

# Emissionen aus der Rinderhaltung

Schriftenreihe, Heft 08/2020



# Erfassung von Emissionen aus diffusen Quellen der Rinderhaltung

Jennifer Deichmann, Thomas Heidenreich, Dr. agr. Jens Lippmann, Dr. rer. nat. Horst-Günter Kath,  
Marc Fröhlich, Frank Rothe

## Inhalt

<b>1</b>	<b>Einleitung</b> .....	<b>7</b>
<b>2</b>	<b>Material und Methoden</b> .....	<b>8</b>
2.1	Messobjekte.....	8
2.1.1	Stall 1.....	8
2.1.2	Stall 2.....	10
2.1.3	Gärrestlager 1.....	11
2.1.4	Gärrestlager 2.....	12
2.1.5	Auslauf 1.....	12
2.1.6	Auslauf 2.....	12
2.1.7	Auslauf 3.....	12
2.2	Messaufbau und –ablauf.....	13
2.2.1	Stallmessungen.....	13
2.2.2	Gärrestlager- und Auslaufmessungen.....	14
2.3	Qualitätssicherung.....	17
2.3.1	Stallmessungen.....	17
2.3.2	Gärrest- und Auslaufmessungen.....	17
2.4	Berechnung der Emissionen.....	19
2.4.1	Stallmessungen.....	19
2.4.2	Gärrestlager- und Auslaufmessungen.....	21
<b>3</b>	<b>Ergebnisse</b> .....	<b>23</b>
3.1.1	Stallmessungen.....	23
3.1.2	Gärrestlagermessungen.....	31
3.1.3	Auslaufmessungen.....	35
<b>4</b>	<b>Diskussion</b> .....	<b>38</b>
4.1.1	Stallmessungen.....	38
4.1.2	Gärrestlagermessungen.....	38
4.1.3	Auslaufmessungen.....	39
<b>5</b>	<b>Fazit</b> .....	<b>40</b>
5.1.1	Stallmessungen.....	41
5.1.2	Gärrestlager und Auslauf.....	41
<b>6</b>	<b>Literaturverzeichnis</b> .....	<b>42</b>

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Ammoniakemissionen der deutschen Landwirtschaft 2015 (Thünen-Report 46) .....	7
Abbildung 2: beschriftetes Luftbild von Stall 1 .....	8
Abbildung 3: beschriftetes Luftbild von Stall 2.....	10
Abbildung 4: Schematische Darstellung des Messaufbaus der Stallmessungen in Stall 1 .....	13
Abbildung 5: Messaufbau zur Erfassung von Flächenquellen .....	15
Abbildung 6: schematische Darstellung der Messpunkte auf dem Gärrestlager .....	16
Abbildung 7: Messhaube mit Schwimmhilfen während der Messung am Gärrestbehälter (links), Messhaube während der Auslaufmessung (rechts) .....	16
Abbildung 8: Liniendiagramm des mittleren Volumenstroms und der mittleren Windgeschwindigkeit am Stall 1 im Winter .....	27
Abbildung 9: Boxplots der Geruchskonzentration der Jahreszeiten an Gärrestlager 1 .....	33
Abbildung 10: Boxplots der Geruchskonzentration der Jahreszeiten an Gärrestlager 2.....	33
Abbildung 11: Boxplots der Methanemissionen in Abhängigkeit des Schwimmschichtzustandes.....	35
Abbildung 12: Boxplots der Ammoniakemission in Abhängigkeit der Art der Verschmutzung des Auslaufs .....	37
Abbildung 13: Geruchskonzentration in Abhängigkeit der Messstellenfeuchte .....	37
Abbildung 14: Beispiele für "geschlossene Schwimmschicht" rot markiert, Rest der Fläche entspricht der Kategorie "undicht (Risse vorhanden)" .....	48

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Stallmaße Stall 1 .....	9
Tabelle 2:	Leistungsdaten Stall 1 .....	9
Tabelle 3:	Stallmaße Stall 2 .....	11
Tabelle 4:	Leistungsdaten Stall 2 .....	11
Tabelle 5:	Schlüssel zur Erfassung der Oberflächenbeschaffenheit der Gärrestlager .....	17
Tabelle 6:	Schlüssel zur Erfassung der Oberflächenbeschaffenheit des Auslaufs.....	17
Tabelle 7:	Gaskonzentrationen im Stall aufgeschlüsselt nach Jahreszeiten .....	24
Tabelle 8:	mittlere Wetterbedingungen der Stallmessungen .....	25
Tabelle 9:	mittlere Volumenströme und Windgeschwindigkeit aufgeschlüsselt nach Jahreszeit .....	25
Tabelle 10:	Emissionsfaktoren der Stallmessungen aufgeschlüsselt nach Jahreszeit.....	28
Tabelle 11:	geometrisches Mittel, Minimum und Maximum der Geruchskonzentration der Stallmessungen .....	29
Tabelle 12:	mittlerer Geruchsemissionsfaktor der Stallmessungen aufgeschlüsselt nach Jahreszeit .....	29
Tabelle 13:	mittlere Staubkonzentrationen aller Stallmessungen .....	31
Tabelle 14:	durchschnittliche Wetterbedingungen während der Gärrestlagermessungen .....	32
Tabelle 15:	mittlere Emissionsfaktoren der Gärrestlagermessungen .....	34
Tabelle 16:	durchschnittliche Wetterbedingungen während der Auslaufmessungen .....	35
Tabelle 17:	geometrisches Mittel, Minimum und Maximum Geruchskonzentration der Auslaufmessungen .....	36
Tabelle 18:	Emissionsfaktoren der Auslaufmessungen .....	36
Tabelle 19:	Spezifikationen der Messgeräte und der Probenahme der Stallmessungen .....	43
Tabelle 20:	Spezifikationen der Messgeräte und der Probenahme der Gärrest-/Auslaufmessungen.....	45
Tabelle 21:	Spezifikationen der Wetterstation an Stall 1 .....	46
Tabelle 22:	Spezifikationen der Wetterstation an Gärrestlager 2 .....	47
Tabelle 23:	Geruchskonzentrationen der Stallmessungen .....	48
Tabelle 24:	Staubkonzentrationen der einzelnen Messtage der Stallmessungen .....	50
Tabelle 25:	Geruchskonzentrationen der Gärrestlagermessungen .....	51
Tabelle 26:	Geruchskonzentrationen der Auslaufmessungen .....	52

## **Abkürzungsverzeichnis**

BfUL	Betriebsgesellschaft für Umwelt und Landwirtschaft
CIGR	Commission Internationale du Génie Rural
FTIR	Fourier-Transformations-Infrarotspektrometer
GE	Geruchseinheit
GV	Großvieheinheit
HPU	Heat-Production-Unit
KTBL	Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft
MGM	Multigasmonitor
TMR	Totale Misch-Ration
TP	Tierplatz
VDI	Verein Deutscher Ingenieure

# 1 Einleitung

Die Emissionen von Tierhaltungsanlagen sind relevant für Genehmigungsverfahren sowie für die Einhaltung nationaler Emissionshöchstmengen. Hier erhalten vor allem die Ammoniakemissionen zusätzliche Relevanz durch die Anforderungen der NERC-Richtlinie, in der die bereits überschrittenen Reduktionsverpflichtungen für Ammoniak von 2001 weiter verschärft wurden.

Die Landwirtschaft trägt mit ca. 95 % zu den deutschen Ammoniakemissionen bei. Als Hauptverursacher ist hier die Düngung mit 53 % zu nennen, gefolgt von der Rinderhaltung mit 19 % (Abbildung 1). Um die hohen Emissionen bei der Ausbringung zu reduzieren, wurden in der neuen Düngeverordnung emissionsarme Ausbringetechniken sowie die schnelle Einarbeitung festgelegt. Um die Emissionen aus der Rinderhaltung zu reduzieren, gibt es zurzeit nur wenige praxistaugliche Maßnahmen.

Im Gegensatz zur Relevanz der Emissionen steht der wissenschaftliche Kenntnisstand speziell zu den diffusen Quellen der Tierhaltung wie Ausläufen, Festmistlagern, Güllelagern und Rinderställen. Speziell die im Rahmen der Forderung nach mehr Tierwohl vermehrt geplanten Ausläufe bereiten den Genehmigungsbehörden Schwierigkeiten in der Bewertung, da hierfür keine bzw. keine validen Emissionsfaktoren für Geruch und Ammoniak zur Verfügung stehen. Um die Datengrundlage zur Ableitung von Emissionsfaktoren zu verbessern, wurde das Projekt „Diffuse Quellen der Rinderhaltung“ geschaffen. Es wurden von 07/2016 bis 11/2017 Messungen an zwei Rinderställen, zwei Gärrestlagern sowie drei Ausläufen durchgeführt und die Emissionsfaktoren für Ammoniak, Methan, Lachgas, Staub und Geruch berechnet.

## Ammoniakemissionen der deutschen Landwirtschaft

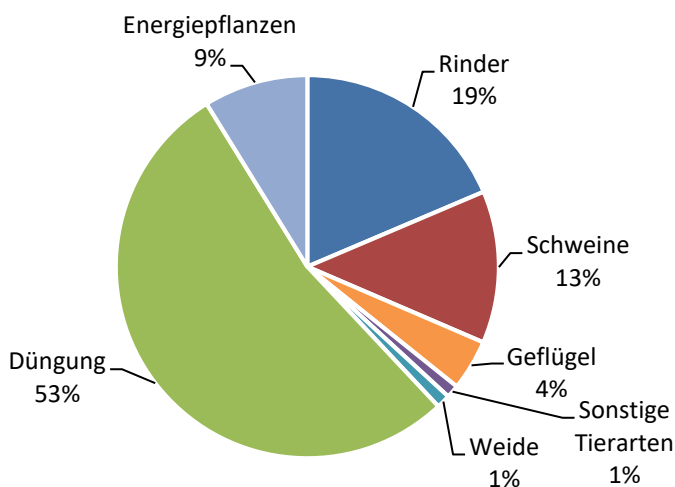


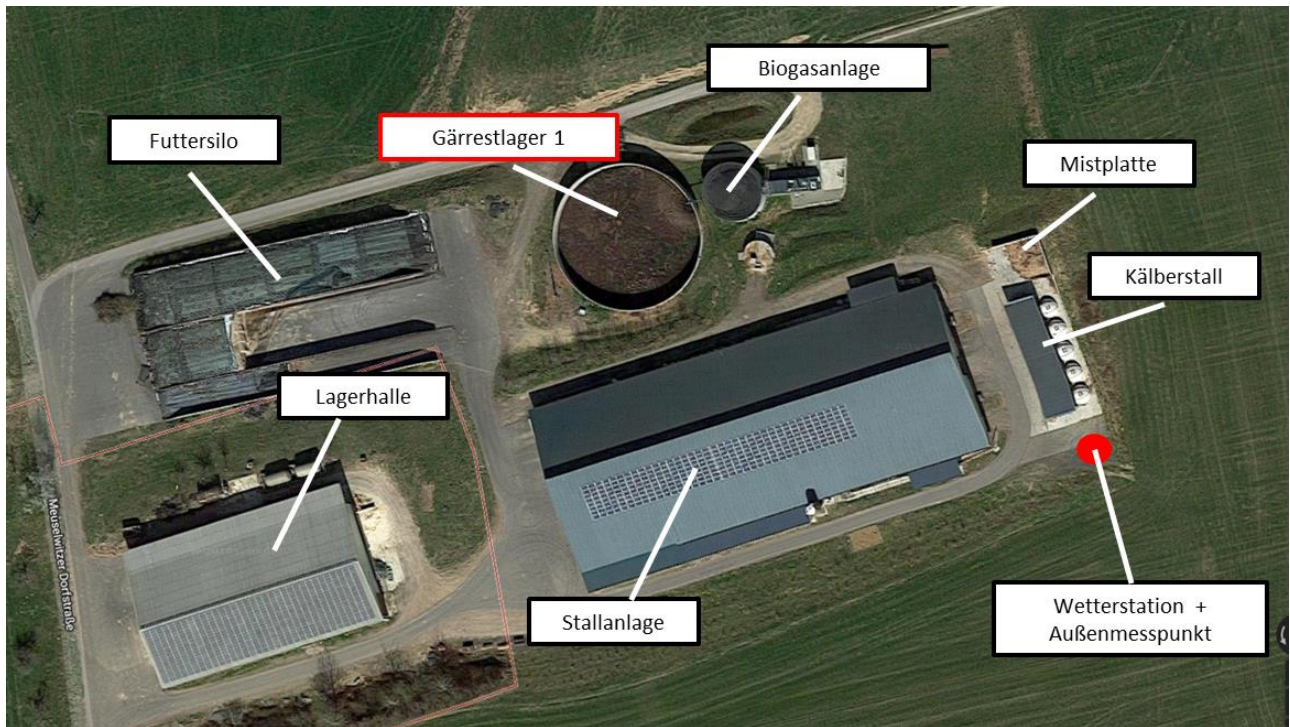
Abbildung 1: Ammoniakemissionen der deutschen Landwirtschaft 2015 (Thünen-Report 46)

# 2 Material und Methoden

## 2.1 Messobjekte

### 2.1.1 Stall 1

Lage:	nordöstlicher Ortsrandlage	
Höhe:	250 m über NN, nach Norden abfallendes Gelände	
Ausrichtung Stallängsachse:	west-ost	
angrenzende Emissionsquellen:	süd-westlich:	Färsenstall (200 m Entfernung)
	nördlich:	Gärrestlager (20 m Entfernung)
	östlich:	Kälberstall (20 m Entfernung)
	nord-westlich:	Futtersilos (30 m Entfernung)



(Quelle: <https://geoviewer.sachsen.de>)

**Abbildung 2: beschriftetes Luftbild von Stall 1**



**Tabelle 1: Stallmaße Stall 1**

Stallmaße	
Länge:	94,00 m
Breite:	36,00 m
Höhe Traufe	4,00 m
Höhe First	8,00 m
Gesamtgrundfläche	3384 m <sup>2</sup>

**Tabelle 2: Leistungsdaten Stall 1**

Leistungsdaten	
tgl. Milchleistung/Kuh:	ca. 31 Liter
Fettgehalt:	3,9 %
Eiweißgehalt:	3,4 %
Harnstoffgehalt:	190 mg/l
Reproduktionsrate:	ca. 30 %
Erstkalbealter:	25 Monate

Der Außenklimastall mit freier Lüftung ist als Liegeboxenlaufstall mit 300 Milchkuhplätzen ausgeführt und wurde während des Versuchszeitraums mit durchschnittlich 250 Milchkühen (laktierend + trockengestellt) bewirtschaftet. Mehrere über den Liegeboxen angebrachte Ventilatoren unterstützen bei Bedarf die Luftströmung entlang der Längsachse des Stalls.

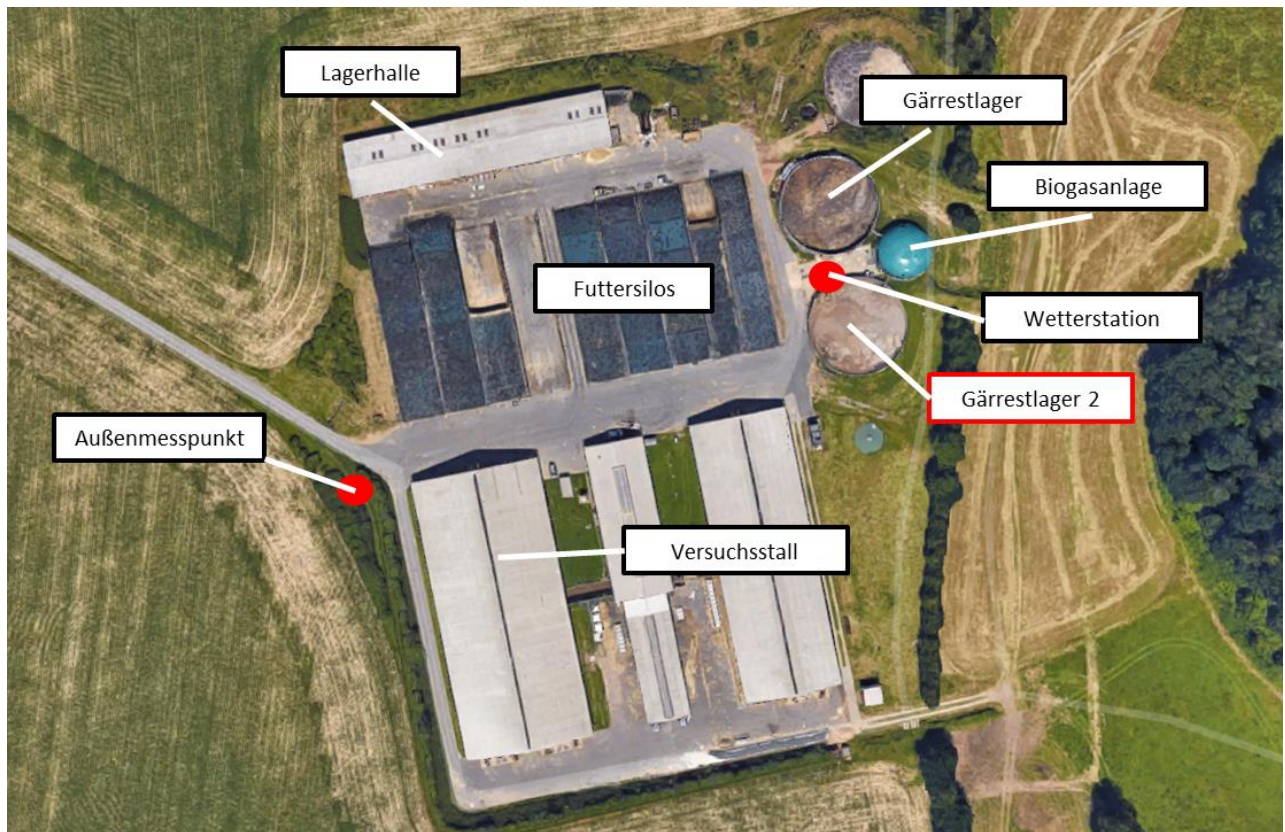
Für separierte und abkalbende Kühe beträgt die Liege- und Lauffläche ca. 360 m<sup>2</sup> und ist mit Stroh eingestreut. Für die laktierenden Kühe beträgt die Lauffläche ca. 1350 m<sup>2</sup> (4,5 m<sup>2</sup>/TP bzw. 5,4 m<sup>2</sup>/Tier) und die Liegefläche ca. 1140 m<sup>2</sup>. Im nahen Stallumfeld sind 65 Kälber untergebracht. Die Stallkonstruktion besteht aus Stahlständern. Die Giebelwände sind aus Blech mit jeweils fünf Toröffnungen. Die Dacheindeckung besteht aus Sandwichplatten und ist als Sheddach konstruiert. Die Stalllängsseiten und der First sind offen und können mit Curtains manuell geschlossen werden. Der Boden besteht aus planbefestigten, profilierten Betonelementen. Beidseitig des 5,20 m breiten Futtertisches folgen ein 4,10 m breiter Fressgang, danach eine 5,20 m breite Doppelliegeboxenreihe, ein 3,10 m breiter Laufgang und eine 2,70 m breite Wandliegeboxenreihe. Die Entmistung der Laufgänge erfolgt stündlich durch Faltschieber. Die Gülle aus dem Stall wird einer Biogasanlage zugeführt und der Gärrest außerhalb des Stalles in einem Gärrestlagerbecken gelagert. Die Liegeboxen werden im Rhythmus von drei bis vier Wochen mit einem Kalk-Stroh-Gemisch (ca. 16 kg/Kuhplatz) nachgestreut. Die Fütterung erfolgt mittels Futtermischwagen täglich zwischen 7 und 9 Uhr. Es wird eine Mischration (TMR) gefüttert. Sie besteht aus Mais- und Grassilage, Pressschnitzeln, Raps- und Gerstenschrot sowie einem Harnstoffzusatz. Das Nachschieben des Futters auf dem Futtertisch wird automatisch mittels Roboter zwischen 11 und 0 Uhr stündlich und 2, 4 sowie 6 Uhr durchgeführt. Für die Berechnung der Futterration wird eine mittlere Lebendmasse von 650 kg je Kuh zugrunde gelegt. Eine Gewichtserfassung erfolgt nicht.

Das Melksystem besteht aus vier Melkrobotern. Hierdurch ergibt sich eine Teilung der Herde in vier Gruppen. Es werden keine Leistungsgruppen separiert. Als Lockfutter wird im Melkroboter bis zu 1 kg Kraftfutter je Kuh und Tag bereitgestellt. dreimal täglich (4, 12, 21 Uhr) wird ein 20-minütiger Service am Melkroboter automatisch durchgeführt. Der Luftwechsel im Stall wird durch das Management von Toren und Curtains individuell beeinflusst. Die Tore an den Giebeln sind geschlossen und werden nur bei hohen Temperaturen geöffnet. Die Curtains sind im Winter zu und im Sommer geöffnet. Während der Übergangsphasen (Herbst und Frühling) werden sie individuell nach Bedarf bedient. Die Curtains an der Firstöffnung sind überwiegend geöffnet und werden bei Regen mit ungünstiger Windrichtung (Vernässung des Futtertisches) individuell geschlossen.

## 2.1.2 Stall 2

Lage:	landwirtschaftlich genutzte Fläche	
Höhe:	219 m über NN	
Ausrichtung Stalllängsachse:	nord-süd	
angrenzende Emissionsquellen:	nördlich:	Fahrsilos (20 m Entfernung)
	nordöstlich:	2 Gärrestlager (20 m; 40 m Entfernung)
	östlich:	Kälberstall (20 m Entfernung), Milchviehstall mit 196 Plätzen (40 m Entfernung)
	nord-westlich:	Färsenstall (800 m Entfernung)

Landwirtschaftlich genutzte Fläche umschließt das Stallgelände. Nach Osten schließt sich in geringer Distanz ein Waldareal an. Das Gelände fällt nach Norden ab.



(Quelle: <https://geoviewer.sachsen.de> )

**Abbildung 3: beschriftetes Luftbild von Stall 2**

**Tabelle 3: Stallmaße Stall 2**

Stallmaße	
Länge:	79,30 m
Breite:	34,80 m
Höhe Traufe:	4,50 m
Höhe First:	10,83 m
Gesamtgrundfläche:	2757 m <sup>2</sup>

**Tabelle 4: Leistungsdaten Stall 2**

Leistungsdaten	
tgl. Milchleistung/Kuh:	ca. 31 Liter
Fettgehalt:	4,0 %
Eiweißgehalt:	3,3 %
Harnstoffgehalt:	180-200 mg/l
Reproduktionsrate:	ca. 28 %
Erstkalbealter:	26 Monate

Der Außenklimastall mit freier Lüftung ist als Liegeboxenlaufstall mit 305 Milchkuhplätzen ausgeführt und wurde während des Versuchszeitraumes mit durchschnittlich 355 Tieren bewirtschaftet.

Das Raumvolumen umfasst 21136 m<sup>3</sup>. Für die Kühe beträgt die Lauffläche ca. 1510 m<sup>2</sup> (5 m<sup>2</sup>/TP bzw. 4,25 m<sup>2</sup>/Tier) und die Liegefläche ca. 1060 m<sup>2</sup>. Die Stallkonstruktion besteht aus Holzständern. Die Giebelwände sind aus Holz mit jeweils fünf Toröffnungen. Die Dacheindeckung besteht aus Wellfaserzementplatten. Die Stalllängsseiten und der First sind offen und können mit Curtains geschlossen werden. Der Boden besteht aus planbefestigten Beton. Beidseitig des 4,90 m breiten Futtertisches folgen ein 4,00 m breiter Fressgang, danach eine 5,00 m breite Doppelliegeboxenreihe, ein 3,00 m breiter Laufgang und eine 2,70 m breite Wandliegeboxenreihe. Die Laufflächen sind teilweise mit Gummimatten ausgelegt. Die Entmistung der Laufgänge erfolgt stündlich automatisch durch Faltschieber. Die Gülle aus dem Stall wird einer Biogasanlage zugeführt, und der Gärrest außerhalb des Stalles in zwei Gärrestlagerbecken gelagert. Die Liegeboxen werden im Rhythmus von einer Woche mit einem Kalk-Stroh-Gemisch (ca. 7 kg/Kuhplatz) nachgestreut. Die Fütterung erfolgt mittels Futterverteilwagen täglich zwischen 6 und 7 sowie 14 Uhr. Die TMR besteht aus Mais- und Grassilage, Stroh, Körnermais, Raps- und Gerstenschrot sowie Erbsenschrot. Das Nachschieben des Futters auf dem Futtertisch erfolgt fünfmal täglich mit einem mobilen Arbeitsgerät. Für die Berechnung der Futterration wird eine mittlere Lebendmasse von 650 kg je Kuh zugrunde gelegt. Eine Gewichtserfassung erfolgt nicht.

Das Melksystem besteht aus einem Melkkarussell. Es werden keine Leistungsgruppen separiert. Die Melkzeiten liegen zwischen 3 und 12 Uhr sowie zwischen 15 und 24 Uhr. Der Luftwechsel im Stall wird durch das Management von Toren und Curtains individuell beeinflusst. Die Tore an den Giebeln sind nachts und unter 0 °C geschlossen. Curtains sind unter 4 °C oder bei Regen geschlossen. Weiterhin sind sie mit einer windabhängigen Steuerung versehen. Dem Futter wird eine Substanz auf der Basis von Milchsäurebakterien untergemischt.

### 2.1.3 Gärrestlager 1

Das Gärrestlagerbecken befindet sich auf dem Betriebsgelände des Stalls 1 (siehe Abbildung 2). Es liegt nördlich der Stallanlage. Dem Becken sind eine Biogasanlage mit einem Volumen von 800 m<sup>3</sup> und ein Vorsammelbecken mit 110 m<sup>3</sup> vorgeordnet. Die Biogasanlage wird zu 100 % mit Gülle aus dem Stall beschickt. Die Verweildauer in der Biogasanlage beträgt ca. 40 Tage. Die Befüllung erfolgt oberhalb des Gärrestspiegels. Die Lagerkapazität reicht für einen Zeitraum von neun Monaten. Mit einem Durchmesser von 33 m und einer Wandhöhe von 6 m (Lagerhöhe ca. 5,5 m) hat es ein Volumen von ca. 5700 m<sup>3</sup> und eine Oberfläche von 855 m<sup>2</sup>. Die Schwimmdecke wird während der Lagerzeit nicht untergerührt. Das Aufrühren erfolgt mit mobiler Technik zur Ausbringung. Diese richtet sich nach der Fruchtart und liegt nach der Ernte zwischen August und

September sowie im Frühjahr. Der Gärrest hat einen Stickstoffgehalt von 3,6 kg je Tonne. Der Trockensubstanzgehalt liegt bei 7,2 % und der pH-Wert bei 8.

### **2.1.4 Gärrestlager 2**

Das Gärrestlagerbecken befindet sich auf dem Betriebsgelände des Stalls 2 (siehe Abbildung 3: beschriftetes Luftbild von Stall 2). Es liegt nordöstlich der Stallanlage. Ein zweites vergleichbares Becken schließt sich nördlich an. Die Becken werden wechselnd aus der Biogasanlage befüllt. Die Verweildauer in der Biogasanlage beträgt ca. 40 Tage. Die Befüllung erfolgt unterhalb des Gärrestspiegels. Die Lagerkapazität reicht für einen Zeitraum von neun Monaten aus. Die Wandhöhe beträgt 6 m, davon sind 4,50 m oberirdisch. Der Durchmesser beträgt 28,00 m und die Oberfläche 616 m<sup>2</sup>. Bei einer möglichen Füllhöhe von 5,50 m hat das Becken ein Fassungsvermögen von ca. 3400 m<sup>3</sup>. Die Schwimmdecke wird während der Lagerzeit nicht untergerührt. Das Aufrühren erfolgt mit stationärer bzw. mobiler Technik zur Ausbringung. Diese richtet sich nach der Fruchtart und liegt nach der Ernte zwischen August und September sowie im Frühjahr. Der Gärrest hat einen Stickstoffgehalt von 2,4 kg je Tonne und einen Trockensubstanzgehalt von 5,8 %.

### **2.1.5 Auslauf 1**

Der Auslauf befindet sich zwischen zwei Rinderställen. Auf einer Seite wird er von der Stallwand begrenzt. An der gegenüberliegenden Seite befinden sich überdachte Hochliegeboxen mit Gummimatten.

Der Auslauf ist über drei Zugänge mit dem angrenzenden Stall verbunden, kann von den Tieren jederzeit genutzt werden. Die Fläche ist 65 m lang und 5 m breit. Hiervon sind 2,5 m nicht überdachte Lauffläche und 2,5 m überdachte Liegefläche. Die Lauffläche ist planbefestigt, besteht aus Beton und ist mit Gummimatten belegt. Sie wird stündlich durch einen Faltschieber gereinigt. Ein kompletter Durchlauf dauert ca. 30 Minuten.

### **2.1.6 Auslauf 2**

Der Auslauf befindet sich zwischen zwei Rinderställen und wird einerseits von der Stallwand und andererseits von einem Futtergang begrenzt.

Der Auslauf ist dem angrenzenden Stall zugeordnet und über einen Zugang verbunden. Entlang der Stallwand befinden sich überdachte Liegeboxen und eine Tränke. Die Liegeboxenfläche ist 2,4 m tief. Die Lauffläche ist 5,6 m breit und 33 m lang und wird mit Stroh eingestreut. Die Auslauffläche umfasst 264 m<sup>2</sup>, davon sind ca. 80 m<sup>2</sup> überdachte Liegeboxenfläche. Der Auslauf wird einmal wöchentlich mobil gereinigt und neu eingestreut. Der Boden ist planbefestigt und aus Beton. Die Ergebnisse der ersten Messung dieses Auslaufes waren nicht zufriedenstellend. Das gewählte Messverfahren ist für diesen Auslauf aufgrund des Stroheinsatzes nicht geeignet. Daher wurden keine weiteren Messungen an diesem Auslauf durchgeführt. Die Entwicklung einer alternativen Herangehensweise im Rahmen dieses Projektes war zeitlich nicht möglich, ist jedoch für die Zukunft avisiert.

### **2.1.7 Auslauf 3**

Der Auslauf befindet sich zwischen Rinderstall und Melkhaus. Er ist in das Treibwegesystem eingebunden und wird auch zur Separierung und Behandlung von Kühen genutzt. Die Fläche besteht aus Spaltenböden mit Gummiauflage. Unterhalb des Bodens befindet sich ein Güllekanal. Die emittierende Gesamtfläche zwischen dem Stall und dem Melkhaus umfasst ca. 248 m<sup>2</sup>. Die Ergebnisse der ersten Messung dieses Auslaufes waren nicht zufriedenstellend. Das gewählte Messverfahren ist für diesen Auslauf aufgrund des Spaltenbodens nicht geeignet. Daher wurden keine weiteren Messungen an diesem Auslauf durchgeführt. Die Entwicklung einer alternativen Herangehensweise im Rahmen dieses Projektes war zeitlich nicht möglich, ist jedoch für die Zukunft avisiert.

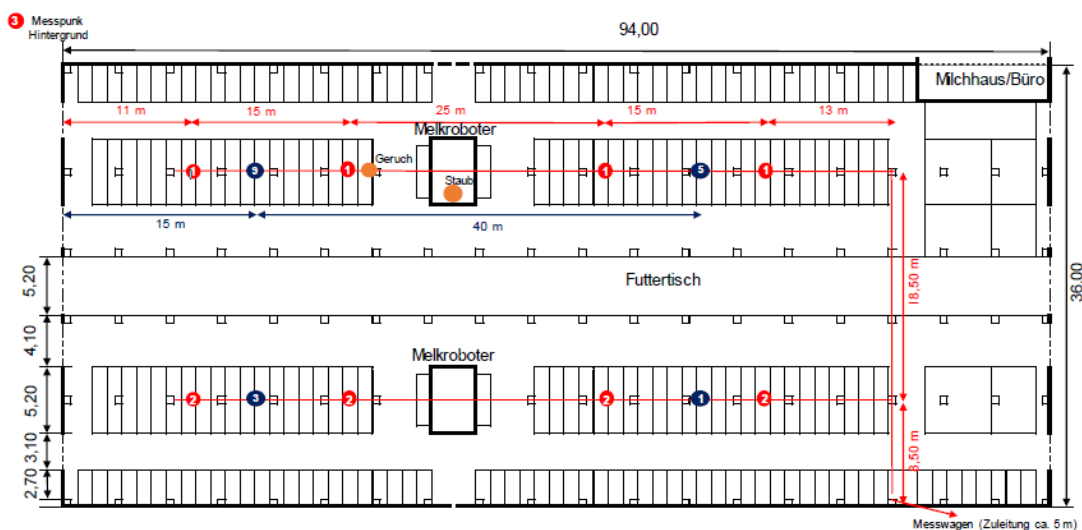
## 2.2 Messaufbau und -ablauf

Die Messungen der Parameter Ammoniak, Kohlenstoffdioxid, Methan, Lachgas, Wasserdampf, Meteorologie und Staub sowie die Messung zur Qualitätssicherung wurden von der staatlichen Betriebsgesellschaft für Umwelt und Landwirtschaft Fachbereich 24 (BfUL) durchgeführt. Die Probenahme für die Geruchsanalyse, die Erfassung der betriebsspezifischen Randbedingungen sowie die Berichterstattung wurde von Dr. Jens Lippmann vom Albrecht-Daniel-Thaer-Institut für Agrar- und Veterinärwissenschaften e.V. Leipzig durchgeführt.

### 2.2.1 Stallmessungen

#### Gasmessung

Die Konzentrationen von Ammoniak ( $\text{NH}_3$ ), Kohlenstoffdioxid ( $\text{CO}_2$ ), Methan ( $\text{CH}_4$ ), Lachgas ( $\text{N}_2\text{O}$ ) und Wasserdampf ( $\text{H}_2\text{O}$ ) wurden in der Stallluft sowie der Umgebungsluft gemessen. Hierfür wurde jeweils mindestens eine 14-tägige Messkampagne innerhalb der Außentemperaturbereiche  $< 5^\circ\text{C}$  (Winter),  $5\text{-}15^\circ\text{C}$  (Übergang) und  $> 15^\circ\text{C}$  (Sommer) durchgeführt. Die Analyseluft wurde dabei im Stall über zwei Messleitungen, die über die gesamte Stalllänge über den Liegeboxenreihen in einer Höhe von etwa 3 m angebracht wurden, zu den Messgeräten geführt. Jede Messleitung verfügt über vier Öffnungen, gleichmäßig verteilt auf die gesamte Länge der Leitung (siehe Abbildung 4). Diese vier Lufteinlässe wurden mit kritischen Kapillaren versehen, um einen gleichmäßigen Volumenstrom an jeder Öffnung zu gewährleisten. Um die Verschmutzung der Analyseluft zu verhindern, war jede Öffnung mit einem Glasfaserfilter des Typ K versehen, welcher zu Beginn jeder Messkampagne gewechselt wurden. Für die Gaskonzentrationsmessungen wurden drei Multigasmonitore (MGM) eingesetzt. An jeder der beiden Messleitungen war ein MGM angeschlossen. Der dritte MGM analysierte die Umgebungsluft des Außenmesspunkts. Die Standorte der Außenmesspunkte sind Abbildung 2 und Abbildung 3 zu entnehmen. Die Messgeräte befanden sich im Messwagen der Betriebsgesellschaft für Umwelt und Landwirtschaft (BfUL), der direkt neben dem Stallgebäude über die gesamte Messkampagne abgestellt wurde. Die Erfassung der Messwerte erfolgte kontinuierlich im Zwei-Minuten-Intervall. Die technischen Daten der gesamten im Projekt verwendeten Messtechnik können Tabelle 19 bis Tabelle 22 im Anhang entnommen werden.



**Abbildung 4: Schematische Darstellung des Messaufbaus der Stallmessungen in Stall 1**  
(rot= die Messleitungen mit den einzelnen Öffnungen, blau= die Standorte der Temperatur- und Feuchtemessung, gelb= die Probenahmestellen für Staub und Geruch)

### Staubmessung und Geruchsprobenahme

Die Staub- und Geruchsprobenahmen wurden je Messkampagne an zwei Tagen durchgeführt. Die Stellen der Probenahme sind in der Abbildung 4 gelb markiert. Zur Bestimmung der Staubkonzentration in der Stallluft wurden Luftproben, über 24 Stunden mittels Impaktoren für die Bestimmung von Gesamtstaub, sowie für die Staubklassen PM<sub>10</sub> und PM<sub>2.5</sub> entnommen und die Staubmasse im Labor gravimetrisch bestimmt. Der Sammelort befand sich stallmitten in ca. 4 m Höhe. Die Entnahme von Geruchsproben erfolgte parallel zur Staubmessung über jeweils dreimal eine Stunde in einer Höhe von 2,50 m. Die Geruchsproben wurden innerhalb von 6 Stunden im Labor ERGO Umweltinstitut GmbH nach DIN EN 13725 2003-07 analysiert. Die Probenahmezeit der Geruchsproben lag zwischen 8 und 12 Uhr.

### Randbedingungen

Die Lufttemperatur und -feuchte wurden in den untersuchten Ställen kontinuierlich gemessen (Messgerät: TinyTag Plus). Es wurden vier Messstellen im Stall eingerichtet, sodass hieraus eine Abbildung der Temperatur- und Feuchtzustände im Stall möglich war. Die Messebene lag ca. 3 Meter über dem Stallboden.

Mittels einer Wetterstation im Umfeld des Emittenten (siehe Abbildung 2 und Abbildung 3: beschriftetes Luftbild von Stall 2) wurden Lufttemperatur, relative Luftfeuchte, Niederschlag, Windgeschwindigkeit und -richtung, Luftdruck sowie Globalstrahlung gemessen und im Intervall von ein bzw. zwei Minuten gespeichert.

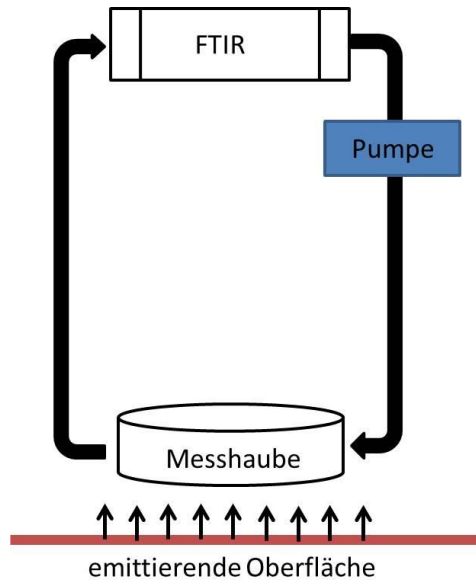
Ausgewählte Kenndaten der Herde bzw. des Stalles wurden mehrmals innerhalb jeder Messkampagne erhoben. Auf dieser Basis wurden mittlere Kenndaten für den untersuchten Zeitraum berechnet. Es wurden die mittleren Kennwerte Laktationstag, tägliche Milchleistung je Kuh sowie die Anzahl der Kühe im Stall und hiervon trockengestellte Kühe für den Datenpool bereitgestellt. Zur Beurteilung des Verschmutzungsgrades der Flächen wurden repräsentative Teilareale fotodokumentiert. Zu jedem Stallbesuch wurden die Stellungen der Curtains erfasst.

## 2.2.2 Gärrestlager- und Auslaufmessungen

### Gasmessung

Der Messaufbau bestand aus einer Messhaube aus PVC mit einem Durchmesser von 295 mm und einer Höhe von 110 mm, die auf die emittierende Oberfläche aufgesetzt wurde. Die Messhaube verfügte über zwei Öffnungen, über die die Luft mit einem Volumenstrom von 3 l/min im Kreislauf geführt wurde (Abbildung 5). Die dafür verwendeten Schläuche waren aus PTFE mit einem Innendurchmesser von 2 mm und einer Länge von 25 m (beide zusammen 50 m). Der Konzentrationsanstieg der Komponenten NH<sub>3</sub>, N<sub>2</sub>O, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O und CH<sub>4</sub> der umlaufenden Luft wurde mittels FTIR-Messgerät Ansyco DX4000 in einem Messzyklus von 10 Sekunden und einer Integrationszeit von 8 Sekunden analysiert.

Nach einer Messdauer von ca. 20-120 Sekunden wurde die Haube angehoben und mit Umgebungsluft gespült, bis die Konzentrationen wieder ein konstant niedriges Niveau erreicht hatten, bevor mit der neuen Messung begonnen wurde. Messbeginn und -ende wurden im Protokoll vermerkt.



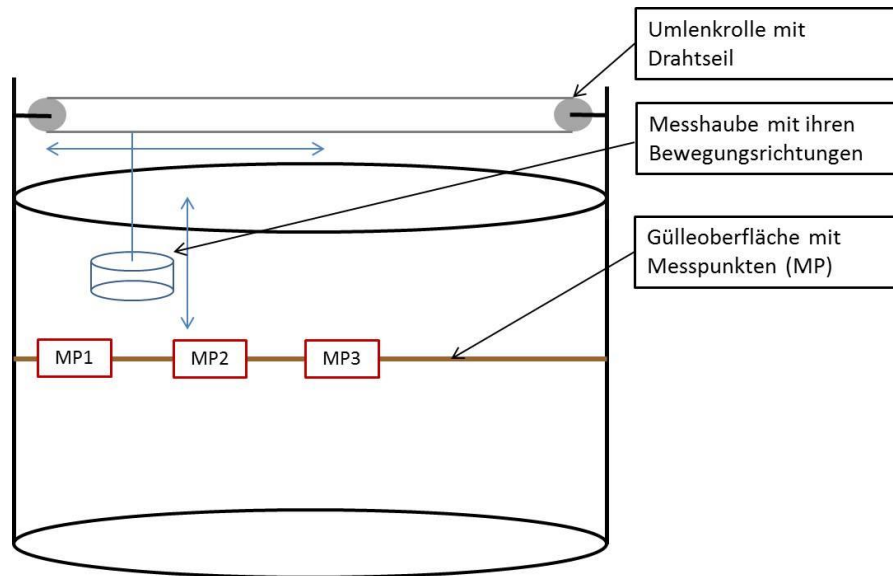
**Abbildung 5: Messaufbau zur Erfassung von Flächenquellen**

An einem Messtag wurden sowohl im Auslauf, wie im Gärrestlager drei Messpunkte mit je drei Wiederholungen gemessen, sodass an einem Messtag in der Regel neun Einzelmessungen durchgeführt wurden. Im Auslauf wurden die drei Messpunkte so ausgewählt, dass die verschiedenen Zustände der Fläche wiedergespiegelt wurden.

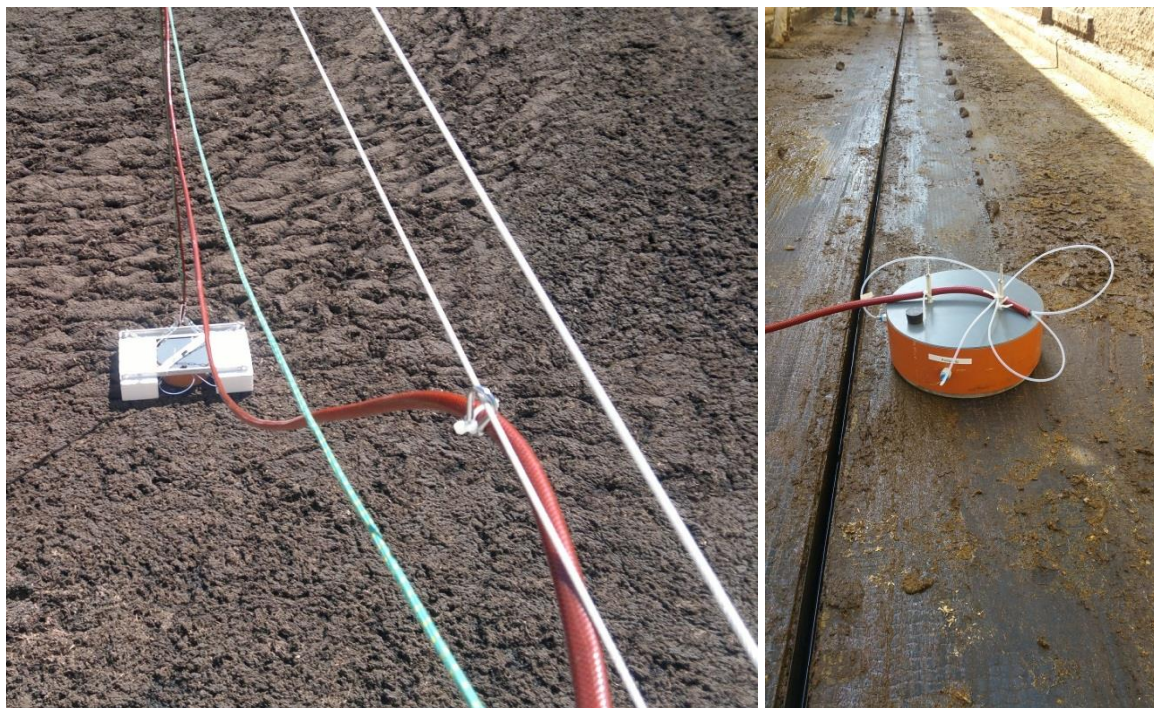
Die Messpunkte der Gärrestbehälter (Abbildung 6) befanden sich in folgenden Abständen zum Behälterrand:

- MP1 = 1-3 m
- MP2 = 3-7 m
- MP3 = 8-20 m

Zur Beprobung der Messpunkte wurde eine Messtrasse aus Drahtseil mit Hilfe von zwei Seilwinden quer über den Behälter gespannt. Die Messhaube wurde mit zwei Schwimmhilfen aus Styropor versehen und mit den Seilwinden über den Behälter bewegt. Ein zusätzliches Seil wurde zum Absenken und Heben der Messhaube verwendet.



**Abbildung 6: schematische Darstellung der Messpunkte auf dem Gärrestlager**



**Abbildung 7: Messhaube mit Schwimmhilfen während der Messung am Gärrestbehälter (links, Foto: Lippmann), Messhaube während der Auslaufmessung (rechts, Foto: Deichmann)**

### Geruchsprobenahme

Es wurde für jeden der Messpunkte jeweils vor oder nach der Gasmessung eine Geruchsprobe entnommen. Dafür wurde das Kreislaufverfahren unterbrochen. Die Luft in der Messhaube wurde durch ein Probenahmegerät in einen 10-Liter-Nalophanbeutel überführt. Die Probenahmedauer betrug ca. 15 Minuten. Zudem wurde eine Geruchsprobe der Umgebungsluft etwa 5 m neben dem Gärrestbehälter bzw., dem Auslauf über den gesamten Messzeitraum genommen. Die Geruchsproben wurden innerhalb von sechs Stunden im Labor ERGO Umweltinstitut GmbH nach DIN EN 13725 2003-07 analysiert.



## Randbedingungen

Das Wetter wurde mit einer mobilen Wetterstation erfasst. Die Oberflächentemperatur des Auslaufes sowie der Schwimmschicht wurden an einem repräsentativen Messpunkt mit einem Infrarotthermometer gemessen. Die Gärresttemperatur wurde 1 m unterhalb der Schwimmschicht an einem Punkt nahe dem Beckenrand mit einem Thermoelement Typ K gemessen.

Die Oberflächenbeschaffenheit der Messpunkte wurde mit folgenden Schlüsseln erfasst:

**Tabelle 5: Schlüssel zur Erfassung der Oberflächenbeschaffenheit der Gärrestlager**

A - Zustand Schwimmschicht	B - Stabilität der Schwimmschicht	C - Feuchte der Schwimmschicht
1 - keine (offene Gärrestoberfläche)	1 - stabil - Messhaube hinterlässt kaum Spuren	1 – feucht
2 - undicht (Risse vorhanden)	2 - instabil - Messhaube hinterlässt deutliche Spuren	2 – trocken
3 - geschlossen (keinerlei Risse)		3 – nass

**Tabelle 6: Schlüssel zur Erfassung der Oberflächenbeschaffenheit des Auslaufs**

A - Grad der Verschmutzung	B - Art der Verschmutzung	C - Feuchte der Messstelle
1 - leicht	1 - vorrangig Kot	1 – trocken
2 - mittel	2 - vorrangig Urin	2 – feucht
3 - stark	3 - Kot/Urin	3 – nass

## 2.3 Qualitätssicherung

### 2.3.1 Stallmessungen

Zur Sicherung der Datenqualität wurde im Anschluss an das Projekt eine Qualitätssicherungsmessung durchgeführt, bei der im Stall 1 über sieben Tage parallel zum Multigasmonitor (MGM) ein FTIR-Gerät (Bruker Matrix MG5) betrieben wurde. Dabei wurden Abweichungen der Messwerthöhe zwischen den Geräten festgestellt. Die Messwerte des MGM lagen für  $\text{NH}_3$  und  $\text{CH}_4$  über denen des FTIR, wobei die Tagesprofile beinahe identisch verliefen. Eine Regressionsanalyse der Werte ergab eine statistisch gesicherte Äquivalenz der beiden Geräte für  $\text{CO}_2$  ( $R^2$  0,995) und  $\text{CH}_4$  ( $R^2$  0,991) mit einer relativen Unsicherheit von 1,3 % und 8 %. Für  $\text{NH}_3$  konnte durch die relative Unsicherheit von 34 %, trotz eines  $R^2$  von 0,905 keine Äquivalenz angenommen werden. Dies macht eine Korrektur der MGM-Werte für  $\text{NH}_3$  nötig, die mit Hilfe der Regressionsfunktion erfolgte. Da die Konstante der Funktion mit -0,016 zu vernachlässigen ist, erfolgte die Umrechnung mithilfe des ermittelten Anstieges, welcher in einem Konversionsfaktor von 0,73 für die  $\text{NH}_3$ -Werte des MGM resultierte. Für  $\text{N}_2\text{O}$  konnte keinerlei Zusammenhang der MGM- und FTIR-Werte festgestellt werden. Damit war eine Auswertung der  $\text{N}_2\text{O}$ -Werte für die Stallmessungen nicht möglich.

### 2.3.2 Gärrest- und Auslaufmessungen

Da die Auswertung auf der subjektiven Festlegung des linearen Kurvenbereichs beruht, wurde am Beispiel der  $\text{NH}_3$ -Kurvenanstiege der Auslaufmessungen eine Wiederholbarkeitsanalyse durchgeführt. Dafür wurde die

Auswertung der Kurven zu drei unterschiedlichen Zeitpunkten wiederholt. Die längste Zeitspanne zwischen zwei Auswertungen betrug dabei ein halbes Jahr. Anschließend wurden die Korrelationskoeffizienten nach Pearson zwischen allen Auswertungen gebildet und gemittelt. Es ergab sich ein mittlerer Korrelationskoeffizient von 0,89, und damit ein starker Zusammenhang und eine gute Wiederholbarkeit. Es ist jedoch zu bemerken, dass sich die NH<sub>3</sub>-Kurven durch gleichmäßige Anstiege auszeichneten, was bei CH<sub>4</sub> nicht der Fall war. Daher ist davon auszugehen, dass die Wiederholbarkeit für CH<sub>4</sub> deutlich geringer ausfällt.

# 3 Berechnung der Emissionen

## 3.1.1 Stallmessungen

### Gase

Die Daten aller Messgeräte sowie der Wetterstation wurden in Excel übertragen und zeitlich synchronisiert sowie auf Stundenwerte gemittelt. Die Daten des ersten Messtages wurden verworfen um das „Einpegeln“ des MGM auf die Stallgaskonzentration auszuschließen. Anschließend wurden für Stall 1 Fälle mit der Windrichtung 50-230° und für Stall 2 180-340° für die Analyse ausgewählt. Alle anderen Daten wurden eliminiert. Der Ausschluss der übrigen Windrichtungen ist wichtig, um die Volumenströme im Stall richtig zu berechnen. Dabei darf der Außenmesspunkt nicht in der Abluftfahne des Stalles liegen. Es folgte die Berechnung des Mittelwertes der Schadgaskonzentrationen aus beiden Messleitungen sowie für Stalltemperatur und -feuchte aus allen Messpunkten. Anschließend wurde mit Hilfe der CO<sub>2</sub> -Bilanz der mittlere Volumenstrom [m<sup>3</sup>/(hpu h)] für jede Stunde mit folgender Formel berechnet (Pedersen et al. 2008):

$$V = \frac{c}{(CO_2 \text{ innen} - CO_2 \text{ außen}) \times 10^{-6}} \quad (1)$$

### Dabei ist:

<i>V</i>	<i>Volumenstrom [m<sup>3</sup> h<sup>-1</sup> hpu<sup>-1</sup>] (1 hpu = 1000 W Gesamtwärmeproduktion des Tieres bei 20°C)</i>
<i>c</i>	<i>CO<sub>2</sub>-Produktion [m<sup>3</sup> h<sup>-1</sup> hpu<sup>-1</sup>]</i>
<i>CO<sub>2</sub> innen</i>	<i>CO<sub>2</sub>-Konzentration im Stall [ppm]</i>
<i>CO<sub>2</sub> außen</i>	<i>CO<sub>2</sub>-Konzentration außerhalb des Stalles [ppm]</i>

Hierbei wurde eine CO<sub>2</sub> -Produktion von 0,2 m<sup>3</sup>/h\*hpu (Pedersen et al. 2008) zugrunde gelegt, die sowohl die CO<sub>2</sub> -Produktion der Tiere als auch die der Exkremeunte berücksichtigt. Die Plausibilitätsprüfung der errechneten Volumenströme zeigte, dass vor allem für Stall 2 trotz des Ausschlusses ungünstiger Windrichtungen häufig der Fall eintrat, dass die CO<sub>2</sub>-Konzentration am Außenmesspunkt höher bzw. fast identisch mit der im Stall war. Dies führt zur Berechnung von negativen bzw. sehr hohen Volumenströmen, da der Nenner der Formel (1) dann negativ bzw. sehr klein wird. Negative Volumenströme wurden von der Analyse ausgeschlossen. Bei den hohen Volumenströmen wurde der maximal mögliche Volumenstrom von 9.000 m<sup>3</sup>/(hpu h) als Abschnittskriterium genutzt. Der maximal mögliche Volumenstrom errechnet sich aus der maximalen Windgeschwindigkeit, die am Stall erfasst wurde und der maximalen Lüftungsfläche des Stalles:

<i>Höchste Windgeschwindigkeit in Stall 2 gemessen:</i>	<i>12,2 m/s</i>
<i>Maximale Lüftungsfläche:</i>	<i>274,05 m<sup>2</sup></i>
<i>Windgeschwindigkeit im Stall:</i>	<i>40 % der Außenwindgeschwindigkeit</i>
<i>Mittlere Gesamtwärme des Stalles:</i>	<i>58 hpu</i>

$$12,2 \text{ m/s} * 0,4 = 4,88 \text{ m/s}$$

$$274,05 \text{ m}^2 * 4,88 \text{ m/s} = 1337,4 \text{ m}^3/\text{s} = 4814510,4 \text{ m}^3/\text{h}$$

$$4814510,4 \text{ m}^3/\text{h} / 558 \text{ hpu} = 8628 \text{ m}^3/(\text{hpu h}) \sim \underline{\underline{9.000 \text{ m}^3/(\text{hpu h})}}$$

Um den Volumenstrom des gesamten Stalles zu berechnen, wurde die durchschnittliche Wärmeleistung der laktierenden sowie der trockenstehenden Kühe mit Formel (2) berechnet (CIGR 1984). Der mittlere Trächtigkeitstag für laktierende Tiere wurde dabei mit 76, der von trockengestellten Tieren mit 250 und das mittlere Tiergewicht mit 650 kg angenommen. Die Wärmeproduktion wurde über einen Temperaturkorrekturfaktor (Formel (3)) (CIGR 1984) für die Umgebungsluft der Tiere korrigiert. Addiert man nun die Wärmeleistung aller laktierenden und aller trockenstehenden Tiere, erhält man die Gesamtwärmeleistung des Stalles, mit deren Hilfe sich der Volumenstrom des gesamten Stalles mit Formel (4) berechnen lässt.

$$\Phi_{ges} = 5,6 m^{0,75} + 22Y + 1,6 * 10^{-5} p^3 \quad (2)$$

**Dabei ist:**

$\Phi_{ges}$	Gesamtwärmeproduktion [W]
$m$	Lebendmasse [kg]
$Y$	Milchleistung [kg d <sup>-1</sup> ]
$p$	Trächtigkeitstag

$$F = 4 * 10^{-5} * (20 - t)^3 + 1 \quad (3)$$

**Dabei ist:**

$F$	Temperaturkorrekturfaktor
$t$	Stalltemperatur [°C]

$$V_{ges} = V * GW_{korr} \quad (4)$$

**Dabei ist:**

$V_{ges}$	Volumenstrom des gesamten Stalles [m <sup>3</sup> h <sup>-1</sup> ]
$V$	Volumenstrom [m <sup>3</sup> h <sup>-1</sup> hpu <sup>-1</sup> ]
$GW_{korr}$	Gesamtwärme aller Tiere im Stall korrigiert nach Stalltemperatur [hpu]

Mit Hilfe des Volumenstroms des gesamten Stalles und der Gaskonzentrationen wurden der Emissionsmassenstrom der einzelnen Gase nach Formel (5) berechnet.

$$E = \frac{V_{ges} * (K_{innen} - K_{außen})}{TP} \quad (5)$$

**Dabei ist:**

$E$	Emissionsmassenstrom [mg h <sup>-1</sup> TP <sup>-1</sup> ]
$V_{ges}$	Volumenstrom des gesamten Stalles [m <sup>3</sup> h <sup>-1</sup> ]
$K_{innen}$	Gaskonzentration im Stall [mg m <sup>-3</sup> ]
$K_{außen}$	Gaskonzentration am Außenmesspunkt (Vorbelastung) [mg m <sup>-3</sup> ]
$TP$	Anzahl Tierplätze

Die Vorbelastung ( $K_{\text{außen}}$ ) wurde dabei für die ersten beiden Messkampagnen an beiden Standorten durch Ersatzwerte ersetzt, da hier noch keine Erfassung aller Parameter am Außenmesspunkt erfolgte. Für  $\text{NH}_3$  erfolgte ein Ersatz der Außenluftwerte über alle Messkampagnen, da in diesem niedrigen Konzentrationsbereich eine Korrektur der Messwerte wie für die Innenkonzentration (siehe 2.3) zu fehlerbehaftet wäre. Der Ersatzwert für die Außenkonzentration wurde berechnet indem der Innenkonzentrationswert mit einem Faktor multipliziert wurde. Diese Faktoren berechnen sich aus dem Verhältnis zwischen Innen- und Außenkonzentration und wurden für jede der drei Jahreszeiten und unter Berücksichtigung der Windrichtung berechnet.

Datengrundlage für die Berechnung der Faktoren war ein 2-jähriges Nachfolgeprojekt, bei dem Innen- und Außenkonzentration an Standort 1 mit Hilfe eines FTIR erfasst wurde.

Zudem wurden auch hier Datenreihen von der Analyse ausgeschlossen, bei denen die Außenluftkonzentration höher war, als die Stallluftkonzentration, da dies zur Berechnung negativer Emissionsmassenströme führen würde. Der Jahresemissionsfaktor wurde anschließend berechnet, indem die Anzahl der Jahresstunden der Klimabereiche „Sommer“, „Winter“ und „Übergang“ mit dem mittleren Emissionsmassenstrom des jeweiligen Klimabereichs multipliziert, die erhaltenen Massenströme addiert und durch die Tierplätze geteilt wurden. Dabei wurden für den Klimabereich Sommer 2.208 für den Übergang 4.392 und für den Winter 2.160 Stunden angesetzt (Heidenreich et al. 2008).

### Geruch

Die Berechnung des Geruchsemissionsfaktors erfolgte nach Formel (5) mit den Volumenströmen des jeweiligen Probenahmezeitraumes. Die Emission wurde hier nicht auf Tierplätze sondern auf Großvieheinheiten bezogen. Die standortspezifische Vorbelastung zur Berechnung der Geruchsemission wurde aus den Vorbelastungsproben der Geruchsmessungen am Gärrestlager abgeleitet. Es wurden zwei Extremwerte für Stall 2 aus dem Datensatz entfernt (Abbildung 3).

### Staub

Die erfasste Staubmasse aus der 24-stündigen Sammlung wurde durch Division mit dem Luftvolumenstrom in die Staubkonzentrationen je  $\text{m}^3$  Stallluft umgewandelt und der Emissionsfaktor ebenfalls nach Formel (5) berechnet. Dabei erfolgte kein Abzug der Vorbelastung. Für die Emissionsfaktorberechnung wurde ein Tagesmittelwert des Volumenstromes berechnet. Um einen für den jeweiligen Tag repräsentativen mittleren Volumenstrom zu bilden, sollten mindestens acht der 24 Stundenmittelwerte in das Tagesmittel eingehen. Tage, an denen dies durch den Windrichtungsschluss nicht der Fall war, wurden von der Emissionsfaktorberechnung ausgeschlossen.

## 3.1.2 Gärrestlager- und Auslaufmessungen

### Gase

Für jede Messung wurde die Quellstärke berechnet, indem zuerst die Messwerte als Liniendiagramm dargestellt und der lineare Bereich der Kurve bestimmt wurde. Start- und Endpunkt dieses Bereiches wurden zur Berechnung der Quellstärke nach VDI 4285-1 (VDI, 2005) verwendet:

$$q = \frac{(c_2 - c_1)V_H}{A_H \Delta t} \quad (6)$$

Dabei ist:

$q$	flächenbezogene Quellstärke [ $\text{mg m}^{-2}\text{s}^{-1}$ ]
$c_1, c_2$	Konzentrationswert zum Zeitpunkt 1 bzw. Zeitpunkt 2 [ $\text{mg m}^{-3}$ ]
$V_H$	Volumen der Haube [ $\text{m}^3$ ]
$A_H$	von der Haube abgedeckte Fläche [ $\text{m}^2$ ]
$\Delta t$	Zeitspanne zwischen den beiden Konzentrationsmessungen [s]

Diese Formel ist nur auf den linearen Kurvenbereich anzuwenden. Die Linearität des ausgewählten Kurvenbereichs wurde mit Hilfe des Bestimmtheitsmaßes überprüft ( $R^2 \Rightarrow 0,9$ ).

War kein Anstieg erkennbar, wurde der Wert 0 für die Quellstärke eingesetzt. War ein Anstieg erkennbar, aber kein eindeutiger linearer Bereich feststellbar, wurde die Messung als nicht auswertbar gewertet. Dies betraf beim Auslauf 10 Messungen für CH<sub>4</sub>. Beim Gärrestlager betraf dies für NH<sub>3</sub> 24, für N<sub>2</sub>O 3 und für CH<sub>4</sub> einen Wert. Anschließend wurden die Ausreißer bereinigt, indem Daten, die mehr als den dreifachen Interquartilsabstand vom Mittelwert aller Messungen abwichen, aus dem Datensatz entfernt wurden. Dies betraf im Auslauf für NH<sub>3</sub> 3 und für CH<sub>4</sub> 2 Werte. Bei den Gärrestlagern wurden für NH<sub>3</sub> 1, für N<sub>2</sub>O 11 und für CH<sub>4</sub> 8 Werte entfernt.

### Geruch

Zur Berechnung des Geruchsemissionsfaktors wurde zunächst die ermittelte Vorbelastung von der Geruchskonzentration des Stalles abgezogen. Anschließend wurde die Geruchskonzentration [GE/m<sup>3</sup>] mit dem Volumenstrom unter der Haube [m<sup>3</sup>/s] multipliziert. Der gewonnene Wert [GE/s] bezieht sich auf die von der Haube abgedeckte Fläche (0,068 m<sup>2</sup>) und wird auf einen Quadratmeter bezogen, indem mit 1/0,068 multipliziert wird.

$$E_{Geruch} = (K_{Ger} - K_V) * V_{Haube} * (1/0,068) \quad (7)$$

#### Dabei ist:

$E_{Geruch}$	Emissionsfaktor Geruch [GE m <sup>-2</sup> s <sup>-1</sup> ]
$K_{Ger}$	Geruchskonzentration der emittierenden Fläche [GE m <sup>-3</sup> ]
$K_V$	Geruchskonzentration der Umgebungsluft (Vorbelastung) [GE m <sup>-3</sup> ]
$V_{Haube}$	Volumenstrom unter der Haube [m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> ]

Es wurde für Gärrestlager 2 ein Geruchskonzentrationswert als Ausreißer ausgeschlossen. Alle Geruchskonzentrationswerte können im Anhang in Tabelle 25 und Tabelle 26 eingesehen werden.

# 4 Ergebnisse

## 4.1.1 Stallmessungen

### Gase

Insgesamt wurden 3503 Messstunden im gesamten Projekt realisiert. Dabei wurden in Stall 1 fünf (2 Sommer, 2 Übergang, 1 Winter) und in Stall 2 drei (1 Sommer, 1 Übergang, 1 Winter) Messkampagnen durchgeführt. Die über alle Messkampagnen gemittelte Konzentration von  $\text{NH}_3$  sowie von  $\text{CH}_4$  betrug in Stall 1  $1,30 \text{ mg NH}_3/\text{m}^3$  und  $12,91 \text{ mg CH}_4/\text{m}^3$  und lag damit leicht über dem Niveau von Stall 2 von  $0,93 \text{ mg NH}_3/\text{m}^3$  und  $11,92 \text{ mg CH}_4/\text{m}^3$ . Die jahreszeitliche Variation der Gaskonzentration ist in Tabelle 7 ersichtlich. Die höchsten Konzentrationen werden in Stall 1 im Winter erreicht, wobei für  $\text{NH}_3$  etwa das Doppelte und für  $\text{CH}_4$  das Dreifache der Sommerkonzentration erreicht wird. In Stall 2 steigt die  $\text{CH}_4$ -Konzentration gegen Winter weniger stark auf das 1,5-fache der Sommerkonzentration an. Für  $\text{NH}_3$  zeigt sich die höchste Konzentration im Übergang, wobei die Konzentrationsunterschiede zwischen den Klimabereichen generell geringer ausfallen als in Stall 1.

Die Gaskonzentration von  $\text{NH}_3$  und  $\text{CH}_4$  unterscheidet sich an beiden Standorten signifikant zwischen den beiden Messleitungen (t-Test mit verbundener Stichprobe;  $p < 0,01$ ) und damit zwischen den beiden Stallseiten. Dabei ist die Gaskonzentration in Hauptwindrichtung bei der zugluftseitigen Messleitung deutlich geringer als die der abluftseitigen Messleitung.

Nach dem Datenausschluss wurden insgesamt 1488 Messstunden in die Berechnung der Emissionsfaktoren einbezogen. Die Randbedingungen, die während der Messungen herrschten, sind in Tabelle 8 dargestellt. Trotz der unterschiedlichen Jahreszeitenanteile stellen sich die Wetterbedingungen im Mittel zwischen den Standorten sehr homogen dar.

Im Mittel hatten in beiden Ställen laktierende Kühe eine Wärmeproduktion von rund  $1.600 \text{ W}$  und trockenstehende Tiere von  $1.100 \text{ W}$ . Die mittleren Volumenströme je Klimabereich sind in Tabelle 9 ersichtlich. Der Volumenstrom wird in erster Linie durch das Zusammenspiel von Windgeschwindigkeit und Öffnungsgrad der Curtains beeinflusst. In Stall 1 zeigt sich die typische Veränderung des Volumenstroms mit den Jahreszeiten: Die höchsten Volumenströme werden im Sommer bei offenen Curtains erzielt. Mit dem abnehmenden Öffnungsgrad der Curtains im Übergang und Winter fallen auch die Volumenströme trotz höherer Windgeschwindigkeit ab. An Stall 2 kann man dies ebenfalls sehen. Trotz deutlich höherer Windgeschwindigkeit sind im Winter die Volumenströme geringer als im Sommer. Auffallend sind hier die sehr hohen Volumenströme im Übergang. Zur Überprüfung der Korrektheit der mit der  $\text{CO}_2$ -Bilanz berechneten Volumenströme wurden diese zusammen mit der Windrichtung in einem Liniendiagramm abgetragen. In Abbildung 8 sieht man, dass ein deutlicher Zusammenhang zwischen den beiden besteht und somit die  $\text{CO}_2$ -Bilanz zur Berechnung der Volumenströme grundsätzlich geeignet ist. Über die Genauigkeit der Volumenströme kann damit allerdings keine Aussage getroffen werden. Sie ist auf jeden Fall in hohem Maße von der Qualität der Eingangsdaten (Innen- $\text{CO}_2$ , Außen- $\text{CO}_2$ ) abhängig.

Die weitere Ursachenforschung für den hohen Volumenstrom im Übergang in Stall 2 ergab ungewöhnlich hohe  $\text{CO}_2$ -Außenluftkonzentrationen während der gesamten Übergangsmessung. Sobald die  $\text{CO}_2$ -Konzentration am Außenmesspunkt Beeinflussungen durch den Stall oder andere Quellen unterliegt, weichen die mit der  $\text{CO}_2$ -Bilanz berechneten Volumenströme stark vom zu erwartenden Wert ab. Es kommt zu negativen Werten oder, wie hier in Stall 2, zu sehr hohen Werten. Die Windgeschwindigkeit, die zur Plausibilitätsprüfung herangezogen wurde, war im Übergangsbereich in Stall 2 unterdurchschnittlich und passt damit nicht zu den hohen Volumenströmen. Der hohe mittlere Volumenstrom im „Übergang“ ist demnach nicht plausibel. Der in Tabelle 10 zu erkennende, deutlich nach oben abweichende Emissionsfaktor im „Übergang“ ist daher ebenfalls nicht

plausibel, wodurch für Stall 2 keine Jahresemissionsfaktoren gebildet werden können. Für Stall 1 betragen die Jahresemissionsfaktoren 18,7 kg NH<sub>3</sub>/(TP a) und 133,0 kg CH<sub>4</sub>/(TP a).

**Tabelle 7: Gaskonzentrationen im Stall aufgeschlüsselt nach Jahreszeiten**

Standort	Jahreszeit		NH <sub>3</sub> [mg/m <sup>3</sup> ]	CH <sub>4</sub> [mg/m <sup>3</sup> ]	CO <sub>2</sub> [mg/m <sup>3</sup> ]
Stall 1	Sommer	N	701	701	701
		Mittelwert	1,15	8,90	991,69
		Standardabweichung	0,62	3,67	94,03
	Übergang	N	1009	1009	1009
		Mittelwert	0,97	9,40	1051,89
		Standardabweichung	0,67	3,48	88,53
	Winter	N	470	470	470
		Mittelwert	2,22	26,41	1487,86
		Standardabweichung	1,28	15,74	397,33
	Insgesamt	N	2180	2180	2180
		Mittelwert	1,30	12,91	1126,53
		Standardabweichung	0,96	10,65	277,55
Stall 2	Sommer	N	323	323	323
		Mittelwert	0,80	9,37	1088,56
		Standardabweichung	0,35	2,94	100,71
	Übergang	N	513	513	513
		Mittelwert	1,01	11,56	1117,44
		Standardabweichung	0,42	3,85	136,14
	Winter	N	487	487	487
		Mittelwert	0,93	13,99	1306,54
		Standardabweichung	0,46	4,15	148,45
	Insgesamt	N	1323	1323	1323
		Mittelwert	0,93	11,92	1180,00
		Standardabweichung	0,43	4,17	164,96



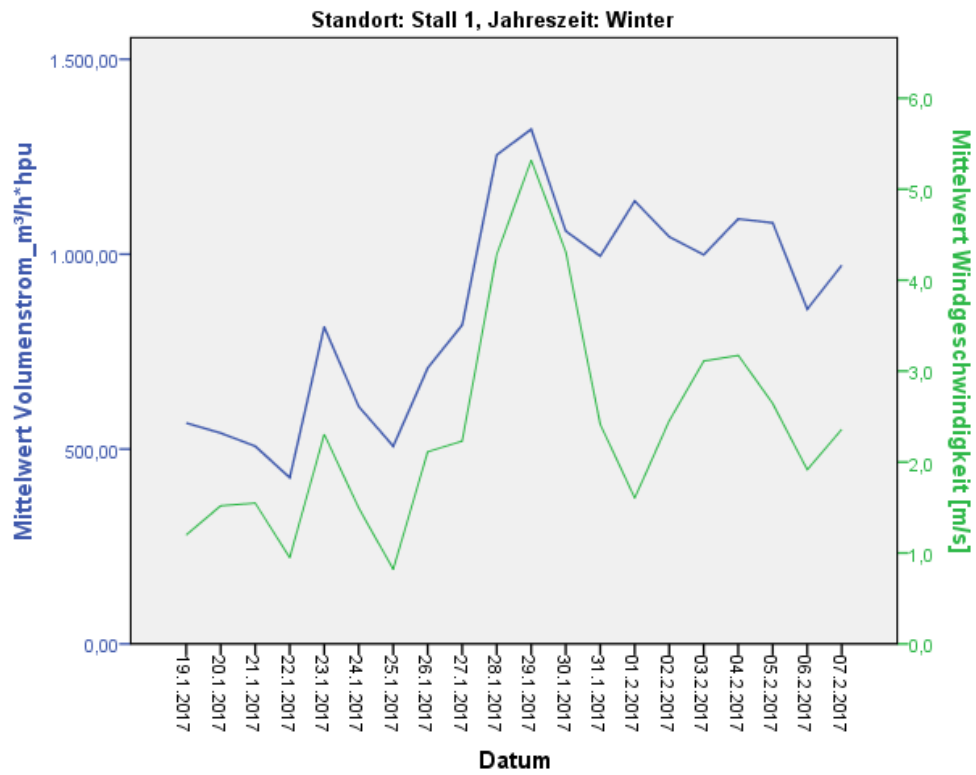
**Tabelle 8: mittlere Wetterbedingungen der Stallmessungen**

Standort		Windgeschwindigkeit [m/s]	Lufttemperatur [°C]	rel. Luftfeuchte [%]	Luftdruck [hPa]	Globalstrahlung [W/m <sup>2</sup> ]	Stalltemperatur [°C]	Stallluftfeuchte [%]
Stall 1	N	1069	1069	1061	1069	1069	1109	1109
	Mittelwert	2,64	6,94	82,59	989,06	93,92	9,61	81,72
	Standardabweichung	1,46	7,89	13,61	8,36	176,80	6,22	10,34
	Minimum	0,00	-11,21	39,07	967,45	0,00	-3,07	44,33
	Maximum	7,86	30,44	101,85	1009,00	885,25	29,89	98,09
Stall 2	N	377	377	377	377	311	377	377
	Mittelwert	2,89	6,88	80,23	987,32	99,72	9,20	87,91
	Standardabweichung	1,94	7,93	14,83	5,94	148,91	7,31	13,37
	Minimum	0,35	-4,94	28,48	969,34	0,00	0,18	37,71
	Maximum	12,21	28,53	95,90	1000,66	703,92	29,72	100,00

**Tabelle 9: mittlere Volumenströme und Windgeschwindigkeit aufgeschlüsselt nach Jahreszeit**

Standort	Jahreszeit	Volumenstrom [m³/(TP h)]	Windgeschwindigkeit [m/s]
Stall 1	Sommer	N	247
		Mittelwert	3030,88
		Standardabweichung	1252,45
	Übergang	N	468
		Mittelwert	2328,81
		Standardabweichung	974,68
	Winter	N	394
		Mittelwert	1146,21
		Standardabweichung	585,20
	Insgesamt	N	1109
		Mittelwert	2065,03
		Standardabweichung	1186,46
Stall 2	Sommer	N	87
		Mittelwert	3528,54
		Standardabweichung	1324,40
	Übergang	N	48
		Mittelwert	7829,14*
		Standardabweichung	4111,40
	Winter	N	242
		Mittelwert	1899,26
		Standardabweichung	690,83
	Insgesamt	N	377
		Mittelwert	3030,24
		Standardabweichung	2576,95

\* nicht plausibel



**Abbildung 8: Liniendiagramm des mittleren Volumenstroms und der mittleren Windgeschwindigkeit am Stall 1 im Winter**

**Tabelle 10: Emissionsfaktoren der Stallmessungen, aufgeschlüsselt nach Jahreszeit**

Standort	Jahreszeit		NH <sub>3</sub> [kg/(TP a)]	CH <sub>4</sub> [kg/(TP a)]
Stall 1	Sommer	N	247	247
		Mittelwert	20,56	99,26
		Standardabweichung	9,67	42,21
	Übergang	N	468	468
		Mittelwert	19,07	134,47
		Standardabweichung	10,94	29,00
	Winter	N	394	394
		Mittelwert	16,08	164,57
		Standardabweichung	5,85	36,49
	Insgesamt	N	1109	1109
		Mittelwert	18,34	137,32
		Standardabweichung	9,30	42,57
Stall 2	Sommer	N	87	87
		Mittelwert	29,32	244,32
		Standardabweichung	8,93	39,35
	Übergang	N	48	48
		Mittelwert	66,87*	329,19
		Standardabweichung	38,08	105,80
	Winter	N	244	244
		Mittelwert	14,09	178,14
		Standardabweichung	6,18	47,89
	Insgesamt	N	379	379
		Mittelwert	24,27	212,46
		Standardabweichung	22,94	77,09

\* nicht plausibel

## Geruch

Die Geruchsmessungen wurden an insgesamt 16 Messtagen (Stall 1: 10, Stall 2: 6) durchgeführt mit je drei Proben pro Tag. Die Einzelergebnisse sind in Tabelle 23 im Anhang ersichtlich. Das geometrische Mittel der Geruchskonzentration in Stall 1 lag bei 170 GE/m<sup>3</sup>, in Stall 2 bei 180 GE/m<sup>3</sup> (Tabelle 11). Nach Ausschluss von Daten wie in 3.1.1 beschrieben, blieben für Stall 1 17 und für Stall 2 4 Konzentrationsmesswerte übrig (Tabelle 12). Dabei sind die Messungen in Stall 1 gleichmäßig auf alle Temperaturbereiche verteilt. In Stall 2 sind durch den Windrichtungsausschluss die Sommermessungen, sowie fast alle Wintermessungen aus dem Datensatz herausgefallen. Damit ist nur der Emissionsfaktor aus Stall 1 von 87 GE/(GV s) gültig.

**Tabelle 11: geometrisches Mittel, Minimum und Maximum der Geruchskonzentration der Stallmessungen**

Geruchskonzentration [GE/m <sup>3</sup> ]				
Standort	N	geometrisches Mittel*	Minimum	Maximum
Stall 1	30	170	56	466
Stall 2	16	180	38	977

\* gerundet auf Zehnerstelle

**Tabelle 12: mittlerer Geruchsemissionsfaktor der Stallmessungen aufgeschlüsselt nach Jahreszeit**

Standort	Jahreszeit		Geruchsemissionsfaktor [GE/(GV s)]
Stall 1	Sommer	N	6
		Mittelwert	113,60
		Standardabweichung	70,50
	Übergang	N	6
		Mittelwert	105,53
		Standardabweichung	51,08
	Winter	N	5
		Mittelwert	33,57
		Standardabweichung	12,69
	Insgesamt	N	17
		Mittelwert	87,22
		Standardabweichung	60,79
Stall 2	Übergang	N	3
		Mittelwert	40,92
		Standardabweichung	25,97
	Winter	N	1
		Mittelwert	154,00
		Standardabweichung	.
	Insgesamt	N	4
		Mittelwert	69,19
		Standardabweichung	60,39

### Staub

Die Staubkonzentration wurde in Stall 1 an 10, in Stall 2 an 6 Messtagen erfasst (Anhang Tabelle 24). Die mittleren Staubkonzentrationen sind Tabelle 13 zu entnehmen. Die Gesamtstaubkonzentration unterscheidet sich signifikant zwischen den beiden Standorten.

**Tabelle 13: mittlere Staubkonzentrationen aller Stallmessungen**

Standort		Konzentration [mg/m <sup>3</sup> ]		
		Gesamtstaub	PM10	PM2,5
Stall 1	N	10	10	10
	Mittelwert	0,18*	0,03	0,02
	Standardabweichung	0,09	0,02	0,02
Stall 2	N	6	6	5
	Mittelwert	0,59*	0,05	0,02
	Standardabweichung	0,15	0,03	0,01
Insgesamt	N	16	16	15
	Mittelwert	0,34	0,04	0,02
	Standardabweichung	0,23	0,03	0,01

\* markiert Werte, die sich innerhalb der Spalte signifikant unterscheiden ( $p < 0,05$ )

Nach Ausschluss von Daten wie in 3.1.1 beschrieben, blieben für Stall 1 10 und für Stall 2 ein Konzentrationsmesswert übrig. Damit konnten die Jahresemissionsfaktoren nur für Stall 1 berechnet werden. Für Gesamtstaub, PM<sub>10</sub>-Staub und PM<sub>2,5</sub>-Staub ergaben sich folgende Emissionsfaktoren: 2,5; 0,4 und 0,2 [kg/(TP a)].

#### 4.1.2 Gärrestlagermessungen

Insgesamt wurden an den Gärrestbehältern an zwölf Messtagen Messungen durchgeführt, wobei elf der Messtage in die Untersuchung eingingen. Die erste Messung an Gärrestlager 1 war eine Probemessungen und geht daher nicht in die Statistik ein. Es wurden insgesamt 102 Einzelmessungen (45 an Gärrestlager 1, 57 an Gärrestlager 2) vorgenommen. Es wurden alle Klimabereiche (Winter, Sommer, Übergang) mit je 2 Messtagen abgedeckt. Außer an Gärrestlager 1, hier ist durch den Ausschluss der Probemessung für den Winter an Gärrestlager 1 nur eine Messung gültig. Eine Übersicht zu den durchschnittlich während der Messungen vorherrschenden Wetterbedingungen gibt Tabelle 14.

Die mittlere Windgeschwindigkeit an Gärrestlager 1 ist doppelt so hoch im Vergleich zu der in an Gärrestlager 2. Dies spielt für die Messungen allerdings eine untergeordnete Rolle, da durch das Aufsetzen der Haube während der Messung der Einfluss des Windes auf die Messstelle ausgeschlossen wird. Weiterhin sind die mittlere Lufttemperatur sowie die Globalstrahlung an Gärrestlager 1 höher, da lediglich ein Wintermesstag in die Statistik eingegangen ist. Die emissionsrelevanten Parameter Gärresttemperatur und Gärrestvolumen weisen ebenfalls Unterschiede zwischen den beiden Standorten auf. An Gärrestlager 2 ist das Gärrestvolumen deutlich geringer bei gleichzeitig höherer Durchschnittstemperatur.

**Tabelle 14: durchschnittliche Wetterbedingungen während der Gärrestlagermessungen**

Standort		Windgeschwindigkeit [m/s]	Lufttemperatur [°C]	rel. Feuchte [%]	Luftdruck [hPa]	Globalstrahlung [W/m <sup>2</sup> ]	Güllevolumen [m <sup>3</sup> ]	Oberflächentemperatur [°C]	Gärresttemperatur 1m [°C]
Gärrestlager 1	N	5	5	5	5	5	5	5	5
	Mittelwert	4,3	14,3	67,9	979,3	477,9	2172	16,0	17,1
	STD	2,6	9,4	14,5	9,0	258,1	937	11,7	5,1
	Minimum	1,7	1,8	48,3	968,0	187,9	1283	0,8	9,2
	Maximum	8,1	23,5	84,5	991,8	847,3	3763	28,0	21,3
Gärrestlager 2	N	6	6	6	6	5	6	6	6
	Mittelwert	2,1	10,8	74,7	987,7	224,3	1307	13,7	22,2
	STD	1,9	6,7	16,2	5,9	209,3	736	8,1	3,8
	Minimum	0,7	3,8	56,0	977,5	40,0	800	6,1	19,0
	Maximum	5,7	20,8	95,4	994,1	559,4	2709	28,0	29,0

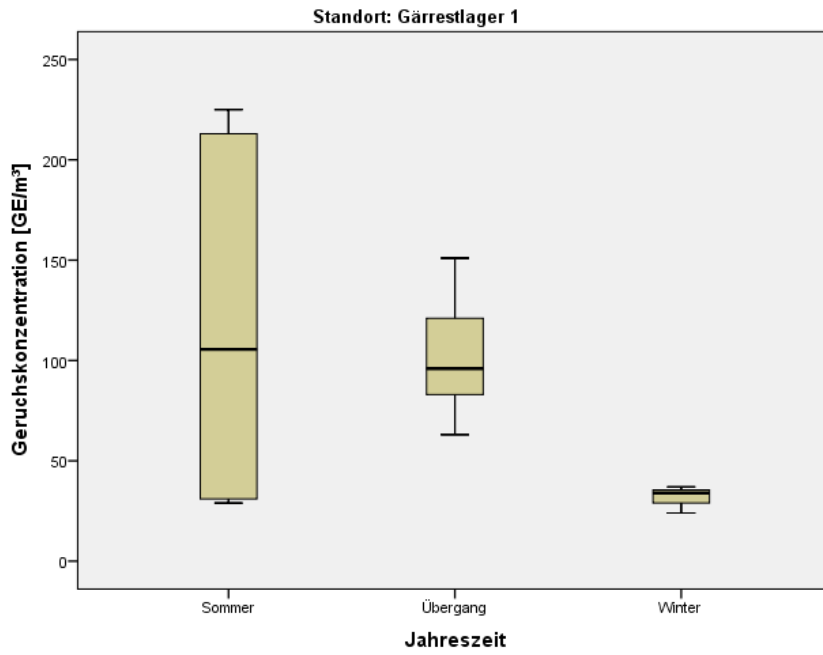
Es wurden zu gleichen Teilen Messungen auf geschlossener bzw. undichter/offener Schwimmschicht (N= ca. 40) durchgeführt. Lediglich bei Gärrestlager 2 gelang es an einem Tag Messungen ohne Schwimmschicht durchzuführen, weshalb die Anzahl an Werten mit 9 hier sehr gering ist. An beiden Standorten wurden etwa 70 % der Messungen auf feuchter und 30 % auf trockener Schwimmschicht durchgeführt. An Gärrestlager 2 wurden öfter Stellen mit einer stabilen Schwimmschicht gemessen, während das Verhältnis zwischen Messstellen mit stabiler und instabiler Schwimmschicht an Gärrestlager 1 gleich war.

Betrachtet man die Geruchskonzentrationswerte der beiden Standorte in Abbildung 9 und Abbildung 10, erkennt man in Gärrestlager 1 eine relativ gleichmäßige Geruchskonzentration des Gärrestes über das Jahr hinweg, wobei in Gärrestlager 2 signifikante Unterschiede innerhalb des Jahres auftreten. Die Geruchskonzentration im Sommer und Übergang unterscheiden sich hier signifikant von denen im Winter ( $p < 0,01$ ). Die Entwicklung der Geruchskonzentrationshöhe in den Jahreszeiten verläuft an den beiden Standorten genau gegensätzlich. Das geometrische Mittel der Geruchskonzentration in Gärrestlager 1 liegt bei 73 GE/m<sup>3</sup>, das in Gärrestlager 2 bei 681 GE/m<sup>3</sup>. Alle Einzelwerte der Geruchskonzentrationsanalyse sind im Anhang in Tabelle 25 zu finden.

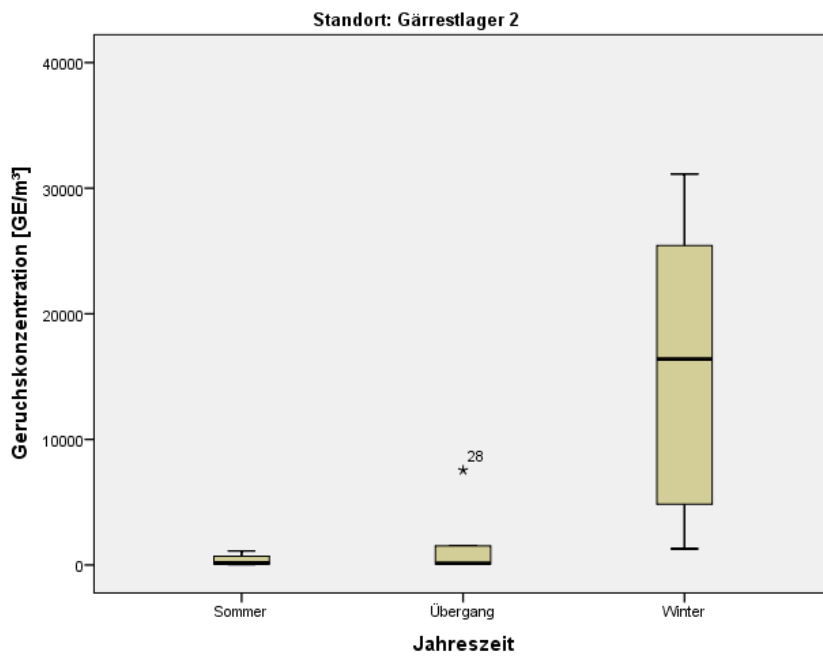
Das Ergebnis der Emissionsfaktorenberechnung sind Tabelle 15 zu entnehmen. Die mittleren NH<sub>3</sub>-Werte sind an Gärrestlager 1 mit 0,83 g/(m<sup>2</sup> d) deutlich höher als an Gärrestlager 2 mit 0,33 g/(m<sup>2</sup> d). Die N<sub>2</sub>O-Werte unterscheiden sich in ähnlicher Größenordnung (0,29 vs. 0,08 g/(m<sup>2</sup> d)) zwischen den beiden Behältern. Der Vergleich der beiden Behälter zeigt für NH<sub>3</sub>, N<sub>2</sub>O und Geruch signifikante Unterschiede ( $p < 0,05$ ). Lediglich die CH<sub>4</sub>-Emissionen sind bei beiden Behältern nicht signifikant verschieden.

Trotz der höheren Gasemissionen liegen die Geruchsemissionen im Mittel an Gärrestlager 1 mit 0,05 GE/(m<sup>2</sup> s) signifikant niedriger als an Gärrestlager 2 mit 0,29 GE/(m<sup>2</sup> s), was auf die bereits erwähnten, deutlich höheren Geruchskonzentrationen an Gärrestlager 2 zurückzuführen ist.





**Abbildung 9: Boxplots der Geruchskonzentration der Jahreszeiten an Gärrestlager 1**



**Abbildung 10: Boxplots der Geruchskonzentration der Jahreszeiten an Gärrestlager 2**

Insgesamt wurde ein Emissionsfaktor für NH<sub>3</sub> von 0,60 g/(m<sup>2</sup> d), für CH<sub>4</sub> von 215,15 g/(m<sup>2</sup> d), für N<sub>2</sub>O von 0,16 g/(m<sup>2</sup> d) sowie für Geruch von 1,72 GE/(m<sup>2</sup> s) ermittelt.

Die Korrelationsanalyse nach Spearman ergab positive Zusammenhänge zwischen der NH<sub>3</sub>- und N<sub>2</sub>O-Emissionsrate und der Lufttemperatur von 0,37 bzw. 0,56.

**Tabelle 15: mittlere Emissionsfaktoren der Gärrestlagermessungen**

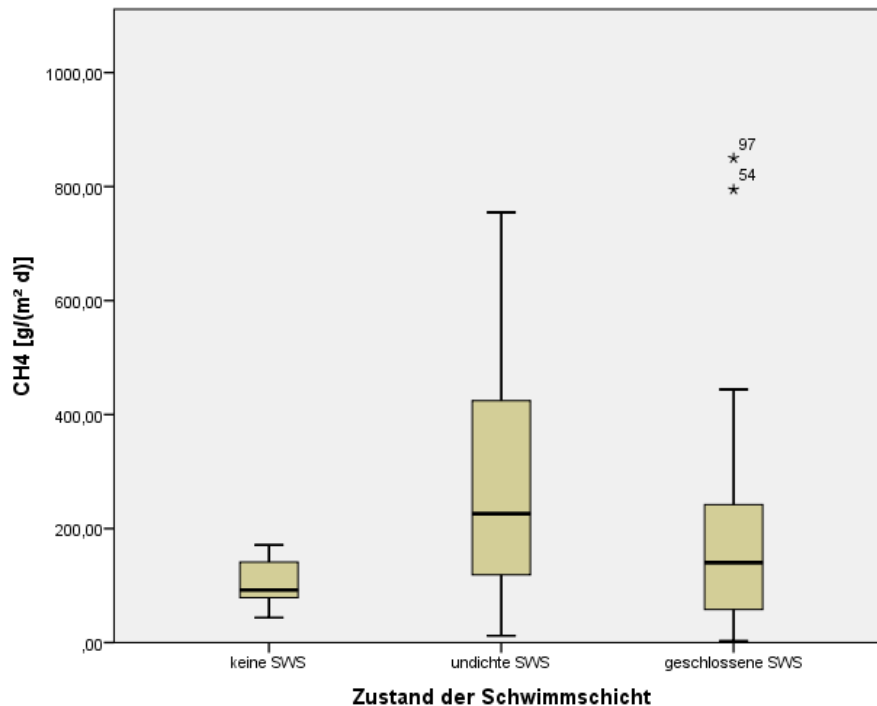
Standort		NH <sub>3</sub> [g/(m <sup>2</sup> d)]	CH <sub>4</sub> [g/(m <sup>2</sup> d)]	N <sub>2</sub> O [g/(m <sup>2</sup> d)]	Geruch [GE/(m <sup>2</sup> s)]
Gärrestlager 1	N	42	35	33	15
	Mittelwert	0,83*	231,22	0,29*	0,05
	Standardabweichung	0,94	213,14	0,41	0,05
Gärrestlager 2	N	35	56	55	17
	Mittelwert	0,33*	205,11	0,08*	3,18
	Standardabweichung	0,59	178,32	0,11	5,95
Insgesamt	N	77	91	88	32
	Mittelwert	0,60	215,15	0,16	1,72
	Standardabweichung	0,83	191,72	0,28	4,56

\* markiert Werte, die sich innerhalb der Spalte signifikant unterscheiden (p<0,05)

Um Effekte der Oberflächenbeschaffenheit der Gärrestoberfläche zu untersuchen, wurde mit der SPSS® Funktion ONEWAY ein Mittelwertvergleich der einzelnen Oberflächenkategorien (siehe Tabelle 5) mit anschließendem Tukey-Test durchgeführt. Es zeigen sich signifikante Unterschiede der CH<sub>4</sub> und N<sub>2</sub>O Emission innerhalb der Kategorie „Zustand der Schwimmschicht“. Dabei unterscheiden sich die Emissionen der undichten und der geschlossenen Schwimmschicht signifikant. Für Lachgas sind die Emissionen auf geschlossener Schwimmschicht signifikant höher, als auf undichter Schwimmschicht. Für Methan verhält es sich anders herum, hier sind die Emissionen auf undichter Schwimmschicht höher, als auf geschlossener Schwimmschicht (siehe Abbildung 11). Dies ist dadurch zu erklären dass Lachgas direkt in der Schwimmschicht entsteht, während Methan unterhalb der Schwimmschicht im Gärrest entsteht. Aufgrund der geringen Anzahl an Messwerten auf offener Gärrestoberfläche konnten keine statistischen Unterschiede zur Kategorie „keine Schwimmschicht“ gefunden werden.

Die Stabilität der Schwimmschicht hat lediglich auf die NH<sub>3</sub>-Emission einen signifikanten Einfluss. Eine instabile Schwimmschicht geht dabei mit höheren Emissionen einher als eine stabile Schwimmschicht.

Es traten keine signifikanten Effekte in Abhängigkeit zur Schwimmschichtfeuchte auf.



**Abbildung 11: Boxplots der Methanemissionen in Abhängigkeit des Schwimmschichtzustandes**

### 4.1.3 Auslaufmessungen

Innerhalb von zehn Monaten wurden am Auslauf 1 an sechs Messtagen insgesamt 54 Gasmessungen sowie 18 Geruchsmessungen durchgeführt. Es wurden alle Klimabereiche (Winter, Sommer, Übergang) mit je zwei Messtagen abgedeckt. Eine Übersicht zu den durchschnittlich während der Messungen vorherrschenden Wetterbedingungen gibt Tabelle 16.

**Tabelle 16: durchschnittliche Wetterbedingungen während der Auslaufmessungen**

	Oberflächen-temp. [°C]	Windgeschwindigkeit [m/s]	Luft-temp. [°C]	rel. Luftfeuchte [%]	Luftdruck [hPa]	Globalstrahlung [W/m²]
N	18	18	18	18	18	18
Mittelwert	13,7	2,0	12,1	68,1	1007	354,0
Standardabweichung	6,5	0,6	7,3	15,9	12	299,2
Minimum	4,4	1,0	1,7	33,8	983	48,9
Maximum	22,1	2,8	22,7	87,0	1021	873,6

Beim Verschmutzungsgrad wurden am häufigsten leicht und stark verschmutzte Flächen beprobt. Bei der Verschmutzungsart wurden vor allem Messstellen, die sowohl mit Kot als auch Urin verschmutzt sind, ausgewählt. Die Feuchte der Messstellen ist von trocken bis nass gleichmäßig verteilt.

Die ermittelten Emissionsfaktoren der Gase sowie für Geruch sind in Tabelle 18 abgebildet. Die mittlere Quellstärke liegt für NH<sub>3</sub> bei 0,27 g/(m<sup>2</sup> d) und für CH<sub>4</sub> bei 0,11 g/(m<sup>2</sup> d). Es konnte keine nennenswerte N<sub>2</sub>O-Emission des Auslaufes festgestellt werden. NH<sub>3</sub> und CH<sub>4</sub> Emissionen weisen Korrelationskoeffizienten nach

Spearman bezüglich der Oberflächentemperatur von 0,4 bzw. 0,5 auf. CH<sub>4</sub> weist zudem noch Korrelationen zur Lufttemperatur und zur Globalstrahlung mit einem Korrelationskoeffizienten von 0,5 auf.

Das geometrische Mittel der Geruchskonzentration lag bei 1000 GE/m<sup>3</sup> (Tabelle 17). Die Geruchskonzentrationen der einzelnen Messungen sind im Anhang in Tabelle 26 ersichtlich. Die Korrelationsanalyse nach Spearman ergab einen hoch signifikanten Zusammenhang der Geruchskonzentration zur Oberflächentemperatur von 0,67. Die Geruchemission lag im Mittel bei 1,29 GE/(m<sup>2</sup> s).

**Tabelle 17: geometrisches Mittel, Minimum und Maximum Geruchskonzentration der Auslaufmessungen**

Geruchskonzentration [GE/m <sup>3</sup> ]				
Datum	N	Geometrisches Mittel*	Minimum	Maximum
23.5.2017	3	5000	3758	6675
22.8.2017	3	1700	870	2686
26.9.2017	3	850	523	1714
10.10.2017	3	680	372	1224
19.12.2017	3	2100	1092	3003
06.3.2018	3	130	62	237
Insgesamt	18	1000	62	6675

\*dreistellige Zahlen gerundet auf Zehnerstelle, vierstellige Zahlen gerundet auf Hunderterstelle

**Tabelle 18: Emissionsfaktoren der Auslaufmessungen**

	NH <sub>3</sub> [g/(m <sup>2</sup> d)]	CH <sub>4</sub> [g/(m <sup>2</sup> d)]	N <sub>2</sub> O [g/(m <sup>2</sup> d)]	Geruch [GE/(m <sup>2</sup> s)]
N	51	42	54	18
Mittelwert	0,27	0,11	0,00	1,29
Standardabweichung	0,31	0,24	0,00	1,35

Um Effekte der Oberflächenbeschaffenheit des Auslaufs zu untersuchen, wurde mit der SPSS® Funktion ONE-WAY ein Mittelwertvergleich der einzelnen Oberflächenkategorien (Tabelle 6) mit anschließendem Tukey-Test durchgeführt. Für NH<sub>3</sub> besteht signifikante Unterschiede innerhalb der Kategorie „Art der Verschmutzung“. Dabei unterscheiden sich alle Kategorien signifikant voneinander. Es besteht zwischen den Kategorien „vorrangig Kot“ und „vorrangig Urin“ ein hoch signifikanter Unterschied (p<0,01). Zu erwähnen ist, dass hinter der Kategorie „vorrangig Urin“ nur eine Messung mit drei Messwerten liegt.

Betrachtet man die Geruchskonzentration im Hinblick auf die Messstellenfeuchte in Abbildung 13, scheint die Geruchskonzentration mit der Feuchte zuzunehmen. Dieser Effekt lässt sich jedoch nicht statistisch sichern. Auch die Art der Verschmutzung sowie der Verschmutzungsgrad haben keinen signifikanten Effekt auf die Geruchskonzentration.

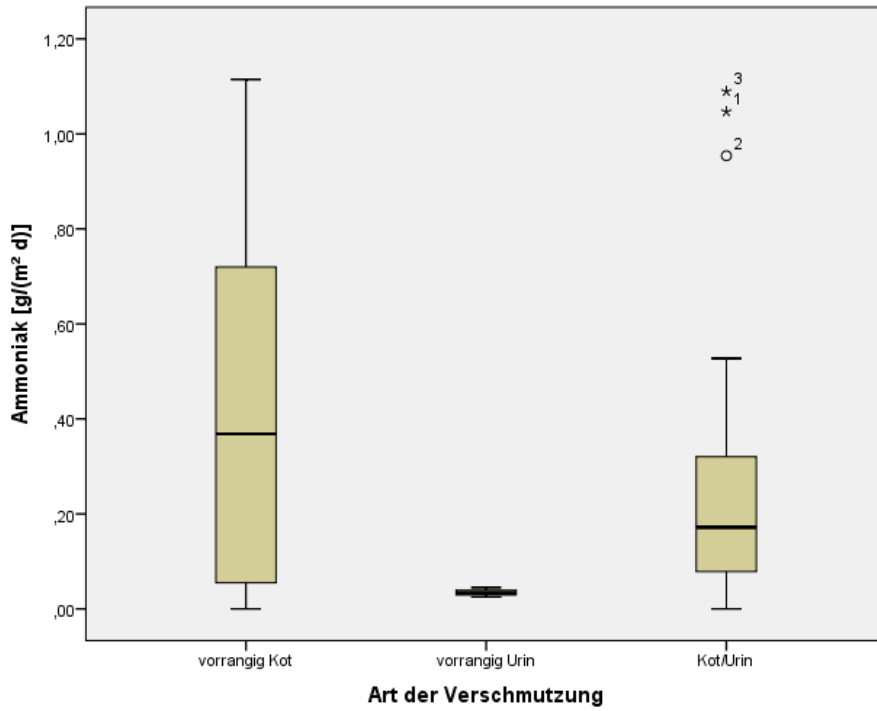


Abbildung 12: Boxplots der Ammoniakemission in Abhängigkeit der Art der Verschmutzung

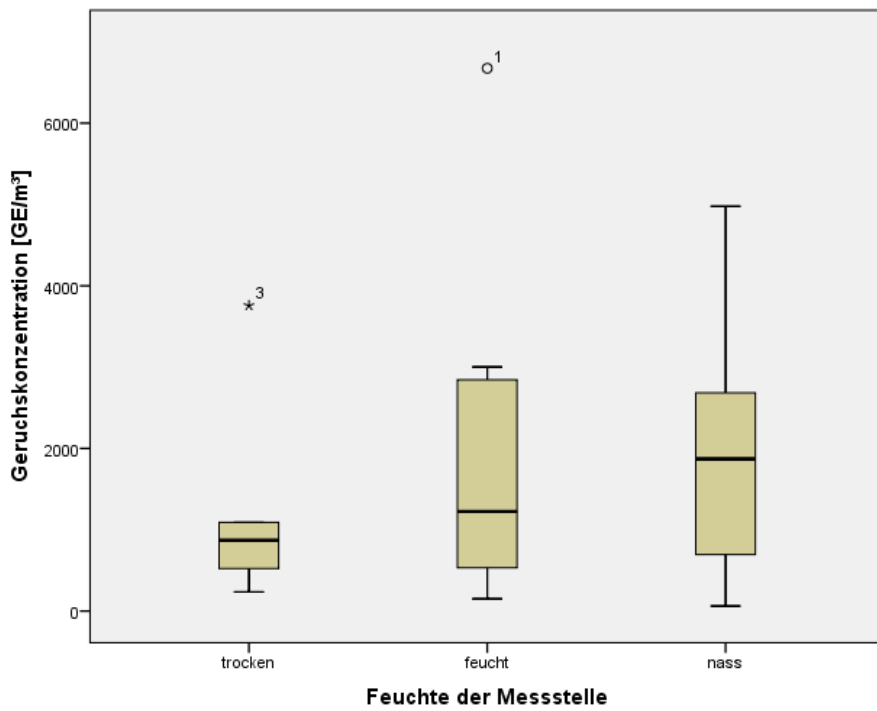


Abbildung 13: Geruchskonzentration in Abhängigkeit der Messstellenfeuchte

# 5 Diskussion

## 5.1.1 Stallmessungen

Grundsätzlich hat sich die CO<sub>2</sub>-Bilanz als geeignetes Mittel zur Berechnung der Volumenströme herausgestellt. Wichtig dabei ist die Qualität der Eingangsdaten (CO<sub>2</sub>-Konzentration der Außen- und Innenluft). Dabei sind die CO<sub>2</sub>-Konzentration der Außenluft und damit auch der Standort des Außenmesspunktes von zentraler Bedeutung.

Der ermittelte Emissionsfaktor für NH<sub>3</sub> von 18,7 kg/(TP a) übersteigt den bestehenden Wert von 12,0 kg/(TP a) für Liegeboxenlaufställe mit Flüssigmistverfahren aus dem Nationalen Bewertungsrahmen Tierhaltungsverfahren (KTBL). Es ist jedoch darauf hinzuweisen, dass durch die Unsicherheit der Regression von 34 % ein Vertrauensbereich von 12,3 bis 25,1 kg NH<sub>3</sub>/(TP a) besteht.

Der CH<sub>4</sub>-Emissionsfaktor von 133,0 kg/(TP a) befindet sich innerhalb der im Nationalen Bewertungsrahmen aufgeführten Spanne von 87,6-170,8 kg/(TP a).

Der Konventionswert für den Geruchemissionsfaktor für Milchviehhaltung der VDI 3894-1 beträgt 12 GE/(GV s). Der im Projekt ermittelte gültige Wert aus Stall 1 beträgt 87 GE/(GV s) und liegt damit um den Faktor 7 über dem Konventionswert. Da der Volumenstrom zu den Messtagen eher unterdurchschnittlich war, ist die Ursache hierfür in den hohen Geruchskonzentrationen zu sehen. Im Projekt „Quantifizierung von Emissionen in der Rinderhaltung“ (Heidenreich et al. 2008) wurden bereits Geruchsanalysen durchgeführt, wobei Werte zwischen ca. 20 und 150 GE ermittelt wurden. Hierbei ist zu bedenken, dass die Probenahme an den Stalllängsseiten am Übergang zur Umgebungsluft durchgeführt wurden. In diesem Projekt wurden die Proben in der Stallmitte jeweils an einem Übertrieb zwischen Futter- und Laufgang genommen. Die Übertriebe werden maximal einmal am Tag gereinigt, sodass hier den ganzen Tag Kot und Urin vorhanden sind. Zudem sind die Abwurfschächte der Schieber in der Nähe der Probenahmestellen, sodass die Probenahme direkt am Ort der Geruchsentstehung durchgeführt wurde.

Die Gesamtstaubkonzentration unterscheidet sich signifikant zwischen Stall 1 und Stall 2. Dabei wurde im Mittel in Stall 2 das 3-fache der Gesamtstaubkonzentration aus Stall 1 gefunden. Die wahrscheinlichste Ursache hierfür ist das Einstreuregime der Betriebe. Während in Stall 1 nur einmal im Monat eingestreut wird, erfolgt dies in Stall 2 jede Woche.

Im Vergleich mit dem Konventionswert von 0,6 kg/(TP a) liegt der hier ermittelte Emissionsfaktor für Gesamtstaub aus Stall 1 mit 2,5 kg/(TP a) um das 4-fache darüber. Auch der Emissionsfaktor für PM<sub>10</sub> Staub von 0,4 kg/(TP a) liegt über dem Wert der VDI 3894-1 mit 0,18 kg/(TP a) (30 % des Gesamtstaubwertes). Hier allerdings nur um das 2-fache. Die Werte der VDI sind allerdings nicht validiert und aus den Messungen zum LfULG-Projekt „Quantifizierung von Emissionen in der Rinderhaltung“ (Heidenreich et al. 2008) entnommen. Die Werte beziehen sich auf einen Stall mit Hochboxen. Für den Stall mit Fressliegeboxen mit Festmistverfahren wurde 1,3 kg/(TP a) Gesamtstaub ermittelt. Dieser Wert ist eher mit dem in diesem Projekt ermittelten Wert von 2,5 kg/(TP a) vergleichbar.

## 5.1.2 Gärrestlagermessungen

Für den Vergleich der gewonnenen Werte stehen außer für Geruch keine validierten Daten zur Verfügung. Dies spiegelt die allgemein schlechte Datenlage solcher Messungen wieder. Die Vergleichbarkeit der vorhandenen Werte ist zudem schwierig, da vielfältige Messmethoden (Probenahmeorte, Probenahmedauer, Messgerät usw.) zum Einsatz kommen und die Rahmenbedingungen (Temperatur usw.) sehr unterschiedlich sein können. Es soll hier dennoch versucht werden, die ermittelten Werte einzuordnen.

Der Emissionsfaktor für  $\text{NH}_3$  der VDI 3894-1 liegt bei  $6 \text{ g}/(\text{m}^2 \text{ d})$  für eine offene Gülleoberfläche. Man geht von einer Reduzierung der Emissionen durch die Bildung einer Schwimmschicht von 80 % aus, woraus ein Emissionsfaktor von  $1,2 \text{ g}/(\text{m}^2 \text{ d})$  resultiert. Minato et al. (2013) fanden geringe Werte von  $0,46 - 0,73 \text{ g}/(\text{m}^2 \text{ d})$ . Der im Projekt ermittelte Emissionsfaktor von  $0,6 \text{ g}/(\text{m}^2 \text{ d})$  passt sehr gut zu den Werten von Minato et al. (2013), ist jedoch im Vergleich zur VDI recht niedrig.

Für  $\text{CH}_4$  konnte eine Untersuchung von Kaharabata et al. (1998) gefunden werden, in der im Mittel  $202,7 \text{ g}/(\text{m}^2 \text{ d})$  ( $49000 \text{ m}^3/\text{a}$  bei  $452 \text{ m}^2$  Behälteroberfläche) angegeben wird. Dieser Wert korrespondiert gut mit dem hier gewonnen Mittel von  $215,15 \text{ g}/(\text{m}^2 \text{ d})$ . Jedoch ist die Messmethodik eine ganz andere (Sammlung von Luftproben 1 m unter und 0,5 m über Behälterrang, Analyse im Gaschromatograph). Die Werte von Minato et al. (2013) von  $34,3 - 54,8 \text{ g}/(\text{m}^2 \text{ d})$  sind trotz der hohen Ähnlichkeit in der Messmethodik sehr viel niedriger. Auch andere Autoren weisen niedrigere Emissionsfaktoren von  $4,0 - 33,7 \text{ g}/(\text{m}^2 \text{ d})$  für  $\text{CH}_4$  aus (Jayasundara et al. 2016). In diesem Licht erscheint der Emissionsfaktor von  $215,15 \text{ g}/(\text{m}^2 \text{ d})$  als deutlich zu hoch. Jedoch handelt es sich bei allen diesen Literaturwerten um reine Rindergülle, die nicht vergoren wurde. Dabei ist zu bedenken, dass die  $\text{CH}_4$ -Emissionen von vergorener Gülle durch die Nachgärung deutlich höher ausfallen. Dies könnte eine Erklärung für die vergleichsweise hohen Werte sein. Bei der Plausibilitätsprüfung der berechneten Quellstärken der Gärrestlager fiel zudem auf, dass bei einigen Messstellen innerhalb der drei Messwiederholungen stark abfallende Kurvenanstiege auftraten. Dabei ist der Anstieg der ersten Messung deutlich höher als den beiden darauf folgenden Messungen an der gleichen Messstelle. Dies lässt darauf schließen, dass hier durch das Aufsetzen der Messhaube auf die Gärrestoberfläche Gasblasen, die sich unter der Schwimmschicht angesammelt haben, auf einmal freigesetzt wurden. Da diese durch die Messung hervorgerufene Beschleunigung der Gasfreisetzung nicht dem natürlichen Emissionsverhalten des Gärrestlagers entspricht, wurden diese Messwerte für die weitere Auswertung nicht berücksichtigt und nicht in den Emissionsfaktor einberechnet. Dies betraf zwei Werte für  $\text{N}_2\text{O}$  und zwölf Werte für  $\text{CH}_4$ . Trotz des Datenausschlusses kann nicht ausgeschlossen werden, dass auch die verwendeten Messwerte durch die Erschütterung der Schwimmschicht höher ausfallen als unter ungestörten Bedingungen. Insgesamt ist der Emissionsfaktor für  $\text{CH}_4$  als unsicher zu betrachten.

Der Emissionsfaktor für  $\text{N}_2\text{O}$  von  $0,16 \text{ g}/(\text{m}^2 \text{ d})$  passt gut zu den Werten von Minato et al. (2013) ( $0 - 0,0682 \text{ g}/(\text{m}^2 \text{ d})$ ) oder Jayasundara et al. (2016) ( $<0,1 \text{ g}/(\text{m}^2 \text{ d})$ ).

Für Geruch existiert ein Konventionswert von  $3 \text{ GE}/(\text{m}^2 \text{ s})$  bei offener Gülleoberfläche in der VDI 3984-1. Setzt man wieder eine 80 %ige Minderung durch die Schwimmschicht voraus, ergibt das einen Emissionsfaktor von  $0,6 \text{ GE}/(\text{m}^2 \text{ s})$ . Der hier ermittelte Wert von  $1,72 \text{ GE}/(\text{m}^2 \text{ s})$  liegt deutlich darüber, beinhaltet jedoch auch Messungen ohne Schwimmschicht.

### 5.1.3 Auslaufmessungen

Bei der Auswertung der Kurven fiel auf, dass die  $\text{NH}_3$ -Konzentrationen sehr gleichmäßig und mit wenig Rauschen anstiegen. Nach dem Aufsetzen der Haube dauerte es 30-40 Sekunden, bis ein Anstieg der Gaskonzentrationen sichtbar war. Bei  $\text{CH}_4$  war eine deutliche höhere Schwankungsbreite innerhalb der Messungen aber auch während der Spülung der Haube mit Umgebungsluft zu erkennen. Oftmals stieg die  $\text{CH}_4$ -Konzentration stark an, wenn die Haube von der Fläche abgenommen oder aufgesetzt wurde. Hier scheint die Bewegung der Haube durch die methanhaltige Umgebungsluft zu einem extremen Anstieg der Konzentration zu führen. Der Anstieg vor dem Aufsetzen der Haube darf dabei nicht mit dem Anstieg unter der Haube verwechselt werden, was zu einer Berechnung zu hoher Methanemissionen führen würde. Ein Vergleich der in dieser Untersuchung ermittelten Quellstärke für  $\text{NH}_3$  von  $0,27 \text{ g}/(\text{m}^2 \text{ d})$  mit vorhandenen Werten aus der Literatur zeigt, dass der hier ermittelte Wert deutlich unter dem Konventionswert von  $8,0 \text{ g}/(\text{m}^2 \text{ d})$  (VDI 2011) liegt. Dieser Wert ist jedoch aus der Literatur abgeleitet und nicht validiert. Die Analysen der Oberflächenkategorien zeigte, dass leicht verschmutzte Flächen über-, und Urinstellen unterrepräsentiert sind. Dies könnte zu der geringen

NH<sub>3</sub>-Quellstärke beigetragen habe, kann aber nicht die alleinige Ursache sein. Die Architektur der Haube mit kleinem Volumen und die Abschirmung der Messstelle von der Umwelt kann ebenfalls zu der geringen NH<sub>3</sub> - Quellstärke geführt haben. Bei einem Methodenvergleich fanden Smith et al. (2007) auf gedüngten Ackerflächen mit einer geschlossenen Haube und Passivsammlung nur 1-5 % des NH<sub>3</sub> -Verlustes im Vergleich zur Messung mit Windtunnel. Zurückgeführt wird dies auf eine geringere Diffusionsrate durch den Ausschluss des Windeinflusses. Unter der Annahme, dass die ermittelten 0,27 g/(m<sup>2</sup> d) NH<sub>3</sub> lediglich 5 % der Quellstärke entsprechen, ergäbe sich eine Quellstärke von insgesamt 5,4 g/(m<sup>2</sup> d), die besser zum bestehenden Konventionswert von 8 g/(m<sup>2</sup> d) passen würde.

Ein Vergleich der ermittelten CH<sub>4</sub>-Quellstärke von 0,11 g/(m<sup>2</sup> d) mit der von Misselbrook et al. (2001) von 0,36 - 0,43 mg/(m<sup>2</sup> h) [entspricht 0,0086 – 0,01 g/(m<sup>2</sup> d)], die ebenfalls mit Hilfe einer Haube gemessen wurde, zeigt den gegenteiligen Trend zu NH<sub>3</sub>. Hier liegt der ermittelte Wert über dem Literaturwert.

Der ermittelte Wert für N<sub>2</sub>O von 0,0 g/(m<sup>2</sup> d) stimmt mit den Werten von Misselbrook et al. (2001) und Jayasundara et al. (2016) überein.

Für die Geruchsemission von Ausläufen gibt es bisher keinen VDI-Konventionswert. Allerdings ist in der sächsischen Emissionsdatenbank ein berechneter Wert von 2,7 GE/(m<sup>2</sup> s) zu finden, der in derselben Größenordnung liegt wie der hier ermittelte Wert von 1,29 GE/(m<sup>2</sup> s).



# 6 Fazit

## 6.1.1 Stallmessungen

- Der Multigasmonitor ist nur bedingt für Messungen im Rinderstall geeignet. Die Tagesprofile der Gaskonzentration lassen sich damit gut darstellen, die absoluten Messwerte weichen jedoch je nach Gas deutlich von den Werten des FTIR ab.
- Die CO<sub>2</sub>-Bilanz liefert grundsätzlich plausible Volumenströme. Die Genauigkeit dieser Volumenströme ist jedoch nur so gut wie die Qualität der eingehenden Berechnungsdaten. Der Standort des Außenmesspunktes ist dabei von besonderer Bedeutung und sollte sorgfältig ausgewählt werden. Beeinflussungen des Stalles oder anderer CO<sub>2</sub>-Quellen sind dabei soweit wie möglich auszuschließen.
- Der Datenausschluss nach Windrichtungen konnte für Stall 2 nicht garantieren, dass der Außenmesspunkt vom Stall unbeeinflusst war. Dies könnte am Relief des Standortes und damit verbundenen ungünstigen Luftströmungen gelegen haben. Es könnte jedoch auch sein, dass die Wetterstation ungünstig gelegen war sodass die Windrichtung an der Wetterstation nicht der Windrichtung am Außenmesspunkt entsprach. Zukünftig sollte die Wetterstation daher möglichst nah am Außenmesspunkt platziert sein.
- Für Stall 1 konnten Jahresemissionsfaktoren abgeleitet werden, die für Ammoniak 18,7 kg/(TP a), Methan 133,0 kg/(TP a), Gesamtstaub 2,5 kg/(TP a); PM<sub>10</sub>-Staub 0,4 kg/(TP a); und PM<sub>2,5</sub>-Staub 0,2 kg/(TP a) betragen. Die Emissionsfaktoren liegen damit teils über den bestehenden Konventionenwerten.
- Die Geruchsemissionen in Stall 1 waren mit rund 87 GE/(GV s) sehr hoch was wahrscheinlich auf die Probenentnahmestelle mitten im Stall zurückzuführen ist. Zukünftig sollte die Geruchskonzentration an den Stallwänden am Übergangsbereich zur Außenluft, wenn möglich, abluftseitig bestimmt werden, um hieraus einen realistischen Geruchsemissionsfaktor abzuleiten.

## 6.1.2 Gärrestlager und Auslauf

- Die Herangehensweise mit der Messhaube hat grundsätzlich funktioniert. Es waren Konzentrationsanstiege von Ammoniak sowie Methan sichtbar.
- Problematisch bei der gewählten Herangehensweise ist die Erschütterung beim Aufsetzen der Messhaube auf die Gärrestoberfläche. Sie könnte ein Grund für die hohen Methanemissionen sein.
- Gärrestlager: Für Ammoniak wurden im Mittel 0,6 g/(m<sup>2</sup> d); für Methan 215,15 g/(m<sup>2</sup> d); für Lachgas 0,16 g/(m<sup>2</sup> d); und für Geruch 1,72 GE/(m<sup>2</sup> s) als Emissionsfaktoren berechnet. Die beiden untersuchten Gärrestlager wiesen einzig bei der Methanemission keine signifikanten Unterschiede auf.
- Sowohl der Zustand als auch die Stabilität der Schwimmschicht hatten einen signifikanten Einfluss auf die Emissionen einzelner Gase.
- Auslauf: Für Ammoniak wurden im Mittel 0,27 g/(m<sup>2</sup> d); für Methan 0,11 g/(m<sup>2</sup> d); für Lachgas 0,0 g/(m<sup>2</sup> d); und für Geruch 1,29 GE/(m<sup>2</sup> s) als Emissionsfaktoren berechnet.
- Die Ammoniakemissionen weisen signifikante Unterschiede innerhalb der Kategorie „Art der Verschmutzung“ auf.
- Der Vergleich der gewonnenen Ergebnisse mit Literaturwerten ist aufgrund der Heterogenität der Herangehensweise jeder einzelnen Untersuchung sehr schwierig und lässt keine Aussage zu, ob die hier gewonnenen Ergebnisse der Gärrest- und Auslaufmessungen tendenziell hoch oder niedrig einzuordnen sind.

# 7 Literaturverzeichnis

- Aarnink, A. J. A.; Blanes-Vidal, H.; Chwalibog, A.; Haeusseman, M.; Heetkamp, J. W.; Pedersen, S., V. (2008): „Carbon Dioxide Production in Animal Houses: A Literature Review“. *Agricultural Engineering International X*, Nr. BC 08 008
- Chadwick, D.R.; Ellis, S; Misselbrook, T. H.; Pain, B. F. und Webb, J. (2001): „Gaseous emissions from outdoor concrete yards used by livestock“. *Atmospheric Environment* 35, Nr. 31 (1. November 2001): 5331–38
- CIGR. „Climatization of Animal Houses“(1984): Scottish Farm Building Investigation Unit
- Desjardins, R. L; Kaharbata, S. K. und Schuepp, P. H. (1998): „Methane Emissions from above Ground Open Manure Slurry Tanks“. *Global Biogeochemical Cycles* 12, Nr. 3 (September 1998): 545–54
- Heidenreich, Thomas; Höferth, Carsten ; LIPPMANN, JENS und Wanka, Uta (2008): „Quantifizierung von Emissionen in der Rinderhaltung“. Schriftenreihe des Landesamtes für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie Heft 33/2008
- Jayasundara, Susantha,; Kebreab, Ermias;Ranga Niroshan Appuhamy, J.A.D und Wagner-Riddle, Claudia (2016): „Methane and Nitrous Oxide Emissions from Canadian Dairy Farms and Mitigation Options: An Updated Review“. Hrsg: J. Plaizier. *Canadian Journal of Animal Science* 96, Nr. 3 (September 2016): 306–31
- KTBL „Nationaler Bewertungsrahmen Tierhaltungsverfahren“(o. J.): <https://daten.ktbl.de/nbr/postHv.html;jsessionid=D39B1EABE63A343154829AEDFB22DA33#start> Datum: 27.04.2020
- Kouda, Yasuyuki; Minato, Keiko; OSADA, TAKASHI; Satoshi, Hara; Tamura, Tadashi und Yamakawa, Masaaki (2013): „Determination of GHG and Ammonia Emissions from Stored Dairy Cattle Slurry by Using a Floating Dynamic Chamber“. *Animal Science Journal = Nihon Chikusan Gakkaiho* 84, Nr. 2 (Februar 2013): 165–77
- VDI „VDI 4285-1(2005): Messtechnische Bestimmung der Emissionen diffuser Quellen Grundlagen“, Juni 2005
- VDI „VDI 3894-1(2011): Emissionen und Immissionen aus Tierhaltungsanlagen“

# Anhang

**Tabelle 19: Spezifikationen der Messgeräte und der Probenahme der Stallmessungen**

<b>Stalltemperatur- und feuchte:</b>	
Messgerät:	TinyTag Plus
Messbereich:	-30 – 50 °C; 0 - 100%
Genauigkeit:	± 0,5 °C (bei -15 - 40 °C); ± 3%
<b>Gaskonzentration:</b>	
Messgerät:	<b>Multigasmonitor 1312, Fa. Innova Air Tech Instruments</b>
Komponenten:	CO <sub>2</sub> , N <sub>2</sub> O, CH <sub>4</sub> , NH <sub>3</sub> , H <sub>2</sub> O
Messverfahren:	Photoakustische IR-Spektroskopie
Messbereichsendwerte nach Herstellerangaben:	CO <sub>2</sub> ... 1500 ppm, N <sub>2</sub> O... 30 ppm, NH <sub>3</sub> ... 200 ppm, CH <sub>4</sub> .. 400 ppm
Nachweisgrenzen nach Herstellerangaben:	CO <sub>2</sub> ... 1,50 ppm, N <sub>2</sub> O ... 0,03 ppm, CH <sub>4</sub> ... 0,4 ppm, NH <sub>3</sub> ... 0,20 ppm, H <sub>2</sub> O 0,10 g/m <sup>3</sup>
Sample Integration Time:	5 sec
Messzyklus:	120 s
Messgerät:	<b>Multigasmonitor 1314, Fa. Innova Air Tech Instruments</b>
Komponenten:	CO <sub>2</sub> , N <sub>2</sub> O, CH <sub>4</sub> , NH <sub>3</sub> , H <sub>2</sub> O
Messverfahren:	Photoakustische IR-Spektroskopie
Messbereichsendwerte nach Herstellerangaben:	CO <sub>2</sub> ... 1500 ppm, N <sub>2</sub> O... 30 ppm, NH <sub>3</sub> ... 200 ppm, CH <sub>4</sub> .. 100 ppm
Nachweisgrenzen nach Herstellerangaben:	CO <sub>2</sub> ... 1,50 ppm, N <sub>2</sub> O ... 0,03 ppm, CH <sub>4</sub> ... 0,1 ppm, NH <sub>3</sub> ... 0,20 ppm, H <sub>2</sub> O 0,10 g/m <sup>3</sup>
Sample Integration Time:	5 s
Messzyklus:	120 s
Messgerät:	<b>Multigasmonitor 1412, Fa. LumaSense Technologies Inc.</b>
Komponenten:	CO <sub>2</sub> , N <sub>2</sub> O, CH <sub>4</sub> , NH <sub>3</sub> , H <sub>2</sub> O
Messverfahren:	Photoakustische IR-Spektroskopie
Messbereichsendwerte nach Herstellerangaben:	CO <sub>2</sub> ... 1500 ppm, N <sub>2</sub> O... 30 ppm, NH <sub>3</sub> ... 200 ppm, CH <sub>4</sub> .. 100 ppm

Nachweisgrenzen nach Hersteller- angaben:	CO <sub>2</sub> ... 1,50 ppm, N <sub>2</sub> O ... 0,03 ppm, CH <sub>4</sub> ... 0,1 ppm, NH <sub>3</sub> ... 0,20 ppm, H <sub>2</sub> O 0,10 g/m <sup>3</sup>
Sample Integration Time:	5 s
Messzyklus:	120 s
<b>Probennahme:</b>	
2 Messleitungen mit je 4 PN-Öffnungen, pro PN-Öffnung 1 Glaskapillare Durchmesser 0,5..0,8 mm, abgestuft angebracht für die Gewährleistung gleichmäßigen Volumenstrom, Partikelfilter an jeder PN-Öffnung, Gasprobenahme erfolgte druckseitig der Absaugeinrichtung im Bypass (drucklos)	
Absaugeinrichtung:	2 Membranpumpen, Fa. KNF, Membran, Ventile PTFE-beschichtet
Durchfluss	je 5 l/min
Schlauchmaterial:	PA
Innendurchmesser:	4 mm
Länge:	ca. 120 m
<b>Geruch:</b>	
Messgerät:	DIN EN 13725 Bestimmung der Geruchsstoffkonzentration mit dynamischer Ol-faktometrie
Probenahmeeinrichtung:	Probenahmesystem CSD30 mit kritischer Düse, Fa. ECOMA, 10 Liter Volumen
Probenbehälter nach dem Lungenprinzip:	Probenbeutel aus Nalophan mit PTFE-Verschluss
Pumpe:	Probenahmesystem CSD30, Fa. ECOMA
Probenleitungen:	PTFE
<b>Staub:</b>	
Probenahmeverfahren:	KleinfILTERverfahren
Probenahmekopf:	Standardprobenahmekopf für KleinfILTERgerät, Fa. Leckel
Abscheidemedium:	Quarzfaserfilter, MK360, Fa. Munktel
Filterdurchmesser:	50 mm
Abscheidegrad:	0,99998
Konditionierung:	24 h und 48 h im Exsikkator, vor
Absaugeinrichtung:	Bravo H Plus
Durchfluss	Gesamtstaub: 3,0 m <sup>3</sup> /h; PM <sub>10</sub> , PM <sub>2,5</sub> : 2,3 m <sup>3</sup> /h

**Tabelle 20: Spezifikationen der Messgeräte und der Probenahme der Gärrest-/Auslaufmessungen**

Gaskonzentration:	
Messgerät:	DX4000N, Gasmet
Komponenten:	CO <sub>2</sub> , N <sub>2</sub> O, CH <sub>4</sub> , NH <sub>3</sub> , H <sub>2</sub> O
Messverfahren:	Fourier-Transformations-Infrarotspektrometer
kalibrierter Messbereich	CO <sub>2</sub> ... 500 - 10000 ppm, N <sub>2</sub> O... 50 -100 ppm, NH <sub>3</sub> ... 5 -100 ppm, CH <sub>4</sub> ... 50 -3500 ppm, H <sub>2</sub> O... 0,1 - 25 Vol%
Temperatur [°C]	180
Messzyklus [s]	10
Integrationszeit [s]	8
Durchfluss [l/min]	3
Aufbau Messzelle:	Multireflexion, feste Weglänge 5 m
Wasserdampfkompensation:	eingeschaltet
Probennahme:	
Messhaube	Durchmesser: 295 mm, Höhe: 110 mm, Innenmaterial: PVC
Schlauchmaterial:	PTFE
Innendurchmesser:	2 mm
Länge:	ca. 25 m
Geruch:	
Messgerät:	DIN EN 13725 Bestimmung der Geruchsstoffkonzentration mit dynamischer Olfaktometrie
Probenahmeeinrichtung:	Probenahmesystem CSD30 mit kritischer Düse, Fa. ECOMA, 10 Liter Volumen
Probenbehälter nach dem Lun- genprinzip:	Probenbeutel aus Nalophan mit PTFE-Verschluss
Pumpe:	Probenahmesystem CSD30, Fa. ECOMA
Probenleitungen:	PTFE

**Tabelle 21: Spezifikationen der Wetterstation an Stall 1**

Lufttemperatur, Luftfeuchte	
Typ:	Feuchte Temperatursensor PC-ME
Hersteller:	MELA Sensortechnik GmbH
Messbereich:	-30..+70°C; 0..100 %rF
Genauigkeit:	+/-0,3 K; +/-2% rF
Luftdruck	
Typ:	Barogeber 3.1157.10.141
Hersteller:	Adolf Thies GmbH & Co.KG
Messbereich:	300..1100 hPa
Genauigkeit:	+/-1 hPa
Globalstrahlung	
Typ:	SMP3-A
Hersteller:	Kipp & Zonen B.V.
Messbereich:	0..1600 W/m <sup>2</sup>
Genauigkeit:	k.A.
Windrichtung, Windgeschwindigkeit	
Typ:	Kombinierter Windgeber 4.3324.31.000
Hersteller:	Adolf Thies GmbH & Co.KG
Messbereich:	0..360°; 0,3..50 m/s
Genauigkeit:	+/- 1,5°; +/- 0,3 m/s

**Tabelle 22: Spezifikationen der Wetterstation an Gärrestlager 2**

Wetterstation Gärrestlager 2	
Typ:	Meteo-Multigeber FMA 510
Hersteller:	Vaisala
Temperatur	
Messbereich:	- 52...+60 °C
Genauigkeit:	+/-0,3 K bei 20 °C
relative Luftfeuchte	
Messbereich:	0..100 % rF
Genauigkeit:	± 3% RH bei 0 ... 90 % RH, ± 5% RH bei 90 ... 100 %
Luftdruck	
Messbereich:	600..1100 hPa
Genauigkeit:	±0,5 mbar bei 0 ... 30 °C, ±1 mbar bei -52 ... +60 °C
Windgeschwindigkeit	
Messbereich:	0,5..60 m/s
Genauigkeit:	0 ... 35 m/s ± 0,3 m/s oder ± 3%, 36 ... 60 m/s ± 5%
Windrichtung	
Messbereich:	0...360 °
Genauigkeit:	± 3°
Globalstrahlung	
Typ:	Globalstrahlungs-Messkopf Typ 7.3
Hersteller:	Ahlborn Mess- und Regelungstechnik GmbH
Messbereich:	0..1300 W/m <sup>2</sup>
Genauigkeit:	k.A.



**Abbildung 14: Beispiele für "geschlossene Schwimmschicht" rot markiert, Rest der Fläche ist entspricht der Kategorie "undicht! (Risse vorhanden)", Foto: Lippmann**

**Tabelle 23: Geruchskonzentrationen der Stallmessungen**

Standort	Messnummer	Datum	Geruchskonzentration [GE/m <sup>3</sup> ]
1	1	04.08.2016	67
1	1	04.08.2016	76
1	1	04.08.2016	101
1	1	10.08.2016	56
1	1	10.08.2016	76
1	1	10.08.2016	76
1	2	24.10.2016	223
1	2	24.10.2016	466
1	2	24.10.2016	178
1	2	02.11.2016	252
1	2	02.11.2016	314
1	2	02.11.2016	280
1	3	25.01.2017	418
1	3	25.01.2017	280
1	3	25.01.2017	80
1	3	31.01.2017	109
1	3	31.01.2017	83
1	3	31.01.2017	74
1	4	26.04.2017	224
1	4	26.04.2017	152



1	4	26.04.2017	144
1	4	04.05.2017	212
1	4	04.05.2017	152
1	4	04.05.2017	109
1	5	20.06.2017	266
1	5	20.06.2017	265
1	5	20.06.2017	251
1	5	27.06.2017	442
1	5	27.06.2017	265
1	5	27.06.2017	393
2	1	31.08.2016	143
2	1	31.08.2016	171
2	1	31.08.2016	192
2	1	07.09.2016	256
2	1	07.09.2016	85
2	1	07.09.2016	95
2	2	30.11.2016	2031*
2	2	30.11.2016	2539*
2	2	30.11.2016	494
2	2	07.12.2016	494
2	2	07.12.2016	977
2	2	07.12.2016	441
2	3	14.03.2017	314
2	3	14.03.2017	223
2	3	14.03.2017	74
2	3	21.03.2017	78
2	3	21.03.2017	38
2	3	21.03.2017	87

\*Ausreißer

**Tabelle 24: Staubkonzentrationen der einzelnen Messtage der Stallmessungen**

Konzentration [mg/m <sup>3</sup> ]					
Standort	Messnr.	Datum	Gesamtstaub	PM10	PM2,5
1	1	04.08.16	0,133	0,024	0,006
1	1	10.08.16	0,110	0,019	0,006
1	2	24.10.16	0,193	0,022	0,015
1	2	01.11.16	0,104	0,023	0,009
1	3	25.01.17	0,399	0,085	0,058
1	3	31.01.17	0,209	0,029	0,018
1	4	25.04.17	0,247	0,024	0,012
1	4	03.05.17	0,185	0,043	0,032
1	5	20.06.17	0,146	0,026	0,009
1	5	27.06.17	0,123	0,029	0,012
2	1	31.08.16	0,636	0,049	0,012
2	1	07.09.16	0,383	0,046	0,022
2	2	29.11.16	0,745	0,044	0,014
2	2	06.12.16	0,742	0,054	.
2	3	14.03.17	0,560	0,112	0,038
2	3	21.03.17	0,458	0,023	0,001

**Tabelle 25: Geruchskonzentrationen der Gärrestlagermessungen**

Standort	Datum	Messstelle	Geruchskonzentration [GE/m <sup>3</sup> ]
1	28.02.2017	1	63
1	28.02.2017	2	109
1	28.02.2017	3	151
1	11.05.2017	1	121
1	11.05.2017	2	83
1	11.05.2017	3	83
1	04.07.2017	3	225
1	04.07.2017	2	213
1	04.07.2017	1	161
1	31.08.2017	3	29
1	31.08.2017	2	31
1	31.08.2017	1	50
1	30.11.2017	1	24
1	30.11.2017	2	37
1	30.11.2017	3	34
2	14.12.2016	1	4839
2	14.12.2016	2	31129*
2	14.12.2016	3	1295
2	11.04.2017	1	7550
2	11.04.2017	2	1528
2	11.04.2017	3	161
2	19.09.2017	1	63
2	19.09.2017	2	87
2	19.09.2017	3	121
2	28.09.2017	1	78
2	28.09.2017	2	694
2	28.09.2017	3	224
2	21.11.2017	1	25440
2	21.11.2017	2	8881
2	21.11.2017	3	23906
2	19.06.2018	1	1122
2	19.06.2018	2	82
2	19.06.2018	3	31

\*Ausreißer

**Tabelle 26: Geruchskonzentrationen der Auslaufmessungen**

Messnr.	Datum	Geruchskonzentration [GE/m <sup>3</sup> ]
1	23.05.2017	6675
1	23.05.2017	4979
1	23.05.2017	3758
2	22.08.2017	870
2	22.08.2017	2686
2	22.08.2017	2029
3	26.09.2017	1714
3	26.09.2017	694
3	26.09.2017	523
4	10.10.2017	372
4	10.10.2017	694
4	10.10.2017	1224
5	19.12.2017	2684
5	19.12.2017	3003
5	19.12.2017	1092
6	06.03.2018	152
6	06.03.2018	62
6	06.03.2018	237

**Herausgeber:**

Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie (LfULG)  
Pillnitzer Platz 3, 01326 Dresden  
Telefon: + 49 351 2612-0  
Telefax: + 49 351 2612-1099  
E-Mail: [lfulg@smul.sachsen.de](mailto:lfulg@smul.sachsen.de)  
[www.lfulg.sachsen.de](http://www.lfulg.sachsen.de)

**Autoren:**

Jennifer Deichmann  
Abteilung 7/Referat 74  
Am Park 3, 04886 Köllitsch  
Telefon: + 49 342 22462223  
E-Mail: [Jennifer.Deichmann@smul.sachsen.de](mailto:Jennifer.Deichmann@smul.sachsen.de)

Thomas Heidenreich  
Abteilung 7/Referat 74  
Am Park 3, 04886 Köllitsch  
Telefon: + 49 342 22462205  
E-Mail: [Thomas.Heidenreich@smul.sachsen.de](mailto:Thomas.Heidenreich@smul.sachsen.de)

Dr. agr. Jens Lippmann  
Albrecht-Daniel-Thaer-Institut für Agrar- und Veterinärwissenschaften e. V.  
an der Universität Leipzig, An den Tierkliniken 29, 04103 Leipzig  
Telefon: + 49 341 9738482  
E-Mail: [thaer-institut@rz.uni-leipzig.de](mailto:thaer-institut@rz.uni-leipzig.de)

Dr. rer. nat. Horst-Günter Kath  
Betriebsgesellschaft für Umwelt und Landwirtschaft, FB 24  
Altwahnsdorf 12, 01445 Radebeul  
Telefon: +49 351 8312715  
E-Mail: [Horst-Guenter.Kath@smul.sachsen.de](mailto:Horst-Guenter.Kath@smul.sachsen.de)

Marc Fröhlich  
Betriebsgesellschaft für Umwelt und Landwirtschaft, FB 24  
Altwahnsdorf 12, 01445 Radebeul  
Telefon: +49 351 85474243  
E-Mail: [Marc.Froehlich@smul.sachsen.de](mailto:Marc.Froehlich@smul.sachsen.de)

Frank Rothe  
Betriebsgesellschaft für Umwelt und Landwirtschaft, FB 24  
Altwahnsdorf 12, 01445 Radebeul  
Telefon: + 49 351 85474244  
E-Mail: [Frank.Rothe@smul.sachsen.de](mailto:Frank.Rothe@smul.sachsen.de)

**Redaktion:**

Jennifer Deichmann  
Abteilung 7/Referat 74  
Am Park 3, 04886 Köllitsch  
Telefon: + 49 342 22462223  
E-Mail: [Jennifer.Deichmann@smul.sachsen.de](mailto:Jennifer.Deichmann@smul.sachsen.de)

**Fotos:**

Jennifer Deichmann, Dr. agr. Jens Lippmann  
<https://geoviewer.sachsen.de>

**Redaktionsschluss:**

20.05.2020

**ISSN:**

1867-2868

**Hinweis:**

Die Broschüre steht nicht als Printmedium zur Verfügung, kann aber als PDF-Datei unter <https://publikationen.sachsen.de/bdb/> heruntergeladen werden.

**Verteilerhinweis**

Diese Informationsschrift wird von der Sächsischen Staatsregierung im Rahmen ihrer verfassungsmäßigen Verpflichtung zur Information der Öffentlichkeit herausgegeben.

Sie darf weder von Parteien noch von deren Kandidaten oder Helfern zum Zwecke der Wahlwerbung verwendet werden. Dies gilt für alle Wahlen. Missbräuchlich ist insbesondere die Verteilung auf Wahlveranstaltungen, an Informationsständen der Parteien sowie das Einlegen, Aufdrucken oder Aufkleben parteipolitischer Informationen oder Werbemittel. Untersagt ist auch die Weitergabe an Dritte zur Verwendung bei der Wahlwerbung.

*Täglich für  
ein gutes Leben.*

[www.lfulg.sachsen.de](http://www.lfulg.sachsen.de)