrag des Umweltministeriums Baden-Württemberg durchgeführten Forschungsprojekts „QuantiSchluMBF“ [1] untersuchte die Universität Stuttgart im Jahr 2014 eine Methode zur Ermittlung der Gesamtemission von landwirtschaftlichen Biogasanlagen. Dabei wurden Open-Path-Konzentrationsmessungen durchgeführt und anschließend die Fracht durch Modellierungen berechnet. Ob diese Untersuchungsmethode auf Kompostierungs- und Vergärungsanlagen übertragbar ist, musste jedoch erst geprüft werden. Aufgrund von Strömungshindernissen, wie beispielsweise Gebäude oder Abgaskamine, ist die Ausbreitung der Emissionen in diesen Fällen relativ komplex.

#### 4. Beschreibung des Lösungsweges

Zur sicheren Quantifizierung der Gesamtfracht an Methan, die ein Kompostwerk oder eine Vergärungsanlage emittiert, kommt ein Fernmessverfahren zur Anwendung. Diese Methode konnte bereits an landwirtschaftlichen Biogasanlagen erfolgreich eingesetzt werden ([7],[8],[9]). Dabei besteht die Methode aus den drei Komponenten „Konzentrationsmessung“, „Windmessung“ und „Modellierung“. Über die Rückrechnung der Gasverteilung anhand der im Lee der Anlage gemessenen Gaskonzentration lässt sich unter Einbeziehung der Windverhältnisse die Quellstärke einer Flächenquelle ermitteln (siehe Abbildung 4.1):

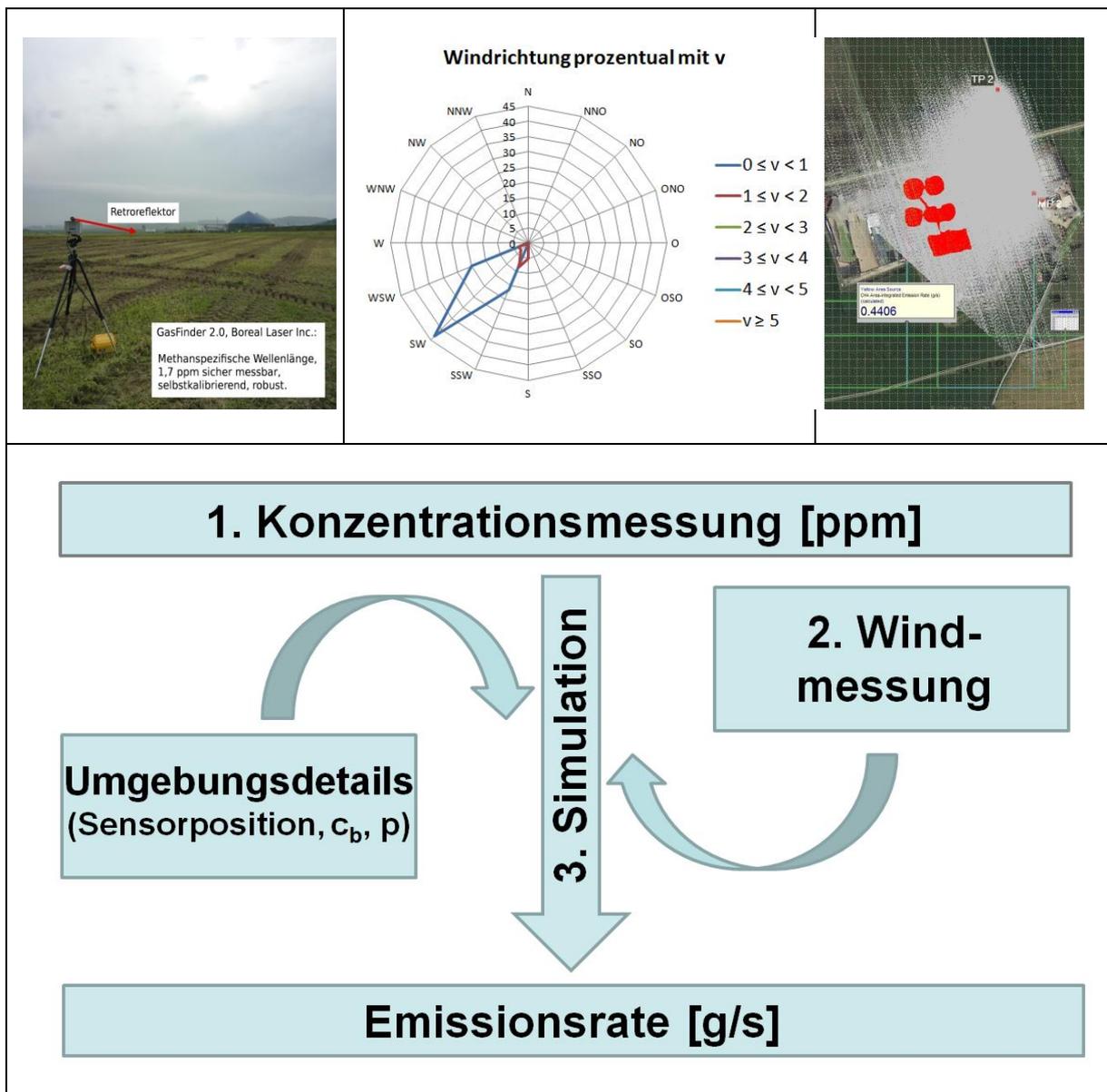


Abbildung 4.1: Komponenten der Quantifizierungsmethode für Methanfrachten

## **4.1. Konzentrationsmessung**

In Luv und Lee der Quelle wird jeweils entlang einer Messstrecke die Methankonzentration gemessen. Diese Analysen werden mittels GasFinder 2.0 von Boreal Laser durchgeführt. Das Fernerkundungsmessgerät basiert auf der Absorption von infrarotem Licht einer charakteristischen Wellenlänge der zu quantifizierende Komponente (TDLAS). Auf der offenen Messstrecke („open path“) zwischen der Lichtquelle und einem Retroreflektor wird eine aufsummierte Linienkonzentration gemessen. Dabei sind Messstrecken zwischen 2 m und 1.000 m Länge möglich. Die Genauigkeit beträgt 1 ppm, die Methan-Hintergrundkonzentration der Atmosphäre von 1,7 ppm ist damit gut messbar. Im Luv wird die Hintergrundkonzentration am Standort bestimmt, um mögliche Sekundärquellen nicht fälschlich der zu untersuchenden Anlage zuzuschreiben. Im Lee der Anlage werden die Methankonzentrationen gemessen, die zusätzlich die der Anlage enthalten.

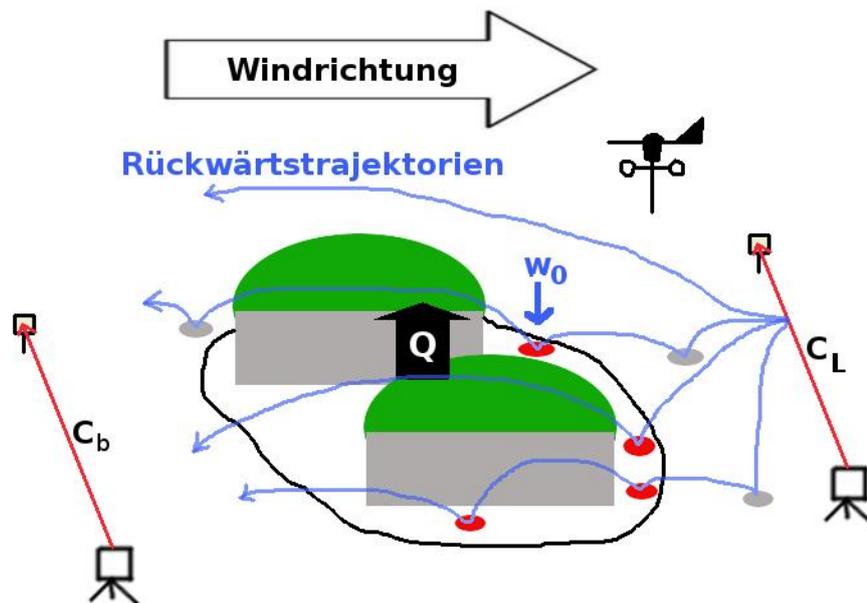
## **4.2. Windmessung**

Parallel zu den Konzentrationsmessungen werden vor Ort Messungen der ungestörten Windrichtung, Windgeschwindigkeit und mehrerer Turbulenzparameter durchgeführt. Hierzu wird ein Ultraschall-Anemometer (USA-1) der Firma METEK eingesetzt.

## **4.3. Quelltermberechnung**

Mit den Konzentrationswerten und den Winddaten als Eingangsgrößen erfolgt in einer Modellrechnung die Ermittlung der von der Quelle emittierten Methanfracht. Die mit dem Anemometer ermittelten Parameter sind die Basis für eine Ausbreitungsmodellierung mit dem frei verfügbaren Programm WindTrax von Thunder Beach Scientific. Je genauer das Windfeld beschrieben werden kann, also je mehr Parameter dem Programm zur Verfügung gestellt werden, desto genauer kann die natürliche Ausbreitung in der tatsächlichen Atmosphäre simuliert werden. Aber auch ganz vereinfacht lassen sich mit WindTrax aus den gemessenen Konzentrationen zufriedenstellende Emissionsraten bestimmen. WindTrax hat eine bedienerfreundliche Oberfläche, die es jedem Anwender ermöglicht, das Programm seiner Qualifikation entsprechend zu bedienen.

### 4.3.1. Beschreibung der Quelltermbestimmung



**Abbildung 4.2: Schematische Darstellung des bLS Modells**

Eine vereinfachte schematische Darstellung zur Beschreibung der Quelltermbestimmung ist in Abbildung 4.2 gegeben. Als Ausgangspunkt für eine Ausbreitungsmodellierung zur Berechnung der Emissionsrate ist eine Fläche zu definieren, aus der die Emissionen entweichen. In diesem Anwendungsfall enthält diese Fläche sämtliche Anlagenkomponenten einer Bioabfallverwertungsanlage, aus denen Emissionen zu erwarten sind. Vereinfachen lässt sich dieser Schritt, indem eine Luftaufnahme des Geländes als Hintergrund in das Programm eingefügt wird. Zusätzlich kann dieses skaliert werden, wodurch Entfernungen und Größenordnungen maßstabsgetreu übertragen werden können. Bezüglich der Emission muss angenommen werden, dass Methan mit einer konstanten aber unbekanntem Rate  $Q$  (in Gramm pro Quadratmeter und Sekunde) gleichmäßig über der gesamten Fläche emittiert wird. Für eine detailliertere Unterteilung der Emissionsquellen einer Anlage, muss die Anzahl an Konzentrationsmessungen dem entsprechend erhöht werden. Dies führt zu einem Mehraufwand an Equipment, was die Kosten für die Messung erhöhen würde. Für eine Abschätzung der Klimarelevanz von Bioabfallbehandlungsanlagen ist die Quantifizierung der Gesamtmethanemissionen der Anlage und somit eine Konzentrationsmessung ausreichend.

WindTrax benutzt zur Bestimmung der Emissionsrate ein Modell, das auf eine rückwärtsgerichtete Lagrange'sche Stochastik (bLS) beruht. Ausbreitungsmodelle, die auf einer Lagrange'sche Stochastik basieren, geben die natürlich vorkommenden atmosphärischen Ausbreitungsprozesse am besten wieder. Konkret ist das Bearbeitungs-

schema des Programms wie folgt: Es erzeugt tausende imaginäre Partikel von mehreren Punkten, die gleichmäßig entlang der Messstrecke verteilt werden. Diese Partikel enthalten die gemessene Konzentration und werden windaufwärts, also zeitlich zurück, verfolgt. Diese Rückwärtstrajektorien dienen der Aufklärung über die Entstehungsorte dieser Partikel. Unter dem Gesichtspunkt einer Lagrange'sche Stochastik sind unterschiedliche Pfade der Partikel mit verschiedenen Wahrscheinlichkeiten möglich. In Abbildung 4.2 sind vier Beispiele solcher Rückwärtstrajektorien von einem Freisetzungspunkt der Messstrecke in blau dargestellt. Dabei wird von der Software eine möglichst natürliche turbulente Ausbreitung in der Atmosphäre simuliert. Jede mögliche Trajektorie, bezüglich der vorherrschenden Bedingungen, und die dazu gehörige Wahrscheinlichkeit wird erfasst und in einer Matrix abgespeichert.

Die wichtigste Information aus diesen Rückwärtstrajektorien sind deren Bodenaufsetzer, die als Touchdowns bezeichnet werden, und die dazugehörige Vertikalgeschwindigkeit ( $w_0$ ). Von besonderem Interesse sind die Touchdowns, die innerhalb der definierten Fläche der Emissionsquelle auftreten. In Abbildung 4.2 sind diese durch rote Aufsetzungspunkte markiert. Die Touchdowns, die außerhalb der emissionsverursachenden Fläche liegen (graue Aufsetzungspunkte), werden entsprechend heraus gerechnet. Die Aufsetzgeschwindigkeiten sind als Funktion der Turbulenzdaten und der mittleren Windgeschwindigkeit  $\beta$  zu verstehen.

Für solche Berechnungen in der atmosphärischen Oberflächenschicht sind grundsätzlich die Rauigkeitslänge, die Monin-Obukhov-Länge und die Schubspannungsgeschwindigkeit erforderlich. Die Rauigkeitslänge  $z_0$  wird nach den CORINE Klassen eingeteilt. Sie stellt einen Korrekturwert für den Grad der gestörten Bewegung des Windes am vorliegenden Erdboden dar. Dadurch können die Einflüsse von Hindernissen, wie zum Beispiel Bäume, korrigiert werden. Die Monin-Obukhov-Länge ist ein Stabilitätsparameter der Atmosphäre. Dieser Wert gibt die thermische Schichtung der Atmosphäre wieder und gibt Aufschluss über vertikale Transportprozesse. Dabei kann in stabile ( $L_M > 0$ ), neutrale ( $L_M = \infty$ ) oder instabile ( $L_M < 0$ ) Schichtung unterschieden werden. Die Schubspannungsgeschwindigkeit ist ein Maß für die Schubspannung, die die strömende Luftschicht auf eine Grenzfläche ausübt.

Mittels der hinterlegten Trajektorienmatrix und der zu den Touchdowns zugehörigen Vertikalgeschwindigkeiten kann das Model ein Verhältnis einer windabgewandten Konzentration zu einer Emissionsrate  $(C_L/Q)_{sim}$  vorhersagen. Dieses Verhältnis beruht weiterhin auf allen eingefügten Umgebungsmerkmalen. Mit Hilfe dieses Verhältnisses und der tatsächlich gemessenen Konzentration, kann auch die tatsächliche Emissionsrate einer Bioabfallbehandlungsanlage berechnet werden (auch wieder in einfacher Verhältnisrelation).

$$Q_{bLs} = \frac{C_L - C_b}{(C_L/Q)_{sim}} \quad (1)$$

Für eine detaillierte Erläuterung der mathematischen Herleitung empfiehlt sich Flesch et al. [10].

In der Quelltermbestimmung wird die Quelle als eine ebene Flächenquelle angenommen. So wird die Simulation vereinfacht, weil nur eine zweidimensionale Betrachtung erfolgt. Da Bioabfallvergärungsanlagen aber eine dreidimensionale Bebauung besitzen, muss die Methode entsprechend angepasst werden. Der Übergang von einer Anlage mit Bauwerken zu einer „ebenen“ Flächenquelle kann angenommen werden, wenn in entsprechender Entfernung zur Anlage gemessen wird. Im Nahbereich ist das Windfeld im Regelfall gestört, da es stark von der Gebäudeumströmung geprägt wird. Auch kann es infolgedessen in manchen Bereichen zur Konzentrationsansammlung kommen.

Im Gegensatz dazu sorgen unterschiedliche Emissionshöhen innerhalb der Anlage eventuell für eine verminderte Konzentrationserfassung. Flesch et al. [7] empfiehlt eine Entfernung, die der zehnfachen Höhe des höchsten Gebäudes entspricht. Für die betrachteten Anlagen entspricht diese Entfernung etwa 100 m. In dieser Entfernung hat sich wieder ein komplett ungestörtes Windfeld ausgebildet, das die gesammelte Gesamtemission der Anlage zur Messstrecke transportiert. In diesem Fall sind Gebäudeumströmungen nicht mehr zu berücksichtigen und die Quelle kann als Flächenquelle betrachtet werden. Bei einer zu groß gewählten Entfernung besteht die Gefahr, dass sich durch Verdünnungsprozesse mit Umgebungsluft, die gemessene Konzentration nicht mehr von der Hintergrundkonzentration in der Atmosphäre unterscheiden lässt. Die Quelltermberechnung wäre somit sehr unsicher.

## 5. Ergebnisse aus den Arbeitspaketen des Vorhabens

### 5.1. Ermittlung der Methan-Gesamtfracht

An zwei Bioabfallkompostierungen und an drei Bioabfallvergärungen wurden die unter Abschnitt 4 beschriebenen Messungen durchgeführt, die wie nachfolgend beschrieben werden:

#### 5.1.1. Vergärungsanlage A

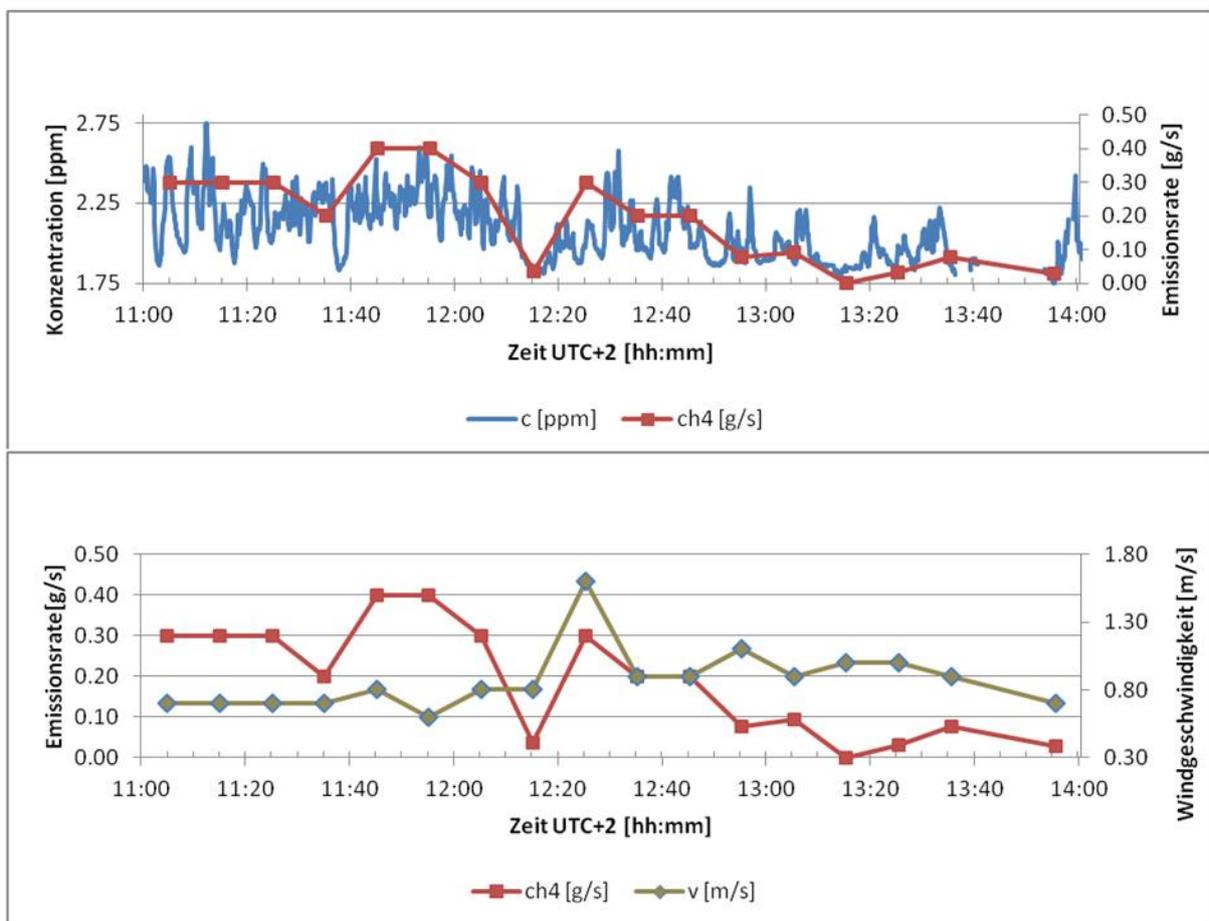
Die erste Anlage, bei der Untersuchungen durchgeführt wurden, arbeitet im Pfropfenstromverfahren, wobei die festen Gärreststoffe anschließend vor Ort kompostiert werden. Jährlich werden so rund 40.000 Mg Bioabfälle und Grünabfälle verwertet. Das entstehende Biogas wird in zwei BHKW's vor Ort in elektrische und thermische Energie umgewandelt. [Quelle: Anlagenbetreiber]

**Tabelle 5.1: Informationen zu den einzelnen Messtagen der VGA A**

Messtag	06.05.2015	02.06.2015	22.12.2015
Messzeitraum	11:01 – 14:05	10:16 – 13:17	9:12 – 13:12
Wetter	sonnig bis heiter $p_0 = 1015 \text{ hPa}$ $T = 18 \text{ °C}$	teils sonnig, heiter $p_0 = 1018 \text{ hPa}$ $T = 22 \text{ °C}$	bedeckt, teils sonnig $p_0 = 1029 \text{ hPa}$ $T = 13 \text{ °C}$
Länge Messstrecke	196 m	200 m	200 m
Abstand Messstrecke	91 m	91 m	91 m
Hintergrund- konzentration	1,9 ppm	2,0 ppm	2,1 ppm
Bemerkungen		Wartungsarbeiten an BHKW I; Gas- fackel z.T. inaktiv	erneuertes Biofil- termaterial

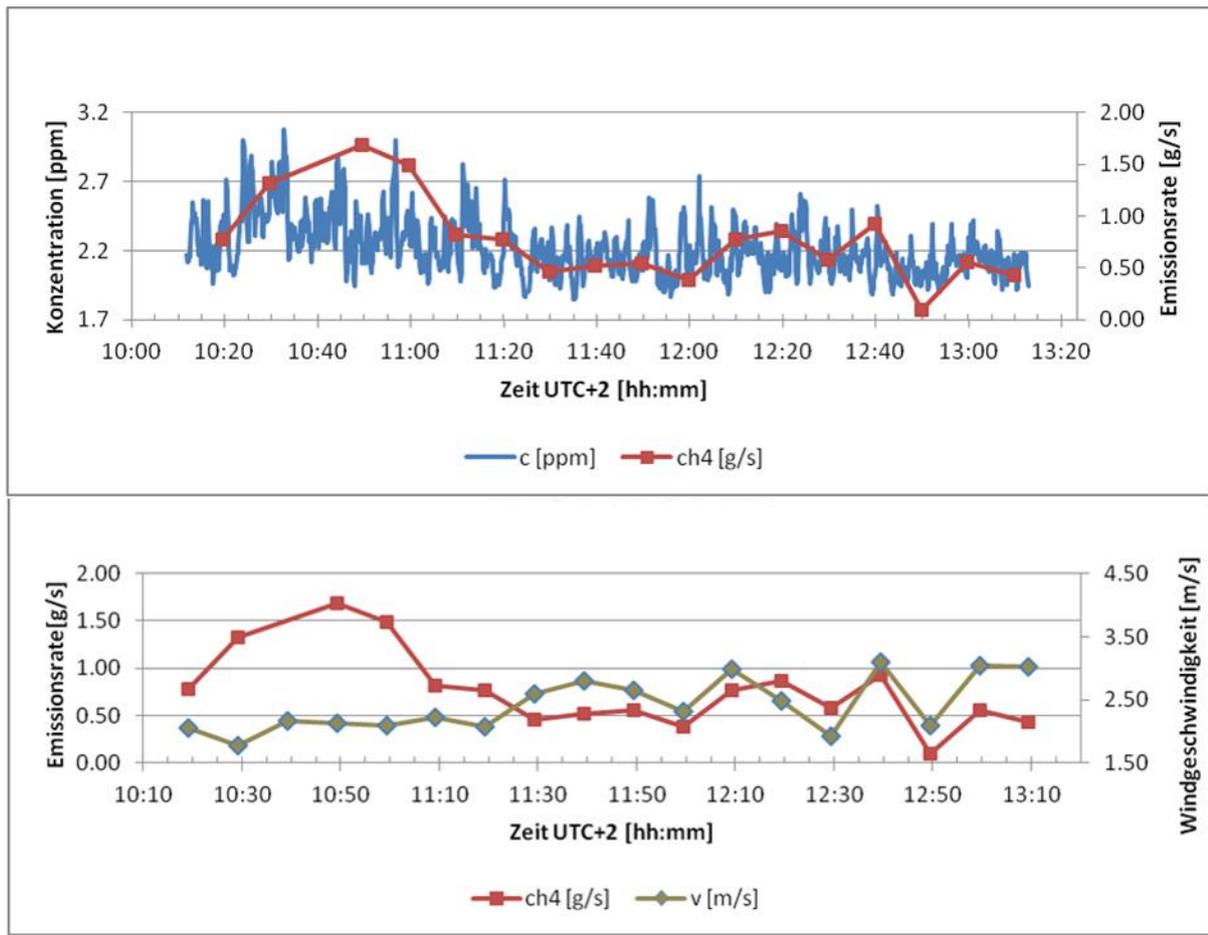
In der Tabelle 5.1 sind wichtige Informationen zu den einzelnen Messtagen im Überblick sowie einige Bemerkungen zu Auffälligkeiten am Messtag zusammengestellt. Die Bilder geben jeweils ein Beispiel des entsprechenden Messtages für ein Resultat der Simulation der Methanemissionsrate bei regulärem Betriebszustand wieder.

Die Graphen in Abbildung 5.1 bis Abbildung 5.3 entsprechen den Ergebnissen aus den 10-Minuten-Mittelintervallen innerhalb der Messzeiträume des gesamten Messtages und geben somit den zeitlichen Verlauf der Emissionsrate der Bioabfallvergärungsanlage während der Messzeiträume wieder.



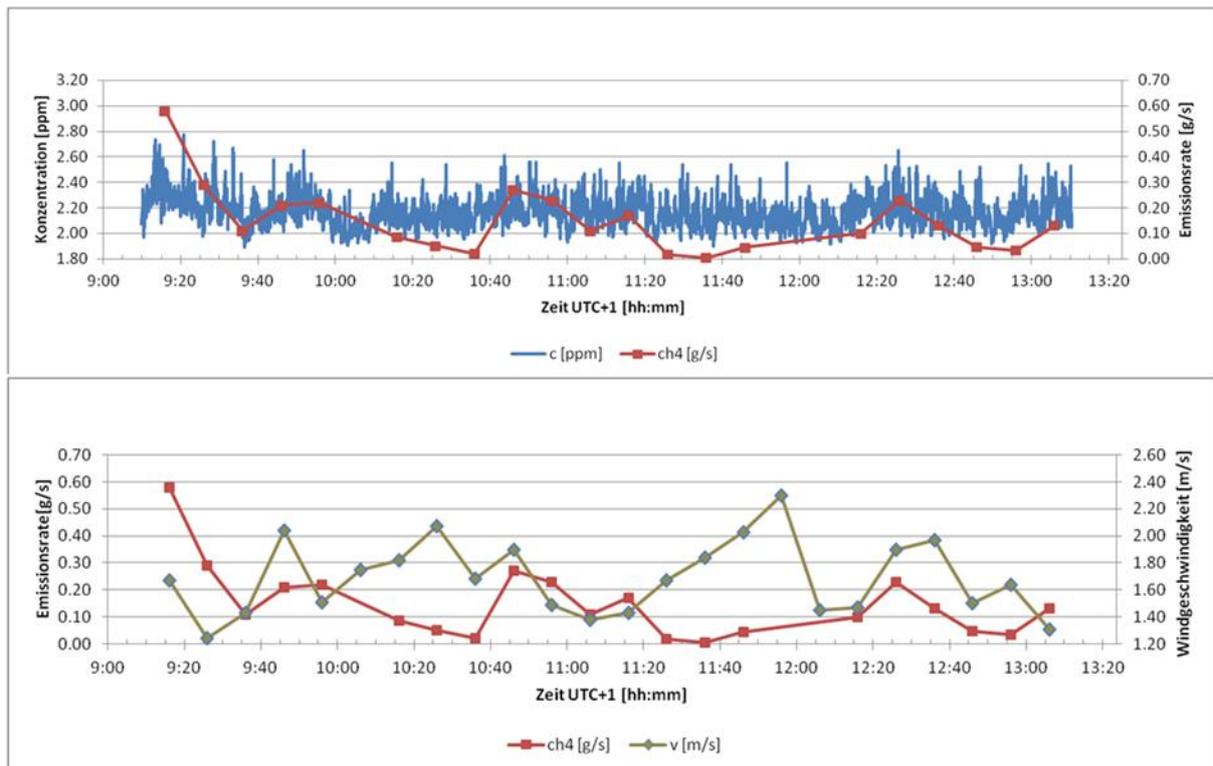
**Abbildung 5.1: CH<sub>4</sub>-Emissionsrate über die Zeit am 06.05.2015, mit Vergleich zur Konzentration (oben) und Windgeschwindigkeit (unten)**

Der Messtag 06.05.2015 wurde gewählt, da an diesem Tag vorwiegend Südwestwind herrschte und damit die einzig vorhandene Messstrecke A gewählt werden konnte. In der Betriebsführung sind während des Messzeitraumes keine Störungen aufgetreten. Die Emissionsraten verlaufen unauffällig und sind mit einem Maximum von 0,4 g/s sehr niedrig.



**Abbildung 5.2: CH<sub>4</sub>-Emissionsrate über die Zeit am 02.06.2015, mit Vergleich zur Konzentration (oben) und Windgeschwindigkeit (unten)**

Am Messtag 02.06.2015 herrschten erneut vorwiegend Südwestwinde, wodurch wieder Messstrecke A zur Konzentrationsbestimmung verwendet werden konnte. Auffällig ist, dass die Emissionsraten an diesem Messtag deutlich höher sind als die am ersten Messtag. An diesem Tag wurde ein Ölwechsel an einem der beiden vor Ort vorhandenen Gasmotoren durchgeführt. Durch die Wartungsarbeiten konnte das produzierte Biogas nur in einem Blockheizkraftwerk energetisch verwertet werden. Das überschüssige Biogas sollte in solch einem Fall über eine Gasfackel verbrannt werden, um das darin enthaltene Methan zu weniger klimaschädlichem Kohlenstoffdioxid zu oxidieren. Zusätzlich zu den Wartungsarbeiten trat der Störfall ein, dass die Gasfackel Zündschwierigkeiten aufwies. Gerade zu Beginn des Messzeitraumes, bis etwa 11:20 Uhr, gelangte das überschüssige Methan ungehindert in die Atmosphäre. In diesem Zeitraum ist das Maximum der Methanemissionsrate rund vier Mal höher als das Maximum des ersten Messtages. Während des restlichen Messzeitraumes hatte die Gasfackel kaum noch Zündschwierigkeiten und die Emissionsraten sind vergleichsweise niedriger, aber immer noch höher als am ersten Messtag.



**Abbildung 5.3: CH<sub>4</sub>-Emissionsrate über die Zeit am 22.12.2015, mit Vergleich zur Konzentration (oben) und Windgeschwindigkeit (unten)**

Für den Messtag 22.12.2015 wurde ebenfalls auf Südwestwindbedingungen geachtet und die Konzentrationsmessung auf der Position „Messstrecke A“ durchgeführt. Am letzten Messtag der ersten untersuchten Bioabfallvergärungsanlage sind die Methanemissionsraten wieder deutlich niedriger als noch am zweiten Messtag. An diesem Tag wurden keine Störfälle verzeichnet und der Emissionsratenverlauf spiegelt die normalen Betriebszustände wider. Im Dezember 2015, kurz vor dem letzten Messtag, wurde das Filtermaterial eines der beiden Biofilter ausgetauscht. Biofiltermaterial setzt und verdichtet sich nach längerer Standzeit. Dadurch kann es unter Umständen zu unzureichend belüfteten Segmenten kommen, in den Methan entstehen kann. In einer neuen Aufschüttung des Biofiltermaterials sollte es nicht zu solchen Segmentbildungen kommen. Dieses Phänomen könnte eine mögliche Erklärung sein, dass die Methanemissionsraten des dritten Messtages größtenteils unterhalb der Emissionsraten vom ersten Messtag liegen.

In Tabelle 5.2 sind die mittleren Methanemissionsraten und deren mittlere Abweichung der Gesamtmesstage im Überblick aufgeführt. Zusätzlich sind die jeweiligen Emissionsfaktoren, bezogen auf die produzierte Methanmenge bzw. bezogen auf den Frischmasseeintrag, angegeben. Am zweiten Messtag wurden die Werte unterteilt in Phasen mit Wartungsarbeiten (A) und Phasen inklusive Störfall (B). Während der Wartungsarbeiten wurde in diesem Fall die dreifache Menge an Methan emittiert, während der Störfallphase sogar die sechsfache Menge. Objektiv betrachtet liegen

die Methanemissionsraten sowohl in Bezug auf die Methanproduktionsrate der Anlage als auch in Bezug auf den Frischmasseeintrag an den zwei Messtagen mit Normalbetrieb auf einem niedrigen Niveau.

**Tabelle 5.2: Mittlere Emissionsraten VGA A, inkl. Emissionsfaktoren**

Messtag	Emissionsrate [g CH <sub>4</sub> /s]	Emissionsfaktor [% C <sub>CH<sub>4</sub></sub> /P <sub>CH<sub>4</sub></sub> ]	Emissionsfaktor [g CH <sub>4</sub> /Mg Input]
06.05.15	0,2 ± 0,1	0,2	150
02.06.15	0,5 ± 0,2 (A)	0,6 (A)	416 (A)
	1,1 ± 0,4 (B)	1,3 (B)	871 (B)
22.12.15	0,1 ± 0,1	0,2	116

### 5.1.2. Vergärungsanlage B

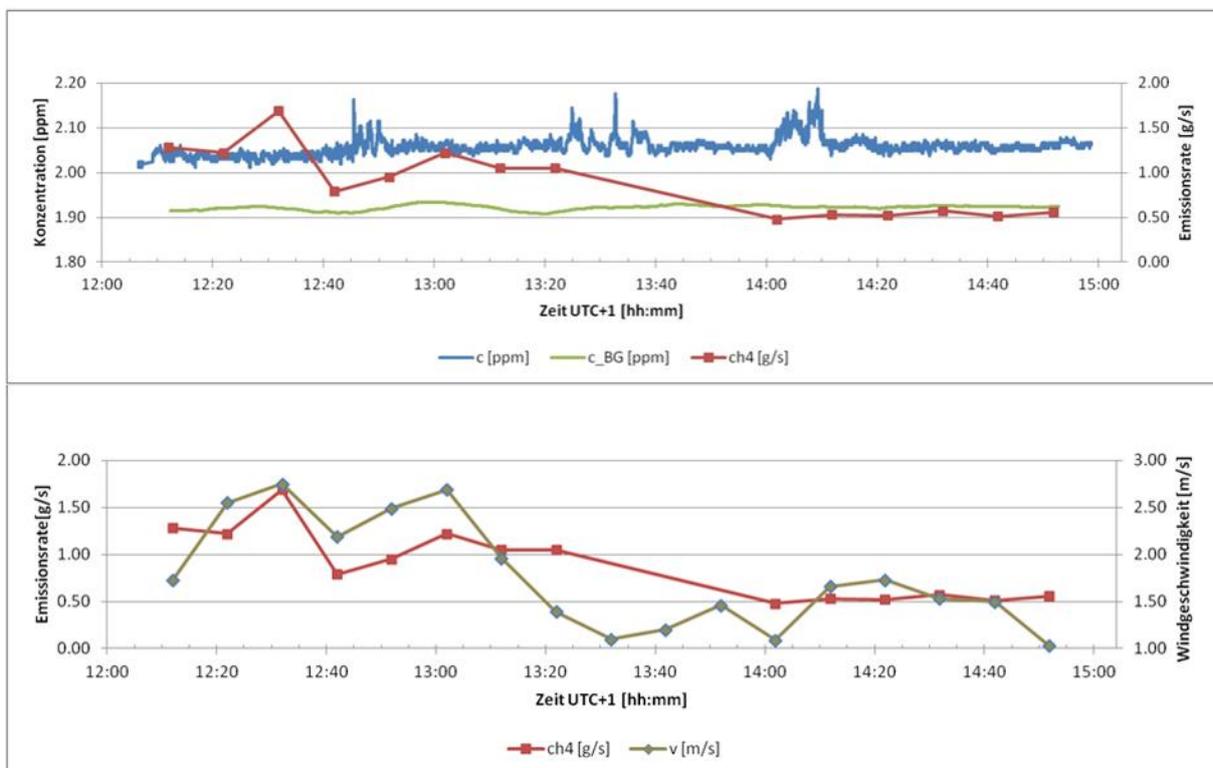
Die zweite Anlage, an der Untersuchungen durchgeführt wurden, arbeitet im Pfropfenstromverfahren, wobei der feste Gärrest anschließend vor Ort kompostiert wird. Jährlich verwertet die Anlage etwa 18.000 Mg Bio- und Grünabfälle. Das erzeugte Biogas wird in Satelliten-BHKW's in elektrische und thermische Energie umgewandelt. [Quelle: Anlagenbetreiber]

In der Tabelle 5.3 sind wichtige Informationen zu den einzelnen Messtagen im Überblick sowie einige Bemerkungen zu Auffälligkeiten am Messtag aufgeführt. Die Bilder geben jeweils ein Beispiel des entsprechenden Messtages für ein Resultat der Simulation der Methanemissionsrate bei regulärem Betriebszustand wieder.

**Tabelle 5.3: Informationen zu den einzelnen Messtagen der VGA B**

Messtag	29.10.2015	21.01.2016	16.02.2016
Messzeitraum	09:38 – 15:08	10:10 – 14:37	09:39 – 13:48
Wetter	bedeckt, z.T. heiter	bedeckt, vereinzelt sonnig	bedeckt, trüb

	$p_0 = 926 \text{ hPa}$ $T = 10 \text{ }^\circ\text{C}$	$p_0 = 929 \text{ hPa}$ $T = -3 \text{ }^\circ\text{C}$	$p_0 = 938 \text{ hPa}$ $T = -2 \text{ }^\circ\text{C}$
Länge Messstrecke	164 m (A)	125 m (B)	179 m (B*)
Abstand Messstrecke	55 m	95 m	95 m
Hintergrund- konzentration	1,9 ppm	1,9 ppm	1,9 ppm
Bemerkungen	simultane Hinter- grundkonzentration- messung	1,5 m hohe Schneedecke	13:30 – 13:40 Tor zur Rottehalle of- fen zur Demo

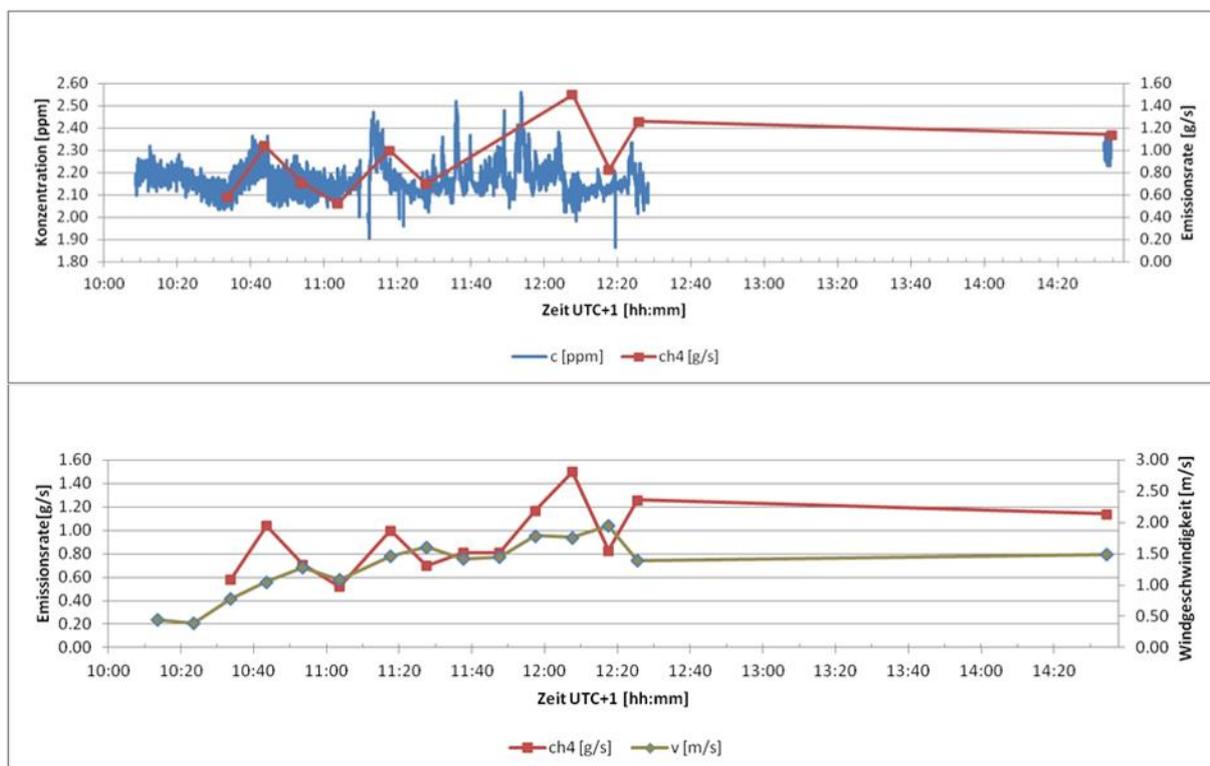


**Abbildung 5.4: CH<sub>4</sub>-Emissionsrate über die Zeit am 29.10.2015, mit Vergleich zur Konzentration (oben) und Windgeschwindigkeit (unten)**

In den Graphen der Abbildung 5.4 bis Abbildung 5.6 sind die Ergebnisse aus den 10-Minuten-Mittelungsintervallen innerhalb der Messzeiträume, analog zur Vergärungs-

anlage A, dargestellt. Im oberen Graph ist die Methanemissionsrate zusammen mit der gemessenen Konzentration aufgetragen. Im unteren ist die Emissionsrate zusammen mit der mittleren Windgeschwindigkeit dargestellt.

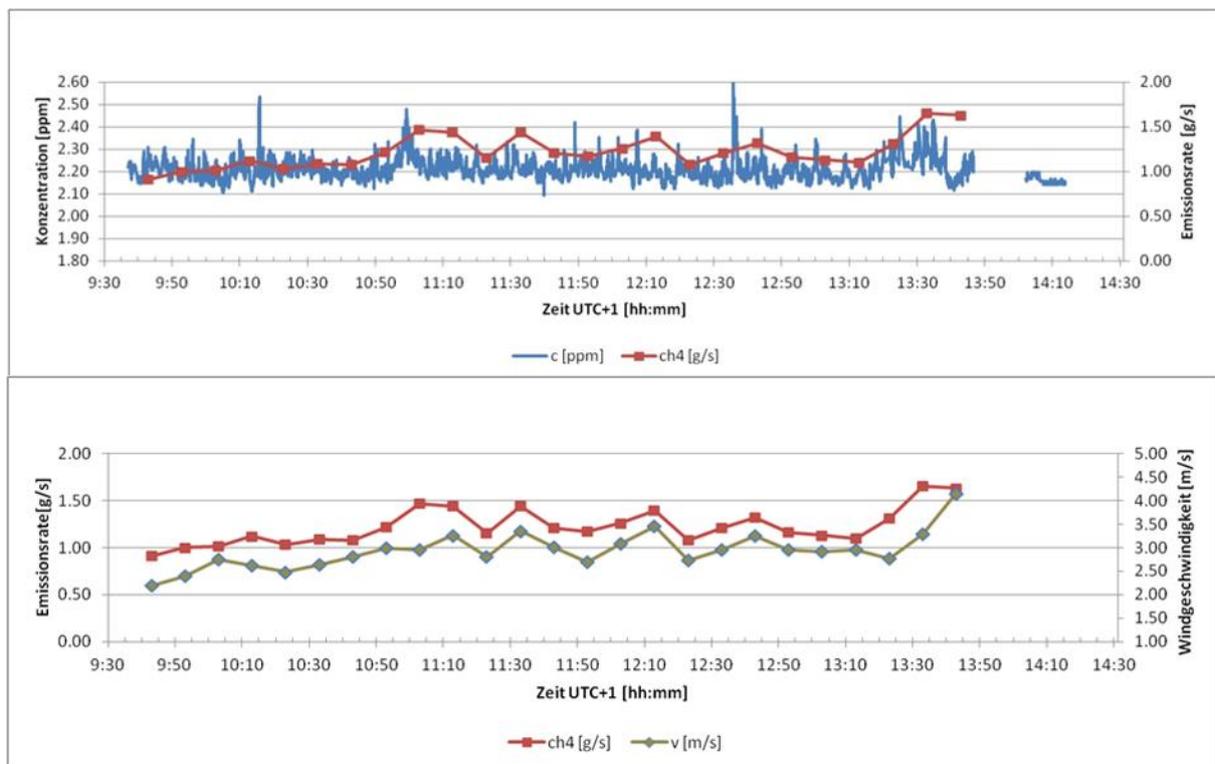
Am Messtag 29.10.2015 stand ein zweites TDLAS-Gerät zur Verfügung, sodass die Hintergrundkonzentration simultan über den gesamten Messzeitraum gemessen werden konnte. Da an diesem Messtag vorwiegend Nordwestwind herrschte, wurden die Messstrecke A zur Messung der Methankonzentration verwendet. Entlang des Pfades von Messstrecke B wurde gleichzeitig die Methanhintergrundkonzentration gemessen. In Abbildung 5.4 (oben) wird diese als grüne Linie dargestellt. Dabei ist die Hintergrundkonzentration nahezu konstant über den gesamten Messzeitraum. Daraus kann geschlossen werden, dass die Bestimmung der Hintergrundkonzentration vor oder nach der eigentlichen Bestimmung der Konzentrationsbelastung ausreichend genau ist. Bei Verdacht auf mögliche Sekundärquellen ist eine simultane Konzentrationsmessung zu empfehlen.



**Abbildung 5.5: CH<sub>4</sub>-Emissionsrate über die Zeit am 21.01.2016, mit Vergleich zur Konzentration (oben) und Windgeschwindigkeit (unten)**

Für den Messtag 21.01.2016 wurde Messstrecke B zur Bestimmung der Methankonzentration der Bioabfallvergärungsanlage B gewählt. Die vorherrschende Windrichtung war Ostnordost. Wie auch schon am Messtag 29.10.2015 traten auch am Messtag 21.01.2016 vereinzelte Peaks in den Methankonzentrationen auf, deren Ursache

erst ermittelt werden musste. Der Abgleich mit den Anlieferungszeiten von Bioabfall lieferte keine Erklärung.



**Abbildung 5.6: CH<sub>4</sub>-Emissionsrate über die Zeit am 16.02.2016, mit Vergleich zur Konzentration (oben) und Windgeschwindigkeit (unten)**

Am Messtag 16.02.2016 herrschten stabile Windverhältnisse aus Nordost, womit Messstrecke B\* gewählt wurde. Um die Ursache der Konzentrationspeaks nachzugehen, wurde am dritten Messtag in einem Mittelungsintervall ein Rolltor zur Kompostierungshalle vorsätzlich offen gelassen. Als Folge stieg die Methankonzentration an. Das Osttor war seit Beginn der Messkampagnen defekt und war deshalb immer geöffnet. Ist die Zufütterung von Kompost als Strukturmaterial in den Fermenter notwendig, transportiert ein Radlader das Material durch das Westtor und entlädt dieses in den Tiefbunker. In dieser gewissen Phase, in der Osttor und Westtor gleichzeitig geöffnet sind, entsteht ein Durchzug in der Rottehalle. Dabei entweicht das dort befindliche Methan instantan. Unter Normalbedingungen würde das Methan in der Rottehalle von der Hallenabsaugung erfasst und kontinuierlich über das Abgasreinigungssystem an die Umgebung abgegeben werden. Die emittierte Methanmenge bleibt in dem Fall gleich aber die Frachten innerhalb eines Zeitintervalls werden dementsprechend beeinflusst.

**Tabelle 5.4: Mittlere Emissionsraten VGA B, inkl. Emissionsfaktoren**

Messtag	Emissionsrate [g CH <sub>4</sub> /s]	Emissionsfaktor [% C <sub>CH<sub>4</sub></sub> /P <sub>CH<sub>4</sub></sub> ]	Emissionsfaktor [g CH <sub>4</sub> /Mg Input]
29.10.15	0,9 ± 0,4	2,9	1537
21.01.16	0,9 ± 0,3	3,1	1609
16.02.16	1,2 ± 0,2	3,9	2047

In Tabelle 5.4 sind die mittleren Methanemissionsraten und deren mittlere Abweichung der Gesamtmesstage im Überblick zusammengestellt. Zusätzlich sind die jeweiligen Emissionsfaktoren, bezogen auf die produzierte Methanmenge bzw. bezogen auf den Frischmasseeintrag, angegeben. Insgesamt betrachtet sind die Methanemissionsraten an allen drei Messtagen in einer ähnlichen Größenordnung. Diese liegt, im Vergleich zu VGA A, eine Zehnerpotenz höher. Aus diesem Grund wären nähere Untersuchungen zur Ursachenfindung oder eine Leckagedetektion sinnvoll.

### 5.1.3. Vergärungsanlage C

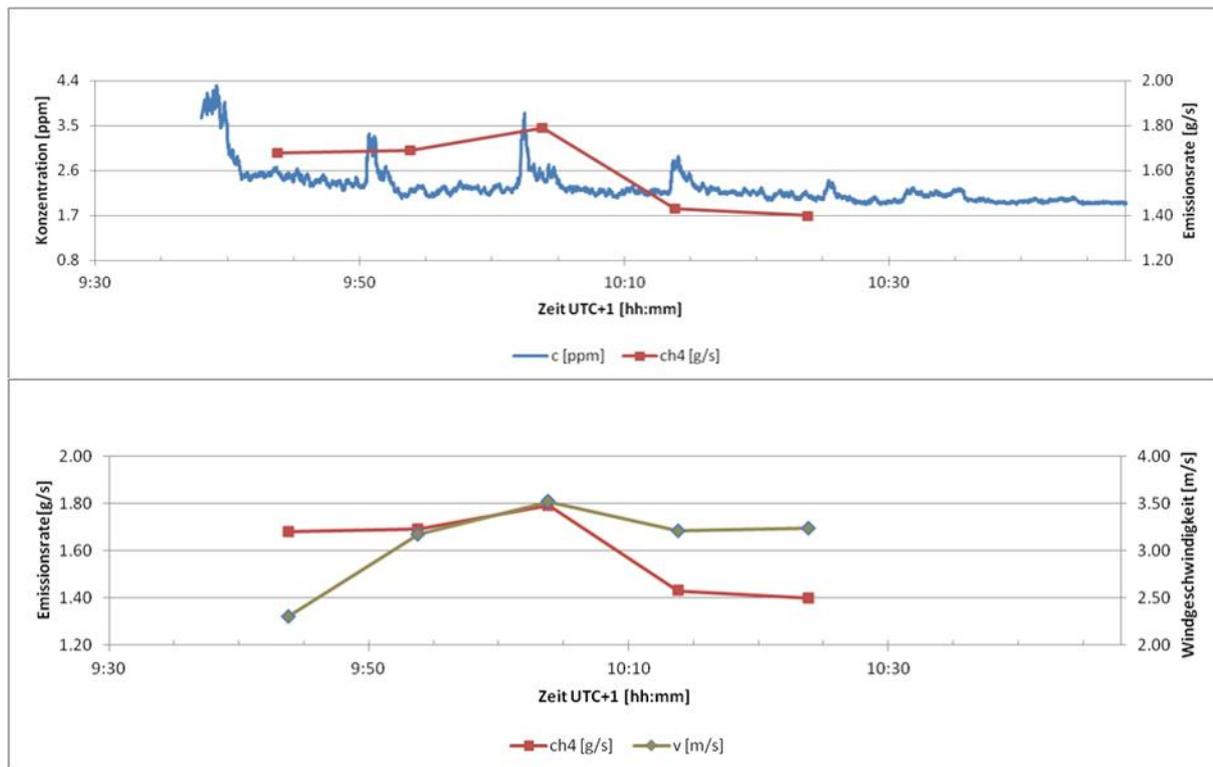
Die dritte untersuchte Bioabfallvergärungsanlage arbeitet im Nassfermentationsverfahren in zweiphasiger Prozessführung. Jährlich werden so bis zu 40.000 Mg häusliche Bioabfälle sowie Speise- und Gewerbeabfälle verwertet. Das produzierte Biogas wird in einer Aufbereitungsanlage zu Biomethan aufbereitet. [Quelle: Anlagenbetreiber]

In der Tabelle 5.5 sind wichtige Informationen zu den einzelnen Messtagen im Überblick sowie einige Bemerkungen zu Auffälligkeiten am Messtag zusammengestellt. Die Bilder geben jeweils ein Beispiel des entsprechenden Messtages für ein Resultat der Simulation der Methanemissionsrate bei regulärem Betriebszustand wieder.

**Tabelle 5.5: Informationen zu den einzelnen Messtagen der VGA C**

Messtag	17.12.2015	26.01.2016	17.02.2016
Messzeitraum	09:40 – 13:30	09:48 – 13:35	09:03 – 14:12
Wetter	trüb, bedeckt $p_0 = 943 \text{ hPa}$ $T = 11 \text{ °C}$	sonnig, wolkenlos $p_0 = 944 \text{ hPa}$ $T = - 8 \text{ °C}$	nass-kalt, gefrierend $p_0 = 931 \text{ hPa}$ $T = - 2 \text{ °C}$
Länge Messstrecke	354 m (A)	466 m (A*)	307 m (B)
Abstand Messstrecke	175 m	190 m	132 m
Hintergrund- konzentration	1,8 ppm	1,9 ppm	1,9 ppm
Bemerkungen	Schwachgasver- brennung z.T. au- ßer Betrieb	Schwachgasver- brennung ab 11:35 nicht aktiv	

In den Graphen der Abbildung 5.7 bis Abbildung 5.9 sind die Ergebnisse aus den 10-Minuten-Mittelungsintervallen innerhalb der Messzeiträume, analog zur Vergärungsanlage I, dargestellt. Im oberen Graph ist die Methanemissionsrate zusammen mit der gemessenen Konzentration aufgetragen. Im unteren ist die Emissionsrate zusammen mit der mittleren Windgeschwindigkeit abgebildet.



**Abbildung 5.7: CH<sub>4</sub>-Emissionsrate über die Zeit am 17.12.2015, mit Vergleich zur Konzentration (oben) und Windgeschwindigkeit (unten)**

Am Messtag 17.12.2015 herrschte während der Messzeit Südwestwind. Folglich wurde die Methankonzentration entlang der Messstrecke A gemessen. Deutlich zu erkennen sind an diesem Messtag signifikante Anstiege in den Methankonzentrationen. Diese sind Folge einer inaktiven Schwachgasverbrennung in der Biomethanaufbereitungsanlage. Schwankungen der angelieferten Bioabfallmengen in der Bioabfallvergärungsanlage erzeugen auch Volumenschwankungen des zur Aufbereitungsanlage gelieferten Biogases. Wird dabei die Aufbereitungsanlage mit zu wenig Biogas beschickt, fällt auch weniger Schwachgas an. Kann die Zündkammer der Schwachgasverbrennung nicht mit ausreichend Schwachgas gefüllt werden, wird die Verbrennung automatisch abgeschaltet. Das Schwachgas wird dann über ein Sicherheitsventil direkt an die Atmosphäre abgegeben. Sowohl die Betreiber der Bioabfallvergärungsanlage als auch der Biomethanaufbereitungsanlage sind dabei, eine Lösung für dieses Problem zu finden. In der Berechnung der Emissionsrate der Vergärungsanlage wurden die Konzentrationspeaks nicht berücksichtigt.

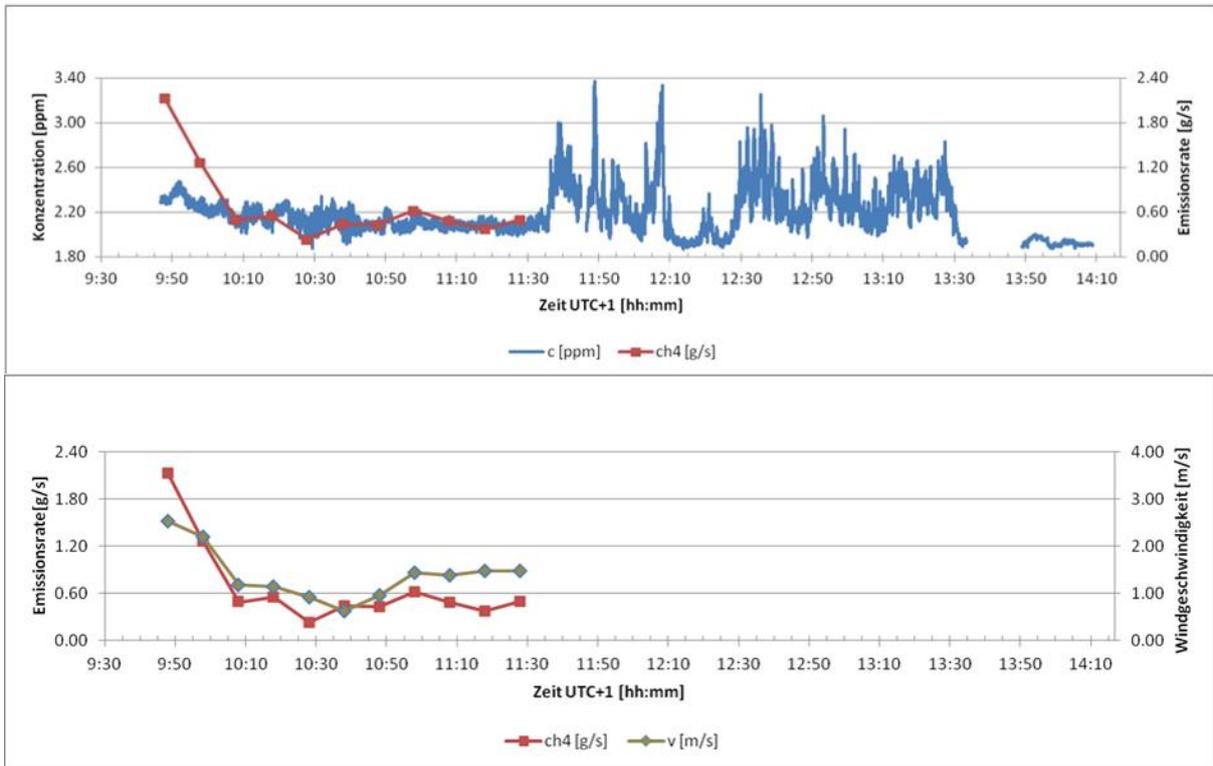


Abbildung 5.8: CH<sub>4</sub>-Emissionsrate über die Zeit am 26.01.2016, mit Vergleich zur Konzentration (oben) und Windgeschwindigkeit (unten)

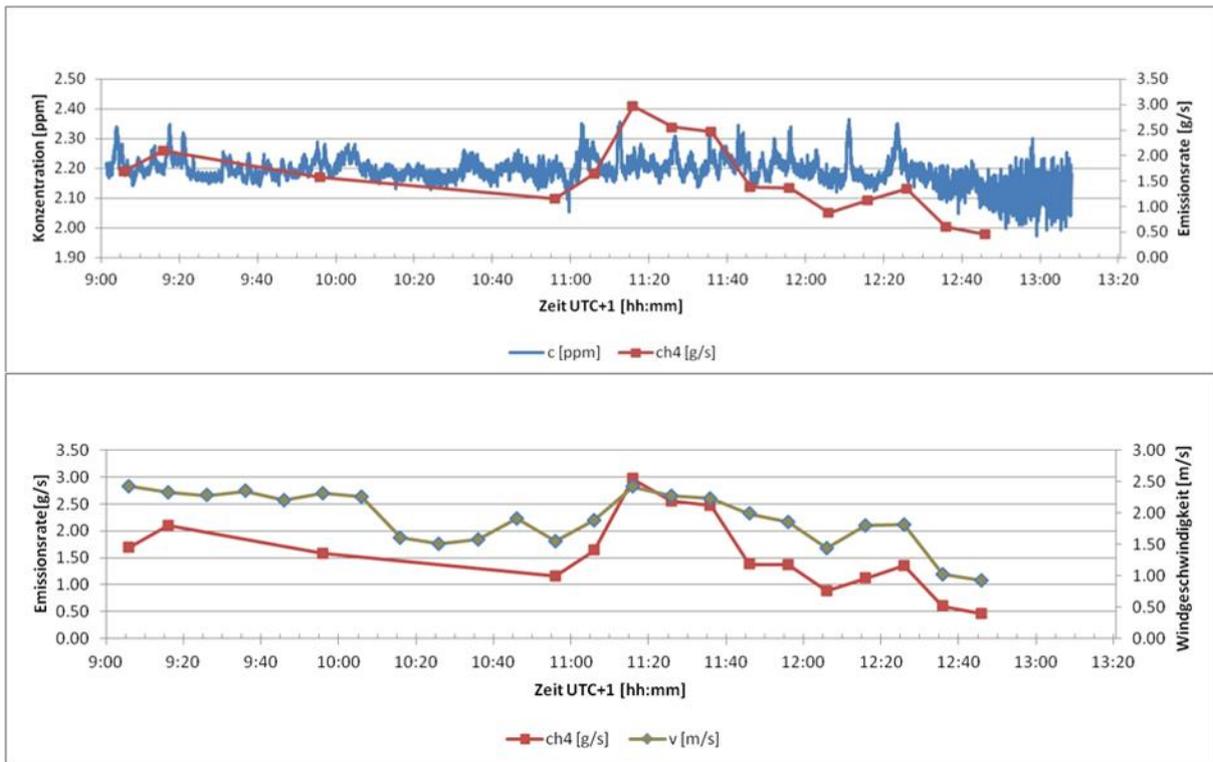


Abbildung 5.9: CH<sub>4</sub>-Emissionsrate über die Zeit am 17.02.2016, mit Vergleich zur Konzentration (oben) und Windgeschwindigkeit (unten)

Für den Messtag 26.01.2016 wurde bei Südwestwindlage die Methankonzentrationsmessung auf Messstrecke A\* erweitert. Auch an diesem Messtag hinderte ab 11:35 Uhr eine inaktive Schwachgasverbrennung die Quantifizierung der reinen Methanemissionsraten der Bioabfallvergärungsanlage. Deshalb wurden Emissionsraten nur für den davor befindlichen Zeitraum berechnet.

Am Messtag 17.02.2016 herrschten nordöstliche Windverhältnisse, die die Methankonzentrationsmessungen auf Messstrecke B implizierten. An diesem Messtag sind keine auffälligen Konzentrationsanstiege verzeichnet worden, was für einen Regelbetrieb der Biomethanaufbereitungsanlage spricht.

**Tabelle 5.6: Mittlere Emissionsraten VGA C, inkl. Emissionsfaktoren.**

Messtag	Emissionsrate [g CH <sub>4</sub> /s]	Emissionsfaktor [% c <sub>CH<sub>4</sub></sub> /P <sub>CH<sub>4</sub></sub> ]	Emissionsfaktor [g CH <sub>4</sub> /Mg Input]
17.12.15	1,6 ± 0,2	2,3	1260
21.01.16	0,7 ± 0,6	1,1	538
16.02.16	1,5 ± 0,6	2,1	1173

In Tabelle 5.6 sind die mittleren Methanemissionsraten und deren mittleren Abweichung der Gesamtmesstage im Überblick. Zusätzlich sind die jeweiligen Emissionsfaktoren, bezogen auf die produzierte Methanmenge bzw. bezogen auf den Frischmasseeintrag, angegeben. Der erste und dritte Messtag liegen bezüglich der Methanemissionsraten in derselben Größenordnung. Beim zweiten Messtag sind die Werte etwa halb so hoch wie an den anderen beiden Messtagen.

#### 5.1.4. Kompostierungsanlage A

Bei der ersten Kompostierungsanlage, an der Untersuchungen stattgefunden haben, handelt es sich um eine voll eingehauste Tafelmietenkompostierung. So werden jährlich bis zu 60.000 Mg Bioabfälle aus der Biotonne, Garten-, Park- und Friedhofsabfälle, verholzte Grünabfälle und der feste Gärrest einer Bioabfallvergärungsanlage verarbeitet. [Quelle: Anlagenbetreiber]

In der Tabelle 5.7 sind wichtige Informationen zu den einzelnen Messtagen im Überblick sowie einige Bemerkungen zu Auffälligkeiten am Messtag aufgeführt. Die

Bilder geben jeweils ein Beispiel des entsprechenden Messtages für ein Resultat der Simulation der Methanemissionsrate bei regulärem Betriebszustand wieder.

**Tabelle 5.7: Informationen zu den einzelnen Messtagen der KPA A**

Messtag	16.09.2015	01.10.2015	14.03.2016
Messzeitraum	09:42 – 12:46	09:38 – 13:44	09:05 – 13:15
Wetter	bedeckt, leichter Regen $p_0 = 1001 \text{ hPa}$ $T = 17 \text{ °C}$	sonnig, wolkenlos $p_0 = 1027 \text{ hPa}$ $T = 13 \text{ °C}$	sonnig, leicht bewölkt $p_0 = 986 \text{ hPa}$ $T = 5 \text{ °C}$
Länge Messstrecke	146 m	135 m	143 m
Abstand Messstrecke	60 m	63 m	63 m
Hintergrundkonzentration	1,9 ppm	1,9 ppm	2,0 ppm
Bemerkungen	Ruhephase	Umsetzung Miete 2 - 3	Ein-/Austrag

In den Graphen der Abbildung 5.10 bis Abbildung 5.12 sind die Ergebnisse aus den 10-Minuten-Mittelungsintervallen innerhalb der Messzeiträume, analog zu den vorangegangenen Vergärungsanlagen, dargestellt. Im oberen Graph ist die Methanemissionsrate zusammen mit der gemessenen Konzentration aufgetragen. Im unteren ist die Emissionsrate zusammen mit der mittleren Windgeschwindigkeit abgebildet.

Am Messtag 16.09.2015 herrschte mäßiger Wind aus Osten kommend, welcher für eine Messstreckenpositionierung „Messstrecke A“ geeignet war. Bis auf einen kleinen Konzentrationsanstieg gegen 10:20 Uhr war der erste Messtag an dieser Kompostierungsanlage sehr unauffällig. Die berechneten Methanemissionsraten weisen sehr kleine Werte auf. Im Verlauf des Messtages nahm der Wind immer wieder eine zu stark nördliche Komponente ein. So kam es häufig zu ungenügender Erfassung der Quellfläche und folglich zu keiner verlässlichen Datengrundlage für die Quelltermberechnung

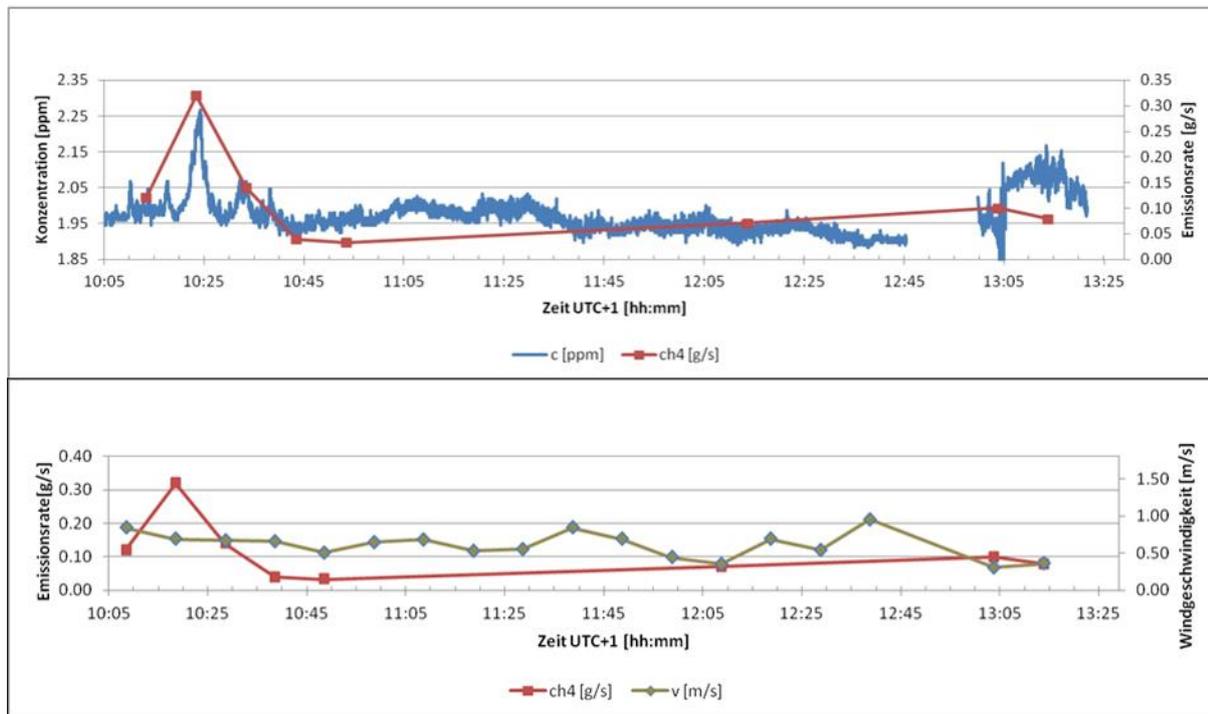


Abbildung 5.10: CH<sub>4</sub>-Emissionsrate über die Zeit am 16.09.2015, mit Vergleich zur Konzentration (oben) und Windgeschwindigkeit (unten)

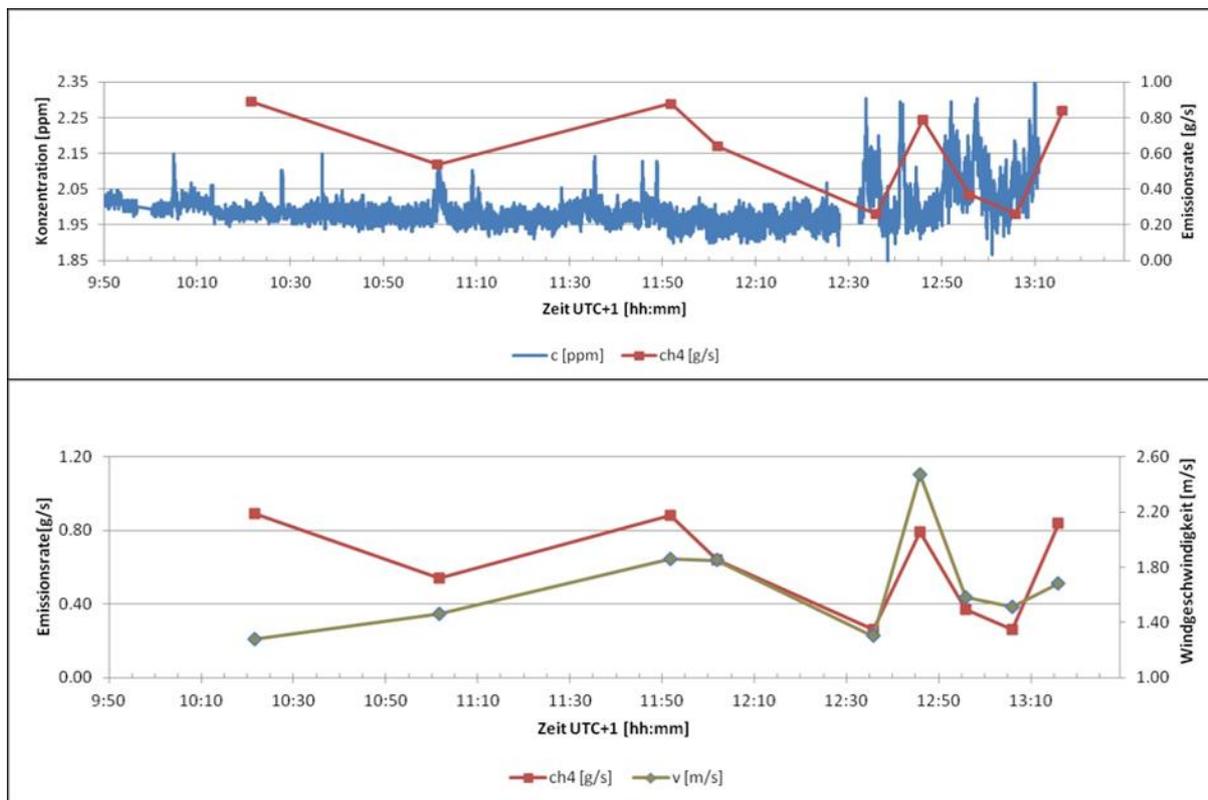
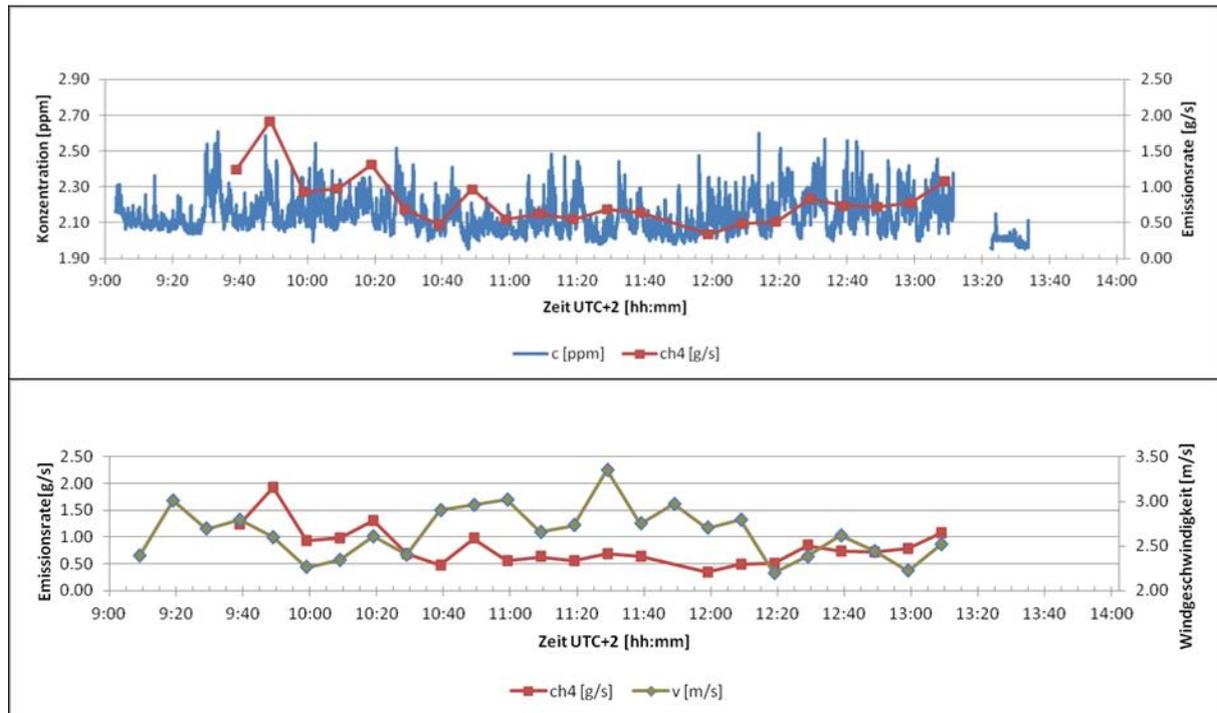


Abbildung 5.11: CH<sub>4</sub>-Emissionsrate über die Zeit am 01.10.2015, mit Vergleich zur Konzentration (oben) und Windgeschwindigkeit (unten)

Der Messtag 01.10.2015 wurde entsprechend den vorherrschenden Ostwinden gewählt, um die Messstrecke A nutzen zu können. Wie schon am vorangegangenen Messtag ist die Ergebnisdichte aufgrund der nördlichen Windkomponente reduziert worden. Auffällig sind die erhöhten Methanemissionsraten im Vergleich zum vorherigen Messtag.



**Abbildung 5.12: CH<sub>4</sub>-Emissionsrate über die Zeit am 14.03.2016, mit Vergleich zur Konzentration (oben) und Windgeschwindigkeit (unten)**

Am dritten Messtag (14.03.2016) herrschten sehr stabil Ostwindverhältnisse. Die Messstrecke A lieferte im Vergleich zu den vorherigen Messtagen eine zufriedenstellende Ergebnisquantität. Insgesamt liegen die Methanemissionsraten nochmals höher als an den beiden vorherigen Messtagen. Vereinzelt treten einige Peaks in den Emissionsraten auf.

In Tabelle 5.8 sind die mittleren Methanemissionsraten und deren mittlere Abweichung der Gesamtmesstage im Überblick aufgeführt. Zusätzlich ist der jeweilige Emissionsfaktor, bezogen auf den Frischmasseeintrag, angegeben.

Die Verarbeitung des frischen Bioabfalls bis zum fertigen Kompost dauert in der Regel 7 bis 8 Wochen. Während dieser Zeit durchläuft das Material mehrere Rottegrade und wird dabei belüftet, mehrmals umgelagert und bewässert. Am Messtag 14.03.16 wurden die höchsten Werte verzeichnet. An diesem Tag wurde während der Messphase der frische Kompost aus der Rottehalle ausgetragen und gleichzeitig frischer Bioabfall eingetragen. Ab der Anlieferung verbleibt der Bioabfall bis zum Eintrag unbelüftet in der Annahmehalle. Frischer Bioabfall verfügt über ein verhältnismäßig ho-

hes Methanbildungspotential. Wird dieser nun durch den Radlader verladen, entweicht das Methan und gelangt über die Hallenabsaugung in die Atmosphäre, da Methan in Biofiltern kaum abgebaut wird.

**Tabelle 5.8: Mittlere Emissionsraten KPA A, inkl. Emissionsfaktoren**

Messtag	Emissionsrate [g CH <sub>4</sub> /s]	Emissionsfaktor [% C <sub>CH<sub>4</sub></sub> /P <sub>CH<sub>4</sub></sub> ]	Emissionsfaktor [g CH <sub>4</sub> /Mg Input]
16.09.15	0,1 ± 0,1	-	59
01.10.15	0,6 ± 0,4	-	319
14.03.16	0,8 ± 0,4	-	428

In den nachfolgenden Rotteschritten ist das Auftreten von anaeroben Bereichen und damit die Bildung Methan in der Miete vor allem in den Bewässerungsperioden der Ruhephasen begünstigt. In den aeroben Bereichen der Miete kann ein Großteil des Methans wieder aerobisiert werden. Durch das Umsetzen wird die Aerobisierung unterbrochen und das Methan entweicht in die Rottehalle. Im Voranschreiten des Rotteprozesses (vom Bioabfall zu Kompost) wird das organische Material reduziert. Demzufolge nimmt auch das Methanbildungspotential und damit die emittierte Menge an Methan beim jeweiligen Umsetzschritt ab.

Am Messtag 01.10.15 wurde im Messzeitraum das Material von Miete 2 auf 3 umgesetzt. Zu diesem Zeitpunkt befindet sich das Material noch in der Hauptrottephase. Der Gehalt an biologischer Restabbauaktivität ist noch hoch. Die Emissionsrate an diesem Messtag ist im Vergleich zu einem Messtag, an dem frischer Bioabfall angeliefert wird, geringer.

Am Messtag 16.09.16 wurden die geringsten Methanemissionsraten aufgezeichnet. Der Messzeitraum dieses Tages lag zwischen zwei Umsetzzyklen. In dieser Zeit befindet sich das Material aller Rottestufen in Ruhe. Methan wird ausreichend in den Mieten aerobisiert und entweicht während dieser Zeit nur mäßig.

### 5.1.5. Kompostierungsanlage B

Die zweite untersuchte Kompostierungsanlage ist eine vollständig gekapselte Tafelmietenkompostierung. Jährlich werden dort etwa 35.000 Mg Bioabfälle aus der ge-

trennten häuslichen Sammlung sowie Garten-, Park- und Friedhofsabfälle und Baum- und Strauchschnitt verarbeitet. [Quelle: Anlagenbetreiber]

In der Tabelle 5.9 sind wichtige Informationen zu den einzelnen Messtagen im Überblick sowie einige Bemerkungen zu Auffälligkeiten am Messtag aufgeführt. Die Bilder geben jeweils ein Beispiel des entsprechenden Messtages für ein Resultat der Simulation der Methanemissionsrate bei regulärem Betriebszustand wieder.

**Tabelle 5.9: Informationen zu den einzelnen Messtagen der KPA B**

Messtag	02.12.2015	27.01.2016	02.03.2016
Messzeitraum	10:04 – 14:04	09:50 – 13:50	09:04 – 13:04
Wetter	bedeckt $p_0 = 1030 \text{ hPa}$ $T = 11 \text{ °C}$	bedeckt $p_0 = 1010 \text{ hPa}$ $T = 13 \text{ °C}$	bedeckt, leichter Regen $p_0 = 990 \text{ hPa}$ $T = 8 \text{ °C}$
Länge Messstrecke	275 m	297 m	341 m
Abstand Messstrecke	100 m	100 m	100 m
Hintergrundkonzentration	1,8 ppm	1,8 ppm	1,8 ppm

Die prognostizierte und die tatsächliche Windrichtung weichen an allen drei Messtagen von einander ab. Der angrenzende Fluss bildet ein kleinmeteorologisches Eigenverhalten aus. Das Flussbett wirkt wie ein Windkanal, in der der Wind entlang weht. So war es nicht möglich, die gemessenen Konzentrationen eindeutig der Kompostierungsanlage zuzuordnen.

### 5.1.6. Weitere Kompostierungsanlagen

Die Findung einer weiteren Kompostierungsanlage gestaltete sich als sehr schwer. Bei der Vorauswahl sind viele Anlagen aufgrund ungeeigneter Messstreckenpositio-

nierung oder aufgrund der Anlagengröße ausgeschlossen worden. Andere Anlagen wurden aufgrund direkter Sekundärquellen im Nahbereich der Anlage ausgeschlossen. Schlussendlich war die Auswahl auf die zwei oben aufgeführten Anlagen begrenzt.

## 5.2. Bewertung der Methanemissionen aus den Anlagen

Die ermittelten Quellstärken werden mit Literaturwerten (Tabelle 5.10) und eigenen Messwerten aus einem vorangegangenen Forschungsprojekt (Tabelle 5.13) verglichen. Damit kann ein Ranking von Anlagen zur Behandlung von Bioabfall auf Basis der Klimarelevanz erstellt werden. Unter Berücksichtigung steht dabei der Bezug der Emissionen zur jeweils vorhandenen Anlagentechnik.

**Tabelle 5.10: Emissionsfaktoren aus der Literatur**

		Emissionsfaktor [g CH <sub>4</sub> /Mg Input]	Emissionsfaktor [g NH <sub>3</sub> /Mg Input]	Emissionsfaktor [g N <sub>2</sub> O /Mg Input]
IPCC [4]	VGA	0 - 8.000 (800)	-	vernachlässigbar
	KPA	30 - 8.000 (4000)	-	60 - 600 (240)
Cuhls et al. [5]	VGA o.NR	63 - 3.200 (910)	2,6 - 10.000 (780)	0,84 - 69 (15)
	VGA + NR g	190 - 5.600 (2.600)	20 - 600 (140)	25 - 350 (66)
	geschl. KPA	50 - 11000 (2500)	3,4 - 93 (32)	7,7 - 300 (77)

Zum Vergleich zu den in Tabelle 5.10 angeführten Werte technischer Anlagen ist die Kuh eine natürlich vorkommende Methanquelle. Unter der Annahme, dass sie jährlich 100 kg CH<sub>4</sub> ausstößt und täglich etwa 50 kg Frischmasse zu sich nimmt, hat eine Kuh einen Emissionsfaktor von rund 5500 g CH<sub>4</sub>/Mg Input. Die im IPCC [4] vorgeschlagenen Richtwerte und die in Cuhls et al. [5] ermittelten Mittelwerte für Methanemissionsfaktoren bei Bioabfallbehandlungsanlagen sind damit niedriger als die einer Kuh.

**Tabelle 5.11: Wichtige Betriebsmerkmale der untersuchten Anlagen**

	Verfahren Vergärung bzw. Kompostierung	Verarbeitungs- kapazität [Mg Input /a]	Volumen Fermenter [m³]	Temperatur Fermenter	Verweilzeit Fermenter	Biogas- produktion [Nm³/a]	fl. Gärrest Abdeckung	KPA bzw. Nachrotte	Belüftung Miete	Verweilzeit Kompost	Abluftreinigung
VGA A	Pfropfenstrom	40.000	2 x 1.300	55 °C (thermophil)	18 d	$6,4 \cdot 10^6$	2 x nicht gasdicht	geschl. Nachrotte	5 x Druckbelüftung + 9 x ohne	2 - 4 Wochen	offener Biofilter
VGA B	Pfropfenstrom	18.000	1 x 1.400	55 °C (thermophil)	20 d	$2,5 \cdot 10^6$	1 x gasdicht	geschl. Nachrotte	6 x Druckbelüftung	4 - 6 Wochen	geschl. Biofilter
VGA C	Nass	40.000	3 x 2.300 + 1x 3.000	38 °C (mesophil)	21+ 7 d	$4,3 \cdot 10^6$	3 x nicht gasdicht	keine vorhanden	-	-	offener Biofilter
KPA A	Tafelmiete	60.000	-	-	-	-	-	geschl. Kompostierung	Saugbelüftung	7 - 8 Wochen	geschl. Biofilter
KPA B	Tafelmiete	35.000	-	-	-	-	-	geschl. Kompostierung	Druckbelüftung	10 Wochen	geschl. Biofilter

In Tabelle 5.11 sind die wichtigsten Betriebsmerkmale der untersuchten Anlagen aufgeführt. Die Tabelle gibt einen Überblick über die jeweils vorliegende Anlagentechnik und einige Prozessdetails, die zur Einteilung und Beurteilung der Klimawirksamkeit eventuell von Relevanz sein könnten.

**Tabelle 5.12: Mittlere Emissionsraten aller Anlagen, inkl. Emissionsfaktoren**

Anlage	Mittlere Emissionsrate [g CH <sub>4</sub> /s]	Emissionsfaktor [% C <sub>CH<sub>4</sub></sub> /P <sub>CH<sub>4</sub></sub> ]	Emissionsfaktor [g CH <sub>4</sub> /Mg Input]
VGA A	0,2 ± 0,2	0,3	191
VGA B	1,0 ± 0,3	3,4	1796
VGA C	1,3 ± 0,7	1,8	988
KPA A	0,3 ± 0,2	-	136
KPA B	-	-	-

In In Tabelle 5.11 sind die wichtigsten Betriebsmerkmale der untersuchten Anlagen aufgeführt. Die Tabelle gibt einen Überblick über die jeweils vorliegende Anlagentechnik und einige Prozessdetails, die zur Einteilung und Beurteilung der Klimawirksamkeit eventuell von Relevanz sein könnten.

Tabelle 5.12 sind die mittleren Methanemissionsraten aus allen Messtagen der Bioabfallvergärungsanlagen und Kompostierungsanlagen angegeben. Im direkten Vergleich der Emissionsfaktoren aller Anlagen, weist VGA A die geringsten Werte auf.

Alle drei untersuchten Bioabfallvergärungsanlagen werden kontinuierlich beschickt. Somit laufen auch die nachfolgenden Prozessschritte nahezu kontinuierlich ab. Das bedeutet, dass prozessspezifisch immer eine gleichbleibende Grundmethanemission vorliegt. Diese Grundemissionsrate ist dann einzig von äußeren Einflüssen geprägt, z.B. Bioabfallzusammensetzung, Störstoffe oder sonstige prozessbeeinflussende Faktoren. Wartungsarbeiten und Störfälle wurden in der Berechnung der mittleren Methanemissionsraten der einzelnen Anlagen nicht berücksichtigt.

Die untersuchten Kompostierungstechniken weisen noch eine zusätzlich Komponente, die die Beurteilung erschwert, auf. Die Kompostierung ist ein diskontinuierlicher Prozess. Ein- und Austrag erfolgt im Abstand von mehreren Tagen und zwischen durch wird das Material stufenweise umgesetzt. Während der Umwandlung von fri-

schem Bioabfall zu fertigem Kompost, durchläuft das Material mehrere Rottestufen. Je nach Rottegrad entstehen so bei der Umsetzung unterschiedlich hohe Emissionen. Für die Ermittlung der mittleren Methanemissionsrate der KPA A wurden deshalb die Ergebnisse für einen kompletten Umsetzzyklus bewertet. Das Ergebnis von Messtag I (Ruhephase) wurde dabei mit 50 % gewichtet. Die Umsetzung der kompletten Mietenformation wurde auch mit 50 % gewichtet. Dafür wurde der Mittelwert aus allen neun Umsetzschritten ermittelt. Für die nicht untersuchten Abschnitte des Umsetzzykluses wurden die Ergebnisse über Messtag II und Messtag III linear extrapoliert.

**Tabelle 5.13: Mittlere Emissionsraten NawaRo-Anlagen aus QuantiSchluMBF, inkl. Emissionsfaktoren**

Anlage	Mittlere Emissionsrate [g CH <sub>4</sub> /s]	Emissionsfaktor [% C <sub>CH<sub>4</sub></sub> /P <sub>CH<sub>4</sub></sub> ]	Emissionsfaktor [g CH <sub>4</sub> /Mg Input]
BGA I	0,6 ± 0,4	0,6	584
BGA II	0,3 ± 0,2	1,3	864
BGA III	1,4 ± 0,7	3,0	4032

Im Forschungsprojekt „QuantiSchluMBF“ [1] wurden die Methanemissionsraten von NawaRo-Anlagen untersucht. In Tabelle 5.13 sind die Ergebnisse der untersuchten Anlagen aufgeführt. Dabei konnte eine eindeutige Klassifizierung der Anlagen durchgeführt werden. Die einflussreichste Größe auf die Höhe der emittierten Methanfracht ist die Abdeckungsart des flüssigen Gärrestes. Offene Gärrestlager waren bei den untersuchten NawaRo-Anlagen emissionsseitig am negativsten gewertet worden (BGA III). Auf einem mittleren Emissionsniveau befand sich die Anlage mit geschlossener, aber nicht gasdichten Gärrestabdeckung (BGA II). Die geringsten Methanemissionsraten konnten an der Biogasanlage mit gasdicht verschlossenen Gärrestbehältern ermittelt werden (BGA I).

Eine so „klassische“ Einteilung konnte an den Bioabfallvergärungsanlagen nicht verifiziert werden. An der VGA A, die zwei geschlossene aber nicht gasdicht verschlossene Gärrestlager besitzt, wurden die geringsten Emissionsraten bestimmt. Die VGA B besitzt einen gasdichten Gärrestbehälter, weist aber deutlich höhere Methanemissionsraten auf. Aufgrund der Separation des Gärrests in fester und flüssiger Phase verbleibt der größere Anteil an Organik in der Festphase. Der Einfluss der Flüssiggärrestabdeckung auf die Methanemissionen ist folglich geringer als bei NawaRo-Anlagen. Damit hängt die Höhe der emittierten Methanfracht noch von weite-

ren Betriebsmerkmalen ab. Dazu zählen unter anderem die Weiterbehandlung der festen Gärreste (Aerobisierungsverfahren, Kompostierungsbedingungen etc.), die Ablufferfassung und -reinigung aber auch die Eintragsmengen und -zusammensetzung der Frischmasse. Die Vielzahl an unterschiedlichen Betriebsparametern, die zudem unterschiedliche Gewichtungen haben können, erschwert die Erstellung einer Rangliste deutlich. Eine Einteilung der Klimarelevanz soll hier dennoch erfolgen.

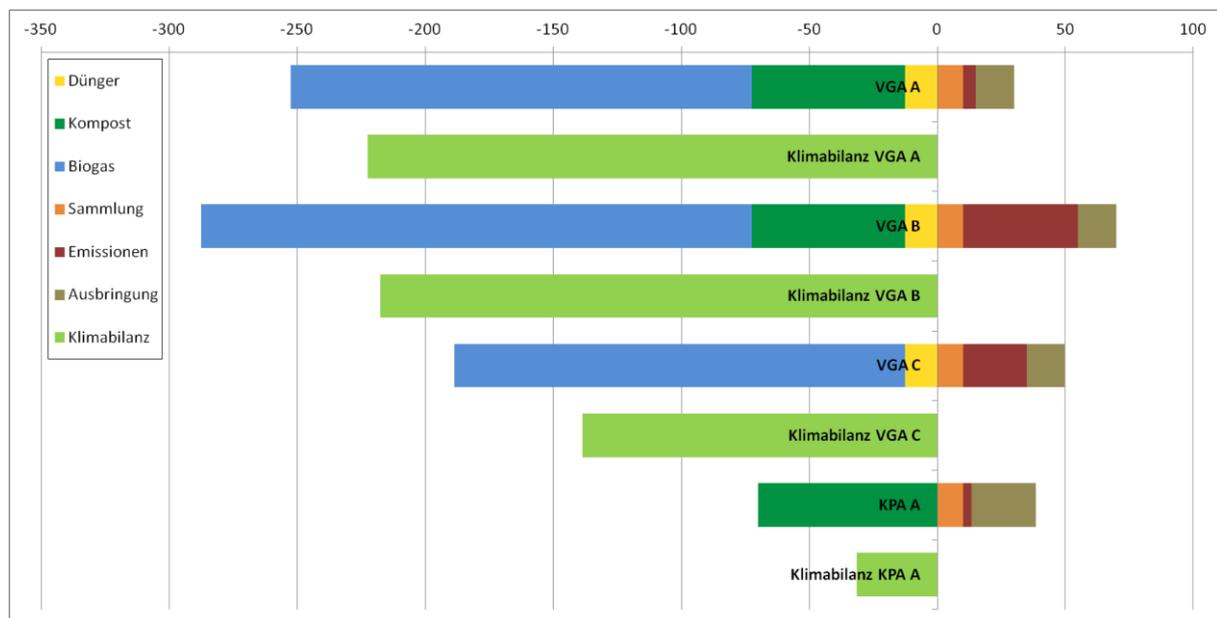
Der IPCC [4] gibt Emissionsfaktoren für den aeroben Abbau von organischem Material an (siehe Tabelle 5.10). Bezogen auf den Frischmasseeintrag liegen die Emissionsfaktoren bei der Kompostierung in einem Wertebereich zwischen 30 - 8.000 g CH<sub>4</sub>/Mg Input. Der Richtwert liegt hier bei 4.000 g CH<sub>4</sub>/Mg Input. Die Methanemissionsraten der untersuchten Kompostierungsanlage befinden sich diesbezüglich nahe dem Minimalwert. KPA A kann so als Bioabfallbehandlungsanlage mit „minimal“ klimarelevanten Methanemissionen eingestuft werden.

Des Weiteren gibt der IPCC [4] Emissionsfaktoren für den anaeroben Abbau von organischem Material an. Bezogen auf die produzierte Methanmenge liegen die Werte zwischen 0 - 10%. „0“ bezieht sich dabei auf eine 100-prozentige Erfassung und Verwertung des produzierten Methans. Als Richtwert wird 5 % angegeben. Alle Emissionsfaktoren der untersuchten Bioabfallvergärungsanlagen, bezüglich der Methanproduktionsrate, liegen zum Teil deutlich unterhalb des angegebenen Richtwertes. Für die Emissionsfaktoren, bezogen auf den Frischmasseeintrag, liegt der vom IPCC angegebene Wertebereich zwischen 0 - 8.000 g CH<sub>4</sub>/Mg Input, bzw. der Richtwert bei 800 g CH<sub>4</sub>/Mg Input. Dieser Wert bezieht sich alleine auf die anaerobe Behandlung. Eine etwaige Nachkompostierung des festen Gärrestes wird nicht berücksichtigt. Der auf den Frischmasseeintrag bezogene Emissionsfaktor der VGA C liegt nahe dem IPCC-Richtwert. VGA C, die keine Nachkompostierung des festen Gärrestes vornimmt, wurde somit als Anlage mit „moderat“ klimarelevanten Methanemissionen eingestuft. Aus dem Mittelwert der Richtwerte für Kompostierung und anaerobe Behandlung ergibt sich ein gemittelter Richtwert für die Vergärung mit anschließender Nachkompostierung von 2.400 g CH<sub>4</sub>/Mg Input. Der Emissionsfaktor der VGA A liegt deutlich unterhalb des mittleren Richtwertes, welche somit als Anlage mit „minimal“ klimarelevanten Methanemissionen eingestuft werden kann. Der berechnete Emissionsfaktor, bezogen auf den Frischmasseeintrag, der VGA B liegt unterhalb des gemittelten Richtwertes aus dem IPCC. Die Methanemissionen dieser Bioabfallvergärungsanlage wurden somit als „gering“ klimarelevant eingestuft.

Auch Cuhls et al. [5] haben im Auftrag des Umweltbundesamtes eine Einschätzung von Bioabfallbehandlungsanlagen vorgenommen und Emissionsfaktoren bezüglich des Frischmasseeintrags veröffentlicht (siehe Tabelle 5.10). Dabei werden die Anlagen bezüglich der verschiedenen Techniken aufgeteilt. Für Vergärungsanlagen mit geschlossener Nachrotte liegt der Wertebereich bei 190 - 5.600 g CH<sub>4</sub>/Mg Input und der Mittelwert bei 2.600 g CH<sub>4</sub>/Mg Input. Die mittlere Methanemissionsrate der

VGA A befindet sich auch hier nahe dem Minimalwert des angegebenen Wertebereiches. Auch die Emissionsraten von VGA B liegen diesmal deutlich unterhalb des angegebenen Mittelwertes. Für Vergärungsanlagen ohne direkt anschließende Kompostierung haben die Methanemissionsfaktoren einen Wertebereich von 63 - 3.200 g CH<sub>4</sub>/Mg Input bzw. einen Mittelwert von 910 g CH<sub>4</sub>/Mg Input. Die an VGA C ermittelten Emissionsraten sind in dieser Spezifikation gleich hoch wie der Mittelwert. Diese Bioabfallvergärungsanlage kann, bezüglich des Verfahrens, am ehesten mit den NawaRo-Anlagen aus Tabelle 5.13 verglichen werden. In der Kategorie „Nassfermentation, nicht gasdichte Gärrestabdeckung“, sind die Emissionsfaktoren der VGA C nahezu identisch mit denen der BGA II.

Für geschlossene Kompostierungsanlagen, die als Endprodukt Fertigkompost produzieren, ermittelten Cuhls et al. einen Wertebereich von 50 - 11.000 g CH<sub>4</sub>/Mg Input. Der Mittelwert lag dabei bei 2.500 g CH<sub>4</sub>/Mg Input. Die extrapolierte mittlere Methanemissionsrate der KPA A liegt auch hier wieder nahe dem angegebenen Minimum.



**Abbildung 5.13: Klimabilanz der Anlagen in [kg CO<sub>2</sub>-Äq / Mg Input], Einsparungen (-) und Belastungen (+)**

In Abbildung 5.13 ist die Klimabilanz, basierend auf den Methanemissionen der untersuchten Bioabfallbehandlungsanlagen, graphisch dargestellt. Die CO<sub>2</sub>-Äquivalente für die Belastung (positive Klimabelastung) durch Emissionen der Anlagen wurden aus den mittleren Methanemissionsfaktoren berechnet gemäß dem GWP nach IPCC [11]. Die Werte für die Belastungen aus Sammlung und Ausbringung und die Werte für die Einsparung durch Kompost- und Dünergewinnung (negative Klimabelastung) entstammen der ökologischen Bewertung aus Kern et al. [12]. Die CO<sub>2</sub>-Äquivalente für die Gutschrift durch die Biogasgewinnung wurden mittels online verfügbaren CO<sub>2</sub>-Rechner [13] berechnet. Für VGA A und VGA B wurde die Stromeinspeisung dem deutschem Strom-Mix-Verbrauch und die Wärmegewinnung dem Fernwärme-

verbrauch gleichgesetzt. Für VGA C wurde die Biomethaneinspeisung analog zum Erdgasverbrauch berechnet. Aufgrund der hohen Gutschrift aus den Biogaserträgen der Vergärungsanlagen können im Vergleich zu Kompostierungsanlagen pro Tonne verwertetem Bioabfall deutlich mehr CO<sub>2</sub>-Äquivalente eingespart werden. Die untersuchten Bioabfallvergärungsanlagen weisen mit etwa 200 kg eingesparten CO<sub>2</sub> pro Mg Input im Vergleich untereinander eine ähnliche Klimabilanz auf.

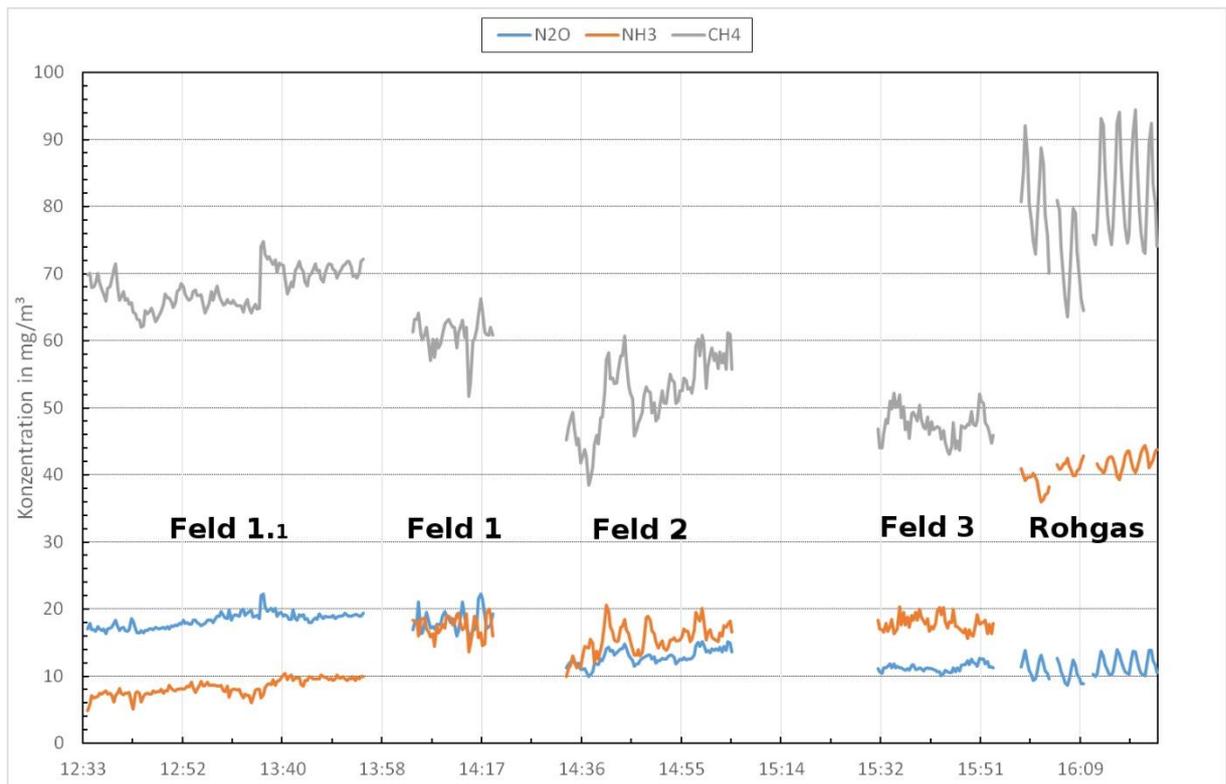
### **5.3. Weitere klimarelevanter Gase**

Nachdem an den zu untersuchenden Anlagen auch aktive, gefasste Emissionsquellen vorhanden sind, kann über deren Quantifizierung eine Plausibilitätsabschätzung der modellierten Gesamtquellstärke und eine Bestimmung der Emission weiterer klimarelevanter Gas, insbesondere Lachgas, vorgenommen werden.

Die Konzentrationsmessungen an den aktiven Punktquellen wurden daher mit einem portablen FT-IR (Fourier-Transformations-Infrarotspektrometer) am 01.10.2015 am Kompostwerk Kirchheim durchgeführt. Wie schon im Abschnitt 5.1.4 auf Seite 28 erläutert, wird die gesammelte Abluft über Biofilter gereinigt und anschließend in die Atmosphäre abgegeben. Dabei wird kein konventioneller Kamin verwendet, sondern ein Kühlmodul. Die Abluft wird mit Hilfe von mehreren Ventilatoren quasi senkrecht nach oben beschleunigt. Dabei wird die Abluft, durch das Ansaugen von Umgebungsluft, gleichzeitig gekühlt und verdünnt. Die FT-IR Messungen wurden direkt oberhalb des Biofilters, an verschiedenen Teilbereichen, durchgeführt. Mit diesem System wurden Lachgas, Ammoniak und Methan zeitgleich analysiert.

Die Ergebnisse sind Abbildung 5.14 graphisch dargestellt. Im letzten Messabschnitt wurde das Rohgas analysiert, bevor es durch den Biofilter geleitet wird. Der Biofilter besteht aus drei Teilsegmenten, auf die das Rohgas gleichmäßig verteilt wird. Zu Beginn der FT-IR Messungen wurde auf Feld 1 die Probenluft unter einer Haube gesammelt (Messabschnitt „Feld 1.1“). Danach wurde nacheinander nur noch eine Mischprobe der Abluft aus „Feld 1“, „Feld 2“ und „Feld 3“ analysiert.

Zusätzlich zu der eigentlichen Fernerkundung der emittierten Gesamtfracht der Anlage, konnte die Methanfracht der gefassten Abluft direkt oberhalb des Kühlmoduls mit Hilfe eines zweiten TDLAS-Gerätes bestimmt werden.



**Abbildung 5.14: Konzentrationen weiterer Abgaskomponenten an KPA A**

**Tabelle 5.14: Mittlere Frachten aus Fernerkundung, Reingas und Rohgas der KPA A vom 01.10.2015**

	Mittlere Fracht [g/s] Fernmessung	Mittlere Fracht [g/s] Kühlmodul	Mittlere Fracht [g/s] Biofilter	Mittlere Fracht [g/s] Rohgas
CH <sub>4</sub>	0,6 ± 0,3	1,1 ± 0,2	1,1 ± 0,1	1,6
NH <sub>3</sub>			0,3 ± 0,1	0,8
N <sub>2</sub> O			0,3 ± 0,1	0,2

In der Tabelle 5.14 sind die berechneten Frachten aus der Fernerkundung, dem Reingas und dem Rohgas der KPA A zum Vergleich aufgeführt. Mittels Fernerkundung wird in dem hier verwendeten Aufbau die von der Anlage gesamte emittierte Methanfracht ermittelt. Die gesammelte Abluft der Kompostierungsanlage wird gefasst, über einen Biofilter geleitet und über das Kühlmodul in die Atmosphäre abgegeben. Die nach dem Kühlmodul auftretenden Methanfrachten sollten demnach maximal der Gesamtfracht der Anlage entsprechen, falls keine diffusen Austritte erfol-

gen. Allerdings sind diese etwa doppelt so groß wie die, die durch die Rückrechnung ermittelt wurden. Das bedeutet, dass an der Fernmessstrecke nur etwa 50 % der Emissionsfahne der Anlage gemessen wurde. Durch die Ventilatoren wird die Abluft so stark nach oben abgeleitet, dass sie zum Teil über die Messstrecke hinweg weht. Die direkt über dem Biofilter ermittelte Methanfracht ist identisch zu der, die über dem Kühlmodul bestimmt wurde. Da bei der Verdünnung mit Umgebungsluft gleichzeitig der Volumenstrom erhöht wird, bleibt infolgedessen die emittierte Fracht gleich.

Des Weiteren sind in Tabelle 5.14 die über Feld 1 bis Feld 3 gemittelten Emissionsraten von Ammoniak und Lachgas aufgeführt. Beides beträgt etwa ein Viertel der Methanemissionsrate. Da das Treibhauspotential von Lachgas aber etwa zwölfmal höher ist als das von Methan ( $GWP_{CH_4}=25$ ,  $GWP_{N_2O}=298$ ), ist die Lachgasemissionsrate bedenklich. Die Klimagutschrift aus Abbildung 5.13 würde sich somit für die KPA A um 42 kg CO<sub>2</sub>-Äq / Mg Input verringern und die Anlage gelte dann als klimaneutral. Der IPCC [4] schlägt auch Emissionsfaktoren für Lachgas vor (siehe Tabelle 5.10). Die bei der Kompostierung von organischem Material auftretenden Lachgasemissionen liegen zwischen 60 - 600 g N<sub>2</sub>O/Mg Input bzw. einen Richtwert von 240 g N<sub>2</sub>O/Mg Input. Der gemessene Wert an der KPA A beträgt 141 g N<sub>2</sub>O/Mg Input und liegt somit noch unterhalb des angegebenen Richtwerts. In Cuhls et al. [5] sind Emissionsfaktoren für Ammoniak und Lachgas ermittelt worden. Für geschlossene Kompostierungsanlagen liegt der Wertebereich für Lachgas zwischen 7,7 - 300 g N<sub>2</sub>O/Mg Input bzw. der Mittelwert bei 77 g N<sub>2</sub>O/Mg Input. Im Vergleich zu den von Cuhls et al. untersuchten Anlagen, zählt die KPA A bezüglich des Lachgases zu den emissionsstärkeren Anlagen. Bei Ammoniak liegt der Wertebereich zwischen 3,4 - 93 g NH<sub>3</sub>/Mg Input bzw. der Mittelwertwert bei 32 g NH<sub>3</sub>/Mg Input. Der an der KPA A gemessene Wert beträgt 169 g NH<sub>3</sub>/Mg Input, was etwa das Doppelte des Maximums entspricht. Hier könnte die Ursache in der Verarbeitung des Gärrests einer Vergärungsanlage liegen.

## 6. Abschlussbemerkungen und Ausblick

An Vergärungsanlagen wäre es durchaus sinnvoll, die einzelnen Emissionsquellen zu identifizieren. Damit könnte untersucht werden, z.B. in wie weit sich die Anlieferung des Bioabfalls oder die Abholung des flüssigen Gärrestes auf die emittierte Methanfracht auswirken. Das kann allerdings nur mit erweiterter Messausrüstung umgesetzt werden. Für eine Abschätzung der Klimarelevanz von Bioabfallbehandlungsanlagen ist die Quantifizierung der Gesamtmethanemissionen der Anlage und somit eine Konzentrationsmessung ausreichend.

Bei der Kompostierung wäre es interessant zu verfolgen, wie das Umsetzen der entsprechenden Rottephasen (Frischmasse vs. Kompost) Einfluss auf die emittierte Methanfracht nimmt. Für diesen Bericht konnte dies nur extrapoliert werden. Dafür müsste man allerdings in der Lage sein, während eines kompletten Umsetzzyklus von mehreren Tagen messen zu können.

Auch die Technik der Abluftbehandlung der Bioabfallbehandlungsanlagen wäre eine weitere mögliche Untersuchungsgrundlage. Offene Biofilter stellen eine Flächenquelle innerhalb der Gesamtanlage dar. Um diesen separat bemessen zu können, müsste auch hier die Messausrüstung, wie oben erwähnt, erweitert werden. Bei geschlossenen Biofiltern, bei denen meistens die Abluft über Kamine in die Umgebung entlassen wird, handelt es sich um Punktquellen. Diese sind zum Teil höher als 20 m, so dass man laut Flesch et al. [7] die Konzentrationen in 200 m Entfernung messen müsste. Eine solche Messdistanz ist an den Standorten meist nicht gegeben. Zusätzlich wäre die Durchmischung der emittierten Methanfracht mit Umgebungsluft auf solch einer Entfernung schon so ausgeprägt, dass die gemessene Methankonzentration sich nicht mehr eindeutig von der Hintergrundkonzentration unterscheiden ließe. Die Ergebnisse in diesem Bericht spiegeln z. T. nur die diffusen Methanemissionen wieder. Da es sich bei Kaminen aber um gefasste Quellen handelt, könnten diese mit einem FID oder einem FT-IR separat bestimmt werden.

Bisher gibt es keine einheitliche Richtlinie, wie die Gesamtmethanemissionen aus Behandlungsanlagen für organisches Material zu bestimmen sind. Das ISWA, Uni Stuttgart, ist seit März 2016 in dem EU-Projekt „MetHarmo“ (Förderkennzeichen: 22405015; ERA-NET) beteiligt, das sich mit einer europaweiten Vereinheitlichung beschäftigt. Das Projekt zielt darauf hin, national verfügbare Ansätze und Methoden zur Bestimmung der Methanemissionen aus Biogasanlagen zu harmonisieren. Es sollen vergleichbare und reproduzierbare Messergebnisse erzielt werden, die dann in einen Normprozess einfließen können.

## 7. Literatur

- [1] A. Groth, C. Maurer und M. Reiser, „Messung von Methanemissionen an Biogasanlagen mit Lasertechnik und Modellierung zur Bestimmung der Methanfracht,“ Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg, 2015, Förderkennzeichen 48820.1004.VO/249.
- [2] N. Webb, M. Broomfield, P. Brown, G. Buys, L. Cardenas, T. Murrells, Y. Pang, N. Passant, G. Thistlethwaite und J. Watterson, „UK Greenhouse Gas Inventory 1990 to 2012: Annual Report for submission under the Framework Convention on Climate Change, ANNEX 3,“ Department of Energy and Climate Change, Oxfordshire, 2014.
- [3] Statistisches Landesamt Baden-Württemberg, „Rinderbestände und -haltungen in Baden-Württemberg 2015,“ 2016. [Online]. Available: [www.statistik.baden-wuerttemberg.de/Landwirtschaft/Viehwirtschaft/Rinder.jsp](http://www.statistik.baden-wuerttemberg.de/Landwirtschaft/Viehwirtschaft/Rinder.jsp). [Zugriff am 29 08 2016].
- [4] IPCC, „2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories,“ prepared by the National Greenhouse Gas Inventories Programme, Volume 5, Chapter 4, IGES, Japan, 2006.
- [5] C. Cuhls, B. Mähl und J. Clemens, „Ermittlung der Emissionssituation bei der Verwertung von Bioabfällen,“ Umweltforschungsplan des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit, Texte 39/2015, Forschungskennzahl 206 33 326, 3709 44 320.
- [6] Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg, „Leitfaden "Hochwertige Verwertung von Bioabfällen",“ [https://um.baden-wuerttemberg.de/fileadmin/redaktion/m-um/intern/Dateien/Dokumente/2\\_Presse\\_und\\_Service/Publikationen/Umwelt/Leitfaden\\_Bioabfall.pdf](https://um.baden-wuerttemberg.de/fileadmin/redaktion/m-um/intern/Dateien/Dokumente/2_Presse_und_Service/Publikationen/Umwelt/Leitfaden_Bioabfall.pdf), 2015.
- [7] T. K. Flesch, R. L. Desjardins und D. Worth, „Fugitive methane emissions from an agricultural biodigester,“ *Biomass and Bioenergy* 35, pp. 3927 - 3935, 2011.
- [8] A. Groth, C. Maurer, M. Reiser und M. Kranert, „Determination of methane emission rates on a biogas plant using data from laser absorption spectrometry,“ *Bioresource Technology* , Nr. 178, pp. 359-361, 2015.

- [9] M. Hrad, M. Piringer und M. Huber-Humer, „Determining methane emissions from biogas plants - Operational and meteorological aspects,“ *Bioresource Technology*, Nr. 191, pp. 234-243, 2015.
- [10] T. K. Flesch und J. D. Wilson, „Backward-Time Lagrangian Stochastic Dispersion Models and their Application to Estimate Gaseous Emissions,“ *Journal of Applied Meteorology*, Nr. 34, pp. 1320-1332, 1995.
- [11] IPCC, Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, S. Solomon, D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K. Averyt, M. M. Tignor und H. L. Miller, Hrsg., United Kingdom and New York: Cambridge University Press, 2007.
- [12] M. Kern, T. Raussen, K. Funda, A. Lootsma und H. Hofmann, „Aufwand und Nutzen einer optimierten Bioabfallverwertung hinsichtlich Energieeffizienz, Klima- und Ressourcenschutz,“ Umweltforschungsplan des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit, Texte 43/2010, Förderkennzeichen 3707 33 304.
- [13] PrimaKlima-weltweit- e.V., „CO2-Rechner,“ [Online]. Available: <https://www.prima-klima-weltweit.de/co2/kompens-berechnen.php>. [Zugriff am 05 09 2016].