

FORSCHUNGSBERICHT AGRARTECHNIK

des Fachausschusses Forschung und Lehre der
Max-Eyth-Gesellschaft Agrartechnik im VDI (VDI-MEG)

576

Stephanie Gronow-Schubert

**Untersuchungen zum Emissions-
geschehen von Ammoniak und
Methan in der Mastschweinehaltung**

Dissertation

Hohenheim 2017

ISSN 0931-6264

Universität Hohenheim
Institut für Agrartechnik
Verfahrenstechnik der Tierhaltungssysteme
apl. Prof Dr. Eva Gallmann



**Untersuchungen zum Emissionsgeschehen
von Ammoniak und Methan in der Mastschweinehaltung**

Dissertation
zur Erlangung des Grades eines Doktors
der Agrarwissenschaften

vorgelegt der Fakultät Agrarwissenschaften
Universität Hohenheim

von
M. Sc. agr. Stephanie Gronow-Schubert
aus Bernau bei Berlin

2017

Die vorliegende Arbeit wurde am 01.02.2017 von der Fakultät Agrarwissenschaften der Universität Hohenheim als „Dissertation zur Erlangung des Grades eines Doktors der Agrarwissenschaften“ angenommen.

Dekan: Prof. Dr. R.T. Vögele
Berichtersteller: apl. Prof. Dr. E. Gallmann
Mitberichter: Prof. Dr. W. Büscher

Mündliche Prüfung: apl. Prof. Dr. E. Gallmann
Prof. Dr. W. Büscher
apl. Prof. Dr. U. Weiler

Leiter Kolloquium: Prof. Dr. M. Rodehutscord

Tag der mündlichen Prüfung: 14.02.2017

Die Förderung des Vorhabens erfolgte im Rahmen des Graduiertenkollegs „Sustainable Resource Use in the North China Plain“ durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) unter dem Förderkennzeichen GRK 1070/3.

© 2017

Im Selbstverlag: Stephanie Gronow-Schubert
Bezugsquelle: Universität Hohenheim
Institut für Agrartechnik - 440 -
Garbenstraße 9
D - 70599 Stuttgart
opus.uni-hohenheim.de

Alle Rechte vorbehalten. Die Verwendung von Texten und Bildern, auch auszugsweise, ist ohne Zustimmung des Autors urheberrechtswidrig und strafbar. Das gilt insbesondere für Vervielfältigung, Übersetzung, Mikroverfilmung sowie die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Für meine Familie und meine Freunde

„Wenn eine Idee am Anfang nicht absurd klingt, dann gibt es keine Hoffnung für sie.“

(Albert Einstein)

Auch die Idee vom eigenen Leben.

INHALTSVERZEICHNIS

ABKÜRZUNGEN UND SYMBOLE	III	
TABELLENVERZEICHNIS	VII	
ABBILDUNGSVERZEICHNIS	XI	
1	EINLEITUNG	1
1.1	Die weltweite Nutztierhaltung im Kontext des anthropogen verursachten Klimawandels	1
1.2	Ammoniakemissionen und deren Minderungspotentiale in der Schweinehaltung in Deutschland	3
1.3	Methanemissionen und deren Reduktionspotentiale in der Schweinehaltung in Deutschland	7
1.4	Modellierung von Ammoniakkonzentrationen- und emissionen im Mastschweinstall	10
1.5	Zielsetzung und Aufbau der vorliegenden Arbeit	12
2	FLÜSSIGMISTMANAGEMENT: EFFEKTE AUF DIE AMMONIAK- UND METHANEMISSIONEN IM MASTSCHWEINESTALL	13
2.1	Versuchsstall und Versuchstiere	14
2.2	Versuchsdurchführung	16
2.2.1	Wöchentliche Entleerung des Flüssigmistkanals	16
2.2.2	Abdeckung der Flüssigmistoberfläche	17
2.2.3	Zugabe von Flüssigmistadditiven: „Effektive Mikroorganismen“ (EM)	18
2.3	Messtechnik	18
2.4	Ergebnisse und Diskussion des Flüssigmistmanagements	20
2.4.1	Ergebnisse der Flüssigmistparameter	20
2.4.2	Ergebnisse und Diskussion der Ammoniak und Methan - Konzentrationen und Emissionen	20
3	EINFLUSSFAKTOREN AUF DIE AMMONIAK- UND METHANEMISSIONEN IM MASTSCHWEINESTALL: ZEITREIHEN UND REGRESSIONSANALYSE	32
3.1	Ammoniak	32
3.2	Methan	33
3.3	Datenerhebung und Auswertung	34
3.3.1	Zeitreihenanalyse	34
3.3.2	Korrelations- und Regressionsanalyse	36
3.4	Ergebnisse und Diskussion der statistischen Auswertungen	38
3.4.1	Ergebnisse der Datenerhebung	38
3.4.2	Ergebnisse der Zeitreihenanalyse	40

3.4.3	Korrelationsergebnisse der Umgebungsvariablen	43
3.4.4	Korrelationsergebnisse der Flüssigmistvariablen	45
3.4.5	Regressionsergebnisse mit den Umgebungsvariablen	46
3.4.6	Regressionsergebnisse mit den Flüssigmistvariablen	49
3.4.7	Ergebnisse der reduzierten Datensätze	50
4	MODELLIERUNG VON AMMONIAKKONZENTRATIONEN UND -EMISSIONEN IM MASTSCHWEINESTALL MIT ANGEWANDTEN EMISSIONSMINDERUNGSSTRATEGIEN	51
4.1	Datenbasis und Modellaufbau	51
4.2	Kalibrierung und Validierung des Modells	57
4.3	Modellierung von Emissionsminderungsmaßnahmen	59
4.3.1	Wöchentliche Entleerung des Flüssigmistkanals	59
4.3.2	Abdeckung der Flüssigmistoberfläche	60
4.4	Diskussion der Modellierungsergebnisse	62
5	GESAMTDISKUSSION	67
5.1	Diskussion der Vorgehensweise	67
5.1.1	Versuchsstall	67
5.1.2	Verwendete Messtechnik und Datenqualität	67
5.1.3	Diskussion der Versuchsplanung und -durchführung	68
5.2	Diskussion der statistischen Auswertung	70
5.2.1	Diskussion der Zeitreihenanalyse	71
5.2.2	Diskussion der Korrelations- und Regressionsanalyse	73
5.3	Diskussion der Modellierung der Ammoniakkonzentrationen- und emissionen	75
6	SCHLUSSFOLGERUNGEN UND AUSBLICK	77
7	ZUSAMMENFASSUNG	79
8	SUMMARY	81
9	LITERATURVERZEICHNIS	83
10	ANHANG	96

ABKÜRZUNGEN UND SYMBOLE

Symbol	Einheit	Erläuterung
A		Behandlung A - wöchentliche Entleerung des Flüssigmistkanals
A_{Slat}	$[m^2]$	Fläche des Spaltenbodens
ACF		Autokorrelationsfunktion
AV		Auswertungsvariante
B		Behandlung B - Abdeckung der Flüssigmistoberfläche
Be		Behandlung
bzgl.		Bezüglich
bzw.		beziehungsweise
C		Kohlenstoff
C		Behandlung C – Zugabe von Effektiven Mikroorganismen
°C		Grad Celsius
C_A	$[mol\ l^{-1}]$	Ammoniakkonzentration in der Zuluft
C_H	$[mol\ l^{-1}]$	Ammoniakkonzentration im headspace
C_R	$[mol\ l^{-1}]$	Ammoniakkonzentration im Abteil
ca.		circa
CCF		Kreuzkorrelationsfunktion
CFD		Computational Fluid Dynamics
CH ₄		Methan
cm	$[10^{-2}\ m]$	Centimeter
CO ₂		Kohlendioxid
d		Tag
d_{pit}	$[m]$	Tiefe des Flüssigmistkanals
d_s	$[cm]$	Höhe des Flüssigmistpegels
d_{s1}	$[cm]$	Höhe des Flüssigmistpegels im vorherigen Zeitschritt
$D_{\text{NH}_3,\text{Air}}$	$[m^2\ s^{-1}]$	Diffusionskoeffizient von Ammoniak in der Luft
DBV		Deutscher Bauernverband
DStatis		Statistisches Bundesamt
E_s	$[mol\ d^{-1}]$	Emissionen aus dem Flüssigmist
EG	$[kg]$	Einzeltiergewichte
EG	$[kg]$	Endgewicht
EM		Effektive Mikroorganismen

EmiDat		Ermittlung von Emissionsdaten für die Beurteilung der Umweltwirkungen der Nutztierhaltung
et al.		et alteri (und andere)
f_s		Fraktion von TAN in Ammoniakform des Flüssigmists
FAO		Food and Agriculture Organization of the United Nations
FM		Flüssigmist
FTIR		Fourier-Transformations-Infrarotspektrometer
FS	[%]	Frischmasse
g	[10^{-3} kg]	Gramm
GV	[500 kg LG]	Großvieheinheit
H		Wasserstoff
H_{Pen}	[m]	Höhe der Bucht
H_s		Henry Konstante des Flüssigmists
headspace		Abstand zwischen der Flüssigmistoberfläche und den Schlitzen der Unterflurabsaugung im Flüssigmistkanal
IAASTD		International Assessment of Agricultural Knowledge, Science and Technology for Development
IPCC		Intergovernmental Panel on Climate Change
K		Kelvin
$k_{NH_3,S}$	[$m s^{-1}$]	konvektiver Massentransferkoeffizient für Ammoniak aus dem Flüssigmist
k.A.		keine Zahlenangaben
kg		Kilogramm
kt		Kilotonnen
KTBL		Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft
l		Liter
L_{Pen}	[m]	Länge der Bucht
L_{Slat}	[m]	Länge des Spaltenbodens
Lag		zeitlicher Abstand zwischen zwei Zeitreihen (z.B. Tag, Monat)
LG		Lebendgewicht
m		Meter
m	[10^{-3}]	Milli
max.		maximal; Maximum
MD		Mastdurchgang
min.		minimal; Minimum

mV	[10 ⁻³ V]	Millivolt
n		Stichprobenumfang
N		Stickstoff
N _{Pen}		Anzahl Buchten
N ₂ O		Lachgas
NH ₃		Ammoniak
NH _{3E}		eingeleseene Messwerte der Zuluft- Ammoniakkonzentrationen
NH ₄ -N		Ammonium-Stickstoff
n.s.		nicht signifikant
OECD		Organization for Economic Co-Operation and Development
oTS	[%]	organische Trockensubstanz
P		(Sicherheits)-Wahrscheinlichkeit
p	[Pa]	Luftdruck
PACF		partielle Autokorrelationsfunktion
pH		negativer dakadischer Logarithmus der H ⁺ -Aktivität
pH _s		pH des Flüssigmists
ppm		parts per million
Q _H	[m ³ d ⁻¹]	Luftvolumenstrom im headspace
Q _R	[m ³ d ⁻¹]	Luftvolumenstrom im Abteil
r		Korrelationskoeffizient
R _A		Referenzabteil zu Behandlung A
R _B		Referenzabteil zu Behandlung B
R _C		Referenzabteil zu Behandlung C
R ²		Regressionskoeffizient (Bestimmtheitsmaß)
R ² _{adj}		angepasster Regressionskoeffizient (Bestimmtheitsmaß)
red		reduziert
RH	[%]	relative Luftfeuchte
RSME		Root Mean Square Error
®		registrierte Trade Mark (Warenmarke)
s		Sekunde
s.		signifikant
SG		Startgewicht
t		Zeit
T	[°C]	Temperatur

T_{film}	[K]	Durchschnittstemperatur des Flüssigmists und der umgebenden Luft
T_{H}	[K]	Temperatur im headspace
$T_{\text{R_Celsius}}$	[°C]	eingelesene Messwerte der Abteilterperatur
T_{S}	[K]	Flüssigmisttemperatur
$T_{\text{S_Celsius}}$	[°C]	eingelesene Messwerte der Flüssigmisttemperatur
TAN	[mol l ⁻¹]	Total Ammonia Nitrogen
TAN _S	[mol l ⁻¹]	Total Ammonia Nitrogen im Flüssigmist
™		unregistrierte Trade Mark (Warenmarke)
TS	[%]	Trockensubstanz
TZ	[g]	tägliche Zunahmen
UBA		Umweltbundesamt
UNFCCC		United Nation Framework Convention on Climate Change
V		Volt
\dot{V}	[m ³ h ⁻¹]	Luftvolumenstrom
v_{H}	[m s ⁻¹]	Windgeschwindigkeit über der Flüssigmistoberfläche
V_{H}	[m ³]	Volumen im headspace
V_{H1}	[m ³]	Volumen im headspace im vorherigen Zeitschritt
vs.		versus
V_{Room}	[m ³]	Volumen des Abteils
W_{Pen}	[m]	Breite der Bucht
WBA		Wissenschaftlicher Beirat für Agrarpolitik beim Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft
x		mal
x_7		Konstante zur Berechnung des Luftvolumenstroms im headspace
x_8		Konstante zur Berechnung des Luftvolumenstroms im headspace
xP		Rohprotein
Z		Säuredissoziationsfaktor für Ammoniak
z.B.		zum Beispiel
∅		Querschnitt / durchschnittlich
∑		Summe
σ		Standardabweichung
\bar{x}		arithmetischer Mittelwert

TABELLENVERZEICHNIS

Tabelle 1:	Ammoniakemissionsfaktoren und Strohbedarf für Mastschweinehaltungsverfahren (aus EURICH-MENDEN et al. 2011)	3
Tabelle 2:	Ammoniakemissionen aus der Tierhaltung in Deutschland in kt, aufgeteilt auf die verschiedenen Quellbereiche für 2011 (nach WBA 2015, aus RÖSEMANN et al. 2013)	4
Tabelle 3:	Beispiele für Minderungspotenziale von Maßnahmen bei Haltungstechnik, Flüssigmistmanagement sowie Luftführung zur NH ₃ -Emissionsreduktion in der Mastschweinehaltung (erweitert nach GALLMANN 2003)	6
Tabelle 4:	Beispiele für Methanemissionsfaktoren und Entmistungshäufigkeiten in verschiedenen Mastschweinehaltungsverfahren (verändert nach JEPSSON 2011)	7
Tabelle 5:	Beispiele für Minderungspotenziale von Maßnahmen bei Haltungstechnik und Flüssigmistmanagement zur CH ₄ -Emissionsreduktion in der Mastschweinehaltung (erweitert nach GALLMANN 2003)	8
Tabelle 6:	Übersicht zu Untersuchungen zur Modellierung von Ammoniakstoffflüssen in der Nutztierhaltung	11
Tabelle 7:	Übersicht der durchgeführten Emissionsminderungsmaßnahmen und die Bezeichnung der Behandlungen (A, B, C), Zuordnung des Versuchsabteils, Zeitraum jeder Behandlung sowie Anzahl an auswertbaren Tagen je Mastdurchgang (n)	14
Tabelle 8:	Versuchsbedingungen innerhalb der drei Behandlungen (A, B, C) und den Referenzabteilen (R _A , R _B , R _C)	16
Tabelle 9:	Übersicht der in allen drei Mastdurchgängen (Versuchs- und Referenzabteil) verwendeten Messtechnik, dem jeweiligen Messprinzip, der Einheit sowie den Messfrequenzen	19
Tabelle 10:	Flüssigmistparameter der drei Behandlungen (A, B, C) und deren Referenzen (R _A , R _B , R _C)	20
Tabelle 11:	Ammoniak- und Methankonzentrationen an den drei Messstellen (Zuluft, Abteil und Abluft) sowie die Ammoniak- und Methanemissionen innerhalb der drei Behandlungen (A, B, C) und deren Referenzen (R _A , R _B , R _C)	21
Tabelle 12:	Bezeichnung der vier Mastdurchgänge, Durchführungszeiträume sowie Anzahl der zur Verfügung stehenden Tagesmittelwerte je Datensatz (komplett, reduziert sowie 14-tägliche Flüssigmistanalysen)	34
Tabelle 13:	Übersicht der Ziel- und Einflusszeitreihen für die Zeitreihenanalyse sowie der abhängigen und unabhängigen Variablen für die Regressionsanalyse für alle vier Mastdurchgänge	35
Tabelle 14:	Übersicht der gebildeten Klassen innerhalb der vier Mastdurchgänge, Klassenbezeichnung und die jeweils durchgeführten Korrelationsanalysen	37

Tabelle 15:	Übersicht der abhängigen und unabhängigen Variablen mit dem dazugehörigen Stichprobenumfang, Mittelwert und Standardabweichung über alle vier Mastdurchgänge (R_A , R_B , R_D , R_D) für die Umgebungsparameter sowie die kontinuierlich digital erhobenen Flüssigmistparameter	39
Tabelle 16:	Übersicht der abhängigen und unabhängigen Variablen mit dem dazugehörigen Stichprobenumfang, Mittelwert und Standardabweichung für alle vier Mastdurchgänge (R_A , R_B , R_C , R_D) für die 14-täglich erhobenen Flüssigmistparameter	40
Tabelle 17:	Übersicht der Kreuzkorrelationsergebnisse von allen vier Mastdurchgängen für die Ammoniak- und Methanemissionen [g h^{-1}] und die Häufigkeit der Signifikanzen je Parameter	41
Tabelle 18:	Häufigkeitsverteilung der unabhängigen Variablen in Rang eins bis acht bei der Korrelation mit den Ammoniakemissionen [g h^{-1}] von allen 19 Klassen für die Auswertungsvarianten A. ohne Einzeltiergewichte, B. mit Einzeltiergewichten und C. mit Einzeltiergewichten und mit Flüssigmistparametern	44
Tabelle 19:	Häufigkeitsverteilung der unabhängigen Variablen in Rang eins bis acht bei der Korrelation mit den Methanemissionen [g h^{-1}] von allen 19 Klassen für die Auswertungsvarianten A. ohne Einzeltiergewichte, B. mit Einzeltiergewichten und C. mit Einzeltiergewichten und mit Flüssigmistparametern	45
Tabelle 20:	Häufigkeitsverteilung der unabhängigen Variablen in Rang eins bis sieben bei den 14-täglich erhobenen Flüssigmistparametern korreliert mit den Ammoniak- und den Methanemissionen [g h^{-1}], über alle vier Mastdurchgänge sowie für Klasse 3 (Sommer/Winter)	46
Tabelle 21:	Übersicht der Regressionsergebnisse der fünf Volumenstromklassen und der drei Temperaturklassen mit den Ammoniakemissionen [g h^{-1}], die Variablenrangfolge basiert auf der Häufigkeitsverteilung der Korrelationsergebnisse (Tabelle 18)	47
Tabelle 22:	Übersicht der Regressionsergebnisse der fünf Volumenstromklassen und der drei Temperaturklassen mit den Methanemissionen [g h^{-1}], die Variablenrangfolge basiert auf der Häufigkeitsverteilung der Korrelationsergebnisse (Tabelle 19)	48
Tabelle 23:	Übersicht der Regressionsergebnisse der Flüssigmistparameter über alle vier Mastdurchgänge (R_A , R_B , R_C , R_D) für die Ammoniak- und Methanemissionen [g h^{-1}], die Variablenrangfolge basiert auf der Häufigkeitsverteilung der Korrelationsergebnisse (Tabelle 20)	49
Tabelle 24:	Übersicht der Kalibrierungs- und Validierungszeiträume und der zur Verfügung stehenden Anzahl an Tagesmittelwerten sowie die in die Modellierungen eingeflossenen Inputparameter	51
Tabelle 25:	Differentialgleichungen des Modells (eigene Formeln abgeleitet aus CORTUS et al. 2010a)	54

Tabelle 26:	Parameter und Definitionen der verwendeten Funktionen sowie die verwendeten Einheiten für das aufgebaute Modell (eigene Darstellung verändert nach CORTUS et al. 2010a)	55
Tabelle 27:	Übersicht der in den Formeln hinterlegten Werte, mit deren Symbolik, Definition, Einheit sowie die Quelle der Werte	56
Tabelle 28:	Modellierungsergebnisse der Kalibrierung und der Validierung - Vergleich der Modelleffizienz, der Wurzel des mittleren quadratischen Fehlers (RMSE) und des Bias für die Ammoniakkonzentrationen im headspace, im Abteil und in der Kombination beider Bereiche	58
Tabelle 29:	Ergebnis der Modellierung der wöchentlichen Entleerung des Flüssigmistkanals - Vergleich der Modelleffizienz, der Wurzel des mittleren quadratischen Fehlers (RMSE) und des Bias der Ammoniakkonzentrationen des headspace, des Abteils und der kombinierten Betrachtung beider Bereiche	60
Tabelle 30:	Ergebnis der Modellierung der Abdeckung des Flüssigmistkanals - Vergleich der Modelleffizienz, der Wurzel des mittleren quadratischen Fehlers (RMSE) und des Bias der Ammoniakkonzentrationen des headspaces, des Abteils und der kombinierten Betrachtung beider Bereiche	61
 <u>Anhang:</u>		
Tabelle A1:	Übersicht zu den Futterinhaltsstoffen der vier Mastdurchgänge A bis D	98
Tabelle A2:	Übersicht der Signifikanzen zwischen den einzelnen Referenzen (A:B, A:C, B:C) bezogen auf die Temperatur, die relative Luftfeuchtigkeit die NH ₃ -, CH ₄ - und CO ₂ -Konzentrationen an den drei Messstellen sowie die NH ₃ -, CH ₄ - und CO ₂ -Emissionsraten und Emissionsfaktoren, die Volumenströme sowie der Flüssigmisttemperatur und den pH-Wert des Flüssigmists	111
Tabelle A3:	Übersicht der Signifikanzen zwischen den einzelnen Referenzen (R _A :R _B , R _A :R _C , R _B :R _C) bezogen auf die Temperatur, die relative Luftfeuchtigkeit die NH ₃ -, CH ₄ - und CO ₂ -Konzentrationen an den drei Messstellen sowie die NH ₃ -, CH ₄ - und CO ₂ -Emissionsraten und Emissionsfaktoren, die Volumenströme sowie der Flüssigmisttemperatur und den pH-Wert des Flüssigmists	112
Tabelle A4:	Übersicht der Signifikanzen zwischen den einzelnen Referenzen (A:R _A , B:R _B , C:R _C) bezogen auf die Temperatur, die relative Luftfeuchtigkeit die NH ₃ -, CH ₄ - und CO ₂ -Konzentrationen an den drei Messstellen sowie die NH ₃ -, CH ₄ - und CO ₂ -Emissionsraten und Emissionsfaktoren, die Volumenströme sowie der Flüssigmisttemperatur und den pH-Wert des Flüssigmists	113
Tabelle A5-a:	Zusammenfassung der Randparameter und Stallklimafaktoren der vier Behandlungen (A, B, C, D) und deren Referenzen (R _A , R _B , R _C , R _D) auf Basis von Tagesmittelwerten	114
Tabelle A5-b:	Zusammenfassung der Randparameter und Stallklimafaktoren der vier Behandlungen (A, B, C, D) und deren Referenzen (R _A , R _B , R _C , R) auf Basis von Tagesmittelwerten	115

Tabelle A5-c:	Zusammenfassung der Randparameter und Stallklimafaktoren der vier Behandlungen (A, B, C, D) und deren Referenzen (R_A , R_B , R_C , R_D) auf Basis von Tagesmittelwerten	116
Tabelle A6:	Übersicht der Randparameter zu den Stallklimafaktoren, den Ammoniak- und Methankonzentrationen, den Ammoniak- und Methanemissionen, den Volumenströmen, Tiergewichten und der Flüssigmisttemperatur und dem pH-Wert des Flüssigmists für die einzelnen Klassen parallel zu den statistischen Auswertungen in Kapitel 3 auf Basis von Tagesmittelwerten	117
Tabelle A7:	Häufigkeitsverteilung der fünf Volumenstromklassen über alle vier Mastdurchgänge (R_A , R_B , R_C , R_D)	148
Tabelle A8:	Häufigkeitsverteilung der drei Temperaturklassen über alle vier Mastdurchgänge (R_A , R_B , R_C , R_D)	149
Tabelle A9:	Übersicht der Regressionsergebnisse bei der Analyse der kompletten (R_A bis R_D) und reduzierten ($R_{A\text{ red}}$ - $R_{D\text{ red}}$) Datensätze der Referenzabteile bei Anwendung der Auswertungsvarianten A, B, C für die Ammoniakemissionen [g h^{-1}]	150
Tabelle A10:	Übersicht der Regressionsergebnisse bei der Analyse der kompletten (R_A bis R_D) und reduzierten ($R_{A\text{ red}}$ - $R_{D\text{ red}}$) Datensätze der Referenzabteile bei Anwendung der Auswertungsvarianten A, B, C für die Methanemissionen [g h^{-1}]	151

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 1:	Verbrauch, Verwertung und Verlust von Proteinen bei der Erzeugung eines Schweins von 108 kg Lebendgewicht (eigene Darstellung nach UBA 2003)	4
Abbildung 2:	Grundriss des Versuchstalles und Anordnung der Messstellen (Abteil „Nord“ = blau, Abteil „Süd“ = rot)	15
Abbildung 3:	Abbildung eines leeren Flüssigmistkanals im Versuchsabteil mit der Kennzeichnung der Höhe des Flüssigmistpegels beim üblichen Staumistverfahrens (weiße Linie) und der Höhe des Flüssigmistpegels im Versuch (rote Linie; links) sowie das Bild eines Ablassstopfens (rechts) im Boden des Flüssigmistkanals	17
Abbildung 4:	Abdeckung der Flüssigmistoberfläche mit Hexa-Cover® - Schwimmkörpern. Zustand vor (links) und nach (rechts) dem Mastdurchgang sowie dem Abteilquerschnitt (mittig; 1 = Flüssigmist, 2 = Trennwand, 3 = Hexa-Cover®; 4 = Vollspaltenboden, 5 = planbefestigter Boden mit reduziertem Schlitzanteil, 6 = Schlitze für die Unterflurabsaugung)	17
Abbildung 5:	Verläufe der NH ₃ -Emissionsraten (oben) und der NH ₃ -Emissionsfaktoren (unten) für die Behandlung „wöchentliche Entleerung des Flüssigmistkanals“ (A) und das Referenzabteil (R _A)	23
Abbildung 6:	Verläufe der CH ₄ -Emissionsraten (oben) und der CH ₄ -Emissionsfaktoren (unten) für die Behandlung „wöchentliche Entleerung des Flüssigmistkanals“ (A) und das Referenzabteil (R _A)	24
Abbildung 7:	Verläufe der NH ₃ -Emissionsraten (oben) und der NH ₃ -Emissionsfaktoren (unten) für die Behandlung „Flüssigmistabdeckung“ (B) und das Referenzabteil (R _B)	27
Abbildung 8:	Verläufe der CH ₄ -Emissionsraten (oben) und der CH ₄ -Emissionsfaktoren (unten) für die Behandlung „Flüssigmistabdeckung“ (B) und das Referenzabteil (R _B)	28
Abbildung 9:	Verläufe der NH ₃ -Emissionsraten (oben) und der NH ₃ -Emissionsfaktoren (unten) für die Behandlung „Zugabe Effektiver Mikroorganismen“ (C) und Referenzabteil (R _C)	30
Abbildung 10:	Verläufe der CH ₄ -Emissionsraten (oben) und der CH ₄ -Emissionsfaktoren (unten) für die Behandlung „Zugabe Effektiver Mikroorganismen“ (C) und Referenzabteil (R _C)	31
Abbildung 11:	Schema der Entstehung, Freisetzung und Ausbreitung von Ammoniak im Stall (nach KECK 1995)	33
Abbildung 12	CCF- Korrelogramm der CH ₄ - Emissionen [g h ⁻¹] kombiniert mit der Ablufttemperatur [°C], R _D	42
Abbildung 13:	CCF- Korrelogramm der CH ₄ - Emissionen [g h ⁻¹] kombiniert mit dem Volumenstrom [m ³ h ⁻¹], R _C	42
Abbildung 14:	Schematische Darstellung der Luftführung im Versuchstall (eigene Darstellung nach GALLMANN 2003)	52

Abbildung 15: Flussdiagramm der Ammoniakstoffflüsse innerhalb des Modells (eigene Darstellung nach CORTUS et al. 2010a)	53
Abbildung 16: Ergebnisse der Kalibrierung (oben) und Validierung (unten) der gemessenen und modellierten Ammoniakkonzentrationen im Abteil und im headspace	57
Abbildung 17: Ergebnis der Modellierung der wöchentlichen Entleerung des Flüssigmistkanals - Grafische Darstellung der gemessenen und modellierten Ammoniakkonzentration des Abteils und des headspace	59
Abbildung 18: Ergebnis der Modellierung der Abdeckung des Flüssigmistkanals - Grafische Darstellung der gemessenen und modellierten Ammoniakkonzentration des Abteils und des headspace	61
Abbildung 19: Diskussion der Modellierung der wöchentlichen Entleerung - Darstellung der modellierten Ammoniakkonzentrationen im headspace und der Ammoniakemissionen des Flüssigmists (oben) und der Ammoniakemissionen aus dem Flüssigmist im Zusammenhang mit der Fraktion des freien Ammoniaks im Flüssigmist (unten)	63
Abbildung 20: Diskussion der Modellierung der wöchentlichen Entleerung - Zusammenhang zwischen der Fraktion des freien Ammoniaks und des pH- Werts im Flüssigmist (oben) und Zusammenhang zwischen der Fraktion des freien Ammoniaks und der Flüssigmisttemperatur (unten)	64
Abbildung 21: Diskussion der Modellierung der wöchentlichen Entleerung - Darstellung der Ammoniakemissionen aus dem Flüssigmist im Zusammenhang mit der Henry-Konstanten	65
Abbildung 22: Diskussion der Kalibrierung - Abbildung der Zusammenhänge zwischen der Fraktion des freien Ammoniaks und des pH-Werts im Flüssigmist und zwischen der Fraktion des freien Ammoniaks und der Flüssigmisttemperatur	66
 <u>Anhang:</u>	
Abbildung A1: Verlauf der Abteil- (links) und Ablufttemperaturen (rechts) auf Ebene von Tagesmittelwerten in den drei Mastdurchgängen (A, B, C) sowie deren Referenzen (R_A , R_B , R_C)	99
Abbildung A2: Verlauf der Volumenströme [$m^3 h^{-1}$] (links) und [$m^3 h^{-1} GV^{-1}$] (rechts) auf Ebene von Tagesmittelwerten in den drei Mastdurchgängen (A, B, C) sowie deren Referenzen (R_A , R_B , R_C)	99
Abbildung A3: Verlauf der Einzeltiergewichte auf Ebene von Tagesmittelwerten in den drei Mastdurchgängen (A, B, C) sowie deren Referenzen (R_A , R_B , R_C)	100
Abbildung A4: Einteilung der Buchten 1 und 2 im Abteil „Süd“ für die Erhebung der Verschmutzungsprofile	101
Abbildung A5: Einteilung der Buchten 3 und 4 im Abteil „Nord“ für die Erhebung der Verschmutzungsprofile	101
Abbildung A6: Verlauf der Verschmutzungsprofile in den Buchten 1 und 2 über den gesamten Mastverlauf in Behandlung A im Abteil „Süd“ (Versuchsabteil, Darstellung 14- täglich)	102

Abbildung A7: Verlauf der Verschmutzungsprofile in den Buchten 3 und 4 über den gesamten Mastverlauf in Behandlung A im Abteil „Nord“ (Referenzabteil, Darstellung 14- täglich)	103
Abbildung A8: Verlauf der Verschmutzungsprofile in den Buchten 1 und 2 über den gesamten Mastverlauf in Behandlung B im Abteil „Süd“ (Referenzabteil, Darstellung 14- täglich)	104
Abbildung A9: Verlauf der Verschmutzungsprofile in den Buchten 3 und 4 über den gesamten Mastverlauf in Behandlung B im Abteil „Nord“ (Versuchsabteil Darstellung 14- täglich)	105
Abbildung A10: Verlauf der Verschmutzungsprofile in den Buchten 1 und 2 über den gesamten Mastverlauf in Behandlung C im Abteil „Süd“ (Referenzabteil, Darstellung 14- täglich)	106
Abbildung A11: Verlauf der Verschmutzungsprofile in den Buchten 3 und 4 über den gesamten Mastverlauf in Behandlung C im Abteil „Nord“ (Versuchsabteil, Darstellung 14- täglich)	107
Abbildung A12: Verläufe der Ammoniakkonzentration im Abteil (links) und in der Abluft (rechts) auf Ebene von Tagesmittelwerten für die drei Mastdurchgänge (A, B, C), sowie deren Referenzen (R_A , R_B , R_C)	108
Abbildung A13: Verläufe der Methankonzentration im Abteil (links) und in der Abluft (rechts) auf Ebene von Tagesmittelwerten für die drei Mastdurchgänge (A, B, C), sowie deren Referenzen (R_A , R_B , R_C)	108
Abbildung A14: Box-Plots der Ammoniakemissionsraten [$\text{g Tag}^{-1} \text{GV}^{-1}$] (oben) und Ammoniakemissionsfaktoren [$\text{kg Tierplatz}^{-1} \text{und Jahr}^{-1}$] (unten) auf Ebene von Tagesmittelwerten für die drei Mastdurchgänge (A, B, C), sowie deren Referenzen (R_A , R_B , R_C)	109
Abbildung A15: Box-Plots der Methanemissionsraten [$\text{g Tag}^{-1} \text{GV}^{-1}$] (oben) und Methanemissionsfaktoren [$\text{kg Tierplatz}^{-1} \text{und Jahr}^{-1}$] (unten) auf Ebene von Tagesmittelwerten für die drei Mastdurchgänge (A, B, C), sowie deren Referenzen (R_A , R_B , R_C)	110

1 EINLEITUNG

1.1 Die weltweite Nutztierhaltung im Kontext des anthropogen verursachten Klimawandels

Verantwortlich für den anthropogen verursachten Klimawandel ist die zusätzliche Freisetzung klimawirksamer Gase, sogenannter Treibhausgase wie Kohlendioxid (CO₂), Methan (CH₄), Distickstoffoxid (Lachgas, N₂O) und die fluorierten Kohlenwasserstoffverbindungen (F-Gase) durch die Verbrennung fossiler Energieträger, chemische Industrie, Waldvernichtung- und Abholzung und die Landwirtschaft (STEINFELD et al. 2006, UBA 2016a).

Ein Drittel der weltweit emittierenden Treibhausgase stammt aus dem landwirtschaftlichen Bereich. Von diesem Drittel entstehen 80 bis 90 % der Treibhausgasemissionen bereits in der landwirtschaftlichen Nahrungsmittelproduktion (Tierhaltung), wobei hier große regionale Unterschiede vorherrschen. Die aus den Tierhaltungsanlagen stammenden Emissionen von Kohlendioxid, Methan und Lachgas tragen als direkte Treibhausgasemissionen zum Treibhauseffekt bei (MENZI & STEINFELD 2011, VERMEULEN et al. 2012).

Die Basis für die Produktion von Nahrungsmitteln wie Fleisch und Milch ist die Haltung von Nutztieren. Annähernd ein Drittel der weltweit zur Verfügung stehenden Ackerflächen wird derzeit für den Anbau von Futtermitteln genutzt. Mit den hinzukommenden Weideflächen bewirtschaftet die Nutztierhaltung weltweit den größten Teil der zur Verfügung stehenden landwirtschaftlichen Flächen. Diese Flächen werden jährlich durch das fortschreitende Abholzen des Regenwalds ausgedehnt. Durch die Futtermittelproduktion, die Verarbeitung der tierischen Produkte und die von der Tierhaltung ausgeprägte Flächennutzung werden weitere, indirekt mit der Tierhaltung in Zusammenhang stehende Treibhausgasemissionen freigesetzt (STEINFELD et al. 2006, FAO 2016, MENZI & STEINFELD 2011).

Der sich weltweit seit Jahrzehnten in der Landwirtschaft vollziehende Strukturwandel ist gekennzeichnet durch stetig wachsende Nutztierbestände aufgrund des steigenden Konsums von Fleisch- und Milchprodukten vor allem in den Schwellenländern wie China, Indien, Indonesien und Brasilien. Hintergrund für den steigenden Konsum von Lebensmitteln tierischen Ursprungs ist das steigende Pro-Kopf-Einkommen der Menschen in den Entwicklungsländern und eine damit verbundene Änderung im Konsumverhalten (PICA-CIAMARRA & OTTE 2009, STEINFELD et al. 2009).

Entsprechend dem steigenden Verbrauch entwickelten sich der Markt sowie die gesamte Wertschöpfungskette hinsichtlich der Fleisch- und Milchproduktion in den letzten Jahren sehr dynamisch. Zum Vergleich: im Jahr 1993 lag die Weltfleischerzeugung bei insgesamt 191 Millionen Tonnen und stieg bis Ende 2015 auf 319 Millionen Tonnen an. Den größten Anteil an der Weltfleischerzeugung hat die Schweineproduktion (118,8 Millionen Tonnen), gefolgt von der Geflügel- und Rinderproduktion (112,1 und 68,3 Millionen Tonnen). Noch nie wurden weltweit mehr Tiere geschlachtet wie im Jahr 2015 und der Ausblick ins Jahr 2024 zeigt, dass der Konsum an Schweine- Geflügel- und Rindfleisch sowie Fisch weiterhin steigen wird (OECD/FAO 2015, WBA 2015, DBV 2016, FAO 2016).

DELGADO et al. definierten den Strukturwandel 1999 mit dem Begriff „livestock revolution“. Dieser Umbruch in den Strukturen der Nutztierhaltung, sowohl weltweit wie auch in Deutschland und der

hohe Konsum an tierischen Lebensmitteln birgt die Gefahr von irreversiblen Schäden auf Ebene der natürlichen Ressourcen wie Boden, Wasser und Luft (STEINFELD et al. 2006).

Die Nutztierhaltung produziert mit einem Anteil von 18 % mehr klimarelevante Gase als das gesamte Transportwesen zu Lande. Auf diese Weise ist sie für die Freisetzung von Gasen verantwortlich, die ein höheres Treibhausgaspotential haben als Kohlendioxid (CO₂). So stammen 37 % des anthropogen verursachten Methans (CH₄; 25 faches Treibhausgaspotential von CO₂) aus der Haltung von Nutztieren, hauptsächlich aus den Fermentationsprozessen im Pansen der Wiederkäuer. Aus den Exkrementen der Nutztiere emittieren jährlich 65 % des anthropogen verursachten Lachgases (N₂O), welches ein 298 Mal höheres Treibhausgaspotential hat wie CO₂. Darüber hinaus entstehen bei der Zersetzung der tierischen Exkremente rund zwei Drittel des anthropogenen Ammoniaks (NH₃) (STEINFELD et al. 2006, FAO 2009, IAASTD 2009, MENZI & STEINFELD 2011, WBA 2015, UBA 2016a, UBA 2016b, UBA 2016c).

Infolge von weiträumigen Ammoniakdepositionen werden Ökosysteme auch in Regionen mit geringen Tierbeständen erheblich belastet (Versauerung der Böden, Eutrophierung der Gewässer, Verringerung der Artenvielfalt). In verschiedenen Modellen schätzten DENTENER et al. (2006) die weltweite Verteilung der Stickstoffdepositionen. Anhand der Modelle konnten sie zeigen, dass im Jahr 2000 in großen Teilen Ost- und Südostchinas sowie Indiens die Stickstoffdeposition bereits so hoch war wie in den Niederlanden, die in Europa die höchsten Werte erreichen. Ihren Schätzungen zur Folge haben 11 % der natürlichen Ökosysteme eine höhere Stickstoffdeposition als 10 kg pro Hektar, was als kritischer Eintrag (critical load) betrachtet wird. Die am meisten betroffenen Regionen sind Osteuropa (80 %), Südasien (60 %), Japan (50 %), Ostasien (40 %) gefolgt von Südostasien (30 %), Westeuropa (30 %) und den USA (20 %).

Hohe Ammoniakkonzentrationen in der unmittelbaren Umgebung von großen Tierhaltungsanlagen können zu direkten Schäden an der Vegetation führen. Zwar zählt Ammoniak nicht zu den direkten Treibhausgasen, aber aufgrund von Nitrifikations- und Denitrifikationsprozessen verschiedener Stickstoffverbindungen kann Lachgas (N₂O) entstehen. Auf diesem Weg erhält Ammoniak eine indirekte Klimarelevanz (STEINFELD et al. 2006, WBA 2015).

Aufgrund der negativen Agglomerationseffekte wie von Nährstoffüberschüssen in Zusammenhang mit der Ausbringung von Wirtschaftsdüngern sowie den Ammoniak- und Methanemissionen, steht insbesondere die Nutztierhaltung in Verbindung mit der regionalen Konzentration von klimarelevanten Gasen. Mit der stetig wachsenden Tierhaltung, vor allem in Asien, werden die Treibhausgasemissionen und Ammoniakdepositionen weiterhin zunehmen (AHLGRIMM 1995, STEINFELD et al. 2006, FAO 2009, IAASTD 2009, MENZI & STEINFELD 2011, GERBER et al. 2013, WBA 2015, UBA 2014c, UBA 2016a).

1.2 Ammoniakemissionen und deren Minderungspotentiale in der Schweinehaltung in Deutschland

Wie oben für die weltweite Nutztierhaltung beschrieben, vollzog sich in den letzten Jahrzehnten auch in Deutschland, insbesondere im Bereich der Schweinehaltung, ein Strukturwandel. Während die Anzahl an schweinehaltenden Betrieben abnimmt, nimmt die Anzahl der pro Betrieb gehaltenen Schweine zu. Dieser Trend wird sich voraussichtlich weiter fortsetzen (WBA 2015). Zu ergänzen ist, dass im November 2015 mit insgesamt 27,7 Millionen Schweinen der niedrigste Schweinebestand in Deutschland seit 2011 existierte (DSTATIS 2016).

Je nach Haltungsverfahren werden in der Mastschweinehaltung derzeit Ammoniakemissionsfaktoren von 2 bis 4 kg NH₃-N je Tierplatz und Jahr angenommen (**Tabelle 1**).

Tabelle 1: Ammoniakemissionsfaktoren und Strohbedarf für Mastschweinehaltungsverfahren (aus EURICH-MENDEN et al. 2011)

Haltungsverfahren	Emissionsfaktor NH ₃ -N [kg Tierplatz ⁻¹ Jahr ⁻¹]	Einstreumenge [kg Tierplatz ⁻¹ Jahr ⁻¹]
Wärmegeämmter Stall, Vollspaltenboden, einstreulos	3	-
Wärmegeämmter Stall, Teilspaltenboden, einstreulos	3	-
Wärmegeämmter Stall, Schrägboden, ein Teil planbefestigt, ein Teil Spalten, Einstreu nur als Beschäftigungsmaterial	2	-
Wärmegeämmter Stall, Zweiflächenbucht, eingestreut, planbefestigt	4	0,3
Wärmegeämmter Stall, Tiefstreu	4	1
Außenklimastall, getrennte Klimabereiche, einstreulos	2	-
Außenklimastall, getrennte Klimabereiche, eingestreut	2	0,3
Außenklimastall, Tiefstreustall	3,5	1

Die Intensivtierhaltung ist in Deutschland Hauptemittent des Luftschadstoffs Ammoniak (NH₃). Mit einem Anteil von 20 % ist die Schweinehaltung, hinter der Rinderhaltung mit 52 %, der zweitgrößte Emittent von Ammoniak. Diese Ammoniakemissionen stammen in der Schweinehaltung zu zwei Dritteln aus den punktförmigen Emissionsquellen wie z.B. Stall und Güllelager und zu einem Drittel aus den diffusen Emissionsquellen in der Fläche aufgrund der Ausbringung organischer Dünger tierischer Herkunft (UBA 2014a, **Tabelle 2**).

Tabelle 2: Ammoniakemissionen aus der Tierhaltung in Deutschland in kt, aufgeteilt auf die verschiedenen Quellbereiche für 2011 (nach WBA 2015, aus RÖSEMANN et al. 2013)

	Rinder	Schweine	Geflügel	Andere Tiere	Summe
Stall	79,6	73,1	14,9	4,0	171,6
Lager	46,8	14,3	10,6	4,2	76,0
Ausbringung	148,2	19,4	23,3	4,2	195,1
Weidegang	6,7	0,0	0,0	1,6	8,3
Summe	281,3	106,9	48,9	14,0	451,1

Vor diesem Hintergrund sind in der Schweinehaltung Emissionsminderungsmaßnahmen sinnvoll, die bereits auf der Ebene der Fütterung weniger Stickstoff (N) in den Stoffkreislauf bringen (z.B. rohproteinangepasste Mehrphasenmast; Verschiebung der N-Ausscheidungen vom Urin zum Kot durch höheren Anteil bakteriell fermentierbarer Substanzen in der Ration und dadurch Absenkung des pH-Werts der Exkrememente; VAN DEN WEGHE 2002, UBA 2003, PHILIPPE et al. 2011, EURICH-MENDEN et al. 2011, RÖBLER et al. 2012).

Dennoch gelangen über die Fütterung der Tiere große Mengen an Stickstoff in den Stoffkreislauf, denn nur ungefähr 33 % des über das Futter aufgenommenen Stickstoffs werden im Schwein in Form von körpereigenem Eiweiß angesetzt (N-Retention). Die restlichen 67 % werden über Kot (16 %) und Harn (51 %) ausgeschieden (AARNINK 1997, UBA 2003; **Abbildung 1**).

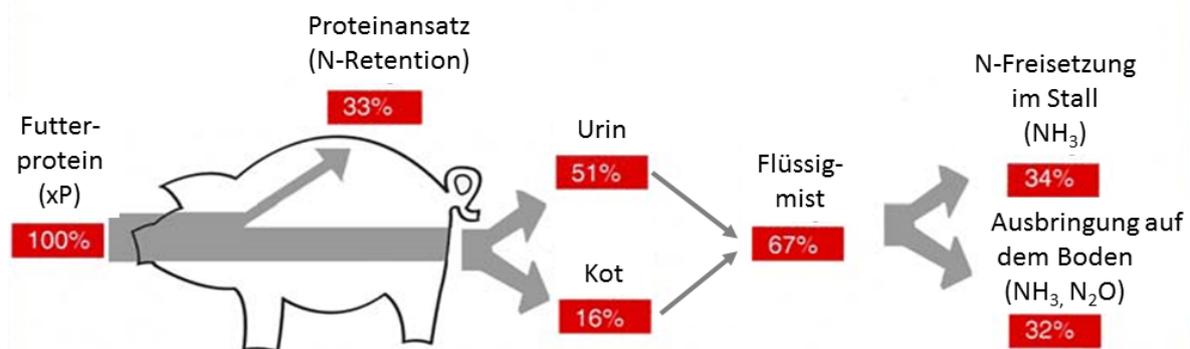


Abbildung 1: Verbrauch, Verwertung und Verlust von Proteinen bei der Erzeugung eines Schweins von 108 kg Lebendgewicht (eigene Darstellung nach UBA 2003)

Die stickstoffangepasste Mehrphasenmast (2 bis 4 Phasen) wird in der Schweinehaltung bereits als „gute fachliche Praxis“ empfohlen bzw. sollte im Rahmen der „Beste verfügbaren Techniken“ angewandt werden (UBA 2003, EURICH-MENDEN et al. 2004, KTBL 2012). Wird der Rohproteingehalte im Futter in mehrwöchigen Abständen (von 18 auf 13 % Rohprotein) angepasst und die Futterrations mit essentiellen Aminosäuren (Lysin und Methionin) ausgeglichen, können die Ammoniakemissionen bis zu 20 % reduziert werden. Bei einer täglichen Anpassung des Rohproteingehaltes können bis zu 40 % der Ammoniakemissionen eingespart werden (PHILIPPE et al. 2011, KTBL 2012). Voraussetzung für die mehrmalige Umstellung der Futterrations ist eine entsprechend geeignete Fütterungstechnik. RÖBLER et al. (2012) zeigten, dass die Kosten für die aufwendigere Fütterungstechnik durch sinkende Futterkosten aufgrund des geringeren Verbrauchs an Rohprotein kompensiert werden können.

Mit Blick auf die Haltungs- und Entmistungstechnik sowie auf das Flüssigmistmanagement im Stall sind die erreichbaren Emissionsminderungen unter der Voraussetzung einer angepassten und sorgfältigen Betriebsweise recht hoch (GALLMANN 2003). Vor dem Hintergrund anhaltend niedriger Erlöse für schweinehaltende Betriebe (WBA 2015, AGRARHEUTE 2016) stehen den erforderlichen Umbaumaßnahmen in Altgebäuden die Investitionskosten als limitierender Faktor entgegen. Bei geplanten Neubauten sollten die Möglichkeiten zur Emissionsminderung bei der Gestaltung des Haltungs- und Entmistungssystems genutzt werden (GALLMANN 2003).

Die in **Tabelle 3** zusammengefassten Minderungsmaßnahmen, welche auf der Ebene der Haltungs- und Entmistungstechnik (I.) und des Flüssigmanagements (II.) ansetzen, bezwecken vor allem die Reduzierung von emittierenden Oberflächen und somit die Freisetzung von NH_3 -Emissionen im Tierbereich und im Flüssigmistkanal. Durch das regelmäßige Spülen des Flüssigmists wird das Ausgangssubstrat für die NH_3 -Freisetzung entzogen. Im Idealfall gelangt der Flüssigmist anschließend in ein abgedecktes Außenlager (UBA 2003, AMON et al. 2006, HANSEN et al. 2006, DÖHLER et al. 2011a). Hier bleibt der im Flüssigmist in Form von Ammonium-Stickstoff ($\text{NH}_4\text{-N}$) gebundene Stickstoff als Wirtschaftsdünger erhalten.

Die aufgeführten Lüftungstechnischen Maßnahmen zur NH_3 -Emissionsminderung (III.) nehmen Einfluss auf die NH_3 -Freisetzung, d.h. den Stoffübergang von der flüssigen in die gasförmige Phase, an der Grenzfläche des Flüssigmists. Durch die Beeinflussung von Faktoren wie Luftvolumenstrom, Luftgeschwindigkeit, Lufttemperatur und Luftführung können die NH_3 -Emissionen reduziert werden.

Am Ende der gesamten Verfahrenskette steht mit der Ausbringung der Wirtschaftsdünger ein Arbeitsschritt, welcher durch die schnelle Einarbeitung des Flüssigmists in die oberste Bodenschicht mittels Schlitztechniken einen wesentlichen Beitrag zur Reduktion der Ammoniakemissionen leisten kann (UBA 2003, DÖHLER et al. 2011b, KTBL 2012).

Das Klima im Stall beeinflusst das Wohlbefinden der Tiere und ist ebenso durch die Tiere selbst beeinflusst (SHOSHANI & HETZRONI 2013). Über die Luftführung und Buchtengestaltung ist es möglich, Einfluss auf die Einteilung und Einhaltung von Funktionsbereichen und somit die Größe und Lokalisation von verschmutzten Oberflächen zu nehmen (AARNINK 1997). Somit sind Kenntnisse über die Luftströmung im Stallgebäude von besonderer Bedeutung. Da sich Luftströmungsmessungen messtechnisch nur mit sehr hohem Aufwand realisieren lassen, können dreidimensionale Modellierungen der Strömungsvorgänge mithilfe numerischer Simulationen, sogenannter Computational Fluid Dynamics - CFD - Simulationen, eine sinnvolle Ergänzung zu den Messungen sein (ADRION et al. 2013). Begünstigt durch höhere verfügbare Rechnerleistungen und verbesserte Löser gewinnt dieses Verfahren im Bereich der Agrarwissenschaften immer mehr an Bedeutung (ADRION 2012, ADRION et al. 2013, HEMPEL et al. 2015a, MÜBLICK et al. 2015, ROJANO et al. 2015).

Tabelle 3: Beispiele für Minderungspotentiale von Maßnahmen bei Haltungstechnik, Flüssigmistmanagement sowie Luftführung zur NH₃-Emissionsreduktion in der Mastschweinehaltung (erweitert nach GALLMANN 2003)

Maßnahme	Minderungs- potential (Anhaltwerte)	Quellen
I. Haltungs- und Entmistungstechnik		
Reduzierter Schlitzanteil bei funktionsoptimierten Spaltenböden	k. A.	AUSTERMANN et al. (2013)
Entmistungsschieber für planbefestigte Böden	k. A.	WEBER et al. (2013)
Kot-Harntrennung	18-45 %	ALBERT (2013)
II. Flüssigmistmanagement		
Spülen über Spülrinnen mit biologisch behandelte Spülflüssigkeit (1-2 Mal täglich)	10-50 %	MEISSNER (2004)
Spülen mit der flüssigen Fraktion des Flüssigmists (2-4 Mal täglich)	13-40 %	GUINGAND et al. (2012)
Abdeckung der Flüssigmistoberfläche (im Laborversuch): Kombination aus Pergülit™ oder Leca™ oder Stroh mit Saccharose	60-85 %	BERG et al. (2006)
Abdeckung der Flüssigmistoberfläche (im Laborversuch): Kombination aus Pergülit™ oder Leca™ oder Stroh mit Milchsäure	40-70 %	BERG et al. (2006)
Einfluss des Abstandes der Flüssigmistoberfläche zur Unterseite des Spaltenbodens im Flüssigmistkanal bzw. bis zu den Schlitzen der Unterflurabsaugung im Flüssigmistkanal (headspace)	k. A.	YE et al. (2009a)
Reduzierung der dem Luftvolumenstrom ausgesetzten Oberfläche, mittels unter den Spalten angebrachter Vorhänge	2-20 %	YE et al. (2011)
Zugabe von Flüssigmistadditiven - Braunkohle (Laborversuch, bei 20°C)	17-28 %	HÖRNIG et al. (2002)
Zugabe von Flüssigmistadditiven zur pH-Wert-Absenkung (Milchsäure; im Ferkelaufzuchtstall)	bis zu 23 %	FROSCH & BÜSCHER (2002)
Zugabe von Flüssigmistadditiven - Effektive Mikroorganismen (Flüssigmistlagerung in zylindrischen Güllebehältern; Güllezusatz im Verhältnis 1:2,6)	11 %	AMON et al. (2005)
Zugabe von Flüssigmistadditiven - Effektive Mikroorganismen (EM) (Versprühung der EM im Stall im Verhältnis 1:1 sowie EM-Gabe über das Futter; Schrägbodenstall; Schwemmentmistung)	42 %	PÖLLINGER et al. (2004)
III. Lüftungstechnik und Einflussnahme auf die Zu- und Abluftführung		
Futterganglüftung mit Ober- oder Unterflurabsaugung; Zuluftlochplatten mit Unterflurabsaugung	10-23 %	KECK (1997)
Zuluftkühlung (Kühlpad, Hochdruckbefeuchtung und Unterfluransaugung)	k. A. ¹	PERTAGNOL (2013)
Zuluftkonditionierung mittels alternativem Gebäude- und Lüftungskonzept	k. A.	KROMMWEH et al. (2013)
Aufteilung der stallinternen Strömungsabläufe in Oberflur- und Unterflurabsaugung mittels Schlitzöffnungen, bei max. 25% ² und 30% ³ unter Flur abgesaugtem Luftvolumenstrom, „intelligente Lüftung“	70 %	KRAUSE et al. (2010) ² MUßLICK et al. (2015) ³

k. A. = keine Zahlenangaben

¹ Ranking: Kühlpad > Hochdruckbefeuchtung > Unterfluransaugung

1.3 Methanemissionen und deren Reduktionspotentiale in der Schweinehaltung in Deutschland

Mit einem Anteil von rund 53 % ist die Landwirtschaft in Deutschland derzeit die bedeutendste Emissionsquelle des klimarelevanten Gases Methan (CH₄). Im Jahr 2013 stammten 19,7 % CH₄ aus der Lagerung und Ausbringung von Wirtschaftsdüngern (UBA 2014b, UBA 2015a).

Je nach Haltungsverfahren und Anzahl der Entmistungen pro Mastdurchgang werden in der Mastschweinehaltung derzeit Methanemissionsfaktoren von rund 1 bis 14 kg CH₄ je Tierplatz und Jahr angenommen (**Tabelle 4**).

Tabelle 4: Beispiele für Methanemissionsfaktoren und Entmistungshäufigkeiten in verschiedenen Mastschweinehaltungsverfahren (erweitert nach JEPSSON 2011)

Haltungsverfahren und Anzahl der Entmistungen je Mastdurchgang	Emissionsfaktor CH ₄ [kg Tierplatz ⁻¹ Jahr ⁻¹] ¹	Quellen
Vollspaltenboden		
Staumistverfahren, 1 Mal entleert ²	9,17	COSTA & GUARINO (2009)
Staumistverfahren, 1 Mal entleert ³	5,63	PHILIPPE et al. (2007a)
Staumistverfahren 1 Mal entleert ³	5,24	PHILIPPE et al. (2007b)
Staumistverfahren 1 Mal entleert ³	2,26	HÄUßERMANN et al. (2006)
Staumistverfahren, 1 Mal entleert ³	3,54	GALLMANN (2003)
Staumistverfahren, 1 Mal entleert ³	1,12	GALLMANN (2003)
Staumistverfahren, 1 Mal entleert ³	14,16	MEISSNER & VAN DEN WEGHE (2003)
Tägliches Spülen	2,93	MEISSNER & VAN DEN WEGHE (2003)
Teilspaltenboden		
Staumistverfahren, 1 Mal entleert ³	2,76	OSADA et al. (1998)
Staumistverfahren, 14-tägliche Entleerung ^{3,4}	3,22	BLANES-VIDAL et al. (2008)
Staumistverfahren, wöchentliche Entleerung ^{3,4}	2,45	OSADA et al. (1998)
Mistschieber, täglich	7,25	NGWABIE et al. (2011)
Tiefstreustall		
Stroh, 1 Mal entleert ³	5,53	PHILIPPE et al. (2007a)
Stroh, 3 Mal entleert ³	2,55	NICKS et al. (2004)
Sägemehl, 3 Mal entleert ¹	1,71	NICKS et al. (2004)
Schrägbodenstall		
Entmistung, täglich ³	3,06	PHILIPPE et al. (2007b)
Tretmiststall	1,52	AMON et al. (2007)
Mistschieber, 2 Mal täglich	0,66	AMON et al. (2007)

¹ Für die Berechnungen der Emissionsfaktoren wurden von JEPSSON (2011) folgende Annahmen getroffen:

Jahr = 345 Tage, Mastschwein = 0,14 GV

² Praxisbetrieb

³ Versuchsstall

⁴ Mastdurchgang im Herbst

Methan entsteht bei der Fermentation leicht abbaubarer organischer Substanzen (Kohlehydrate) unter anaeroben Bedingungen durch die Aktivität von Methanbakterien. Diese leichtabbaubaren Substanzen sind in der Schweinehaltung vor allem im Flüssigmist enthalten (HARTUNG 2002, JEPSON 2011). Wird den Methanbakterien durch regelmäßiges Entleeren des Flüssigmistkanals oder durch das Abschieben der planbefestigten Böden die Nahrungsgrundlage (I.) entzogen, kann auf der Ebene des Flüssigmistmanagements in Zusammenhang mit einer entsprechenden Entmistungstechnik ein wesentlicher Beitrag zur Senkung der Methanemissionen geleistet werden. Auch die Zugabe von Flüssigmistadditiven sowie die Abdeckung der Flüssigmistoberfläche (II.) zeigen deutliche Reduktionspotentiale (**Tabelle 5**).

Tabelle 5: Beispiele für Minderungspotentiale von Maßnahmen bei Haltungstechnik und Flüssigmistmanagement zur CH₄-Emissionsreduktion in der Mastschweinehaltung (erweitert nach GALLMANN 2003)

Maßnahme	Reduktionspotential (Anhaltwerte)	Quellen
I. Haltungs- und Entmistungstechnik		
Reinigung und Desinfektion des Flüssigmistkanals zwischen den Mastdurchgängen	40 %	HÄUßERMANN et al. (2006)
Entmistungsschieber für planbefestigte Böden	k. A.	WEBER et al. (2013)
II. Flüssigmistmanagement		
Flüssigmistbelüftung	bis 70 %	KRESSE & BÜSCHER (2009)
Spülen über Spülrinnen mit biologisch behandelter Spülflüssigkeit (1-2 Mal täglich)	60-90 %	MEISSNER (2004)
Spülen mit der flüssigen Fraktion des Flüssigmists (2-4 Mal täglich)	26-46 %	GUINGAND et al. (2012)
Zugabe von Flüssigmistadditiven - Braunkohle (Laborversuch, bei 20°C)	17-29 %	HÖRNIG et al. (2002)
Zugabe von Flüssigmistadditiven zur pH-Wert-Absenkung (Milchsäure; im Ferkelaufzuchtstall)	50-60 %	FROSCH & BÜSCHER (2002)
Zugabe von Flüssigmistadditiven - Effektive Mikroorganismen (EM) (Versprühung der EM im Stall im Verhältnis 1:1 sowie EM-Gabe über das Futter; Schrägbodenstall; Schwemmentmistung)	69 %	PÖLLINGER et al. (2004)
Abdeckung der Flüssigmistoberfläche (im Laborversuch): Kombination aus Pergulit™ oder Leca™ oder Stroh mit Saccharose	über 10 %	BERG et al. (2006)
Abdeckung der Flüssigmistoberfläche (im Laborversuch): Kombination aus Pergulit™ oder Leca™ oder Stroh mit Milchsäure	40-78 %	BERG et al. (2006)
III. Lüftungstechnik und Einflussnahme auf die Zu- und Abluftführung		
Vermeidung des Luftaustausches durch den Spaltenboden	k. A.	MONTENY et al. (2001)
Stallklimaregelung anhand von CO ₂ -Innenraumkonzentration, Temperatur und Luftfeuchtigkeit zur Regelung der Befeuchtung und adiabatischen Kühlung der Abteilluft	k. A.	HÄUßERMANN (2006)
Zuluftkühlung (Kühlpad, Hochdruckbefeuchtung und Unterfluransaugung)	k. A. ¹	PERTAGNOL (2013)

k. A. = keine Zahlenangaben

¹Ranking: Unterfluransaugung > Hochdruckbefeuchtung > Kühlpad

Untersuchungen zur Kühlung des Flüssigmists (III.) zeigten deutliche Reduktionspotentiale (50 bis 60 %; UBA 2003). Der Einbau von Kühlsystemen (z.B. Kühlrippen) in den Flüssigmistkanal von Mastschweinställen hat sich aufgrund der durch die Kühlung steigenden Energiekosten in der Praxis nicht etabliert. Im Zusammenhang mit der in Tabelle 3 aufgeführten Zuluftkühlung durch Unterfluransaugung der Zuluft könnte durch weitere baulich-technische Lösungen, welche die gleichzeitige Kühlung des Flüssigmists beinhalten, sowohl die Ammoniak- als auch die Methanemissionen kombiniert reduziert werden. Auf diesem Weg könnte die Kühlung des Flüssigmists wieder ein interessanter Ansatzpunkt zur Reduktion von der Methanemissionen sein (UBA 2003).

Auf der Ebene des Flüssigmistmanagements kann die Landwirtschaft demzufolge einen Beitrag zur Senkung der Emissionen direkt und indirekt wirksamer Treibhausgase in Deutschland leisten, um das angestrebte Minderungsziel im Jahr 2020 zu erreichen (UBA 2015b).

1.4 Modellierung von Stoffflüssen im Mastschweinestall

Der Hintergrund für die Erstellung mathematischer Modelle zur Abbildung von Stoffkreisläufen in der Landwirtschaft und im Speziellen in der Tierhaltung liegt hauptsächlich in der politischen Verpflichtung der Mitgliedsstaaten der Vereinten Nationen, Emissionsminderungen für Treibhausgase und Luftschadstoffe zu erzielen. Diese internationalen Verpflichtungen gehen auf die Klimarahmenkonvention von 1992 (UN Framework Convention on Climate Change - UNFCCC) und das Kyoto-Protokoll von 1997 zurück. Für das Einhalten dieser Verpflichtungen sind jährlich detaillierte Inventare nationaler Emissionen zu berechnen und international zu berichten (RÖSEMAN et al. 2015). Für diese Berichterstattung werden mathematische Modelle als „Werkzeuge“ verwendet, um auf nationaler Ebene Emissionsinventare bereitstellen zu können.

Seit Mitte der 1990er Jahre sind in der agrartechnischen Forschung weltweit Teams von Wissenschaftlern daran beteiligt, geeignete mathematische Modelle zu erstellen, die in der Lage sind, diese Emissionsinventare zu berechnen. Dazu zählen, in Form von kleineren Untermodellen, auch die Modellierungen von Ammoniakstoffflüssen innerhalb von Tierhaltungsanlagen verschiedener Tierarten und die daraus resultierende Berechnung von Ammoniakemissionen (OLESEN & SOMMER 1993, ZHANG et al. 1994, AARNINK & ELZING 1998, WEBB & MISSELBROOCK 2004, KAI et al. 2006, NI et al. 2000, RIGOLOT et al. 2010a und 2010b, CORTUS et al. 2010a und 2010b, RÖSEMAN et al. 2015).

Darüber hinaus sind die Wissenschaftler anhand solcher Modelle in der Lage, eine Abschätzung zum Effekt von verschiedenen Emissionsminderungsszenarien zeit- und kostensparend vorzunehmen. Dies ist vor allem mit Blick auf die Vielzahl an Einflussfaktoren interessant, welche an der Freisetzung von Ammoniak beteiligt sind (RIGOLOT et al. 2010a und 2010b, CORTUS et al. 2010a und 2010b).

In den letzten Jahren ist das Verständnis über die Prozesse hinsichtlich der Freisetzung von Ammoniakemissionen stetig gewachsen. Dieses Wissen ist in die Entwicklung von unterschiedlichen Modellen geflossen (CORTUS et al. 2010a), welche in **Tabelle 6** zusammengestellt wurden.

Die Grundlage für jede Modellierung liegt in dem Vorhandensein von verlässlichen Datensätzen. Die Modellgüte ist im Wesentlichen von der gewählten Datenbasis abhängig. Daher ist es wichtig, dass parallel zu den wissenschaftlichen Emissionsmessungen in den Versuchsställen unter kontrollierten Bedingungen auch Messungen in der Breite der landwirtschaftlichen Praxis von Nutztierhaltungsanlagen erfolgen, wie sie derzeit im EmiDat-Projekt (KTBL 2014) vorangetrieben werden. Diese im Feld erhobenen Datensätze sind für die Weiterentwicklung und Optimierung der Modelle relevant, auch im Hinblick auf die erforderliche Emissionsinventarermittlung. Ohne eine korrekte Einschätzung der Ausgangssituation hinsichtlich der Menge der entstehenden Emissionen aus den verschiedenen Tierhaltungen und deren genaue Zuordnung zu den Quellen, ist es schwer konkrete Minderungsziele zu formulieren und diese auch einzuhalten.

Tabelle 6: Übersicht zu Untersuchungen zur Modellierung von Ammoniakstoffflüssen in der Nutztierhaltung

Modell	Quelle
Modellierung der Ammoniakverluste bei unterschiedlichen Windgeschwindigkeiten und Flüssigmistabdeckungen (bei der Lagerung von Rinder- und Schweineflüssigmist)t	OLESEN & SOMMER (1993)
Modellierung der NH ₃ -Freisetzung aus Schweineflüssigmist für einen Mastdurchgang (konventionelles Staumistverfahren)	ZHANG et al. (1994)
Modellierung der NH ₃ -Freisetzung & Ammoniakemissionen (Teilspaltenboden, ohne Stroheinstreu)	AARNINK & ELZING (1998)
Massenflussansatz zur Schätzung der Ammoniakemissionen für die Tierproduktion in Großbritannien; inklusive Minderungsmaßnahmen und Kostenanalyse	WEBB & MISSELBROOCK (2004)
Modellierung der Ammoniak-,Methan- und Geruchsquellen im Schweinestall 2 Durchgänge, Tiergewicht: 1 x 25 kg und 1 x 45 kg (2 identische Versuchsabteile, Vollspaltenboden, mit Spülentmistung)	KAI et al. (2006)
Modellierung der Ammoniakfreisetzung aus Schweineflüssigmist, (zwangselüfteter Stall, Staumistverfahren)	NI et al. (2000)
Modellierung der Flüssigmistentwicklung von Schweinen und die Emissionen von NH ₃ , N ₂ O und CH ₄ über die Zeit eines Mastdurchganges hinweg bis zur Lagerung und Ausbringung; Simulation verschiedener Szenarien möglich	RIGOLOT et al. (2010a) RIGOLOT et al. (2010b)
Modellierung von NH ₃ -Konzentrationen im Abteil und unter den Spalten sowie der NH ₃ -Emissionen, Modellierungszeitraum: stündlich bis 3 Tage, Simulation verschiedener Szenarien möglich, (zwangselüfteter Stall, Oberflurabsaugung, Staumistverfahren)	CORTUS et al. (2010a) CORTUS et al. (2010b)

1.5 Zielsetzung und Aufbau der vorliegenden Arbeit

Das Hauptziel der vorliegenden Arbeit waren Untersuchungen zum Emissionsgeschehen und zu ausgewählten Ansätzen zur Emissionsminderung von Ammoniak und Methan, insbesondere beim Flüssigmistmanagement in der Mastschweinehaltung. In diesem Kontext standen die drei Herangehensweisen Messen – Analysieren – Modellieren im Fokus und wurden entsprechend als Teilziele festgelegt:

- Durchführung von Emissionsminderungsstrategien beim Flüssigmistmanagement in einem konventionellen Schweinemaststall und Vergleich der Emissionen mit einem Referenzsystem ohne Emissionsminderungsmaßnahmen. Die ausgewählten Emissionsminderungsstrategien sollten praxistauglich und nachträglich in vorhandenen Stallbauten anwendbar sein.
- Analyse der Haupteinflussfaktoren auf die Emissionen im Mastverlauf in unterschiedlichen Jahreszeiten unter besonderen Berücksichtigung von Zeitreiheneffekten und Regressionen.
- Prüfung der Möglichkeiten einer Stoffflussmodellierung, Anwendung auf die eigenen Messdaten bzw. zur Potentialabschätzung von Emissionsminderungsmaßnahmen sowie Evaluierung des gewählten Ansatzes zur Stoffflussmodellierung.

Im Rahmen dieser Arbeit werden für die Teilziele in drei eigenständigen Kapiteln jeweils die Vorgehensweise und die Ergebnisse dargestellt und im Speziellen diskutiert.

Im ersten der drei Kapitel „FLÜSSIGMISTMANAGEMENT“ werden die Ergebnisse von zwei durchgeführten Emissionsminderungsstrategien für Ammoniak und Methan vorgestellt, die sich auf das Flüssigmistmanagement im Mastschweinstall beziehen. Im darauffolgenden Kapitel „STATISTISCHE AUSWERTUNGEN“ werden die Ergebnisse der statistischen Auswertung beschrieben, in welcher die Daten des Referenzabteils von insgesamt vier durchgeführten Mastdurchgängen mittels Zeitreihen- und Regressionsanalyse ausgewertet wurden. Innerhalb des dritten Kapitels „MODELLIERUNGEN“ werden ergänzend zu den Versuchen im Stall und somit anhand der eigenen Datensätze die Möglichkeiten einer Stoffflussmodellierung von Ammoniak in einem dynamischen Modell geprüft.

Als Abschluss folgen eine Gesamtdiskussion und Zusammenfassung.

2 FLÜSSIGMISTMANAGEMENT: EFFEKTE AUF DIE AMMONIAK- UND METHANEMISSIONEN IM MASTSCHWEINESTALL

In der Mastschweinehaltung beeinflusst das Flüssigmistmanagement im Stall die Emissionen von Ammoniak und Methan, wobei die Reduktionspotentiale noch nicht hinreichend geklärt sind. In diesem Projekt wurde jeweils über einen Mastdurchgang und im Vergleich zum Staumistverfahren (Referenz) eine wöchentliche Entleerung der Flüssigmistkanals sowie eine Abdeckung des unterflur gelagerten Flüssigmists mit Schwimmkörpern untersucht und mit dem Staumistverfahren als Referenz verglichen. Dieser Beitrag beschreibt die Vorgehensweise und zeigt anhand eigener Ergebnisse die Vor- und Nachteile der beiden ausgewählten Emissionsminderungsstrategien auf.

Im Gegensatz zur Milchviehhaltung, bei welcher der Hauptanteil der Methanemissionen vom Tier selber stammt, emittiert Methan in der Mastschweinehaltung hauptsächlich aus den Exkrementen der Tiere, welche konventionell unter dem Spaltenboden gelagert werden (CLEMENS & AHLGRIMM 2001). In Bezug auf die gleichzeitige Beeinflussung der Methan- und Ammoniakemissionen durch die verschiedenen Flüssigmisthandhabungen, können derzeit noch keine konkreten Vorgaben zum optimalen Umgang mit dem Flüssigmist im Stall gegeben werden. Zu den potenziellen Managementstrategien zählen das regelmäßige Ableiten des Flüssigmists vom Stall in ein Außenlager sowie das Abdecken der Flüssigmistoberfläche (EURICH-MENDEN et al. 2011, MEISSNER 2004, GALLMANN 2003).

Die Untersuchungen von NI et al. (1999) zeigen, dass die Höhe des Flüssigmistpegels bzw. die Menge an angestautem Flüssigmist im Flüssigmistkanal zwar keinen Einfluss auf die Ammoniakemissionen hat, jedoch auf die Methanemissionen (DONG et al. 2011). Demgegenüber stehen Ergebnisse, welche zeigen, dass durch das tägliche Entleeren des Flüssigmistkanals die Methan- und auch die Ammoniakemissionen in drei von vier Versuchen reduziert werden konnten (AMON et al. 2007). Zweimaliges Spülen des Flüssigmistkanals pro Tag reduzierte sowohl die Methan- als auch die Ammoniakemissionen durchgängig (GUINGAND et al. 2012). Dies deckt sich mit den Untersuchungsergebnissen von MEISSNER (2004). Durch das ein bzw. zweimal tägliche Spülen über Spülrinnen mit biologisch behandelter Spülflüssigkeit sowohl die Ammoniakemissionen (10 bis 50 %) als auch die Methanemissionen (60 bis 90 %) deutlich reduziert werden. Ammoniakemissionen lassen sich hauptsächlich durch die Reduzierung der Flüssigmistoberfläche beeinflussen (PHILIPPE et al. 2011). Hinsichtlich der Abdeckung der Flüssigmistoberfläche im Stall existieren bisher nur wenige Erfahrungen und Ergebnisse. In einer Studie (YE et al. 2011) wurden z.B. Vorhänge unter dem Spaltenboden angebracht, um auf diese Weise die Oberfläche zu reduzieren, welche in direktem Kontakt zum Luftvolumenstrom des Lüftungssystems steht. Bereits diese Maßnahme führte zu einer Reduktion der Ammoniakemissionen zwischen 2 bis 20 %.

Untersuchungen von PÖLLINGER et al. (2004) und AMON et al. (2005) zeigten, dass hinsichtlich der Ammoniakemissionen ein positiver Effekt (Emissionsreduktion zwischen 11 und 42 %) durch die Zugabe von Flüssigmistadditiven (hier: Effektive Mikroorganismen) erzielt werden konnte. Bei den Methanemissionen konnten nur PÖLLINGER et al. (2004) eine deutliche Emissionsminderung von 69 % beobachten. Bei den Untersuchungen von AMON et al. (2005) kam es zu einer Erhöhung der Methanemissionen um 24 %.

Ziel dieses Arbeitspaketes war es, das Potential möglichst leicht umsetzbarer Managementmaßnahmen hinsichtlich der Handhabung des Flüssigmists im Stall zu untersuchen.

2.1 Versuchsstall und Versuchstiere

Die Untersuchungen fanden in einem Mastschweinegestall mit zwei Abteilen auf der Versuchsstation Agrarwissenschaften, Standort Lindenhöfe der Universität Hohenheim statt. Ein Abteil diente jeweils als Versuchsabteil (Behandlung A - wöchentliche Entleerung des Flüssigmistkanals; Behandlung B - Abdeckung der Flüssigmistoberfläche; Behandlung C – Zugabe von Effektiven Mikroorganismen zum Flüssigmist) und das jeweils andere Abteil als Referenzabteil (R_A , R_B , R_C) (**Tabelle 7**). Im Versuchsstall erfolgte über die gesamte Dauer der Mastdurchgänge die Flüssigmistlagerung, außer in der Behandlung B, unterflur im Staumistverfahren. Die Behandlung A mit wöchentlicher Entleerung des Flüssigmistkanals wurde gewählt, um zum einen den Arbeitsaufwand gering zu halten und zum anderen, um auch eine Mindestmenge an Flüssigmist zu gewährleisten, die für das ordnungsgemäße Entleeren des Flüssigmistkanals benötigt wird. Natürlich hat das tägliche Entleeren des Flüssigmistkanals ein höheres Emissionsminderungspotential. In diesem Versuch sollte herausgefunden werden, ob auch schon das wöchentliche Entleeren einen mindernden Effekt auf die Emissionen hat. Das Versuchsabteil und das Referenzabteil wurden nach dem ersten Mastdurchgang (Behandlung A) gewechselt, d.h. die Behandlung A wurde im Abteil „Süd“ und die Behandlungen B und C im Abteil „Nord“ durchgeführt (**Abbildung 2**; das blaue Abteil entspricht Abteil „Nord“ und das rote Abteil dem Abteil „Süd“). Für die drei Behandlungen wurden im Rein-Raus-Prinzip nacheinander jeweils 50 Schweine (Genetik: Deutsche Landrasse x Pietrain) mit einem Einzeltiergewicht von ca. 28 kg gemischtgeschlechtlich eingestallt. Pro Abteil waren je 25 Tiere in zwei Buchten untergebracht. Jedem Tier stand rund 1 m² Platz zur Verfügung. Der Betonboden ist in beiden Abteilen zu $\frac{2}{3}$ mit reduziertem Schlitzanteil (ca. 6 %) und zu $\frac{1}{3}$ als Vollspaltenboden mit ca. 14 % Schlitzanteil ausgestattet

Tabelle 7: Übersicht der durchgeführten Emissionsminderungsmaßnahmen und die Bezeichnung der Behandlungen (A, B, C), Zuordnung des Versuchsabteils, Zeitraum jeder Behandlung sowie Anzahl an auswertbaren Tagen je Mastdurchgang (n)

Mastdurchgang (MD) Anzahl Tage (n)	Zeitraum	Bezeichnung der Behandlung und der Referenz	Durchgeführte Emissionsminderungsmaßnahme / (Versuchsabteil)
1 n=95	06.08.2013 – 08.11.2013	A / R_A	Wöchentliche Entleerung des Flüssigmistkanals (Abteil „Süd“)
2 n=96	16.01.2014 – 21.04.2014	B / R_B	Abdeckung der Flüssigmistoberfläche mit Hexa-Cover®-Schwimmkörpern (Abteil „Nord“)
3 n=97	30.10.2014 – 03.02.2015	C / R_C	Zugabe von Flüssigmistadditiven „Effektive Mikroorganismen“ (Abteil „Nord“)

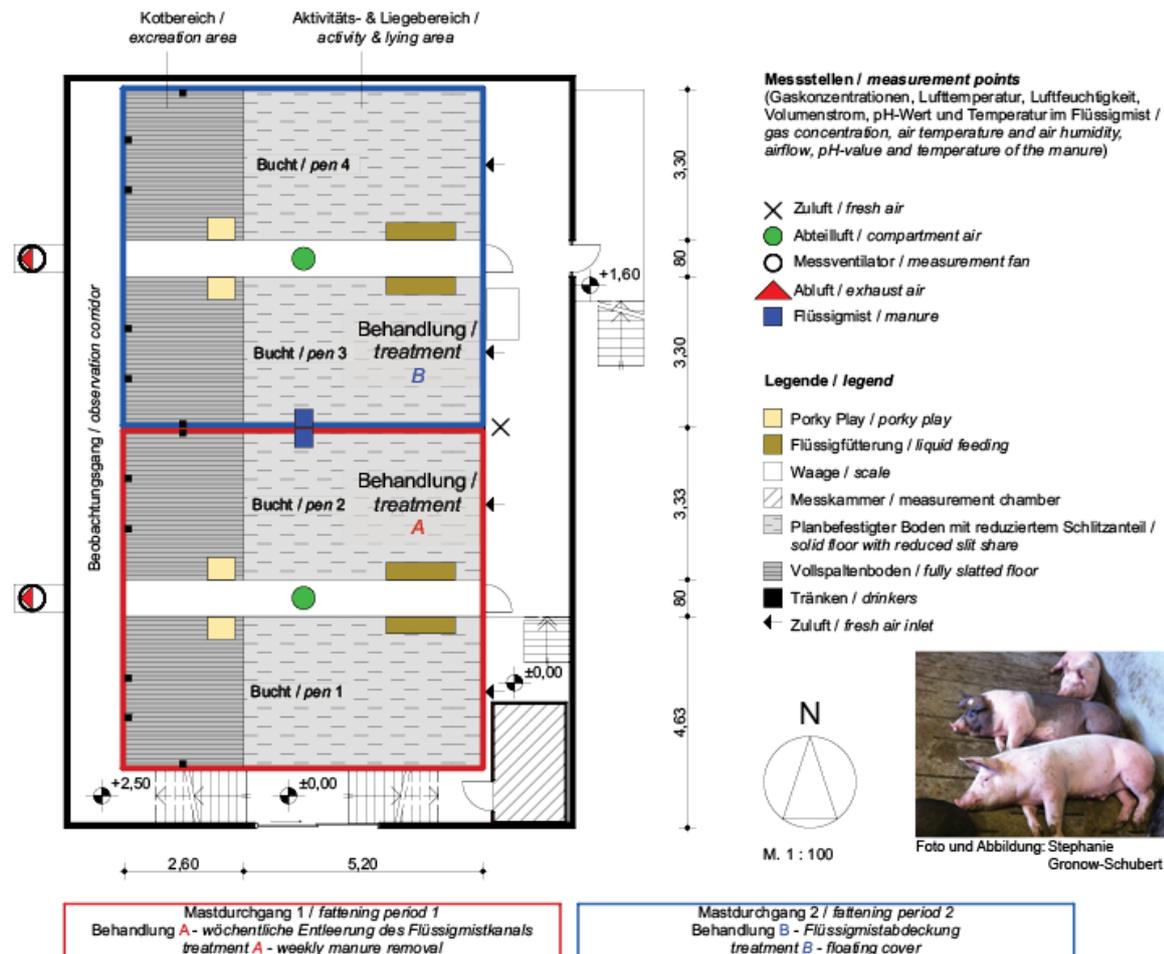


Abbildung 2: Grundriss des Versuchsstalls und Anordnung der Messstellen
(Abteil „Nord“ = blau, Abteil „Süd“ = rot)

Jede Bucht verfügt über eine eigene Staumistwanne mit einer Höhe von 1,20 m, einer Breite von 3,30 m und einer Länge von 7,80 m und somit einem maximalem Lagervolumen von 20 m³. Die Zuluft gelangt über Porenkanäle in den Stall und wird abteilweise unterflur abgesaugt. Die Sensorflüssigfütterung versorgte die Tiere täglich zu 12 Fütterungszeiten zwischen 6:00 und 22:00 Uhr. Wasser stand den Tieren ad libitum an jeweils drei Tränken pro Bucht zur Verfügung.

Für die Haltungsbedingungen, Lüftungs- und Fütterungseinstellungen sowie Mastleistungen konnten in beiden Abteilen (Behandlung und Referenz) weitgehend Ceteris-Paribus-Bedingungen erreicht werden (**Tabelle 8**; Abbildungen A1 bis A3). Die Futterzusammensetzung variierte zwischen den Mastdurchgängen bzw. den Abteilen nur geringfügig (Tabelle A1). Es wurde eine stickstoffangepasste Dreiphasenmast nach guter fachlicher Praxis vorgenommen. Die gemittelten täglichen Zunahmen unterschieden sich zwischen den drei Behandlungen kaum voneinander, wie auch die Ein- und Ausstallgewichte. Die erhobenen Verschmutzungsprofile zeigten, dass die Nutzung der Funktionsbereiche (Liegen und Aktivität sowie Abkoten) in beiden Abteilen (Behandlung und Referenz) in allen vier Buchten über alle drei Mastdurchgänge hinweg eingehalten wurde (Abbildungen A4 bis A11). Die Tiere haben die Strukturierung der Bucht mit unterschiedlichen Bodenoberflächen angenommen und ihren Kot und Urin hauptsächlich in den dafür vorgesehenen Kotbereich abgesetzt. Dies war eine grundlegende Voraussetzung für den zweiten Versuch (Behandlung B - Abdeckung der Flüssigmistoberfläche).

Tabelle 8: Versuchsbedingungen innerhalb der drei Behandlungen (A, B, C) und den Referenzen (R_A, R_B, R_C)

Parameter	Wöchentliche Entleerung des Flüssigmistkanals 06.08.2013 - 08.11.2013 Behandlung A			Abdeckung der Flüssigmistoberfläche 16.01.2014 - 21.04.2014 Behandlung B			Zugabe von Effektiven Mikroorganismen (EM) 30.10.2014 - 03.02.2015 Behandlung B		
	<i>n</i>	\bar{x}	σ	<i>n</i>	\bar{x}	σ	<i>n</i>	\bar{x}	σ
T _{Zuluft} [°C]	A 95 R_A 95	A 15,8 R_A 15,8	A 4,1 R_A 4,1	B 96 R_B 96	B 9,5 R_B 9,5	B 3,2 R_B 3,2	C 97 R_C 97	C 6,8 R_C 6,8	C 3,5 R_C 3,5
RH _{Zuluft} [%]	A 95 R_A 95	A 72,8 R_A 72,8	A 9,0 R_A 9,0	B 96 R_B 96	B 63,0 R_B 63,0	B 8,9 R_B 8,9	C 97 R_C 97	C 75,6 R_C 75,6	C 6,3 R_C 6,3
T _{Abteil} [°C]	A 95 R_A 95	A 20,6 R_A 20,4 n.s.	A 2,8 R_A 2,8	B 96 R_B 96	B 18,5 R_B 18,6 n.s.	B 1,3 R_B 1,2	C 97 R_C 97	C 18,1 R_C 18,3 n.s.	C 1,7 R_C 2,0
RH _{Abteil} [%]	A 95 R_A 95	A 63,9 R_A 71,9 ***	A 6,1 R_A 5,8	B 96 R_B 96	B 60,7 R_B 56,7 ***	B 4,5 R_B 5,7	C 97 R_C 97	C 68,8 R_C 59,9 ***	C 4,1 R_C 4,6
T _{Abluft} [°C]	A 95 R_A 95	A 19,6 R_A 19,8 n.s.	A 2,6 R_A 2,7	B 96 R_B 96	B 16,1 R_B 16,2 n.s.	B 1,1 R_B 1,1	C 97 R_C 97	C 17,1 R_C 15,5 ***	C 1,6 R_C 1,8
RH _{Abluft} [%]	A 95 R_A 95	A 70,5 R_A 72,5 *	A 6,3 R_A 6,0	B 96 R_B 96	B 72,8 R_B 70,0 **	B 4,9 R_B 6,9	C 97 R_C 97	C 76,0 R_C 78,9 ***	C 4,3 R_C 4,2
V _{strom} [m ³ h ⁻¹ Tier ⁻¹]	A 95 R_A 95	A 60,2 R_A 61,6 n.s.	A 9,2 R_A 7,2	B 96 R_B 96	B 49,2 R_B 47,0 n.s.	B 8,6 R_B 9,1	C 97 R_C 97	C 45,6 R_C 44,9 n.s.	C 8,3 R_C 4,4
Mastparameter	SG [kg]	EG [kg]	TZ [kg]	SG [kg]	EG [kg]	TZ [kg]	SG [kg]	EG [kg]	TZ [kg]
	A 38,9 R_A 35,9	A 119,2 R_A 116,7	A 0,854 R_A 0,851	B 34,8 R_B 31,9	B 112,7 R_B 112,9	B 0,812 R_B 0,844	C 35,1 R_C 35,1	C 115,3 R_C 115,8	C 0,834 R_C 0,832

n = StichprobenumfangSG = \emptyset Startgewicht des Einzeltieres zu Versuchsbeginn

T = Temperatur

 \bar{x} = MittelwertEG = \emptyset Endgewicht des Einzeltieres zu Versuchsende

RH = relative Luftfeuchtigkeit

 σ = Standardabweichung

TZ = tägliche Zunahmen

V = Luftvolumenstrom

n.s. = nicht signifikant; Mittelwertunterschiede zwischen Variante und Referenz (U-Test nach Mann & Whitney, $P > 0,05$)* = signifikant; Mittelwertunterschiede zwischen Variante und Referenz (U-Test nach Mann & Whitney, $P \leq 0,05$)** = sehr signifikant; Mittelwertunterschiede zwischen Variante und Referenz (U-Test nach Mann & Whitney, $P \leq 0,01$)*** = höchst signifikant; Mittelwertunterschiede zwischen Variante und Referenz (U-Test nach Mann & Whitney, $P \leq 0,001$)

2.2 Versuchsdurchführung

2.2.1 Wöchentliche Entleerung des Flüssigmistkanals

Für den Zeitraum des ersten Mastdurchganges (14 Wochen) wurde von Anfang August bis Mitte November 2013 das wöchentliche Entleeren des Flüssigmistkanals (Behandlung A) mit der Flüssigmistsammlung im Staumistverfahren über den gesamten Mastdurchgang unter den Spalten (Referenz - R_A) verglichen. Die wöchentliche Entleerung des Flüssigmistkanals erfolgte über zwei Ablassstopfen im Boden des Flüssigmistkanals (**Abbildung 3**). Nach dem Ablassen des Flüssigmists wurde keine zusätzliche Spülung mit Wasser oder Dünggülle durchgeführt. Eine kleine Restmenge von Flüssigmist bedeckte demzufolge immer den Kanalboden.



Abbildung 3: Abbildung eines leeren Flüssigmistkanals im Versuchsabteil (links) mit der Kennzeichnung der Höhe des Flüssigmistpegels beim üblichen Staumistverfahrens (weiße Linie) und der Höhe des Flüssigmistpegels im Versuch (rote Linie) sowie das Bild eines Ablassstopfens (rechts) im Boden des Flüssigmistkanals

2.2.2 Abdeckung der Flüssigmistoberfläche

Im zweiten Mastdurchgang von Mitte Januar bis Ende April 2014 wurde die Abdeckung der Flüssigmistoberfläche (Behandlung B) unterhalb des Buchtenbodens des Aktivitäts- und Liegebereichs mit reduziertem Schlitzanteil getestet. Der Flüssigmist wurde mit sechseckigen Schwimmkörpern aus Kunststoff (Hexa-Cover®, $\varnothing = 18 \text{ cm}$) abgedeckt (**Abbildung 4**).

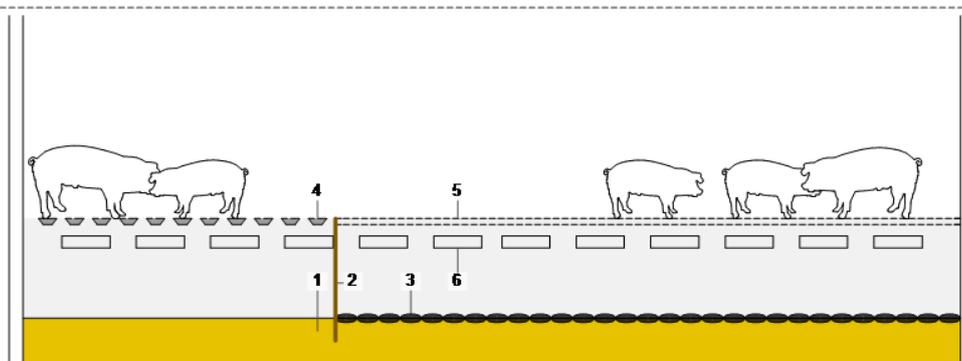


Abbildung 4: Abdeckung der Flüssigmistoberfläche mit Hexa-Cover® - Schwimmkörpern. Zustand vor (links) und nach (rechts) dem Mastdurchgang sowie dem Abteilquerschnitt (mittig; 1 = Flüssigmist, 2 = Trennwand, 3 = Hexa-Cover®; 4 = Vollspaltenboden, 5 = planbefestigter Boden mit reduziertem Schlitzanteil, 6 = Schlitz für die Unterflurabsaugung)

Unterhalb des $\frac{1}{3}$ Vollspaltenbodenanteils (Kotbereich) wurden keine Hexa-Cover® verteilt. Um die Schwimmkörper auf die Fläche unter dem Aktivitäts- und Liegebereich zu begrenzen, wurde eine Trennwand unter der Unterkante des Spaltenbodens bis 10 cm über dem Kanalboden eingebaut, sodass der Flüssigmistpegel im gesamten Kanal auf gleichem Niveau blieb. Zu Beginn des Mastdurchganges wurde in alle vier Flüssigmistlager des Versuchsstalls ein Wasserpegel von 10 cm eingefüllt. Dieser Wasserpegel war notwendig, damit sich die Hexa-Cover®- Schwimmkörper in den Buchten 3 und 4 (Behandlung B) selbstständig verteilten (Abbildung 4).

2.2.3 Zugabe von Flüssigmistadditiven: „Effektive Mikroorganismen“ (EM)

In Behandlung C wurde am 30. Oktober 2014 mit der Datenaufnahme begonnen und diese endete nach 97 Tagen am 3. Februar 2015. Innerhalb der Behandlung wurden an 3 Tagen (29.10., 12.11., 10.12. 2014) jeweils 40 l, 20 l und 25 l Güllezusatz „Effektive Mikroorganismen (EM)“ über die gesamte Fläche des Flüssigmists im Versuchsabteil (Abteil „Nord“) hinzugegeben. Die Verteilung erfolgte bei der ersten Impfung über einen Trichter und bei den zwei weiteren Impfungen mit einer handelsüblichen Gießkanne. Der Güllezusatz wurde vor dem Ausbringen in einem Verhältnis von 1:2 (Güllezusatz : Wasser) verdünnt. Beim Ausbringen wurde die verdünnte Lösung auf dem gesamten Spaltenboden verteilt und lief anschließend durch die Spalten hindurch in den Flüssigmistkanal ab. Die Zugabe des Güllezusatzes erfolgte eine Woche nach dem Einstellen der Schweine, um im Flüssigmistkanal genügend organische Substanz als Nahrungsgrundlage für die Mikroorganismen vorrätig zu haben. Nach der zweiten und dritten Zugabe der EM entsprach das einem Mischungsverhältnis von Flüssigmist zu Güllezusatz von 1:2,6. Darüber hinaus wurden jeweils einmal wöchentlich von der 1. bis 8. Woche 3 l und von der 9. bis 17. Woche 5 l EM-Stallreiniger (im Mischungsverhältnis 1:10) mit einer Handspritze im gesamten Versuchsabteil auf die Buchtenwände, Tränken, Futtertröge und Spalten versprüht.

Die im Güllezusatz enthaltenden lebenden Effektiven Mikroorganismen setzen sich aus Milchsäurebakterien, Photosynthesebakterien und Hefen zusammen.

2.3 Messtechnik

Die Zuluft-, - Abteil- und Abluftkonzentrationen von Ammoniak (NH₃), Kohlendioxid (CO₂) und Methan (CH₄) wurden quasi-kontinuierlich mit dem Multigasmonitor 1412 von LumaSense™ Technologies (Dänemark) mit photoakustischem Messprinzip erfasst. Der Multigasmonitor war mit dem dazugehörigen Multiplexer 1309 von LumaSense™ Technologies verbunden. Für die gesicherte statistische Auswertung erfolgte die Beprobung der fünf Messstellen randomisiert. Hierfür wurde in der Steuerungssoftware eine Messstellenabfolge hinterlegt, die mit einem Zufallsgenerator erstellt worden war. Nach jedem beendeten Mastdurchgang führte die Autorin beim Multigasmonitor eine Nullpunkt- und Wasserinterferenzkalibration durch. Die Gase Ammoniak, Kohlendioxid und Methan wurden im feuchten Zustand kalibriert. Innerhalb der Kalibrierungen wurden regelmäßige Vergleichsmessungen mit einem FTIR (Fourier-Transformations-Infrarotspektrometer) durchgeführt. Potentielle Lachgasemissionen (N₂O) wurden in diesen Versuchen nicht erfasst, da keine hinreichende Messgenauigkeit bei der Lachgasbestimmung sichergestellt werden konnte.

Für die kontinuierliche Erfassung der Lufttemperatur und der relativen Luftfeuchtigkeit wurde ein digitaler Sensor pro Messstelle (Firma Ahlborn, Deutschland) verwendet. Die Bestimmung des Luftvolumenstroms erfolgte für die Behandlungen und die Referenzen jeweils separat über die in den zwei Abluftkaminen eingebauten Messventilatoren (Firma Multifan, Niederlande). Für die Messung der Temperatur- und des pH-Werts an der Flüssigmistoberfläche wurde in beiden Abteilen ein digitaler Kombisensor (Firma Endress+Hauser, Deutschland) so installiert, dass sich der Sensor mit Hilfe eines angefertigten Kantholzes stets schwimmend an der Oberfläche des Flüssigmists befand. Im 14-täglichen Turnus wurden alle 100 Schweine einzeln gewogen und Proben für die Analyse des Flüssigmists gezogen (Stickstoffanalyse nach Kjeldahl, Bestimmung der Trockensubstanz, der organischen Trockensubstanz und des Kalium- und Phosphorgehaltes). Die Flüssigmistproben wurden pro Bucht stets an denselben Punkten entnommen. Dennoch ist eine im klassischen Sinne repräsentative Beprobung des inhomogenen Flüssigmists kaum möglich gewesen, ohne die Flüssigmistzusammensetzung und -struktur sowie die Stabilisierung des Flüssigmists bezüglich einer Emissionsquelle zu stören. Die Verschmutzungsprofile der vier Buchten wurden wöchentlich erhoben (**Tabelle 9**).

Tabelle 9: Übersicht der in allen drei Mastdurchgängen (Versuchs- und Referenzabteil) verwendeten Messtechnik, dem jeweiligen Messprinzip, der Einheit sowie den Messfrequenzen

Messgröße	Messgerät und Messprinzip	Einheit	Messfrequenz
NH ₃ -Konzentration (Zuluft, Abteil & Abluft)	Multigasmonitor 1412 & Multiplexer 1309, Luma Sense™, photoakustisch	[ppm]	1-3 Werte pro Stunde je Messstelle
CH ₄ -Konzentration (Zuluft, Abteil & Abluft)	Multigasmonitor 1412 & Multiplexer 1309, Luma Sense™, photoakustisch	[ppm]	1-3 Werte pro Stunde je Messstelle
CO ₂ -Konzentration (Zuluft, Abteil & Abluft)	Multigasmonitor 1412 & Multiplexer 1309, Luma Sense™, photoakustisch	[ppm]	1-3 Werte pro Stunde je Messstelle
pH-Wert des Flüssigmists (1 Sensor je Abteil)	Orbisint CPS11D, Endress & Hauser, digitale Glaselektrode	[]	30 min
Temperatur des Flüssigmists (1 Sensor je Abteil)	Orbisint CPS11D, Endress & Hauser, digitale Glaselektrode	[°C]	30 min
Lufttemperatur (Zuluft, Abteil & Abluft)	digitaler Sensor, Ahlborn GmbH verknüpft mit der Almemo Software 2590	[°C]	10 min
Luftfeuchte (Zuluft, Abteil & Abluft)	digitaler Sensor, Ahlborn GmbH	[%]	10 min
Volumenstrom (1 Sensor je Abluftkamin)	Messventilator von Multifan verknüpft mit der Almemo Software 2590 von der Ahlborn GmbH, digitaler Sensor	[m ³ /h]	10 min
Tiergewicht	Waage (Einzeltiergewichte)	[kg]	14-täglich
Flüssigmistpegel	Meterstab (immer an der gleichen Stelle je Bucht)	[cm]	wöchentlich
Verschmutzungsprofil	Anhand Erhebungsbogen bonitiert (Abbildung A4 und A5)	[]	wöchentlich

2.4 Ergebnisse und Diskussion des Flüssigmistmanagements

2.4.1 Ergebnisse der Flüssigmistparameter

Die Flüssigmistparameter unterscheiden sich zwischen den drei Behandlungen - insbesondere bei Trockenmasse, Gesamt-Stickstoff und Anteil Ammoniumstickstoff (NH₄-N) am Gesamt-Stickstoff in der Frischmasse - voneinander (**Tabelle 10**). Die Ergebnisse können aber aufgrund der oben genannten Gründe nur als Anhaltswerte dienen. Zudem ist zu beachten, dass bei der Behandlung A mit wöchentlicher Entleerung des Flüssigmistkanals der Flüssigmistpegel nie höher als bis auf 7 cm anstieg, was die Probenentnahme zusätzlich erschwerte. Der geringe Flüssigmistpegel ist auch ursächlich für den geringen Stichprobenumfang (n) bei den Parametern pH-Wert und Temperatur an der Flüssigmistoberfläche in der Behandlung A, welche mit den digitalen Sensoren erfasst werden konnten.

Tabelle 10: Flüssigmistparameter der drei Behandlungen (A, B, C) und deren Referenzen (R_A, R_B, R_C)

Parameter	Wöchentliche Entleerung des Flüssigmistkanals 06.08.2013 - 08.11.2013			Abdeckung der Flüssigmistoberfläche 16.01.2014 - 21.04.2014			Zugabe von Effektiven Mikroorganismen (EM) 30.10.2014 - 03.02.2015		
	Behandlung A			Behandlung B			Behandlung B		
	n	\bar{x}	σ	n	\bar{x}	σ	n	\bar{x}	σ
T _{Flüssigmist} [°C]	A 4 R _A 43	A 17,4 R _A 17,5	A 1,3 R _A 1,7	B 47 R _B 63	B 15,7 R _B 14,9	B 0,4 R _B 0,7	C 91 R _C 74	C 15,6 R _C 15,5	C 1,4 R _C 1,7
pH _{Flüssigmist}	A 6 R _A 43	A 7,6 R _A 7,4	A 0,3 R _A 0,2	B 47 R _B 63	B 7,2 R _B 7,6	B 0,5 R _B 0,3	C 91 R _C 74	C 0,7,3 R _C 7,3	C 0,1 R _C 0,2
Trockenmasse [g kg ⁻¹]	A 6 R _A 6	A 7,0 R _A 4,9	A 1,8 R _A 1,0	B 7 R _B 7	B 1,6 R _B 4,3	B 0,6 R _B 2,4	C 7 R _C 7	C 2,8 R _C 2,2	C 1,9 R _C 1,5
Gesamt N in FS [g kg ⁻¹]	A 6 R _A 6	A 5,9 R _A 4,9	A 0,6 R _A 0,7	B 7 R _B 7	B 3,1 R _B 4,3	B 1,0 R _B 1,7	C 7 R _C 7	C 3,5 R _C 3,3	C 1,6 R _C 1,4
NH ₄ -N in FS [g kg ⁻¹]	A 6 R _A 6	A 2,7 R _A 3,1	A 0,5 R _A 0,7	B 7 R _B 7	B 2,7 R _B 3,0	B 0,9 R _B 1,1	C 7 R _C 7	C 2,6 R _C 2,6	C 0,8 R _C 0,9
Anteil NH ₄ -N an Gesamt N [%]*	A 6 R _A 6	A 46,1 R _A 64,2	A 8,9 R _A 12,5	B 7 R _B 7	B 83,8 R _B 71,5	B 3,7 R _B 7,2	C 7 R _C 7	C 81,4 R _C 81,9	C 20,3 R _C 12,3
Flüssigmistpegel [cm]	A 12 R _A 12	Start: 7 Ende: 5	Ende: 5 Ende: 56	B 14 R _B 14	Start: 10 Start: 10	Ende: 60 Ende: 52	C 14 R _C 14	Start: 10 Start: 10	Ende: 61 Ende: 59
<i>n</i> = Stichprobenumfang			T = Temperatur			N = Stickstoff			
\bar{x} = Mittelwert			FS = Frischmasse			NH ₄ -N = Ammonium-Stickstoff			
σ = Standardabweichung			*im \emptyset über den gesamten Mastdurchgang						

2.4.2 Ergebnisse und Diskussion der Ammoniak und Methan - Konzentrationen und Emissionen

Die NH₃- und CH₄-Konzentrationen in der Zuluft, den beiden Abteilen und in der Abluft sowie die NH₃- und CH₄-Emissionsraten und Emissionsfaktoren für alle drei Behandlungen (A, B, C) sowie deren Referenzen (R_A, R_B, R_C) sind in **Tabelle 11** vergleichend dargestellt (Abbildungen A12 bis A15 und Tabellen A2 bis A4).

Tabelle 11: Ammoniak- und Methankonzentrationen an den drei Messstellen (Zuluft, Abteil und Abluft) sowie die Ammoniak- und Methanemissionen innerhalb der drei Behandlungen (A, B, C) und deren Referenzen (R_A , R_B , R_C)

Mess- stelle	Parameter	Wöchentliche Entleerung des Flüssigmistkanals 06.08.2013 - 08.11.2013			Abdeckung der Flüssigmistoberfläche 16.01.2014 - 21.04.2014			Zugabe von Effektiven Mikroorganismen (EM) 30.10.2014 - 03.02.2015			
		Behandlung A			Behandlung B			Behandlung B			
		n	\bar{x}	σ	n	\bar{x}	σ	n	\bar{x}	σ	
Zuluft	NH ₃ -Konzentration [ppm]	A 95	A 1,1	A 0,1	B 96	B 2,2	B 0,6	C 97	C 0,9	C 0,2	
		R _A 95	R _A 1,1	R _A 0,1	R _B 96	R _B 2,2	R _B 0,6	R _C 97	R _C 0,9	R _C 0,2	
	CH ₄ -Konzentration [ppm]	A 95	A 1,9	A 2,0	B 96	B 2,8	B 0,9	C 97	C 0,2	C 0,5	
		R _A 95	R _A 1,9	R _A 2,0	R _B 96	R _B 2,8	R _B 0,9	R _C 97	R _C 0,2	R _C 0,5	
Abteil	NH ₃ -Konzentration [ppm]	A 95	A 2,1	A 0,6	B 96	B 3,7	B 1,1	C 97	C 4,3	C 1,2	
		R _A 95	R _A 2,3 **	R _A 0,6	R _B 96	R _B 4,8 **	R _B 2,2	R _C 97	R _C 3,6 ***	R _C 1,5	
	CH ₄ -Konzentration [ppm]	A 95	A 3,1	A 2,6	B 96	B 5,2	B 1,3	C 97	C 3,7	C 1,9	
		R _A 95	R _A 3,2 n.s.	R _A 2,6	R _B 96	R _B 4,7 *	R _B 1,3	R _C 97	R _C 2,6 ***	R _C 1,9	
Abluft	NH ₃ -Konzentration [ppm]	A 95	A 10,9	A 2,6	B 96	B 12,4	B 2,4	C 97	C 11,0	C 2,6	
		R _A 95	R _A 10,3 n.s.	R _A 2,1	R _B 96	R _B 12,9 n.s.	R _B 3,1	R _C 97	R _C 10,0 **	R _C 2,2	
		CH ₄ -Konzentration [ppm]	A 95	A 4,1	A 3,2	B 96	B 11,3	B 4,1	C 97	C 7,5	C 3,5
			R _A 95	R _A 5,9 ***	R _A 2,4	R _B 96	R _B 6,9 ***	R _B 1,7	R _C 97	R _C 6,9 n.s.	R _C 2,6
		NH ₃ -Emissionsrate [g Tag ⁻¹ GV ⁻¹]	A 95	A 63,3	A 7,7	B 96	B 63,2	B 10,9	C 97	C 52,5	C 6,2
			R _A 95	R _A 64,3 n.s.	R _A 11,4	R _B 96	R _B 73,3 *	R _B 31,6	R _C 97	R _C 48,2 ***	R _C 12,0
		NH ₃ -Emissionsfaktor [kg Tierplatz ⁻¹ Jahr ⁻¹]	A 95	A 3,2	A 0,8	B 96	B 2,9	B 0,8	C 97	C 2,6	C 0,7
		R _A 95	R _A 3,1 n.s.	R _A 0,7	R _B 96	R _B 2,7 n.s.	R _B 0,8	R _C 97	R _C 2,3 ***	R _C 0,6	
	CH ₄ -Emissionsrate [g Tag ⁻¹ GV ⁻¹]	A 95	A 17,1	A 14,8	B 96	B 44,5	B 19,2	C 97	C 34,1	C 13,5	
		R _A 95	R _A 28,2 ***	R _A 13,0	R _B 96	R _B 21,0 ***	R _B 8,0	R _C 97	R _C 32,3 n.s.	R _C 12,9	
	CH ₄ -Emissionsfaktor [kg Tierplatz ⁻¹ Jahr ⁻¹]	A 95	A 0,7	A 0,4	B 96	B 2,3	B 1,2	C 97	C 1,8	C 0,8	
		R _A 95	R _A 1,3 ***	R _A 0,3	R _B 96	R _B 1,1 ***	R _B 0,5	R _C 97	R _C 1,6 **	R _C 0,7	

n = Stichprobenumfang
 \bar{x} = Mittelwert
 σ = Standardabweichung

R = Referenzabteil
 EM = Effektive Mikroorganismen

GV = Großvieheinheit
 Jahr = 330 Tage

n.s. = nicht signifikant; Mittelwertunterschiede zwischen Variante und Referenz (U-Test nach Mann & Whitney, $P > 0,05$)

* = signifikant; Mittelwertunterschiede zwischen Variante und Referenz (U-Test nach Mann & Whitney, $P \leq 0,05$)

** = sehr signifikant; Mittelwertunterschiede zwischen Variante und Referenz (U-Test nach Mann & Whitney, $P \leq 0,01$)

*** = höchst signifikant; Mittelwertunterschiede zwischen Variante und Referenz (U-Test nach Mann & Whitney, $P \leq 0,001$)

Einfluss des wöchentlichen Entleerens des Flüssigmistkanals auf Ammoniak und Methan - A

Die NH_3 -Konzentrationen unterschieden sich über den gesamten Mastverlauf in der Zuluft und der Abluft nicht signifikant voneinander. Wohingegen sich die NH_3 -Konzentrationen im Abteil signifikant voneinander unterschieden (A: 2,1 ppm; R_A : 2,3 ppm). Insgesamt sind die hier gemessenen Konzentrationen vergleichbar mit den Ergebnissen vorangegangener Messungen im selben Versuchsstall (GALLMANN 2003, HÄUßERMANN 2006). Im Vergleich zur Untersuchung von PERTAGNOL (2013) sind die Konzentrationen im Abteil und in der Abluft als sehr niedrig einzustufen. Die Ammoniakemissionen blieben in diesem Versuch durch das nur ein Mal wöchentliche Entleeren des Flüssigmistlagers nahezu unbeeinflusst (A: 63,3 g je Tag und Großvieheinheit; R_A : 64,3 g je Tag und Großvieheinheit; **Abbildung 5**). Dies deckt sich mit anderen Untersuchungsergebnissen, bei denen festgestellt wurde, dass sowohl die Höhe des Flüssigmistpegels und damit die angestaute Menge an Flüssigmist (Ni et al. 1999) als auch das Raumvolumen über der emittierenden Oberfläche (YE et al. 2011) keinen Einfluss auf die Ammoniakemissionen haben. Eine nennenswerte Ammoniakreduktion konnte in Untersuchung von GUINGAND et al. (2012) gezeigt werden, in welcher der Flüssigmist sehr häufig (ein bis zweimal täglich) entfernt und zusätzlich gespült wurde (Reduktion der Ammoniakemissionen um 13 bis 29 %). Dies konnte auch bei MEISSNER (2004) beobachtet werden, wo sich durch das ein- oder zweimal tägliche Spülen die Ammoniakemissionen um 10 bis 40 % reduzierten.

Ein Erklärungsansatz für die signifikanten Unterschiede bezüglich der CH_4 -Konzentrationen in der Abluft (A: 4,1 ppm; R_A : 5,9 ppm; Tabelle 11) und den CH_4 -Emissionsraten (A: 17,1 g je Tag und Großvieheinheit; R_A : 28,2 g je Tag und Großvieheinheit; -39,4 %; **Abbildung 6**) ist die wöchentliche Entleerung des Flüssigmistkanals und die damit verbundene deutliche Reduktion an fermentierbarer Substanz, welche ansonsten für die Methanbildung zur Verfügung steht (BLANES-VIDAL et al. 2008). In den Untersuchungen von HÄUßERMANN (2006) und BLANES-VIDAL et al. (2008) wurde nach jedem Mastdurchgang das gesamte Flüssigmistlager unter den Spalten ausgewaschen und desinfiziert. Schon diese Maßnahmen verzögerte die Methanbildung zu Beginn des Mastdurchgangs im Vergleich zu den Untersuchungen von GALLMANN (2003), in welcher auf diese Maßnahmen verzichtet wurde. Durch zweimaliges Spülen pro Tag mit der flüssigen Phase des Flüssigmists konnte bei GUINGAND et al. (2012) eine Emissionsreduktion von 26 bis 46 % erreicht werden. Es besteht ein direkter Zusammenhang zwischen der Menge an vorhandenem Flüssigmist und den entstehenden Methanemissionen im Stall. In den Untersuchungen von MEISSNER (2004) konnten die Methanemissionen durch das regelmäßige Spülen sogar um 60 bis 90 % reduziert werden.

In diesem Versuch (Behandlung A) hat das regelmäßige Entleeren des Flüssigmistlagers nur Einfluss auf die Methanemissionen und - anders als bei MEISSNER (2004) und GUINGAND et al. (2012) - nicht auch auf die Ammoniakemissionen. Im Vergleich zu den Ergebnissen von GALLMANN (2003), wo die Spanne der Emissionsraten im Vollspaltensystem zwischen 68 und 134 g je Tag und Großvieheinheit lag und HÄUßERMANN (2006) (Spanne: 33 bis 73 g je Tag und Großvieheinheit) sind die Emissionsraten bei Methan in diesem Versuch insgesamt niedrig. Die Werte fügen sich in die Ergebnisse von GALLMANN (2003) ein, welche bei einem Haltungssystem mit getrennten Klimabereichen und freier Schachtlüftung ermittelt wurden. Die Werte der in Behandlung A ermittelten Emissionsraten lagen zwischen 17 bis 36 g je Tag und Großvieheinheit. Bei Gallmann (2003) wurden in ähnlichen Messzeiträumen (Herbst 1999 und 2000) nahezu gleiche Emissionsraten (24 und 36 g je Tag und Großvieheinheit), wie in diesem Versuch beobachtet. Die über den Mastverlauf sinkenden Methanemissionsraten sind hier durch die Bezugsgröße des Tiergewichts (GV), zu erklären.

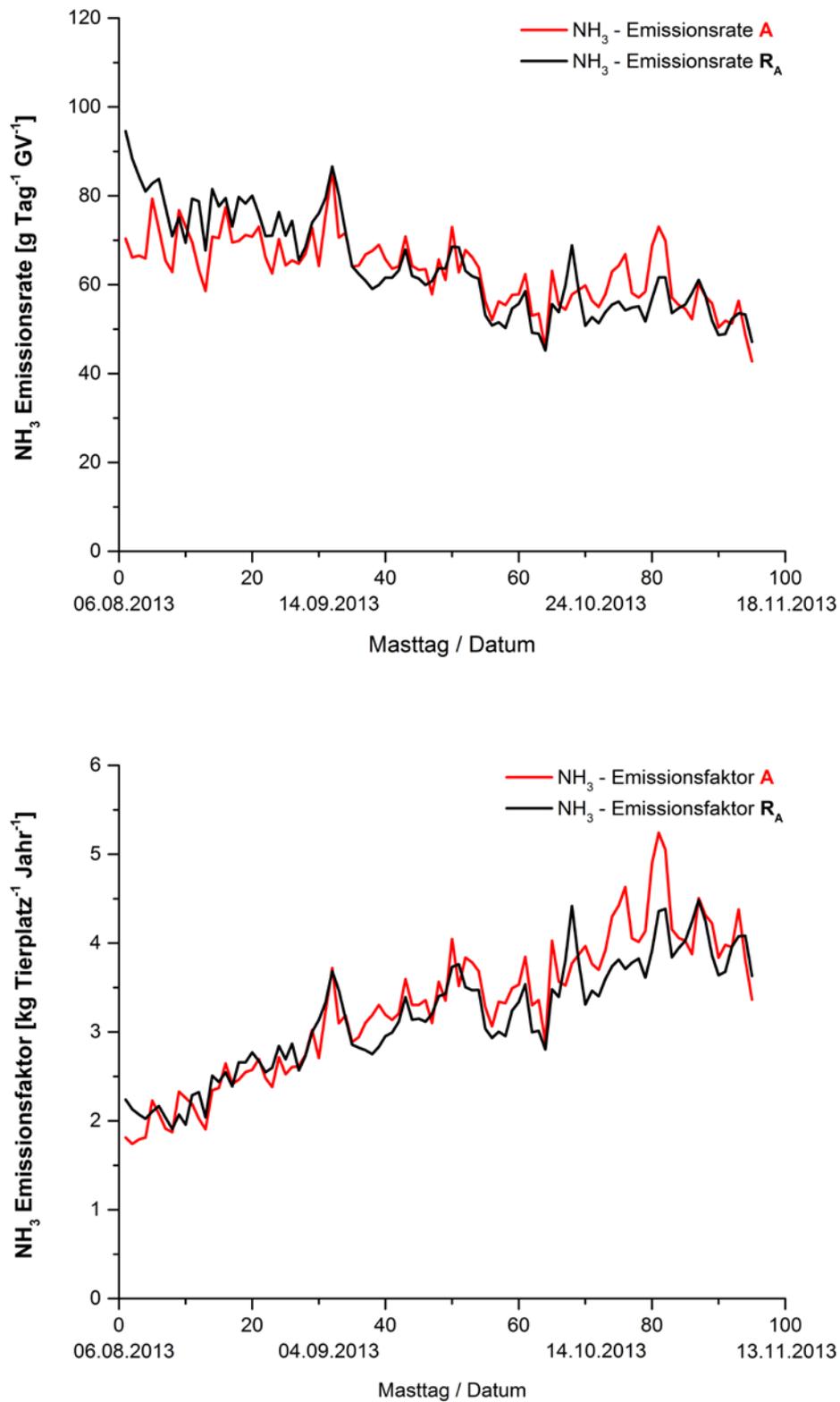


Abbildung 5: Verläufe der NH₃-Emissionsraten (oben) und der NH₃-Emissionsfaktoren (unten) für die Behandlung „wöchentliche Entleerung des Flüssigmistkanals“ (A) und das Referenzabteil (R_A)

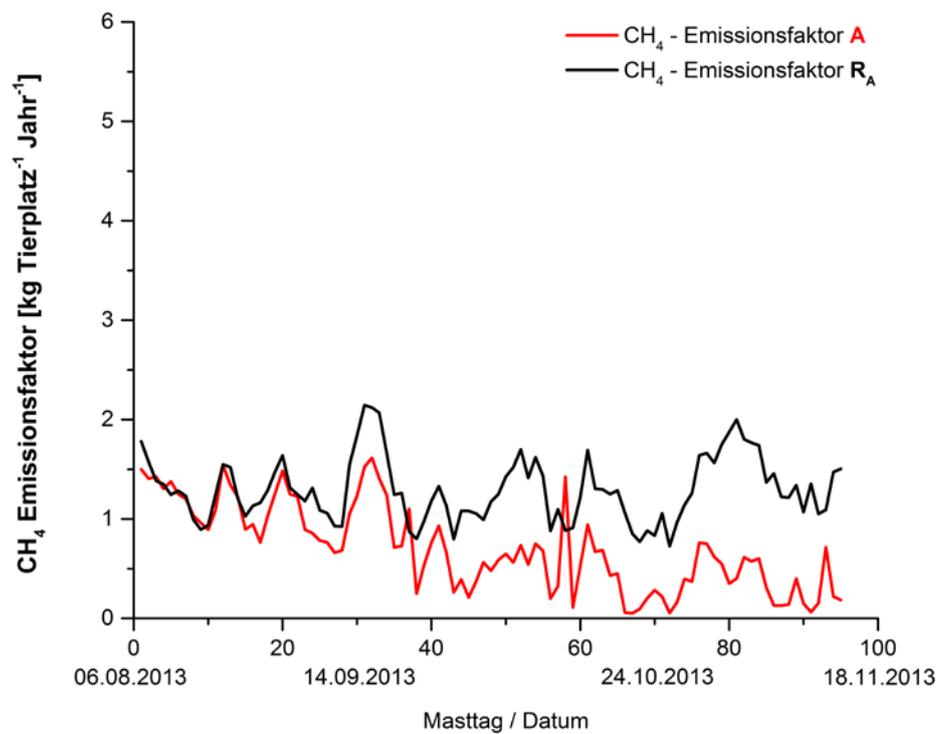
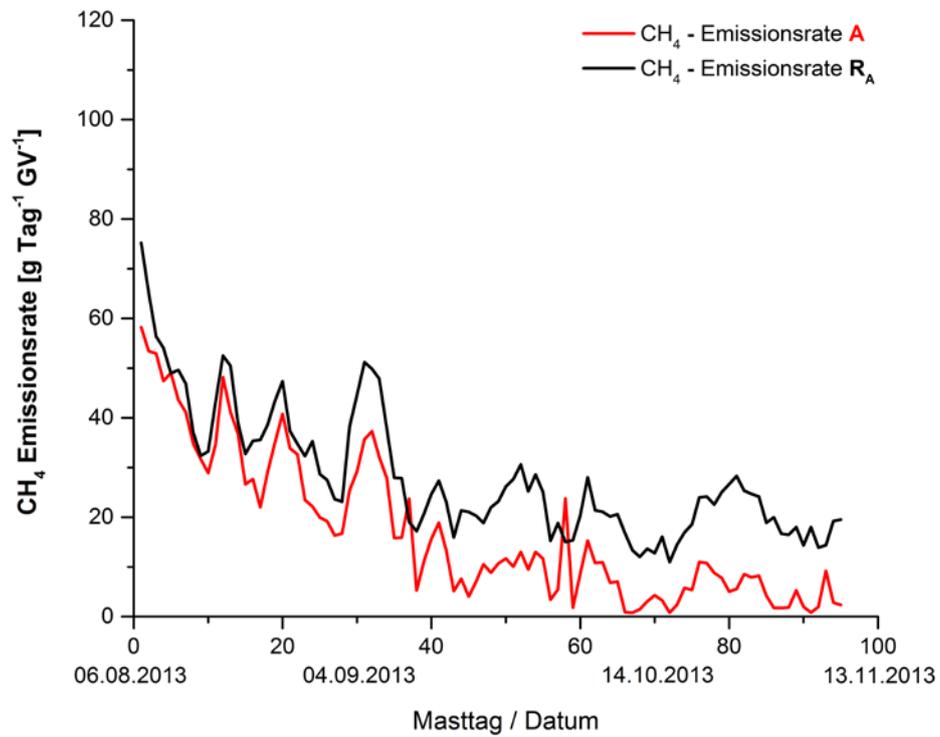


Abbildung 6: Verläufe der CH₄-Emissionsraten (oben) und der CH₄-Emissionsfaktoren (unten) für die Behandlung „wöchentliche Entleerung des Flüssigmistkanals“ (A) und das Referenzabteil (R_A)

Aufgrund der wöchentlichen Entleerung war der headspace (Abstand zwischen der Flüssigmistoberfläche und den Schlitzen der Unterflurabsaugung im Flüssigmistkanal) über den ganzen Mastverlauf hinweg gleichbleibend groß (Tabelle 10) und damit verbunden auch der Abstand der Flüssigmistoberfläche zur Luftführung. Die Ergebnisse der Nebelproben aus KECK (1997) zeigten zudem, dass der zwischen Spaltenboden und Flüssigmistoberfläche eingeströmte Nebel dort nahezu in Ruhe verweilt und überwiegend horizontal zu den Ansaugöffnungen der Unterflurabsaugung entlang des Spaltenbodens angesaugt wird. Diese beiden Faktoren - der große Abstand der Flüssigmistoberfläche zu den Schlitzen der Unterflurabsaugung und das beobachtete „Verharren“ der Luft in der Nähe des Spaltenbodens auf der Höhe der Lüftungsschlitze - hätten auch eine Minderung der Ammoniakemissionen erwarten lassen.

Einfluss der Flüssigmistabdeckung auf Ammoniak und Methan - B

Die Ammoniakkonzentrationen in den Abteilen unterschieden sich signifikant voneinander (B: 3,7 ppm; R_B: 4,8 ppm), wohingegen die Abluftkonzentrationen (B: 12,4 ppm; R_B: 12,9 ppm) unbeeinflusst blieben (Tabelle 11). Bezogen auf die NH₃-Emissionsraten (B: 63,2 g je Tag und Großvieheinheit; R_B: 73,3 g je Tag und Großvieheinheit; **Abbildung 7**) konnte durch die Abdeckung der Flüssigmistoberfläche eine Emissionsreduktion von 13,8 % erreicht werden. Der abnehmende Verlauf der NH₃-Emissionsraten ist durch die gewählte Bezugsgröße zu erklären, d.h. die ansteigenden Tiergewichte bezogen auf Großvieheinheiten (GV). Die Emissionsreduktion kann darauf zurückgeführt werden, dass aufgrund der Abdeckung von $\frac{2}{3}$ der Flüssigmistoberfläche mit den Hexa-Covern® - Schwimmkörpern unter dem planbefestigten Buchtenboden nur noch $\frac{1}{3}$ der gesamten Flüssigmistoberfläche dem Luftvolumenstrom (Abbildung 3) ausgesetzt war (PHILIPPE et al. 2011, YE et al. 2011, BLANES-VIDAL et al. 2008). Auch die Ammoniakemissionsraten in Behandlung B sind im Vergleich zu GALLMANN (2003) und HÄUBERMANN (2006) im Vollspaltensystem niedriger (Spanne der Emissionsrate: 100 bis 149 g je Tag und Großvieheinheit und 94 bis 130 g je Tag und Großvieheinheit). Mit Blick auf die Ergebnisse aus dem Haltungssystem mit getrennten Klimabereichen und freier Schachtlüftung aus GALLMANN (2003) im gleichen Messzeitraum (Frühjahr: 92,7 g je Tag und Großvieheinheit) liegen die Werte aus diesem Versuch ebenfalls darunter.

Die Ergebnisse der Methankonzentrationen zeigen deutlich, wie auch bei CLEMENS & AHLGRIMM (2001) beschrieben, dass der Flüssigmist die Hauptemissionsquelle für Methan darstellt. Die Abteilkonzentrationen bei B: 5,2 ppm verglichen mit R_B: 4,7 ppm unterschieden sich zwar signifikant voneinander, aber nicht so deutlich, wie die Abluftkonzentrationen B: 11,3 ppm und R_B: 6,9 ppm (Tabelle 11). Bezogen auf die Emissionsraten (B: 44,5 g je Tag und Großvieheinheit; R_B: 21,0 g je Tag und Großvieheinheit) unterschieden sich die Werte um rund +111,9 % in der Behandlung (B), verglichen mit dem Referenzabteil R_B (**Abbildung 8**). Ursächlich für diesen deutlichen Emissionsanstieg können die für die Methanogenese günstigeren anaeroben Bedingungen sein, welche durch die Abdeckung geschaffen wurden. Auf den Hexa-Covern® bildete sich im Laufe des Mastdurchgangs eine überwiegend trockene bis teilweise feuchte Schicht, bestehend aus dem Stroh des Beschäftigungsautomaten, Staub sowie Futterresten, welche zusätzlich den Luftabschluss über den Hexa-Covern® förderte (Abbildung 4). Die Liegefläche über dem Bereich der Hexa-Covern®-Abdeckung wurde zum Großteil sauber gehalten, was anhand von Verschmutzungsprofilen bereits im Vorversuch deutlich wurde. Es konnte aber nicht komplett ausgeschlossen werden, dass im Aktivitäts- und Liegebereich Exkremamente abgesetzt wurden. Diese Ergebnisse decken sich mit den Ausführungen in BERG et al. (2006) bei denen die reine Abdeckung mit Natursteingranulat Pergülit™, Tongranulat Leca™ oder Stroh ebenfalls zu einen Anstieg bei den Methanemissionen führte,

allerdings nur unter Laborbedingungen. Zieht man die Versuchsergebnisse von GALLMANN (2003) mit dem Haltungssystem der getrennten Klimabereiche im gleichen Messzeitraum (Frühjahr: 18 g je Tag und Großvieheinheit) zum Vergleich heran, so kann festgestellt werden, dass die Werte aus dem Referenzabteil (R_B : 21,0 g je Tag und Großvieheinheit) ähnlich hoch sind. Hingegen weichen die Werte aus dem Versuchsabteil (B: 44,5 g je Tag und Großvieheinheit) deutlich ab. Die Abnahme der Emissionsraten über den gesamten Mastverlauf hinweg, begründet sich auch hier durch die Bezugsgröße des Tiergewichts (GV). Bisher konnten noch keine hinreichenden Erklärungen für die Entstehung der Peaks in den Emissionsverläufen gefunden werden.

Wird die Flüssigmistoberfläche im Stall mit Materialien wie zum Beispiel Stroh und Mais BLANES-VIDAL et al. (2008) abgedeckt, ist der Einfluss des Eintrags von Kot und Harn zu beachten. Natürliche Abdeckungsmaterialien sind - im Gegensatz zu den verwendeten Schwimmkörpern - vermehrt biologischen Zersetzungsprozessen ausgesetzt, welche wiederum das Emissionsgeschehen beeinflussen MEISSNER (2004). Daher sind die Ergebnisse aus Untersuchungen zur Abdeckung von Flüssigmistbehältern im Freien (ohne den Einflussfaktor „Tier“) nicht 1:1 auf Untersuchungen im Stall übertragbar (BERG et al. 2006, AMON et al. 2006, HANSEN et al. 2006).

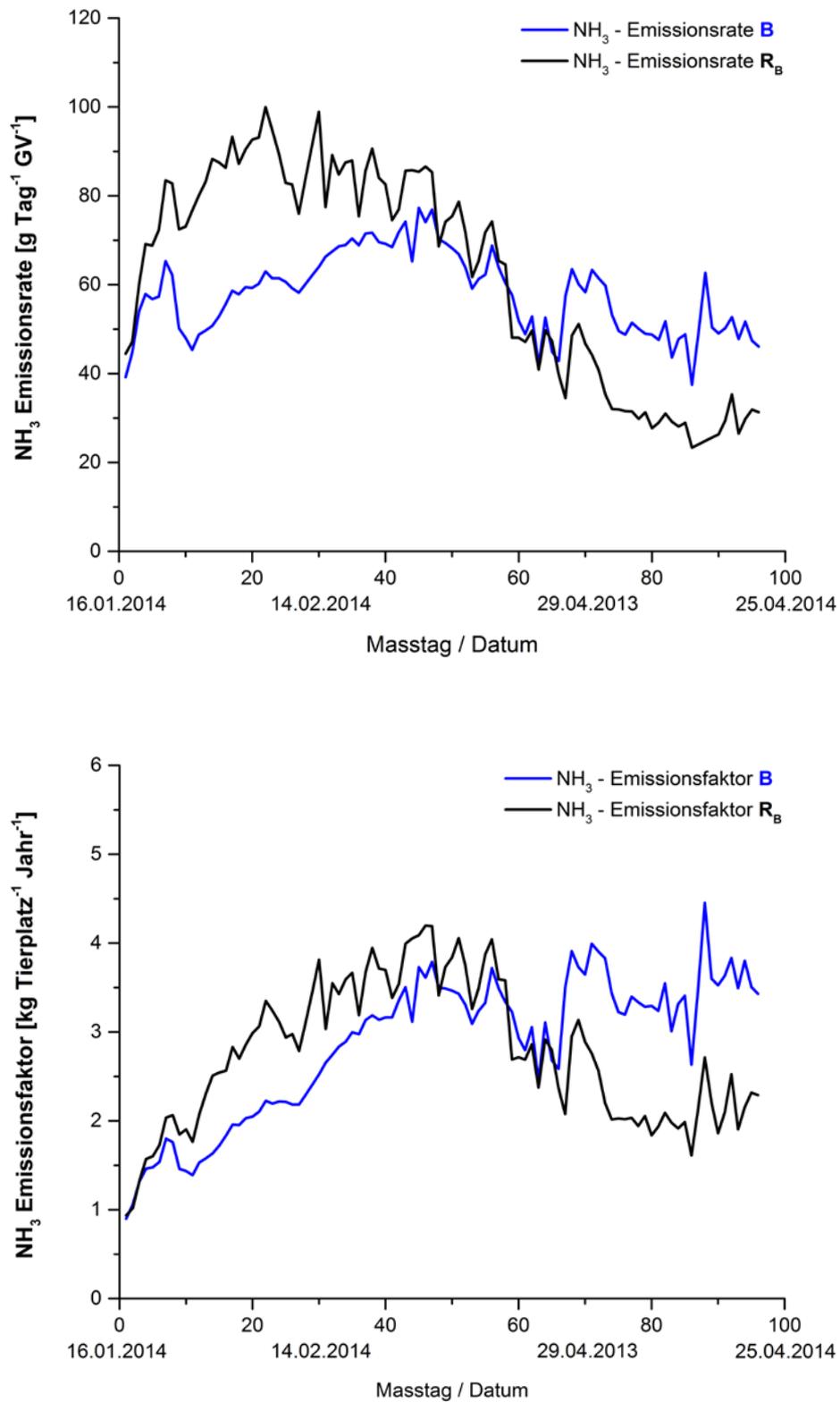


Abbildung 7: Verläufe der NH₃-Emissionsraten (oben) und der NH₃-Emissionsfaktoren (unten) für die Behandlung „Flüssigmistabdeckung“ (B) und das Referenzabteil (R_B)

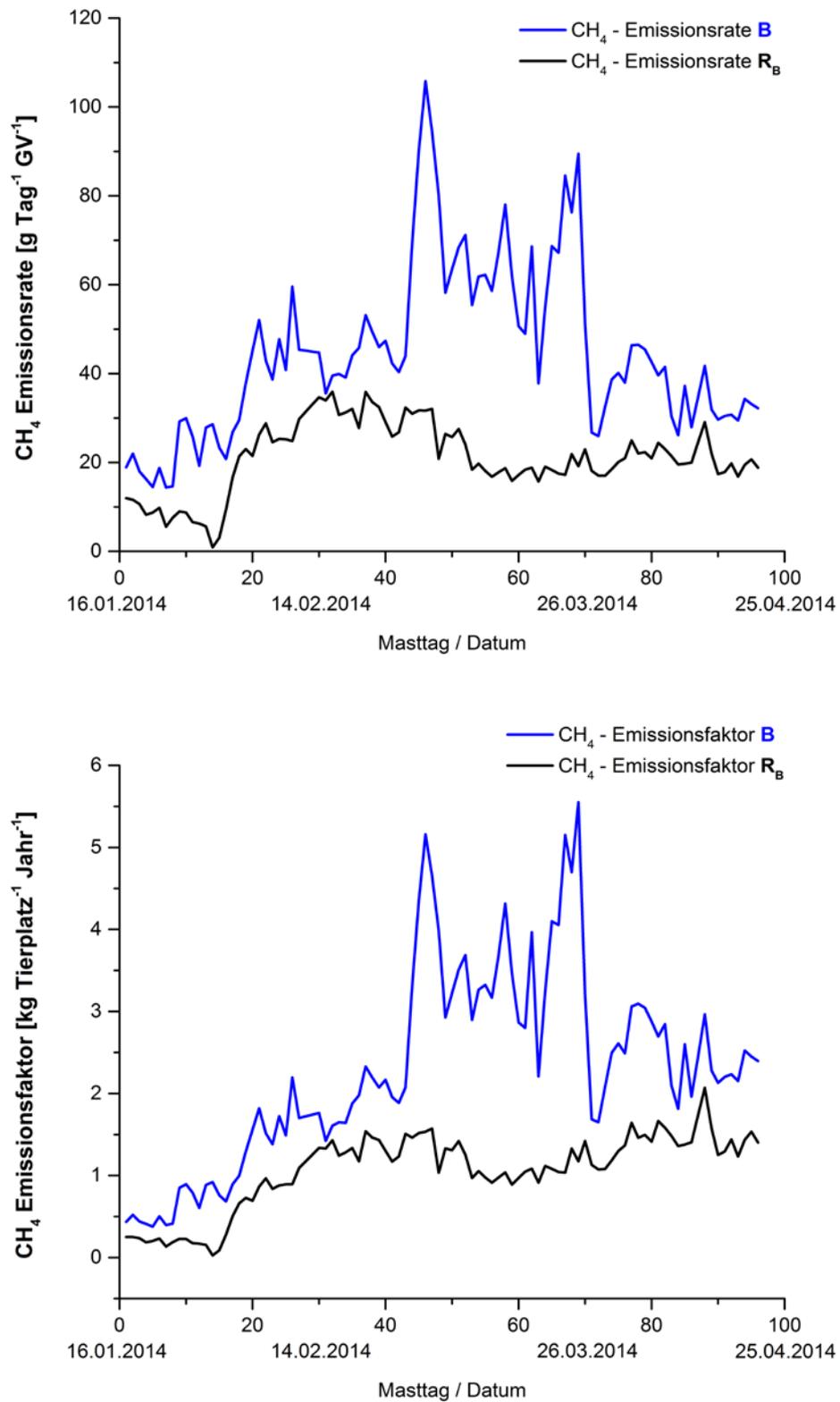


Abbildung 8: Verläufe der CH₄-Emissionsraten (oben) und der CH₄-Emissionsfaktoren (unten) für die Behandlung „Flüssigmistabdeckung“ (B) und das Referenzabteil (R_B)

Einfluss der Zugabe von Effektiven Mikroorganismen (EM) auf Ammoniak und Methan - C

Innerhalb der eigenen Untersuchung konnte ein signifikanter Einfluss der Effektiven Mikroorganismen auf die Emissionen (in Gramm je Tag und Großvieheinheit) von Ammoniak festgestellt werden. Die Methanemissionen wiesen bei der Betrachtung der Emissionen in Gramm je Tag und Großvieheinheit keine signifikanten Unterschiede auf. Insgesamt wurden sowohl für die Ammoniak- als auch die Methanemissionen (Ammoniakemissionen in Behandlung C: 52,2 g je Tag und Großvieheinheit; R_c: 48,2 g je Tag und Großvieheinheit; Methanemissionen in Behandlung C: 34,1 g je Tag und Großvieheinheit; R_c: 32,3 g je Tag und Großvieheinheit; **Abbildungen 9 und 10**) leichte Emissionsanstiege von 8,3 % und 5,9 % beobachtet.

Die von PÖLLINGER et al. (2004) und AMON et al. (2005) beobachteten Ammoniakemissionsreduktionen (11 und 42 %) durch die Zugabe von Flüssigmistadditiven konnten hier nicht beobachtet werden. Weder der Vergleich der eingesetzten Menge an EM (Mischungsverhältnis von Flüssigmist zum Güllezusatz in Behandlung C = 1:2,6; Versuch AMON et al. 2005 = 1:2), noch der Vergleich der Untersuchungszeiträume (Behandlung C: Oktober 2014 bis Februar 2015; Versuch AMON et al. 2005: Juni bis Dezember 2004) lieferten Erklärungsansätze für die Unterschiede zwischen der eigenen und den Untersuchungen aus den Jahren 2004 und 2005.

Der leichte Anstieg der Methanemissionen von rund 6 % durch die Zugabe der Effektiven Mikroorganismen zum Flüssigmist in Behandlung C deckt sich zum Teil mit den Untersuchungsergebnissen von AMON et al. (2005; Flüssigmistlagerung in zylindrischen Güllebehältern), die einen CH₄-Emissionsanstieg von 24 % bezogen auf [kg CH₄ pro m³ Frischmasse] gemittelt über den gesamten Versuchszeitraum beobachteten. Bei den Methanemissionen konnten nur PÖLLINGER et al. (2004) eine deutliche Emissionsminderung von 69 % beobachten.

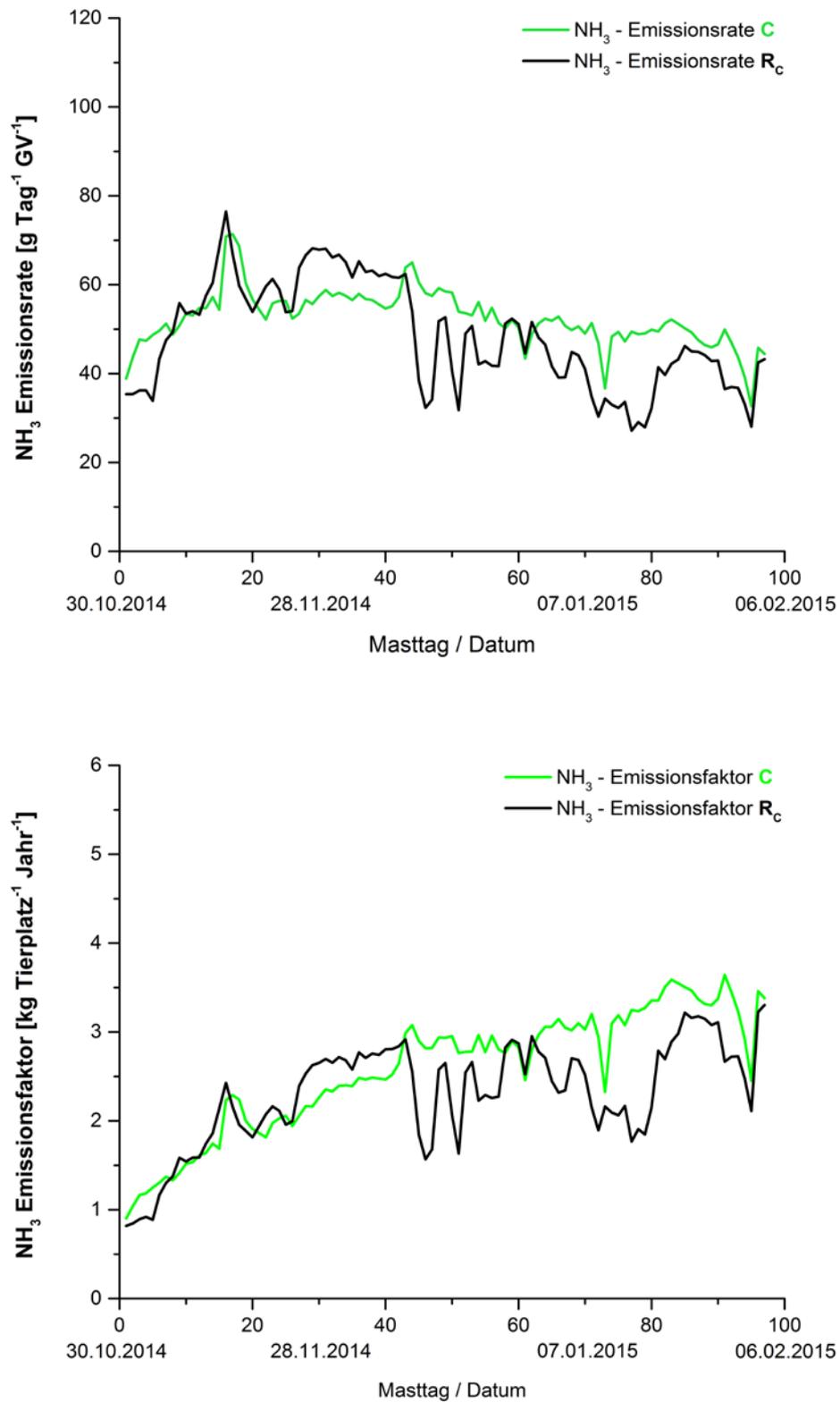


Abbildung 9: Verläufe der NH₃-Emissionsraten (oben) und der NH₃-Emissionsfaktoren (unten) für die Behandlung „Zugabe Effektiver Mikroorganismen“ (C) und Referenzabteil (R_c)

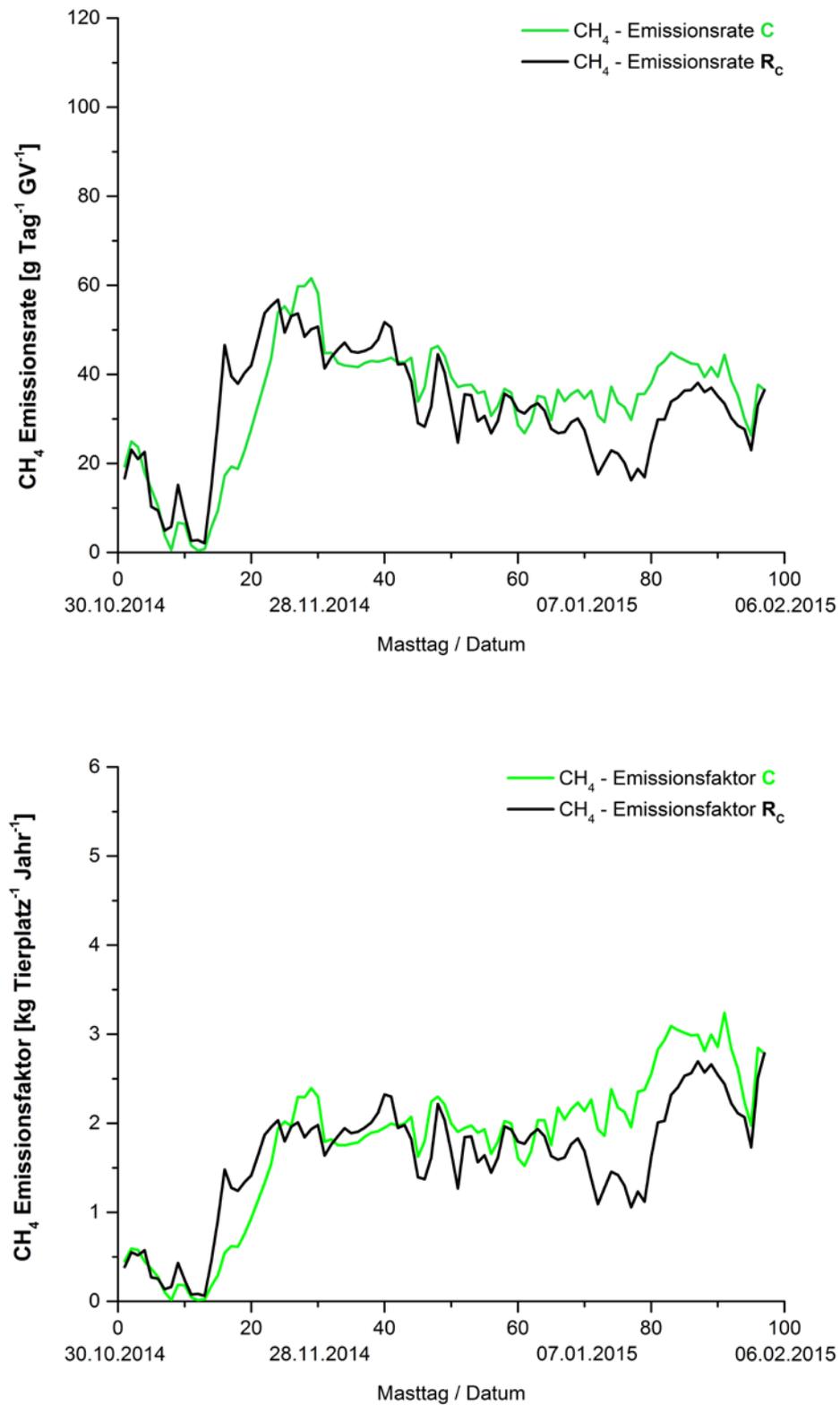


Abbildung 10: Verläufe der CH₄-Emissionsraten (oben) und der CH₄-Emissionsfaktoren (unten) für die Behandlung „Zugabe Effektiver Mikroorganismen“ (C) und Referenzabteil (R_c)

3 EINFLUSSFAKTOREN AUF DIE AMMONIAK- UND METHANEMISSIONEN IM MASTSCHWEINESTALL: ZEITREIHEN UND REGRESSIONSANALYSE

Dieses Kapitel befasst sich im Speziellen mit dem Emissionsgeschehen in einem zwangsbelüfteten Mastschweinestall anhand der Daten aus vier unterschiedlichen Mastdurchgängen. Im Fokus stand die Untersuchung der Einflussfaktoren auf die Ammoniak- und Methan-Emissionen mittels mathematisch statistischer Auswertungen (Zeitreihen- und Regressionsanalyse), mit dem Ziel, daraus mögliche Ansatzpunkte für die praktische Anwendung ableiten zu können.

3.1 Ammoniak

Das Ausgangssubstrat und somit die Hauptquelle für die NH_3 -Emissionen sind die Exkremente der Tiere. In einstreulosen Haltungssystemen betrifft dies sowohl die Exkremente, welche unterhalb des Spaltenbodens im Flüssigmistkanal angestaut werden wie auch die verschmutzten Flächen oberhalb des Spaltenbodens inkl. der Buchtenwände (BÜSCHER 1996, MEISSNER 2004). Kenntnisse über die Einflussfaktoren, welche an der NH_3 -Freisetzung aus Flüssigmist beteiligt sind, sind seit Ende der 1990er Jahre weitestgehend vorhanden (HARTUNG, E. 1995, KECK 1997, NI 1999).

Insgesamt unterliegt die NH_3 -Freisetzung einer Reihe von chemischen und physikalischen Einflussfaktoren, welche sich in stoff- und kontaktflächengebundene Faktoren einteilen lassen. Zu den stoffgebundenen Einflussfaktoren zählen die Faktoren, welche den NH_3 -Stoffübergang im Flüssigmist von der Flüssigphase in die Gasphase beeinflussen (pH-Wert und Temperatur des Flüssigmists, NH_3 - Nachlieferungspotential, NH_3 -Konzentration im Flüssigmist sowie die Beschaffenheit der Flüssigmistoberfläche). Die kontaktflächengebundenen Einflüsse sind diejenigen Faktoren, welche das gasförmige Ammoniak aus der Grenzfläche des Flüssigmists in die Umgebungsluft überführen und somit freisetzen. Zu diesen Faktoren zählen die Partialdruck-Differenz zwischen dem Ammoniak in der Flüssigkeit und dem gasförmigen Ammoniak in der Luft. Ebenso die Luftströmung und Luftgeschwindigkeit an der Grenzfläche des Flüssigmists und die Größe der Grenzfläche. Die Wirkung beider Faktorengruppen hängt stark von der Umgebungstemperatur und dem pH-Wert des Flüssigmists ab (HARTUNG, E. 1995, KECK 1997, HARTUNG 2002a, GALLMANN 2003, MEISSNER 2004; **Abbildung 11**).

PHILIPPE et al. (2011) heben die Temperatur, die Luftgeschwindigkeit und die Größe der Flüssigmistoberfläche als bedeutende Einflussfaktoren auf die Ammoniakfreisetzung hervor und YE et al. (2011) ergänzen diese Einflussfaktoren um den Luftvolumenstrom und den „headspace“ (Abstand der Flüssigmistoberfläche bis zur Unterseite des Spaltenbodens bzw. bis zu den Schlitzen der Unterflurabsaugung im Flüssigmistkanal)

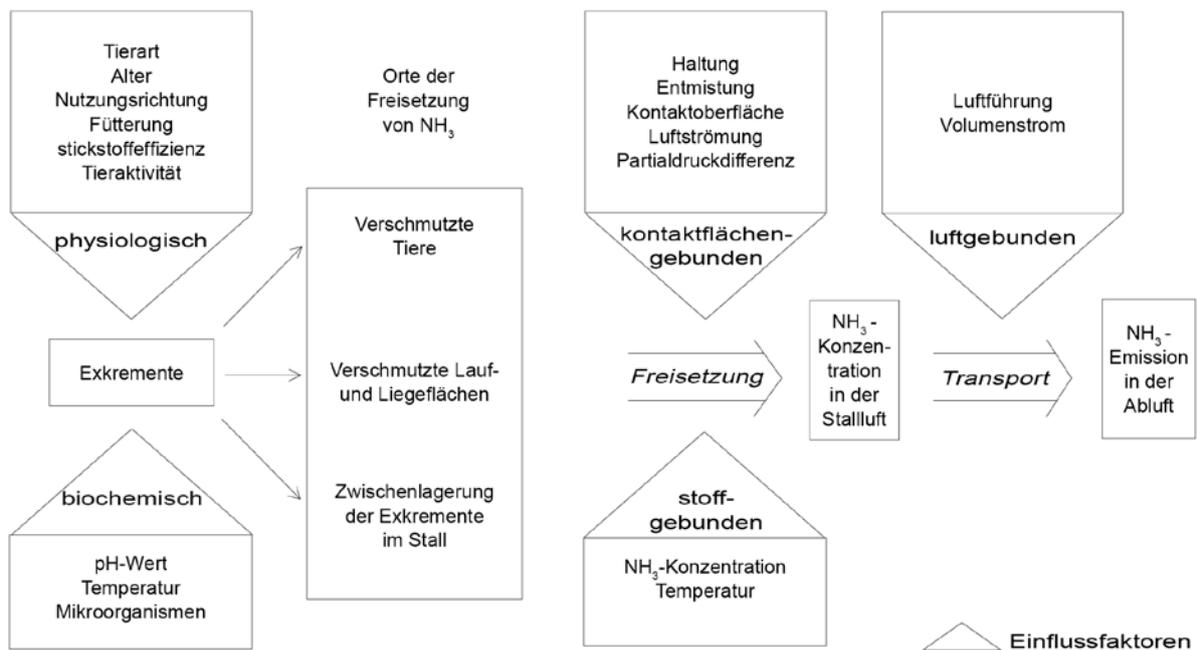


Abbildung 11: Schema der Entstehung, Freisetzung und Ausbreitung von Ammoniak im Stall (nach KECK 1997)

3.2 Methan

Als wesentliche Quelle für die Methanfreisetzung gelten in der Schweinehaltung die im Stallinneren zwischengelagerten Exkremente der Tiere (HARTUNG 2002b, MONTENY et al. 2006). Da die Methanproduktion ein Resultat der anaeroben Abbaukette von organischen Substanzen ist, sind vor allem die Faktoren von Bedeutung, welche die optimalen Bedingungen für die Methanbildung beschreiben. Dazu zählen nach HARTUNG (2002b) die Abwesenheit von Sauerstoff, absolute Dunkelheit, ein Redoxpotential von kleiner als -300 mV, eine ausreichende Menge an leicht abbaubarer organischer Substanz, Temperaturen über 3° C, pH-Werte zwischen sechs und acht, ein C/N-Verhältnis zwischen zehn und sechzehn zu eins sowie ein Wassergehalt von über 50 %. Der Flüssigmist ohne Schwimmschicht ist nach CLEMENS et al. (2002) als anaerob zu betrachten, da nur in den ersten Millimetern des Flüssigmists Sauerstoff in geringen Mengen nachweisbar ist. Für die methanbildenden Mikroorganismen herrschen somit optimale Bedingungen. Die Methanfreisetzung folgt grundsätzlich den Gesetzmäßigkeiten des konvektiven Stoffübergangs von einer flüssigen in die gasförmige Phase, wie sie bereits von der Ammoniakfreisetzung bekannt sind. Die Methanfreisetzung wird maßgeblich vom Konzentrationsgefälle an der Flüssigmistoberfläche, der Viskosität des Flüssigmists (im Zusammenhang mit der geringen Wasserlöslichkeit des Gases) sowie von der Umgebungstemperatur und dem Volumenstrom beeinflusst (HARTUNG & MONTENY 2000, GALLMANN 2003, BLANES-VIDAL et al. 2008, MASSÉ et al. 2008, PHILIPPE et al. 2015, WANG et al. 2016).

3.3 Datenerhebung und Auswertung

Die Erhebung der Datensätze von insgesamt vier Mastdurchgängen (**Tabelle 12**) fand in einem Zeitraum von eineinhalb Jahren auf der Versuchsstation Agrarwissenschaften, Standort Lindenhöfe der Universität Hohenheim statt (Kapitel 2.1, 2.2 und 2.3).

Tabelle 12: Bezeichnung der vier Mastdurchgänge, Durchführungszeiträume sowie Anzahl der zur Verfügung stehenden Tagesmittelwerte je Datensatz (komplett, reduziert sowie 14-tägliche Flüssigmistanalysen)

Mastdurchgang (MD) und Bezeichnung	Zeitraum	Anzahl Tagesmittelwerte kompletter Datensatz	Anzahl Tagesmittelwerte reduzierter Datensatz ¹	Anzahl Werte 14-tägliche Flüssigmistanalyse
1 / R _A	06.08.2013 – 08.11.2013	95	20	6
2 / R _B	16.01.2014 – 21.04.2014	96	20	8
3 / R _D	19.06.2014 – 11.09.2014	85	18	8
4 / R _C	30.10.2014 – 03.02.2015	97	20	7

¹ nur die Messwerte von jedem 5. Tag des kompletten Datensatzes verwendet, für eine Betrachtung, ob sich die Ergebnisse ändern in Abhängigkeit der Anzahl der einbezogenen Werte.

Die statistische Analyse der Datensätze erfolgte mit der Software IBM SPSS 22 (Lineare Regression), Origin 2015 (beschreibende Statistik) sowie R (Zeitreihenanalyse). Für alle Auswertungen wurden nur die Daten aus den Referenzabteilen (R_A, R_B; R_C, R_D) verwendet, um ungeachtet der durchgeführten Behandlungen, grundlegende Aussagen zu den Einflussfaktoren auf die Ammoniak- und Methanemissionen treffen zu können (GRONOW-SCHUBERT & GALLMANN 2014 und Kapitel 2.4). Die gesamten Auswertungen wurden auf der Basis von Tagesmittelwerten durchgeführt, welche zuvor mit Microsoft Excel 2013 aus den Rohdaten berechnet wurden. Vereinzelt fehlende Tagesmittelwerte der kontinuierlich ermittelten Messgrößen sowie die Tiergewichte zwischen den Wiegeterminen wurden interpoliert. Die Auswertung der Datensätze erfolgte in zwei statistischen Analysen. Es wurde mit allen Datensätzen eine Zeitreihenanalyse durchgeführt sowie eine nach Klassen eingeteilte Korrelations- und Regressionsanalyse vorgenommen.

3.3.1 Zeitreihenanalyse

Eine Zeitreihe ist eine Reihe zeitlich geordneter Beobachtungswerte des jeweils gleichen Sachverhaltes. Die Zeitabstände, die sogenannten Lags, zwischen den Beobachtungswerten sollten dabei immer gleich sein (z.B. täglich oder monatlich). Bei der Zeitreihenanalyse werden die so geordneten Beobachtungswerte in einzelne Komponenten ‚Trend‘, ‚Saison‘ oder ‚Zufall‘ zerlegt, um Strukturen und Gesetzmäßigkeiten innerhalb dieser Zeitreihe aufzuspüren. Ziel der Zeitreihenanalyse ist es, eine Systematik in dieser Zeitreihe zu identifizieren und mathematisch zu erfassen. Anschließend können dann weitere mathematisch statistische Auswertungen mit der so analysierten Zeitreihe erfolgen (MAZZONI 2011; SCHLITTEGEN 2012). In dieser Untersuchung waren die Tageswerte ausgewählter Variablen von insgesamt vier Mastdurchgängen die geordneten Beobachtungswerte und somit die zu untersuchenden Zeitreihen (Tabellen 12 und 13).

Durch die Anwendung der Zeitreihenanalyse auf die vorhandenen vier Datensätze sollte geklärt werden, ob es Zusammenhänge (Kreuzkorrelationen) zwischen den Zielzeitreihen und den Einflusszeitreihen gibt. Die Wahl der Einflusszeitreihen erfolgte anhand der in der Literatur beschriebenen Einflussparameter auf die Ammoniak- und Methanemissionen. Bei der Auswahl der Einflussparameter wurde sowohl in der Zeitreihen- als auch in der Regressionsanalyse bewusst auf die Verwendung der Ammoniak- und Methankonzentrationen verzichtet. Die Begründung hierfür liegt in der Berechnung der Emissionen, welche über die Multiplikation des Volumenstroms [m^3/h] mit der Gaskonzentration [mg/m^3] erfolgt, wobei auf den Volumenstrom direkt Einfluss genommen werden kann, nicht aber auf die Gaskonzentration. Es sollten somit ausschließlich die an der Ammoniak- und Methanfreisetzung beteiligten und ggf. steuerbaren Einflussparameter, wie zum Beispiel die Innenraum-Temperatur, der Luftvolumenstrom und die Flüssigmistparameter (pH-Wert und Temperatur) untersucht werden.

Tabelle 13: Übersicht der Ziel- und Einflusszeitreihen für die Zeitreihenanalyse sowie der abhängigen und unabhängigen Variablen für die Regressionsanalyse für alle vier Mastdurchgänge

Zielzeitreihen (Zeitreihenanalyse) ¹ bzw. abhängige Variablen und Einheiten (Regressionsanalyse) ²	Abkürzung
NH ₃ Emissionen [g h^{-1}] ^{1,2}	NH ₃
CH ₄ Emissionen [g h^{-1}] ^{1,2}	CH ₄
Einflusszeitreihen (Zeitreihenanalyse) ¹ bzw. unabhängige Variablen und Einheiten (Regressionsanalyse) ²	Abkürzung
Abteilterperatur [$^{\circ}\text{C}$] ^{1,2}	T _{Abteil}
Ablufttemperatur [$^{\circ}\text{C}$] ^{1,2}	T _{Abluft}
relative Luftfeuchte im Abteil [%] ^{1,2}	RH _{Abteil}
relative Luftfeuchte in der Abluft [%] ^{1,2}	RH _{Abluft}
Volumenstrom [$\text{m}^3 \text{h}^{-1}$] ^{1,2}	V _{Strom}
Temperatur des Flüssigmists [$^{\circ}\text{C}$] ^{1,2}	T _{FM}
pH-Wert des Flüssigmists ^{1,2}	pH _{FM}
Einzel tiergewichte [kg] ²	EG
Abstand zwischen der Flüssigmistoberfläche und den Schlitzen der Unterflurabsaugung im Flüssigmistkanal [cm] ²	headspace
Gesamtammoniak in der Frischmasse [g kg^{-1}] ²	Gesamt-N in FS
Ammoniumstickstoff in der Frischsubstanz [g kg^{-1}] ²	NH ₄ -N in FS
Anteil von Ammoniumstickstoff am Gesamtstickstoff [%] ²	Anteil NH ₄ -N an Gesamt N
Organische Trockensubstanz in der Frischsubstanz [g kg^{-1}] ²	oTS-Gehalt in FS

Kreuzkorrelationsfunktion (CCF)

Die Kreuzkorrelationsfunktion (CCF) beschreibt die Korrelation zwischen zwei zeitlich verschobenen Zeitreihen in Abhängigkeit von der Zeitverschiebung (als Lags). Der Spezialfall der CCF einer Zeitreihe mit sich selbst wird Autokorrelationsfunktion (ACF) genannt. Mit der Darstellung von Kreuzkorrelationsfunktionen (CCF) in einem Korrelogramm kann die Stärke des linearen Zusammenhangs von zwei ausgewählten Prozessen (z.B. Zeitreihen) veranschaulicht werden. Die Vorteile der Analyse von Kreuzkorrelationen liegt darin, dass aufgrund der zuvor durchgeführten mathematischen Schritte nur noch Signale ermittelt werden, die einen Zusammenhang zwischen den betrachteten Zeitreihen erkennen lassen (HARTUNG, J. 1995, KOSFELD 2014, SEMMLER-BUSCH 2009).

Für die Auswertungen wurden die CCF-Korrelogramme sowohl für die Ammoniak- als auch die Methanemissionen (Zielzeitreihen) und jede einzelne Einflusszeitreihe (Tabelle 13) von allen vier Mastdurchgängen erstellt. Zur Vorbereitung der Kreuzkorrelationsanalysen wurden die Zielzeitreihen von Trend und Autokorrelationsstruktur bereinigt, indem ein Zeitreihenmodell der Form ARIMA [1,1,1] angepasst wurde und die Modellgüte sowohl optisch, durch die Darstellung der ACF und der partiellen ACF (PACF) der Residuen, als auch rechnerisch durch den P-Wert (Ljung-Box-Test, bis Lag 5) überprüft. Die Residuen geben die Abweichungen vom mittleren Verlauf wieder. Hängen diese mit den entsprechenden Werten der Einflusszeitreihen zusammen, kann man davon ausgehen, dass diese Kreuzkorrelationen tatsächliche Zusammenhänge anzeigen und nicht nur einen ähnlichen Verlauf der Zeitreihen abbilden.

Der Trend, welcher in dieser Untersuchung bereinigt wurde, war in erster Linie durch das Wachstum der Tiere bedingt. Hinter dem Wachstum der Tiere verbirgt sich u.a. die Tatsache, dass die Tiere mit zunehmendem Alter und Gewicht mehr Kot und Urin absetzen, was im Verlauf der Mast zu höheren Ammoniak- und Methankonzentrationen, sowohl im Abteil als auch in der Abluft und schlussendlich auch zu steigenden Ammoniak- und Methanemissionen führt (ZONG et al. 2015). Durch den zuvor bereinigten Trend, konnten mithilfe der anschließend durchgeführten Kreuzkorrelationsanalysen, die direkt am Emissionsgeschehen beteiligten Parameter ermittelt werden. Die Durchführung der Kreuzkorrelationsanalyse diente zum einen der Absicherung der gewählten Parameter und zum anderen sollte sie Einblicke in die zeitlichen Zusammenhänge geben. Eine der Fragen war z.B. wie lange sich hohe Temperaturen bzw. hohe Volumenströme auf die Emission von Ammoniak und Methan im Mastschweinestall auswirken?

Die CCF wurden in Korrelogrammen dargestellt, wobei sich die Korrelation zum Lag 0 (Korrelation der zeitlich nicht verschobenen Zeitreihen) in der Mitte der Grafik befindet. Die CCF für negative Lags beschreibt die lineare Abhängigkeit der vergangenen Werte der Einflusszeitreihe auf die aktuellen Werte der Zielzeitreihe. Dagegen gibt die CCF für positive Lags die Korrelation zwischen den zukünftigen Werten der Einflusszeitreihe und den aktuellen Werten der Zielzeitreihe an. Die horizontalen Linien in den Grafiken stellen das 95 % asymptotische Konfidenzband der ACF eines Weißes Rauschen Prozesses dar, welcher ein Beispiel für das Verhalten von zwei unabhängigen Zeitreihen darstellt. Liegt die CCF größtenteils innerhalb dieser beiden Grenzen, dann kann in guter Näherung geschlossen werden, dass sich die beiden betrachteten Zeitreihen nicht beeinflussen. Beim Überschreiten dieser beiden Grenzen liegt eine gegenseitige Beeinflussung der betrachteten Zeitreihen vor (DÖRING 2016, SCHLITGEN 2012, SEMMLER-BUSCH 2009).

3.3.2 Korrelations- und Regressionsanalyse

Korrelationsanalyse

Im Vorfeld der Regressionsanalysen wurden zunächst für jeden Mastdurchgang ohne Klassifizierung und anschließend separat für jede gebildete Klasse (**Tabelle 14**) Korrelationsanalysen zwischen den absoluten Ammoniak- und Methanemissionen [g h^{-1}] und den ausgewählten Parametern durchgeführt. Durch die Ordnung der Beträge der Korrelationskoeffizienten kann jeweils eine Rangfolge für die ausgewählten Parameter bestimmt werden. Die Korrelationsergebnisse fielen zwischen den Mastdurchgängen differenziert aus, was zu vielen unterschiedlichen Rangfolgen geführt hat. Für die Regressionsanalysen und deren anschließende Auswertung wurde eine für alle Mastdurchgänge einheitliche Rangfolge je Gas und Klasse angestrebt. Um dies zu realisieren, wurden

die Korrelationsergebnisse pro Gas und Klasse über die Mastdurchgänge eins bis vier gemittelt und anhand dieser gebildeten Mittelwerte die Rangfolgen bestimmt. Diese klassenspezifischen Rangfolgen waren die Basis für die Variablenreihenfolge der im Anschluss durchgeführten Regressionsanalysen.

Tabelle 14: Übersicht der gebildeten Klassen innerhalb der vier Mastdurchgänge, Klassenbezeichnung und die jeweils durchgeführten Korrelationsanalysen

Übersicht der gebildeten Klassen	Klassenbezeichnung	Durchgeführte Korrelationsanalyse
1. Einteilung in Mastabschnitte (einzeln für jeden MD) (anhand der Fütterungsumstellungsdaten innerhalb der 3-Phasenmast)	Vormast Mittelmast Endmast	Pearson-Korrelation
2. Temperaturklassen (alle MD je Klasse zusammengefasst) (die Einteilung der Zulufttemperaturen auf Basis von Tagesmittelwerten erfolgte anhand der Definitionen für „kalter Tag“, „warmer Tag“ und „heißer Tag“)	-5 bis 10 °C 10 bis 20 °C 20 bis über 30 °C	Pearson-Korrelation
3. Sommer- und Winterdurchgänge (einzeln für jeden MD) (Einteilung anhand Hauptsaison der Durchführungszeiträume; angewendet auf die kompletten und die reduzierten Datensätze; Tabelle 10)	Sommer $R_A + R_D$ Winter $R_B + R_C$	Pearson-Korrelation
4. Gewichtsklassen (einzeln für jeden MD) (in Anlehnung an DEKOCK et al. 2009)	< 65 kg > 65 kg	Pearson-Korrelation
5. reduzierter Datensatz - jeder 5. Tag (einzeln für jeden MD) (erstellt anhand der Ergebnisse aus der Zeitreihenanalyse)	R_A reduziert R_B reduziert R_D reduziert R_C reduziert	Pearson-Korrelation
6. Volumenstromklassen (alle MD je Klasse zusammengefasst)	0 - 2000 m ³ h ⁻¹ 2000 - 2500 m ³ h ⁻¹ 2500 - 3000 m ³ h ⁻¹ 3000 - 3500 m ³ h ⁻¹ 3500 - 4000 m ³ h ⁻¹	Pearson-Korrelation
7. Flüssigmistparameter (einzeln für jeden MD) (aufgrund der geringeren Datenbasis bei den 14-täglich erhobenen Flüssigmistparametern wurden diese separat ausgewertet; je MD standen 6-8 Werte zur Verfügung)	alle MD (R_A bis R_D) Sommer $R_A + R_D$ Winter $R_B + R_C$	Spearman-Korrelation
n = Stichprobenumfang N = Stickstoff	FM = Flüssigmist NH ₄ -N = Ammonium-Stickstoff	FS = Frischsubstanz oTS = organische Trockensubstanz

Insgesamt wurden 19 Klassifizierungen für jeweils drei Auswertungsvarianten betrachtet (A: ohne Einzeltiergewichte, B: mit Einzeltiergewichten und C: mit Einzeltiergewichten und Flüssigmistparametern; Tabellen 13 und 14). Die in Auswertungsvariante B hinzugenommene Variable „Einzeltiergewichte“ diente als Hilfsparameter für die im Mastverlauf ansteigenden Kot- und Urinmengen. Die Begründung dafür beruht auf der Annahme, dass mit steigender Lebendmasse die aufgenommene Futtertrockenmasse zunimmt. Damit verbunden nimmt auch die aufgenommene Wassermenge, deren Aufnahme an die Trockenmasseaufnahme gekoppelt ist, zu. Demzufolge steigen die Kot- und Urinmengen entsprechend zu den Einzeltiergewichten an, da angenommen werden kann, dass die ausgeschiedene Wassermenge weitgehend der aufgenommenen entspricht und im sich Laufe der Mast die Wasserkonzentration in Kot und Urin nicht verändert (STEINGASS 2015). Anhand der Korrelationsergebnisse sollte geprüft werden, ob es sinnvoll ist, die Einzeltiergewichte in die anschließende Regressionsanalyse einzubeziehen.

Hinsichtlich der Flüssigmistparameter wurden aufgrund der beiden zur Verfügung stehenden Datensätze auch zwei voneinander getrennte Korrelations- und Regressionsanalysen durchgeführt. Der eine Datensatz umfasste den pH-Wert und die Temperatur des Flüssigmists auf Basis von Tagesmittelwerten, erhoben durch digitale Sensoren, welche kontinuierlich an der Flüssigmistoberfläche positioniert waren (Kapitel 2.3). Diese Werte wurden in der Auswertungsvariante C berücksichtigt. Der darüber hinaus erhobene Datensatz mit den 14-täglichen Flüssigmistanalysen ergab je nach Mastdurchgang sechs bis acht Werte, welche einer separaten Klasse zugeordnet wurden (Klasse 7: Flüssigmistparameter; Tabelle 14). Diese Trennung war aufgrund der unterschiedlichen Größe der Datensätze notwendig. Einerseits konnten so die vorhandenen digital erhobenen Tagesmittelwerte von Flüssigmisttemperatur und -pH-Wert in die statistischen Auswertungen einfließen und andererseits konnte in der anschließenden Regressionsanalyse geklärt werden, wie hoch der Anteil der 14-täglichen erhobenen Flüssigmistparameter (N-Gesamt in der Frischmasse, $\text{NH}_4\text{-N}$ in der Frischmasse, Anteil $\text{NH}_4\text{-N}$ an N-Gesamt sowie der Gehalt organischer Trockensubstanz) an der Gesamtvarianz ist, wenn nur die Flüssigmistparameter betrachtet werden.

Regressionsanalyse

Für die Regressionsanalyse wurde in IBM SPSS 22 die lineare Regression nach der Einschluss-Methode gewählt. Jede unabhängige Variable wurde hier in einem eigenen Block angelegt (BÜHL 2014). In den Analysen wurden jeweils vier Blöcke, analog zu der Rangfolge der Variablen angelegt. Für jede Gruppe wurden somit stets die vier ranghöchsten Variablen in die Regressionsanalyse aufgenommen. Die unabhängige Variable mit dem höchsten Rang wurde in den ersten Block und die mit dem niedrigsten Rang in den letzten Block eingefügt. Auf diese Weise war es möglich, über alle Analysen hinweg, die Reihenfolgen der unabhängigen Variablen festzulegen, ohne dass diese vom Programm selbst über den F-Test ausgeschlossen wurden. Dies war für die Vergleichbarkeit der Regressionsergebnisse von Bedeutung. Ziel der Regressionsanalyse war die Ermittlung der unabhängigen Variablen, welche am häufigsten den größten Anteil an der erklärenden Varianz haben. Daraus sollte, auch im Vergleich zu den Ergebnissen der Kreuzkorrelation, abgeleitet werden, welche Variablen für Ammoniak und welche für Methan die bedeutsamsten im hier untersuchten Emissionsgeschehen waren. Zur Auswertung der Regressionsanalysen diente das angepasste Bestimmtheitsmaß (R^2_{adj}).

3.4 Ergebnisse und Diskussion der statistischen Auswertungen

3.4.1 Ergebnisse der Datenerhebung

Aufgrund des gewählten Versuchsansatzes ließen sich die vier Mastdurchgänge in jeweils zwei Sommer und zwei Winterdurchgänge einteilen. R_A und R_D zählten mit einer durchschnittlichen Zulufttemperatur von 15,8 und 19,3° C zu den Sommerdurchgängen und R_B und R_C mit einer durchschnittlichen Zulufttemperatur von 9,5 und 6,8° C zu den Winterdurchgängen (**Tabelle 15** und Tabellen A5- a bis A5- c).

Die Ergebnisse der durchschnittlichen Ammoniak- und Methanemissionen [g h^{-1}] lassen zwischen den Sommer- und Winterdurchgängen nicht diese klare Trennung erkennen, wie es bei den Temperaturen der Fall war. Sowohl im Sommer (R_A : 19,6 g h^{-1} ; R_D : 15,2 g h^{-1}) als auch im Winter (R_B : 18,0 g h^{-1} ; R_C : 15,1 g h^{-1}) wurden vergleichbar höhere und geringere Ammoniakemissionen gemessen. Die Methanemissionen wiesen in den Sommerdurchgängen Werte zwischen 8,0 bis 14 g h^{-1} und in den

Winterdurchgängen zwischen 6,9 bis 10,6 g h⁻¹ auf, d.h. dass auch hier keine eindeutige Zuordnung der gemessenen Werte zu den einzelnen Jahreszeiten möglich war. Um diese Angaben besser mit Bezug zum Tierbesatz einordnen zu können, wurden die Ammoniak- und Methanemissionen in Gramm (g) je Tag und Großvieheinheit (GV) berechnet. Für die Sommerdurchgänge bedeutete dies Ammoniakemissionen in Höhe von 64,3 und 46,8 g Tag⁻¹ GV⁻¹ und für die Winterdurchgänge von 64,3 und 48,2 g Tag⁻¹ GV⁻¹. Die Methanemissionen lagen im R_A und R_D bei 28,2 und 43,5 g Tag⁻¹ GV⁻¹ und im R_B und R_C bei 21,0 und 32,3 g Tag⁻¹ GV⁻¹. Im Vergleich zu Untersuchungen von GALLMANN (2003) und HÄUßERMANN (2006) im selben Versuchsstall aber mit anderer Gasmestechnik sind dies geringere Werte, dennoch liegen sie innerhalb der Spannweite international gemessener Emissionen für Mastschweine (PHILIPPE et al. 2011).

Tabelle 15: Übersicht der abhängigen und unabhängigen Variablen mit dem dazugehörigen Stichprobenumfang, Mittelwert und Standardabweichung über alle vier Mastdurchgänge (R_A, R_B, R_D, R_C) für die Umgebungsparameter sowie die kontinuierlich digital erhobenen Flüssigmistparameter

Variablen	„Sommer“ R _A			„Winter“ R _B			„Sommer“ R _D			„Winter“ R _C		
	n	\bar{x}	σ	n	\bar{x}	σ	n	\bar{x}	σ	n	\bar{x}	σ
Abhängige												
NH ₃ [g h ⁻¹]	95	19,6	3,7	96	18,0	5,3	85	15,2	3,8	97	15,1	3,9
CH ₄ [g h ⁻¹]	95	8,0	2,0	96	6,9	3,0	85	14,0	5,1	97	10,6	4,4
Unabhängige												
T _{Zuluft} [°C]	95	15,8	4,1	96	9,5	3,2	85	19,3	3,0	97	6,8	3,5
T _{Abteil} [°C]	95	20,4	2,8	96	18,6	1,2	85	22,9	2,4	97	18,3	2,0
T _{Abluft} [°C]	95	19,8	2,7	96	16,2	1,1	85	21,9	2,2	97	15,5	1,8
RH _{Abteil} [%]	95	71,9	5,8	96	56,7	5,7	85	65,5	7,9	97	59,9	4,6
RH _{Abluft} [%]	95	72,5	6,0	96	70,0	6,9	85	73,1	7,6	97	78,9	4,2
V _{Strom} [m ³ h ⁻¹]	95	3020	348	96	2436	468	85	3365	371	97	2334	228
T _{FM} [°C]	74	17,7	1,4	96	15,0	0,7	85	19,7	1,1	97	15,3	1,6
pH _{FM}	74	7,4	0,2	96	7,6	0,3	85	6,9	0,1	97	7,3	0,1
EG [kg]	95	78,4	24,7	96	74,4	24,5	85	77,1	23,4	97	75,6	23,4
n = Stichprobenumfang			T = Temperatur				FM = Flüssigmist					
\bar{x} = Mittelwert			RH = relative Luftfeuchte				EG = Einzeltiergewichte					
σ = Standardabweichung			V = Volumenstrom									

Die Ergebnisse der beschreibenden Statistik der 14-täglichen Flüssigmistanalysen werden in **Tabelle 16** zusammengefasst dargestellt. Der wesentliche Unterschied zur Darstellung in Tabelle 15 ist hier der deutlich geringere Stichprobenumfang von sechs bis acht Werten je Mastdurchgang. Die Mittelwerte der Ammoniak- und Methanemissionen bei sechs bis acht verwendeten Tagesmittelwerten waren dennoch vergleichbar mit denen des kompletten Mastdurchgangs. Der Gehalt an Gesamtstickstoff in der Frischsubstanz lag zwischen 3,0 bis 4,9 g kg⁻¹, der des Ammoniumstickstoffs (NH₄-N) zwischen 1,1 bis 3,1 g kg⁻¹. Der Anteil an Ammoniumstickstoff am Gesamtstickstoff betrug zwischen 58,2 und 74,5 %. Diese Werte waren, verglichen zu bereits durchgeführten Untersuchungen im selben Versuchsstall (GALLMANN 2003, HÄUßERMANN 2006), als geringer einzuordnen. In Studien von AMON et al. (2007) und CHADWICK et al. (2011) wurden hingegen ähnliche Werte ermittelt.

Die Flüssigmisttemperaturen lagen in den Winterdurchgängen bei 15,1 und 15,4° C und stiegen in den Sommerdurchgängen durchschnittlich um circa zwei bis vier Grad Celsius an (R_A : 17,7 und R_D : 19,7° C). Die hier gemessenen Flüssigmisttemperaturen lagen unterhalb der Werte, welche HÄUßERMANN (2006) in ihren Untersuchungen ermittelte. Die pH-Werte hingegen nahmen ähnliche Spannweiten ein, wie jene von GALLMANN (2003; 7,2 bis 7,4) und HÄUßERMANN (2006; 7,2 bis 7,5). Lediglich der pH-Wert aus R_D wich mit einem Wert von 6,9 deutlich ab. Parallel zu dem niedrigen pH-Wert wurde im R_D auch die höchste Flüssigmisttemperatur gemessen. Dies könnte ein Hinweis auf die gesteigerte Aktivität der methanogenen Bakterien durch die im Vergleich höheren Umgebungstemperaturen sein. Durch den Abbau der organischen Substanz durch die Mikroben kommt es zur Absenkung des pH-Werts. Die parallel dazu durchgeführte Auswertung der beschreibenden Statistik (Tabelle A6) zeigte, dass im R_D mit 42,7 g Tag⁻¹ und GV⁻¹ auch die höchsten Methanemissionen gemessen wurden, was die erhöhte Aktivität der Methanbakterien bestätigen würde. Die Methanemissionen der anderen Mastdurchgänge lagen zwischen 21,0 bis 32,2 g Tag⁻¹ GV⁻¹.

Tabelle 16: Übersicht der abhängigen und unabhängigen Variablen mit dem dazugehörigen Stichprobenumfang, Mittelwert und Standardabweichung für alle vier Mastdurchgänge (R_A , R_B , R_C , R_D) für die 14-tägig erhobenen Flüssigmistparameter

Variablen	n	R_A		n	R_B		n	R_D		n	R_C	
		\bar{x}	σ		\bar{x}	σ		\bar{x}	σ		\bar{x}	σ
Abhängige												
NH ₃ [g h ⁻¹]	6	19,7	3,0	8	16,8	5,9	7	14,3	4,4	8	15,5	5,1
CH ₄ [g h ⁻¹]	6	8,2	0,7	8	6,5	3,4	7	13,1	5,1	8	10,6	6,2
Unabhängige												
pH _{FM}	6	7,4	0,2	8	7,6	0,3	7	6,9	0,1	8	7,2	0,2
T _{FM} [°C]	6	17,7	1,2	8	15,1	1,0	7	19,7	1,2	8	15,4	1,9
headspace [cm]	6	69,0	11,5	8	70,1	15,6	7	73,1	15,0	8	66,5	16,3
Gesamt N in FS [g kg ⁻¹]	6	4,9	0,7	8	3,9	2,1	7	4,0	1,3	8	3,0	1,7
NH ₄ -N in FS [g kg ⁻¹]	6	3,1	0,7	8	2,7	1,4	7	2,5	1,1	8	2,3	1,2
Anteil NH ₄ -N an Gesamt N [%]	6	64,2	12,5	8	68,2	10,1	7	58,2	16,8	8	74,5	19,1
oTS-Gehalt [g kg ⁻¹]	6	4,9	1,0	8	2,6	2,0	7	3,3	1,7	8	1,2	1,2
n = Stichprobenumfang	T = Temperatur			FM = Flüssigmist								
\bar{x} = Mittelwert	N = Stickstoff			FS = Frischsubstanz								
σ = Standardabweichung	NH ₄ -N = Ammonium-Stickstoff			oTS = organische Trockensubstanz								

3.4.2 Ergebnisse der Zeitreihenanalyse

Bei den Kreuzkorrelationen unterschied sich die Anzahl signifikanter Ergebnisse zum einen zwischen den Sommer- und Winterdurchgängen und zum anderen auch zwischen den Gasen (**Tabelle 17**). Bei den Ammoniakemissionen konnten Signifikanzen hauptsächlich in den Winterdurchgängen (R_B und R_C) und bei den Methanemissionen vorrangig in den Sommerdurchgängen (R_A und R_D) ermittelt werden. Insgesamt gab es bei den Methanemissionen mehr signifikante Kreuzkorrelationen ($\Sigma = 16$) als bei den Ammoniakemissionen ($\Sigma = 11$). Bei den Methanemissionen traten signifikante Ergebnisse am häufigsten im Zusammenhang mit der Abteilterperatur, der Luftfeuchtigkeit im Abteil und dem

Volumenstrom auf. Auch war zu beobachten, dass diese Einflusszeitreihen fast in allen Mastdurchgängen signifikanten Einfluss auf die Methanemissionen hatten. Hinsichtlich der Kreuzkorrelationsergebnisse zwischen den Einflusszeitreihen und den Ammoniakemissionen ergab sich ein nicht so deutliches Bild. Bei den Sommerdurchgängen gab es von insgesamt vierzehn möglichen nur zwei signifikante Ergebnisse. Jeweils eines für die Abteilterperatur und eines für die Ablufttemperatur. In den beiden Winterdurchgängen waren die Kreuzkorrelationen zwischen den Ammoniakemissionen und den Einflusszeitreihen für die Luftfeuchte im Abteil und der Abluft sowie für den Volumenstrom signifikant.

Tabelle 17: Übersicht der Kreuzkorrelationsergebnisse von allen vier Mastdurchgängen für die Ammoniak- und Methanemissionen [g h^{-1}] und die Häufigkeit der Signifikanzen je Parameter

Mastdurchgang	R_A		R_B		R_D		R_C		Häufigkeit Signifikanzen R_A bis R_D		
	06.08.2013 - 08.11.2013		16.01.2014 - 21.04.2014		19.06.2014 - 11.09.2014		30.10.2014 - 03.02.2015		NH_3 [g h^{-1}]	CH_4 [g h^{-1}]	
	NH_3 [g h^{-1}]	CH_4 [g h^{-1}]	NH_3 [g h^{-1}]	CH_4 [g h^{-1}]	NH_3 [g h^{-1}]	CH_4 [g h^{-1}]	NH_3 [g h^{-1}]	CH_4 [g h^{-1}]			
Einflusszeitreihe											
$T_{\text{Abteil}} [^{\circ}\text{C}]$	n.s.	s.	n.s.	s.	s.	s.	n.s.	n.s.	1	3	
$T_{\text{Abluft}} [^{\circ}\text{C}]$	n.s.	s.	s.	n.s.	s.	s.	n.s.	n.s.	2	2	
$\text{RH}_{\text{Abteil}} [\%]$	n.s.	s.	s.	s.	n.s.	s.	s.	s.	2	4	
$\text{RH}_{\text{Abluft}} [\%]$	n.s.	n.s.	s.	n.s.	n.s.	s.	s.	s.	2	2	
$V_{\text{Strom}} [\text{m}^3 \text{h}^{-1}]$	n.s.	s.	s.	n.s.	n.s.	s.	s.	s.	2	3	
pH_{FM}	n.s.	n.s.	s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	1	0	
$T_{\text{FM}} [^{\circ}\text{C}]$	n.s.	s.	s.	n.s.	n.s.	s.	n.s.	n.s.	1	2	
n.s. =	nicht signifikant (grafische Auswertung: Werte lagen innerhalb des Schwankungsintervalls mit $\alpha = 5\%$)									$\Sigma = 11$	$\Sigma = 16$
s. =	signifikant (grafische Auswertung: Werte überschritten das Schwankungsintervall mit $\alpha = 5\%$; Abbildungen 7 und 8)										

Anhand von zwei ausgewählten Beispielen (**Abbildung 12:** CCF- Korrelogramm der CH_4 -Emissionen kombiniert mit der Ablufttemperatur des R_D ; **Abbildung 13:** CCF- Korrelogramm der CH_4 -Emissionen kombiniert mit dem Volumenstrom des R_C), erfolgt die nähere Erläuterung der Kreuzkorrelationsergebnisse.

Abbildungen 12 und 13 stellen die Ergebnisse der Kreuzkorrelation zwischen der Zielzeitreihe (y) und der zeitlich verschobenen Einflusszeitreihe (x) grafisch dar. Jede Säule im Diagramm repräsentiert dabei die Korrelation bei gegebener Zeitverschiebung in Tagen (Lags). Ausgangspunkt der Interpretation von CCF- Korrelogrammen ist stets der Lag 0. Von dort aus kann die Kreuzkorrelation bzgl. der in die Vergangenheit verschobenen Einflusszeitreihe (links vom Lag 0) oder der in die Zukunft verschobenen Einflusszeitreihe (rechts vom Lag 0) betrachtet werden. Beide Diagramme wurden ausgewählt, da sie im Bereich des Lag 0 Korrelationen aufweisen, die signifikant von null verschieden

sind. Der Verlauf in beiden Diagrammen ist typisch für Situationen, in denen Regelmechanismen in ein System (hier: dem Stallklima) eingreifen.

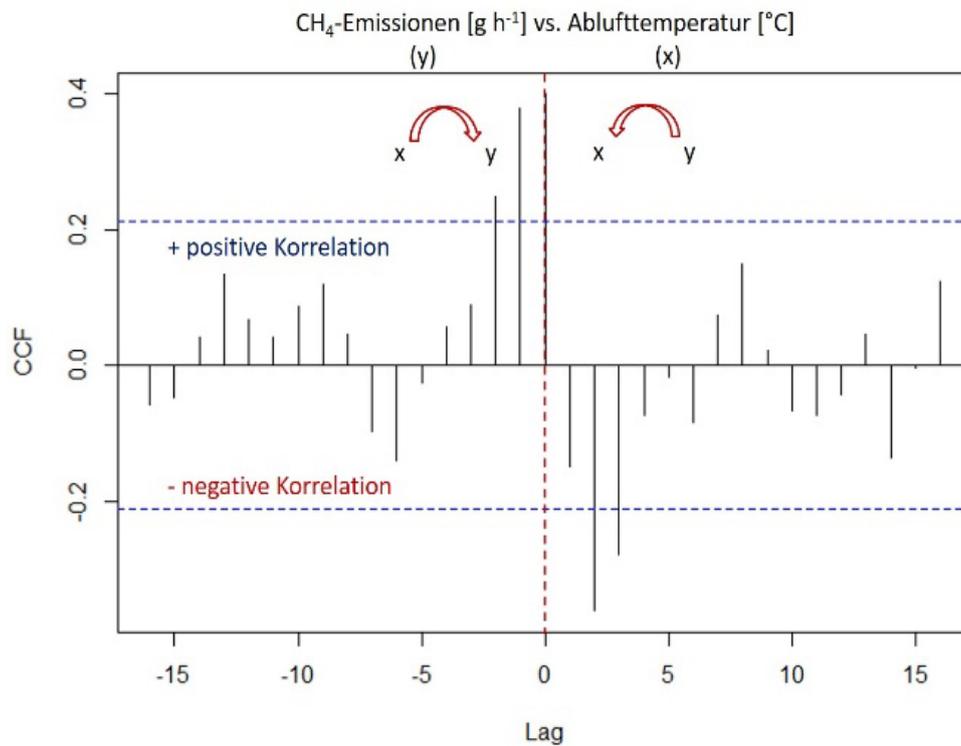


Abbildung 12: CCF- Korrelogramm der CH₄-Emissionen [g h⁻¹] kombiniert mit der Ablufttemperatur [°C], Daten aus R_b

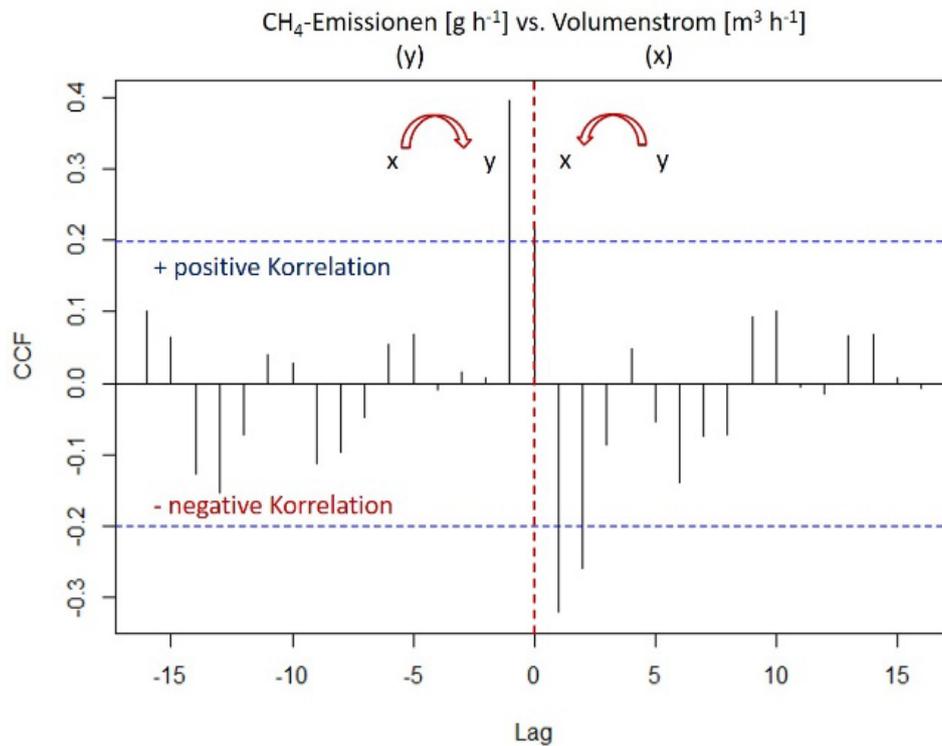


Abbildung 13: CCF- Korrelogramm der CH₄-Emissionen [g h⁻¹] kombiniert mit dem Volumenstrom [m³ h⁻¹], Daten aus R_c

In Abbildung 12 wurde die Methanemission bis zu zwei Tage vor dem Beobachtungstag (Lag 0) positiv von der Ablufttemperatur beeinflusst. Hohe Ablufttemperaturen am Vortag und dem Tag davor hatten eine steigernde Wirkung auf die Methanemissionen am Beobachtungstag selbst (positive Korrelation). Nach dem Lag⁰ wurde die Regelung durch die Stallklimatechnik erkennbar. Die hohen Temperaturen im Stall bewirkten infolge der Stallklimaregelung einen Anstieg des Volumenstroms und führten somit zu einer Erhöhung des Luftdurchsatzes. Als Reaktion darauf stiegen die Methanemissionen und die Temperaturen sanken (negative Korrelation). Diese Wirkung hielt bis zu den Tagen zwei und drei nach dem Beobachtungstag an. Mit der Abbildung 13 wird der eben beschriebene Zusammenhang bestätigt. Ein hoher Volumenstrom am Vortag führte zu hohen Methanemissionen am Beobachtungstag (positive Korrelation). Nach dem Lag 0 waren die Methanemissionen negativ mit dem Volumenstrom korreliert, d.h. dass anschließend die wieder ansteigenden Methanemissionen mit geringeren Volumenströmen zusammenhingen.

Die Ergebnisse der Kreuzkorrelationen gaben Hinweise darauf, wie dynamisch bzw. stabil das klimatische Geschehen in einem Mastschweinestall sein kann. Wie für Abbildung 12 beschrieben, scheint es so zu sein, dass sich auch die Temperaturen im Stall langsam auf- oder abbauen, analog zu den Temperaturen außerhalb des Stalls. Durch die Hülle des Stallgebäudes und durch die Lüftungsregelung geschieht dies mit einer zeitlichen Verzögerung (Pufferwirkung). Das klimatische Geschehen im System „zwangsbelüfteter Mastschweinestall“ ist trotz Lüftungsregelung an sehr heißen Tagen stark vom Außenklima beeinflusst, trotz hoher Luftwechselraten. PERTAGNOL (2013) konnte feststellen, dass noch zwei Tage nach gemessenen Außenhöchsttemperaturen von über 36° C die Innenraumtemperaturen im Versuchsabteil bei 28,7° C lagen. Auch HÄÜBERMANN et al. (2006) hatten analysiert, dass die absoluten Methanemissionen nicht nur von den Temperaturen beeinflusst wurden, die aktuell im Stallinnenraum vorherrschten, sondern auch von jenen, die bereits an den Tagen zuvor das klimatische Geschehen im Stallinnenraum mitbestimmten.

3.4.3 Korrelationsergebnisse der Umgebungsvariablen

Die Korrelationsergebnisse werden anhand der Häufigkeitsverteilungen der unabhängigen Variablen auf die Ränge eins bis acht in den Auswertungsvarianten A, B und C für die Ammoniakemissionen (**Tabelle 18**) und für die Methanemissionen (**Tabelle 19**) zusammengefasst dargestellt.

Die Auswertung der Häufigkeitsverteilungen der unabhängigen Variablen auf die Ränge eins bis acht ergab für die Ammoniakemissionen in Auswertungsvariante A, dass die Abteiltemperatur der am häufigsten mit dem höchsten Rang versehene Einflussparameter war, gefolgt vom Volumenstrom und der Ablufttemperatur. Fügt man zu den unabhängigen Variablen die Einzeltiergewichte als Einflussparameter hinzu (Auswertungsvariante B), so rückten diese an die Stelle der häufigsten auf Rang eins ausgezählten Variablen. Auch bei der Einbeziehung der Flüssigmistparameter (Temperatur und pH-Wert, Auswertungsvariante C) blieben die Einzeltiergewichte der bedeutendste Einflussparameter. Bei der Berücksichtigung aller acht Variablen ergab sich folgende Variablenreihenfolge: 1. Einzeltiergewichte, 2. Flüssigmisttemperatur, 3. Volumenstrom und 4. Abteiltemperatur.

Tabelle 18: Häufigkeitsverteilung der unabhängigen Variablen in Rang eins bis acht bei der Korrelation mit den Ammoniakemissionen [g h^{-1}] von allen 19 Klassen für die Auswertungsvarianten A. ohne Einzeltiergewichte, B. mit Einzeltiergewichten und C. mit Einzeltiergewichten und mit Flüssigmistparametern

Unabhängige Variable	Rang							
	1	2	3	4	5	6	7	8
Auswertungsvariante A								
$T_{\text{Abteil}} [^{\circ}\text{C}]$	8	8	0	2	1			
$T_{\text{Abluft}} [^{\circ}\text{C}]$	4	8	4	2	1			
$\text{RH}_{\text{Abteil}} [\%]$	0	1	3	6	9			
$\text{RH}_{\text{Abluft}} [\%]$	0	0	7	6	6			
$V_{\text{Strom}} [\text{m}^3 \text{h}^{-1}]$	7	2	5	3	2			
Auswertungsvariante B								
$T_{\text{Abteil}} [^{\circ}\text{C}]$	3	9	4	0	2	1		
$T_{\text{Abluft}} [^{\circ}\text{C}]$	2	4	7	3	2	1		
$\text{RH}_{\text{Abteil}} [\%]$	0	0	1	3	6	9		
$\text{RH}_{\text{Abluft}} [\%]$	0	0	1	6	6	6		
$V_{\text{Strom}} [\text{m}^3 \text{h}^{-1}]$	3	4	3	4	3	2		
EG [kg]	11	2	3	3	0	0		
Auswertungsvariante C								
$T_{\text{Abteil}} [^{\circ}\text{C}]$	0	4	6	6	0	0	2	1
$T_{\text{Abluft}} [^{\circ}\text{C}]$	1	0	3	7	3	3	1	1
$\text{RH}_{\text{Abteil}} [\%]$	0	0	0	1	2	1	6	9
$\text{RH}_{\text{Abluft}} [\%]$	0	0	1	0	3	6	4	5
$V_{\text{Strom}} [\text{m}^3 \text{h}^{-1}]$	2	2	3	0	4	5	1	2
EG [kg]	10	1	2	3	1	2	0	0
$T_{\text{FM}} [^{\circ}\text{C}]$	6	5	2	1	3	1	1	0
pH_{FM}	0	7	2	1	3	1	4	1
T = Temperatur			FM = Flüssigmist			EG = Einzeltiergewichte		
RH = relative Luftfeuchte			V = Volumenstrom					

Die Ergebnisse für die Methanemissionen zeigten, dass in allen Klassen der Volumenstrom der am häufigsten auf Rang eins platzierte Einflussparameter war, gefolgt von der Abluft- und Abteiltemperatur (Auswertungsvariante A und B). Unter Berücksichtigung aller acht Variablen (Auswertungsvariante C) ergab sich folgende Variablenreihenfolge: 1. Volumenstrom, 2. Flüssigmisttemperatur, 3. Ablufttemperatur und 4. pH-Wert des Flüssigmists. Sowohl bei den Ammoniak- als auch bei den Methanemissionen nahm die relative Luftfeuchte im Abteil und in der Abluft eine untergeordnete Rolle innerhalb der Einflussparameter ein.

Tabelle 19: Häufigkeitsverteilung der unabhängigen Variablen in Rang eins bis acht bei der Korrelation mit den Methanemissionen [g h^{-1}] von allen 19 Klassen für die Auswertungsvarianten A. ohne Einzeltiergewichte, B. mit Einzeltiergewichten und C. mit Einzeltiergewichten und mit Flüssigmistparametern

Unabhängige Variable	Rang							
	1	2	3	4	5	6	7	8
Auswertungsvariante A								
T _{Abteil} [°C]	3	5	9	2	0			
T _{Abluft} [°C]	4	8	6	0	1			
RH _{Abteil} [%]	0	0	2	6	11			
RH _{Abluft} [%]	0	2	0	11	6			
V _{Strom} [$\text{m}^3 \text{h}^{-1}$]	12	4	2	0	1			
Auswertungsvariante B								
T _{Abteil} [°C]	1	5	6	5	2	0		
T _{Abluft} [°C]	4	5	5	4	0	1		
RH _{Abteil} [%]	0	0	0	2	8	9		
RH _{Abluft} [%]	0	1	1	3	8	6		
V _{Strom} [$\text{m}^3 \text{h}^{-1}$]	10	4	4	0	0	1		
EG [kg]	4	4	3	5	1	2		
Auswertungsvariante C								
T _{Abteil} [°C]	1	1	3	7	3	4	0	0
T _{Abluft} [°C]	3	2	4	3	5	1	0	1
RH _{Abteil} [%]	0	0	0	0	2	1	9	7
RH _{Abluft} [%]	0	0	1	1	1	4	7	5
V _{Strom} [$\text{m}^3 \text{h}^{-1}$]	8	3	3	2	2	0	0	1
EG [kg]	2	3	2	4	1	4	2	1
T _{FM} [°C]	4	1	2	1	3	3	1	4
pH _{FM}	1	9	4	1	2	2	0	0
T = Temperatur			FM = Flüssigmist			EG = Einzeltiergewichte		
RH = relative Luftfeuchte			V = Volumenstrom					

3.4.4 Korrelationsergebnisse der Flüssigmistvariablen

Aufgrund des geringen Stichprobenumfangs konnten die vier Datensätze der 14-täglichen Flüssigmistparameter nicht wie oben beschrieben in 19 Klassen unterteilt werden. Hier erfolgte die Analyse zum einen im Vergleich zwischen den vier Mastdurchgängen (R_A bis R_D) und zum anderen in der Unterteilung nach Sommer- und Winterdurchgängen (Klasse 3). Daraus ergaben sich je Gas drei Klassen und demzufolge drei Korrelationen. Die Auswertung der Korrelationen erfolgte anhand der Häufigkeitsverteilung der unabhängigen Variablen auf die Ränge eins bis sieben (**Tabelle 20**). Diese zeigte, dass sowohl bei den Ammoniak- als auch bei den Methanemissionen der headspace die bedeutendste Einflussgröße war. An zweiter und dritter Position folgten bei den Ammoniakemissionen der Ammoniumstickstoff und der Gesamtstickstoff (g kg^{-1} FS) und bei den Methanemissionen der pH-Wert und der Ammoniumstickstoff (g kg^{-1} FS). Bezüglich des headspace bedeutete dies, dass in allen Mastdurchgängen und für beide Gase mittlere bis hohe negative (-0,5 bis -1,0) Korrelationsergebnisse ausgewertet wurden. Ein großer headspace korrelierte mit geringen Ammoniak- und Methanemissionen und ein geringer headspace mit hohen Emissionswerten beider Gase.

Tabelle 20: Häufigkeitsverteilung der unabhängigen Variablen in Rang eins bis sieben bei den 14-tägig erhobenen Flüssigmistparametern korreliert mit den Ammoniak- und den Methanemissionen [g h^{-1}], über alle vier Mastdurchgänge sowie für Klasse 3 (Sommer/Winter)

Unabhängige Variable	Ammoniakemissionen [g h^{-1}]						
	Rang						
	1	2	3	4	5	6	7
pH _{FM}	0	0	0	0	1	2	0
T _{FM} [°C]	0	0	0	2	0	0	1
headspace [cm]	2	1	0	0	0	0	0
Gesamt N in FS [g kg^{-1}]	1	0	2	0	0	0	0
NH ₄ -N in FS [g kg^{-1}]	0	2	1	0	0	0	0
Anteil NH ₄ -N an Gesamt N [%]	0	0	0	1	0	0	2
oTS-Gehalt [g kg^{-1}]	0	0	0	0	2	1	0

Unabhängige Variable	Methanemissionen [g h^{-1}]						
	Rang						
	1	2	3	4	5	6	7
pH _{FM}	1	0	0	1	0	1	0
T _{FM} [°C]	0	0	0	1	0	2	0
headspace [cm]	2	1	0	0	0	0	0
Gesamt N in FS [g kg^{-1}]	0	1	1	1	0	0	0
NH ₄ -N in FS [g kg^{-1}]	0	1	2	0	0	0	0
Anteil NH ₄ -N an Gesamt N [%]	0	0	0	0	0	0	3
oTS-Gehalt [g kg^{-1}]	0	0	0	0	3	0	0

headspace = Abstand zwischen der Flüssigmistoberfläche und den Schlitten der Unterflurabsaugung im Flüssigmistkanal

N = Stickstoff
NH₄-N = Ammonium-Stickstoff
T = Temperatur

FS = Frischsubstanz
FM = Flüssigmist
oTS = organische Trockensubstanz

3.4.5 Regressionsergebnisse mit den Umgebungsvariablen

Die Begrenzung der Anzahl der unabhängigen Variablen auf maximal vier je Gruppe begründet sich aus den Ergebnissen von BLANES VIDAL et al. (2008) und YE et al. (2011), welche zeigten, dass auch mit einer Anzahl von mehr als vier unabhängigen Variablen die Werte des angepassten Bestimmtheitsmaßes R^2_{adj} nicht nennenswert gesteigert werden konnten. Darüber hinaus wächst der durch das Regressionsmodell erklärte Anteil an der Gesamtvarianz je hinzugenommener Variable, auch wenn diese voneinander unabhängig sind. Durch die Verwendung von R^2_{adj} konnten verschiedene Regressionsmodelle bzgl. ihrer Anpassung verglichen und somit über eine sinnvolle Aufnahme der Variablen zwei bis vier zum Modell entschieden werden. In den folgenden **Tabellen 21** und **22** wird immer der Wert des Modells mit dem höchsten R^2_{adj} hervorgehoben, welcher mit der geringsten Anzahl an Variablen erreicht wurde.

Die Auswahl der hier vorgestellten Regressionsergebnisse basiert auf den Ergebnissen der Korrelationsanalysen, in welchen sich der Volumenstrom, die Abteilterperatur und der headspace als wesentliche Einflussfaktoren bestätigten. Darauf aufbauend werden zunächst die Regressionsergebnisse der Volumenstrom- und Temperaturklassen und anschließend die Regressionsergebnisse der Flüssigmistparameter für die Ammoniak- und die Methanemissionen für alle drei Auswertungsvarianten (A, B, C) vorgestellt. Die Häufigkeitsverteilungen der Volumenstrom- und der Temperaturklassen über alle vier Mastdurchgänge sind in den Tabellen A7 und A8 dargestellt.

Tabelle 21: Übersicht der Regressionsergebnisse der fünf Volumenstromklassen und der drei Temperaturklassen mit den Ammoniakemissionen [g h^{-1}], die Variablenrangfolge basiert auf der Häufigkeitsverteilung der Korrelationsergebnisse (Tabelle 18)

		Volumenstromklassen [$\text{m}^3 \text{h}^{-1}$]					Temperaturklassen [$^{\circ}\text{C}$]		
		0-2000	2000-2500	2500-3000	3000-3500	3500-4000	-5-10	10-20	20-30+
		n=27	n=117	n=98	n=72	n=59	n=144	n=182	n=47
Rang	AV A	R^2_{adj}	R^2_{adj}	R^2_{adj}	R^2_{adj}	R^2_{adj}	R^2_{adj}	R^2_{adj}	R^2_{adj}
1	$T_{\text{Abteil}} [^{\circ}\text{C}]$	0,19	0,18	0,43	0,30	0,10	0,10	0,07	-0,02
2	$V_{\text{Strom}} [\text{m}^3 \text{h}^{-1}]$	0,17	0,28	0,42	0,29	0,09	0,30	0,40	0,43
3	$T_{\text{Abluft}} [^{\circ}\text{C}]$	0,69	0,30	0,43	0,60	0,32	0,31	0,46	0,58
4	$\text{RH}_{\text{Abluft}} [\%]$	0,75	0,30	0,43	0,67	0,38	0,31	0,46	0,58
Rang	AV B	R^2_{adj}	R^2_{adj}	R^2_{adj}	R^2_{adj}	R^2_{adj}	R^2_{adj}	R^2_{adj}	R^2_{adj}
1	EG [kg]	0,01	0,06	0,27	0,26	0,27	0,07	0,31	0,46
2	$T_{\text{Abteil}} [^{\circ}\text{C}]$	0,28	0,37	0,44	0,29	0,26	0,09	0,31	0,45
3	$V_{\text{Strom}} [\text{m}^3 \text{h}^{-1}]$	0,40	0,44	0,44	0,28	0,27	0,34	0,40	0,47
4	$T_{\text{Abluft}} [^{\circ}\text{C}]$	0,68	0,44	0,46	0,67	0,51	0,39	0,46	0,70
Rang	AV C	R^2_{adj}	R^2_{adj}	R^2_{adj}	R^2_{adj}	R^2_{adj}	R^2_{adj}	R^2_{adj}	R^2_{adj}
1	EG [kg]	0,01	0,06	0,27	0,26	0,27	0,07	0,31	0,46
2	$T_{\text{FM}} [^{\circ}\text{C}]$	0,21	0,11	0,31	0,26	0,26	0,07	0,31	0,54
3	$V_{\text{Strom}} [\text{m}^3 \text{h}^{-1}]$	0,33	0,27	0,33	0,29	0,27	0,31	0,35	0,53
4	$T_{\text{Abteil}} [^{\circ}\text{C}]$	0,40	0,44	0,44	0,30	0,26	0,37	0,39	0,52

n = Stichprobenumfang R^2_{adj} = angepasstes Bestimmtheitsmaß RH = relative Luftfeuchte T = Temperatur
AV = Auswertungsvariante V = Volumenstrom EG = Einzeltiergewichte FM = Flüssigmist

Die Auswertung der Regressionsergebnisse für die Ammoniakemissionen in der Einteilung nach den fünf Volumenstromklassen (Tabelle 21) zeigt, dass das höchste angepasste R^2 (0,75) in Auswertungsvariante A (ohne EG) in der untersten Volumenstromklasse (0 bis $2000 \text{ m}^3 \text{h}^{-1}$) beobachtet wurde. Auch in Auswertungsvariante B konnte mit 68 % der größte Anteil an der Gesamtvarianz innerhalb der untersten Volumenstromklasse erklärt werden. In beiden Auswertungsvarianten (A und B) gab es in der Volumenstromklasse von 3000 bis $3500 \text{ m}^3 \text{h}^{-1}$ noch vergleichbar gute Ergebnisse von 67 % erklärter Varianz. Auswertungsvariante C (mit Flüssigmistparametern) zeigte mit maximal 44 % erklärter Varianz die geringsten Werte auf. Auswertungsvariante C unterschied sich in ihren Ergebnissen somit deutlich von den anderen beiden Auswertungsvarianten.

Bei der Betrachtung der Regressionsergebnisse bei Einteilung in drei Temperaturklassen zeigte sich, dass mit einer erklärten Varianz von 70 % der höchste Wert in der dritten Temperaturklasse (20 bis über 30°C) innerhalb der Auswertungsvariante B erreicht wurde. Mit 56 und 58 % erklärter Varianz konnten sowohl in Auswertungsvariante A und B vergleichbare Ergebnisse beobachtet werden. Der niedrigste Wert für das angepasste R^2 wurde über alle drei Auswertungsvarianten hinweg in der untersten Temperaturklasse (-5 bis 10°C) ermittelt.

Anhand der unterschiedlichen Ergebnisse zwischen den Auswertungsvarianten einer Klasse konnte der Einfluss der einzelnen Variablen genauer verfolgt werden. In Auswertungsvariante A wurde als vierte Variable die relative Luftfeuchte aufgenommen. Im Vergleich zur Auswertungsvariante B, in welcher (anstelle der relativen Luftfeuchte) die Einzeltiergewichte berücksichtigt wurden, hatte im Zusammenhang mit niedrigen Volumenströmen die Luftfeuchte in der Abluft einen größeren Einfluss auf das Emissionsgeschehen von Ammoniak als die Flüssigmistmenge selbst.

Die Regressionsergebnisse der Methanemissionen (Tabelle 22) unterschieden sich im Gesamtbild deutlich von denen der Ammoniakemissionen. Innerhalb der Volumenstromklassen konnte zwar auch in der untersten Klasse (0 bis 2000 m³ h⁻¹) das höchste Ergebnis ermittelt werden, hier aber in der Auswertungsvariante C mit einer erklärten Varianz von 83 %. Es zeigte sich auch, dass die Werte des angepassten R² über alle Klassen und in allen drei Auswertungsvarianten im Durchschnitt höher waren, als beim Ammoniak. Die zweithöchsten Werte konnten, ähnlich wie beim Ammoniak, in der Volumenstromklasse von 3000 bis 3500 m³ h⁻¹ beobachtet werden.

Tabelle 22: Übersicht der Regressionsergebnisse der fünf Volumenstromklassen und der drei Temperaturklassen mit den Methanemissionen [g h⁻¹], die Variablenrangfolge basiert auf der Häufigkeitsverteilung der Korrelationsergebnisse (Tabelle 19)

		Volumenstromklassen [m ³ h ⁻¹]					Temperaturklassen [°C]		
		0-2000	2000-2500	2500-3000	3000-3500	3500-4000	-5-10	10-20	20-30+
		n=27	n=117	n=98	n=72	n=59	n=144	n=182	n=47
Rang	AV A	R²_{adj}	R²_{adj}	R²_{adj}	R²_{adj}	R²_{adj}	R²_{adj}	R²_{adj}	R²_{adj}
1	V _{Strom} [m ³ h ⁻¹]	0,10	0,01	0,19	0,44	0,23	0,45	0,49	0,77
2	T _{Abluft} [°C]	0,27	0,37	0,32	0,50	0,50	0,52	0,49	0,76
3	T _{Abteil} [°C]	0,60	0,49	0,42	0,56	0,49	0,56	0,51	0,77
4	RH _{Abluft} [%]	0,61	0,51	0,57	0,62	0,55	0,61	0,60	0,77
Rang	AV B								
1	V _{Strom} [m ³ h ⁻¹]	0,10	0,01	0,19	0,44	0,23	0,45	0,49	0,77
2	EG [kg]	0,76	0,12	0,25	0,47	0,23	0,49	0,49	0,87
3	T _{Abluft} [°C]	0,76	0,39	0,33	0,51	0,58	0,52	0,53	0,89
4	T _{Abteil} [°C]	0,77	0,57	0,43	0,58	0,59	0,72	0,59	0,89
Rang	AV C								
1	V _{Strom} [m ³ h ⁻¹]	0,10	0,01	0,19	0,44	0,23	0,45	0,49	0,77
2	T _{FM} [°C]	0,53	0,25	0,29	0,54	0,49	0,47	0,52	0,76
3	T _{Abluft} [°C]	0,61	0,37	0,31	0,54	0,53	0,53	0,52	0,76
4	pH _{FM}	0,83	0,39	0,45	0,64	0,65	0,64	0,55	0,75

n = Stichprobenumfang R²_{adj} = angepasstes Bestimmtheitsmaß RH = relative Luftfeuchte T = Temperatur
 AV = Auswertungsvariante V = Volumenstrom EG = Einzeltiergewichte FM = Flüssigmist

Hinsichtlich der Regressionsergebnisse für die Methanemissionen innerhalb der drei Temperaturklassen konnte festgestellt werden, dass der Anteil erklärter Varianz im Vergleich zu den Ammoniakergebnissen über alle Klassen und in allen drei Auswertungsvarianten höher war und die Unterschiede zwischen den Klassen relativ gering ausfielen. Aber ebenso wie beim Ammoniak hatte die dritte Temperaturklasse (20 bis über 30° C) mit einem Anteil an erklärter Varianz von 75 bis 89 % die höchsten Ergebnisse. In den Auswertungsvarianten A und B konnten allein durch die Variable Volumenstrom 75 und 77 % der Gesamtvarianz erklärt werden. Der Einfluss der Flüssigmistparameter war beim Methan über alle Klassen deutlich höher als beim Ammoniak, dabei ist zu beachten, dass bei Methan aufgrund der Korrelationsergebnisse beide Variablen (pH-Wert und Temperatur) in das Regressionsmodell aufgenommen, bei Ammoniak nur die Flüssigmisttemperatur.

Die Regressionsergebnisse der Umgebungsvariablen zeigten, im Detail analysiert und dargestellt durch die Ergebnisse der Volumenstrom- und Temperaturklassen, dass für beide Gase die eindeutigsten und höchsten Regressionsergebnisse in der untersten Volumenstromklasse und in der wärmsten Temperaturklasse ermittelt wurden. Das Emissionsgeschehen von Ammoniak und Methan ist eng an die Höhe der Temperatur und die Höhe des Volumenstroms gebunden. Bei der Betrachtung der beschreibenden Statistik für diese beiden Klassen zeigte sich aber ein wesentlicher Unterschied zwischen den beiden Gasen. Beim Ammoniak traten hohe Emissionen von 69,1 bzw.

58,3 g Tag⁻¹ und GV⁻¹ sowohl im Zusammenspiel von geringen Volumenströmen ($\bar{x} = 1839 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$) und geringen Zulufttemperaturen ($\bar{x} = 6,8^\circ\text{C}$) als auch bei hohen Volumenströmen ($\bar{x} = 3386 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$) und hohen Zulufttemperaturen ($\bar{x} = 22,2^\circ\text{C}$) auf.

Das Emissionsgeschehen von Methan blieb in beiden Klassen bis zu Zulufttemperaturen von 15,1 und 17,6° C relativ konstant. In der letzten Temperatur- und Volumenstromklasse, also im Zusammenhang mit Temperaturen von über 20° C und damit verbundenen hohen Volumenströmen stiegen die Methanemissionen von zuvor 27,8 sprunghaft auf 52,2 g Tag⁻¹ und GV⁻¹ an. Dieser deutliche Anstieg der Methanemissionen ab Temperaturen von 20° C wurde ebenso von MASSÉ et al. (2008) und WANG et al. (2016) beobachtet.

3.4.6 Regressionsergebnisse mit den Flüssigmistvariablen

Die Auswertung der 14-täglich erhobenen Flüssigmistparameter innerhalb der Regressionsanalysen (**Tabelle 23**) zeigte den deutlichen Einfluss des headspace am Emissionsgeschehen sowohl für Ammoniak (42 bis 94 % erklärter Varianz) als auch Methan (61 bis 78 % erklärter Varianz). Mit den weiteren Variablen Gesamtstickstoff- und Ammoniumstickstoffgehalt g kg⁻¹ in der Frischsubstanz und dem pH-Wert sowie der Temperatur des Flüssigmists konnten 60 bis 99 % der Gesamtvarianz erklärt werden. Die in dieser Klasse ermittelten angepassten R² sind aufgrund des geringeren Stichprobenumfangs höher als in den anderen Klassen und sollten daher eher als Tendenzen eingestuft werden.

Tabelle 23: Übersicht der Regressionsergebnisse der Flüssigmistparameter über alle vier Mastdurchgänge (R_A, R_B, R_C, R_D) für die Ammoniak- und Methanemissionen [g h⁻¹], die Variablenrangfolge basiert auf der Häufigkeitsverteilung der Korrelationsergebnisse (Tabelle 20)

Rang	Einflussfaktor	Ammoniakemissionen				Methanemissionen			
		R _A	R _B	R _D	R _D	R _A	R _B	R _D	R _D
		R ² _{adj} n = 6	R ² _{adj} n = 8	R ² _{adj} n = 7	R ² _{adj} n = 8	R ² _{adj} n = 6	R ² _{adj} n = 8	R ² _{adj} n = 7	R ² _{adj} n = 8
1	headspace [cm]	0,42	-0,07	0,94	0,59	0,04	0,63	0,78	0,61
2	NH ₄ -N in FS [g kg ⁻¹]	0,25	0,38	0,95	0,82	-0,10	0,77	0,72	0,64
3	Gesamt N in FS [g kg ⁻¹]	0,28	0,43	0,94	0,83	-0,50	0,75	0,86	0,84
4	T _{FM} [°C] ¹ / pH _{FM} ²	0,71	0,60	0,90	0,84	-0,73	0,90	0,99	0,81

n = Stichprobenumfang

R²_{adj} = angepasstes Bestimmtheitsmaß

headspace = Abstand zwischen der Flüssigmistoberfläche und den Schlitzen der Unterflurabsaugung im Flüssigmistkanal

N = Stickstoff

NH₄-N = Ammonium-Stickstoff

T = Temperatur

FM = Flüssigmist

FS = Frischsubstanz

Insgesamt konnten anhand der Korrelations- und Regressionsergebnisse die in der Einleitung aufgeführten Einflussfaktoren bestätigt werden. Bezogen auf die Umgebungsvariablen haben die vorhandene Substratmenge (erfasst durch den Hilfsparameter Einzeltiergewichte), die Temperatur (Abteil und Abluft) und der Volumenstrom bedeutenden Einfluss auf das Emissionsgeschehen von Ammoniak und Methan. Im Zusammenhang mit dem Volumenstrom gebührt dem headspace, als Einflussgröße aus den Flüssigmistvariablen, besondere Aufmerksamkeit. Der headspace beschreibt den Abstand der Flüssigmistoberfläche zur Unterseite des Spaltenbodens bzw. bis zu den Schlitzen der Unterflurabsaugung (je nach Lüftungssystem) und damit den Abstand der Flüssigmistoberfläche zum geführten Luftvolumenstrom. Nach YE et al. (2009) beeinflusst die Höhe des headspace den

Luftaustausch im Flüssigmistkanal. Anhand von Grafiken zeigten YE et al. (2009), dass sich die geführten Luftmassen im Labormodell in unterschiedlichem Ausmaß über dem Flüssigmist verteilten. Bei einem geringen Abstand zwischen der Flüssigmistoberfläche und dem Spaltenboden verteilten sich die Luftmassen unterflur flach und weit, bis an die äußeren Begrenzungen des Labormodells. Erhöhte sich der Abstand zwischen Flüssigmist und Spaltenboden, drangen die Luftmassen tiefer in den Raum unterflur ein, breiteten sich aber nicht so weit aus. Des Weiteren stellten Untersuchungen den direkten Zusammenhang zwischen der Freisetzung von Ammoniak aus der flüssigen Phase und der Luftgeschwindigkeit (HARTUNG, E. 1995 und YE et al. 2008) sowie den Luftturbulenzen über der Flüssigmistoberfläche (YE et al. 2008) dar. Die höchsten Luftturbulenzen traten bei geringen Luftgeschwindigkeiten von $0,1$ bis $0,3 \text{ m s}^{-1}$ auf und nahmen mit steigenden Geschwindigkeiten (bis $0,8 \text{ m s}^{-1}$) sukzessive ab. Die Höhe des headspace und der Volumenstrom stehen demzufolge in engem Zusammenhang mit der Verteilung und dem physikalischen Verhalten (Turbulenzen) der Luftmassen unterhalb des Spaltenbodens und auf diese Weise in direktem Zusammenhang mit der Freisetzung von Ammoniak und Methan aus dem Flüssigmist.

Über alle gebildeten Klassen hinweg konnte in den Regressionsanalysen für Ammoniak und Methan festgestellt werden, dass die Variablenauswahl der Auswertungsvariante B zu den höchsten Werten beim angepassten R^2 führte. Aber in den Sommerdurchgängen bzw. in Klassifizierungen mit hohen Zulufttemperaturen nahm der Einfluss der Flüssigmistvariablen (Auswertungsvariante C) zu. Das heißt, dass dann in beiden Auswertungsvarianten (B und C) ähnliche Werte beim angepassten R^2 erreicht wurden. Dieser direkte Zusammenhang zwischen den steigenden Außentemperaturen und dem Einfluss der Flüssigmisttemperatur und des pH-Werts des Flüssigmists könnte an der besonderen Bauweise des Versuchsstalls liegen. Der Flüssigmistkanal wurde nicht wie in der Praxis üblich in das Erdreich eingelassen, sondern aufgrund baulicher Bedingungen auf eine Bodenplatte gesetzt. Demzufolge fehlte an warmen Tagen die kühlende Wirkung des Erdreichs.

3.4.7 Ergebnisse der reduzierten Datensätze

Die Auswertung der vier reduzierten Datensätze (R_A - R_D reduziert; Tabellen 12 und 14) erfolgte, wie bei den Flüssigmistparametern, zum einen über alle Mastdurchgänge hinweg und zum anderen in der Klasse 3 (Sommer/Winter). Die Wahl jeden 5. Tagesmittelwert des jeweiligen kompletten Datensatzes zu verwenden wurde aufgrund der Ergebnisse aus der Zeitreihenanalyse getroffen. Diese zeigten, dass nach fünf Tagen im überwiegenden Teil der Datensätze (bis auf die Daten der Einzeltiergewichte und des headspace) keine Autokorrelation mehr zwischen den Tagen eins und fünf vorlagen. Ein größerer Abstand, z. B. die Wahl nur jeden 10. Tagesmittelwert in die Auswertungen einzubeziehen, was bedeutet hätte, mit nur neun bis zehn Tagesmittelwerten zu arbeiten, erschien in Anbetracht der Gesamtgröße der Datensätze von 85 bis 97 Tagesmittelwerten, als zu groß. Eine diesbezügliche Auswertung wäre aber sicher interessant. Die Regressionsergebnisse der reduzierten Datensätze zeigten, dass, ähnlich wie in den Auswertungen von DEKOCK et al. (2009), auch mit einer reduzierten Datenmenge je Datensatz vergleichbare Ergebnisse erzielt werden, sowie gleiche Tendenzen erkennbar sind und somit vergleichbare Aussagen getroffen werden können (Tabellen A9 und A10).

**4 MODELLIERUNG VON AMMONIAKKONZENTRATIONEN UND -EMISSIONEN IM
MASTSCHWEINESTALL MIT ANGEWANDTEN EMISSIONSMINDERUNGSSTRATEGIEN**

Anknüpfend an die Erhebung der Emissionsdaten und den statistischen Auswertungen wurde im dritten Arbeitspaket untersucht, welchen Beitrag die Stoffflussmodellierung der Ammoniakemissionen für den Erkenntnisgewinn hinsichtlich des Emissionsgeschehens und Minderungsmaßnahmen im Mastschweinestall leisten kann. Dafür wurden ausgewählte Messdaten in ein Stoffflussmodell überführt.

Dieses Kapitel beschreibt die Vorgehensweise zur Anpassung, Kalibrierung und Validierung eines Stoffflussmodells, welches die Ammoniakkonzentrationsänderungen innerhalb eines zwangsbelüfteten Mastschweinestalls über die Zeit berechnet und die Ergebnisse von modellierten Emissionsminderungsstrategien abbildet. Anhand von zwei bereits in einem Versuch durchgeführten Emissionsminderungsmaßnahmen (Kapitel 2, GRONOW-SCHUBERT & GALLMANN 2014) werden die Modellierungsergebnisse den erhobenen Daten gegenüber gestellt.

Die folgenden Ausführungen basieren im Wesentlichen auf den Untersuchungen und Darstellungen in der Masterarbeit SCHLAMEUß (2014), die im Sinne der Zielsetzung als Projektteil erarbeitet, betreut und angeleitet wurde.

4.1 Datenbasis und Modellaufbau

Die Daten für die Kalibrierung und Validierung des Modells stammen aus den Untersuchungen von GRONOW-SCHUBERT & GALLMANN (2014) sowie aus der unter Kapitel 2 und 3 beschriebenen Datenerhebung. Die für das Modell relevanten Eingangsparameter wurden auf der Ebene von Tagesmittelwerten bereitgestellt und Datenlücken mittels Interpolation (durch Bildung von Mittelwerten) geschlossen (**Tabelle 24**).

Tabelle 24: Übersicht der Kalibrierungs- und Validierungszeiträume und der zur Verfügung stehenden Anzahl an Tagesmittelwerten sowie die in die Modellierungen eingeflossenen Inputparameter

	Messzeitraum	Anzahl an Tagesmittelwerten je Parameter
Kalibrierung	15.09.2013 - 12.11.2013	59
Validierung	16.01.2014 - 21.04.2014	96

	Inputparameter aus den eigenen Datensätzen	Einheit
1	NH ₃ -Zuluftkonzentration	[ppm]
2	NH ₃ -Abluftkonzentration	[ppm]
3	NH ₃ -Abteilkonzentration	[ppm]
4	Abteitemperatur	[°C]
5	Flüssigmistpegel	[cm]
6	pH-Wert des Flüssigmists	[]
7	Temperatur des Flüssigmists	[°C]
8	TAN (NH ₄ -N)	[g/kg]
9	Luftvolumenstrom	[m ³ /d]

Für die numerische Integration der Differentialgleichungssysteme wurde die Software Berkeley Madonna 8.3.18 verwendet (MACEY UND OSTER 2001). Als Basismodell diente das Ammonia Concentration and Emission Simulation (ACES)-Modell von CORTUS et al. (2010a). Hierbei handelt es sich um ein dynamisches Modell zur Beschreibung der Ammoniakkonzentrationsänderungen zwischen dem Abteil und dem Flüssigmistkanal (headspace). Aufgrund unterschiedlicher Versuchsbedingungen zwischen den Untersuchungen von CORTUS et al. (2010a) und den eigenen, musste das ACES-Modell in drei Schritten angepasst werden. Schritt eins beinhaltete das Entfernen des Untermodells der Urinpfüten aus dem Basismodell aufgrund der fehlenden Datenbasis. Im zweiten Schritt erfolgte die Anpassung der Flussgleichung auf die im Versuchsstall vorhandene Unterflurabsaugung, welche ursprünglich auf eine Oberflurabsaugung ausgelegt war. Schritt drei enthielt die Verlängerung des Modellierungszeitraums von zuvor Stunden bei CORTUS et al. (2010a) auf Tage im eigenen Modell.

Als Systemgrenze galten die baulichen Abgrenzungen des Versuchsstalls beginnend im Vorraum zum Abteil, in welchen die Zuluft angesaugt wurde und dann über die Zuluftöffnungen in das Abteil gelangte bis hin zum Abluftkamin (Abbildung 14).

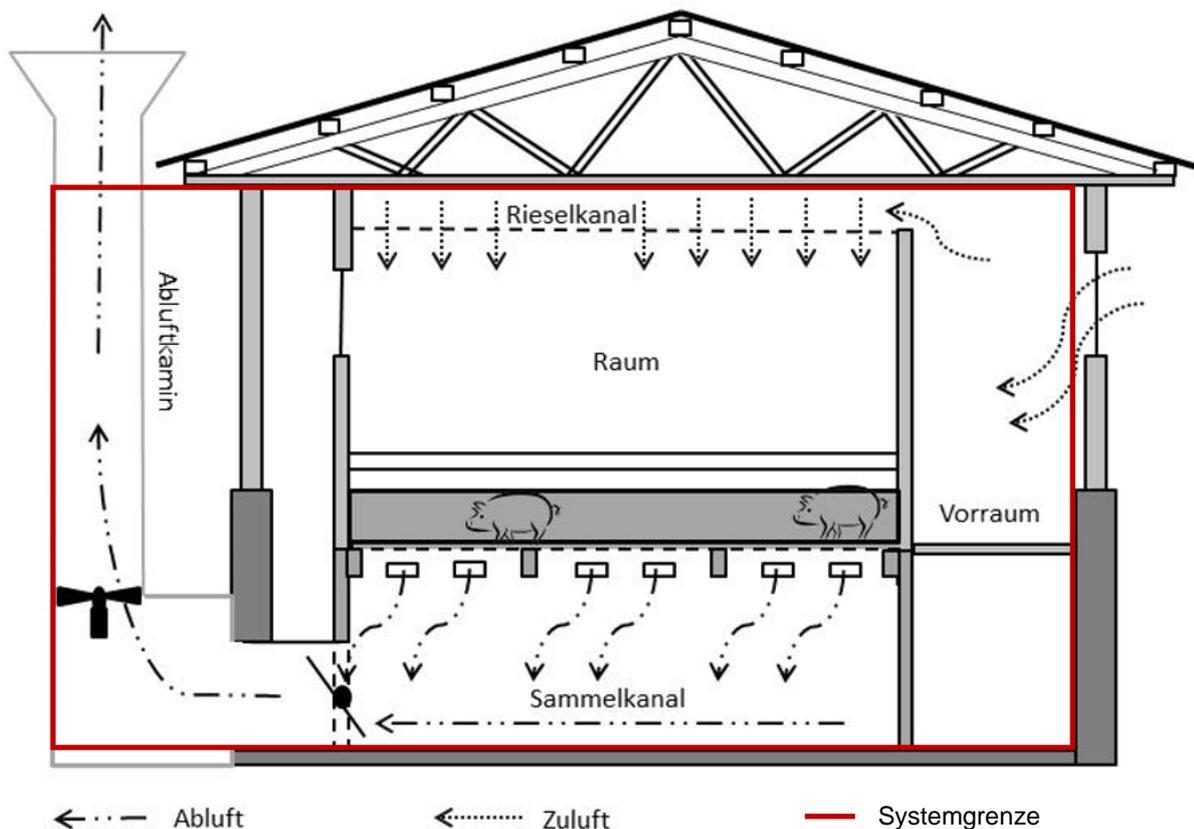
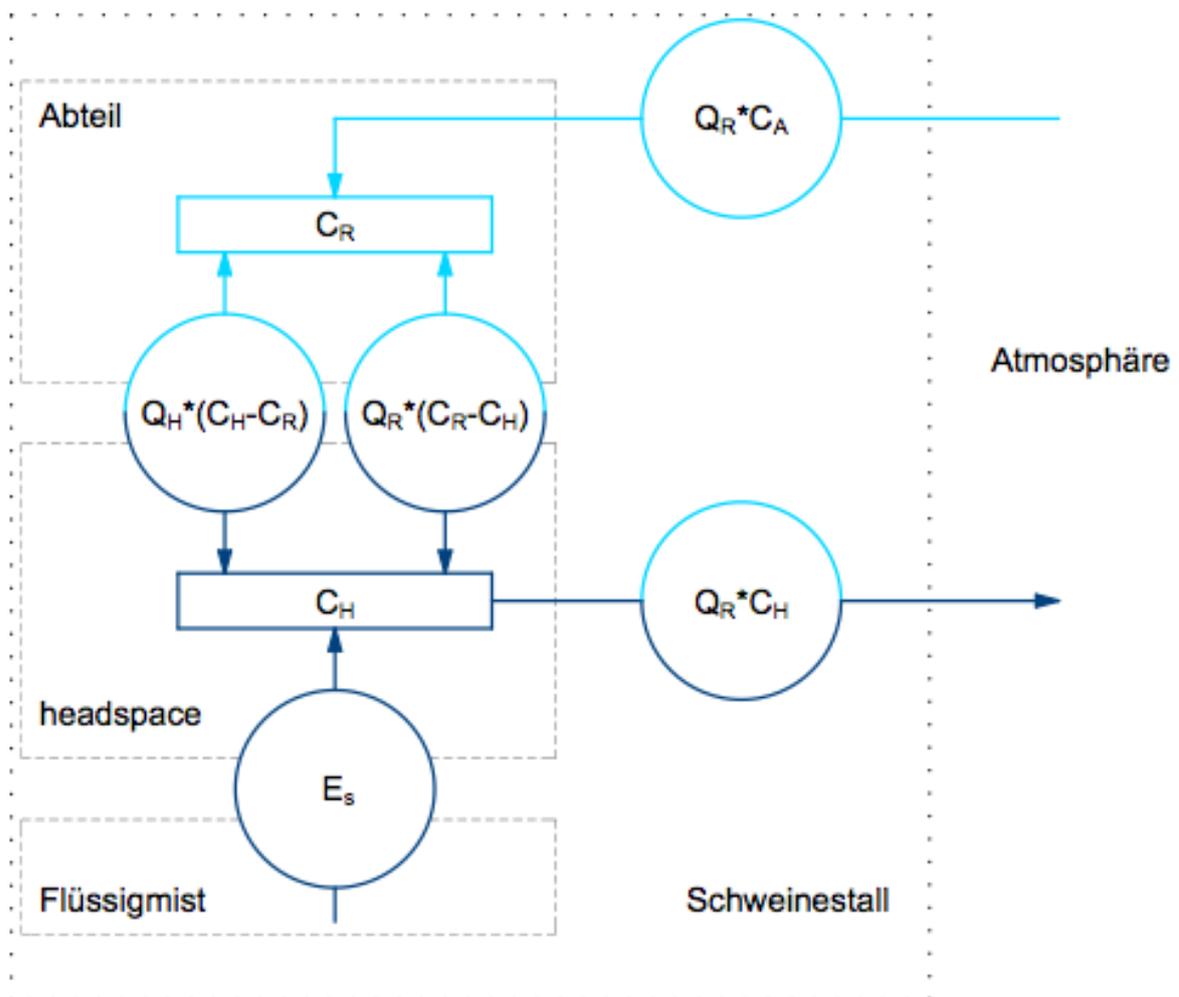


Abbildung 14: Schematische Darstellung der Luftführung im Versuchsstall (eigene Darstellung nach GALLMANN 2003)

Die Ammoniakflüsse innerhalb des Modells sind in **Abbildung 15** dargestellt. Die gepunktete Linie stellt die Systemgrenze dar, welche der Außenhülle des Versuchsstalls entspricht. Innerhalb dieser Systemgrenze befinden sich drei Bereiche, welche anhand gestrichelter Linien abgegrenzt wurden a) der Flüssigmist, b) der headspace sowie c) das Abteil. Zwischen diesen drei Bereichen fand der Ammoniak Austausch statt. Der Ammoniakfluss aus dem Flüssigmist E_s speiste das Kompartiment der Ammoniakkonzentrationen im headspace C_H (durchgezogene dunkelblaue Linie). Das Ammoniakkompartiment im headspace (C_H) wurde ebenfalls durch die geführte Bewegung der Luft aus dem Ammoniakkompartiment C_R im Abteil (durchgezogene hellblaue Linie) mit Ammoniak angereichert. Zwischen beiden Ammoniakkompartimenten bestand ein gegenseitiger Austausch von Ammoniakkonzentrationen ($Q_H \cdot (C_H - C_R)$ bzw. $Q_R \cdot (C_R - C_H)$). Über die einströmende Zuluft ($Q_R \cdot C_A$) erfolgte ebenso eine Beeinflussung der Ammoniakkonzentration des Kompartiments im Abteil C_R . Vom Ammoniakkompartiment im headspace C_H gelangte die mit Ammoniak angereicherte Abluft ($Q_R \cdot C_H$) hinaus in die Umgebung.



C_A = Ammoniakkonzentration in der Zuluft [mol l^{-1}], C_R = Ammoniakkonzentration im Abteil [mol l^{-1}],
 Q_R = Luftaustauschrate im Abteil [$\text{m}^3 \text{d}^{-1}$], C_H = Ammoniakkonzentration im headspace [mol l^{-1}],
 Q_H = Luftaustauschrate im headspace [$\text{m}^3 \text{d}^{-1}$], E_s = Emissionen aus dem Flüssigmist [mol d^{-1}]

Abbildung 15: Flussdiagramm der Ammoniakstoffflüsse innerhalb des Modells (eigene Darstellung nach CORTUS et al. 2010a)

Die in Abbildung 15 dargestellten Ammoniakstoffflüsse visualisieren gleichzeitig auch die beiden Hauptgleichungen des Modells, welche das Anreichern und das Entleeren der Ammoniakkompartimente C_R und C_H mit Ammoniak beschreiben (**Tabelle 25**). Die Differentialgleichung, welche die Ammoniakkonzentrationsänderung im Abteil (dC_R/dt) mathematisch löst (Gleichung 1), wurde um den Anteil reduziert, der die Emissionen aus den Urinpfützen beschrieben hätte. Innerhalb der mathematischen Berechnung der Ammoniakkonzentrationsänderung im headspace (dC_H/dt) erfolgte die Anpassung auf die Unterflurabsaugung der Abluft (Gleichung 2). Zusätzlich wurde in Gleichung 2 der Term $-(V_H - V_{H1}) / (V_H * C_H)$ eingefügt. Dieser passt die Ammoniakkonzentrationsänderung im headspace aufgrund des veränderten Luftvolumens durch den ansteigenden Flüssigmistpegel über die Zeit an.

Tabelle 25: Differentialgleichungen des Modells (eigene Formeln abgeleitet aus CORTUS et al. 2010a)

Reservoir	Gleichung	Differentialgleichung
C_R NH ₃ -Konzentration im Abteil [mol l ⁻¹ d ⁻¹]	1	$\frac{dC_R}{dt} = \frac{(Q_R * 1000 * (C_A - C_R))}{(1000 * V_{Room})} + \frac{(Q_H * 1000 * (C_H - C_R))}{(1000 * V_{Room})}$
C_H NH ₃ -Konzentration im headspace [mol l ⁻¹ d ⁻¹]	2	$\frac{dC_H}{dt} = - \frac{(Q_H * 1000 * (C_H - C_R))}{(1000 * V_H)} + \frac{E_S}{(1000 * V_H)} + \frac{(Q_R * 1000 * (C_R - C_H))}{(1000 * V_H)} - \frac{(V_H - V_{H1})}{(V_H * C_H)}$

NH₃ = Ammoniak, C_R = Ammoniakkonzentration des Abteils [mol l⁻¹], Q_R = Luftvolumenstrom des Abteils [m³ d⁻¹], C_A = Ammoniakkonzentration der Außenluft [mol l⁻¹], V_{Room} = Volumen des Abteils [m³], Q_H = Luftvolumenstrom des headspace [m³ d⁻¹], C_H = Ammoniakkonzentration im headspace [mol l⁻¹], E_S = Emissionen aus dem Flüssigmist [mol s⁻¹], V_H = Volumen im headspace [m³], V_{H1} = Volumen im headspace im vorherigem Zeitschritt [m³]

Der für die Modellierung der Ammoniakkonzentrationen relevante Bereich war der headspace, da von hieraus das Ammoniak über die Abluft als Emissionen an die Außenluft gelangt. Um die Ammoniakkonzentrationsänderungen im headspace modellieren zu können, mussten sowohl die Ammoniakkonzentrationsänderungen im Abteil (C_R) als auch die Emissionen aus dem Flüssigmist (E_S) berechnet werden. Für die Berechnungen der Emissionen aus dem Flüssigmist wurde ein Untermodell aufgebaut. In **Tabelle 26** sind das Untermodell sowie weitere statische und dynamische Parameter aufgeführt.

In **Tabelle 27** sind die verwendeten Bestandteile aus den Formeln, deren Definition, der in der Formel hinterlegte Wert mit der dazugehörigen Einheit und die Quelle der Werte zusammenfassend aufgeführt. Wurden die Werte „angepasst“ bedeutete dies, dass hierfür eine vorherige Berechnung der Werte notwendig war. Stamten die Werte „aus Daten“ konnten sie direkt aus den Datensätzen übernommen werden. Bei zwei Eingabewerten wurden Angaben aus der Literatur verwendet (Diffusionskoeffizient von Ammoniak in Luft und NH₄-N des Flüssigmists).

Tabelle 26: Parameter und Definitionen der verwendeten Funktionen sowie die verwendeten Einheiten für das aufgebaute Modell (eigene Darstellung verändert nach CORTUS et al. 2010a)

Parameter	Definition	Einheit
Untermmodell der Emissionen aus dem Flüssigmist		
$T_{film} = \frac{T_H + T_S}{2}$	Durchschnittstemperatur des Flüssigmists und der umgebenden Luft	[K]
$k_{NH3,S} = 0.0821 * T_{film}^{0.7} * v_H^{0.5} * L_{slat}^{-0.5} * D_{NH3,Air}^{0.666}$	konvektiver Massentransfer von Ammoniak von der Flüssigmistoberfläche in die umgebende Luft	[m/s]
$f_s = \frac{10^{pH_S}}{10^{pH_S} + \frac{1}{Z * 10^{-(0.0897 + \frac{2729}{T_S})}}}$	Fraktion von TAN in Ammoniakform im Flüssigmist	[]
$H_S = 1431 * 1.053^{293 - T_S}$	Temperaturabhängige Henry-Konstante	[]
$E_S = N_{Pen} * k_{NH3,S} * A_{slat} * 1000 * \left(\frac{f_s * TAN_S}{H_S} - C_H \right) * 3600 * 24$	Emissionen aus dem Flüssigmist	[mol/d]
Eingabewerte und Annahmen: statische Variablen		
$A_{slat} = L_{slat} * W_{pen}$	Spaltenbodenfläche pro Bucht	[m ²]
$V_{Room} = N_{Pen} * ((W_{Pen} + 0.4) * L_{Pen} * H_{Pen})$	Abteilvervolumen	[m ³]
Eingabewerte und Annahmen: dynamische Variablen		
$V_H = N_{Pen} * L_{slat} * W_{pen} * (d_{pit} - (d_s/100))$	Volumen des headspace	[m ³]
$V_{H1} = N_{Pen} * L_{slat} * W_{pen} * (d_{pit} - (d_{s1}/100))$	Volumen des headspace einen Zeitschritt früher	[m ³]
$v_H = \frac{2.3 * (\frac{Q_R}{3600 * 24})}{(N_{Pen} * L_{Pen} * (W_{Pen} + 0.4))} + 0.02$	Windgeschwindigkeit über der Flüssigmistoberfläche	[m/s]
$Q_H = x_8 + x_7 * Q_R$	Luftvolumenstrom im headspace	[m ³ /d]

Q_R = Luftvolumenstrom des Abteils [m³ s⁻¹], V_{Room} = Volumen des Abteils [m³], Q_H = Luftvolumenstrom des headspace [m³ d⁻¹], C_H = Ammoniakkonzentration des headspace [mol l⁻¹], E_S = Emissionen aus dem Flüssigmist [mol d⁻¹], N_{Pen} = Anzahl Buchten, $k_{NH3,S}$ = konvektiver Massentransferkoeffizient für Ammoniak aus dem Flüssigmist [m s⁻¹], A_{slat} = Fläche des Spaltenbodens [m²], f_s = Fraktion von TAN in Ammoniakform des Flüssigmists, TAN_S = Total Ammonia Nitrogen im Flüssigmist [mol l⁻¹], H_S = Henry Konstante des Flüssigmists, T_{film} = Durchschnittstemperatur des Flüssigmists und der umgebenden Luft [K], T_H = Temperatur des headspace [K], T_S = Temperatur des Flüssigmists [K], v_H = Windgeschwindigkeit über der Flüssigmistoberfläche [m s⁻¹], L_{slat} = Länge des Spaltenbodens [m], $D_{NH3,Air}$ = Diffusionskoeffizient von Ammoniak in Luft [m² s⁻¹], pH_S = pH des Flüssigmists, Z = Säuredissoziationsfaktor für Ammoniak, W_{Pen} = Breite der Bucht [m], L_{Pen} = Länge der Bucht [m], H_{Pen} = Höhe der Bucht [m], V_H = Volumen des headspace [m³], d_{pit} = Tiefe des Flüssigmistkanals [m], d_s = Höhe des Flüssigmistpegels [cm], V_{H1} = Volumen des headspace im vorherigen Zeitschritt [m³], d_{s1} = Höhe des Flüssigmistpegels im vorherigen Zeitschritt [cm], x_8 = Konstante zur Berechnung des Luftvolumenstroms im headspace, x_7 = Konstante zur Berechnung des Luftvolumenstroms im headspace

Tabelle 27: Übersicht der in den Formeln hinterlegten Werte, mit deren Symbolik, Definition, Einheit sowie die Quelle der Werte

Symbol	Definition	Wert bzw. Wertebereich	Einheit	Quelle
T_R	Abteilterperatur	$T_{R_Celsius} + 273,13$	[K]	angepasst
$T_{R_Celsius}$	Eingelesene Messwerte der Abteilterperatur	15,47 - 22,34 (18,55)	[°C]	aus Daten
T_S	Flüssigmisttemperatur	$T_{S_Celsius} + 273,13$	[K]	angepasst
$T_{S_Celsius}$	Eingelesene Messwerte der Flüssigmisttemperatur	13,9 - 19,2 (16,9)	[°C]	aus Daten
T_H	Temperatur im headspace	$T_H = T_R$	[K]	per Annahme
L_{Pen}	Länge der Bucht	7,8	[m]	aus Daten
W_{Pen}	Breite der Bucht	3,3	[m]	aus Daten
L_{Stat}	Länge des Spaltenbodens	7,8	[m]	aus Daten
N_{Pen}	Anzahl der Buchten	2	[]	aus Daten
H_{Pen}	Höhe der Bucht	3	[m]	aus Daten
Z	Säuredissoziationsfaktor	1,08979	[]	angepasst
$D_{NH3,Air}$	Diffusionskoeffizient von Ammoniak in Luft	$0,28 \cdot 10^{-4}$	[m ² /s]	CORTUS et. al (2010a)
p	Stallluftdruck	100000	[Pa]	aus Daten
x_7	Konstante zur Berechnung des Luftvolumenstroms im headspace	-0,579463	[]	angepasst
x_8	Konstante zur Berechnung des Luftvolumenstroms im headspace	2379,27	[]	angepasst
TAN_S	NH ₄ -N des Flüssigmists (TAN = total amoniactal-N)	$(TAN_{S_gprokg} * 1.015) / 14$	[mol/l]	LEICK (2003)
TAN_{S_gprokg}	Eingelesene Messwerte des NH ₄ - N des Flüssigmists	2,85 - 3,8 (3,5)	[g/kg]	aus Daten
d_{pit}	Tiefe der Flüssigmistmistkanals	1,2	[m]	aus Daten
d_S	Eingelesene Messwerte der Höhe des Flüssigmistpegels	23,3 - 50,5 (37,16))	[cm]	aus Daten
d_{S1}	Eingelesene Messwerte der Höhe des Flüssigmistpegels einen Zeitschritt früher	23,3 - 50,5 (37,16)	[cm]	aus Daten
pH_S	Eingelesene Messwerte des pH- Werts des Flüssigmists	7,4 - 7,6 (7,5)	[]	aus Daten
C_A	Ammoniakkonzentration der Zuluft	$NH3_E * 100 / 8.314 / 293 * 10^{-6}$	[mol/l]	angepasst
$NH3_E$	Eingelesene Messwerte der Zuluft- Ammoniakkonzentration	0,88 - 1,52 (1,17)	[ppm]	aus Daten
Q_R	Eingelesene Messwerte des Luftvolumenstroms des Abteils	2466 – 4436 (3551)	[m ³ /d]	aus Daten

4.2 Kalibrierung und Validierung des Modells

Die Kalibrierung des Modells erfolgte anhand der Datenbasis von 59 Tageswerten aus dem Zeitraum vom 15.09.2013 bis 12.11.2013 und die Validierung anhand von 96 Tageswerten aus dem Zeitraum 16.01.2014 bis 21.04.2014 (Tabelle 22). Die Kalibrierung des Modells wurde durch die Anpassung der Parameter x_7 , x_8 und Z vorgenommen. Zunächst wurde sowohl für die Kalibrierung als auch für die Validierung die Modellierung separat für die headspace-Konzentrationen sowie für die Abteilkonzentrationen durchgeführt. Im zweiten Auswertungsschritt wurden die headspace- und die Abteilkonzentrationen zusammen modelliert (**Abbildung 16**).

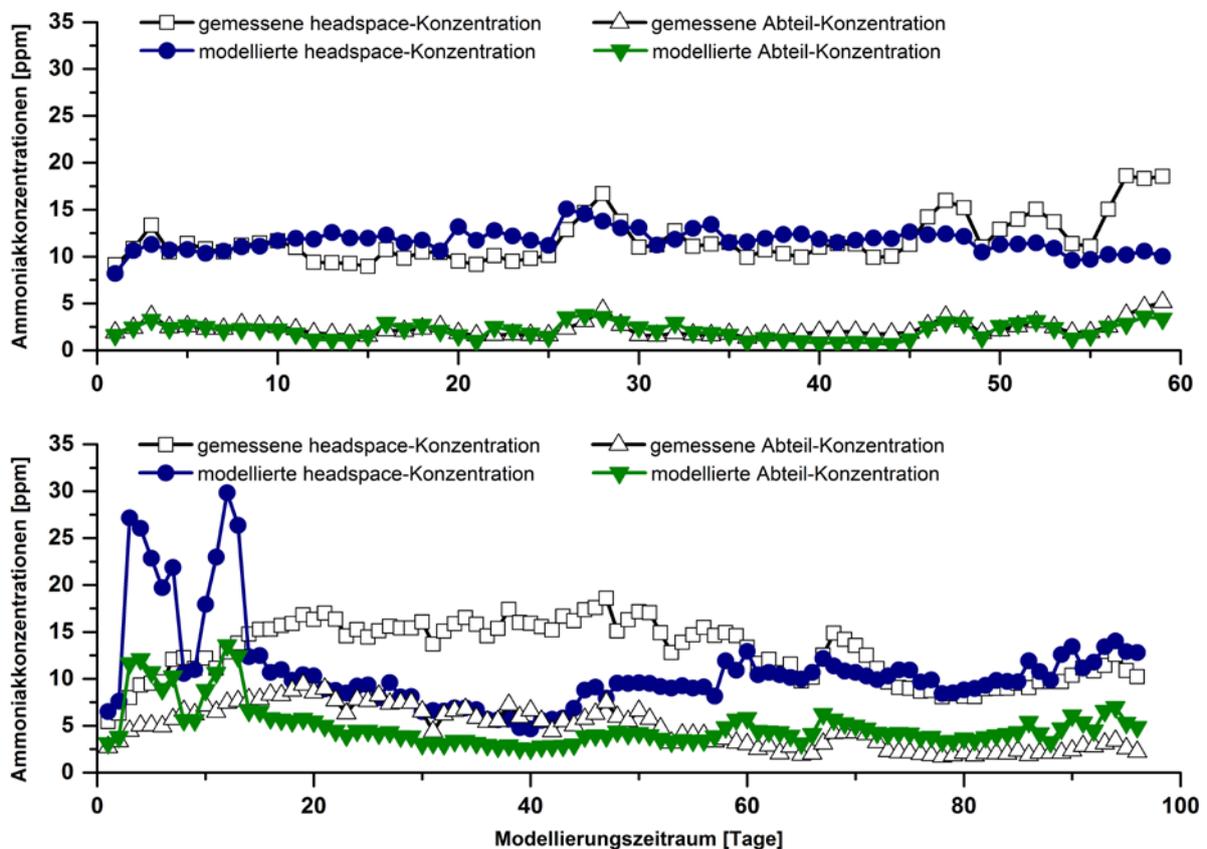


Abbildung 16: Ergebnisse der Kalibrierung (oben) und Validierung (unten) der gemessenen und modellierten Ammoniakkonzentrationen im Abteil und im headspace

Die Ergebnisse zur Modellgüte beider Auswertungsschritte sind in **Tabelle 28** zusammengefasst dargestellt. Die Modellgüte wurde mit den Parametern Modelleffizienz, Wurzel des mittleren quadratischen Fehlers (RSME - Root Mean Square Error) und dem Bias ermittelt.

Tabelle 28: Modellierungsergebnisse der Kalibrierung und der Validierung - Vergleich der Modelleffizienz, der Wurzel des mittleren quadratischen Fehlers (RMSE) und des Bias für die Ammoniakkonzentrationen im headspace, im Abteil und in der Kombination beider Bereiche

	headspace Kalibrierung	Abteil Kalibrierung	headspace + Abteil Kalibrierung	headspace Validierung	Abteil Validierung	headspace + Abteil Validierung
Modelleffizienz¹	-0,25	0,33	0,85	-3,89	-0,62	-0,12
RMSE²	2,68	0,63	1,95	6,78	2,80	5,19
Bias³	-0,12	-0,21	-0,17	-2,12	0,14	-0,99

headspace = Abstand zwischen der Flüssigmistoberfläche und den Schlitzen der Unterflurabsaugung im Flüssigmistkanal [cm]

$$^1 \text{ Modelleffizienz} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^N (O_i - \bar{O})^2} \text{ (NASH \& SUTCLIFFE 1970).}$$

$$^2 \text{ RMSE} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^N (P_i - O_i)^2}.$$

$$^3 \text{ Bias} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^N (P_i - O_i) \text{ (INGWERSEN et al. 2010).}$$

Bei der Betrachtung der Ergebnisse aus der Kalibration des Modells spiegelten die modellierten Ergebnisse des Abteils, im Vergleich zu den Ergebnissen des headspace, die real gemessenen Werte am besten wieder. Die Modelleffizienz lag hier bei 0,33, d.h. dass 33 % der beobachteten Varianz wurde durch das Modell erklärt. Die Wurzel des mittleren quadratischen Fehlers (RMSE) gibt Auskunft über den mittleren Fehler, der in diesem Fall bei $\pm 0,63$ ppm lag. Der Bias, welcher ein Maß für das systematische Unter- oder Überschätzen der Messwerte ist, zeigte, dass die modellierten Werte die real gemessenen Werte um durchschnittlich 0,21 ppm unterschätzten (-0,21). Die Kalibrierung des headspace lieferte keine zufriedenstellenden Ergebnisse. Die Modelleffizienz betrug hier -0,25. Da dieser Wert im negativen Zahlenbereich lag, deutete dies darauf hin, dass das Ergebnis ungenauer war, als der Mittelwert der gemessenen Daten. Auch die Dynamik der Beobachtungen konnte im Modell nicht wiedergegeben werden. Der RMSE betrug 2,68 und der Bias -0,12. In der kombinierten Betrachtung der Kalibrierung, in welcher die headspace- und die Abteilkonzentrationen zusammen modelliert wurden, zeigte eine Modelleffizienz von 0,85. Es konnten somit 85 % der gemessenen Varianz durch das Modell abgebildet werden. Dies ist dadurch zu erklären, dass sich die Varianzen der einzelnen Modelle in der kombinierten Betrachtung ausgeglichen haben. Ebenso beim RMSE (1,95) und beim Bias (-0,17).

Die Validierungsergebnisse zeigten für den headspace hinsichtlich der Modelleffizienz einen deutlich negativen Wert (-3,89). Dieser Wert lag im negativen Zahlenbereich und somit war das Ergebnis ebenfalls ungenauer als der Mittelwert der gemessenen Daten. Die Dynamik der Beobachtungen wurde ebenfalls nicht getroffen (RMSE = 6,78; Bias = 2,12). Ähnliches konnte auch für die Validierungsergebnisse des Abteils beobachtet werden. Die Modelleffizienz betrug hier -0,62, der RMSE 2,80 und der Bias 0,14. In der kombinierten Betrachtung der Bereiche (headspace und Abteil) näherten sich die Ergebnisse dem positiven Zahlenbereich an. Die Modelleffizienz betrug hier -0,12, der RMSE 5,19 und der Bias -0,99.

4.3 Modellierung von Emissionsminderungsmaßnahmen

4.3.1 Wöchentliche Entleerung des Flüssigmistkanals

Für die Modellierung der wöchentlichen Entleerung des Flüssigmistkanals wurden die Daten des Versuchsabteils vom 03.09.2013 bis 08.10.2013 aus dem zweiten Kapitel verwendet und konnte somit für 36 Tage simuliert werden.

Die angewandte Emissionsminderungsmaßnahme wurde durch die Verwendung der in das Modell eingelesenen Höhen des Flüssigmistpegels ($H_{\text{min}} = 4,8 \text{ cm}$, $H_{\text{max}} = 9,8 \text{ cm}$) umgesetzt, sodass im Modell selbst keine weiteren Anpassungen notwendig waren. Auf diese Weise wurde die wöchentliche Entleerung, im Vergleich zum kontinuierlich ansteigenden Flüssigmistpegel im Referenzabteil, simuliert. **Abbildung 17** stellte die modellierten und gemessenen Ammoniakkonzentrationen des headspace sowie des Abteils dar.

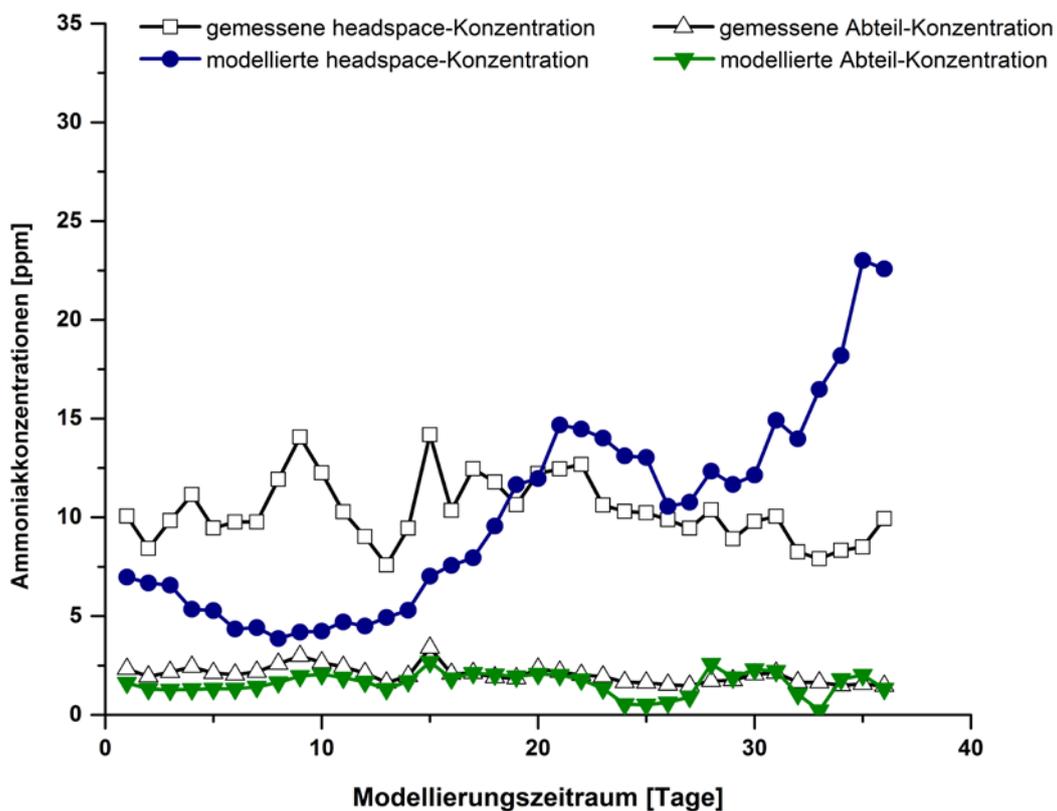


Abbildung 17: Ergebnis der Modellierung der wöchentlichen Entleerung des Flüssigmistkanals - Grafische Darstellung der gemessenen und modellierten Ammoniakkonzentration des Abteils und des headspace

Die modellierten Ammoniakkonzentrationen des Abteils lagen auch wie bei der Kalibrierung und der Validierung näher an den gemessenen Werten als die des headspaces. Die Kennzahlen zur Modellgüte dieser modellierten Minderungsmaßnahme sind in **Tabelle 29** zusammengefasst.

Tabelle 29: Ergebnis der Modellierung der wöchentlichen Entleerung des Flüssigmistkanals - Vergleich der Modelleffizienz, der Wurzel des mittleren quadratischen Fehlers (RMSE) und des Bias der Ammoniakkonzentrationen des headspace, des Abteils und der kombinierten Betrachtung beider Bereiche

	headspace	Abteil	headspace + Abteil
Modelleffizienz¹	-11,67	-1,46	0,11
RMSE²	5,70	0,66	4,06
Bias³	-0,26	-0,43	-0,34

headspace = Abstand zwischen der Flüssigmistoberfläche und den Schlitzen der Unterflurabsaugung im Flüssigmistkanal [cm]

$$^1 \text{ Modelleffizienz} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^N (O_i - \bar{O})^2} \text{ (NASH \& SUTCLIFFE 1970).}$$

$$^2 \text{ RMSE} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^N (P_i - O_i)^2}$$

$$^3 \text{ Bias} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^N (P_i - O_i) \text{ (INGWERSEN et al. 2010).}$$

Mit einem Zahlenwert von -1,46 lag die Modelleffizienz des Abteils deutlich näher am positiven Zahlenbereich als die des headspace (-11,67). Ebenso wurde die Dynamik der Beobachtungen nicht getroffen (RMSE = 0,66; Bias = -0,43). Das Ergebnis der Modelleffizienz des headspace war mit -11,67 deutlich negativ. Auch hier wurde die Dynamik der Beobachtungen nicht getroffen (RMSE = 5,70; Bias = -0,26). Die kombinierte Betrachtung beider Bereiche (headspace und Abteil) stellte sich insgesamt als am geeignetsten dar. Hier konnten 11 % der Varianz durch das Modell erklärt werden. Der RMSE betrug 4,06 und der Bias -0,34.

4.3.2 Abdeckung der Flüssigmistoberfläche

In einem weiteren Mastdurchgang wurde die Abdeckung der Flüssigmistoberfläche als Emissionsminderungsmaßnahme im Versuchsabteil getestet (Kapitel 2, GRONOW-SCHUBERT & GALLMANN 2014). Für die Modellierung dieser Maßnahme wurden die Daten vom 16.01.2014 bis 21.04.2014 verwendet, was einen Zeitraum von 96 Tagen entsprach.

Um die Abdeckung der Flüssigmistoberfläche im Modell entsprechend zu hinterlegen, wurde die emittierende Oberfläche angepasst. Dies bedeutete im Detail, dass die ursprüngliche Länge der emittierenden Flüssigmistoberfläche mit $\frac{1}{3}$ multipliziert wurde, dadurch wurden die durch die Abdeckung nicht mehr emittierenden $\frac{2}{3}$ der ursprünglichen Gesamtlänge der Flüssigmistoberfläche nicht gewichtet. Durch Multiplikation dieser gekürzten emittierenden Länge mit der konstant gebliebenen emittierenden Breite, erhielt man schließlich die reduzierte emittierende Flüssigmistoberfläche. Die grafische Darstellung der Ergebnisse der Modellierung erfolgt in **Abbildung 18**.

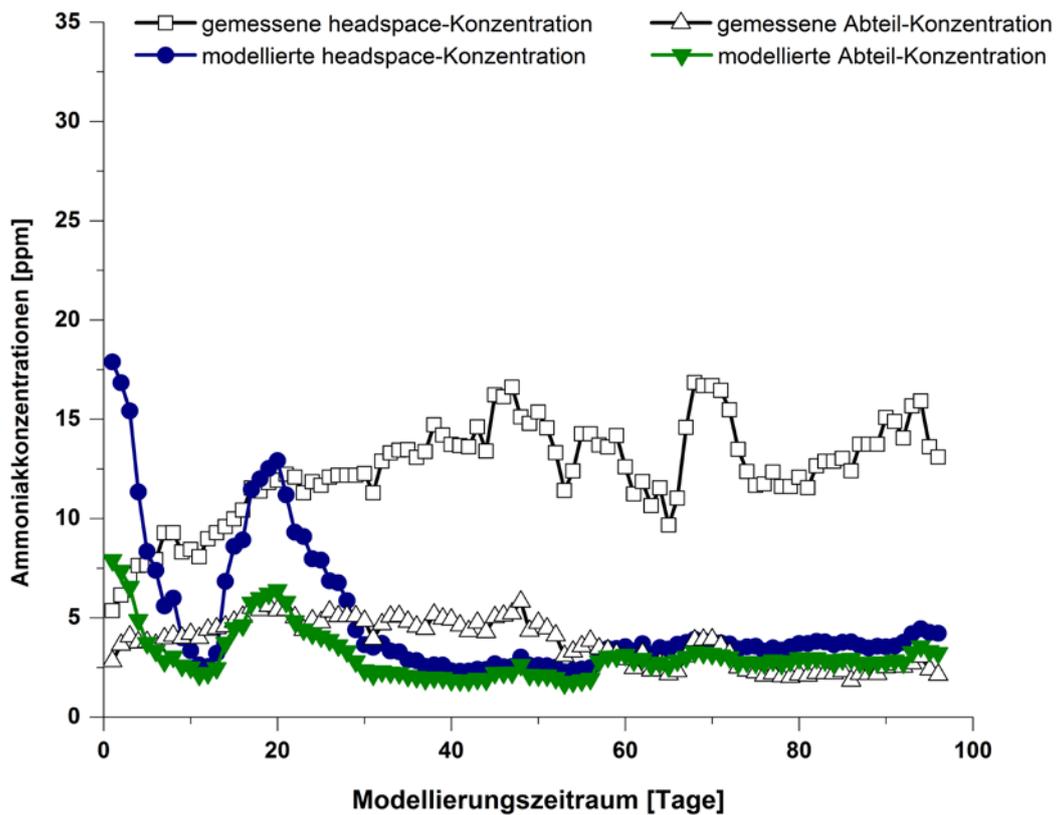


Abbildung 18: Ergebnis der Modellierung der Abdeckung des Flüssigmistkanals - Grafische Darstellung der gemessenen und modellierten Ammoniakkonzentration des Abteils und des headspace

Die obige Abbildung zeigt, dass sich die modellierten Ammoniakkonzentrationen des headspace ab dem 20. Tag denen des Abteils annäherten und somit ihr Niveau deutlich abfiel. Die modellierten Ammoniakkonzentrationen des Abteils bewegten sich zwar auf demselben Niveau wie die gemessenen Ammoniakkonzentrationen, allerdings schienen sie die Dynamik der gemessenen Werte nicht ausreichend zu treffen. Die Kennzahlen zur Modellgüte sind in **Tabelle 30** zusammengefasst.

Tabelle 30: Ergebnis der Modellierung der Abdeckung des Flüssigmistkanals - Vergleich der Modelleffizienz, der Wurzel des mittleren quadratischen Fehlers (RMSE) und des Bias der Ammoniakkonzentrationen des headspaces, des Abteils und der kombinierten Betrachtung beider Bereiche

	headspace	Abteil	headspace + Abteil
Modelleffizienz¹	-13,25	-1,18	-0,91
RMSE²	9,14	1,68	6,57
Bias³	-7,59	-0,64	-4,12

headspace =Abstand zwischen der Flüssigmistoberfläche und den Schlitzen der Unterflurabsaugung im Flüssigmistkanal [cm]

$$^1 \text{ Modelleffizienz} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^N (O_i - \bar{O})^2} \text{ (NASH \& SUTCLIFFE 1970).}$$

$$^2 \text{ RMSE} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^N (P_i - O_i)^2}$$

$$^3 \text{ Bias} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^N (P_i - O_i) \text{ (INGWERSEN et al. 2010).}$$

Ebenso wie bei der Modellierung der ersten Minderungsmaßnahme lagen die Modelleffizienzen des headspace mit -13,25 und des Abteils mit -1,18 im negativen Zahlenbereich. Zwar war hier das Abteil wieder näher am positiven Zahlenbereich, dennoch war der Mittelwert beider Bereiche ungenauer als der jeweilige Mittelwert der gemessenen Daten. Die Dynamik der Beobachtungen wurde ebenfalls nicht getroffen (RMSE des headspace = 9,14; Bias des headspace = -7,59; RSME des Abteils = 1,68; Bias des Abteils = -0,64). Auch bei der kombinierten Betrachtung beider Bereiche lag die Modelleffizienz mit -0,91 im negativen Zahlenbereich (RMSE = 6,57; Bias = -4,12).

4.4 Diskussion der Modellierungsergebnisse

Insgesamt konnte über alle Modellierungen hinweg festgestellt werden, dass die Ammoniakkonzentrationen im Abteil genauer abgebildet werden konnten, als die Ammoniakkonzentrationen im headspace (Abbildung 16). Die Ergebnisse zur Modellgüte waren über alle Modellierungen hinweg noch nicht zufriedenstellend. Die Ergebnisse der Kalibrierung zeigten aber, dass das Modell prinzipiell in der Lage ist, die Ammoniakkonzentrationen im System „Mastschweinestall“ korrekt wiederzugeben. Im Folgenden werden mögliche Ursachen diskutiert, die Einfluss auf die Modellierungsergebnisse haben könnten, im speziellen auf die Modellierung der Ammoniakkonzentrationen im headspace. Anhand des Szenarios „wöchentliche Entleerung des Flüssigmistkanals“ sollen diesbezügliche Modellierungsdetails besprochen werden.

In die Berechnung der Ammoniakkonzentrationsänderung im headspace flossen unter anderem die Ammoniakemissionswerte aus dem Flüssigmist ein. Betrachtete man die Kurven der Ammoniakkonzentrationsänderung im headspace sowie die Ammoniakemissionen aus dem Flüssigmist in einer Grafik, so wurde ersichtlich, dass der Verlauf der Kurven fast identisch war. Daraus konnte geschlussfolgert werden, dass die Ammoniakemissionen aus dem Flüssigmist in direktem Zusammenhang zu der Ammoniakkonzentrationsänderung im headspace stand (**Abbildung 19**).

In die Berechnung der Ammoniakemissionen aus dem Flüssigmist flossen wiederum der konvektive Massentransferkoeffizient für Ammoniak aus dem Flüssigmist sowie der Gradient zwischen der Ammoniakkonzentration im headspace und der Ammoniakkonzentration im Flüssigmist ein. Dieser Gradient setzt sich aus der Fraktion des freien Ammoniaks, der TAN-Konzentration des Flüssigmists und der Henry-Konstanten des Flüssigmists zusammen. Beim Vergleich beider Kurvenverläufe, die Fraktion des freien Ammoniaks mit den Ammoniakemissionen aus dem Flüssigmist, konnte beobachtet werden, dass der Verlauf der Ammoniakemissionen aus dem Flüssigmist stark von jenem der Fraktion des freien Ammoniaks beeinflusst wurde (Abbildung 19). Im Vergleich dazu schien die Henry-Konstante fast keine Auswirkung auf die Freisetzung von Ammoniakemissionen aus dem Flüssigmist zu haben (**Abbildung 21**). Der große Einfluss der Fraktion des freien Ammoniaks auf die Freisetzung der Ammoniakemissionen aus dem Flüssigmist, bedeutete im Umkehrschluss einen geringen Einfluss des konvektiven Massentransferkoeffizienten auf jene Zusammenhänge.

Der pH-Wert und die Temperatur des Flüssigmists waren schließlich die Parameter, welche Einfluss auf die Fraktion des freien Ammoniaks hatten. Vergleich man beide Parameter jeweils mit der Fraktion des freien Ammoniaks in einer gemeinsamen Grafik, so war zu erkennen, dass der pH-Wert des Flüssigmists ausschlaggebend für die Verläufe der Fraktion des freien Ammoniaks war (**Abbildung 20**). Die Temperatur des Flüssigmists schien keinen nennenswerten Einfluss auf den Kurvenverlauf der Fraktion des freien Ammoniaks zu haben (Abbildung 20).

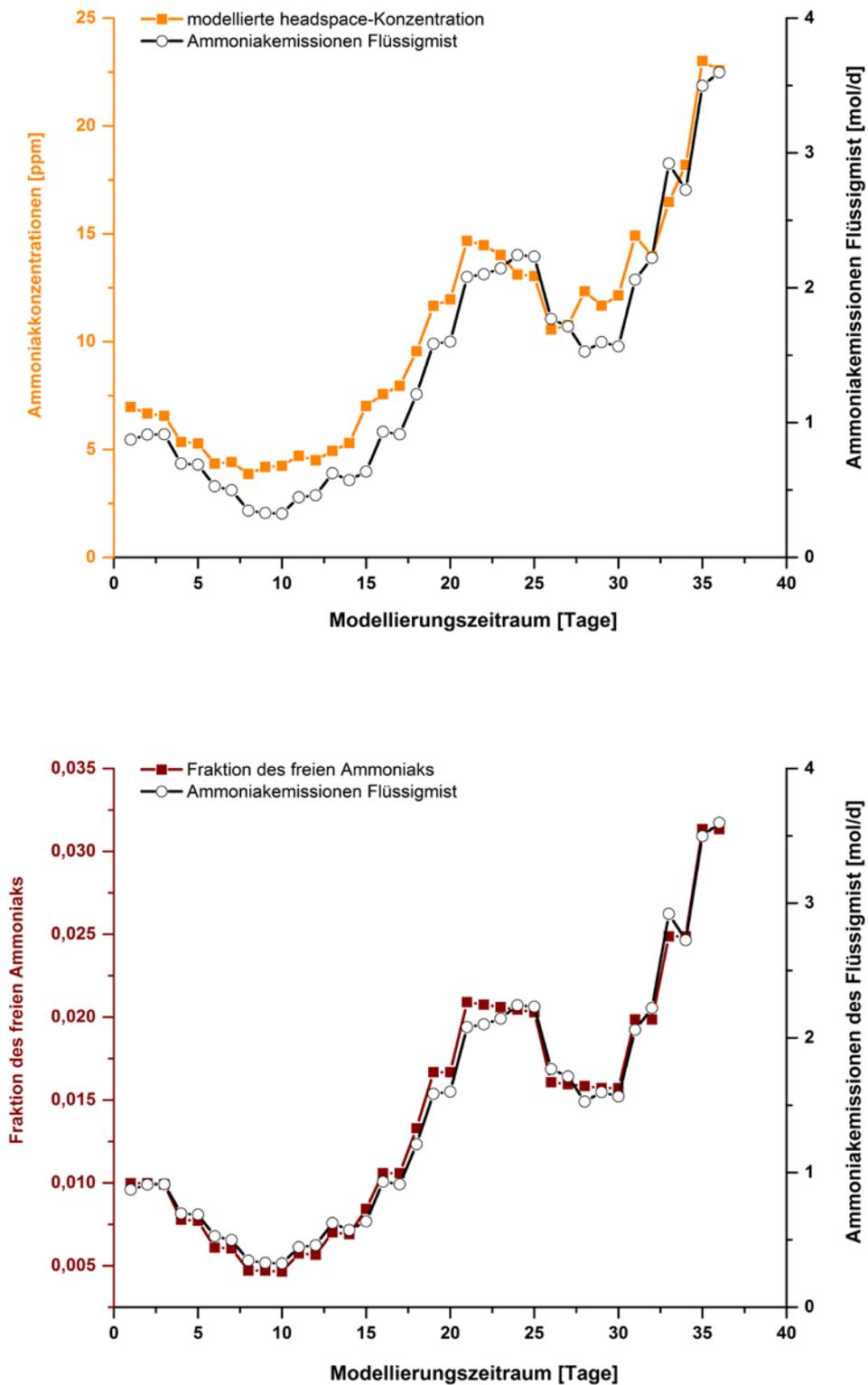


Abbildung 19: Diskussion der Modellierung der wöchentlichen Entleerung - Darstellung der modellierten Ammoniakkonzentrationen im headspace und der Ammoniakemissionen des Flüssigmists (oben) und der Ammoniakemissionen aus dem Flüssigmist im Zusammenhang mit der Fraktion des freien Ammoniaks im Flüssigmist (unten)

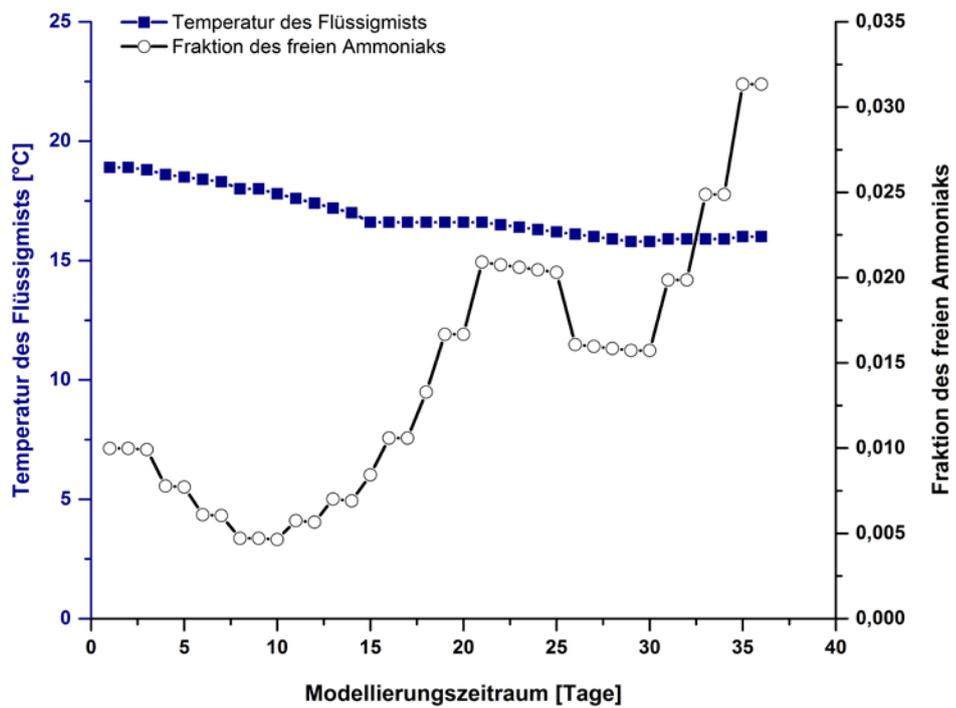
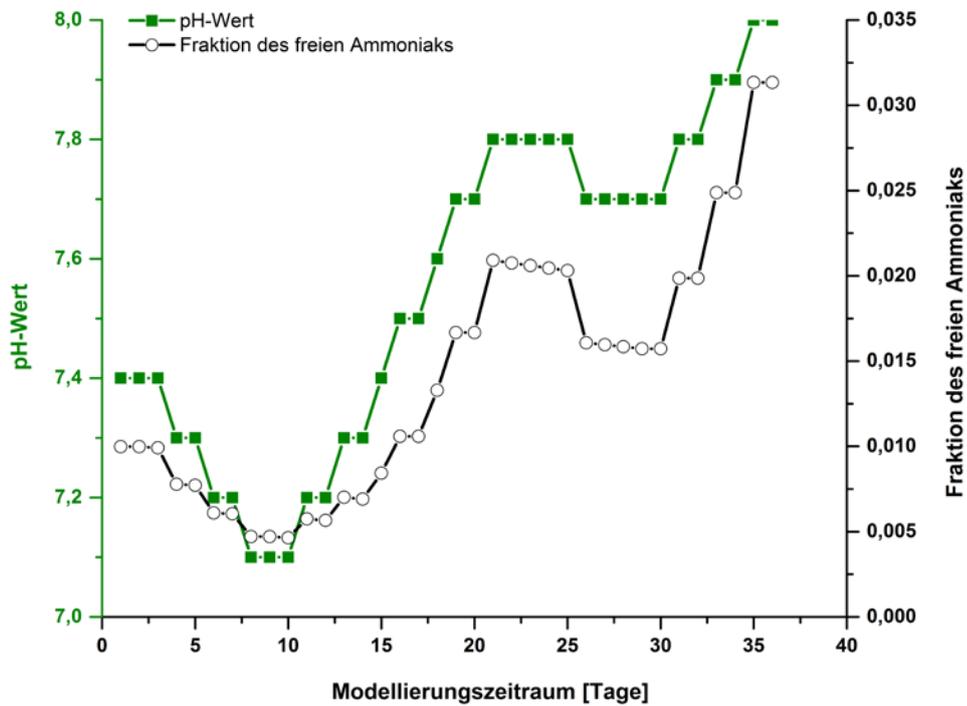


Abbildung 20: Diskussion der Modellierung der wöchentlichen Entleerung - Zusammenhang zwischen der Fraktion des freien Ammoniaks und des pH- Werts im Flüssigmist (oben) und Zusammenhang zwischen der Fraktion des freien Ammoniaks und der Flüssigmisttemperatur (unten)

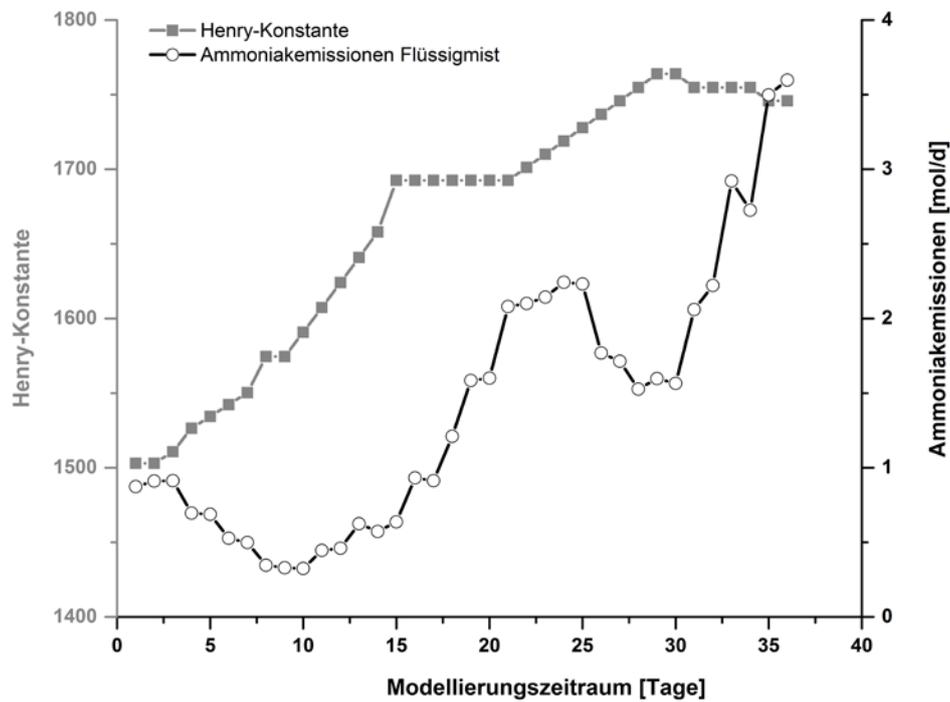


Abbildung 21: Diskussion der Modellierung der wöchentlichen Entleerung - Darstellung der Ammoniakemissionen aus dem Flüssigmist im Zusammenhang mit der Henry-Konstanten

Da nicht nur der pH-Wert des Flüssigmists, sondern auch die Flüssigmisttemperatur eine essentielle Rolle für die Freisetzung der Ammoniakemissionen spielt, sollte geprüft werden, ob das Modell per se nicht in der Lage ist Temperatur- und pH-Wert- Schwankungen gemeinsam zu berücksichtigen? Bei der Betrachtung aller Modellierungen fiel auf, dass, außer bei der Kalibrierung, der pH-Wert des Flüssigmists ausschlaggebend für die Verläufe der Fraktion des freien Ammoniaks war. Die Ergebnisse der Kalibrierung waren insgesamt zufriedenstellend. Bei der Überprüfung des Einflusses der Temperatur und des pH-Werts auf die Fraktion des freien Ammoniaks in der Kalibrierung konnte festgestellt werden, dass das Modell an sich in der Lage ist, sowohl die Auswirkungen der Flüssigmisttemperatur als auch die des pH-Wertes des Flüssigmists (**Abbildung 22**) abzubilden.

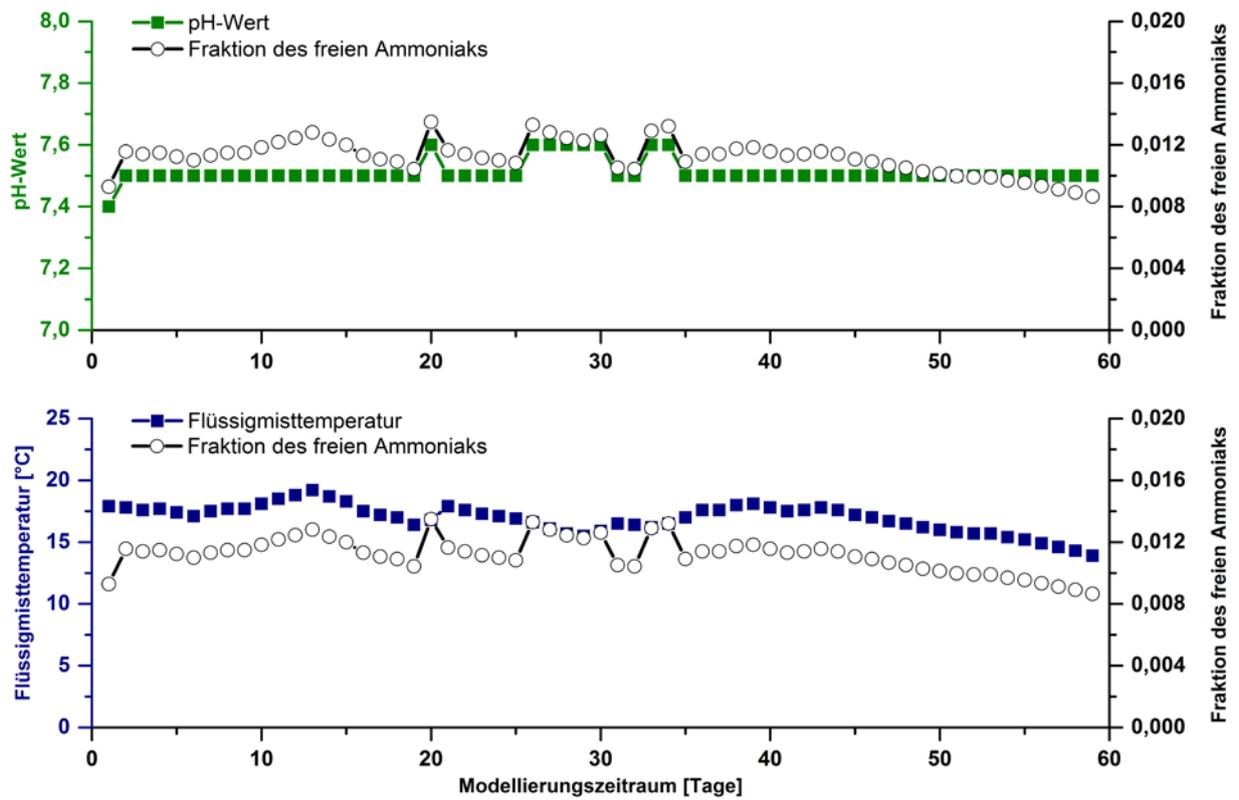


Abbildung 22: Diskussion der Kalibrierung - Abbildung der Zusammenhänge zwischen der Fraktion des freien Ammoniaks und des pH-Werts im Flüssigmist und zwischen der Fraktion des freien Ammoniaks und der Flüssigmisttemperatur

5 GESAMTDISKUSSION

Analog zur Strukturierung der vorliegenden Arbeit in die drei Arbeitspakete Messen – Analysieren – Modellieren erfolgt im Anschluss an die Bewertung der gewählten Vorgehensweise und Messmethodik sowie der damit erlangten Datenbasis und Datenqualität die Diskussion der statistischen Auswertungen (Zeitreihen- und Regressionsanalyse) sowie die der Modellierung der Ammoniakkonzentrationen und Emissionen.

5.1 Diskussion der Vorgehensweise

5.1.1 Versuchsstall

Die Durchführung der Versuche zum Emissionsgeschehen und zu den Emissionsminderungsstrategien beim Flüssigmistmanagement über insgesamt vier Mastdurchgänge erfolgten auf der Versuchsstation Agrarwissenschaften, Standort Lindenhöfe der Universität Hohenheim. Der Versuchsstall für Mastschweine bietet durch seine Konzeption und Unterteilung in zwei räumlich getrennte Abteile (pro Versuch jeweils ein Versuchs- und Referenzabteil) sehr gute Voraussetzungen für die anwendungsorientierte Durchführung von Untersuchungen zur vergleichenden Beurteilung von Emissionsminderungsstrategien (HARTUNG 2001). Besonders vorteilhaft ist, dass beide Abteile hinsichtlich des Lüftungs-, Fütterungs- und Entmistungsmanagements so geführt werden können, dass gleiche Umgebungs- und Haltungsbedingungen (Ceteris-Paribus-Bedingungen; Abbildungen A1 bis A3) in den Abteilen existieren. Somit können die beobachteten Effekte mit großer Sicherheit auf den Einfluss der Minderungsmaßnahme zurückgeführt werden. Die Einbettung der Arbeiten im Versuchsstall in die Abläufe der Versuchsstation (z.B. das Bereitstellen der Tiere und des Futters, die tägliche Reinigung der Liegeflächen und die Tierkontrolle) sowie die engagierte Beteiligung der Mitarbeiter der Versuchsstation und die sehr gute Zusammenarbeit waren eine ideale Basis für die Versuchsdurchführung.

5.1.2 Verwendete Messtechnik und Datenqualität

Die quasi-kontinuierlichen Messungen in beiden Abteilen im Parallelbetrieb über die Gesamtdauer von vier aufeinanderfolgenden Mastdurchgängen zu unterschiedlichen Jahreszeiten (zugeordnet zu je zwei Sommer- und Winterdurchgängen) ergaben eine umfassende Datenbasis. Besonders die Variabilität der Ergebnisse zwischen den Mastdurchgängen aus dem Referenzabteil wurde anhand dieser Langzeitmessungen deutlich. Nur auf der Grundlage einer repräsentativen Datenbasis kann anschließend eine solide statistische Auswertung erfolgen. Die gleichzeitig hochaufgelöste Erfassung der Stallklimafaktoren, der Ammoniak- und Methanemissionen, der Flüssigmistparameter sowie das wöchentliche Erstellen von Verschmutzungsprofilen (Abbildungen A4 bis A11) sowie Messen des Flüssigmistpegels, darüber hinaus das 14-tägliche Wiegen der Tiere und die Beprobung des Flüssigmists, waren für die Beurteilung bzw. Einordnung der Ergebnisse besonders vorteilhaft. Mit Blick auf die Modellierungen der Ammoniakflüsse ist es dennoch sinnvoll, die Beprobung des Flüssigmists in kürzeren Zeitabständen durchzuführen. Die TAN-Konzentration im Flüssigmist stellt als Eingabeparameter im hier vorgestellten Ammoniakstofffluss-Modell eine noch weiter zu untersuchende Einflussgröße dar. Daher wären zumindest wöchentliche Beprobungen zu empfehlen.

Die ausgewählten Messgrößen, die verwendete Messtechnik bzw. -methoden sowie die räumliche und zeitliche Beprobung der Messstellen waren für die Zielsetzung der Untersuchungen insgesamt sehr gut geeignet. Durch die Nutzung der Softwareanwendung „TeamViewer“ konnte das Funktionieren der Messtechnik jederzeit überprüft werden. Hauptursache für den Ausfall der Messtechnik waren Stromausfälle im Versuchsstall. In solchen Situationen konnte die Messtechnik über die Fernsteuerung wieder in Betrieb genommen und der Ausfall der Daten auf wenige Tage je Mastdurchgang eingegrenzt werden.

Das regelmäßige Kalibrieren der Messgeräte sowie die umfassende Dokumentation aller Vorgänge im Stall dienten der Sicherung einer hohen Zuverlässigkeit der laufenden Messungen und der anschließenden Datenauswertung. Anhand dieser Stallprotokolle konnten im Nachhinein die Tage von der Auswertung ausgeschlossen werden, an denen Tätigkeiten im Versuchsstall vorgenommen wurden, welche die Gasmessung beeinflussten.

5.1.3 Diskussion der Versuchsplanung und -durchführung

Die gewählte Versuchsplanung und -durchführung wird insgesamt als gut geeignet und auch für notwendig erachtet, um der Zielsetzung dieser Arbeit umfassend gerecht zu werden. Die verwendete Technik hinsichtlich Aufstallung, Lüftung, Fütterung sowie der mit Stroh befüllte Beschäftigungsautomat entsprach der guten fachlichen Praxis.

Bei der Wahl der durchgeführten Emissionsminderungsstrategien (Tabelle 7) wurde Wert auf Praxisnähe und -tauglichkeit sowie Eignung auch als nachträgliche Maßnahme bei vorhandenen Stallbauten gelegt.

Wöchentliche Entleerung des Flüssigmistkanals

Behandlung A

Die Versuchsdurchführung und die Diskussion der Ergebnisse von Behandlung A sind unter Kapitel 2.2.1 und 2.4.2 beschrieben. An dieser Stelle erfolgt eine kurze abschließende Bewertung dieser Minderungsmaßnahme.

Nach Abschluss aller Untersuchungen kann das wöchentliche Entleeren des Flüssigmistkanals als praxistaugliche Methode bewertet werden. Sie hatte vor allem auf die Methanemissionen einen positiven Effekt (-39,4 %). Wenn die Konsistenz des Flüssigmists sowie die baulichen Voraussetzungen des Mastschweinstalls es zulassen, dann wäre dies dennoch eine schnell und einfach umsetzbare Methode, um einen Beitrag zur Senkung des Treibhausgases Methan zu leisten.

Auf die Ammoniakemissionen hatte diese Maßnahme keinen Einfluss. Um auch diese zu reduzieren müsste, wie in den Kapiteln 1.2 und 2.4.2 beschrieben, die Entleerung des Flüssigmistkanals in kürzeren Zeitabständen (z.B. täglich bzw. mehrmals wöchentlich) und mit anschließender Spülung erfolgen.

Abdeckung der Flüssigmistoberfläche unter den Spalten mit Hexa-Cover®- Schwimmkörpern

Behandlung B

Die Versuchsdurchführung und die Diskussion der Ergebnisse von Behandlung B sind in Kapitel 2 beschrieben. An dieser Stelle soll kurz darauf eingegangen werden, warum für diesen Versuch die Hexa-Cover®-Schwimmkörper verwendet wurden. Der Hintergrund für die Entscheidung, die Flüssigmistoberfläche unter den Spalten mit den Hexa-Cover®-Schwimmkörpern ($\varnothing = 18 \text{ cm}$)

abzudecken (Abbildung 4), beruhte auf zwei Bedingungen. Das grundsätzliche Ziel dieser Behandlung war es, ähnlich wie bei YE et al. (2011), den Anteil der Flüssigmistoberfläche zu reduzieren, welche dem Luftvolumenstrom ausgesetzt war, um auf diese Weise einen positiven Effekt auf die Ammoniakemissionen zu erzielen. Versuche dieser Art waren in der Literatur bisher noch nicht beschrieben. Die Behandlung B sollte diese Datenlücke schließen.

Aufgrund der im Versuchsabteil vorhandenen Unterflurabsaugung konnte die Abdeckung der Flüssigmistoberfläche nicht über die Schließung der Schlitze im Buchtenboden erreicht werden, da ansonsten die Lüftung des Abteils nicht mehr gewährleistet gewesen wäre. Des Weiteren musste eine Abdeckungsvariante gefunden werden, die sich nach dem Mastdurchgang wieder zurückbauen lässt, da noch weitere Untersuchungen folgen sollten. Somit wurden die Schwimmkörper der Firma Hexa-Cover® ausgewählt, mit der Idee, dass sich diese bei zu hoher Schmutzlast durch Futter- oder Strohreste auch von selber drehen sollten und auf diese Weise eine Art „Selbstreinigung“ der Schwimmkörper stattfindet.

Die gewünschte Drehung der Schwimmkörper erfolgte nicht. Im Laufe des Mastdurchgangs bildete sich eine überwiegend trockene bis teilweise feuchte Schicht, bestehend aus Stroh aus dem Beschäftigungsautomaten, Staub sowie Futterresten. Diese Schicht förderte den Luftabschluss über den Hexa-Cover® zusätzlich und führte zu einem deutlichen Anstieg bei den Methanemissionen (+111,9 %). Die Ammoniakemissionen konnten leicht gesenkt werden (-13,8 %).

Insgesamt hat sich diese Behandlung nur als bedingt geeignet erwiesen, um sowohl die Ammoniak- als auch die Methanemissionen zu senken. Zum einen aufgrund des deutlichen Anstiegs der Methanemissionen und zum anderen wegen der anschließend schwierig durchzuführenden Reinigung des Flüssigmistkanals. Für die Abdeckung der Flüssigmistoberfläche ist es wichtig, dass die Funktionsbereiche für die Nutzung durch die Tiere klar gegliedert sind. Durch die Wahl der Bodenbeschaffenheit (planbefestigter Boden, Spaltenboden), die Anordnung der Haltungseinrichtungen (z.B. Tränken und Futtertröge) sowie durch das Einrichten verschiedener Klimazonen kann das Tierverhalten derart beeinflusst werden, dass die Tiere hauptsächlich in den dafür vorgesehenen Bereich abkoten (GALLMANN 2003, PFLANZ 2007). Um gesicherte Aussagen auch im Hinblick auf die Anwendbarkeit in der Praxis treffen zu können, ist es notwendig weitere Studien bezüglich der Abdeckung des Flüssigmists im Stall und der dafür geeigneten Materialien durchzuführen.

Zugabe von Flüssigmistadditiven: „Effektive Mikroorganismen“

Behandlung C

Als mögliche Emissionsminderungsmaßnahme wurde in den Kapiteln 1.2 und 1.3 die Zugabe von Flüssigmistadditiven aufgeführt. Aktuell gibt es nur sehr wenige Untersuchungen zur Zugabe von Flüssigmistadditiven, im Speziellen für die Effektiven Mikroorganismen (PÖLLINGER et al. 2004, AMON et al. 2005). Mit dieser Behandlung sollte die Datenbasis diesbezüglich erweitert und weitere Erfahrungen bei der Anwendung im Stall gesammelt werden.

Die Ergebnisse von PÖLLINGER et al. (2004) können nur bedingt zum Vergleich herangezogen werden. Zum einen aufgrund der voneinander sehr verschiedenen Haltungssysteme (eigener Versuch: zu $\frac{2}{3}$ planbefestigter Boden mit reduziertem Schlitzanteil und zu $\frac{1}{3}$ Vollspaltenboden, einstreulos; PÖLLINGER et al. 2004: eingestreuter Schrägbodenstall mit Schwemmentmischung) und zum anderen

aufgrund der deutlich unterschiedlichen Mischungsverhältnis der Sprühsubstanz (eigener Versuch: 1:10; PÖLLINGER et al. 2004: 1:1).

Inwieweit sich der Einsatz von Effektiven Mikroorganismen bei der Fütterung alleine oder in Kombination mit der nachträglichen Anwendung im Stall bzw. im Flüssigmist auf das Emissionsgeschehen auswirkt, wurde hier nicht untersucht. Es ist aber nicht auszuschließen, dass sich der Einsatz bei der Fütterung positiv auf die Darmgesundheit und die Verdauungsprozesse auswirken kann und in der Folge die Exkrementenzusammensetzung und somit das Emissionsgeschehen beeinflusst wird wie Untersuchungen von AMON et al. (2004) zeigten.

Für eine abschließende Beurteilung der Wirkung von Effektiven Mikroorganismen auf das Emissionsgeschehen von Ammoniak und Methan reichen die in dieser Arbeit gewonnenen Ergebnisse und Erfahrungen nicht aus. Hierfür sind weitere Untersuchungen in Tierhaltungsanlagen notwendig.

Insgesamt ist jede Emissionsminderung im Stall jedoch nur dann zielführend, wenn auch entlang der gesamten Verfahrenskette (Lagerung und Ausbringung) emissionsmindernde Maßnahmen stattfinden.

5.2 Diskussion der statistischen Auswertung

Eine umfassende statistische Auswertung der Daten aus dem jeweiligen Referenzabteil der Behandlungen A bis D erfolgte in Kapitel 3. Im Anhang sind in den Tabelle A1 bis A8 sowie den Abbildungen A1 bis A15 die Ergebnisse der beschreibenden Statistik für die Mastdurchgänge R_A bis R_D für alle 19 Klassen, die Häufigkeitsverteilungen, Buchtenverschmutzungen, Übersicht zu den Futterinhaltsstoffe und der Flüssigmistparameter ergänzend zu den Auswertungen im dritten Kapitel dargestellt. An dieser Stelle erfolgt nun eine weiterführende Diskussion zu den statistischen Auswertungen.

Bei der Festlegung der Versuchsanordnung und der Anzahl der Wiederholungen pro Versuch steckt im Bereich der Emissionsmessungen noch viel Potential. Die Anzahl der Wiederholungen ist für statistische Auswertungen von großer Bedeutung (GYGAX 2014). Es ist innerhalb von Emissionsmessungen stets ein Abwägen zwischen hinreichender Länge von Messungen, da die Messtechnik entsprechende Anlaufzeiten (z.B. Aufwärmen des Multigasmonitors von LumaSense™ Technologies) braucht, um verlässliche und stabile Werte zu messen (ADRION 2009, CALVET et al. 2013) und zwischen der genügend großen Anzahl an Wiederholungen pro Versuch. Emissionsmessungen in Tierhaltungsanlagen sind immer mit dem Vorhandensein von Tieren verbunden. Zum einen stehen diese im Fall von Mastschweinen, nur für einen begrenzten Zeitraum eines Mastdurchgangs zur Verfügung, und zum anderen steht jeder Mastdurchgang für sich, da sich die Mastdurchgänge auch unter quasi-gleichen Bedingungen, wie sie in diesem Versuchsstall gegeben waren, schon deutlich voneinander unterscheiden.

Ein wesentlicher Schritt in die standardisierte Emissionsmessung und somit für die Bereitstellung von vergleichbaren Daten sind auf internationaler Ebene die VERA-Testprotokolle (2011) und auf nationaler Ebene die Messprotokolle von EURICH-MENDEN & GRIMM (2013) und KTBL (2013). Die Messprotokolle von EURICH-MENDEN & GRIMM (2013) und KTBL (2013) sollen einerseits durch eine festgelegte Vorgehensweise hinsichtlich der Emissionsmessungen in zwangsbelüfteten (Mastschweinstall) sowie in offenen Stallsystemen (Milchviehstall) die Vergleichbarkeit von Emissionsmessungen verbessern und andererseits durch kürzere, häufigere Messungen die Anzahl der Wiederholungen auf verschiedenen Betrieben steigern.

Im Idealfall wären die Versuche auch bei der Erhebung von Emissionsdaten randomisiert angelegt. Dies könnte derzeit bei Emissionsmessungen nur in Laborversuchen ohne Vorhandensein von Tieren realisiert werden. Solche Laborversuche wären durchaus hilfreich, um im Modellmaßstab verschiedene Stall-, Lüftungs- und Entmistungssysteme nachzubauen, um noch tieferes Wissen über die chemisch-physikalischen Einflussfaktoren und deren Wirken auf die Freisetzungsprozesse von Ammoniak- und Methan aus dem Flüssigmist zu erlangen (KRESSE & BÜSCHER 2009, YE et al. 2008, YE et al. 2009a, YE et al. 2009b, YIN et al. 2016). Dieses Wissen kann anschließend in die Versuchsanordnung der Emissionsmessungen in den verschiedenen Stallsystemen einfließen. Wobei zu bemerken ist, dass der Tiereffekt deutlichen Einfluss auf die Emissionsmessungen hat (BLANES-VIDAL et al. 2008) und die Ergebnisse aus den Laborversuchen nicht eins zu eins auf die Ergebnisse im Stall übertragen werden können (z.B. Ergebnisse von AMON et al. 2005 - mit den Ergebnissen dieser Arbeit zu den Behandlungen B und C).

5.2.1 Diskussion der Zeitreihenanalyse

Die unter Kapitel 3 beschriebene Zeitreihenanalyse war eine der ersten Untersuchungen im Bereich der Emissionsforschung. Mit Hilfe mathematischer und statistischer Analysen konnten unter Berücksichtigung der vom Trend bereinigten Zeitkomponente, signifikante Einflussparameter auf das Emissionsgeschehen im Mastschweinestall ermittelt werden. Ähnliche Auswertungen hinsichtlich des Klima- und Emissionsgeschehens in freibelüfteten Kuhställen befinden sich aktuell in der Bearbeitung (HEMPEL et al. 2015b).

Im Kapitel 3 wurde die mathematisch, statistische Vorgehensweise wie z.B. die Modellauswahl nur kurz erläutert. An dieser Stelle wird diese nun detaillierter beschrieben und mögliche Verbesserungsansätze für weitere Analysen diskutiert.

Der zeitliche Verlauf der Methan- und Ammoniakemissionen wurden mit Hilfe von verschiedenen ARIMA-Modellen dargestellt:

AR = Autoregressiv(er)

I = Integriert(er)

MA = Moving-Average-Prozess.

Das ARIMA [p,1,q] Modell beschreibt die Differenzen der Emissionen zweier aufeinander folgender Zeitpunkte (Zuwächse) als Summe eines p-stufigen Autoregressiven und eines q-stufigen Moving-Average Prozesses. P-stufig bedeutet dabei, dass der aktuelle Wert sich aus den vergangenen p Zeitpunkten ergibt. Folgende ARIMA- Modellvarianten wurden getestet und anhand der AIC- Werte (AKAIKE- Informationskriterium) miteinander verglichen:

- ARIMA [3,1,0], ARIMA [0,1,3] und ARIMA [3,1,3] sowie
- ARIMA [1,1,0], ARIMA [0,1,1] und ARIMA [1,1,1].

Hinter dem Autoregressiven- Prozess verbirgt sich die Berechnung von Verdünnungseffekten z.B. die Verdünnung der mit NH_3 - und CH_4 - angereicherten Abteilluft mit der konzentrationsarmen Zuluft. Beim Moving-Average- Prozess wird der komplette Austausch z.B. der Luft nach einer Zeit (t) und somit die zeitlich begrenzte Auswirkung eines Einflussfaktors auf den beobachteten Faktor (z.B. Emissionen) angenommen. Im Zusammenhang mit der in dieser Arbeit vorgenommenen Untersuchung bezogen

sich diese beiden Prozesse auf die Ammoniak- Methanemissionen und somit auf den Luftaustausch im Stall. Wenn z.B. der AR- Prozess (ARIMA [3,1,0] oder ARIMA [1,1,0]) im Vergleich zum MA- Prozess (ARIMA [0,1,3] oder ARIMA [0,1,1]) den geringeren AIC- Wert bei der Modellauswertung hatte, dann bedeutete dies, dass das Emissionsgeschehen in diesem Fall besser mit dem AR- Prozess beschrieben werden kann. Aufgrund der zu dem Zeitpunkt vorhandenen Umgebungsbedingungen (z.B. tiefe Außentemperaturen und daraus folgernd geringere Luftwechselraten, wie es im Winter üblich ist) „verdünnten“ sich die Emissionen mit der Zuluft und entwichen langsam aus dem System „Mastschweinestall“. Traten hingegen geringere AIC-Werte beim Moving-Average-Prozess auf, bedeutete dies, dass mit diesem Prozess das beobachtete Geschehen im System am besten beschrieben werden konnte. In diesem Fall wurden die Emissionen nach einer gewissen Zeit (t) komplett über die angesaugte Zuluft aus dem Stall transportiert. Der Moving-Average-Prozess kommt bei hohen Luftwechselraten zum Tragen, wie sie an warmen oder heißen Tagen im Mastschweinestall üblich sind.

Anhand der Modellvergleiche zeigte sich, dass je nach Mastdurchgang (Sommer- oder Winterdurchgang) und je betrachtetem Gas, mal der AR- Prozess und mal der MA- Prozess das Emissionsgeschehen am besten beschrieb. Am häufigsten war das ARIMA-Modell [1,1,1] mit den niedrigsten AIC-Werten vertreten. Daher wurde dies für die weiteren Zeitreihenanalysen ausgewählt. Warum auch Unterschiede zwischen den Gasen Ammoniak und Methan innerhalb desselben Beobachtungszeitraums bestanden, konnte nicht geklärt werden. Es kann aber angenommen werden, dass dies an den unterschiedlichen Hauptemissionsquellen liegt. Im Sommer, wenn an sehr heißen Tagen die Verschmutzung der Buchten zunimmt, entsteht bereits der Großteil der Ammoniakemissionen im Abteil. Diese Emissionsquellen (verschmutzte Buchtenoberflächen) sind dem Luftvolumenstrom direkt ausgesetzt. In diesem Zusammenhang werden die Ammoniakkonzentrationen durch die zudem höheren Luftwechselraten im Sommer zügig aus dem Stall transportiert und entweichen als Emissionen.

Die Auswahl des geeignetsten ARIMA-Modells könnte mit einem detaillierterem Wissen über die Luftströmungen im zwangsbelüfteten Mastschweinestall präziser getroffen werden. Daher tragen die Ergebnisse der Strömungssimulationen wie sie bereits von ADRIAN et al. (2013) durchgeführt wurden und z.B. von HEMPEL et al. (2015a) sowie ROJANO et al. (2015) weiterhin durchgeführt werden zu einem besseren Verständnis bei und sind eine wichtige Ergänzung zu den Emissionsmessungen im Stall und eine wichtige Wissensgrundlage für die anschließenden statistischen Auswertungen.

Die Ergebnisse der Zeitreihenanalyse gaben insgesamt wertvolle Hinweise auf die zeitlichen Zusammenhänge zwischen den einzelnen Einflusszeitreihen (z.B. Temperatur, Volumenstrom, headspace) und den Zielzeitreihen (Ammoniak- und Methanemissionen). Ausgewertet wurden dabei die kompletten Datensätze der Referenzabteile von den vier durchgeführten Masturchgängen. Für weiterführende Zeitreihenanalysen wäre an dieser Stelle die Auswertung anhand der gebildeten Klassen interessant. Die Wahl der Klassen müsste so gewählt werden, dass Datensätze ausgewählt würden, die in der gleichen zeitlichen Auflösung (z.B. aufeinanderfolgende Tagesmittelwerte) vorhanden wären. Dies wäre beispielsweise in den Klassen 1 oder 4 (Einteilung der Mastabschnitte in Vor-, Mittel- und Endmast, bzw. Einteilung nach Gewichtsklassen < 65 kg und > 65 kg; Tabelle 14) der hier vorgestellten Arbeit der Fall. Über diese Ergebnisse könnte noch mehr über den Einfluss des Gewichts- bzw. des Mastabschnitts auf die Emissionen in Erfahrung gebracht werden.

5.2.2 Diskussion der Korrelations-und Regressionsanalyse

Die Korrelationsanalysen erfolgten anhand der Datensätze aus den Referenzabteilen der vier durchgeführten Mastdurchgänge (R_A bis R_D) auf Basis von Tagesmittelwerten. Der lineare Zusammenhang zwischen den Variablen Ammoniak- oder Methanemission [g h^{-1}] und eine der folgenden Einflussfaktoren

- Abteiltemperatur [$^{\circ}\text{C}$]
- Ablufttemperatur [$^{\circ}\text{C}$]
- Luftfeuchte im Abteil [%]
- Luftfeuchte in der Abluft [%]
- Volumenstrom [$\text{m}^3 \text{h}^{-1}$]
- Einzeltiergewichte [kg]*
- Flüssigmisttemperatur [$^{\circ}\text{C}$]
- pH-Wert des Flüssigmists

* (Hilfsparameter für die im Mastverlauf steigenden Kot- und Urinmengen)

wurde anhand des Pearson Korrelationskoeffizienten (r) ermittelt.

Diese Vorgehensweise sollte Aufschluss darüber geben, welche der gewählten Einflussfaktoren den stärksten Einfluss auf die Emissionen des jeweils betrachteten Gases hat. Sie diene als Vorbereitung der Regressionsanalysen. Wie im Kapitel 3 beschrieben, konnten aus den oben genannten acht Einflussfaktoren, im Zusammenhang mit den statistischen Auswertungen nachfolgend Einflussparameter benannt, über die Auswertungsbreite von 19 Klassen sowie je drei Auswertungsvarianten (A: ohne Einzeltiergewichte, B: mit Einzeltiergewichten, C: mit Einzeltiergewichte und Flüssigmistparametern) für die Ammoniak- und Methanemissionen die vier einflussreichsten Parameter bestimmt werden.

Die Auswertungen zeigten, dass bei den Ammoniakemissionen die stärksten und häufigsten linearen Zusammenhänge zu

1. den Einzeltiergewichten,
2. der Abteiltemperatur,
3. dem Volumenstrom und
4. der Ablufttemperatur

bestanden.

Die Korrelationen wiesen bei diesen Einflussparametern fast in allen Mastdurchgängen eine sehr hohe Signifikanz ($P \leq 0,01$, Shapiro-Wilk-Test) auf. Die Kot- und Urinmengen (erfasst durch den Hilfsparameter der Einzeltiergewichte) zeigten in allen Mastdurchgängen höchste Signifikanzen. Die unter dem Kapitel 1.2 beschriebene Minderungsstrategie der Reduktion des Stickstoffinputs über die Mehrphasenmast bestätigt sich auch in dieser Untersuchung als bedeutsam. Die auf den Rängen zwei, drei und vier aufgeführten Einflussparameter Abteiltemperatur, Volumenstrom und Ablufttemperatur weisen hohe Korrelationen zu den Ammoniakemissionen auf und können anhand der eigenen

Untersuchungsergebnisse als wichtige Ansatzpunkte für die Minderung der Ammoniakemissionen herangezogen werden. In der Regulation der Zulufttemperaturen durch Zuluftkühlung in Kombination mit der Reduzierung der Luftvolumenströme (Kapitel 1.2 und 3.4.5) liegt ein bedeutendes Potential zur Minderung der Ammoniakemissionen in Mastschweinställen.

Die Korrelationsanalysen zwischen den Methanemissionen und den Einflussparametern zeigten, dass die stärksten und häufigsten Korrelationen

1. zum Volumenstrom,
2. der Flüssigmisttemperatur,
3. der Ablufttemperatur und
4. dem pH-Wert des Flüssigmists

bestanden.

Die Korrelationskoeffizienten wiesen bei diesen vier Einflussparametern fast in allen Mastdurchgängen sehr hohe Signifikanzen ($P \leq 0,01$, Shapiro-Wilk-Test) verschieden von Null auf. Auffällig ist, dass zwischen den Methanemissionen und den gewählten Einflussparametern die Einzeltiergewichte nicht die Bedeutung haben, wie dies bei den Ammoniakemissionen der Fall ist. Die Gründe hierfür sind aus den vorliegenden Daten nicht zu entnehmen. Vor dem Hintergrund, dass der Flüssigmist die Hauptemissionsquelle von Methan ist und somit auch die nachgelieferte Menge an Substrat (Kot und Harn) deutlichen Einfluss auf die Methanproduktion hat, war dies nicht zu erwarten. Deutlich wird aber, dass die Flüssigmisttemperatur und der pH-Wert des Flüssigmists bei der alleinigen Betrachtung der kontinuierlich erhobenen Flüssigmistparameter bei den einflussreichsten Parametern vertreten sind.

Innerhalb der gewählten linearen Regression sollte anschließend geschaut werden, wie hoch der Anteil erklärter Varianz an der Gesamtvarianz ist, wenn nur die stärksten Einflussparameter (unabhängige Variablen) in die Regressionsanalysen für das jeweilige Gas aufgenommen werden. Die Verwendung des angepassten Bestimmtheitsmaßes (R_{adj}) sollte weiteren Aufschluss darüber geben, ob das Hinzunehmen der Variablen zwei, drei und vier noch sinnvoll war, da sich das R_{adj} nur dann erhöht, wenn der zusätzliche Erklärungsgehalt den Strafterm für das Hinzunehmen des weiteren Parameters ausgleicht. Untersuchungen von BLANES-VIDAL et al. (2008) zeigten, dass durch das Hinzunehmen weiterer unabhängiger Variablen der Anteil erklärter Varianz nicht nennenswert erhöht wird. In einigen Fällen erklären bereits ein oder zwei unabhängige Variablen den Großteil der abhängigen Variablen (BLANES-VIDAL et al. 2008).

Wie bereits in Kapitel 3.4.7 kurz erläutert, zeigte sich bei der Gegenüberstellung der Regressionsergebnisse der kompletten Datensätze (R_A bis R_D) zu den Regressionsergebnissen der reduzierten Datensätzen ($R_{A\ red}$ bis $R_{D\ red}$), dass diese durchaus miteinander vergleichbar sind (Tabellen A9 und A10). Mit dem hier gewählten und beschriebenen Vorgehen der statistischen Datenauswertung konnten somit im Vergleich zwischen den kompletten und den reduzierten Datensätzen, bis auf eine Ausnahme bei den Ammoniakemissionen im R_B und $R_{B\ red}$, für die Ammoniak- und Methanemissionen 50 bis 83 % bzw. 57 bis 88 % der Gesamtvarianz erklärt werden. Ähnliche Ergebnisse wurden bei den Regressionen von BLANES-VIDAL et al. (2008) und YE et al. (2011) erreicht. BLANES-VIDAL et al. (2008) beobachteten mit sechs unabhängigen Variablen bei den Ammoniak- und Methanemissionen Werte von R_{adj} zwischen 0,33 bis 0,67 bzw. 0,73 bis 0,85. Für das

Regressionsmodell der Ammoniakemissionen wählten YE et al. (2011) neun unabhängige Variablen, wobei mit der sechsten Variablen das höchste $R_{adj} = 0,83$ ermittelt wurde.

Das Aufnehmen weiterer unabhängiger Variablen in die Auswertungen, was in der vorliegenden Arbeit mit bis zu maximal acht unabhängigen Variablen durchgeführt wurde, führte nur zu einer geringen Erhöhung des R_{adj} und änderte auch nichts an dem Gesamtbild der Ergebnisse. Somit kann das Beschränken auf maximal vier unabhängigen Variablen auch für zukünftige statistische Auswertungen von Emissionsdaten empfohlen werden.

Die zum Teil deutlichen Unterschiede der gesamten Regressionsergebnisse zwischen den einzelnen Mastdurchgängen bei gleicher Auswahl der unabhängigen Variablen können zum Teil durch den Einfluss der Außentemperaturen (Sommer- und Winterdurchgänge) erklärt werden. Der Anteil der nicht erklärten Varianz wird zudem von Einflussparametern bestimmt, die in dieser Untersuchung nicht mit Zahlenwerten aufgenommen und entsprechend einbezogen wurden (z.B. Buchtenverschmutzung, Tieraktivität). BLANES-VIDAL et al. (2008) zeigten, dass die Tieraktivität einen deutlichen Anteil an der erklärten Varianz hat. Das Aufnehmen der Tieraktivität und in diesem Zusammenhang auch die Berücksichtigung der Buchtenverschmutzung (Tabellen A4 bis A11) als Einflussparameter auf das Emissionsgeschehen könnten in zukünftigen Untersuchungen weitere wertvolle Hinweise aufzeigen, wie durch die Strukturierung der Buchten und die Klimasteuerung das Tierverhalten beeinflusst und auf diese Weise Einfluss auf das Emissionsgeschehen genommen werden könnte (AARNINK 1997, GALLMANN 2003).

5.3 Diskussion der Modellierung der Ammoniakkonzentrationen- und emissionen

Mit dem in Kapitel 4 vorgestelltem Ammoniakstofffluss-Modell konnten die Ammoniakkonzentrationen- und emissionen in einem Mastschweinestall anhand der erhobenen Daten aus vier unterschiedlichen Mastdurchgängen abgebildet werden. Darüber hinaus wurden die unter Kapitel 2.2 im Praxisversuch durchgeführten Emissionsminderungsmaßnahmen im Modell simuliert. Insgesamt war die Qualität der Modellierungen noch nicht zufriedenstellend. Mögliche Ursachen für die unzureichende Modellgüte können in den vorgenommenen Anpassungen des Modells an die Bedingungen im Versuchsstall (Unterflurabsaugung; Basismodell = Oberflurabsaugung) und an der Anpassung des gewünschten Modellierungszeitraums (mehrere Wochen; Basismodell = drei Tage) liegen.

Die Kürzung des ACES-Modells von CORTUS et al. (2010a und 2010b) um das Untermodell der Urinpfüten stellt eine weitere mögliche Einflussgröße auf die Modellgüte dar (AARNINK & ELZING 1998). Wie die Modellierungsergebnisse von CORTUS et al. (2010a und 2010b) und BROSE & MONTENY (2004) zeigten - beide verwendeten ein Untermodell für die Modellierung der Ammoniakfreisetzung aus den Urinpfüten auf dem Buchtenboden - können unter Einbeziehung dieser zusätzlichen Emissionsquelle in das Modell genauere Modellierungsergebnisse, als die in dieser Arbeit vorgestellten, erreicht werden. Aufgrund einer ungenügenden Datenbasis aus den drei Versuchen, wie z.B. die Werte des Anfangsharnstoffgehalts der Urinpfüten, Fläche und Tiefe einer Urinpfüte sowie Anfangs-TAN und Anfangs-pH-Wert der Urinpfüten, musste dieses Untermodell aus dem ACES-Modell entfernt werden. In zukünftigen Arbeiten wäre es aber sinnvoll, diesen Ansatz weiter zu verfolgen.

Als wesentlicher Hinweis aus den Modellierungen kann auch der Einfluss des pH-Werts auf die Fraktion des freien Ammoniaks bewertet werden. Dies deckt sich mit Studien von (FROSCH & BÜSCHER 2002)

welche durch die Absenkung des pH-Wertes im Flüssigmist die Ammoniakemissionen um bis zu 23 % reduzieren konnten. Dieser Zusammenhang sollte in Laborversuchen, mit der Möglichkeit der vielfältigen Einflussnahme auf den pH-Wert und die Flüssigmistparameter, überprüft werden.

Des Weiteren könnte das kalibrierte Modell zu zeitraum- und umweltspezifisch gewesen sein. Verfolgt man diesen Gedankengang bis zum Schluss, dann kann davon ausgegangen werden, dass die Parameter x_7 , x_8 und Z wahrscheinlich nicht allgemeingültig genug angepasst wurden. Verantwortlich hierfür könnte der für die Kalibrierung relativ kurze Modellierungszeitraum sein (nur 59 Tage - R_A), was zu einem höheren Grad an Spezialisierung geführt haben könnte. Beispielsweise ist bei einem kurzen Modellierungszeitraum die Differenz der Schweinegewichte von Modellierungsbeginn zu Modellierungsende geringer, als dies bei längeren Modellierungszeiträumen der Fall ist. Dies könnte einen Einfluss auf die Modellgüte gehabt haben, da die Schweine zum Ende der Mast größer und schwerer sind, weshalb sie im Liegen mehr Spaltenbodenfläche verschließen als jüngere und kleinere Schweine. Dies führt zu veränderten Luftströmungsverhältnissen. Vor diesem Hintergrund könnten x_7 , x_8 und Z nicht allgemeingültig genug sein und müssten vielleicht für jeden Mastdurchgang bzw. für bestimmte Mastabschnitte differenziert angepasst werden, um das Modell zu optimieren.

Für die aufgezählten Verbesserungsansätze für das Modell besteht in zukünftigen Arbeiten weiterer Forschungsbedarf. In diesen könnte die Gewichtung der einzelnen Einflussfaktoren untereinander (z.B. der Fraktion des freien Ammoniaks, der Sensitivität für Temperatur und pH-Wert, die Simulation der Ammoniakbewegungen im Stall) sowie eine eventuelle Kombination der Einflussfaktoren untersucht werden.

Weiterhin könnten im eigenen Versuchsstall Umweltbedingungen vorgelegen haben, die zu einer Verschiebung des empirischen Zusammenhangs zwischen der Flüssigmisttemperatur und dem pH-Wert des Flüssigmists in der Gleichung für die Berechnung der Fraktion des freien Ammoniaks im Flüssigmist geführt haben. In entsprechenden Laborversuchen könnte geprüft werden, ob der empirische Zusammenhang noch mit dem in der Formel hinterlegten übereinstimmt. Anhand von Laborergebnissen könnte die Gleichung für die Fraktion des freien Ammoniaks gegebenenfalls auf die speziellen Bedingungen hinsichtlich der Flüssigmistparameter im Versuchsstall angepasst werden, was aber mit einem hohen Verlust an Allgemeingültigkeit verbunden wäre.

6 SCHLUSSFOLGERUNGEN UND AUSBLICK

Für die weltweite Nutztierhaltung, wird es eine der wichtigsten Herausforderungen sein, den Anstieg der Emissionen zu vermeiden bzw. die Reduktion der Emissionen einzuleiten (AHLGRIMM 1995, STEINFELD et al. 2006, FAO 2009, IAASTD 2009, MENZI & STEINFELD 2011, GERBER et al. 2013, WBA 2015, UBA 2016c).

Die Implementierung zukunftsfähiger Maßnahmen für die Emissionsreduktion der umwelt- und klimarelevanten Gase Ammoniak und Methan auf der Ebene der Haltungs- und Umgebungsbedingungen wird die Kombination verschiedener Ansätze erfordern. Der Weg dahin führt über die weiter auszubauende interdisziplinäre Zusammenarbeit der einzelnen Fachgebiete und Universitäten, das Einbeziehen moderner Computertechnik sowie das Nutzen von externen Kompetenzen.

Das standardisierte Messen auf Basis von Messprotokollen (VERA 2011, EURICH- MENDEN & GRIMM 2013), das anschließende tiefergehende statistische Auswerten der Daten bis hin zur Modellierung auf Basis der erhobenen Messwerte wird der künftige Weg sein, um neue Erkenntnisse hinsichtlich des Emissionsgeschehens von klimarelevanten Gasen zu gewinnen.

Durch die Strukturierung der vorliegenden Arbeit in die drei Arbeitspakete konnten arbeitspaketübergreifende Zusammenhänge erkannt werden. Vor allem bei der Entscheidungsfindung hinsichtlich der für verschiedene Fragestellungen geeignetsten Art und Weise der Emissionsermittlung, können die hier erzielten Erkenntnisse Hilfestellung geben.

Sowohl die statistischen Auswertungen als auch die Stoffflussmodellierungen zeigten, dass es hinsichtlich der mathematisch-physikalischen Zusammenhänge und der Stärke der verschiedenen Einflussparameter auf die Bildung und Freisetzung der Ammoniak- und Methanemissionen noch zu klärenden Fragen gibt. Zur Klärung dieser Fragen werden hochaufgelöste Langzeitmessungen, sowohl in Versuchsställen als auch in Laborversuchen, notwendig sein. Zum Beispiel wäre es in künftigen Untersuchungen interessant, die Luftströmungen unter dem Spaltenboden bei unterschiedlichen Variationen der Einflussfaktoren Temperatur (Abteil und Abluft), Volumenstrom, headspace und Substratmenge vor allem vor dem Hintergrund der Zeitreiheneffekte zu untersuchen. Bereits innerhalb der Zeitreihenanalyse war bei der Wahl des geeignetsten ARIMA- Modells zu erkennen, dass je nach Saison (Sommer oder Winter) zum einen der AR-Prozess (Autoregressiver Prozess) oder zum anderen der MA-Prozess (Moving Average Prozess) zu den höchsten AIC-Werten (AKAIKE- Informationskriterium) führte. Hintergrund hierfür sind die bisher noch nicht ausführlich untersuchten sehr heterogenen Luftströmungsprozesse innerhalb der Stallgebäude. Hilfreich könnten hier die mit moderner CFD- Software am PC durchgeführten Strömungssimulationen sein, welche im Bereich der Agrarwissenschaften immer mehr an Bedeutung gewinnen (ADRION 2012, HEMPEL et al. 2015, ROJANO et al. 2015).

Wie die vorliegende Arbeit zeigt, können, wenn für Auswertungen nur reduzierte Datensätze zur Verfügung stünden, tendenziell die gleichen mittleren Emissionen ermittelt werden wie aus den Ergebnissen der durchgängigen (täglichen) Messung der Emissionen entlang eines Mastdurchgangs. Dieses Ergebnis ist für zukünftige Untersuchungen auf dem Gebiet der Emissionsmessungen, z.B. für das EmiDat-Programm (KTBL 2014) von Bedeutung, da hierdurch die Möglichkeit bestünde, den Umfang und somit den Zeit- und Kostenaufwand der Emissionsmessungen zu reduzieren ohne Qualitätseinschränkungen bei der anschließenden Beurteilung der Daten in Kauf nehmen zu müssen.

Zudem könnten auf dem Gebiet des Modellierens von Stoffkreisläufen mit Hilfe von weiteren Erkenntnissen auf Ebene der physikalisch-chemischen Stoffumwandlungsprozesse die Optimierung der momentan vorhandenen Modelle fortgeführt werden. Auch hierfür bedarf es qualitativ hochwertiger Datensätze. Mit validen Modellen böte sich die Chance, dass verschiedene emissionsmindernde Szenarien am PC genauer modelliert und anschließend bewertet werden könnten. Auf diese Weise wäre es möglich, die Auswahl der letztendlich in der praktischen Forschung umzusetzenden Versuche und Messungen auf vielversprechende Optionen einzugrenzen, gerade auch mit Blick auf die Kombination verschiedener Maßnahmen, welche sowohl die Ammoniak- als auch die Methanemissionen senken können (z.B. regelmäßiges Entleerung des Flüssigmistkanals bei gleichzeitiger Reduktion der emittierenden Oberfläche).

Auch die Wahl der mathematischen Grundmodelle ist zu überprüfen. Möglicherweise war der Ansatz des hier gewählten Kompartimentmodells zu einfach, um den komplexen turbulenten Luftaustausch und damit verbunden den Ammoniaktransport zwischen Abteil und headspace abzubilden. Dies könnte z.B. durch 3D-Simulationen auf Basis eines Finite-Elemente-Methoden-Ansatzes¹ und der Anwendung der Navier-Stokes-Gleichung² genauer beschrieben werden. Navier-Stokes-Gleichungen sind unter anderem in der Lage Turbulenzen und das Verhalten von Gasen an den Grenzschichten abzubilden (CHORIN & MARSDEN 2013). Mit Blick auf die Erkenntnisse aus den Kapiteln 2 und 3 scheint hier ein wesentlicher Forschungsansatz für künftige Untersuchungen zu liegen. Das Wissen um die physikalischen Bildungs- Freisetzungsprozesse von Ammoniak und Methan aus dem Flüssigmist sollte noch vertieft und zur Optimierung der mathematischen Modelle genutzt werden.

Derzeit wird die Weiterentwicklung von Methoden zur Bestimmung von Emissionsfaktoren intensiv vorangetrieben. Dazu zählen die Volumenstrombestimmung diffuser Quellen und die Simulation der Luftströmungen in geschlossenen wie offenen Stallsystemen (ADRION et al. 2013, HEMPEL et al. 2015, ROJANO et al. 2015) die Verbesserung der Gassensorik vor allem im Bereich freibelüfteter Stallsysteme (SCHRADER 2009), die Erstellung einer einheitlichen Versuchsplanung und Standardisierung der Emissionsmessungen (VERA 2011, EURICH- MENDEN UND GRIMM 2013, KTBL 2013) sowie die Modellierung von Emissionen (RIGOLOT et al. 2010a und 2010b, CORTUS et al. 2010a und 2010b).

Die Landwirtschaft von morgen verknüpft auf diese Weise durch wissenschaftliche Innovationen (z.B. Zuluftkühlung) den Umweltschutz mit dem Tierwohl. Die moderne Landwirtschaft steht für emissionsarme Stallbaukonzepte mit hohem Tierschutzaspekten und einem ressourcenschonenden Wirtschaften mit den Nährstoffen. Auf diese Weise kann der gesamte Sektor der Nutztierhaltung mit seiner weltweit großen wirtschaftlichen, sozialen und ökologischen Rolle einen wesentlichen Beitrag zur Reduktion von Emissionen klimarelevanter Gase beitragen (STEINFELD et al. 2006, FAO 2009, WBA 2015). Das Ausmaß der Zielkonflikte ist dabei in vielen Bereichen geringer als es in der aktuell geführten Tierwohldebatte besprochen wird (GAILLARD et al. 2015, WBA 2015).

Der Weg für eine substantielle Reduktion der Emissionen aus Tierhaltungsanlagen führt aber durchaus auch über eine langfristige und weltweite Reduktion des Konsums tierischer Produkte, verbunden mit der Reduktion der weltweiten Nutztierbestände.

¹Die Finite-Elemente-Methode ist ein Werkzeug zum Lösen von partiellen Differentialgleichungen. Sie wird häufig im Ingenieurwesen zur Festkörpersimulation eingesetzt (ZIENKIEWICZ et al. 2013).

²Durch Navier-Stokes-Gleichungen können Strömungen von Fluiden und Gasen beschrieben werden (CHORIN & MARSDEN 2013).

7 ZUSAMMENFASSUNG

Der Anbau von Futtermitteln, die Haltung von Nutztieren, die Verarbeitung der tierischen Produkte und die dadurch ausgeprägte Flächennutzung durch die gesamte landwirtschaftliche Tierhaltung führen weltweit zu Treibhausgasemissionen. In direktem Zusammenhang mit der Haltung von Nutztieren und somit auch in der Mastschweinehaltung stehen die Ammoniak- und Methanemissionen. Das Hauptziel der vorliegenden Arbeit waren Untersuchungen zum Emissionsgeschehen und zu ausgewählten Ansätzen zur Emissionsminderung von Ammoniak und Methan, insbesondere beim Flüssigmistmanagement in der Mastschweinehaltung. In diesem Kontext standen die drei Herangehensweisen Messen – Analysieren – Modellieren im Fokus und wurden entsprechend als Teilziele festgelegt:

- Durchführung von Emissionsminderungsstrategien beim Flüssigmistmanagement in einem konventionellen Schweinemaststall und Vergleich der Emissionen mit einem Referenzsystem ohne Emissionsminderungsmaßnahmen. Die ausgewählten Emissionsminderungsstrategien sollten praxistauglich und nachträglich in vorhandenen Stallbauten anwendbar sein.
- Analyse der Haupteinflussfaktoren auf die Emissionen im Mastverlauf in unterschiedlichen Jahreszeiten unter besonderen Berücksichtigung von Zeitreiheneffekten und Regressionen.
- Prüfung der Möglichkeiten einer Stoffflussmodellierung, Anwendung auf die eigenen Messdaten bzw. zur Potentialabschätzung von Emissionsminderungsmaßnahmen sowie Evaluierung des gewählten Ansatzes zur Stoffflussmodellierung.

Das Flüssigmistmanagement im Stall beeinflusst in der Mastschweinehaltung die Emissionen von Ammoniak und Methan entscheidend, obgleich die konkreten Minderungspotentiale noch nicht hinreichend geklärt sind. In dieser Arbeit wurden im ersten Arbeitspaket in einem Case-Control-Ansatz über je einen Mastdurchgang die Flüssigmistmanagementmaßnahmen - wöchentliche Entleerung des Flüssigmistkanals, Abdeckung des unterflur gelagerten Flüssigmists sowie die Zugabe von Effektiven Mikroorganismen als Flüssigmistadditive - auf ihr Emissionsminderungspotential untersucht und mit dem Staumistverfahren als Referenz verglichen. Der Versuchsstall für Mastschweine war in zwei Abteile (Versuchs- und Referenzabteil) mit je 50 Tieren unterteilt. Quasi-kontinuierlich wurden die Zuluft,- Abteil- sowie Abluftkonzentrationen von Ammoniak und Methan, die Zuluft,- Abteil- sowie Ablufttemperaturen sowie die Temperatur und der pH-Wert des Flüssigmists erfasst. Ergänzend wurden im 14- täglichen Rhythmus Flüssigmistproben analysiert, der Flüssigmistpegel gemessen sowie der Verschmutzungsgrad der Buchtenböden, die Tiergewichte und Leistungs- bzw. Fütterungsdaten erhoben. Zwischen dem Versuchs- und Referenzabteil bestanden keine weiteren Unterschiede hinsichtlich der Fütterung, Lüftung, Haltung.

Die angewendeten Minderungsstrategien konnten die Ammoniak- und Methanemissionen teilweise reduzieren (wöchentliche Entleerung des Flüssigmistkanals: Emissionsminderung bei Methan um 39,4 % bezogen auf die Emissionsrate in Gramm je Tag und GV; Flüssigmistabdeckung: 13,8 % Minderung bei den Ammoniakemissionsraten in Gramm je Tag und GV), hatten zum Teil keinen Effekt oder sogar einen negativen Einfluss auf die Emissionen (wöchentliche Entleerung des Flüssigmistkanals: kein Effekt auf die Ammoniakemissionen; Flüssigmistabdeckung: 111,9 %-iger Anstieg bei den Methanemissionsraten in Gramm je Tag und GV). Das gewählte wöchentliche Intervall für die Entleerung des Flüssigmistkanals reichte als Minderungsstrategie nicht aus. Bei der Abdeckung

der Flüssigmistoberfläche unterflur muss bedacht werden, dass durch den fast luftdichten Abschluss der Flüssigmistoberfläche die Voraussetzungen für die Methanogenese begünstigt werden. Die Zugabe von Effektiven Mikroorganismen zum Flüssigmist hatte sowohl auf die Ammoniak- als auch auf die Methanemissionen nur einen geringen Einfluss. Die Ammoniakemissionen stiegen um 8,3 % und die Methanemissionen um 5,9 %.

Die Auswertungen (Zeitreihen- und Regressionsanalyse) der Daten aus den Referenzabteilen von insgesamt vier Mastdurchgängen (zwei Sommer- und zwei Winterdurchgänge) umfassten das zweite Arbeitspaket.

Die Zeitreihenanalyse ermöglichte Einblicke in die zeitlichen Zusammenhänge zwischen den Ammoniak- und Methanemissionen und den Einflussfaktoren, welche die Freisetzung und den Transport der Gase beeinflussen. Beispielweise konnte graphisch gezeigt werden, welchen zeitlichen Einfluss hohe Außentemperaturen auf das System „Mastschweinestall“ und die Freisetzung von Emissionen haben. Die Zeitreihenanalyse gab Hinweise darauf, wie dynamisch bzw. stabil das klimatische Geschehen in einem Mastschweinestall sein kann.

Die Regressionsanalysen zeigten deutlich, dass das Emissionsgeschehen, sowohl bei Ammoniak als auch bei Methan, im Besonderen durch die vorhandene Menge an Flüssigmist, die Temperatur und den Luftvolumenstrom beeinflusst wird. Ebenso hatte der Abstand zwischen der Flüssigmistoberfläche und dem Spaltenboden („headspace“) direkten Einfluss auf die Freisetzung von Ammoniak und Methan aus dem Flüssigmist. Ein großer ‚headspace‘ korrelierte mit geringeren Emissionen und umgekehrt.

Anknüpfend an die Erhebung der Emissionsdaten und den statistischen Auswertungen wurde im dritten Arbeitspaket untersucht, welchen Beitrag die Stoffflussmodellierung der Ammoniakemissionen für den Erkenntnisgewinn hinsichtlich des Emissionsgeschehens und der Minderungsmaßnahmen im Mastschweinestall leisten kann. Dafür wurden ausgewählte Messdaten in ein Stoffflussmodell überführt. Als Basis diente das Modell von CORTUS et al. (2010a), welches in drei Schritten an die Bedingungen im eigenen Versuchstall angepasst wurde. Als Systemgrenze galten die baulichen Abgrenzungen des Versuchstalls. Für die numerische Integration der Differentialgleichungssysteme wurde die Software Berkeley Madonna 8.3.18 verwendet. Die Kalibration und Validation erfolgte anhand der eigenen Daten, jeweils aus dem Referenzabteil zwei unterschiedlicher Mastdurchgänge.

Das angepasste Modell war prinzipiell in der Lage Ammoniakkonzentrationen- und emissionen zu modellieren. Zudem konnte der Einfluss der Flüssigmisttemperatur und des pH-Werts des Flüssigmists abgebildet werden. Insgesamt reagierte das Modell aber zu temperatur- und zu pH-Wert-sensitiv. Aufgrund dessen über- oder unterschätze das Modell die gemessenen Werte teilweise deutlich. Einen wesentlichen Einfluss auf die Modellgüte scheint das Untermodell der Urinpfüten zu haben. Dieses wurde für die eigenen Modellierungen, im Zusammenhang der Modellanpassung auf die erhobenen Daten, aus dem Basismodell herausgekürzt.

Die Modellierung von Gaskonzentrationen- und Emissionen bietet im Vergleich zu Messungen den Vorteil, kostengünstig und zeitsparend das Emissionspotential verschiedener Haltungssysteme z.B. für die Mastschweinehaltung abschätzen zu können. Die Kalibrierung und Validierung sowie Anpassung auf den Anwendungsfall bedürfen aber besonderer Sorgfalt und Expertise.

Die Arbeit leistet einen Beitrag zum besseren Verständnis des Emissionsgeschehens und der Emissionsminderung, insbesondere beim Flüssigmistmanagement in der Mastschweinehaltung mit Hilfe verschiedener methodischer Ansätze über die Messung, Analyse und Modellierung.

8 SUMMARY

The growing of feed crops, the production of farm livestock and the processing of livestock products, along with the associated use of farmland for this entire production chain, all engender greenhouse gases on a worldwide scale. In this respect, ammonia and methane emissions are directly associated with livestock farming including the feeding of pigs for slaughter. The main aim of the work presented in this thesis was investigation of emissions produced in this way, and into selected strategies applied for reducing ammonia and methane release, particularly in management of liquid manure inside a fattening unit. In this context, the paper focusses on the three approaches – measuring, analysing and modelling - which are accordingly established as the following part-targets:

- Applying emission reduction strategies as part of liquid manure management in a conventional fattening unit and comparing the resultant emissions with those from a reference system where no emission reduction actions had been taken. The selected emission reduction strategies should be practicable and sustainably applicable in existing livestock housing systems.
- Analysing the main factors of influence on emissions throughout the fattening period during different seasons of the year, with special consideration of time series effects and regressions.
- Examining the possibilities of substance flow modelling, application to own measurement data rather or for assessing the potential of emission reduction methods as well as evaluation of the selected approach for substance flow modelling.

In-barn liquid manure management with fattening pigs markedly influences ammonia and methane emissions whereby the concrete reduction potentials are not yet sufficiently clarified. Within this study, a first work package compares, through a case control approach, the liquid manure management strategies - weekly emptying of the liquid manure channel as well as covering of the underfloor stored liquid manure surface as well as the addition of Effective Microorganisms to the liquid manure – with the strategies tested for emission reduction potential and compared over a feeding cycle in each case with the stored manure method as reference. The pig housing used in the trial was divided into two compartments (experimental and reference compartment) each holding 50 animals. In quasi-continuous measurement, incoming air, compartment and exhaust air ammonia and methane concentrations, temperatures of incoming air, compartment and exhaust air, and the temperature and pH of the liquid manure, were all recorded. Additionally, liquid manure samples were analysed in 14-day rhythm and the level of liquid manure measured as well as the degree of dirtiness of pen floors. Also recorded were pig weights and performance or feeding data. No further differences in terms of feeding, ventilation or management existed between trial and reference compartments.

The applied reduction strategies were able to partially reduce ammonia and methane emissions (weekly emptying of liquid manure channel: methane emission rates reduced by 39 % based on emission rate in grams per day and livestock unit; liquid manure cover: 13.8 % ammonia emission rates reduction in grams per day and livestock unit), had in part no effect, or even a negative influence on the emissions (weekly emptying of the liquid manure channel: no effect on ammonia emissions; liquid manure cover: 119.9 % rise in methane emission rates in terms of grams per day and livestock unit). The selected interval of one week between emptying the liquid manure channel was not sufficient as a reduction strategy. With covering of the liquid manure surface underfloor, it is important to consider

that the almost airtight sealing of the liquid manure surface delivered favourable conditions for methanogenesis. The influence of the addition of Effective Microorganisms to the liquid manure on the emissions of ammonia and methane was marginal. The emissions of ammonia increased of 8.3 % and the emissions of methane of 5.9 %.

The evaluations (time series and regression analyses) of the data from the reference compartments from a total of four feeding cycles (two summer and two winter cycles) comprised the second work package.

The time series analysis enabled insight into the relationships between the ammonia and methane emissions in terms of time, and insights into the influential factors affecting release and transport of the gases. For example, the time-related influences of high temperatures on the system “fattening unit” and on the release of emissions, could be graphically shown. The time series analysis gave indications as to how dynamic, or how stable, climatic conditions can be in pig housing.

The regression analyses clearly showed that the emission process, with ammonia as well as with methane, is influenced particularly through the amount of liquid manure involved, the temperature and the air volume flow. In the same way, the distance between the liquid manure surface and the slatted flooring (‘headspace’) was found to have direct influence on the release of ammonia and methane from the liquid manure. A larger ‘headspace’ correlated with reduced emissions and vice versa.

Following recording and statistical evaluation of the emission data, the contribution that can be made through substance flow modelling of ammonia emissions towards increasing knowledge on the emission process and on methods for its reduction within pig housing was examined as a third work package. This involved the transfer of selected recorded data into the substance flow model. Serving as basis was the model from CORTUS et al. (2010a) adapted in three steps to take account of the conditions in the pig housing being used. The constructional outline of the trial livestock housing served as system limit. Berkeley Madonna 8.3.18 software was used for numerical integration of the differential equation system. Own data was applied for calibration and validation, in each case taken from the reference compartment of two different feeding cycles.

In principle, the adapted model was capable of modelling ammonia concentrations and emissions. In addition, the influence of the liquid manure temperature and pH value of the liquid manure could be depicted. However, the model generally reacted sensitively to temperature and pH values. Because of this, the model underestimated and overestimated recorded values, in part substantially. An important influence on the model accuracy appeared to be related to the submodel considering urine puddles. For the purposes of own modelling, this submodel was cut out of the main model during its adaptation according to the recorded data.

Compared to recordings, modelling of gas concentrations and emissions offers the advantage of cost-efficient and time-saving estimations of emission potential for different housing systems, e.g. for feeding pig production. Calibration and validation, as well as adaptation to suit the type of application requires, however, particular care and expertise.

Through the various methods for measurement, analysis and modelling that were applied, the work reported here contributes to better understanding of the emission process and the reduction of emissions, particularly in the case of liquid manure management in feeding pig production.

9 LITERATURVERZEICHNIS

- AARNINK, A.J.A. (1997): Ammonia emission from houses for growing pigs as affected by pen design, indoor climate and behavior. Dissertation Landbouwniversiteit Wageningen. Niederlande.
ISSN 90-5485-662-9
- AARNINK, A.J.A. & ELZING, A. (1998): Dynamic model for ammonia volatilization in housing with partially slatted floors, for fattening pigs. *Livestock Production Science* 53, S. 153-169
- ADRION, F. (2009): Untersuchungen zur Eignung und Messgenauigkeit eines Multigasmonitors. Bachelorarbeit. Universität Hohenheim. Stuttgart
- ADRION, F. (2012): Simulation der Luftströmung in Mastschweineställen mit unterschiedlicher Zuluftführung. Masterarbeit. Universität Hohenheim Stuttgart
- ADRION, F.; THREM, J.; GALLMANN, E.; PFLANZ, W.; JUNGBLUTH, T. (2013): Simulation der Luftströmung in einem Mastschweinestall mit Unterflurzuluftführung. *KTBL-Tagungsband. 11. Tagung: Bau, Technik und Umwelt 2013*. Darmstadt, S. 200-205
- AGRARHEUTE (2016): Märkte und Preise. Schweine. Erzeugerpreise Schweine.
<http://www.agrarheute.com/markt/schweine>
Zugriff am 25.05.2016
- AHLGRIMM, H.-J. (1995): Beitrag der Landwirtschaft zur Emission klimarelevanter Spurengase - Möglichkeiten zur Reduktion? *Landbauforschung Völkenrode* 45, Nr. 4, S. 191-204
- ALBERT, C. (2013): Untersuchung zur Reduktion der Ammoniakbelastung in einem Mastschweinestall. Techniker Arbeit. Akademie für Landbau. Nürtingen. Deutschland
- ALEXANDRATOS, N. & Bruinsma, J. (2012): World agriculture towards 2030/2050: the 2012 revision. ESA Working paper No. 12-03. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). Rom. Italien
- AMON, B; FRÖLICH, M.; KRYVORUCHKO, V.; AMON, TH. (2004): Einfluss von "Effektiven Mikroorganismen (EM)" auf Ammoniak auf Ammoniak-, Lachgas- und Methanemissionen und auf das Geruchsemissionspotential aus einem Schrägbodenstall für Mastschweine. Endbericht im Auftrag der Multikraft Produktions- und HandelsGmbH. Österreich
- AMON, B.; KRYVORUCHKO, V.; FRÖHLICH, M.; AMON, TH. (2005): Einfluss von Effektiven Mikroorganismen (EM) auf Ammoniak-, Lachgas- und Methanemissionen und auf das Geruchsemissionspotential während der Lagerung von Schweineflüssigmist und- festmist. Endbericht. Universität für Bodenkultur Wien. Österreich

- AMON, B.; KRYVORUCHKO, V.; AMON, TH. (2006): Influence of different methods of covering slurry stores on greenhouse gas and ammonia emissions. International Congress Series 1293, S. 315-318
- AMON, B.; KRYVORUCHKO, V.; FRÖHLICH, M.; AMON, TH.; PÖLLINGER, A.; MÖSENBACHER, I.; HAUSLEITNER, A. (2007): Ammonia and greenhouse gas emissions from a straw flow system for growing/finishing pigs. Housing and manure storage. Livestock Science 112, S. 199-207
- AUSTERMANN, F.; HÖLSCHER, R.; BÜSCHER, W. (2013): Auswirkungen eines reduzierten Schlitzanteils bei funktionsoptimierten Spaltenböden für Mastschweine auf Stallhygiene, Stallklima sowie Fundament- und Klauengesundheit. KTBL-Tagungsband. 12. Tagung: Bau, Technik und Umwelt 2015. Darmstadt, S. 94-99
- BERG, W.; BRUNSCH, R.; PAZISCZKI, I. (2006): Greenhouse gas emissions from covered slurry compared with uncovered during storage. Agriculture, Ecosystems and Environment 112, S. 129-134
- BLANES-VIDAL, V.; HANSEN, M.N.; PEDERSON, S.; ROM, H.B. (2008): Emissions of ammonia, methane and nitrous oxide from pig houses and slurry: Effects of rooting material, animal activity and ventilation flow. Agriculture, Ecosystems and Environment 124, S. 237-244
- BROSE, G. & Montey, G.-J. (2004): Simulationsmodell für Ammoniakemissionen. Landtechnik 55(4), S. 292-293
- BÜHL, A. (2014): SPSS 22 – Einführung in die moderne Datenanalyse. Hallbergmoos, Pearson Deutschland GmbH, 14., aktualisierte Auflage
- BÜSCHER, W. (1996): Ammoniakfreisetzung aus zwangsbelüfteten Stallanlagen mit Flüssigentmischung – Ansätze zu deren Reduzierung. Habilitationsschrift. Agrartechnische Berichte Nr. 27. Universität Hohenheim Stuttgart
- CALVET, S.; GATES, R.S.; ZHANG, G-Q.; ESTELLÉS, F.; OGINK, N.W.M.; PEDERSEN, S.; BERCKMANS, D. (2013): Measuring gas emissions from livestock buildings: A review on uncertainty analysis and error sources. Biosystems Engineering 166, S. 221-231
- CHADWICK, D.; SOMMER, S.; THORMAN, R.; FANGUEIRO, D.; CARDENAS, L.; AMON, B.; MISSELBROCK, T. (2011): Manure management: Implications for greenhouse gas emissions. Animal Feed Science and Technology 166-167, S. 514-531
- CHORIN, A. J. & MARSDEN, J. E. (2013): A Mathematical Introduction to Fluid Mechanics. New York, Springer New York, 3. Auflage
- CLEMENS, J. & AHLGRIMM, H.J. (2001): Greenhouse gases from animal husbandry: mitigation options. Nutrient Cycling in Agroecosystems (60), S. 287-300

- CLEMENS, J.; WOLTER, M.; WULF, S.; AHLGRIMM, H.-J. (2002): Methan-und Lachgas-Emissionen bei der Lagerung und Ausbringung von Wirtschaftsdüngern. KTBL-Schrift 406, Darmstadt, S. 203-214
- CORTUS, E. L.; LEMAY, S. P.; BARBER, E. M. (2010a): Dynamic simulation of ammonia concentration and emission within swine barns: Part I. Model development. ASABE Vol. 53(3), S. 911-923
- CORTUS, E. L.; LEMAY, S. P.; BARBER, E. M. (2010b): Dynamic simulation of ammonia concentration and emission within swine barns: Part II. Model calibration and validation. ASABE Vol. 53(3), S. 925-938
- COSTA, A. & GUARINO, M. (2009): Definition of yearly emission factor of dust and greenhouse gases through continuous measurements in swine husbandry. Atmospheric Environment 43, S. 1548-1556
- DBV (2016): Deutscher Bauernverband. Situationsbericht. Trends und Fakten zur Landwirtschaft. Berlin.
<http://www.bauernverband.de/situationsbericht-2015-16>
Zugriff am 19.05.2016
- DEKOCK, J.; VRANKEN, E.; GALLMANN, E.; HARTUNG, E.; BERKMANS, D. (2009): Optimisation and validation of the intermittent measurement method to determine ammonia emissions from livestock buildings. Biosystems Engineering 104, S. 396-403
- DENTENER, F.; DREVET, J.; LAMARQUE, J.F.; BEY, I.; EICKHOUT, B. (2006): Nitrogen and sulfur deposition on regional and global scales: A multimodel evaluation. Global Biogeochemical Cycles 20
DOI: 10.1029/2005GB002672
Zugriff am 26.05.2016
- DÖHLER, H.; VANDRÉ, R.; RÖBLER, R.; EURICH-MENDEN, B.; WULF, S. (2011a): Ammoniakemissionen: Minderungskosten bei der Lagerung von Flüssigmist. Landtechnik 66(6), S. 465-468
- DÖHLER, H.; VANDRÉ, R.; RÖBLER, R.; WULF, S. (2011b): Ammoniakemissionen: Minderungskosten bei der Ausbringung von Flüssigmist. Landtechnik 66(6), S. 469-472
- DÖRING, M. (2016): schriftliche Mitteilung vom 18.02.2016. Institut für Angewandte Mathematik und Statistik, Universität Hohenheim Stuttgart
- DONG, H.; ZHU, Z.; ZHOU, Z.; XIN, H.; CHEN, Y. (2011): Greenhouse gas emissions from swine manure stored at different stack heights. Animal Feed Science and Technology 166-167, S. 557-561

- DSTATIS (2016): Tiere und tierische Erzeugung. Betriebe mit Schweinen und Schweinebestand für Mai 2015 und November 2015. Statistisches Bundesamt. Wiesbaden. Deutschland
<https://www.destatis.de/DE/ZahlenFakten/Wirtschaftsbereiche/LandForstwirtschaftFischerei/TiereundtierischeErzeugung/AktuellSchweine.html>
Zugriff am 24.05.2016
- EURICH-MENDEN, B.; DÖHLER, H.; HARTUNG, E. (2004): Gute fachliche Praxis der Ammoniak-Emissionsminderung in der Landwirtschaft. Landtechnik 59(2), S. 104-105
- EURICH-MENDEN, B.; DÖHLER, H.; VAN DEN WEGHE, H. (2011): Ammoniakemissionsfaktoren im landwirtschaftlichen Emissionsinventar – Teil 2: Geflügel und Mastschweine. Landtechnik 66 (1), S. 60-63
- EURICH-MENDEN, B. & GRIMM, E. (2013): Messprotokoll. Vorgehensweise zur Ermittlung repräsentativer Emissionsfaktoren - Messprotokoll für zwangsbelüftete Stallsysteme - Beispiel Mastschweine. Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e. V. (KTBL). Darmstadt
- FAO (2009): The State of Food and Agriculture. Livestock in Balance. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). Rom. Italy
- FAO (2016): Animal production. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO).
<http://www.fao.org/animal-production/en/>
Zugriff am 20.05.2016
- FROSCH, W. & BÜSCHER, W. (2002): Flüssigmist-Additive zur Minderung von Ammoniak- und Methanemissionen. Landtechnik 57(3), S. 168-169
- GAILLARD, G.; ALIG, M.; NEMECEK, T. (2015): Zielkonflikte und Lösungswege aus der Sicht der Ökobilanz in der Geflügel-, Schweine- und Rinderhaltung. Tagungsbeitrag. KTBL-Tagung: Herausforderung Tierwohl. Darmstadt, S. 135-154
- GALLMANN, E. (2003): Vergleich von zwei Haltungssystemen für Mastschweine mit unterschiedlichen Lüftungsprinzipien – Stallklima und Emissionen. Forschungsbericht Agrartechnik VDI-MEG Schrift 404, Dissertation. Universität Hohenheim Stuttgart
- GERBER, P.J.; STEINFELD, H.; HENDERSON, B.; MOTTET, A.; OPIO, C.; DIJKMAN, J., FALCUCCI, A. & TEMPIO, G. (2013). Tackling climate change through livestock – A global assessment of emissions and mitigation opportunities. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). Rom. Italien
- GRONOW-SCHUBERT, S. & GALLMANN, E. (2014): Flüssigmistmanagement: Effekte auf die Ammoniak- und Methanemissionen im Mastschweinestall. Landtechnik 69(6), S. 280-289

- GUINGAND, N.; RUGANI, A.; GRANIER, R.; LEBAS, N. (2012): The frequency of emptying slurry on gas and odours emitted by piggeries equipped with flushing systems. International Symposium on Emissions of Gas and Dust from livestock. St-Malo. Frankreich
Zugriff am 14.02.2014
- GYGAX, L. (2014): Warum die Statistik vom Versuchsdesign wissen muss. In: Aktuelle Arbeiten zur artgerechten Tierhaltung. KTBL-Schrift 505. Darmstadt, S. 104-115
- HANSEN, M.N.; HENRIKSEN, K.; SOMMER, S.G. (2006): Observation of production and emission of greenhouse gases and ammonia during storage of solids separated from pig slurry: Effects of covering. Atmospheric Environment 40, S. 4172-4181
- HARTUNG, E. (1995): Entwicklung einer Messmethode und Grundlagenuntersuchung zur Ammoniakfreisetzung aus Flüssigmist. Forschungsbericht Agrartechnik VDI-MEG Schrift 275, Dissertation. Universität Hohenheim Stuttgart
- HARTUNG, E. (2001): Konzeption, Realisierung und Evaluierung einer Versuchseinrichtung zur Entwicklung und differenzierten Beurteilung von Haltungssystemen für Mastschweine. Forschungsbericht Agrartechnik VDI-MEG Schrift 392, Habilitation. Universität Hohenheim Stuttgart
- HARTUNG, E. (2002a): Ammoniak-Emissionen der Rinderhaltung und Minderungsmaßnahmen. In: Emissionen der Tierhaltung – Grundlagen, Wirkungen, Maßnahmen. KTBL-Schrift Nr. 406, Darmstadt, S. 63-72
- HARTUNG, E. (2002b): Methan- und Lachgas-Emissionen der Rinder-, Schweine und Geflügelhaltung. In: Emissionen der Tierhaltung – Grundlagen, Wirkungen, Maßnahmen. KTBL-Schrift Nr. 406, Darmstadt, S. 192-202
- HARTUNG, E. & MONTENY, G.-J. (2000): Emissionen von Methan (CH₄) und Lachgas (N₂O) aus der Tierhaltung. Agrartechnische Forschung 6, Heft 4, S. 62-69
- HARTUNG, J. (1995): Statistik. Lehr- und Handbuch der angewandten Statistik. München - Wien, R. Oldenbourg Verlag GmbH, 10. Auflage
- HÄUBERMANN, A. (2006): Entwicklung und Evaluierung sensorgestützter komplexer Regelstrategien für die Mastschweinehaltung. Forschungsbericht Agrartechnik VDI-MEG Schrift 443, Dissertation. Universität Hohenheim Stuttgart
- HÄUBERMANN, A.; HARTUNG, E.; GALLMANN, E.; JUNGBLUTH, T. (2006). Influence of season, ventilation strategy and slurry removal on methane emissions from pig houses. Agriculture, Ecosystems and Environment 112, S. 115-121

- HEMPEL, S.; WIEDEMANN, L.; AMMON, C.; FIEDLER, M.; SAHA, C.; JANKE, D.; LOEBSIN, C.; FISCHER, J.; AMON, B.; HOFFMANN, G.; MENZ, C.; ZHANG, G.; HALACHMI, I.; DEL PRADO, A.; ESTELLES, F.; BERG, W. (2015a): Determine the flow characteristics of naturally ventilated dairy barns to optimize barn climate. KTBL-Tagungsband: 12. Tagung: Bau, Technik und Umwelt 2015. Darmstadt, S. 346-351
- HEMPEL, S.; AMON, B.; AMMON, C.; HOFFMANN, G.; BERG, W.; MENZ, C.; ZHANG, G.; HALACHMI; DEL PRADO, A.; ESTELLES, F.; BRUNSCH, R.; AMON, T. (2015b): OptiBarn – Optimised animal specific barn climatisation facing temperature rise and increased climate variability. Poster. 16. Internationale Konferenz „Rural-Urban Symbiosis. 8-10 September 2015, Hamburg, Deutschland.
- HÖRNIG, G.; BRUNSCH, R.; BIEGEL, A.; NOACK, M. (2002): Braunkohle mindert Gülleemissionen. Landtechnik 57(2), S. 94-95
- IAASTD (2009): International Assessment of Agricultural Knowledge, Science and Technology for Development. Synthesis Report. Chapter 10: Climate Change. Washington. USA
- INGWERSEN, J.; STEFFENS, K.; HÖGY, P.; WARRACH-SAGI, K.; ZHUNUSBAYEVA, D.; POLTORADNEV, M.; GÄBLER, R.; WIZEMANN, H.-D.; FANGMEIER, A.; WULFMEYER, V.; STRECK, T. (2010): Comparison of Noah simulations with eddy covariance and soil water measurements at a winter wheat stand. Agricultural and Forest Meteorology, Vol. 151, S. 345-355
- JEPPSSON, K.-H. (2011): Greenhouse gas emissions from pig housing. In: Emissionen aus der Tierhaltung. Treibhausgase, Umweltbewertung und Stand der Technik. KTBL-Schrift 491. Darmstadt. S. 178-191
- KAI, P.; KASPERS, B.; VAN KEMPEN, T. (2006): Modeling Sources of Gaseous Emissions in a Pig House with Recharge Pit. ASABE Vol. 49(5), S. 1479-1485
- KECK, M. (1997): Beeinflussung von Raumluftqualität und Ammoniakemissionen aus der Schweinehaltung durch verfahrenstechnische Maßnahmen. Forschungsbericht Agrartechnik VDI-MEG Schrift 299, Dissertation. Universität Hohenheim Stuttgart
- KRAUSE, K.-H., MÜLLER, H.-J.; MÜBLICK, M.; LINKE, S. (2010): Mit intelligenter Lüftung gehen Tiergesundheit, Umweltschutz und Energieeinsparung zusammen. Landtechnik 65(1), S. 15-19
- KRESSE, A. & BÜSCHER, W. (2009): Minderung von Methanemissionen durch Flüssigmistbelüftung im Technikum. Landtechnik 64(2), S. 89-91
- KROMMWEH, M.S.; RÖSMANN, P.; BÜSCHER, W. (2013): Der Modulstall mit Erdwärmetauscher: Zuluftkonditionierung mittels alternativen Gebäude- und Lüftungskonzeptes für zwangsbelüftete Tierställe. KTBL-Tagungsband. 11. Tagung: Bau, Technik und Umwelt 2013. Darmstadt, S. 188-193

- KOSFELD, R. (2014): Zeitreihenanalyse mit R.
<http://www.uni-kassel.de/~rkosfeld/lehre/zeitreihen/Zeitreihenanalyse%20mit%20R.pdf>
Zugriff am 16.07.2015
- KTBL (2012): Ammoniak Emissionsfaktoren und Minderungsmaßnahmen – Milchkuh-, Mastschweine- und Legehennenhaltung. Fachartikel. Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft. Darmstadt. Deutschland
- KTBL (2013): Messprotokoll. Vorgehensweise zur Ermittlung repräsentativer Emissionsfaktoren – Messprotokoll für offene Stallsysteme – Beispiele Milchviehstall. Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e. V. (KTBL). Darmstadt
- KTBL (2014): Ermittlung von Emissionsdaten für die Beurteilung der Umweltwirkungen der Nutztierhaltung (EmiDat). Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e. V. (KTBL). Darmstadt
<https://www.ktbl.de/inhalte/ausgewaehlte-projekte/emidat/>
Zugriff am 09.12.2015
- MACEY, R. I. & OSTER, G. F. (2001): Berkeley Madonna, Modelling and Analysis of Dynamic Systems.
<http://www.berkeleymadonna.com>,
Zugriff am 27.08.2014
- MASSÉ, D.I.; MASSE, L.; CLAVEAU, S.; BENCHAAR, C.; THOMAS, O. (2008): Methane Emissions From Manure Storage. American Society of Agricultural and Biological Engineers. 51(5), S. 1775-1781
- MAZZONI, T. (2011): Zeitreihenanalyse. Einstieg und Aufgaben. Vorlesungsskript der Wirtschaftswissenschaft, Kurs 00889. FernUniversität Hagen
- MEISSNER, P. & VAN DEN WEGHE, H. (2003): Methanemissionen – Vergleich zweier Stallsysteme bei der einstreulosen Mastschweinehaltung. Landtechnik 58(5), S. 322-323
- MEISSNER, P. (2004): Analyse und Bewertung des Emissionsverhaltens eines einstreulosen Mastschweineestalles mit Spülmistung im Vergleich zu Güllelagerung im Stall. Forschungsbericht Agrartechnik VDI-MEG Schrift 425, Dissertation, Georg-August-Universität Göttingen
- MENZI, H. & STEINFELD, H. (2011): Weltweite Entwicklungen und Auswirkungen der Nutztierhaltung auf Klima und Umwelt. In: Emissionen aus der Tierhaltung. Treibhausgase, Umweltbewertung und Stand der Technik. KTBL-Schrift 491. Darmstadt. S. 11-23
- MONTENY, G.J.; GROENSTEIN, C.M.; HILHORST, M.A. (2001): Interactions and coupling between emissions of methane and nitrous oxide from animal husbandry. Nutrient Cycling in Agroecosystems (60), S. 123-132

- MONTENY, G.-J.; BANNINK, A.; CHADWICK, D. (2006): Greenhouse gas abatement strategies for animal husbandry. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 112, S. 163-170
- MUßLICK, M.; BAUER, T.; DONHAUSE, H.; DRMIC, J.; ECKHOF, W.; GERNAND, E.; LINKE, S.; MÜLLER, J.; PILZ, M.; WENTZKE, R. (2015): Alternative raumlufttechnische Konzepte der Emissionsminderung in der Schweinehaltung unter den Gesichtspunkten der Tier- und Umweltschutzes. Bundesministerium für Umweltschutz, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB) Berlin und dem Umweltbundesamt (UBA) Dessau-Roßlau, Deutschland
- NASH, J.E. & Sutcliffe, J.V. (1970): River flow forecasting through conceptual models. Part I - A discussion of principles. *Journal of Hydrology* 10(3), S. 282-290
- NGWABIE, N.M.; JEPPSSON, K.-H.; NIMMERMARK, S.; GUSTAFSSON, G. (2011): Effects of animal and climate parameters on gas emissions from a barn of fattening pigs. *Applied Engineering in Agriculture*, 27(6), S. 1027-1037
- NI, J.Q.; VINCKER, C.; COENEGRACHTS, J.; HENDRIKS, J. (1999): Effect of manure on ammonia emission from a fattening pig house with partly slatted floor. *Livestock Production Science* 59, S. 25-31
- NI, J.-Q.; HENDRIKS, J.; VINCKIER, C.; COENEGRACHTS, J. (2000): Development and validation of a dynamic mathematical model of ammonia release in pig house. *Environment International* 26, S. 105–115
- NICKS, B.; LAITAT, M.; FARNIR, F.; VANDENHEEDE, M.; DÉSION, A.; VERHAEGHE, C.; CANART, B. (2004): Gaseous emissions from deep litter pens with straw or sawdust for growing/finishing pigs. *Animal Science* 78, S. 99-107
- OECD/FAO (2015): Food and Agriculture Organization of the United Nations (2015): OECD-FAO Agricultural Outlook 2015, OECD Publishing, Paris.
DOI: 10.1787/19991142
Zugriff am 28.12.2015
- OLESEN, J. E. & SOMMER, S. G. (1993): Modelling of Effects of wind speed and surface cover on ammonia volatilization from stored pig slurry. *Atmospheric Environment* Vol. 27A, Nr. 16, S. 2567-2574
- OSADA, T.; ROM, H.B.; DAHL, P. (1998): Continous measurements of nitrous oxide and methane emission in pig units by infrared photoacoustic detection. *Transaction of ASAE* 41(4), S. 1109-1114
- PERTAGNOL, J. (2013): Untersuchungen zu verschiedenen Zuluftführungs- und Kühlmöglichkeiten in Mastschweineeställen. Forschungsbericht Agrartechnik VDI-MEG Schrift 526, Dissertation. Universität Hohenheim Stuttgart

- PFLANZ, W. (2007): Gesamtheitliche Beurteilung innovativer Schweinemastverfahren für Baden - Württemberg. Forschungsbericht Agrartechnik VDI-MEG Schrift 466, Dissertation. Universität Hohenheim Stuttgart
- PHILIPPE, F.-X.; LAITAT, M.; CANART, B.; VANDENHEEDE, M.; NICKS, B. (2007a): Comparison of ammonia and greenhouse gas emissions during the growing/finishing of pigs, kept either on fully slatted floor or on deep litter. *Livestock Science* 111, S. 144-152
- PHILIPPE, F.-X.; LAITAT, M.; CANART, B.; VANDENHEEDE, M.; NICKS, B. (2007b): Gaseous emissions during the growing/ finishing of pigs kept either on fully slatted floors or on straw flow. *Animal* 1(10), S. 1515-1523
- PHILIPPE, F.-X.; CABARAUX, J.-F.; BAUDOUIN, N. (2011): Ammonia emissions from pig houses: Influencing factors and mitigation techniques. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 141, S. 245-260
- PHILIPPE, F.-X.; NICKS, B. (2015): Review on greenhouse gas emissions from pig houses: Production of carbon dioxide, methane and nitrous oxide by animals and manure. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 199, S. e10-e25
- PICA-CIAMARRA, U. & OTTE, J. (2009): The "Livestock Revolution": Rhetoric and Reality. Pro-Poor Livestock Policy Initiative. A Living from Livestock. Research Report Nr. 09-05
http://www.fao.org/Ag/againfo/programmes/en/pplpi/docarc/rep-0905_livestockrevolution.pdf
Zugriff am 18.05.2016
- PÖLLINGER, A.; AMON, B.; KRYVORUCHKO, V.; MÖSENBACHER, I.; HAUSLEITNER, A.; AMON, TH. (2004): Emissionen aus einem Schrägbodensystem für Mastschweine. Tagungsbeitrag. Gumpensteiner-Bautagung. Höhere Bundeslehr- und Forschungsanstalt für Landwirtschaft (HBLFA) Raumberg-Gumpenstein. Österreich
- RIGOLOT, C.; ESPAGNOL, S.; POMAR, C.; DOURMAD, J.-Y. (2010a): Modelling of manure production by pigs and NH₃, N₂O and CH₄ emissions. Part I: animal excretion and enteric CH₄, effect of feeding and performance. *Animal*, 4:8, S. 1401-1412
- RIGOLOT, C.; ESPAGNOL, S.; POMAR, C.; DOURMAD, J.-Y. (2010b): Modelling of manure production by pigs and NH₃, N₂O and CH₄ emissions. Part II: effect of animal housing, manure storage and treatment practices. *Animal*, 4:8, S. 1413-1424
- ROJANO, F.; BOURNET, P.-E.; ROBIN, P.; HASSOUNA, M.; CHOI, C.Y.; KACIRA, M. (2015): Analysis of the dynamics of heat and mass transfer in a naturally ventilated poultry house using CFD. KTBL-Tagungsband. 12. Tagung: Bau, Technik und Umwelt 2015. Darmstadt, S. 358-369

- RÖSEMANN, C.; HAENEL, H.-D.; DÄMMGEN, U.; PODDEY, E.; FREIBAUER, A.; WULF, S.; EURICH-MENDEN, B.; DÖHLER, H.; SCHREINER, C.; BAUER, B.; OSTERBURG, B. (2013): Berechnung von gas- und partikelförmigen Emissionen aus der deutschen Landwirtschaft 1990 – 2011. Report zu Methoden und Daten (RMD) Berichterstattung 2013. Thünen Report 1. vTI, Braunschweig. Deutschland
- RÖSEMANN, C.; HAENEL, H.-D.; DÄMMGEN, U.; FREIBAUER, A.; WULF, S.; EURICH-MENDEN, B.; DÖHLER, H.; SCHREINER, C.; BAUER, B.; OSTERBURG, B. (2015): Berechnung von gas- und partikelförmigen Emissionen aus der deutschen Landwirtschaft 1990 – 2013. Report zu Methoden und Daten (RMD) Berichterstattung 2015. Thünen Report 27. vTI, Braunschweig. Deutschland
- RÖBLER, R.; EURICH-MENDEN, B.; VANDRÉ, R.; WULF, S.; DÖHLER, H. (2012): Ammoniakemissionen: Minderungskosten bei der Mastschweinefütterung. Landtechnik 67(1), S. 69-72.
- SCHLAMEUß, A. (2014): Modelle zur Beschreibung der Emissionen und Nährstoffflüsse in der Mastschweinehaltung. Masterarbeit. Universität Hohenheim, Stuttgart
- SCHLITTEG, R. (2012). Angewandte Zeitreihenanalyse mit R. München, Oldenbourg Wissenschaftsverlag GmbH, 2. Auflage
- SCHRADE, S. (2009): Ammoniak- und PM10- Emissionen im Laufstall für Milchvieh mit freier Lüftung und Laufhof anhand einer Tracer-Ratio-Methode. VDI-MEG Schrift 483, Dissertation. Christian-Albrechts-Universität, Kiel
- SEMMLER-BUSCH, U. (2009): Zeitreihenanalyse. Vorlesungsskript "Advanced Methods in Epidemiology" im MSE-NRW-Netzwerk. Heinrich Heine Universität Düsseldorf
- SHOSHANI, E. & HETZRONI, A. (2013): Optimal barn characteristics for high-yielding Holstein cows as derived by a new heat-stress model. Animal 7 (10), S. 176-182
- STEINFELD, H; GERBER, P; WASSENAAR, T; CASTEL, V.; ROSALES, M.; DE HAAN, C. (2006): Livestock's long shadow: environmental issues and options. Livestock, Environment and Development (LEAD) Initiative. Rom. Italien
- STEINGASS, H. (2015): schriftliche Mitteilung vom 27.11.2015. Institut für Nutztierwissenschaften, Fachgebiet Tierernährung, Universität Hohenheim Stuttgart
- UBA (2003): Integrierte Vermeidung und Verminderung der Umweltverschmutzung (IVU-Richtlinie). BVT-Merkblatt „Beste verfügbare Techniken in der Intensivtierhaltung von Geflügel und Schweinen“. Umweltbundesamt. Juli 2003. Dessau. Deutschland

- UBA (2014a): Ammoniak, Geruch und Staub. Umweltbundesamt.
<https://www.umweltbundesamt.de/themen/boden-landwirtschaft/umweltbelastungen-der-landwirtschaft/ammoniak-geruch-staub>
Zugriff am 08.12.2015
- UBA (2014b): Lachgas und Methan. Umweltbundesamt.
<https://www.umweltbundesamt.de/themen/boden-landwirtschaft/umweltbelastungen-der-landwirtschaft/lachgas-methan>
Zugriff am 08.12.2015
- UBA (2014c): Maßnahmen zur Emissionsminderung von Luftschadstoffen. Umweltbundesamt.
<http://www.umweltbundesamt.de/daten/luftbelastung/massnahmen-zur-emissionsminderung-von>
Zugriff am 05.09.2014
- UBA (2015a): Klimarelevante Gase. Umweltbundesamt. Dessau-Roßlau. Deutschland
<https://www.umweltbundesamt.de/daten/land-forstwirtschaft/landwirtschaft/beitrag-der-landwirtschaft-zu-den-treibhausgas>
Zugriff am 08.12.2015
- UBA (2015b): Daten zur Umwelt 2015 – Umwelttrends in Deutschland. Umweltbundesamt.
<http://www.umweltbundesamt.de/publikationen/daten-zur-umwelt-2015>
Zugriff am 08.12.2015
- UBA (2016a): Die Treibhausgase. Umweltbundesamt. Dessau-Roßlau. Deutschland
<https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/klimaschutz-energiepolitik-in-deutschland/treibhausgas-emissionen/ie-treibhausgase>
Zugriff am 24.05.2016
- UBA (2016b): Emissionsquellen. Landwirtschaft. Emissionen aus Stall und Feld.
<https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/klimaschutz-energiepolitik-in-deutschland/treibhausgas-emissionen/emissionsquellen>
Zugriff am 24.05.2016
- UBA (2016c): Berichterstattung unter der Klimarahmenkonvention der vereinten Nationen und dem Kyoto-Protokoll 2016. Nationaler Inventarbericht zum Deutschen Treibhausgasinventar 1990- 2014. Climate Change 23/2016. Umweltbundesamt. Dessau – Roßlau. Deutschland
- VAN DEN WEGHE, H. (2002): Ammoniak-Emissionen der Schweinehaltung und Minderungsmaßnahmen. KTBL-UBA Symposium – Emissionen der Tierhaltung und beste verfügbare Techniken zur Emissionsminderung. KTBL-Schrift 406. Darmstadt. S. 73-93

- VERA (2011): Test Protocol for Livestock Housing and management Systems. Version 2. VERA Secretariat. Charlottenlund. Dänemark.
- VERMEULEN, S. J.; CAMPBELL, B. M.; INGRAM, J. S. I. (2012): Climate Change and Food Systems. *Environment and Resources* 2012.37, S. 195-222.
- WANG, Y.; Dong, H.; Zhu, Z.; Li, L.; Zhou, T.; Jiang, B.; Xin, H. (2016): CH₄, NH₃, N₂O and NO emissions from stored biogas digester effluent of pig manure at different temperatures. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 217, S. 1-12
- WBA (2015): Wissenschaftlicher Beirat Agrarpolitik beim BMEL (2015). Wege zu einer gesellschaftlich akzeptierten Nutztierhaltung. Gutachten. Berlin. Deutschland
- WEBB, J. & MISSELBROOK, T. H. (2004): A mass-flow model of ammonia emissions from UK livestock production. *Atmospheric Environment* 38 (2004), S. 2163–2176
- WEBER, R.; ETTINGER, A.; STEINER, B.; WECHSLER, B.; JUNGBLUTH, T. (2013): Neu entwickelte Entmistungsschieber für Mastschweine. *Landtechnik* 68(4), S. 232-234
- YE, Z.; Zhang, G.; LI, B.; STRØM, J.S.; TONG, G.; DAHL, P.J. (2008): Influence of airflow and liquid properties on the mass transfer coefficient of ammonia in aqueous solutions. *Biosystems Engineering* 100, S. 422-434
- YE, Z.; ZHANG, G.; SEO, I.-H.; KAI, P.; SAHA, C.K.; WANG, C.; LI, B. (2009a): Airflow characteristics at the surface of manure in a storage pit affected by ventilation rate, floor slat opening and headspace height. *Biosystems Engineering* 104, S. 97-105
- YE, Z.; SAHA, C.K.; LI, B.; TONG, G.; WANG, C.; ZHU, S.; ZHANG, G. (2009b): Effect of environmental deflector and curtain on air exchange rate in slurry pit in a model pig house. *Biosystems Engineering* 104, S. 522-533
- YE, Z.; ZHU, S.; KAI, P.; LI, B.; BLANES-VIDAL, V.; PAN, J. WANG, C.; ZHANG, G. (2011): Key factors driving ammonia emissions from a pig house slurry pit. *Biosystems Engineering* 108, S. 195-203
- YIN, S.; VAN'T OOSTER, B.; OGINK, N.W.M.; GROOT KOERKAMP, P.W.G. (2016): Assessment of porous media instead of slatted floor for modelling the airflow and ammonia emission in the pit headspace. *Computers and Electronics in Agriculture* 123, S. 163-175
- ZHANG, R. H.; DAY, D. L.; CHRISTIANSON, L. L.; JEPSON, W. P. (1994): A Computer Model for Predicting Ammonia Release Rates from Swine Manure Pits. *J. agric. Engng Res.* (1994) 58, S. 223-229

ZIENKIEWICZ, O. C.; TAYLOR, R. L.; NITHIARASU, P. (2013): The Finite Element Method for Fluid Dynamics. Butterworth-Heinemann, Oxford, Auflage 7

ZONG, C.; LI, H.; ZHANG, G. (2015). Ammonia and greenhouse gas emissions from fattening pug house with two types of partial pit ventilation systems. Agriculture, Ecosystems and Environment 208, S. 94-105

10 ANHANG

Tabellen

- Tabelle A1: Übersicht zu den Futterinhaltsstoffen der vier Mastdurchgänge A bis D
- Tabelle A2: Übersicht der Signifikanzen zwischen den einzelnen Referenzen (A:B, A:C, B:C) bezogen auf die Temperatur, die relative Luftfeuchtigkeit die NH_3 -, CH_4 - und CO_2 -Konzentrationen an den drei Messstellen sowie die NH_3 -, CH_4 - und CO_2 -Emissionsraten und Emissionsfaktoren, die Volumenströme sowie der Flüssigmisttemperatur und den pH-Wert des Flüssigmists
- Tabelle A3: Übersicht der Signifikanzen zwischen den einzelnen Referenzen (R_A : R_B , R_A : R_C , R_B : R_C) bezogen auf die Temperatur, die relative Luftfeuchtigkeit die NH_3 -, CH_4 - und CO_2 -Konzentrationen an den drei Messstellen sowie die NH_3 -, CH_4 - und CO_2 -Emissionsraten und Emissionsfaktoren, die Volumenströme sowie der Flüssigmisttemperatur und den pH-Wert des Flüssigmists
- Tabelle A4: Übersicht der Signifikanzen zwischen den einzelnen Referenzen (A: R_A , B: R_B , C: R_C) bezogen auf die Temperatur, die relative Luftfeuchtigkeit die NH_3 -, CH_4 - und CO_2 -Konzentrationen an den drei Messstellen sowie die NH_3 -, CH_4 - und CO_2 -Emissionsraten und Emissionsfaktoren, die Volumenströme sowie der Flüssigmisttemperatur und den pH-Wert des Flüssigmists
- Tabelle A5-a: Zusammenfassung der Randparameter und Stallklimafaktoren der vier Behandlungen (A, B, C, D) und deren Referenzen (R_A , R_B , R_C , R_D) auf Basis von Tagesmittelwerten
- Tabelle A5-b: Zusammenfassung der Randparameter und Stallklimafaktoren der vier Behandlungen (A, B, C, D) und deren Referenzen (R_A , R_B , R_C , R_D) auf Basis von Tagesmittelwerten
- Tabelle A5-c: Zusammenfassung der Randparameter und Stallklimafaktoren der vier Behandlungen (A, B, C, D) und deren Referenzen (R_A , R_B , R_C , R_D) auf Basis von Tagesmittelwerten
- Tabelle A6: Übersicht der Randparameter zu den Stallklimafaktoren, den Ammoniak- und Methankonzentrationen, den Ammoniak- und Methanemissionen, den Volumenströmen, Tiergewichten und der Flüssigmisttemperatur und dem pH-Wert des Flüssigmists für die einzelnen Klassen parallel zu den statistischen Auswertungen in Kapitel 3 auf Basis von Tagesmittelwerten
- Tabelle A7: Häufigkeitsverteilung der fünf Volumenstromklassen über alle vier Mastdurchgänge (R_A , R_B , R_C , R_D)
- Tabelle A8: Häufigkeitsverteilung der drei Temperaturklassen über alle vier Mastdurchgänge (R_A , R_B , R_C , R_D)
- Tabelle A9: Übersicht der Regressionsergebnisse bei der Analyse der kompletten (R_A bis R_D) und reduzierten ($R_{A, \text{red}}$ - $R_{D, \text{red}}$) Datensätze der Referenzabteile bei Anwendung der Auswertungsvarianten A, B, C für die Ammoniakemissionen [g h^{-1}]
- Tabelle A10: Übersicht der Regressionsergebnisse bei der Analyse der kompletten (R_A bis R_D) und reduzierten ($R_{A, \text{red}}$ - $R_{D, \text{red}}$) Datensätze der Referenzabteile bei Anwendung der Auswertungsvarianten A, B, C für die Methanemissionen [g h^{-1}]

Abbildungen

- Abbildung A1: Verlauf der Abteil- (links) und Ablufttemperaturen (rechts) auf Ebene von Tagesmittelwerten in den drei Mastdurchgängen (A, B, C) sowie deren Referenzen (R_A , R_B , R_C)
- Abbildung A2: Verlauf der Volumenströme [$\text{m}^3 \text{h}^{-1}$] (links) und [$\text{m}^3 \text{h}^{-1} \text{GV}^{-1}$] (rechts) auf Ebene von Tagesmittelwerten in den drei Mastdurchgängen (A, B, C) sowie deren Referenzen (R_A , R_B , R_C)
- Abbildung A3: Verlauf der Einzeltiergewichte auf Ebene von Tagesmittelwerten in den drei Mastdurchgängen (A, B, C) sowie deren Referenzen (R_A , R_B , R_C)
- Abbildung A4: Einteilung der Buchten 1 und 2 im Abteil „Süd“ für die Erhebung der Verschmutzungsprofile
- Abbildung A5: Einteilung der Buchten 3 und 4 im Abteil „Nord“ für die Erhebung der Verschmutzungsprofile
- Abbildung A6: Verlauf der Verschmutzungsprofile in den Buchten 1 und 2 über den gesamten Mastverlauf in Behandlung A im Abteil „Süd“ (Versuchsabteil; Darstellung 14-täglich)
- Abbildung A7: Verlauf der Verschmutzungsprofile in den Buchten 3 und 4 über den gesamten Mastverlauf in Behandlung A im Abteil „Nord“ (Referenzabteil; Darstellung 14-täglich)
- Abbildung A8: Verlauf der Verschmutzungsprofile in den Buchten 1 und 2 über den gesamten Mastverlauf in Behandlung B im Abteil „Süd“ (Referenzabteil; Darstellung 14-täglich)
- Abbildung A9: Verlauf der Verschmutzungsprofile in den Buchten 3 und 4 über den gesamten Mastverlauf in Behandlung B im Abteil „Nord“ (Versuchsabteil; Darstellung 14-täglich)
- Abbildung A10: Verlauf der Verschmutzungsprofile in den Buchten 1 und 2 über den gesamten Mastverlauf in Behandlung C im Abteil „Süd“ (Referenzabteil; Darstellung 14-täglich)
- Abbildung A11: Verlauf der Verschmutzungsprofile in den Buchten 3 und 4 über den gesamten Mastverlauf in Behandlung C im Abteil „Nord“ (Versuchsabteil; Darstellung 14-täglich)
- Abbildung A12: Verläufe der Ammoniakkonzentration im Abteil (links) und in der Abluft (rechts) auf Ebene von Tagesmittelwerten für die drei Mastdurchgänge (A, B, C), sowie deren Referenzen (R_A , R_B , R_C)
- Abbildung A13: Verläufe der Methankonzentration im Abteil (links) und in der Abluft (rechts) auf Ebene von Tagesmittelwerten für die drei Mastdurchgänge (A, B, C), sowie deren Referenzen (R_A , R_B , R_C)
- Abbildung A14: Box-Plots der Ammoniakemissionsraten [$\text{g Tag}^{-1} \text{GV}^{-1}$] (oben) und Ammoniakemissionsfaktoren [$\text{kg Tierplatz}^{-1} \text{und Jahr}^{-1}$] (unten) auf Ebene von Tagesmittelwerten für die drei Behandlungen (A, B, C) sowie deren Referenzen (R_A , R_B , R_C)
- Abbildung A15: Box-Plots der Methanemissionsraten [$\text{g Tag}^{-1} \text{GV}^{-1}$] (oben) und Methanemissionsfaktoren [$\text{kg Tierplatz}^{-1} \text{und Jahr}^{-1}$] (unten) auf Ebene von Tagesmittelwerten für die drei Behandlungen (A, B, C) sowie deren Referenzen (R_A , R_B , R_C)

Tabelle A1: Übersicht zu den Futterinhaltsstoffen der vier Mastdurchgänge A bis D

Mastdurchgang Phase	Trockenmasse [%]	Energie¹ [MJ kg⁻¹]	Rohprotein [g kg⁻¹]	Lysin¹ [g kg⁻¹]	Methionin¹ [g kg⁻¹]	Cystin¹ [g kg⁻¹]
A						
Vormast (30-60 kg)	88,8	15,0	204,0	14,0	3,5	3,9
Mittelmast (60-80 kg)	88,7	15,4	187,0	12,3	3,4	3,6
Endmast (80 kg - Ende)	88,0	15,6	173,0	12,2	3,1	3,6
B						
Vormast (30-60 kg)	88,9	14,6	193,0	12,7	3,3	3,1
Mittelmast (60-80 kg)	87,5	15,4	199,0	13,0	3,4	3,4
Endmast (80 kg - Ende)	87,7	15,2	185,0	12,0	2,7	4,0
D*						
Vormast (30-60 kg)	88,5	15,3	189,0	13,0	3,4	3,6
Mittelmast (60-80 kg)	88,8	15,0	177,0	12,2	3,2	3,4
Endmast (80 kg - Ende)	88,4	15,3	178,0	12,0	3,2	3,6
C						
Vormast (30-60kg)	89,0	15,3	196,0	13,0	3,4	4,0
Mittelmast (60-80 kg)	88,2	15,3	192,0	12,0	2,9	3,6
Endmast (80 kg - Ende)	87,4	15,1	175,0	10,5	2,7	3,5

*Dieser Mastdurchgang wurde nur in die Statistischen Auswertungen im Kapitel 3 einbezogen.

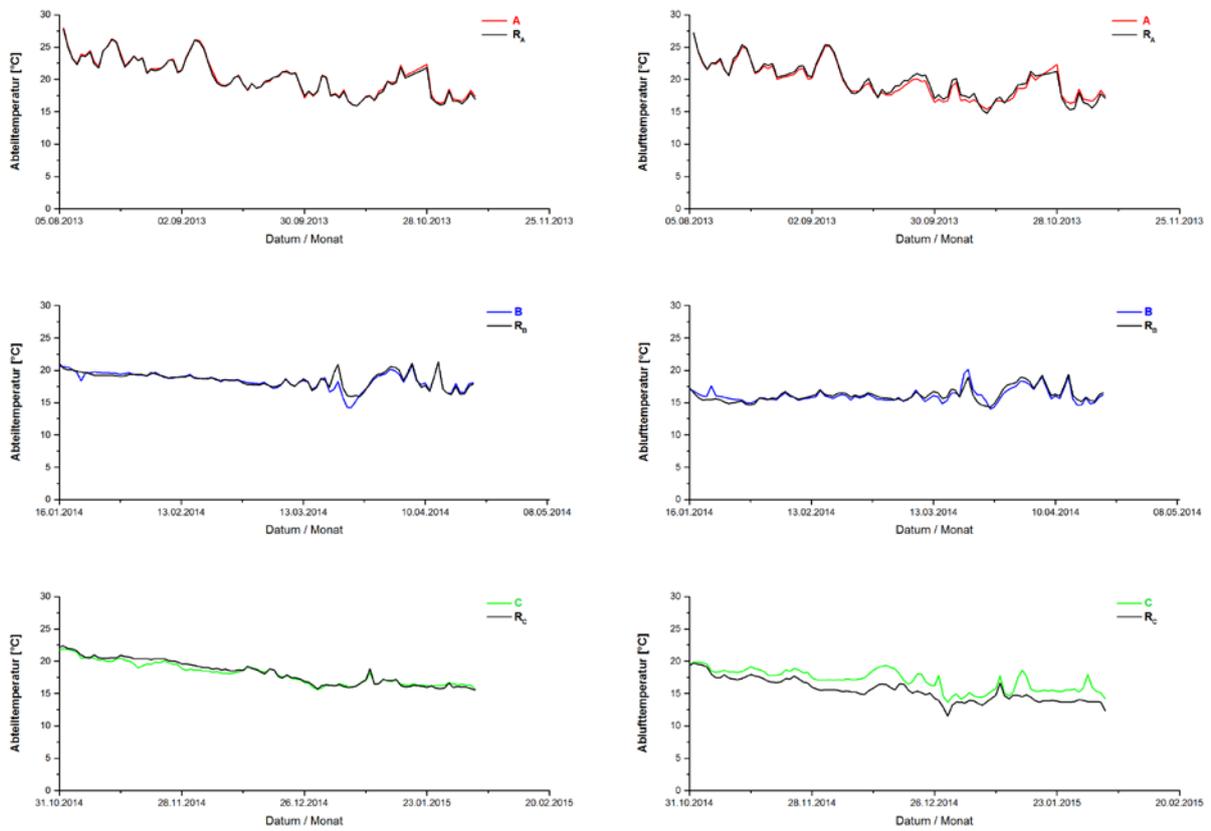


Abbildung A1: Verlauf der Abteil- (links) und Ablufttemperaturen (rechts) auf Ebene von Tagesmittelwerten in den drei Mastdurchgängen (A, B, C) sowie deren Referenzen (R_A , R_B , R_C)

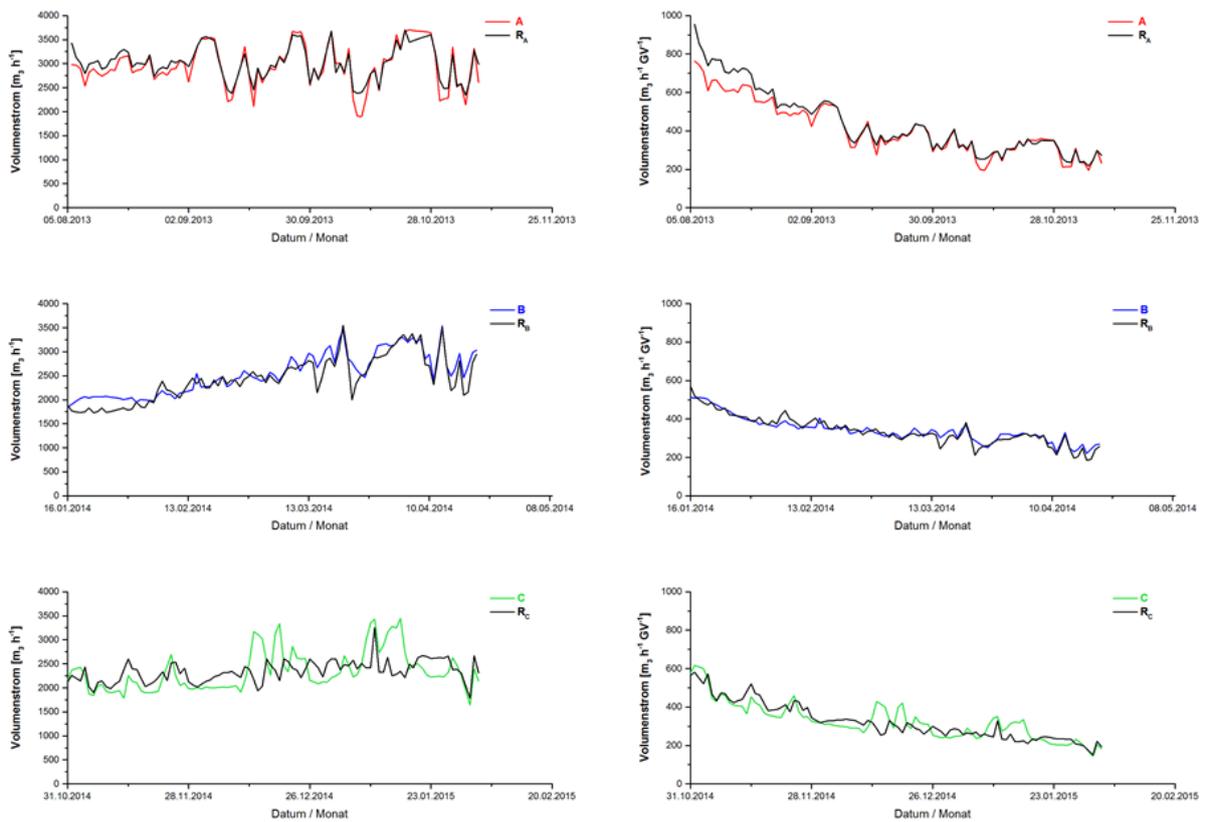


Abbildung A2: Verlauf der Volumenströme [$m^3 h^{-1}$] (links) und [$m^3 h^{-1} GV^{-1}$] (rechts) auf Ebene von Tagesmittelwerten in den drei Mastdurchgängen (A, B, C) sowie deren Referenzen (R_A , R_B , R_C)

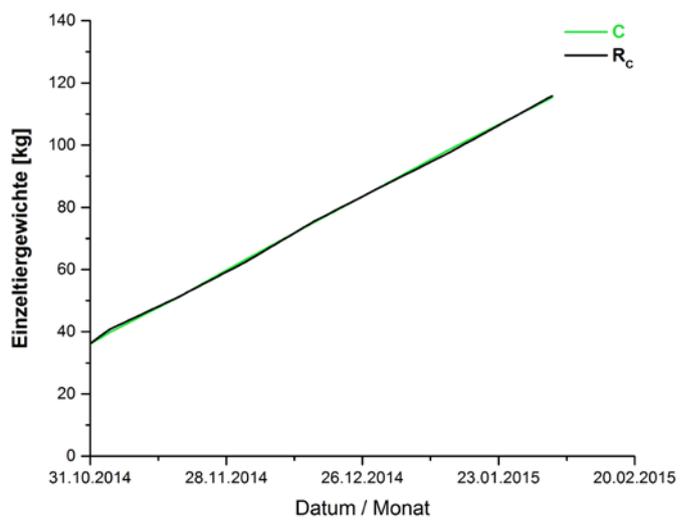
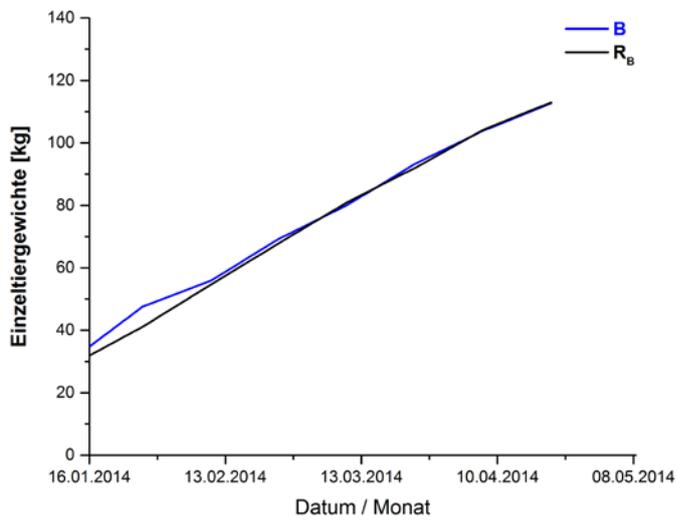
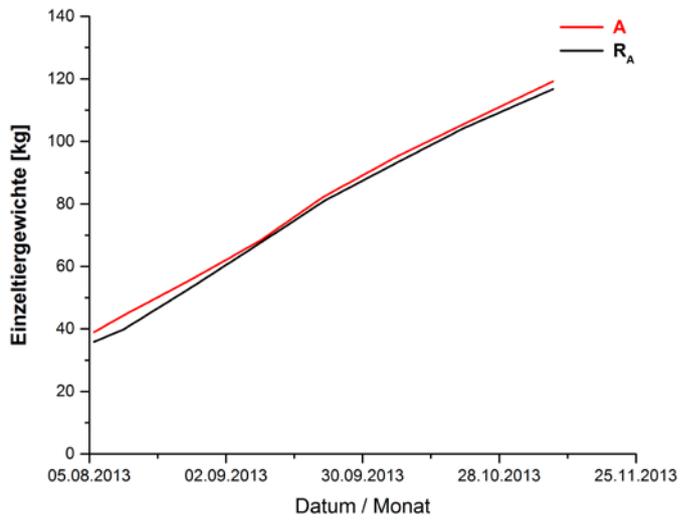


Abbildung A3: Verlauf der Einzeltiergewichte auf Ebene von Tagesmittelwerten in den drei Mastdurchgängen (A, B, C) sowie deren Referenzen (R_A , R_B , R_C)

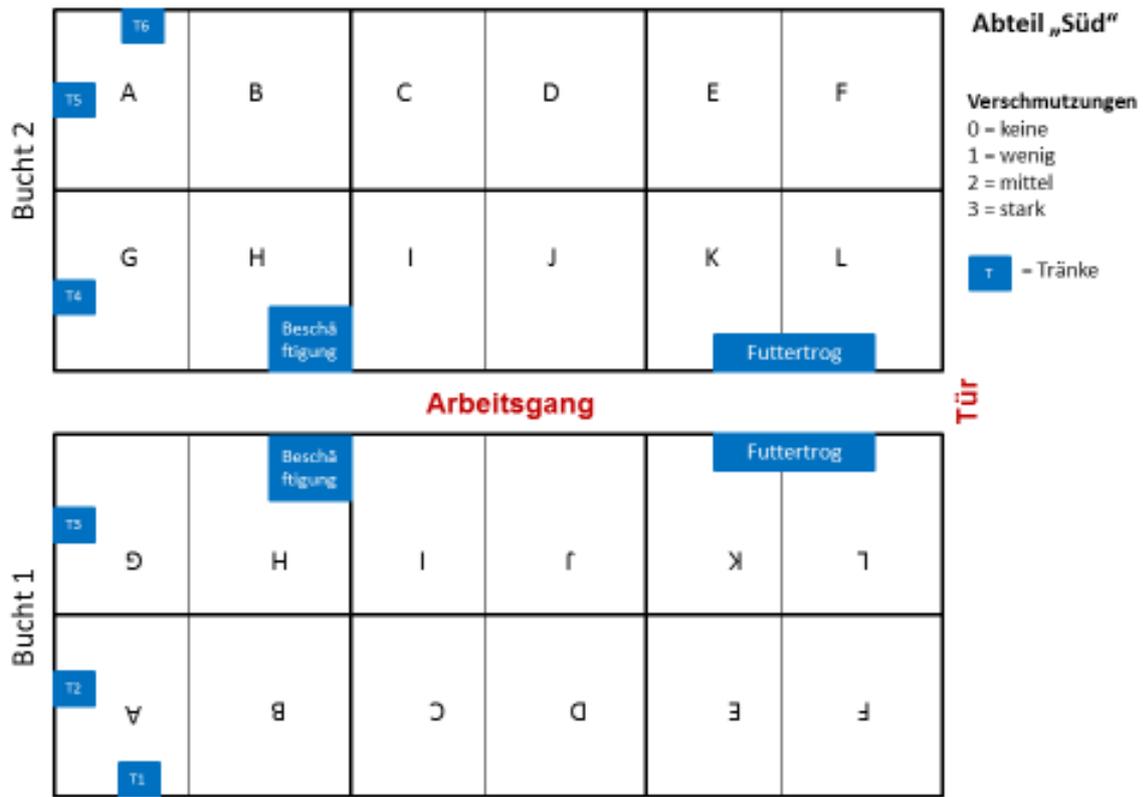


Abbildung A4: Einteilung der Buchten 1 und 2 im Abteil „Süd“ für die Erhebung der Verschmutzungsprofile

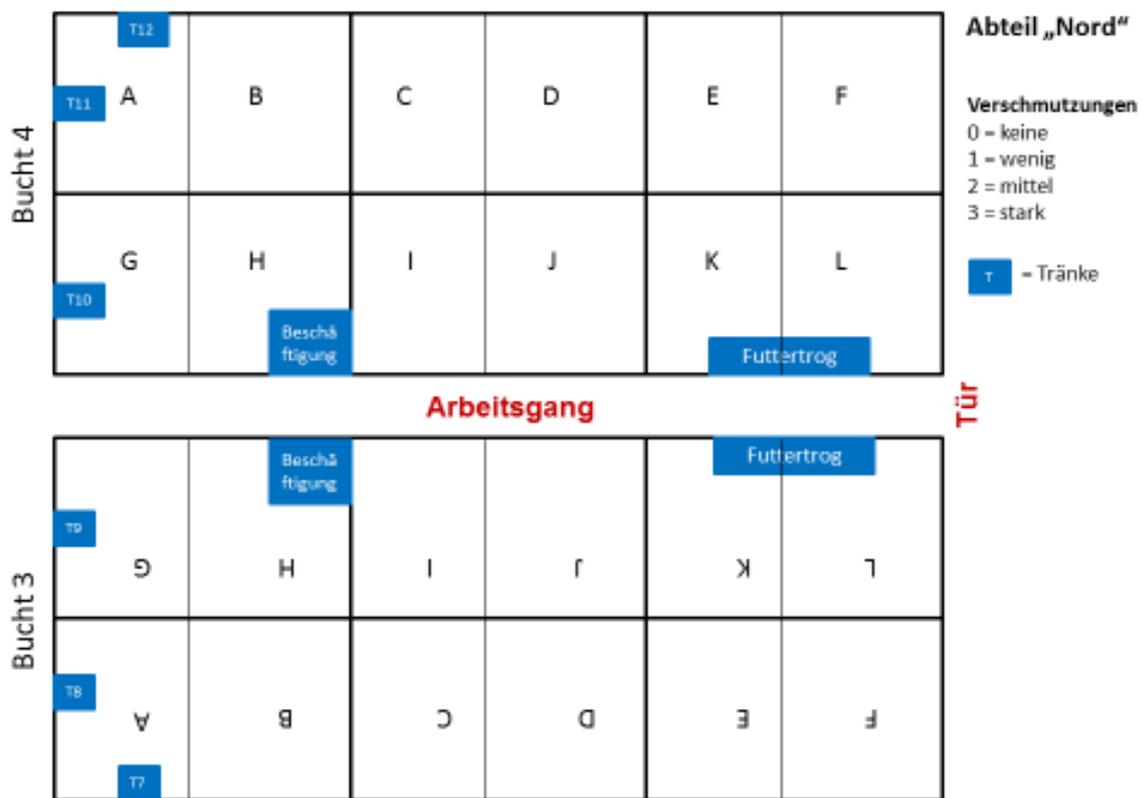


Abbildung A5: Einteilung der Buchten 3 und 4 im Abteil „Nord“ für die Erhebung der Verschmutzungsprofile

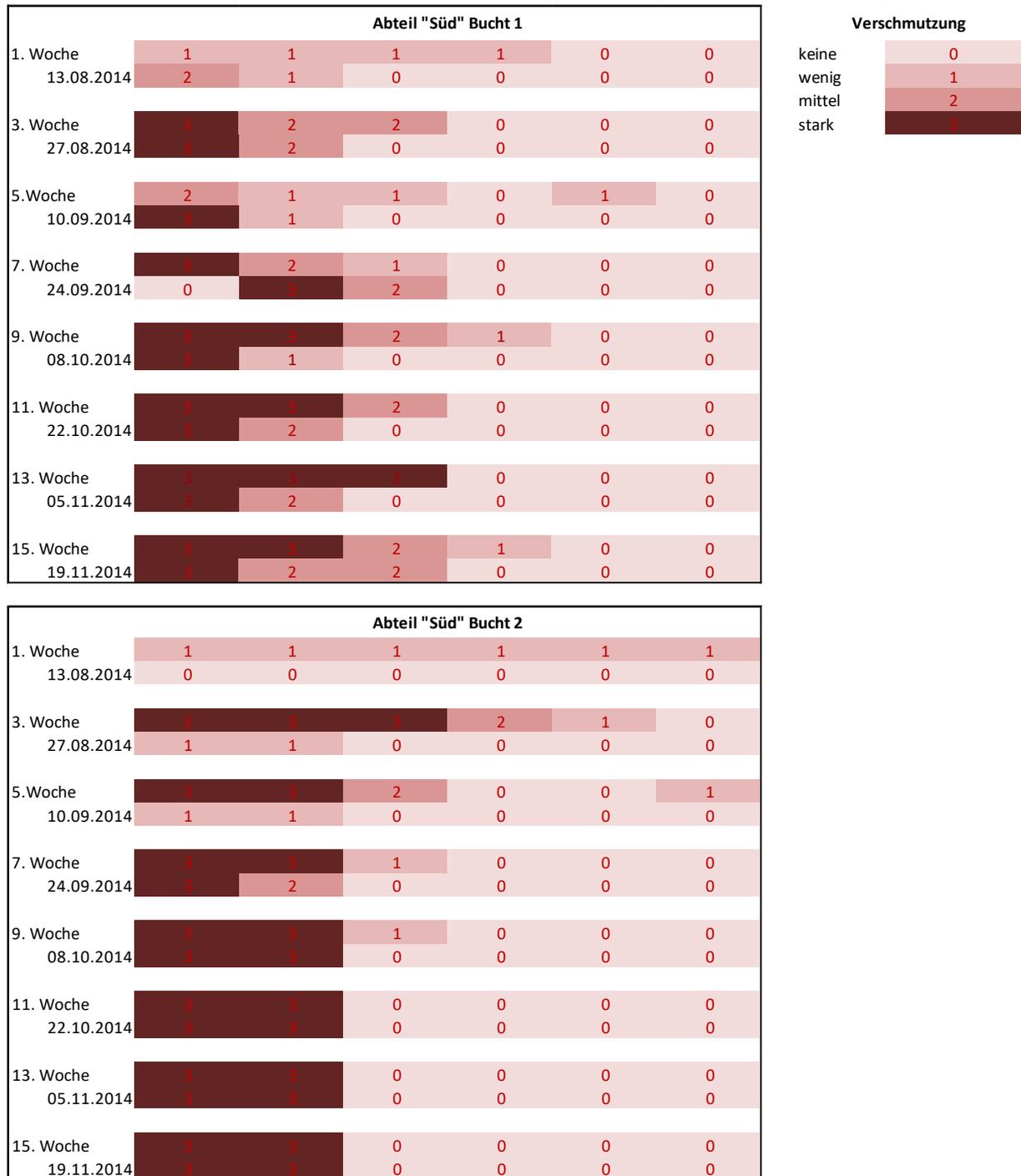


Abbildung A6: Verlauf der Verschmutzungsprofile in den Buchten 1 und 2 über den gesamten Mastverlauf in Behandlung A im Abteil „Süd“ (Versuchsabteil, Darstellung 14-täglich)

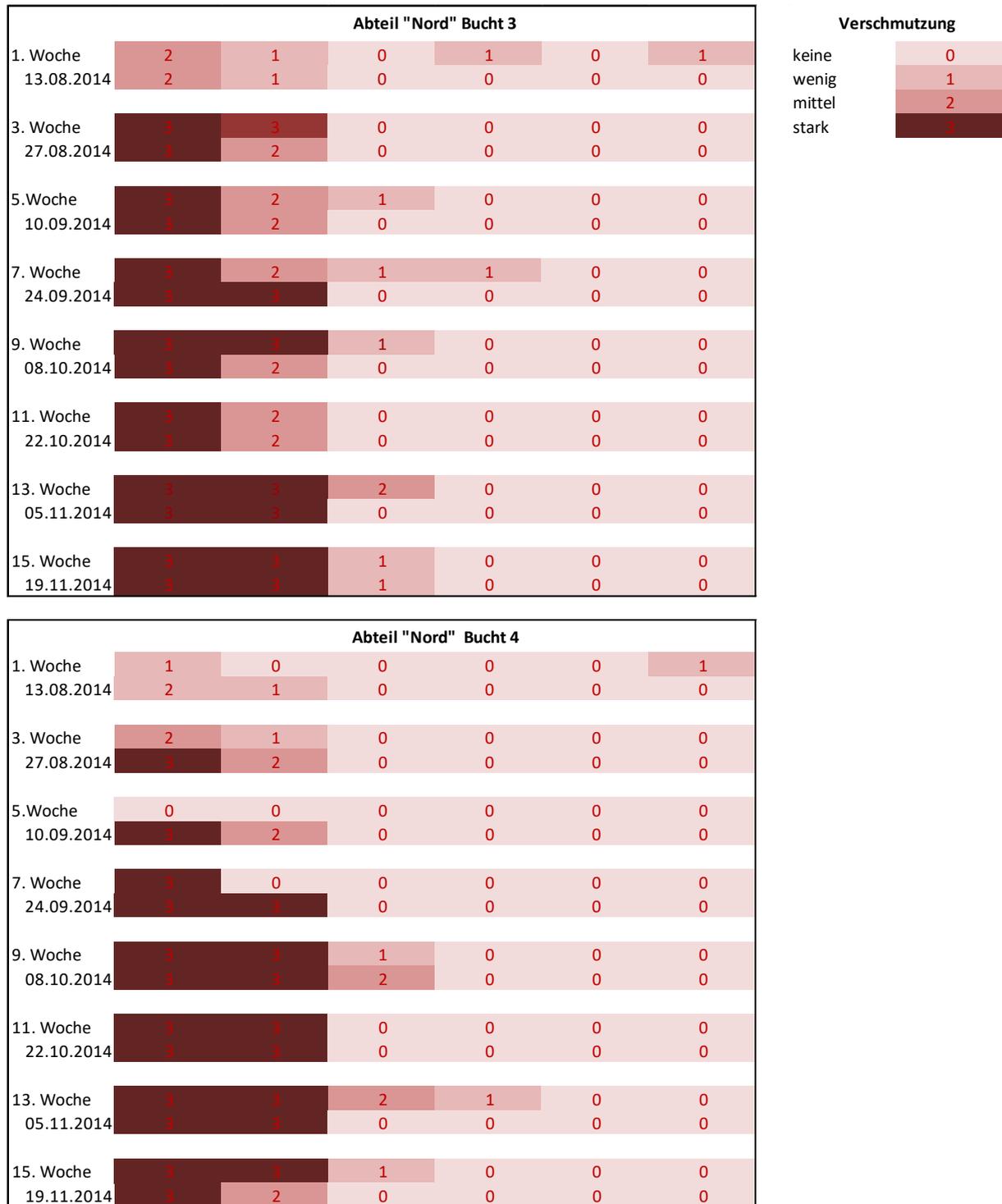


Abbildung A7: Verlauf der Verschmutzungsprofile in den Buchten 3 und 4 über den gesamten Mastverlauf in Behandlung A im Abteil „Nord“ (Referenzabteil, Darstellung 14-täglich)

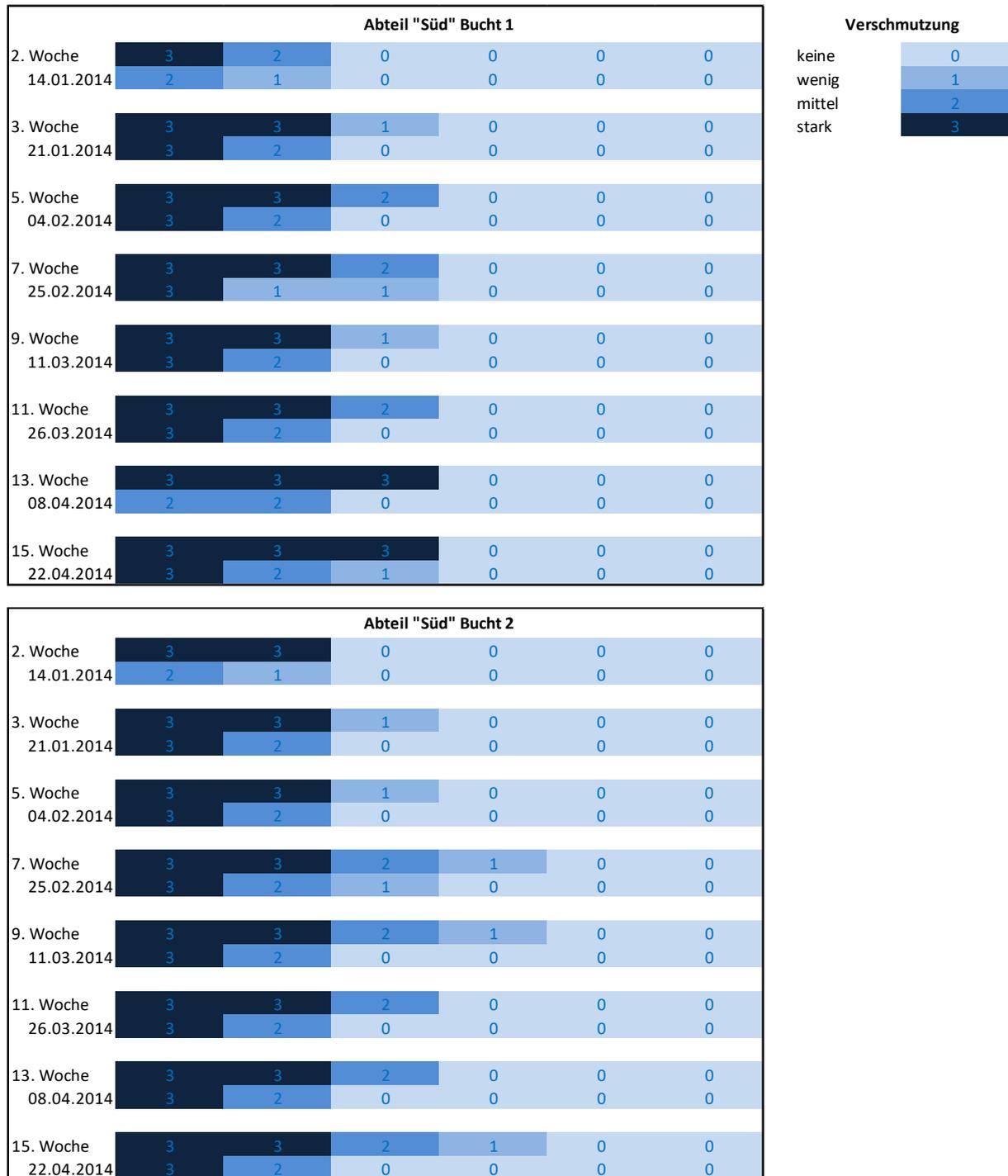


Abbildung A8: Verlauf der Verschmutzungsprofile in den Buchten 1 und 2 über den gesamten Mastverlauf in Behandlung B im Abteil „Süd“ (Referenzabteil, Darstellung 14-täglich)

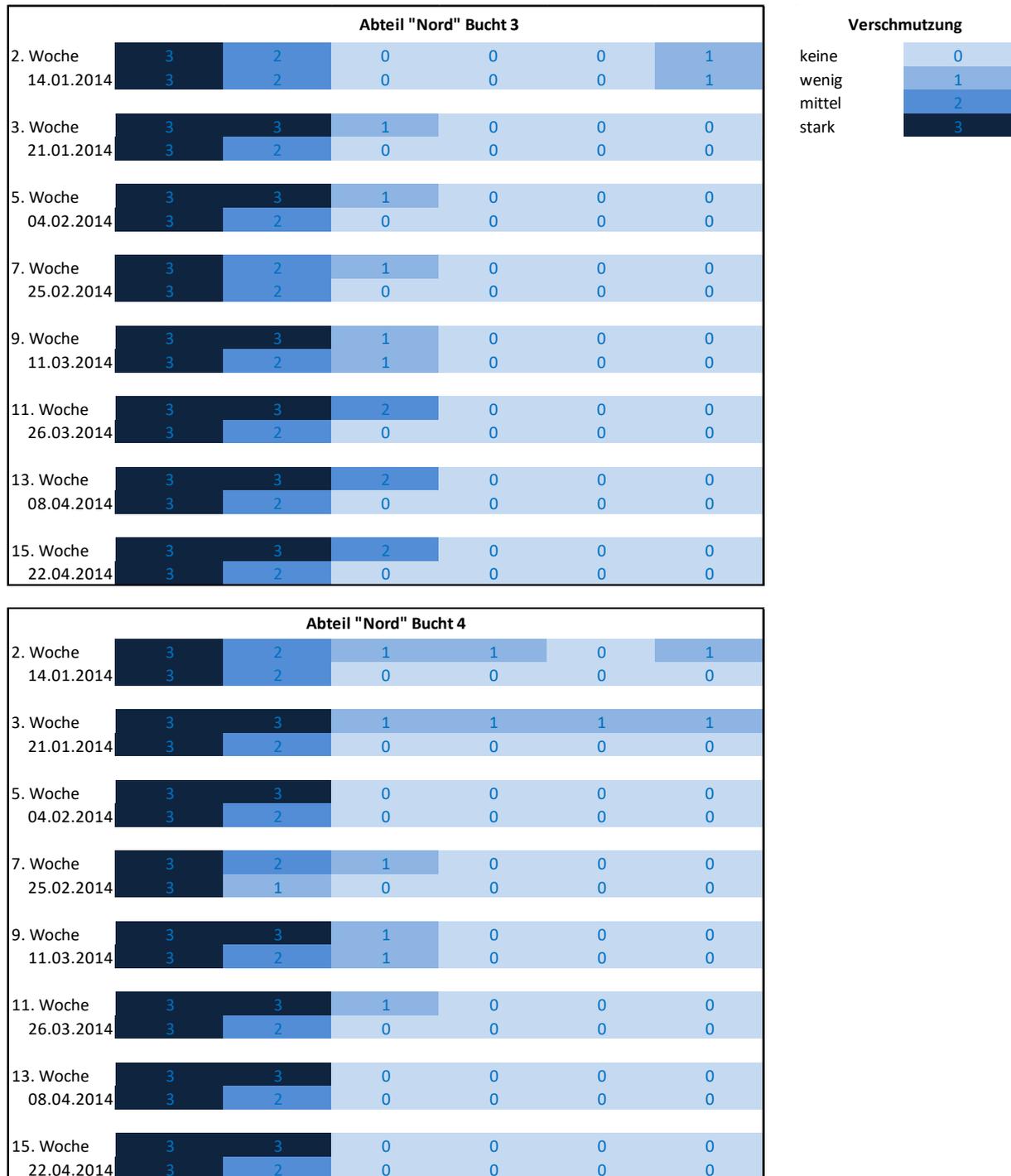


Abbildung A9: Verlauf der Verschmutzungsprofile in den Buchten 3 und 4 über den gesamten Mastverlauf in Behandlung B im Abteil „Nord“ (Versuchsabteil, Darstellung 14-täglich)

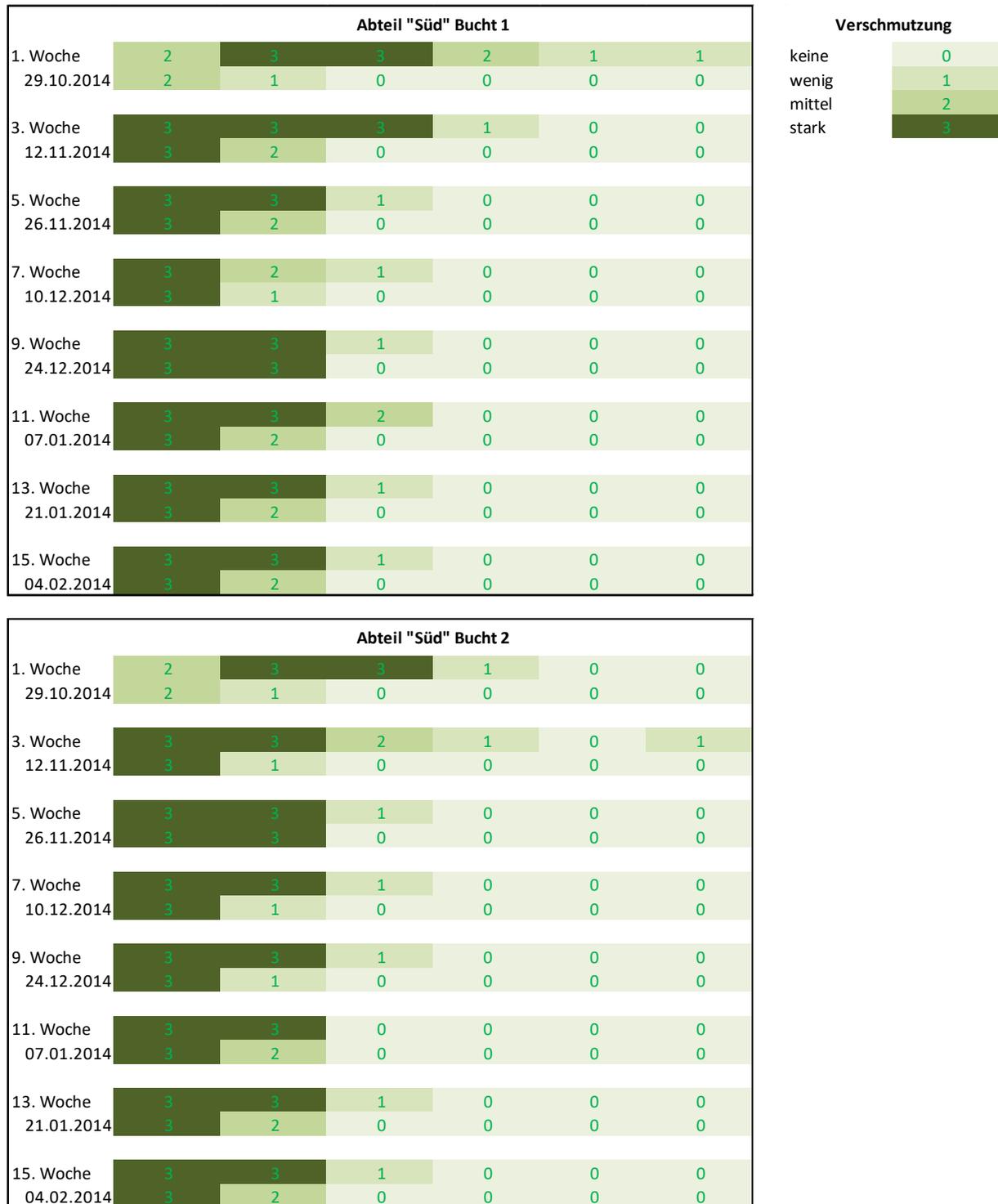


Abbildung A10: Verlauf der Verschmutzungsprofile in den Buchten 1 und 2 über den gesamten Mastverlauf in Behandlung C im Abteil „Süd“ (Referenzabteil, Darstellung 14-täglich)

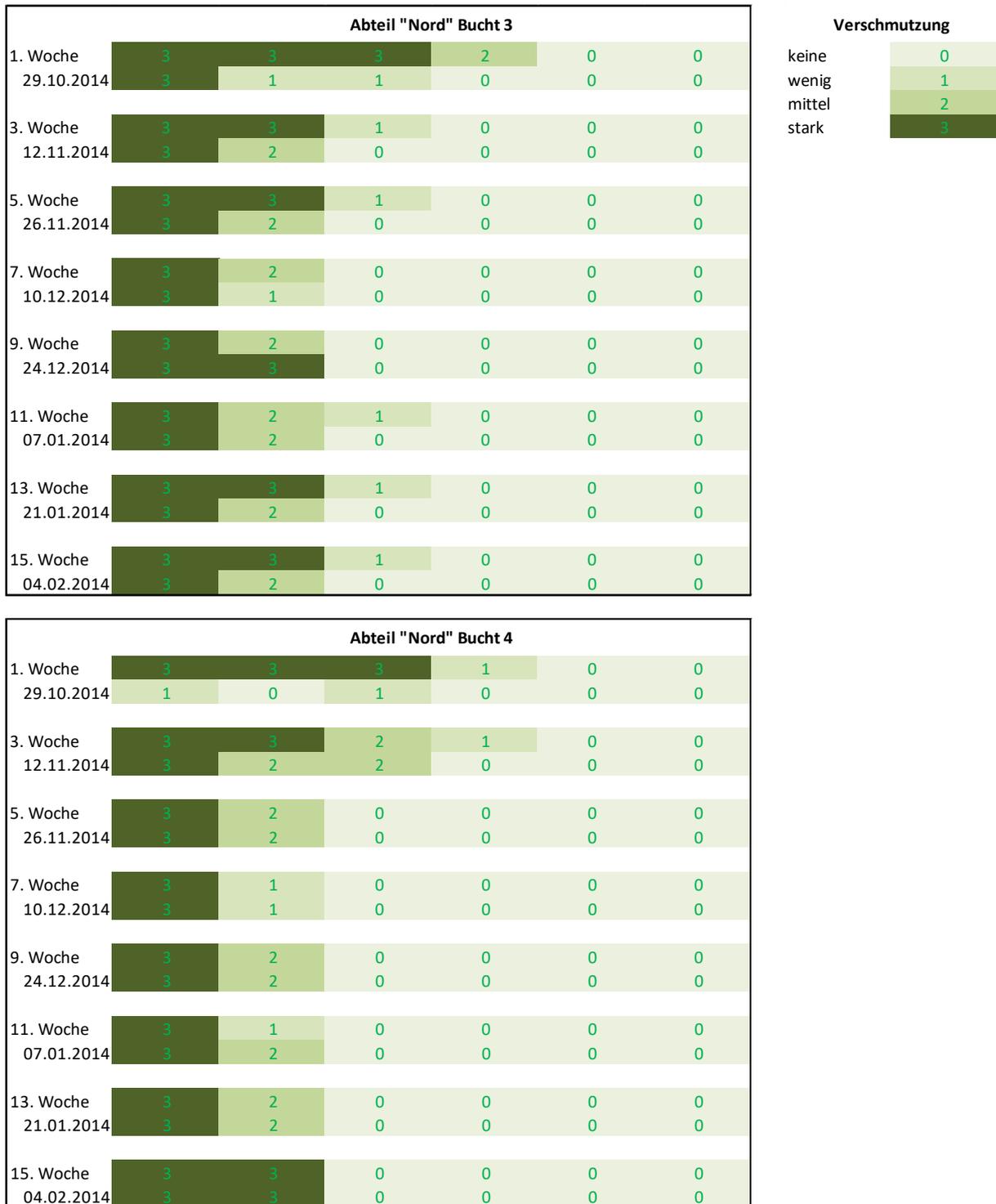


Abbildung A11: Verlauf der Verschmutzungsprofile in den Buchten 3 und 4 über den gesamten Mastverlauf in Behandlung C im Abteil „Nord“ (Versuchsabteil, Darstellung 14-täglich)

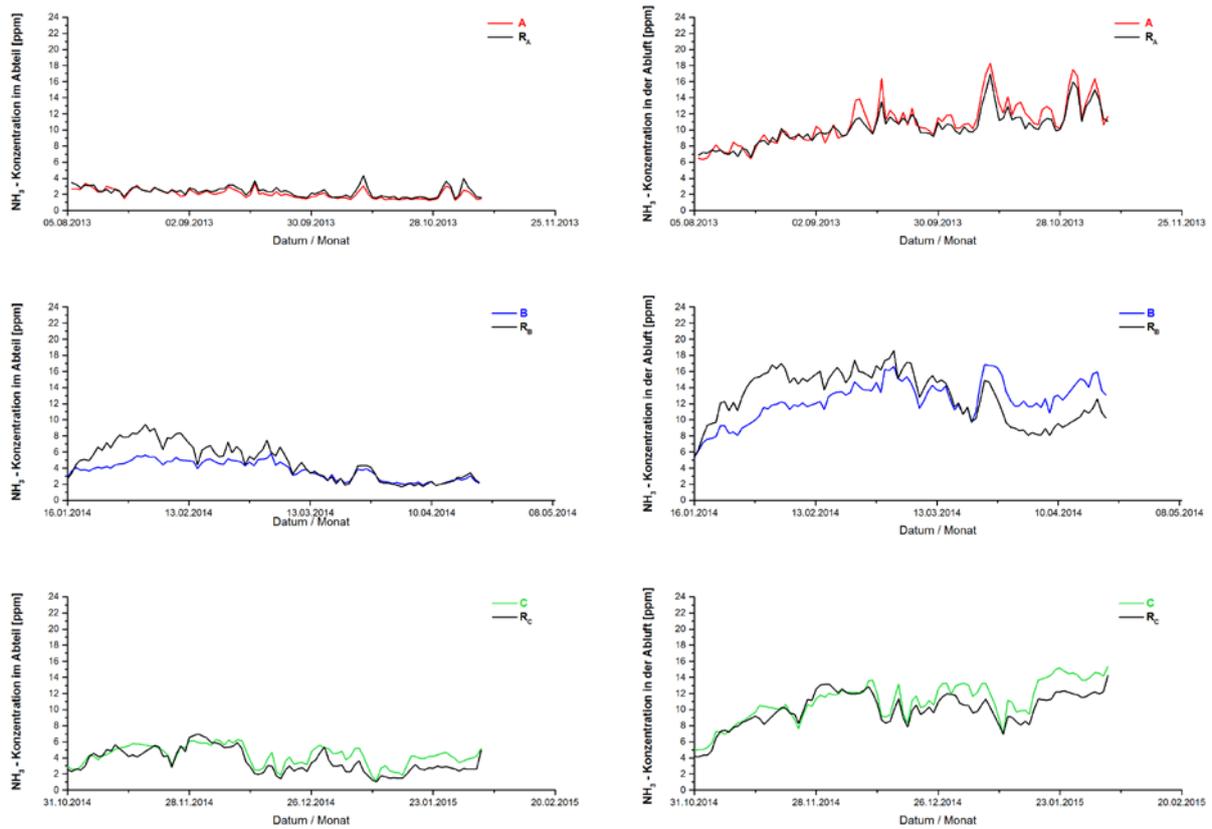


Abbildung A12: Verläufe der Ammoniakkonzentration im Abteil (links) und in der Abluft (rechts) auf Ebene von Tagesmittelwerten für die drei Mastdurchgänge (A, B, C), sowie deren Referenzen (R_A , R_B , R_C)

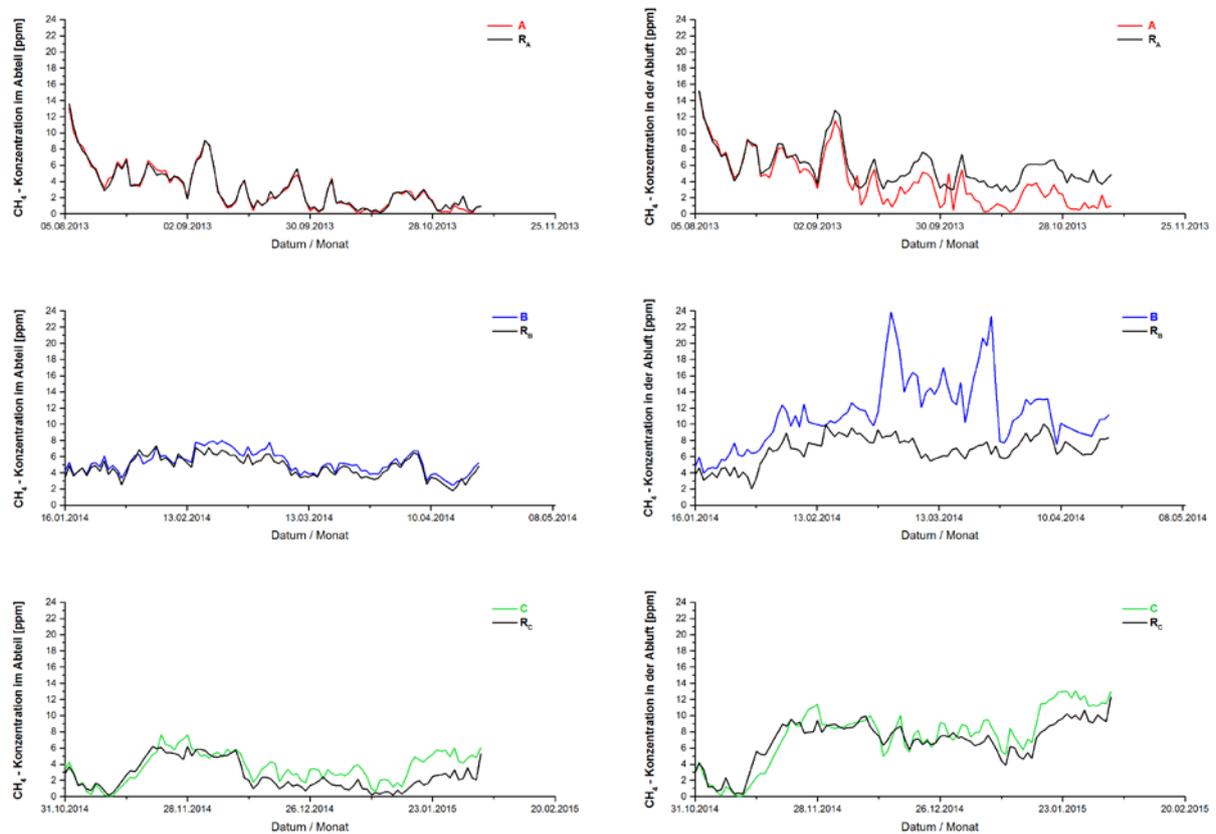


Abbildung A13: Verläufe der Methankonzentration im Abteil (links) und in der Abluft (rechts) auf Ebene von Tagesmittelwerten für die drei Mastdurchgänge (A, B, C), sowie deren Referenzen (R_A , R_B , R_C)

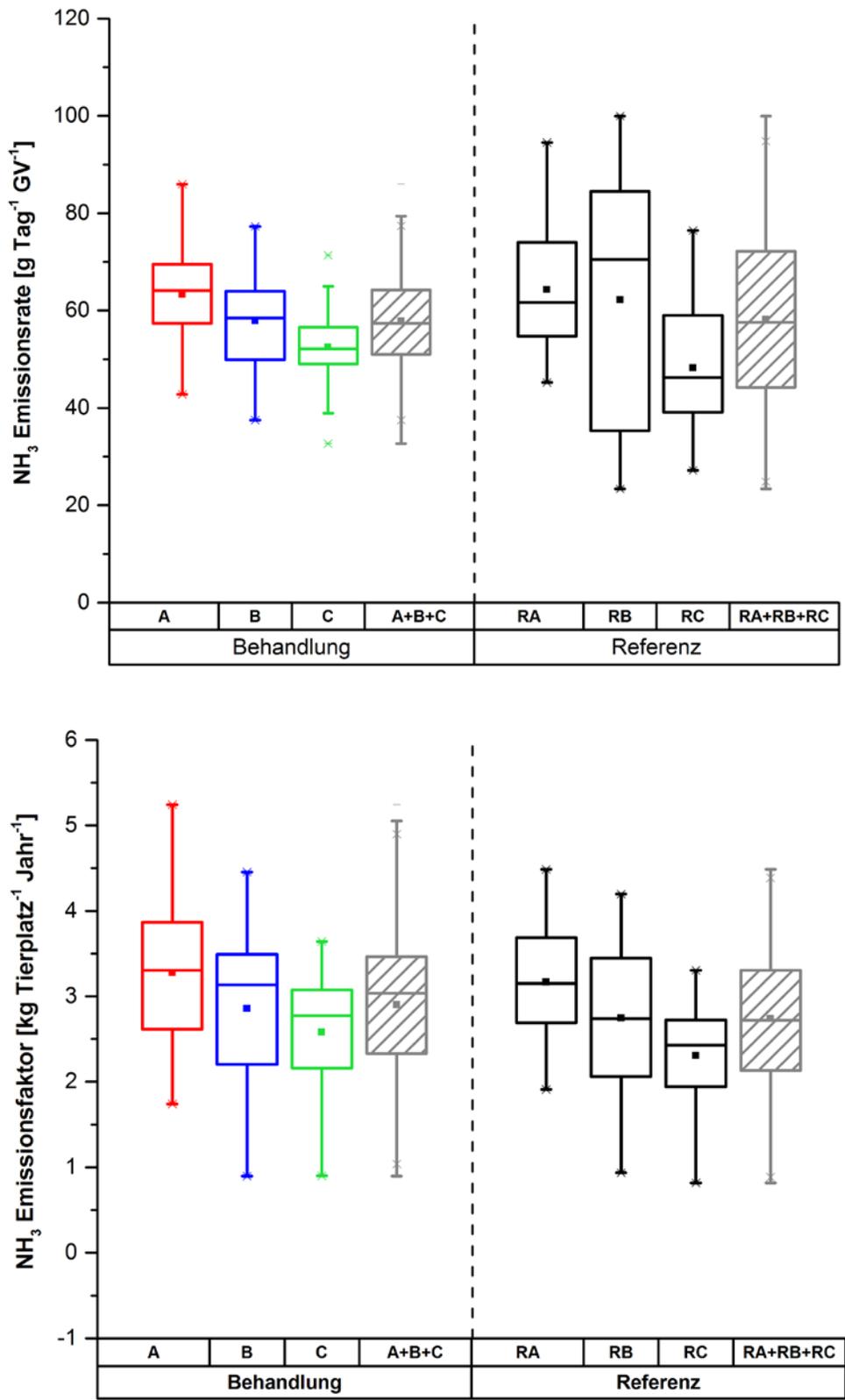


Abbildung A14: Box-Plots der Ammoniakemissionsraten $[\text{g Tag}^{-1} \text{GV}^{-1}]$ (oben) und Ammoniakemissionsfaktoren $[\text{kg Tierplatz}^{-1} \text{Jahr}^{-1}]$ (unten) auf Ebene von Tagesmittelwerten für die drei Behandlungen (A, B, C) sowie deren Referenzen (R_A , R_B , R_C)

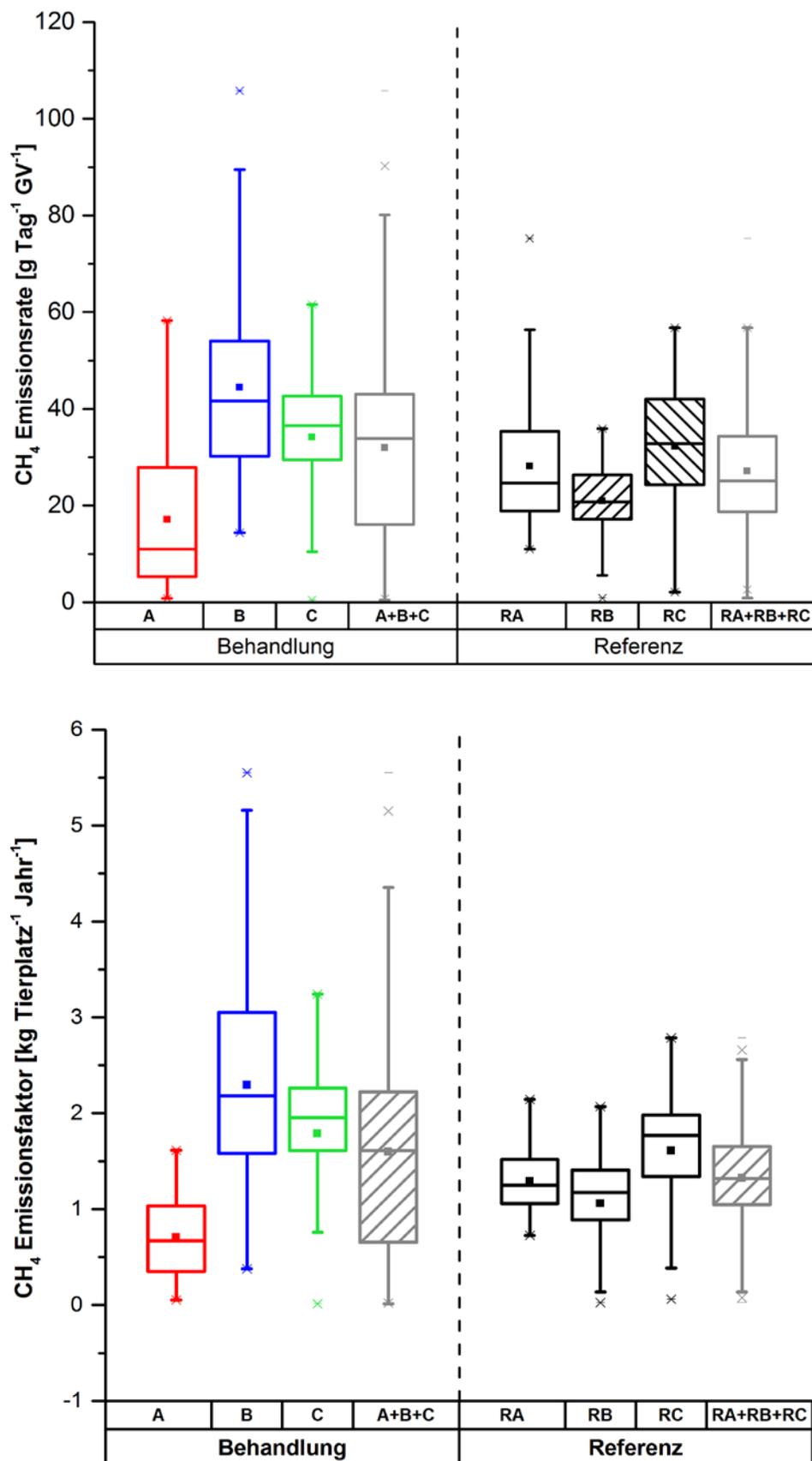


Abbildung A15: Box-Plots der Methanemissionsraten [g Tag⁻¹ GV⁻¹] (oben) und Methanemissionsfaktoren [kg Tierplatz⁻¹ Jahr⁻¹] (unten) auf Ebene von Tagesmittelwerten für die drei Behandlungen (A, B, C) sowie deren Referenzen (R_A, R_B, R_C)

Tabelle A2: Übersicht der Signifikanzen zwischen den einzelnen Referenzen (A:B, A:C, B:C) bezogen auf die Temperatur, die relative Luftfeuchtigkeit die NH₃-, CH₄- und CO₂-Konzentrationen an den drei Messstellen sowie die NH₃-, CH₄- und CO₂-Emissionsraten und Emissionsfaktoren, die Volumenströme sowie der Flüssigmisttemperatur und den pH-Wert des Flüssigmists

Messstellen	Parameter	Vergleich			
		Behandlungen A, B, C	A:B	A:C	B:C
Zuluft	Temperatur [°C]		***	***	***
	Relative Luftfeuchte [%]		***	*	***
	NH ₃ Konzentration [ppm]		***	***	***
	CH ₄ Konzentration [ppm]		***	***	***
	CO ₂ Konzentration [ppm]		***	***	***
Abteil	Temperatur [°C]		***	***	n.s.
	Relative Luftfeuchte [%]		***	***	***
	NH ₃ Konzentration [ppm]		***	***	**
	CH ₄ Konzentration [ppm]		***	*	***
	CO ₂ Konzentration [ppm]		***	***	**
Abluft	Temperatur [°C]		***	***	***
	Relative Luftfeuchte [%]		**	***	***
	NH ₃ Konzentration [ppm]		***	n.s.	***
	CH ₄ Konzentration [ppm]		***	***	***
	CO ₂ Konzentration [ppm]		***	***	***
	Volumenstrom [m ³ h ⁻¹ Tier ⁻¹]		***	***	**
	Volumenstrom [m ³ h ⁻¹ GV ⁻¹]		n.s.	***	***
	NH ₃ Emissionsrate [g Tag ⁻¹ GV ⁻¹]		n.s.	***	***
	NH ₃ Emissionsfaktor [kg Tierplatz ⁻¹ Jahr ⁻¹]		***	***	**
	CH ₄ Emissionsrate [g Tag ⁻¹ GV ⁻¹]		***	***	***
	CH ₄ Emissionsfaktor [kg Tierplatz ⁻¹ Jahr ⁻¹]		***	***	**
	CO ₂ Emissionsrate [kg Tag ⁻¹ GV ⁻¹]		***	***	n.s.
	CO ₂ Emissionsfaktor [kg Tierplatz ⁻¹ Jahr ⁻¹]		***	***	***
	Temperatur Flüssigmist [°C]		**	*	n.s.
	pH- Wert Flüssigmist		*	**	***

GV = Großvieheinheit (eine Großvieheinheit entspricht 500 kg Lebendgewicht)

n.s. = nicht signifikant; Mittelwertunterschiede zwischen Variante und Referenz (U-Test nach Mann & Whitney, $P > 0,05$)

* = signifikant; Mittelwertunterschiede zwischen Variante und Referenz (U-Test nach Mann & Whitney, $P \leq 0,05$)

** = sehr signifikant; Mittelwertunterschiede zwischen Variante und Referenz (U-Test nach Mann & Whitney, $P \leq 0,01$)

*** = höchst signifikant; Mittelwertunterschiede zwischen Variante und Referenz (U-Test nach Mann & Whitney, $P \leq 0,001$)

Tabelle A3: Übersicht der Signifikanzen zwischen den einzelnen Referenzen ($R_A:R_B$, $R_A:R_C$, $R_B:R_C$) bezogen auf die Temperatur, die relative Luftfeuchtigkeit die NH_3 -, CH_4 - und CO_2 -Konzentrationen an den drei Messstellen sowie die NH_3 -, CH_4 - und CO_2 -Emissionsraten und Emissionsfaktoren, die Volumenströme sowie der Flüssigmisttemperatur und den pH-Wert des Flüssigmists

Messstellen	Parameter				
	Vergleich	Referenzen R_A, R_B, R_C	$R_A:R_B$	$R_A:R_C$	$R_B:R_C$
Zuluft	Temperatur [°C]		***	***	***
	Relative Luftfeuchte [%]		***	*	***
	NH_3 Konzentration [ppm]		***	***	***
	CH_4 Konzentration [ppm]		***	***	***
	CO_2 Konzentration [ppm]		***	***	***
Abteilluft	Temperatur [°C]		***	***	n.s.
	Relative Luftfeuchte [%]		***	***	***
	NH_3 Konzentration [ppm]		***	***	***
	CH_4 Konzentration [ppm]		***	n.s.	***
	CO_2 Konzentration [ppm]		***	***	n.s.
Abluft	Temperatur [°C]		***	***	**
	Relative Luftfeuchte [%]		**	***	***
	NH_3 Konzentration [ppm]		***	n.s.	***
	CH_4 Konzentration [ppm]		***	***	n.s.
	CO_2 Konzentration [ppm]		***	***	n.s.
	Volumenstrom [$m^3 h^{-1} Tier^{-1}$]		***	***	n.s.
	Volumenstrom [$m^3 h^{-1} GV^{-1}$]		n.s.	***	***
	NH_3 Emissionsrate [$g Tag^{-1} GV^{-1}$]		*	***	***
	NH_3 Emissionsfaktor [$kg Tierplatz^{-1} Jahr^{-1}$]		***	***	***
	CH_4 Emissionsrate [$g Tag^{-1} GV^{-1}$]		n.s.	***	***
	CH_4 Emissionsfaktor [$kg Tierplatz^{-1} Jahr^{-1}$]		**	***	***
	CO_2 Emissionsrate [$kg Tag^{-1} GV^{-1}$]		***	***	n.s.
	CO_2 Emissionsfaktor [$kg Tierplatz^{-1} Jahr^{-1}$]		***	***	**
	Temperatur Flüssigmist [°C]		***	***	n.s.
	pH- Wert Flüssigmist		n.s.	***	***

GV = Großvieheinheit (eine Großvieheinheit entspricht 500 kg Lebendgewicht)

n.s. = nicht signifikant; Mittelwertunterschiede zwischen Variante und Referenz (U-Test nach Mann & Whitney, $P > 0,05$)

* = signifikant; Mittelwertunterschiede zwischen Variante und Referenz (U-Test nach Mann & Whitney, $P \leq 0,05$)

** = sehr signifikant; Mittelwertunterschiede zwischen Variante und Referenz (U-Test nach Mann & Whitney, $P \leq 0,01$)

*** = höchst signifikant; Mittelwertunterschiede zwischen Variante und Referenz (U-Test nach Mann & Whitney, $P \leq 0,001$)

Tabelle A4: Übersicht der Signifikanzen zwischen den einzelnen Referenzen (A:R_A, B:R_B, C:R_C) bezogen auf die Temperatur, die relative Luftfeuchtigkeit die NH₃-, CH₄- und CO₂-Konzentrationen an den drei Messstellen sowie die NH₃-, CH₄- und CO₂-Emissionsraten und Emissionsfaktoren, die Volumenströme sowie der Flüssigmisttemperatur und den pH-Wert des Flüssigmists

Messstellen	Parameter	A:R _A	B:R _B	C:R _C
	Vergleich Behandlungen A, B, C zu Referenzen R_A, R_B, R_C			
Zuluft	Temperatur [°C]	n.s.	n.s.	n.s.
	Relative Luftfeuchte [%]	n.s.	n.s.	n.s.
	NH ₃ Konzentration [ppm]	n.s.	n.s.	n.s.
	CH ₄ Konzentration [ppm]	n.s.	n.s.	n.s.
	CO ₂ Konzentration [ppm]	n.s.	n.s.	n.s.
Abteilluft	Temperatur [°C]	n.s.	n.s.	n.s.
	Relative Luftfeuchte [%]	***	***	***
	NH ₃ Konzentration [ppm]	**	**	***
	CH ₄ Konzentration [ppm]	n.s.	*	***
	CO ₂ Konzentration [ppm]	n.s.	n.s.	***
Abluft	Temperatur [°C]	n.s.	n.s.	***
	Relative Luftfeuchte [%]	*	**	***
	NH ₃ Konzentration [ppm]	n.s.	n.s.	**
	CH ₄ Konzentration [ppm]	***	***	n.s.
	CO ₂ Konzentration [ppm]	n.s.	n.s.	***
	Volumenstrom [m ³ h ⁻¹ Tier ⁻¹]	n.s.	n.s.	n.s.
	Volumenstrom [m ³ h ⁻¹ GV ⁻¹]	n.s.	n.s.	n.s.
	NH ₃ Emissionsrate [g Tag ⁻¹ GV ⁻¹]	n.s.	*	***
	NH ₃ Emissionsfaktor [kg Tierplatz ⁻¹ Jahr ⁻¹]	n.s.	n.s.	***
	CH ₄ Emissionsrate [g Tag ⁻¹ GV ⁻¹]	***	***	n.s.
	CH ₄ Emissionsfaktor [kg Tierplatz ⁻¹ Jahr ⁻¹]	***	***	**
	CO ₂ Emissionsrate [kg Tag ⁻¹ GV ⁻¹]	n.s.	n.s.	n.s.
	CO ₂ Emissionsfaktor [kg Tierplatz ⁻¹ Jahr ⁻¹]	n.s.	n.s.	***
	Temperatur Flüssigmist [°C]	n.s.	***	*
pH- Wert Flüssigmist	n.s.	***	**	

GV = Großvieheinheit (eine Großvieheinheit entspricht 500 kg Lebendgewicht)

n.s. = nicht signifikant; Mittelwertunterschiede zwischen Variante und Referenz (U-Test nach Mann & Whitney, $P > 0,05$)

* = signifikant; Mittelwertunterschiede zwischen Variante und Referenz (U-Test nach Mann & Whitney, $P \leq 0,05$)

** = sehr signifikant; Mittelwertunterschiede zwischen Variante und Referenz (U-Test nach Mann & Whitney, $P \leq 0,01$)

*** = höchst signifikant; Mittelwertunterschiede zwischen Variante und Referenz (U-Test nach Mann & Whitney, $P \leq 0,001$)

Tabelle A5-a: Zusammenfassung der Randparameter und Stallklimafaktoren der vier Behandlungen (A, B, C, D) und deren Referenzen (R_A, R_B, R_C, R_D) auf Basis von Tagesmittelwerten

Messstellen		Wöchentlicher Flüssigmistablass 06.08.2013 - 08.11.2013			Abdeckung der Flüssigmistoberfläche 16.01.2014 – 21.04.2014			Zugabe von Flüssigmistadditiven (EM „1“) 30.10.2014 - 03.02.2015			Zugabe von Flüssigmistadditiven (EM „0“) 19.06.2014 - 11.09.2014		
		Behandlung A			Behandlung B			Behandlung C			Behandlung D		
		MD1			MD2			MD4			MD3		
		n	\bar{x}	σ	n	\bar{x}	σ	n	\bar{x}	σ	n	\bar{x}	σ
Zuluft	Temperatur [°C]	A 95 R _A 95	A 15,8 R _A 15,8	A 4,1 R _A 4,1	B 96 R _B 96	B 9,5 R _B 9,5	B 3,2 R _B 3,2	C 97 R _C 97	C 6,8 R _C 6,8	C 3,5 R _C 3,5	D 85 R _D 85	D 19,3 R _D 19,3	D 2,9 R _D 2,9
	NH ₃ Konzentration [ppm]	A 95 R _A 95	A 1,1 R _A 1,1	A 0,1 R _A 0,1	B 96 R _B 96	B 2,2 R _B 2,2	B 0,6 R _B 0,6	C 97 R _C 97	C 0,9 R _C 0,9	C 0,2 R _C 0,2	D 85 R _D 85	D 0,5 R _D 0,5	D 0,1 R _D 0,1
	CH ₄ Konzentration [ppm]	A 95 R _A 95	A 1,9 R _A 1,9	A 2,0 R _A 2,0	B 96 R _B 96	B 2,8 R _B 2,8	B 0,9 R _B 0,9	C 97 R _C 97	C 0,2 R _C 0,2	C 0,5 R _C 0,5	D 85 R _D 85	D 3,4 R _D 3,4	D 2,6 R _D 2,6
	CO ₂ Konzentration [ppm]	A 95 R _A 95	A 436,3 R _A 436,3	A 13,1 R _A 13,1	B 96 R _B 96	B 478,3 R _B 478,3	B 22,3 R _B 22,3	C 97 R _C 97	C 449,5 R _C 449,5	C 12,7 R _C 12,7	D 85 R _D 85	D 429,3 R _D 429,3	D 12,6 R _D 12,6
Abteilluft	Temperatur [°C]	A 95 R _A 95	A 20,6 R _A 20,4 n.s.	A 2,8 R _A 2,6	B 96 R _B 96	B 18,5 R _B 18,6 n.s.	B 1,3 R _B 1,2	C 97 R _C 97	C 18,1 R _C 18,3 n.s.	C 1,7 R _C 2,0	D 85 R _D 85	D 23,2 R _D 22,9 n.s.	D 2,2 R _D 1,4
	NH ₃ Konzentration [ppm]	A 95 R _A 95	A 2,1 R _A 2,3 **	A 0,6 R _A 0,6	B 96 R _B 96	B 3,7 R _B 4,8 **	B 1,1 R _B 2,2	C 97 R _C 97	C 4,3 R _C 3,6 ***	C 1,2 R _C 1,5	D 85 R _D 85	D 1,4 R _D 1,3 ***	D 0,3 R _D 0,3
	CH ₄ Konzentration [ppm]	A 95 R _A 95	A 3,1 R _A 3,2 n.s.	A 2,6 R _A 2,6	B 96 R _B 96	B 5,2 R _B 4,7 *	B 1,3 R _B 1,3	C 97 R _C 97	C 3,7 R _C 2,6 ***	C 1,9 R _C 1,9	D 85 R _D 85	D 4,7 R _D 4,7 n.s.	D 3,0 R _D 2,9
	CO ₂ Konzentration [ppm]	A 95 R _A 95	A 826,8 R _A 862,3 n.s.	A 134,9 R _A 160,4	B 96 R _B 96	B 1494,1 R _B 1461,2 n.s.	B 407,0 R _B 447,1	C 97 R _C 97	C 1705,3 R _C 1517,3 ***	C 241,6 R _C 271,8	D 85 R _D 85	D 746,4 R _D 709,3 **	D 99,1 R _D 76,9

n = Stichprobenumfang in Tagen

 \bar{x} = Mittelwert σ = Standardabweichung

GV = Großvieheinheit entsprechend 500kg Lebendgewicht

Jahr = 330 Tage

EM = Effektive Mikroorganismen

n.s. = nicht signifikant; Mittelwertunterschiede zwischen Variante und Referenz (U-Test nach Mann & Whitney, P > 0,05)

* = signifikant; Mittelwertunterschiede zwischen Variante und Referenz (U-Test nach Mann & Whitney, P ≤ 0,05)

** = sehr signifikant; Mittelwertunterschiede zwischen Variante und Referenz (U-Test nach Mann & Whitney, P ≤ 0,01)

*** = höchst signifikant; Mittelwertunterschiede zwischen Variante und Referenz (U-Test nach Mann & Whitney, P ≤ 0,001)

Tabelle A5-b: Zusammenfassung der Randparameter und Stallklimafaktoren der vier Behandlungen (A, B, C, D) und deren Referenzen (R_A, R_B, R_C, R_D) auf Basis von Tagesmittelwerten

Messstellen		Wöchentlicher Flüssigmistablass 06.08.2013 - 08.11.2013			Abdeckung der Flüssigmistoberfläche 16.01.2014 – 21.04.2014			Zugabe von Flüssigmistadditiven (EM „1“) 30.10.2014 - 03.02.2015			Zugabe von Flüssigmistadditiven (EM „0“) 19.06.2014 - 11.09.2014		
		Behandlung A			Behandlung B			Behandlung C			Behandlung D		
		MD1			MD2			MD4			MD3		
		n	\bar{x}	σ	n	\bar{x}	σ	n	\bar{x}	σ	n	\bar{x}	σ
Abluft	Temperatur [°C]	A 95	A 19,6	A 2,6	B 96	B 16,1	B 1,1	C 97	C 17,1	C 1,6	D 85	D 21,9	D 2,2
		R _A 95	R _A 19,8	R _A 2,7	R _B 96	R _B 16,2	R _B 1,1	R _C 97	R _C 15,5	R _C 1,8	R _D 85	R _D 22,1	R _D 2,3
		n.s.		n.s.				***			n.s.		
	NH ₃ Konzentration [ppm]	A 95	A 10,9	A 2,6	B 96	B 12,4	B 2,4	C 97	C 11,0	C 2,6	D 85	D 6,4	D 1,0
		R _A 95	R _A 10,3	R _A 2,1	R _B 96	R _B 12,9	R _B 3,1	R _C 97	R _C 10,0	R _C 2,2	R _D 85	R _D 6,9	R _D 1,3
		n.s.		n.s.				**			*		
	CH ₄ Konzentration [ppm]	A 95	A 4,1	A 3,2	B 96	B 11,3	B 4,1	C 97	C 7,5	C 3,5	D 85	D 9,6	D 4,0
R _A 95		R _A 5,9	R _A 2,4	R _B 96	R _B 6,9	R _B 1,7	R _C 97	R _C 6,9	R _C 2,6	R _D 85	R _D 9,4	R _D 4,0	
	***		***				n.s.			n.s.			
CO ₂ Konzentration [ppm]	A 95	A 973,7	A 150,7	B 96	B 1494,4	B 312,2	C 97	C 1718,8	C 211,3	D 85	D 889,8	D 68,3	
	R _A 95	R _A 968,7	R _A 155,3	R _B 96	R _B 1519,0	R _B 356,6	R _C 97	R _C 1596,8	R _C 224,0	R _D 85	R _D 870,5	R _D 59,2	
	n.s.		n.s.				***			*			
NH ₃ Emissionsrate [g Tag ⁻¹ GV ⁻¹]	A 95	A 63,3	A 7,7	B 96	B 63,2	B 9,1	C 97	C 52,5	C 6,2	D 85	D 45,7	D 8,1	
	R _A 95	R _A 64,3	R _A 11,4	R _B 96	R _B 73,3	R _B 24,1	R _C 97	R _C 48,2	R _C 12,0	R _D 85	R _D 47,7	R _D 6,3	
	n.s.		*				***			**			
NH ₃ Emissionsfaktor [kg Tierplatz ⁻¹ Jahr ⁻¹]	A 95	A 3,2	A 0,8	B 96	B 2,9	B 0,8	C 97	C 2,6	C 0,7	D 85	D 2,2	D 0,4	
	R _A 95	R _A 3,1	R _A 0,7	R _B 96	R _B 2,7	R _B 0,8	R _C 97	R _C 2,3	R _C 0,6	R _D 85	R _D 2,3	R _D 0,6	
	n.s.		n.s.				***			n.s.			

n = Stichprobenumfang in Tagen

 \bar{x} = Mittelwert σ = Standardabweichung

GV = Großvieheinheit entsprechend 500kg Lebendgewicht

Jahr = 330 Tage

EM = Effektive Mikroorganismen

n.s. = nicht signifikant; Mittelwertunterschiede zwischen Variante und Referenz (U-Test nach Mann & Whitney, P > 0,05)

* = signifikant; Mittelwertunterschiede zwischen Variante und Referenz (U-Test nach Mann & Whitney, P ≤ 0,05)

** = sehr signifikant; Mittelwertunterschiede zwischen Variante und Referenz (U-Test nach Mann & Whitney, P ≤ 0,01)

*** = höchst signifikant; Mittelwertunterschiede zwischen Variante und Referenz (U-Test nach Mann & Whitney, P ≤ 0,001)

Tabelle A5-c: Zusammenfassung der Randparameter und Stallklimafaktoren der vier Behandlungen (A, B, C, D) und deren Referenzen (R_A, R_B, R_C, R_D) auf Basis von Tagesmittelwerten

Messstellen		Wöchentlicher Flüssigmistablass 06.08.2013 - 08.11.2013			Abdeckung der Flüssigmistoberfläche 16.01.2014 – 21.04.2014			Zugabe von Flüssigmistadditiven (EM „1“) 30.10.2014 - 03.02.2015			Zugabe von Flüssigmistadditiven (EM „0“) 19.06.2014 - 11.09.2014		
		Behandlung A			Behandlung B			Behandlung C			Behandlung D		
		MD1			MD2			MD4			MD3		
		n	\bar{x}	σ	n	\bar{x}	σ	n	\bar{x}	σ	n	\bar{x}	σ
Abluft	CH ₄ Emissionsrate [g Tag ⁻¹ GV ⁻¹]	A 95	A 17,1	A 14,8	B 96	B 44,5	B 19,2	C 97	C 34,1	C 13,5	D 85	D 45,2	D 13,2
		R _A 95	R _A 28,2	R _A 13,0	R _B 96	R _B 21,0	R _B 8,0	R _C 97	R _C 32,3	R _C 12,9	R _D 85	R _D 43,5	R _D 13,1
			***			***			n.s.			n.s.	
	CH ₄ Emissionsfaktor [kg Tierplatz ⁻¹ Jahr ⁻¹]	A 95	A 0,7	A 0,4	B 96	B 2,3	B 1,2	C 97	C 1,8	C 0,8	D 85	D 2,2	D 0,8
		R _A 95	R _A 1,3	R _A 0,3	R _B 96	R _B 1,1	R _B 0,5	R _C 97	R _C 1,6	R _C 0,7	R _D 85	R _D 2,1	R _D 0,8
			***			***			**			n.s.	
	CO ₂ Emissionsrate [kg Tag ⁻¹ GV ⁻¹]	A 95	A 9,3	A 2,7	B 96	B 15,6	B 6,2	C 97	C 17,7	C 4,3	D 85	D 9,4	D 2,5
		R _A 95	R _A 9,7	R _A 2,8	R _B 96	R _B 16,1	R _B 7,8	R _C 97	R _C 16,4	R _C 5,7	R _D 85	R _D 8,7	R _D 2,4
			n.s.			n.s.			n.s.			n.s.	
	CO ₂ Emissionsfaktor [kg Tierplatz ⁻¹ Jahr ⁻¹]	A 95	A 453,1	A 69,8	B 96	B 694,1	B 140,7	C 97	C 822,8	C 112,3	D 85	D 445,8	D 57,4
		R _A 95	R _A 461,9	R _A 89,8	R _B 96	R _B 671,9	R _B 156,1	R _C 97	R _C 742,8	R _C 143,4	R _D 85	R _D 412,9	R _D 55,3
			n.s.			n.s.			***			***	

n = Stichprobenumfang in Tagen

 \bar{x} = Mittelwert σ = Standardabweichung

GV = Großvieheinheit entsprechend 500kg Lebendgewicht

Jahr = 330 Tage

EM = Effektive Mikroorganismen

n.s. = nicht signifikant; Mittelwertunterschiede zwischen Variante und Referenz (U-Test nach Mann & Whitney, P > 0,05)

* = signifikant; Mittelwertunterschiede zwischen Variante und Referenz (U-Test nach Mann & Whitney, P ≤ 0,05)

** = sehr signifikant; Mittelwertunterschiede zwischen Variante und Referenz (U-Test nach Mann & Whitney, P ≤ 0,01)

*** = höchst signifikant; Mittelwertunterschiede zwischen Variante und Referenz (U-Test nach Mann & Whitney, P ≤ 0,001)

Die Tabelle 6 ist fortlaufend über die folgenden Klasseneinteilungen:

- Klasse 1: Einteilung in einzelne Mastabschnitte (Vormast, Mittelmast, Endmast) - für die vier Referenzabteile R_A, R_B, R_C, R_D
- Klasse 2: Einteilung in die Temperaturklassen (-5 bis 10°C, 10 bis 20 °C, 20 bis über 30°C) - für die vier Referenzabteile R_A, R_B, R_C, R_D
- Klasse 4: Einteilung in einzelne Gewichtsklassen (< 65 kg und > 65 kg) - für die vier Referenzabteile R_A, R_B, R_C, R_D
- Klasse 3 und 5: Einteilung in die Sommer - und Winterdurchgänge im Vergleich dazu die Auswertungen vom kompletten Datensatz zum reduzierten Datensatz
- für die vier Referenzabteile R_A, R_B, R_C, R_D
- Klasse 6: Einteilung in einzelnen Volumenstromklassen (0-2000 m³/h, 2000-2500 m³/h, 2500-3000 m³/h, 3000-3500 m³/h, 3500-4000 m³/h)
- für die vier Referenzabteile R_A, R_B, R_C, R_D

Tabelle A6: Übersicht der Randparameter zu den Stallklimafaktoren, den Ammoniak- und Methankonzentrationen, den Ammoniak- und Methanemissionen, den Volumenströmen, Tiergewichten und der Flüssigmisttemperatur und dem pH-Wert des Flüssigmists für die einzelnen Klassen parallel zu den statistischen Auswertungen in Kapitel 3 auf Basis von Tagesmittelwerten

Klasse Parameter	R _A _Vormast 06.08.2013 – 28.08.2013						R _A _Mittelmast 29.08.2013 – 28.09.2013						R _A _Endmast 29.09.2013 – 08.11.2013					
	n	\bar{x}	\tilde{x}	Min	Max	σ	n	\bar{x}	\tilde{x}	Min	Max	σ	n	\bar{x}	\tilde{x}	Min	Max	σ
NH ₃ – Konzentrationen _{Abteil} [ppm]	23	2,6	2,6	1,7	3,5	0,4	31	2,5	2,5	1,7	3,7	0,4	41	2,1	1,7	1,4	4,3	0,7
NH ₃ – Konzentrationen _{Abluft} [ppm]	23	7,9	7,6	6,6	10,2	1,0	31	10,3	10,1	8,6	13,5	1,1	41	11,7	11,2	9,2	16,9	1,9
NH ₃ – Emissionen [g h ⁻¹]	23	14,6	14,5	12,1	17,5	1,7	31	19,8	19,8	16,2	23,3	2,0	41	22,3	22,8	17,3	27,3	2,5
NH ₃ – Emissionen [g GV ⁻¹ d ⁻¹]	23	78,3	78,8	67,7	94,5	6,3	31	67,1	63,6	59,1	86,6	7,1	41	54,3	53,8	45,2	68,9	4,5
CH ₄ – Konzentrationen _{Abteil} [ppm]	23	5,9	5,4	2,9	13,6	2,5	31	3,6	3,3	0,7	9,1	2,2	41	1,4	1,1	0,1	4,2	1,0
CH ₄ – Konzentrationen _{Abluft} [ppm]	23	7,8	7,3	4,1	15,2	2,5	31	6,2	5,7	3,1	12,8	2,6	41	4,5	4,4	2,7	7,3	1,2
CH ₄ – Emissionen [g h ⁻¹]	23	8,1	7,9	5,6	11,2	1,4	31	8,2	7,9	5,0	13,5	2,4	41	7,8	7,8	5,0	11,9	2,0
CH ₄ – Emissionen [g GV ⁻¹ d ⁻¹]	23	44,4	43,1	32,2	75,2	11,2	31	28,3	26,2	15,9	51,2	9,5	41	19,0	18,8	11,0	28,3	4,6
Temperatur _{Zuluft} [°C]	23	19,8	19,7	16,0	25,9	2,5	31	16,2	16,5	11,3	23,4	3,1	41	13,0	12,9	6,1	19,0	3,3
Temperatur _{Abteil} [°C]	23	23,4	23,3	20,9	27,7	1,7	31	21,1	20,7	18,4	26,1	2,1	41	18,2	17,7	15,9	21,9	1,8
Temperatur _{Abluft} [°C]	23	22,5	22,5	20,4	27,2	1,7	31	20,4	20,3	17,1	25,3	2,2	41	17,8	17,3	14,8	21,3	1,9
Luftfeuchte _{Abteil} [%]	23	70,7	70,9	57,9	81,3	7,2	31	73,4	73,5	62,8	81,2	4,7	41	71,6	72,1	59,6	83,7	5,6
Luftfeuchte _{Abluft} [%]	23	69,5	69,0	56,9	80,2	7,3	31	73,3	73,6	63,0	81,1	4,9	41	73,5	74,3	60,5	82,1	5,6

Klasse Parameter	R _A _Vormast 06.08.2013 – 28.08.2013						R _A _Mittelmast 29.08.2013 – 28.09.2013						R _A _Endmast 29.09.2013 – 08.11.2013					
	n	\bar{x}	\tilde{x}	Min	Max	σ	n	\bar{x}	\tilde{x}	Min	Max	σ	n	\bar{x}	\tilde{x}	Min	Max	σ
Volumenstrom [m ³ h ⁻¹]	23	3032	3012	2725	3430	167	31	3057	3026	2382	3609	354	41	2985	2988	2344	3708	416
Volumenstrom [m ³ h ⁻¹ Tier ⁻¹]	23	60,6	60,2	54,5	68,6	3,3	31	61,9	61,3	48,6	73,6	7,0	41	61,9	61,4	48,7	76,8	8,8
Einzeltiergewichte [kg]	23	45,0	44,7	35,9	55,4	6,2	31	71,5	71,6	56,4	85,8	9,1	41	102,3	102,8	86,6	116,7	9,0
Abteilmgewichte [kg]	23	2248	2234	1794	2770	309	31	3562	3580	2821	4203	435	41	4931	5036	4244	5485	358
Flüssigmist _{pH}	2	6,9	6,9	6,9	6,9	0,04	31	7,3	7,4	6,9	7,5	0,2	41	7,5	7,5	7,5	7,6	0,04
Flüssigmist _{Temperatur} [°C]	2	18,9	18,9	18,9	19,0	0,08	31	18,7	18,5	17,1	21,3	1,1	41	16,8	16,9	15,2	18,3	0,8

n = Stichprobenumfang \bar{x} = Mittelwert \tilde{x} = Median Min = Minimum Max = Maximum σ = Standardabweichung

Klasse Parameter	R _B _Vormast 16.01.2014 – 09.02.2014						R _B _Mittelmast 10.02.2014 – 16.03.2014						R _B _Endmast 17.03.2014 – 21.04.2014					
	n	\bar{x}	\tilde{x}	Min	Max	σ	n	\bar{x}	\tilde{x}	Min	Max	σ	n	\bar{x}	\tilde{x}	Min	Max	σ
NH ₃ – Konzentrationen _{Abteil} [ppm]	25	6,8	7,4	2,7	9,4	1,8	35	5,6	5,7	3,0	8,4	1,4	36	2,5	2,2	1,7	4,3	0,8
NH ₃ – Konzentrationen _{Abluft} [ppm]	25	12,9	14,0	5,4	17,0	3,3	35	15,6	15,5	12,8	18,6	1,2	36	10,4	10,1	8,1	14,9	1,8
NH ₃ – Emissionen [g h ⁻¹]	25	15,0	15,2	6,1	22,0	4,5	35	23,5	23,6	17,7	27,6	2,7	36	14,7	13,7	10,6	20,6	2,7
NH ₃ – Emissionen [g GV ⁻¹ d ⁻¹]	25	80,0	83,1	44,4	100,0	14,1	35	77,9	78,7	48,0	98,9	11,4	36	34,6	31,5	23,3	51,1	8,4
CH ₄ – Konzentrationen _{Abteil} [ppm]	25	4,9	4,9	2,5	7,4	1,2	35	5,4	5,5	3,4	7,1	1,1	36	4,0	4,0	1,8	6,5	1,1
CH ₄ – Konzentrationen _{Abluft} [ppm]	25	5,0	4,6	2,0	8,9	1,8	35	7,8	7,8	5,5	9,9	1,2	36	7,3	7,2	5,7	10,0	1,1
CH ₄ – Emissionen [g h ⁻¹]	25	2,6	1,5	0,2	6,3	2,0	35	8,1	8,2	5,8	10,3	1,4	36	8,7	8,8	6,0	13,3	1,5
CH ₄ – Emissionen [g GV ⁻¹ d ⁻¹]	25	13,4	9,8	0,9	21,5	8,4	35	27,3	29,1	15,9	35,9	6,2	36	20,1	19,6	15,7		2,8
Temperatur _{Zuluft} [°C]	25	6,7	6,3	3,6	10,5	1,7	35	8,9	8,5	6,6	12,5	1,5	36	12,2	12,2	6,5	17,3	3,1
Temperatur _{Abteil} [°C]	25	19,5	19,3	19,1	21,0	0,5	35	18,3	18,4	16,8	19,2	0,6	36	18,2	17,8	16,0	21,3	1,6
Temperatur _{Abluft} [°C]	25	15,6	15,5	14,6	17,3	0,6	35	16,0	16,0	15,3	17,0	0,4	36	16,7	16,4	14,4	19,3	1,4
Luftfeuchte _{Abteil} [%]	25	61,3	61,8	55,6	66,7	2,6	35	56,9	58,7	44,3	61,9	4,5	36	53,3	52,1	41,8	67,5	6,0
Luftfeuchte _{Abluft} [%]	25	77,5	78,7	68,9	83,1	3,6	35	70,0	71,9	57,3	75,4	4,7	36	64,7	63,5	54,7	75,8	5,3

Klasse Parameter	R _B _Vormast 16.01.2014 – 09.02.2014						R _B _Mittelmast 10.02.2014 – 16.03.2014						R _B _Endmast 17.03.2014 – 21.04.2014					
	n	\bar{x}	\tilde{x}	Min	Max	σ	n	\bar{x}	\tilde{x}	Min	Max	σ	n	\bar{x}	\tilde{x}	Min	Max	σ
Volumenstrom [m ³ h ⁻¹]	25	1882	1825	1731	2388	178	35	2434	2426	2039	2813	188	36	2823	2871	1998	3554	406
Volumenstrom [m ³ h ⁻¹ Tier ⁻¹]	25	36,2	35,1	33,3	45,9	3,4	35	46,9	46,7	39,2	54,1	3,6	36	54,7	55,3	38,4	68,7	7,7
Einzel tiergewichte [kg]	25	42,4	42,1	31,9	53,7	6,7	35	70,5	70,7	54,6	85,6	9,5	36	100,5	101,1	86,4	112,9	8,2
Abteilgewichte [kg]	25	2206	2190	1658	2790	348	35	3668	3674	2841	4454	493	36	5154	5156	4495	5760	382
Flüssigmist _{pH}	25	8,0	8,0	7,6	8,4	0,3	35	7,4	7,5	7,2	7,6	0,1	36	7,4	7,5	7,3	7,5	0,1
Flüssigmist _{Temperatur} [°C]	25	15,6	15,6	15,3	16,1	0,2	35	14,8	14,9	13,7	15,5	0,6	36	14,8	14,6	13,4	16,6	0,9

n = Stichprobenumfang \bar{x} = Mittelwert \tilde{x} = Median Min = Minimum Max = Maximum σ = Standardabweichung

Klasse Parameter	R _D _Vormast 19.06.2014 – 11.07.2014						R _D _Mittelmast 12.07.2014 – 30.07.2014						R _D _Endmast 31.07.2014 – 11.09.2014					
	n	\bar{x}	\tilde{x}	Min	Max	σ	n	\bar{x}	\tilde{x}	Min	Max	σ	n	\bar{x}	\tilde{x}	Min	Max	σ
NH ₃ – Konzentrationen _{Abteil} [ppm]	23	1,5	1,5	1,0	2,3	0,4	19	1,1	1,2	0,9	1,4	0,1	43	1,3	1,2	0,9	2,0	0,2
NH ₃ – Konzentrationen _{Abluft} [ppm]	23	5,8	5,9	4,5	7,6	0,7	19	6,3	6,2	5,2	7,4	0,6	43	7,7	7,7	5,2	10,2	1,1
NH ₃ – Emissionen [g h ⁻¹]	23	10,8	11,0	7,4	12,9	1,4	19	14,1	14,9	10,9	17,8	2,0	43	18,0	17,6	12,4	24,1	2,6
NH ₃ – Emissionen [g GV ⁻¹ d ⁻¹]	23	52,9	52,7	44,4	64,8	5,5	19	47,7	46,7	41,9	54,6	3,5	43	43,2	42,1	32,6	54,8	5,0
CH ₄ – Konzentrationen _{Abteil} [ppm]	23	3,7	3,2	1,0	9,8	2,3	19	7,6	7,3	5,3	10,6	1,5	43	4,0	3,5	0,1	10,3	2,9
CH ₄ – Konzentrationen _{Abluft} [ppm]	23	6,6	6,3	3,1	15,1	3,2	19	12,6	12,7	9,5	17,1	2,2	43	9,5	8,7	3,8	18,8	4,0
CH ₄ – Emissionen [g h ⁻¹]	23	8,3	7,3	4,4	14,4	2,9	19	15,9	16,3	11,5	20,3	2,6	43	16,1	17,0	8,3	25,6	4,6
CH ₄ – Emissionen [g GV ⁻¹ d ⁻¹]	23	40,3	40,5	23,7	63,0	11,4	19	53,6	51,9	43,5	67,4	7,0	43	39,3	38,4	18,9	68,1	13,0
Temperatur _{Zuluft} [°C]	23	19,2	19,1	13,5	25,2	2,8	19	21,7	21,2	17,8	27,5	2,8	43	18,2	17,6	13,8	23,8	2,6
Temperatur _{Abteil} [°C]	23	23,1	23,0	19,5	27,5	1,9	19	24,8	24,3	21,8	29,5	2,3	43	21,9	21,2	18,4	26,5	2,2
Temperatur _{Abluft} [°C]	23	21,6	21,1	18,3	25,9	1,9	19	23,8	23,3	20,8	28,1	2,1	43	21,2	20,4	18,1	25,7	2,1
Luftfeuchte _{Abteil} [%]	23	60,8	59,5	48,3	75,5	8,1	19	66,7	67,2	49,8	82,7	10,4	43	67,5	68,2	57,4	77,0	5,1
Luftfeuchte _{Abluft} [%]	23	68,3	66,6	56,4	82,6	8,1	19	73,9	75,3	57,2	88,2	9,7	43	75,2	76,5	66,2	84,3	4,6

Klasse Parameter	R _D _Vormast 19.06.2014 – 11.07.2014						R _D _Mittelmast 12.07.2014 – 30.07.2014						R _D _Endmast 31.07.2014 – 11.09.2014					
	n	\bar{x}	\tilde{x}	Min	Max	σ	n	\bar{x}	\tilde{x}	Min	Max	σ	n	\bar{x}	\tilde{x}	Min	Max	σ
Volumenstrom [m ³ h ⁻¹]	23	2866	2822	2180	3398	319	19	3538	3587	3214	3699	16	43	3556	3647	3176	3732	161
Volumenstrom [m ³ h ⁻¹ Tier ⁻¹]	23	55,1	54,3	41,9	65,3	6,1	19	68,0	69,0	61,8	71,1	2,8	43	68,4	70,1	61,1	71,8	3,1
Einzel tiergewichte [kg]	23	47,3	46,8	37,5	58,0	6,3	19	68,1	68,2	59,0	77,0	5,7	43	97,1	97,6	77,9	115,3	11,4
Abteilgewichte [kg]	23	2458	2432	1949	3017	330	19	3543	3545	3070	4004	294	43	5022	5077	4050	5878	562
Flüssigmist _{pH}	23	6,9	6,8	6,6	7,3	0,2	19	6,8	6,8	6,7	7,0	0,1	43	7,0	7,0	6,8	7,1	0,1
Flüssigmist _{Temperatur} [°C]	23	19,1	18,9	18,1	20,9	0,7	19	20,6	20,9	19,1	21,5	0,8	43	19,7	19,6	17,7	21,9	1,2

n = Stichprobenumfang \bar{x} = Mittelwert \tilde{x} = Median Min = Minimum Max = Maximum σ = Standardabweichung

Klasse Parameter	R _c _Vormast 30.10.2014 – 19.11.2014						R _c _Mittelmast 20.11.2014 – 23.12.2014						R _c _Endmast 24.12.2014 – 03.02.2015					
	n	\bar{x}	\tilde{x}	Min	Max	σ	n	\bar{x}	\tilde{x}	Min	Max	σ	n	\bar{x}	\tilde{x}	Min	Max	σ
NH ₃ – Konzentrationen _{Abteil} [ppm]	21	4,1	4,2	2,3	5,6	1,0	34	4,3	4,6	1,4	7,0	1,7	42	2,7	2,6	1,0	5,3	0,9
NH ₃ – Konzentrationen _{Abluft} [ppm]	21	7,2	7,8	4,1	9,7	2,0	34	10,8	11,0	7,8	13,2	1,6	42	10,7	11,2	6,9	14,3	1,5
NH ₃ – Emissionen [g h ⁻¹]	21	10,1	10,4	5,4	16,0	3,2	34	15,9	16,9	10,3	19,2	2,5	42	17,0	17,7	11,6	21,7	2,8
NH ₃ – Emissionen [g GV ⁻¹ d ⁻¹]	21	51,9	43,3	33,9	76,5	11,8	34	56,0	61,4	31,7	68,2	11,0	42	40,1	41,7	27,2	52,3	6,8
CH ₄ – Konzentrationen _{Abteil} [ppm]	21	2,5	1,9	0,2	7,4	1,8	34	4,0	5,0	1,0	6,2	1,9	42	1,6	1,4	0,1	5,3	1,0
CH ₄ – Konzentrationen _{Abluft} [ppm]	21	3,2	3,0	0,3	8,0	2,4	34	8,2	8,5	5,8	9,9	1,0	42	7,6	7,4	3,9	12,3	1,9
CH ₄ – Emissionen [g h ⁻¹]	21	4,2	2,9	0,4	10,7	3,5	34	12,2	12,5	8,3	15,2	1,6	42	12,4	12,1	6,9	18,3	3,2
CH ₄ – Emissionen [g GV ⁻¹ d ⁻¹]	21	21,1	16,6	2,1	47,8	15,7	34	43,1	45,0	24,7	56,8	8,7	42	29,0	29,8	16,2	38,1	6,1
Temperatur _{Zuluft} [°C]	21	10,6	9,7	7,8	14,7	2,2	34	7,6	6,9	4,1	12,0	2,3	42	4,4	3,7	-3,8	13,8	3,0
Temperatur _{Abteil} [°C]	21	21,0	20,7	20,4	22,3	0,7	34	19,0	18,9	17,4	20,4	0,9	42	16,4	16,2	15,5	18,8	0,6
Temperatur _{Abluft} [°C]	21	18,0	17,6	16,7	19,7	0,9	34	16,0	15,7	14,9	17,7	0,8	42	13,9	13,8	11,5	16,6	0,8
Luftfeuchte _{Abteil} [%]	21	64,7	65,3	58,6	69,9	2,8	34	61,6	62,2	54,2	66,1	3,0	42	56,2	56,9	43,9	62,1	3,2
Luftfeuchte _{Abluft} [%]	21	80,3	81,3	70,8	84,7	4,0	34	81,3	82,1	73,5	86,3	3,4	42	76,2	76,6	63,5	83,2	3,4

Klasse Parameter	R _C _Vormast 30.10.2014 – 19.11.2014						R _C _Mittelmast 20.11.2014 – 23.12.2014						R _C _Endmast 24.12.2014 – 03.02.2015					
	n	\bar{x}	\tilde{x}	Min	Max	σ	n	\bar{x}	\tilde{x}	Min	Max	σ	n	\bar{x}	\tilde{x}	Min	Max	σ
Volumenstrom [m ³ h ⁻¹]	21	2170	2133	1899	2604	179	34	2282	2285	1943	2603	174	42	2458	2439	1780	3251	224
Volumenstrom [m ³ h ⁻¹ Tier ⁻¹]	21	41,7	41,0	36,5	50,1	3,4	34	43,9	43,9	37,4	50,1	3,4	42	47,3	47,0	34,2	62,5	4,3
Einzeltiergewichte [kg]	21	44,2	44,5	35,1	51,9	5,0	34	66,8	66,7	52,7	81,1	8,7	42	98,5	98,1	81,9	115,8	10,1
Abteilmgewichte [kg]	21	2296	2312	1823	2697	260	34	3473	3465	2740	4216	455	42	5122	5103	4258	6022	528
Flüssigmist _{pH}	21	7,2	7,1	6,8	7,5	0,2	34	7,3	7,2	7,2	7,4	0,1	42	7,4	7,4	7,3	7,5	0,1
Flüssigmist _{Temperatur} [°C]	21	17,6	17,5	16,7	18,6	0,6	34	15,8	15,7	14,7	16,9	0,7	42	13,7	13,6	13,4	14,6	0,3

n = Stichprobenumfang \bar{x} = Mittelwert \tilde{x} = Median Min = Minimum Max = Maximum σ = Standardabweichung

Klasse Parameter	R _A bis 65 kg 06.08.2013 – 07.09.2013						R _A über 65 kg 08.09.2013 – 08.11.2013					
	n	\bar{x}	\tilde{x}	Min	Max	σ	n	\bar{x}	\tilde{x}	Min	Max	σ
NH ₃ – Konzentrationen _{Abteil} [ppm]	33	2,6	2,5	1,7	3,5	0,4	62	2,2	2,0	1,4	4,3	0,7
NH ₃ – Konzentrationen _{Abluft} [ppm]	33	8,4	8,5	6,6	10,5	1,1	62	11,4	11,1	9,2	16,9	1,7
NH ₃ – Emissionen [g h ⁻¹]	33	16,0	16,1	12,1	23,3	2,8	62	21,5	21,5	17,3	27,3	2,5
NH ₃ – Emissionen [g GV ⁻¹ d ⁻¹]	33	77,4	77,6	65,5	94,5	6,3	62	57,7	56,5	45,2	72,0	5,9
CH ₄ – Konzentrationen _{Abteil} [ppm]	33	5,7	5,0	1,8	13,6	2,4	62	1,8	1,5	0,1	6,1	1,3
CH ₄ – Konzentrationen _{Abluft} [ppm]	33	7,9	7,3	3,7	15,2	2,7	62	4,8	4,4	2,7	8,7	1,4
CH ₄ – Emissionen [g h ⁻¹]	33	8,5	8,1	5,6	9,8	2,2	62	7,8	7,8	4,5	11,9	1,9
CH ₄ – Emissionen [g GV ⁻¹ d ⁻¹]	33	42,2	39,0	23,1	75,2	11,5	62	20,8	20,4	11,0	37,9	5,3
Temperatur _{Zuluft} [°C]	33	19,8	19,6	16,0	25,9	2,4	62	13,7	13,9	6,1	19,1	3,1
Temperatur _{Abteil} [°C]	33	23,4	23,3	20,9	27,7	1,7	62	18,8	18,9	15,9	22,7	1,8
Temperatur _{Abluft} [°C]	33	22,6	22,4	20,4	27,2	1,7	62	18,3	18,0	14,8	22,4	1,8
Luftfeuchte _{Abteil} [%]	33	70,2	69,5	57,9	81,3	6,4	62	72,8	72,9	59,6	83,7	5,4
Luftfeuchte _{Abluft} [%]	33	69,0	68,5	56,9	80,2	6,4	62	74,3	74,6	60,5	82,1	5,0

Klasse Parameter	R _A bis 65 kg 06.08.2013 – 07.09.2013						R _A über 65 kg 08.09.2013 – 08.11.2013					
	n	\bar{x}	\tilde{x}	Min	Max	σ	n	\bar{x}	\tilde{x}	Min	Max	σ
Volumenstrom [m ³ h ⁻¹]	33	3090	3026	2725	3561	210	62	2983	2963	2344	3708	400
Volumenstrom [m ³ h ⁻¹ Tier ⁻¹]	33	61,8	60,5	54,5	71,2	4,2	62	61,5	60,5	48,6	76,8	8,4
Einzeltiergewichte [kg]	33	49,8	49,5	35,9	65,5	9,2	62	93,6	94,4	66,5	116,7	14,7
Abteilmgewichte [kg]	33	2490	2476	1794	3274	460	62	4550	4625	3324	5485	630
Flüssigmist _{pH}	12	7,1	7,1	6,9	7,4	0,1	62	7,5	7,5	7,2	7,6	0,1
Flüssigmist _{Temperatur} [°C]	12	19,5	19,0	18,4	21,3	1,1	62	17,3	17,5	15,2	20,1	1,1

n = Stichprobenumfang \bar{x} = Mittelwert \tilde{x} = Median Min = Minimum Max = Maximum σ = Standardabweichung

Klasse Parameter	R _B bis 65 kg 16.01.2014 – 21.02.2014						R _B über 65 kg 22.02.2014 – 21.04.2014					
	n	\bar{x}	\tilde{x}	Min	Max	σ	n	\bar{x}	\tilde{x}	Min	Max	σ
NH ₃ – Konzentrationen _{Abteil} [ppm]	37	6,7	6,8	2,7	9,4	1,6	59	3,5	3,1	1,7	7,5	1,6
NH ₃ – Konzentrationen _{Abluft} [ppm]	37	13,7	14,8	5,4	17,0	3,0	59	12,5	12,1	8,1	18,6	3,1
NH ₃ – Emissionen [g h ⁻¹]	37	17,3	13,3	5,9	20,6	5,1	59	18,4	17,7	10,6	27,6	5,4
NH ₃ – Emissionen [g GV ⁻¹ d ⁻¹]	37	81,6	83,9	44,4	99,6	12,3	59	50,0	46,7	23,3	90,6	21,7
CH ₄ – Konzentrationen _{Abteil} [ppm]	37	5,3	5,4	2,5	7,4	1,2	59	4,4	4,3	1,8	6,6	1,2
CH ₄ – Konzentrationen _{Abluft} [ppm]	37	6,1	6,6	2,0	9,9	2,2	59	7,4	7,4	5,5	10,0	1,1
CH ₄ – Emissionen [g h ⁻¹]	37	4,5	4,5	0,2	10,1	3,2	59	8,4	8,6	5,8	13,3	1,5
CH ₄ – Emissionen [g GV ⁻¹ d ⁻¹]	37	19,4	21,5	0,9	35,9	11,2	59	22,0	20,1	15,7	33,6	5,0
Temperatur _{Zuluft} [°C]	37	7,2	7,3	3,6	11,0	1,8	59	11,0	10,8	6,5	17,3	3,0
Temperatur _{Abteil} [°C]	37	19,3	19,2	18,6	21,0	0,5	59	18,1	17,8	16,0	18,7	1,3
Temperatur _{Abluft} [°C]	37	15,8	15,7	14,6	17,3	0,6	59	16,4	16,1	14,4	17,1	1,2
Luftfeuchte _{Abteil} [%]	37	60,8	60,6	55,6	66,7	2,4	59	54,1	53,7	41,8	67,5	5,7
Luftfeuchte _{Abluft} [%]	37	76,1	75,6	68,9	83,1	3,6	59	66,1	66,5	54,7	75,8	5,5

Klasse Parameter	R _B bis 65 kg 16.01.2014 – 21.02.2014						R _B über 65 kg 22.02.2014 – 21.04.2014					
	n	\bar{x}	\tilde{x}	Min	Max	σ	n	\bar{x}	\tilde{x}	Min	Max	σ
Volumenstrom [m ³ h ⁻¹]	37	2017	1940	1731	2485	257	59	2699	2687	1998	3554	368
Volumenstrom [m ³ h ⁻¹ Tier ⁻¹]	37	38,8	37,3	33,3	47,8	4,9	59	52,1	51,7	38,4	68,7	7,1
Einzeltiergewichte [kg]	37	48,1	47,9	31,9	65,0	10,1	59	91,0	91,2	66,0	112,9	14,1
Abteilmgewichte [kg]	37	2500	2490	1658	3381	524	59	4688	4740	3430	5760	688
Flüssigmist _{pH}	37	7,8	7,7	7,3	8,4	0,4	59	7,4	7,5	7,2	7,6	0,1
Flüssigmist _{Temperatur} [°C]	37	15,5	15,5	15,2	16,1	0,2	59	14,7	14,6	13,4	16,6	0,8

n = Stichprobenumfang \bar{x} = Mittelwert \tilde{x} = Median Min = Minimum Max = Maximum σ = Standardabweichung

Klasse Parameter	R ₀ bis 65 kg 19.06.2014 – 18.07.2014						R ₀ über 65 kg 19.07.2014 – 11.09.2014					
	n	\bar{x}	\tilde{x}	Min	Max	σ	n	\bar{x}	\tilde{x}	Min	Max	σ
NH ₃ – Konzentrationen _{Abteil} [ppm]	30	1,4	1,3	0,9	2,3	0,4	55	1,3	1,2	0,9	2,0	0,2
NH ₃ – Konzentrationen [ppm]	30	5,7	5,7	4,5	7,6	0,6	55	7,5	7,4	5,2	10,2	1,1
NH ₃ – Emissionen [g h ⁻¹]	30	11,1	11,2	7,4	13,4	1,4	55	17,4	17,1	12,4	24,1	2,6
NH ₃ – Emissionen [g GV ⁻¹ d ⁻¹]	30	51,0	51,5	42,0	64,8	6,0	55	44,6	44,8	32,2	54,8	5,3
CH ₄ – Konzentrationen _{Abteil} [ppm]	30	4,4	3,8	1,0	9,8	2,4	55	4,9	5,7	0,1	10,6	3,2
CH ₄ – Konzentrationen _{Abluft} [ppm]	30	7,6	6,7	3,1	15,1	3,4	55	10,4	11,9	3,8	18,8	4,0
CH ₄ – Emissionen [g h ⁻¹]	30	9,5	9,3	4,4	16,3	3,5	55	16,4	17,0	8,3	25,6	4,2
CH ₄ – Emissionen [g GV ⁻¹ d ⁻¹]	30	42,5	42,5	23,7	63,0	11,0	55	42,9	44,7	18,9	68,1	13,7
Temperatur _{Zuluft} [°C]	30	19,8	20,3	13,5	25,7	2,9	55	19,0	19,4	13,8	27,5	3,0
Temperatur _{Abteil} [°C]	30	23,5	23,7	19,5	27,9	2,1	55	22,6	22,7	18,4	29,5	2,5
Temperatur _{Abluft} [°C]	30	22,1	22,2	18,3	26,5	2,1	55	21,8	22,0	18,1	28,1	2,4
Luftfeuchte _{Abteil} [%]	30	61,4	59,8	48,3	77,9	8,3	55	67,7	69,0	49,8	82,7	6,7
Luftfeuchte _{Abluft} [%]	30	69,0	62,6	56,4	85,0	8,3	55	75,3	76,6	58,0	88,2	6,1

Klasse Parameter	R _D bis 65 kg 19.06.2014 – 18.07.2014						R _D über 65 kg 19.07.2014 – 11.09.2014					
	n	\bar{x}	\tilde{x}	Min	Max	σ	n	\bar{x}	\tilde{x}	Min	Max	σ
Volumenstrom [m ³ h ⁻¹]	30	2990	2929	2180	3606	366	55	3570	3637	3176	3732	147
Volumenstrom [m ³ h ⁻¹ Tier ⁻¹]	30	57,5	56,3	41,9	69,3	7,0	55	68,7	69,9	61,1	71,8	2,8
Einzeltiergewichte [kg]	30	50,7	50,3	37,5	65,1	8,5	55	91,5	91,6	66,1	115,2	14,7
Abteilmgewichte [kg]	30	2638	2618	1949	3387	442	55	4740	4762	3439	5878	738
Flüssigmist _{pH}	30	6,8	6,8	6,6	7,3	0,2	55	7,0	7,0	6,7	7,1	0,1
Flüssigmist _{Temperatur} [°C]	30	19,3	19,1	18,1	20,9	0,7	55	20,0	20,5	17,7	21,9	1,2

n = Stichprobenumfang \bar{x} = Mittelwert \tilde{x} = Median Min = Minimum Max = Maximum σ = Standardabweichung

Klasse Parameter	R _c bis 65 kg 30.10.2014 – 05.12.2014						R _c über 65 kg 06.12.2014 – 03.02.2015					
	n	\bar{x}	\tilde{x}	Min	Max	σ	n	\bar{x}	\tilde{x}	Min	Max	σ
NH ₃ – Konzentrationen ^{Abteil} [ppm]	37	4,7	4,7	2,3	7,0	1,3	60	2,9	2,7	1,0	5,9	1,1
NH ₃ – Konzentrationen ^{Abluft} [ppm]	37	9,0	8,9	4,1	13,2	2,7	60	10,6	10,9	6,9	14,3	1,5
NH ₃ – Emissionen [g/h]	37	12,7	12,9	5,4	18,2	4,0	60	16,6	17,4	10,3	21,7	2,9
NH ₃ – Emissionen [g GV ⁻¹ d ⁻¹]	37	56,7	59,0	33,9	76,5	10,9	60	42,9	42,3	27,2	63,1	9,4
CH ₄ – Konzentrationen ^{Abteil} [ppm]	37	3,8	4,6	0,2	7,4	2,1	60	1,9	1,7	0,1	5,7	1,3
CH ₄ – Konzentrationen ^{Abluft} [ppm]	37	5,6	6,1	0,3	9,6	3,3	60	7,7	7,5	3,9	12,3	1,7
CH ₄ – Emissionen [g h ⁻¹]	37	7,8	9,3	0,4	13,4	4,9	60	12,3	12,1	6,9	18,3	2,9
CH ₄ – Emissionen [g GV ⁻¹ d ⁻¹]	37	33,2	41,4	2,1	56,8	18,5	60	31,7	31,5	16,2	51,7	7,9
Temperatur ^{Zuluft} [°C]	37	9,3	9,2	5,2	14,7	2,7	60	5,3	4,8	-3,8	13,8	3,2
Temperatur ^{Abteil} [°C]	37	20,5	20,4	18,8	22,3	0,9	60	17,0	16,6	15,5	19,2	1,1
Temperatur ^{Abluft} [°C]	37	17,3	17,3	15,3	19,7	1,2	60	14,4	14,2	11,5	16,6	1,1
Luftfeuchte ^{Abteil} [%]	37	64,1	64,0	58,6	69,9	2,4	60	57,4	57,4	43,9	65,4	3,7
Luftfeuchte ^{Abluft} [%]	37	81,4	82,1	70,8	86,3	3,5	60	77,3	76,9	63,5	85,4	3,9

Klasse Parameter	R _c bis 65 kg 30.10.2014 – 05.12.2014						R _c über 65 kg 06.12.2014 – 03.02.2015					
	n	\bar{x}	\tilde{x}	Min	Max	σ	n	\bar{x}	\tilde{x}	Min	Max	σ
Volumenstrom [m ³ h ⁻¹]	37	2195	2145	1899	2604	169	60	2420	2409	1780	3251	218
Volumenstrom [m ³ h ⁻¹ Tier ⁻¹]	37	42,2	41,2	36,5	50,1	3,3	60	46,5	46,3	34,2	62,5	4,2
Einzeltiergewichte [kg]	37	50,5	50,3	35,1	65,2	8,6	60	91,1	91,0	66,2	115,8	14,4
Abteilmgewichte [kg]	37	2626	2617	1823	3392	449	60	4738	4733	3441	6022	749
Flüssigmist _{pH}	37	7,2	7,2	6,8	7,5	0,2	60	7,3	7,4	7,2	7,5	0,1
Flüssigmist _{Temperatur} [°C]	37	17,1	17,5	15,8	18,6	0,8	60	14,2	13,7	13,4	15,7	0,8

n = Stichprobenumfang \bar{x} = Mittelwert \tilde{x} = Median Min = Minimum Max = Maximum σ = Standardabweichung

Klasse Parameter	R _A kompletter Datensatz						R _A jeder 5. Wert					
	n	\bar{x}	\tilde{x}	Min	Max	σ	n	\bar{x}	\tilde{x}	Min	Max	σ
NH ₃ – Konzentrationen ⁿ _{Abteil} [ppm]	95	2,3	2,3	1,4	4,3	0,6	20	2,2	2,2	1,5	3,5	0,6
NH ₃ – Konzentrationen ⁿ _{Abluft} [ppm]	95	10,3	10,1	6,6	16,9	2,1	20	10,0	10,2	6,7	12,9	1,7
NH ₃ – Emissionen [g h ⁻¹]	95	19,6	19,9	12,1	27,3	3,7	20	19,3	19,8	12,4	24,7	3,5
NH ₃ – Emissionen [g GV ⁻¹ d ⁻¹]	95	64,3	61,6	45,2	94,5	11,3	20	64,3	61,5	47,1	94,5	12,8
CH ₄ – Konzentrationen ⁿ _{Abteil} [ppm]	95	3,2	2,6	0,1	13,6	2,6	20	3,4	2,9	0,3	13,6	3,1
CH ₄ – Konzentrationen ⁿ _{Abluft} [ppm]	95	5,9	5,4	2,7	15,2	2,4	20	6,1	5,5	2,8	15,2	2,8
CH ₄ – Emissionen [g h ⁻¹]	95	8,0	7,9	4,5	13,5	2,0	20	8,2	7,9	5,2	11,6	1,8
CH ₄ – Emissionen [g GV ⁻¹ d ⁻¹]	95	28,2	24,6	11,0	75,2	13,0	20	29,4	25,6	12,8	75,2	14,8
Temperatur ⁿ _{Zuluft} [°C]	95	15,8	16,4	6,1	25,9	4,1	20	16,4	15,8	10,4	25,9	3,7
Temperatur ⁿ _{Abteil} [°C]	95	20,4	20,5	15,9	27,7	2,8	20	20,6	20,5	16,6	27,7	2,9
Temperatur ⁿ _{Abluft} [°C]	95	19,8	10,1	14,8	27,2	2,7	20	20,1	19,9	16,4	27,2	2,7
Luftfeuchte ⁿ _{Abteil} [%]	95	71,9	72,2	57,9	83,7	5,8	20	71,7	72,1	57,9	81,2	5,1
Luftfeuchte ⁿ _{Abluft} [%]	95	72,5	73,4	56,9	82,1	6,0	20	71,9	72,7	56,9	80,7	5,5

Klasse Parameter	R _A kompletter Datensatz						R _A jeder 5. Wert					
	n	\bar{x}	\tilde{x}	Min	Max	σ	n	\bar{x}	\tilde{x}	Min	Max	σ
Volumenstrom [m ³ h ⁻¹]	95	3020	3014	2344	3708	348	20	3060	3044	2518	3478	256
Volumenstrom [m ³ h ⁻¹ Tier ⁻¹]	95	61,6	60,5	48,6	76,8	7,2	20	62,5	61,8	53,6	74,0	5,4
Einzeltiergewichte [kg]	95	78,4	80,8	35,9	116,7	24,7	20	77,9	80,1	35,9	116,7	26,3
Abteilgewichte [kg]	95	3835	4042	1794	5485	1141	20	3810	3965	1794	5485	1220
Flüssigmist _{pH}	74	7,4	7,5	6,9	7,6	0,2	15	7,4	7,5	7,0	7,6	0,2
Flüssigmist _{Temperatur} [°C]	74	17,7	17,6	15,2	21,3	1,4	15	17,6	17,4	15,2	21,0	1,5

n = Stichprobenumfang \bar{x} = Mittelwert \tilde{x} = Median Min = Minimum Max = Maximum σ = Standardabweichung

Klasse Parameter	R _B kompletter Datensatz						R _B jeder 5. Wert					
	n	\bar{x}	\tilde{x}	Min	Max	σ	n	\bar{x}	\tilde{x}	Min	Max	σ
NH ₃ – Konzentrationen _{Abteil} [ppm]	96	4,8	4,6	1,7	9,4	2,2	20	4,8	4,9	1,9	8,6	2,2
NH ₃ – Konzentrationen _{Abluft} [ppm]	96	12,9	13,6	5,4	18,6	3,1	20	12,7	13,5	5,4	17,4	3,5
NH ₃ – Emissionen [g h ⁻¹]	96	18,0	18,0	6,1	27,6	5,3	20	17,8	18,1	6,1	26,8	5,9
NH ₃ – Emissionen [g GV ⁻¹ d ⁻¹]	96	62,2	70,4	23,3	99,6	24,2	20	62,0	70,3	26,3	98,9	24,9
CH ₄ – Konzentrationen _{Abteil} [ppm]	96	4,7	4,8	1,8	7,4	1,3	20	4,6	4,6	1,8	6,4	1,2
CH ₄ – Konzentrationen _{Abluft} [ppm]	96	6,9	7,0	2,0	10,0	1,7	20	6,7	6,9	3,3	8,8	1,7
CH ₄ – Emissionen [g h ⁻¹]	96	6,9	7,7	0,2	13,3	3,0	20	6,7	8,2	0,6	10,0	3,1
CH ₄ – Emissionen [g GV ⁻¹ d ⁻¹]	96	21,0	20,7	0,9	35,9	8,0	20	20,4	20,4	3,1	34,7	8,2
Temperatur _{Zuluft} [°C]	96	9,5	8,6	3,6	17,3	3,2	20	9,2	8,7	4,0	17,3	3,3
Temperatur _{Abteil} [°C]	96	18,6	18,7	16,0	21,3	1,2	20	18,5	18,6	16,0	21,0	1,3
Temperatur _{Abluft} [°C]	96	16,2	16,0	14,4	19,3	1,1	20	16,1	15,8	14,4	18,9	1,1
Luftfeuchte _{Abteil} [%]	96	56,7	58,6	41,8	67,5	5,7	20	56,9	58,8	43,8	67,5	6,3
Luftfeuchte _{Abluft} [%]	96	70,0	71,7	54,7	83,1	6,9	20	70,4	71,9	54,7	80,0	7,2

Klasse Parameter	R _B kompletter Datensatz						R _B oder 5. Wert					
	n	\bar{x}	\tilde{x}	Min	Max	σ	n	\bar{x}	\tilde{x}	Min	Max	σ
Volumenstrom [m ³ h ⁻¹]	96	2436	2410	1731	3554	468	20	2424	2426	1733	3554	484
Volumenstrom [m ³ h ⁻¹ Tier ⁻¹]	96	47,0	46,3	33,3	68,7	9,1	20	46,8	46,7	33,3	68,3	9,4
Einzeltiergewichte [kg]	96	74,4	75,8	31,9	112,9	24,5	20	73,5	74,9	31,9	112,3	26,0
Abteilgewichte [kg]	96	3844	3941	1658	5760	1240	20	3798	3892	1658	5728	1313
Flüssigmist _{pH}	96	7,6	7,5	7,2	8,4	0,3	20	7,6	7,5	7,2	8,3	0,3
Flüssigmist _{Temperatur} [°C]	96	15,0	15,2	13,4	16,6	0,7	20	15,0	15,1	13,7	16,1	0,8

n = Stichprobenumfang \bar{x} = Mittelwert \tilde{x} = Median Min = Minimum Max = Maximum σ = Standardabweichung

Klasse Parameter	R _D kompletter Datensatz						R _D jeder 5. Wert					
	n	\bar{x}	\tilde{x}	Min	Max	σ	n	\bar{x}	\tilde{x}	Min	Max	σ
NH ₃ – Konzentrationen _{Abteil} [ppm]	85	1,3	1,2	0,9	2,3	0,3	18	1,3	1,3	0,9	1,6	0,2
NH ₃ – Konzentrationen _{Abluft} [ppm]	85	6,9	6,8	4,5	10,2	1,3	18	6,8	6,9	4,5	9,4	1,4
NH ₃ – Emissionen [g h ⁻¹]	85	15,2	15,4	7,4	24,1	3,8	18	14,9	15,5	7,8	21,5	4,0
NH ₃ – Emissionen [g GV ⁻¹ d ⁻¹]	85	46,8	45,9	32,2	64,8	6,3	18	46,3	46,7	32,2	57,1	6,2
CH ₄ – Konzentrationen _{Abteil} [ppm]	85	4,7	5,2	0,1	10,6	2,9	18	4,6	3,8	0,2	9,8	3,0
CH ₄ – Konzentrationen _{Abluft} [ppm]	85	9,4	9,5	3,1	18,8	4,0	18	9,2	8,1	4,8	16,3	3,8
CH ₄ – Emissionen [g h ⁻¹]	85	14,0	14,2	4,4	25,6	5,1	18	13,6	12,2	6,4	21,5	4,8
CH ₄ – Emissionen [g GV ⁻¹ d ⁻¹]	85	42,7	43,5	18,9	68,1	12,8	18	42,8	43,2	22,4	62,4	12,5
Temperatur _{Zuluft} [°C]	85	19,3	19,5	13,5	27,5	3,0	18	19,6	20,2	13,8	25,7	3,3
Temperatur _{Abteil} [°C]	85	22,9	23,0	18,4	29,5	2,4	18	23,0	23,7	18,4	27,9	2,6
Temperatur _{Abluft} [°C]	85	21,9	22,0	18,1	28,1	2,2	18	22,0	22,5	18,1	26,5	2,4
Luftfeuchte _{Abteil} [%]	85	65,5	67,1	48,3	82,7	7,9	18	63,3	64,6	49,8	75,5	8,3
Luftfeuchte _{Abluft} [%]	85	73,1	74,8	56,4	88,2	7,6	18	71,3	73,0	57,2	81,4	8,0

Klasse Parameter	R _D kompletter Datensatz						R _D jeder 5. Wert					
	n	\bar{x}	\tilde{x}	Min	Max	σ	n	\bar{x}	\tilde{x}	Min	Max	σ
Volumenstrom [m ³ h ⁻¹]	85	3365	3545	2180	3732	371	18	3337	3314	2734	3732	344
Volumenstrom [m ³ h ⁻¹ Tier ⁻¹]	85	64,7	68,2	41,9	71,8	7,1	18	64,2	63,7	52,6	71,8	6,6
Einzel tiergewichte [kg]	85	77,1	77,9	37,5	115,2	23,4	18	76,7	77,4	37,5	115,2	25,2
Abteilgewichte [kg]	85	3998	4050	1949	5878	1199	18	3975	4027	1949	5878	1289
Flüssigmist _{pH}	85	6,9	6,9	6,6	7,3	0,1	18	6,9	6,9	6,6	7,3	0,2
Flüssigmist _{Temperatur} [°C]	85	19,7	19,6	17,7	21,9	1,1	18	19,8	19,6	17,9	21,5	1,1

n = Stichprobenumfang \bar{x} = Mittelwert \tilde{x} = Median Min = Minimum Max = Maximum σ = Standardabweichung

Klasse Parameter	R _c kompletter Datensatz						R _c jeder 5. Wert					
	n	\bar{x}	\tilde{x}	Min	Max	σ	n	\bar{x}	\tilde{x}	Min	Max	σ
NH ₃ – Konzentrationen _{Abteil} [ppm]	97	3,6	3,0	1,0	7,0	1,5	20	3,5	3,0	1,7	6,5	1,4
NH ₃ – Konzentrationen _{Abluft} [ppm]	97	10,0	10,2	4,1	14,3	2,2	20	9,8	9,9	4,3	12,6	2,4
NH ₃ – Emissionen [g h ⁻¹]	97	15,1	15,9	5,4	21,7	3,9	20	14,4	14,1	5,4	21,1	4,2
NH ₃ – Emissionen [g GV ⁻¹ d ⁻¹]	97	48,2	46,2	27,2	76,5	12,0	20	46,4	42,9	28,0	68,4	12,2
CH ₄ – Konzentrationen _{Abteil} [ppm]	97	2,6	2,1	0,1	7,4	1,9	20	2,7	1,8	0,6	7,4	2,1
CH ₄ – Konzentrationen _{Abluft} [ppm]	97	6,9	7,4	0,3	12,3	2,6	20	6,9	7,0	1,1	9,7	2,5
CH ₄ – Emissionen [g h ⁻¹]	97	10,6	11,6	0,4	18,3	4,4	20	10,1	10,9	1,6	16,7	4,3
CH ₄ – Emissionen [g GV ⁻¹ d ⁻¹]	97	32,2	32,8	2,1	56,8	12,9	20	31,2	30,1	8,3	51,7	12,3
Temperatur _{Zuluft} [°C]	97	6,8	6,7	-3,8	14,7	3,5	20	7,1	6,4	0,4	14,3	3,8
Temperatur _{Abteil} [°C]	97	18,3	15,5	15,5	22,3	2,0	20	18,4	18,8	15,8	21,9	2,1
Temperatur _{Abluft} [°C]	97	15,5	15,4	11,5	19,7	1,8	20	15,6	15,4	12,9	19,4	1,9
Luftfeuchte _{Abteil} [%]	97	59,9	59,9	43,9	69,9	4,6	20	59,7	59,0	47,8	69,9	5,3
Luftfeuchte _{Abluft} [%]	97	78,9	78,5	63,5	86,3	4,2	20	78,4	78,5	68,6	85,1	4,7

Klasse Parameter	R _c kompletter Datensatz						R _c jeder 5. Wert					
	n	\bar{x}	\tilde{x}	Min	Max	σ	n	\bar{x}	\tilde{x}	Min	Max	σ
Volumenstrom [m ³ h ⁻¹]	97	2334	2341	1780	3251	228	20	2264	2270	1780	2663	218
Volumenstrom [m ³ h ⁻¹ Tier ⁻¹]	97	44,9	45,0	34,2	62,5	4,4	20	43,5	43,7	34,2	51,2	4,2
Einzel tiergewichte [kg]	97	75,6	76,3	35,1	115,8	23,4	20	74,4	74,9	35,1	114,1	24,6
Abteilgewichte [kg]	97	3932	3965	1823	6022	1218	20	3869	3893	1823	5933	1278
Flüssigmist _{pH}	97	7,3	7,3	6,8	7,5	0,1	20	7,3	7,3	6,8	7,5	10,2
Flüssigmist _{Temperatur} [°C]	97	15,3	15,3	13,4	18,6	1,6	20	15,4	15,3	13,5	18,3	1,7

n = Stichprobenumfang \bar{x} = Mittelwert \tilde{x} = Median Min = Minimum Max = Maximum σ = Standardabweichung

Klasse Parameter	Volumenstrom 0-2000 m³/h						Volumenstrom 2000 - 2500 m³/h						Volumenstrom 2500 - 3000 m³/h					
	n	\bar{x}	\tilde{x}	Min	Max	σ	n	\bar{x}	\tilde{x}	Min	Max	σ	n	\bar{x}	\tilde{x}	Min	Max	σ
NH ₃ – Konzentrationen ⁿ _{Abteil} [ppm]	27	6,0	6,2	1,9	9,4	2,2	117	4,3	4,2	1,3	8,4	1,9	98	2,7	2,6	1,3	6,3	1,0
NH ₃ – Konzentrationen ⁿ _{Abluft} [ppm]	27	11,6	12,1	4,3	17,0	3,7	117	11,7	11,9	4,1	18,6	3,3	98	10,4	10,6	4,5	17,6	2,7
NH ₃ – Emissionen [g h ⁻¹]	27	13,2	13,4	5,4	20,1	4,1	117	17,1	17,5	5,6	27,5	5,3	98	17,4	17,7	7,8	27,6	4,4
NH ₃ – Emissionen [g GV ⁻¹ d ⁻¹]	27	69,1	73,1	28,0	93,3	21,0	117	57,1	56,7	23,3	100,0	19,2	98	54,1	51,8	24,1	86,6	14,1
CH ₄ – Konzentrationen ⁿ _{Abteil} [ppm]	27	4,3	4,2	0,2	7,4	1,8	117	3,4	3,3	0,1	7,4	2,2	98	2,8	2,7	0,3	7,8	1,6
CH ₄ – Konzentrationen ⁿ _{Abluft} [ppm]	27	4,7	4,5	0,4	9,6	2,1	117	6,7	7,4	0,3	12,3	2,5	98	6,2	6,3	2,8	10,2	1,9
CH ₄ – Emissionen [g h ⁻¹]	27	2,7	1,5	0,2	11,4	2,7	117	8,9	8,8	0,4	18,3	3,5	98	8,9	7,9	4,4	17,7	3,2
CH ₄ – Emissionen [g GV ⁻¹ d ⁻¹]	27	12,1	9,4	0,9	28,2	7,6	117	29,1	28,8	2,1	56,8	11,9	98	28,1	25,1	12,8	54,0	10,5
Temperatur ⁿ _{Zuluft} [°C]	27	6,8	6,3	3,0	12,4	2,2	117	8,0	8,2	-3,8	16,9	3,1	98	11,9	12,2	1,9	21,6	5,2
Temperatur ⁿ _{Abteil} [°C]	27	19,4	19,3	16,0	21,9	1,2	117	18,4	18,6	15,5	22,3	1,7	98	18,9	18,1	15,7	24,7	2,5
Temperatur ⁿ _{Abluft} [°C]	27	15,7	15,5	13,7	18,8	1,1	117	15,9	15,8	11,5	20,0	1,5	98	17,4	17,0	13,2	23,0	2,7
Luftfeuchte ⁿ _{Abteil} [%]	27	62,2	61,9	53,4	69,9	3,3	117	60,7	60,2	46,7	79,3	5,5	98	61,9	58,5	41,8	82,2	10,4
Luftfeuchte ⁿ _{Abluft} [%]	27	78,5	79,1	68,5	84,7	3,6	117	76,4	75,9	60,5	86,3	5,4	98	71,2	73,2	55,9	82,6	7,5
Volumenstrom [m³ h ⁻¹]	27	1839	1825	1731	1998	90,0	117	2294	2324	2018	2495	136	98	2745	2731	2507	2992	144
Volumenstrom [m³ h ⁻¹ Tier ⁻¹]	27	35,4	35,1	33,3	38,4	1,7	117	44,4	44,8	38,8	52,9	3,1	98	54,0	53,9	48,2	63,6	3,6

Klasse Parameter	Volumenstrom 0-2000 m ³ /h						Volumenstrom 2000 - 2500 m ³ /h						Volumenstrom 2500 - 3000 m ³ /h					
	n	\bar{x}	\tilde{x}	Min	Max	σ	n	\bar{x}	\tilde{x}	Min	Max	σ	n	\bar{x}	\tilde{x}	Min	Max	σ
Einzeliergewichte [kg]	27	46,4	42,1	31,9	114,1	18,4	117	73,1	69,5	36,2	115,8	21,7	98	79,7	83,4	37,5	116,7	23,7
Abteilergewichte [kg]	27	2414	2190	1658	5933	957	117	3770	3577	1883	6022	1090	98	4056	4307	1893	5977	1187
Flüssigmist _{pH}	27	7,8	7,9	6,8	8,4	0,4	117	7,3	7,4	6,7	7,6	0,2	90	7,3	7,4	6,6	7,6	0,2
Flüssigmist _{Temperatur} [°C]	27	15,7	15,6	13,5	18,3	0,9	117	15,6	15,5	13,4	18,8	1,5	90	15,9	15,4	13,4	20,3	2,0

n = Stichprobenumfang \bar{x} = Mittelwert \tilde{x} = Median Min = Minimum Max = Maximum σ = Standardabweichung

Klasse Parameter	Volumenstrom 3000 - 3500 m ³ /h						Volumenstrom 3500 - 4000 m ³ /h					
	n	\bar{x}	\tilde{x}	Min	Max	σ	n	\bar{x}	\tilde{x}	Min	Max	σ
NH ₃ – Konzentrationen _{Abteil} [ppm]	72	1,8	1,7	0,9	3,5	0,6	59	1,4	1,3	0,9	2,5	0,3
NH ₃ – Konzentrationen _{Abluft} [ppm]	72	8,4	8,2	5,2	12,0	1,9	59	7,9	7,5	5,2	11,4	1,6
NH ₃ – Emissionen [g h ⁻¹]	72	16,8	16,5	10,9	24,7	4,0	59	18,4	18,0	11,4	26,0	3,6
NH ₃ – Emissionen [g GV ⁻¹ d ⁻¹]	72	55,2	54,5	27,7	94,5	17,0	59	49,4	47,2	24,8	86,6	10,5
CH ₄ – Konzentrationen _{Abteil} [ppm]	72	4,0	4,1	0,1	13,6	2,7	59	5,7	6,4	0,7	10,6	2,7
CH ₄ – Konzentrationen _{Abluft} [ppm]	72	7,2	6,4	3,1	15,2	2,6	59	10,9	12,2	4,8	18,8	3,5
CH ₄ – Emissionen [g h ⁻¹]	72	9,6	9,5	5,9	14,4	2,0	59	16,2	16,5	7,1	25,6	4,1
CH ₄ – Emissionen [g GV ⁻¹ d ⁻¹]	72	32,9	26,9	14,5	75,2	14,0	59	44,2	46,8	18,3	68,1	12,9
Temperatur _{Zuluft} [°C]	72	17,6	16,7	12,4	25,9	3,2	59	19,8	19,6	15,1	27,5	2,8
Temperatur _{Abteil} [°C]	72	21,5	20,6	17,1	27,7	2,6	59	23,2	23,0	19,5	29,5	2,3
Temperatur _{Abluft} [°C]	72	20,6	20,1	16,6	27,2	2,5	59	22,4	22,3	18,9	28,1	2,2
Luftfeuchte _{Abteil} [%]	72	66,8	68,2	47,3	81,3	8,0	59	67,7	68,2	43,0	83,7	8,8
Luftfeuchte _{Abluft} [%]	72	70,6	71,1	56,9	85,0	6,3	59	73,5	75,7	54,7	88,2	8,0
Volumenstrom [m ³ h ⁻¹]	72	3228	3233	3000	3499	142	59	3622	3637	3506	3732	58
Volumenstrom [m ³ h ⁻¹ Tier ⁻¹]	72	63,9	63,8	58,3	74,0	3,1	59	70,7	70,5	67,7	76,8	2,0

Klasse Parameter	Volumenstrom 3000 - 3500 m ³ /h						Volumenstrom 3500 - 4000 m ³ /h					
	n	\bar{x}	\tilde{x}	Min	Max	σ	n	\bar{x}	\tilde{x}	Min	Max	σ
Einzelgewichte [kg]	72	78,1	85,0	35,9	116,0	25,1	59	88,8	85,8	63,5	114,4	16,2
Abteilmgewichte [kg]	72	3937	4163	1794	5878	1252	59	4532	4461	3173	5837	790
Flüssigmist _{pH}	59	7,2	7,2	6,7	7,6	0,3	59	7,0	7,0	6,7	7,5	0,2
Flüssigmist _{Temperatur} [°C]	59	18,0	18,1	13,6	20,9	1,7	59	19,9	20,5	14,8	21,9	1,5

Klasse Parameter	-5 bis 10 Grad Celsius						10 bis 20 Grad Celsius						20 bis 30+ Grad Celsius					
	n	\bar{x}	\tilde{x}	Min	Max	σ	n	\bar{x}	\tilde{x}	Min	Max	σ	n	\bar{x}	\tilde{x}	Min	Max	σ
NH ₃ – Konzentrationen _{Abteil} [ppm]	144	4,7	4,7	1,3	9,4	2,0	182	2,1	2,0	1,0	6,3	0,9	47	1,6	1,4	0,9	3,5	0,7
NH ₃ – Konzentrationen _{Abluft} [ppm]	144	12,4	12,1	6,3	18,6	2,8	182	9,1	9,1	4,1	15,5	2,3	47	6,9	6,7	4,5	10,5	1,5
NH ₃ – Emissionen [g h ⁻¹]	144	18,0	17,8	6,7	27,6	4,6	182	16,8	17,1	5,4	26,5	4,6	47	14,9	14,0	7,8	24,1	3,8
NH ₃ – Emissionen [g GV ⁻¹ d ⁻¹]	144	59,9	59,2	26,3	100,0	19,3	182	51,5	50,2	23,3	94,8	14,6	47	58,3	52,7	35,5	94,5	15,0
CH ₄ – Konzentrationen _{Abteil} [ppm]	144	3,5	3,5	0,1	7,4	2,1	182	3,2	2,9	0,1	9,3	2,0	47	7,1	7,0	3,0	13,6	2,3
CH ₄ – Konzentrationen _{Abluft} [ppm]	144	6,9	7,3	0,3	12,3	2,3	182	6,3	6,1	0,7	13,9	2,5	47	11,5	12,3	4,9	18,8	3,5
CH ₄ – Emissionen [g h ⁻¹]	144	9,0	9,3	0,2	18,3	4,4	182	9,2	8,6	0,9	21,4	3,9	47	14,2	13,4	5,9	25,6	5,4
CH ₄ – Emissionen [g GV ⁻¹ d ⁻¹]	144	27,3	28,6	0,9	55,4	12,5	182	27,8	24,7	4,9	56,8	11,2	47	52,2	51,7	33,2	75,2	9,3
Temperatur _{Zuluft} [°C]	144	6,5	6,8	-3,8	9,7	2,4	182	15,1	15,3	10,0	20,0	3,0	47	22,2	21,6	20,2	27,5	1,8
Temperatur _{Abteil} [°C]	144	17,9	17,9	15,5	20,7	1,5	182	20,2	20,4	16,6	23,6	1,9	47	25,2	24,7	23,5	29,5	1,4
Temperatur _{Abluft} [°C]	144	15,2	15,4	11,5	17,7	1,1	182	19,1	19,0	15,8	23,1	2,0	47	24,1	23,7	22,1	28,1	1,4
Luftfeuchte _{Abteil} [%]	144	59,7	59,3	43,9	73,5	4,9	182	66,4	68,0	41,8	83,7	9,6	47	63,5	64,8	48,3	76,8	7,4
Luftfeuchte _{Abluft} [%]	144	76,4	76,7	60,5	86,3	5,3	182	72,7	73,5	54,7	88,2	7,3	47	68,4	68,0	56,4	79,5	6,8

Klasse Parameter	-5 bis 10 Grad Celsius						10 bis 20 Grad Celsius						20 bis 30+ Grad Celsius					
	n	\bar{x}	\tilde{x}	Min	Max	σ	n	\bar{x}	\tilde{x}	Min	Max	σ	n	\bar{x}	\tilde{x}	Min	Max	σ
Volumenstrom [m ³ h ⁻¹]	144	2279	2328	1731	2712	263	182	2999	2995	1887	3731	460	47	3386	3443	2759	3688	283
Volumenstrom [m ³ h ⁻¹ Tier ⁻¹]	144	44,1	44,8	33,3	56,5	5,3	182	59,2	60,1	36,3	76,8	9,4	47	65,8	68,2	53,1	71,2	5,3
Einzeltiergewichte [kg]	144	75,0	73,9	32,7	115,8	23,8	182	81,0	85,7	31,9	116,7	23,7	47	62,5	63,1	35,9	112,8	19,7
Abteilmgewichte [kg]	144	3871	3844	1702	6022	1207	182	4098	4324	1658	5878	1169	47	3219	3223	1794	5755	1028
Flüssigmist _{pH}	144	7,5	7,4	7,1	8,4	0,3	182	7,3	7,3	6,6	8,1	0,3	47	6,9	6,9	6,7	7,3	0,1
Flüssigmist _{Temperatur} [°C]	144	15,0	15,3	13,4	17,8	1,2	182	17,5	17,8	13,4	21,7	1,9	47	22,4	20,7	18,6	21,9	0,9

n = Stichprobenumfang \bar{x} = Mittelwert \tilde{x} = Median Min = Minimum Max = Maximum σ = Standardabweichung

Tabelle A7: Häufigkeitsverteilung der fünf Volumenstromklassen über alle vier Mastdurchgänge (R_A, R_B, R_C, R_D)

Klasse	R _A	R _B	R _D	R _C	Anzahl R _A bis R _D
	n	n	n	n	n
0 - 2000 m ³ /h	0	22	0	5	27
2000 - 2500 m ³ /h	10	36	3	68	117
2500 - 3000 m ³ /h	34	27	14	23	98
3000 - 3500 m ³ /h	39	9	23	1	72
3500 - 4000 m ³ /h	12	2	45	0	59
Summe	95	96	85	97	373

Tabelle A8: Häufigkeitsverteilung der drei Temperaturklassen über alle vier Mastdurchgänge (R_A, R_B, R_C, R_D)

Klasse \	R _A	R _B	R _D	R _C	Anzahl R _A bis R _D
	n	n	n	n	n
-5 - 10 °C	8	59	0	77	144
10 - 20 °C	74	37	51	20	182
20 - 30+°C	13	0	34	0	47
Summe	95	96	85	97	373

n = Stichprobenumfang

Tabelle A9: Übersicht der Regressionsergebnisse bei der Analyse der kompletten (R_A bis R_D) und reduzierten ($R_{A\text{ red}}$ - $R_{D\text{ red}}$) Datensätze der Referenzabteile bei Anwendung der Auswertungsvarianten A, B, C für die Ammoniakemissionen [g h^{-1}]

		Ammoniakemissionen [g h^{-1}]							
		R_A	R_B	R_D	R_C	$R_{A\text{ red}}$	$R_{B\text{ red}}$	$R_{D\text{ red}}$	$R_{C\text{ red}}$
		n=95	n=96	n=85	n=97	n=20	n=20	n=18	n=20
		R^2_{adj}	R^2_{adj}	R^2_{adj}	R^2_{adj}	R^2_{adj}	R^2_{adj}	R^2_{adj}	R^2_{adj}
Rang	AV A								
1	$T_{\text{Abteil}} [^\circ\text{C}]$	0,33	0,06	0,02	0,48	0,46	0,05	0,05	0,50
2	$V_{\text{Strom}} [\text{m}^3 \text{h}^{-1}]$	0,58	0,06	0,61	0,52	0,64	0,02	0,69	0,60
3	$T_{\text{Abluft}} [^\circ\text{C}]$	0,59	0,11	0,63	0,76	0,63	0,10	0,67	0,80
4	$\text{RH}_{\text{Abluft}} [\%]$	0,60	0,11	0,63	0,79	0,62	0,05	0,65	0,81
Rang	AV B								
1	EG [kg]	0,77	0,00	0,80	0,39	0,79	-0,06	0,77	0,40
2	$T_{\text{Abteil}} [^\circ\text{C}]$	0,80	0,11	0,83	0,49	0,80	0,04	0,79	0,50
3	$V_{\text{Strom}} [\text{m}^3 \text{h}^{-1}]$	0,80	0,49	0,83	0,54	0,79	0,52	0,79	0,58
4	$T_{\text{Abluft}} [^\circ\text{C}]$	0,81	0,50	0,83	0,76	0,78	0,49	0,78	0,86
Rang	AV C								
1	EG [kg]	0,53	0,00	0,80	0,39	0,53	-0,06	0,77	0,40
2	$T_{\text{FM}} [^\circ\text{C}]$	0,60	0,20	0,81	0,41	0,64	0,15	0,75	0,43
3	$V_{\text{Strom}} [\text{m}^3 \text{h}^{-1}]$	0,59	0,28	0,82	0,46	0,62	0,19	0,81	0,55
4	$T_{\text{Abteil}} [^\circ\text{C}]$	0,63	0,51	0,83	0,56	0,62	0,52	0,80	0,55

n = Stichprobenumfang R^2_{adj} = angepasstes Bestimmtheitsmaß RH = relative Luftfeuchte T = Temperatur
 AV = Auswertungsvariante V = Volumenstrom EG = Einzeltiergewichte FM = Flüssigmist

Tabelle A10: Übersicht der Regressionsergebnisse bei der Analyse der kompletten (R_A bis R_D) und reduzierten ($R_{A\text{ red}}$ - $R_{D\text{ red}}$) Datensätze der Referenzabteile bei Anwendung der Auswertungsvarianten A, B, C für die Methanemissionen [g h^{-1}]

		Methanemissionen [g h^{-1}]							
		R_A n=95	R_B n=96	R_D n=85	R_C n=97	$R_{A\text{ red}}$ n=20	$R_{B\text{ red}}$ n=20	$R_{D\text{ red}}$ n=18	$R_{C\text{ red}}$ n=20
		R^2_{adj}	R^2_{adj}	R^2_{adj}	R^2_{adj}	R^2_{adj}	R^2_{adj}	R^2_{adj}	R^2_{adj}
Rang	AV A								
1	$T_{\text{Abteil}} [^\circ\text{C}]$	0,61	0,53	0,71	0,22	0,32	0,46	0,80	0,20
2	$V_{\text{Strom}} [\text{m}^3 \text{h}^{-1}]$	0,62	0,54	0,78	0,51	0,32	0,55	0,80	0,53
3	$T_{\text{Abluft}} [^\circ\text{C}]$	0,69	0,69	0,85	0,53	0,59	0,73	0,85	0,54
4	$\text{RH}_{\text{Abluft}} [\%]$	0,69	0,72	0,87	0,56	0,66	0,73	0,92	0,54
Rang	AV B								
1	EG [kg]	0,61	0,53	0,71	0,22	0,32	0,46	0,80	0,20
2	$T_{\text{Abteil}} [^\circ\text{C}]$	0,61	0,61	0,71	0,44	0,29	0,59	0,79	0,46
3	$V_{\text{Strom}} [\text{m}^3 \text{h}^{-1}]$	0,72	0,61	0,85	0,50	0,37	0,60	0,79	0,50
4	$T_{\text{Abluft}} [^\circ\text{C}]$	0,75	0,69	0,88	0,60	0,56	0,76	0,84	0,78
Rang	AV C								
1	EG [kg]	0,67	0,53	0,71	0,22	0,53	0,46	0,80	0,20
2	$T_{\text{FM}} [^\circ\text{C}]$	0,70	0,53	0,80	0,41	0,53	0,48	0,83	0,45
3	$V_{\text{Strom}} [\text{m}^3 \text{h}^{-1}]$	0,70	0,54	0,81	0,53	0,49	0,53	0,82	0,51
4	$T_{\text{Abteil}} [^\circ\text{C}]$	0,70	0,81	0,81	0,57	0,48	0,78	0,81	0,52

n = Stichprobenumfang

R^2_{adj} = angepasstes Bestimmtheitsmaß

RH = relative Luftfeuchte

T = Temperatur

AV = Auswertungsvariante

V = Volumenstrom

EG = Einzeltiergewichte

FM = Flüssigmist