

FORSCHUNGBERICHT AGRARTECHNIK

des Arbeitskreises Forschung und Lehre der

Max-Eyth-Gesellschaft Agrartechnik im VDI (VDI-MEG)

404

Eva Gallmann

**Vergleich von zwei Haltungssystemen
für Mastschweine mit
unterschiedlichen Lüftungsprinzipien –
Stallklima und Emissionen**

Dissertation

Hohenheim 2003

ISSN 0931-6264

Universität Hohenheim
Institut für Agrartechnik
Verfahrenstechnik in der Tierproduktion
und landwirtschaftliches Bauwesen
Prof. Dr. Thomas Jungbluth

**Vergleich von zwei Haltungssystemen für Mastschweine mit
unterschiedlichen Lüftungsprinzipien -
Stallklima und Emissionen**

Dissertation
zur Erlangung des Grades eines Doktors
der Agrarwissenschaften

vorgelegt der Fakultät Agrarwissenschaften
Universität Hohenheim

von
Dipl.-Ing. sc. agr. Eva Gallmann
aus Aachen

2003

Die vorliegende Arbeit wurde am 11.02.2003 von der Fakultät Agrarwissenschaften der Universität Hohenheim als "Dissertation zur Erlangung des Grades eines Doktors der Agrarwissenschaften" angenommen.

Prodekan: Prof. Dr. K. Stahr
Hauptberichter: Prof. Dr. T. Jungbluth
Mitberichter: Prof. Dr. U. Haas

Mündliche Prüfung: Prof. Dr. T. Jungbluth
Prof. Dr. U. Haas
Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. H.D. Kutzbach

Tag der mündlichen Prüfung: 03.03.2003

Die vorliegende Arbeit wurde von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) im Rahmen der Forschergruppe "Messung, Modellierung und Minderung von Gasemissionen in landwirtschaftlichen Betriebssystemen" finanziell unterstützt.

D 100

Copyright 2003

Im Selbstverlag: Eva Gallmann
Bezugsquelle: Universität Hohenheim
Institut für Agrartechnik -440-
Garbenstr. 9
D-70599 Stuttgart

Alle Rechte, auch der Übersetzung und des Nachdruckes sowie jede Art der photo-mechanischen Wiedergabe, auch auszugsweise, bleiben vorbehalten.

Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftliche Mitarbeiterin am Fachgebiet Verfahrenstechnik in der Tierproduktion und landwirtschaftliches Bauwesen des Instituts für Agrartechnik der Universität Hohenheim.

An dieser Stelle gilt mein herzlicher Dank Herrn Prof. Dr. T. Jungbluth, der mir die selbstständige Bearbeitung des Projektes durch die Bereitstellung hervorragender Arbeitsbedingungen, sein entgegengebrachtes Vertrauen und durch eine gesunde Mischung aus Fordern und Fördern ermöglicht hat. Herrn Prof. Dr. U. Haas als Mitberichter danke ich aufrichtig für die engagierte Durchsicht der Arbeit, die konstruktive und hilfreiche Kritik sowie angenehmen Gespräche. Herrn Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. H.D. Kutzbach gilt mein Dank für die Begleitung der Arbeit als Sprecher der DFG-Forscherguppe und die Beteiligung an der mündlichen Prüfung.

An der erfolgreichen Realisierung des Projektes und vor allem am Bau und Umbau des Versuchsstalles für Mastschweine waren viele hilfreiche Köpfe und Hände beteiligt, die das Projekt durch ihre Einsatzbereitschaft auf allen Ebenen unterstützt haben. Mein besonderer Dank gilt hierfür allen Mitarbeitern der zentralen Einrichtungen wie Werkstatt und Messtechnik des Instituts für Agrartechnik sowie der Leitung und den Mitarbeitern der Versuchsstation "Unterer Lindenhof". Weiterhin danke ich allen wissenschaftlichen Hilfskräften für ihre aktive Mitarbeit und die schöne Zeit beim Stallbau und bei der Versuchsdurchführung.

Allen Mitarbeitern, ehemaligen und derzeitigen Mitdoktoranden am Fachgebiet und der gesamten "Hohenheimer Agrartechnik Familie" verdanke ich vielfältige fachliche Unterstützung sowie eine wunderbare Zeit in kollegialer und freundschaftlicher Atmosphäre. Meinem Betreuer, Herrn PD Dr. E. Hartung, möchte ich an dieser Stelle besonders danken für die vertrauensvolle Zusammenarbeit, den gemeinsamen Weg durch die Höhen und Tiefen des wissenschaftlichen Arbeitens, seine konstruktive Kritik und die in meine Arbeit investierte Zeit auch nach Feierabend.

Schließlich gilt mein Dank allen jenen, die mich in Freundschaft und Liebe aus fern und nah auf meinem Weg begleitet haben und mich in zahlreichen, aufmunternden Gesprächen motiviert haben. Meinen Eltern gebührt der größte Dank, da sie mir immer zur Seite stehen, mir alle Freiheiten geben und meine Entscheidungen mittragen. Für das große Verständnis für meine Arbeit und meine Launen, die Unterstützung und Motivation danke ich von Herzen dem Mann an meiner Seite, Christoph Kleinknecht, der den Mut hatte, mich "trotzdem" zu heiraten.

Für meine Familie und Freunde

[...] "Die Wissenschaft besteht aus zwei grundlegenden Dingen, erstens aus Messungen und Beobachtungen, aus dem geduldigen, rastlosen Sammeln von unzähligen Tatsachen, die aufgezeichnet und ausgewertet werden müssen. Auf diese Weise wird in einem riesigen Katalog versucht, die unendlich vielfältigen Formen der Materie zu erfassen. Zweitens besteht die Wissenschaft aus Erleuchtung, die manchmal in einer einzigen Sekunde dem Forscher das gegenseitige Abhängigkeitsverhältnis der Erscheinungen klar werden lässt. Diese Erleuchtung kommt selten und ist die Gabe einiger weniger. So manches Wissenschaftlerdasein geht nach vielen Jahren undankbarer und mühseliger Sammel- und Beobachtungstätigkeit zu Ende, ohne dass es jemals von dem Blitz der großen Erkenntnis erhellt wurde. In den Namen jener, die durch umwälzende Entdeckungen unsterblich wurden, sind die Namen Tausender unbekannter Forscher vereinigt. Ihr Ameisenfleiß ermöglichte es den Glücklicheren, in einem Augenblick der Erleuchtung eines der zahllosen Rätsel, die uns umgeben, zu lösen. [...] Wer um sie (die Welt) kämpfen will, muss ein heißes Herz, einen kühlen Verstand haben und er sollte sich darüber im klaren sein, dass sich so mancher damit abfinden muss, aus dem Leben zu scheiden, ohne in der Wissenschaft etwas erreicht zu haben; aber das hilft dir leider gar nichts - niemand und nichts hilft dir, wenn du unter Hilfe ein Rezept für Entdeckungen verstehst. Doch eine Hilfe findest du stets: den reichen Schatz von Erfahrungen, den die Wissenschaftler der Erde in Tausenden von Jahren angehäuft haben. Setz dich hier auf diese Bank, die dein Großvater aufgestellt hat, und denke darüber nach, ob es sich unter diesen Perspektiven für dich lohnt, Forscher zu werden" [...]

aus "Die Astronauten" von Stanislaw Lem; geschrieben 1950

INHALTSVERZEICHNIS

Abkürzungen und Symbole		III
Tabellenverzeichnis		VII
Abbildungsverzeichnis		XI
1	EINLEITUNG	1
1.1	Problemstellung	2
1.2	Zielsetzung	2
2	KENNTNISSTAND	3
2.1	Ammoniak	3
2.1.1	Bildung und Freisetzung	6
2.1.2	Einflussfaktoren und Verminderungsstrategien	10
2.1.3	Innenraumkonzentrationen und Emissionen	17
2.2	Klimarelevante Gase	24
2.2.1	Kohlendioxid	27
2.2.1.1	Bildung und Freisetzung	29
2.2.1.2	Einflussfaktoren und Verminderungsstrategien	32
2.2.1.3	Innenraumkonzentrationen und Emissionen	33
2.2.2	Methan	37
2.2.2.1	Bildung und Freisetzung	39
2.2.2.2	Einflussfaktoren und Verminderungsstrategien	42
2.2.2.3	Innenraumkonzentrationen und Emissionen	44
2.2.3	Lachgas	48
2.2.3.1	Bildung und Freisetzung	50
2.2.3.2	Einflussfaktoren und Verminderungsstrategien	52
2.2.3.3	Innenraumkonzentrationen und Emissionen	54
2.3	Staub (Particulate Matter)	57
2.3.1	Charakterisierung von Schwebstaub in Schweineställen	61
2.3.2	Verminderungsstrategien	63
2.3.3	Innenraumkonzentrationen und Einflussfaktoren	66
2.4	Methoden zur Erfassung und Beurteilung von Stallklima und Emissionen	69
2.4.1	Bestimmung von Gaskonzentrationen	70
2.4.2	Bestimmung von Staubkonzentrationen	73
2.4.3	Volumenstrombestimmung	76
2.4.3.1	Zwangslüftung	76
2.4.3.2	Freie Lüftung	77
2.4.4	Durchführung von Untersuchungen zu Stallklima und Emissionen	82
2.4.4.1	Allgemeine Anforderungen	82
2.4.4.2	Probenahme	84
2.4.4.3	Datenaufbereitung und Qualitätskontrolle	86
3	EIGENE UNTERSUCHUNGEN - MATERIAL UND METHODE	89
3.1	Versuchsstall für Mastschweine und Haltungssysteme	89
3.2	Untersuchungszeiträume	98
3.3	Räumliche und zeitliche Probenahme sowie Messgrößen	99
3.4	Datenaufbereitung und Emissionsberechnung	105
3.5	Statistische Methoden	108

4	EIGENE UNTERSUCHUNGEN - ERGEBNISSE	110
4.1	Eignung und Empfindlichkeit des Messsystems	110
4.1.1	Volumenstrombestimmung - Kalibrierung der Messventilatoren	110
4.1.2	Gaskonzentrationsbestimmung	114
4.1.3	Nachweis von Leckluftströmen	118
4.2	Vergleich der Haltungssysteme - Ergebnisse der Langzeitmessung	120
4.2.1	Randbedingungen der Mastdurchgänge	120
4.2.1.1	Jahreszeitliche Einordnung	120
4.2.1.2	Stallbelegung und Leistung	121
4.2.1.3	Flüssigmistparameter	122
4.2.1.4	Windverhältnisse	126
4.2.1.5	Verschmutzung	128
4.2.2	Stallklimafaktoren	130
4.2.2.1	Temperatur und relative Luftfeuchte	130
4.2.2.2	Volumenströme	134
4.2.2.3	Konzentrationen von Ammoniak, Kohlendioxid und Methan	139
4.2.2.4	Staubkonzentrationen	144
4.2.3	Emissionen von Ammoniak, Kohlendioxid und Methan	150
4.2.3.1	Veränderung der Emissionen im Mastverlauf	151
4.2.3.2	Vergleich der Emissionen zwischen den Haltungssystemen	154
4.2.3.3	Einfluss der Temperatur auf der Basis der Tagesmittelwerte	156
4.2.3.4	Einfluss des Volumenstromes auf der Basis der Tagesmittelwerte	158
4.2.3.5	Vergleich der Kohlendioxidemissionen mit einer Abschätzung der tierspezifischen Kohlendioxidproduktion	159
4.2.3.6	Zusammenhang zwischen Ammoniakemission und Kohlendioxidemission	161
4.2.3.7	Tageszeitliche Effekte und Ansätze zur Emissionskontrolle im Tagesverlauf- Regressionsmodelle	162
4.2.3.7.1	Haltungssystem "Vollspalten, Zwangslüftung (VSP)"	164
4.2.3.7.2	Haltungssystem "Getrennte Klimabereiche, freie Lüftung (GK)"	169
4.2.3.7.3	Reduziertes Regressionsmodell	174
4.2.3.7.4	Wirkung und mögliche Anwendung	175
5	DISKUSSION	176
5.1	Bewertung der Vorgehensweise	176
5.1.1	Versuchsstall und Haltungssysteme	176
5.1.2	Versuchsplanung und -durchführung	179
5.2	Bewertung der Datenqualität	181
5.3	Bewertung und Einordnung der Ergebnisse	182
5.3.1	Stallklimafaktoren	182
5.3.2	Emissionen	185
5.4	Weiterführende Untersuchungen und Forschungsbedarf	188
6	ZUSAMMENFASSUNG	190
7	SUMMARY	193
8	LITERATUR	196
9	ANHANG	220

Abkürzungen und Symbole

Symbol	Einheit	Erläuterung
a		Jahr
A	[m ²]	(Phasengrenz)fläche
A		Anhang
Abb.		Abbildung
AEL		Arbeitsgemeinschaft für Elektrizitätsanwendung in der Landwirtschaft e.V.
ASAE		American Society of Agricultural Engineers
BImSchG		Bundes-Immissionsschutzgesetz
BVET		Bundesamt für Veterinärwesen, Schweiz
BVT		Best Verfügbare Techniken
bzw.		beziehungsweise
c	[mg m ⁻³]	Gaskonzentration
c _i	[mg m ⁻³]	Konzentration der Gase i
C		Kohlenstoff
°C		Grad Celsius
Ca		Kalzium
ca.		circa
CF ₄		Tetrafluoromethan (perfluorierter Kohlenwasserstoff)
C ₂ F ₆		Hexafluoroethan (perfluorierter Kohlenwasserstoff)
C ₃ F ₈		Octafluoropropan (perfluorierter Kohlenwasserstoff)
CH ₄		Methan
CIGR		Commission International du Génie Rural
cm	[10 ⁻² m]	Zentimeter
CO ₂		Kohlendioxid
CO ₂ (NH ₂) ₂		Harnstoff
d		Tag
D		Durchmesser
D _{ae}		aerodynamischer Durchmesser
DENOX-Anlage		Anlage zur Rauchgasentstickung über katalytische Reduktion von Stickoxiden
DFG		Deutsche Forschungsgemeinschaft
d.h.		das heißt
DIN		Deutsche Industrie Norm
E	[g h ⁻¹]	Emission
E _i		Emission des Gases i
ECD		Elektroneneinfangdetektor (Electron Capture Detector)
ECE		UN Economic Commission for Europe
EG		Europäische Gemeinschaft
EN		Europäische Norm
et al.		et alteri (und andere)
etc.		et cetera (und so weiter)
EU		Europäische Union
evtl.		eventuell
FCKW		Fluorchlorkohlenwasserstoff
FID		Flammenionisationsdetektor
FKW		Fluorkohlenwasserstoff

FS		Frischsubstanz
FTIR		Fourier-transformierte Infrarotspektroskopie
g	[10 ⁻³ kg]	Gramm
GC		Gaschromatograph
GFF		Glasfaserfilter
ggf.		gegebenenfalls
GK		Haltungssystem Getrennte Klimabereiche
Gt	[10 ¹² kg]	Gigatonne
GV	[500 kg LG]	Großvieheinheit
GWP		Global Warming Potential
h		Stunde
H		Wasserstoff
H ₂		molekularer Wasserstoff
H ₂ O		Wasser
H-FKW		Halogenisierte Fluorkohlenwasserstoffe
H ₂ S		Schwefelwasserstoff
hPa		Hekto-Pascal
i.		in; im
i.d.R.		in der Regel
incl.		inklusive
IPCC		Intergovernmental Panel on Climate Change
IR		Infrarot
ISO		Internationale Standard Organisation
IVU		Integrierte Vermeidung und Verminderung der Umweltverschmutzung
K		Kalium
K		Kelvin
k.A.		keine Angabe
Kap.		Kapitel
kg		Kilogramm
kt	[10 ⁶ kg]	Kilotonne
KTBL		Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V.
L		Liter
LG		Lebendgewicht
LM		Lebendmasse
m		Meter
m	[10 ⁻³]	Milli
MAK		maximale Arbeitsplatzkonzentration
max		maximal; Maximum
MD		Mastdurchgang
ME		Umsetzbare Energie
min		Minute
Min		Minimum
Mio.t	[10 ⁹ kg]	Millionen Tonnen
MJ	[10 ⁶ Joule]	Mega Joule
µm	[10 ⁻⁶ m]	Mikrometer
Mrd.t	[10 ¹² kg]	Milliarden Tonnen
Mt	[10 ⁹ kg]	Megatonnen
mV	[10 ⁻³ V]	Millivolt
<i>n</i>		Anzahl; Anzahl Messwerte (Stichprobenumfang)

N		Stickstoff
N ₂		molekularer Stickstoff
NDIR		Nichtdispersive Infrarot-Spektroskopie
NEC		National Emission Ceiling (nationale Emissionsobergrenzen)
Nfe		Stickstoff freie Extraktstoffe
NH ₃		Ammoniak
NH ₄ ⁺		Ammonium-Ion
NH ₂ OH		Hydroxylamin
NO ₂ ⁻		Nitrit
NO ₃ ⁻		Nitrat
NO _x		Stickoxide
N ₂ O		Distickstoffoxid (Lachgas)
n.n.		nicht nachweisbar
n.s.		nicht signifikant
O		Sauerstoff
O ₂		molekularer Sauerstoff
O ₃		Ozon
o.g.		oben genannt
OH ⁻		Hydroxy-Ion
OPC		Optischer Partikelzähler
<i>P</i>		(Sicherheits-)Wahrscheinlichkeit
P		Phosphor
Pa		Pascal
PAS		Photoakustische Spektroskopie
pH		negativer dekadischer Logarithmus der H ⁺ -Aktivität (pondus hydrogenium)
PID		Passiv Infrarot Detektor
ppb		parts per billion
ppbv		part per billion (volumetrisch)
ppm		part per million
ppmv		parts per million (volumetrisch)
PM		Particulate Matter
QK		Qualitäts-Kontrolle
QS		Qualitäts-Sicherung
QZ		Qualitäts-Zertifizierung
<i>r</i>		Korrelationskoeffizient
<i>R</i> ²		Regressionskoeffizient (Bestimmtheitsmaß)
<i>RH</i>	[%]	Relative Luftfeuchte
<i>RH</i> _a	[%]	Relative Luftfeuchte der Außenluft
<i>RH</i> _i	[%]	Relative Luftfeuchte der Innenraumluft
RQ		Respiratorischer Quotient
s		Sekunde
s.a.		siehe auch
SchHaVo		Schweinehaltungsverordnung
SD		Standardabweichung
SF ₆		Schwefelhexafluorid
s.o.		siehe oben
sog.		sogenannte(r)
s.u.		siehe unten
t	[10 ³ kg]	Tonne

T	[°C]	Temperatur
T_a	[°C]	Außentemperatur
T_i	[°C]	Innenraumtemperatur
TA		Technische Anleitung
Tab.		Tabelle
TEOM		Tapered Element Oscillating Microbalance
Tg	[10 ⁹ kg]	Teragramm
TS	[%]	Trockensubstanz
u.a.		unter anderem; und andere
UBA		Umweltbundesamt
UN		United Nations
u.U.		unter Umständen
UV		Ultraviolett
UVP		Umweltverträglichkeitsprüfung
v	[m s ⁻¹]	Geschwindigkeit
V		Volt
\dot{V}	[m ³ h ⁻¹]	Volumenstrom
vgl.		vergleiche
Vgl.		Vergleich
VOC		Volatile Organic Compound
Vol.-%		Volumenprozent
VSP		Halbungssystem Vollspaltenboden
z.B.		zum Beispiel
z.T.		zum Teil
z.Zt.		zur Zeit

Tabellenverzeichnis

Tab. 1:	NH ₃ -Emissionen nach Sektoren in Deutschland (Stand August 1999) (geändert nach UBA, 2001a)	4
Tab. 2:	Beispiele für Reduktionspotenziale verschiedener fütterungstechnischer Maßnahmen zur NH ₃ -Emissionsminderung der Mastschweinehaltung	11
Tab. 3:	Beispiele für Reduktionspotenziale von Maßnahmen bei Haltungstechnik und Entmistung zur NH ₃ -Emissionsminderung der Mastschweinehaltung	13
Tab. 4:	Beispiele für Reduktionspotenziale lüftungstechnischer Maßnahmen zur NH ₃ -Emissionsminderung der Mastschweinehaltung	14
Tab. 5:	Beispiele für mittlere NH ₃ -Konzentrationen und -Emissionen bei verschiedenen Rahmenbedingungen zwangsbelüfteter Haltungssysteme mit Flüssigmist für Mastschweine	18/19
Tab. 6:	Beispiele für mittlere NH ₃ -Konzentrationen und -Emissionen bei verschiedenen Rahmenbedingungen freibelüfteter Haltungssysteme für Mastschweine mit Flüssigmist	20
Tab. 7:	Beiträge der EU-Staaten zur Emissionsminderung der sechs Treibhaus- gase (CO ₂ , CH ₄ , N ₂ O, H-FKW, FKW und SF ₆) im Rahmen des Kioto- Protokolls bis zum Zeitraum 2008-12 (UBA, 2001a)	26
Tab. 8:	Emissionen von CO ₂ , CH ₄ und N ₂ O in der EU 1990 bzw. 1998 in Mio. t CO ₂ - Äquivalenten (nach UBA, 2001a)	26
Tab. 9:	Entwicklung der Emissionen von CO ₂ , CH ₄ und N ₂ O und CO ₂ -Äquivalente in Deutschland von 1990 bis 1999 (nach UBA, 2001a)	27
Tab. 10:	CO ₂ -Emissionen nach Emittentengruppen in Deutschland (Stand Januar 2001) (geändert nach UBA, 2001a)	28
Tab. 11:	Beispiele für mittlere CO ₂ -Konzentrationen und -Emissionen bei verschiedenen Rahmenbedingungen zwangsbelüfteter Haltungssysteme mit Flüssigmist für Mastschweine	34
Tab. 12:	Beispiele für mittlere CO ₂ -Konzentrationen und -Emissionen bei verschiedenen Rahmenbedingungen freibelüfteter Haltungssysteme für Mastschweine mit Flüssigmist	35
Tab. 13:	CH ₄ -Emissionen nach Emittentengruppen in Deutschland (Stand Januar 2001) (geändert nach UBA, 2001a)	38
Tab. 14:	Beispiele für verfahrenstechnische Maßnahmen zur CH ₄ -Emissions- minderung aus Mastschweineeställen mit Flüssigmist (Stallebene)	42
Tab. 15:	Beispiele für mittlere CH ₄ -Konzentrationen und -Emissionen bei verschiedenen Rahmenbedingungen zwangsbelüfteter Haltungssysteme mit Flüssigmist für Mastschweine	45
Tab. 16:	Beispiele für mittlere CH ₄ -Konzentrationen und -Emissionen bei verschiedenen Rahmenbedingungen freibelüfteter Haltungssysteme für Mastschweine mit Flüssigmist	46

Tab. 17:	N ₂ O-Emissionen nach Emittentengruppen in Deutschland (Stand Januar 2001) (geändert nach UBA, 2001a)	49
Tab. 18:	Bestimmungsfaktoren des N ₂ O/N ₂ -Verhältnisses bei der Denitrifikation (nach BEESE, 1994)	51
Tab. 19:	Beispiele für mögliche Maßnahmen zur N ₂ O-Emissionsminderung aus Mastschweineställen	53
Tab. 20:	Beispiele für mittlere N ₂ O-Konzentrationen und -Emissionen bei verschiedenen Rahmenbedingungen zwangsbelüfteter Haltungssysteme mit Flüssigmist für Mastschweine	55
Tab. 21:	Beispiele für mittlere N ₂ O-Konzentrationen und -Emissionen bei verschiedenen Rahmenbedingungen freibelüfteter Haltungssysteme für Mastschweine mit Flüssigmist	56
Tab. 22:	Schätzung der PM 10 und PM 2,5 Emissionen in Europa zwischen 1990 und 2010 und Beitrag des landwirtschaftlichen Sektors (RAINS-Modell) (nach KLIMONT & AMANN, 2002)	60
Tab. 23:	Komponenten von Bioaerosolen aus der Nutztierhaltung (nach DONHAM, 1993; HARTUNG, J., 1999)	61
Tab. 24:	Beispiele für verfahrenstechnische Maßnahmen zur Minderung der Schwebstaubkonzentration in der Innenraumluft von Schweineställen	65
Tab. 25:	Beispiele für mittlere Schwebstaubkonzentrationen bei verschiedenen Rahmenbedingungen unterschiedlicher Haltungssysteme für Mastschweine (ohne Anwendung einer staubmindernden Maßnahme)	67
Tab. 26:	Messverfahren zur Bestimmung der Konzentrationen von NH ₃ , CO ₂ , CH ₄ , und N ₂ O in und aus Nutztierställen (verändert nach HARTUNG, E., 2002)	71
Tab. 27:	Anforderungen an die Messdurchführung und Messgeräte zur kontinuierlichen Bestimmung der Gaskonzentrationen von NH ₃ , CO ₂ , CH ₄ , und N ₂ O in und aus landwirtschaftlichen Nutztierställen (nach Hartung, E., 2002)	73
Tab. 28:	Einteilung von Messparametern und Messmethoden zur quantitativen und qualitativen Erfassung von luftgetragenen Partikeln (verändert nach HARTUNG, E., 2002)	74
Tab. 29:	Bilanzmethoden zur Bestimmung des Luftvolumenstromes bei freier Lüftung (nach HARTUNG, E., 2002)	79
Tab. 30:	Anforderungen an die Durchführung von Untersuchungen zur Quantifizierung von Schadgasen in und aus landwirtschaftlichen Nutztierställen (nach AMON, 1998 und HARTUNG, E., 2002)	83
Tab. 31:	Zu erwartende prozentuale Datenunsicherheiten bei der Bestimmung von Luftschadstoffen in Abhängigkeit von der Qualitätsstufe der Messketten (nach HARTUNG, E., 2002; verändert nach DE SAEGER, 1999)	87
Tab. 32:	Fütterungszeiten der Sensorflüssigfütterung	96
Tab. 33:	Inhaltsstoffe der Futtermitteln	96
Tab. 34:	Kurzbeschreibung und Vergleich der untersuchten Haltungssysteme	97
Tab. 35:	Vergleich der Hauptuntersuchungszeiträume und Haltungssysteme	98

Tab. 36:	Übersicht der Messgrößen und Messgeräte	101
Tab. 37:	Unterteilung der Beprobungsreihenfolge der Messstellen zur quasi-kontinuierlichen Konzentrationsbestimmung von NH ₃ , CO ₂ und CH ₄	103
Tab. 38:	Tägliche Zunahmen pro Tier in den Haltungssystemen Vollspalten, Zwangslüftung (VSP) und Getrennte Klimabereiche, freie Lüftung (GK) während der vier untersuchten Mastdurchgänge	122
Tab. 39:	Zusammenfassung der durchschnittlichen Flüssigmistparameter anhand der aus vier Mastdurchgängen entnommenen Proben (VSP: Vollspalten, Zwangslüftung; GK: Getrennte Klimabereiche, freie Lüftung)	123
Tab. 40:	Auswahl der Variablen für eine multiple Regressionsanalyse zur Untersuchung von Bestimmungsfaktoren auf den tageszeitlichen Verlauf der Emission	163
Tab. 41:	Zusammenfassung der Randbedingungen und mittleren Gaskonzentrationen und Emissionsraten von NH ₃ und CO ₂ für drei Messzeiträume eines Mastdurchganges (März bis Juni 2000) im Haltungssystem VSP „Vollspalten, Zwangslüftung“ (Mittelwert und Standardabweichung)	164
Tab. 42:	Zusammenfassung der Randbedingungen und mittleren Gaskonzentrationen und Emissionsraten von NH ₃ und CO ₂ für drei Messzeiträume eines Mastdurchganges (März bis Juni 2000) im Haltungssystem GK „Getrennte Klimabereiche, freie Lüftung“ (Mittelwert und Standardabweichung)	169
Tab. 43:	Anteil der erklärbaren Varianz der Emissionsraten von NH ₃ und CO ₂ für drei Messzeiträume eines Mastdurchganges (März bis Juni 2000) im reduzierten Regressionsmodell	174
Tab. 44:	Einordnung und vergleichende Beurteilung der verschiedenen Stallklimafaktoren in den beiden untersuchten Haltungssystemen VSP (Vollspalten, Zwangslüftung) und GK (Getrennte Klimabereiche, freie Lüftung)	184
Tab. 45:	Zusammenfassung der Ergebnisse zum Vergleich der Emissionen von NH ₃ , CH ₄ und CO ₂ und verschiedener Einflussfaktoren und Randbedingungen	187
<u>Anhang</u>		
Tab. A1-a:	Zusammenfassung von Randbedingungen und Stallklimafaktoren im Mastdurchgang 1 (18.10.99-14.01.00; 88 Messtage) auf der Basis von selektierten Tagesmittelwerten (n = Anzahl verwertbarer Messtage)	222
Tab. A1-b:	Zusammenfassung von Randbedingungen und Emissionen im Mastdurchgang 1 (18.10.99-14.01.00; 88 Messtage) auf der Basis von selektierten Tagesmittelwerten (n = Anzahl verwertbarer Messtage)	223
Tab. A2-a:	Zusammenfassung von Randbedingungen und Stallklimafaktoren im Mastdurchgang 2 (28.02.00-06.06.00; 100 Messtage) auf der Basis von selektierten Tagesmittelwerten (n = Anzahl verwertbarer Messtage)	224
Tab. A2-b:	Zusammenfassung von Randbedingungen und Emissionen im Mastdurchgang 2 (28.02.00-06.06.00; 100 Messtage) auf der Basis von selektierten Tagesmittelwerten (n = Anzahl verwertbarer Messtage)	225

Tab. A3-a: Zusammenfassung von Randbedingungen und Stallklimafaktoren im Mastdurchgang 3 (14.08.00-01.12.00; 110 Messtage) auf der Basis von selektierten Tagesmittelwerten (n = Anzahl verwertbarer Messtage)	226
Tab. A3-b: Zusammenfassung von Randbedingungen und Emissionen im Mastdurchgang 3 (14.08.00-01.12.00; 110 Messtage) auf der Basis von selektierten Tagesmittelwerten (n = Anzahl verwertbarer Messtage)	227
Tab. A4-a: Zusammenfassung von Randbedingungen und Stallklimafaktoren im Mastdurchgang 4 (15.01.01-27.04.01; 102 Messtage) auf der Basis von selektierten Tagesmittelwerten (n = Anzahl verwertbarer Messtage)	228
Tab. A4-b: Zusammenfassung von Randbedingungen und Emissionen im Mastdurchgang 4 (15.01.01-27.04.01; 102 Messtage) auf der Basis von selektierten Tagesmittelwerten (n = Anzahl verwertbarer Messtage)	229
Tab. A5-a: Signifikanzen des paarweisen Mittelwertvergleiches von vier Mastdurchgängen von Randbedingungen und Stallklimafaktoren (U-Test nach Mann & Whitney)	230
Tab. A5-b: Signifikanzen des paarweisen Mittelwertvergleiches von vier Mastdurchgängen von Randbedingungen und Emissionen (U-Test nach Mann & Whitney)	231
Tab. A6: Vergleich von Randbedingungen und Staubkonzentrationen mehrerer 24 h-Messungen in den Haltungssystemen Vollspalten, Zwangslüftung (VSP) und Getrennte Klimabereiche, freie Lüftung (GK)	232

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1:	Grundriss des Versuchsstalles und der Haltungssysteme	91
Abb. 2:	Schnitt und Blick in den Versuchsstall im südlichen Abteil mit dem Haltungssystem VSP	91
Abb. 3:	Schematischer Aufbau des Lüftungssystems im System Vollspalten (VSP) (nach HAUSER, 1999)	92
Abb. 4:	Schnitt und Blick in den Stall im nördlichen Abteil mit dem Haltungssystem Getrennte Klimabereiche (GK)	94
Abb. 5:	Anordnung der Messstellen und Messgrößen	100
Abb. 6:	Vergleich der Kalibriergerade (bis $4000 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$) eines Messventilators bei Einbau mit und ohne Gleichrichter	111
Abb. 7:	Vergleich der Kalibriergeraden eines neuen Messventilators und nach einem Jahr Einsatz im Abluftkamin des Systems Vollspalten	112
Abb. 8:	Vergleich der Kalibriergeraden der Messventilatoren, die in den Untersuchungen zum Vergleich der Haltungssysteme VSP und GK verwendet wurden (VSP: System Vollspalten, Zwangslüftung; GK: System Getrennte Klimabereiche; freie Lüftung)	113
Abb. 9:	Einfluss der Wasserdampfquerempfindlichkeit sowie Beprobungsreihenfolge der Messstellen auf das Messergebnis von NH_3 und CH_4 (korrigiert = Abzug der gerätespezifischen Querempfindlichkeit von $0,23 \text{ ppm NH}_3$ pro g Wasserdampf pro kg trockene Luft bzw. von $0,64 \text{ ppm CH}_4$ pro g Wasserdampf pro kg trockene Luft)	115
Abb. 10:	N_2O -Konzentration an verschiedenen Messstellen aus bis zu 10 Stichprobenmessungen (Fehlerbalken entspricht mittlerer GC-Genauigkeit von $\pm 7 \%$) (Zu = Zuluft; Ab = Abluft; In = Innenraum; Flü = Flüssigmistkeller; Lieg = Liegebereich; vgl. Abb. 5)	117
Abb. 11:	Beispielhafter Verlauf der CO_2 -Konzentration und Windgeschwindigkeit an der Zuluftöffnung sowie des Gesamtabluftvolumenstroms des Haltungssystems GK (Getrennte Klimabereiche; freie Schachtlüftung)	119
Abb. 12:	Vergleich der Stallbelegung in Großvieheinheiten sowie des Durchschnittsgewichts pro Tier zwischen den Haltungssystemen und Mastdurchgängen (VSP: Vollspalten, Zwangslüftung; GK: Getrennte Klimabereiche, freie Lüftung)	121
Abb. 13:	Vergleich der pH-Werte der Flüssigmistproben aus zwei Haltungssystemen und vier Mastdurchgängen (VSP: Haltungssystem Vollspalten, Zwangslüftung; GK: Haltungssystem Getrennte Klimabereiche, freie Lüftung)	124
Abb. 14:	Vergleich des prozentualen Anteils des $\text{NH}_4\text{-N}$ am Gesamt-N der Flüssigmistproben aus zwei Haltungssystemen und vier Mastdurchgängen (VSP: Haltungssystem Vollspalten, Zwangslüftung; GK: Haltungssystem Getrennte Klimabereiche, freie Lüftung)	124

Abb. 15:	Vergleich des $\text{NH}_4\text{-N}$ -Gehaltes in der Frischsubstanz (FS) der Flüssigmistproben aus zwei Haltungssystemen und vier Mastdurchgängen (VSP: Haltungssystem Vollspalten, Zwangslüftung; GK: Haltungssystem Getrennte Klimabereiche, freie Lüftung)	125
Abb. 16:	Anstieg des Flüssigmistpegels im Mastverlauf (VSP: Haltungssystem Vollspalten, Zwangslüftung; GK: Haltungssystem Getrennte Klimabereiche, freie Lüftung)	125
Abb. 17:	Relative Häufigkeit [%] der Tagesmittelwerte der Windrichtung [°] an der Zuluftöffnung des Systems GK während der vier untersuchten Mastdurchgänge (Klassenbreite der Windrichtung $22,5^\circ$) bei Windgeschwindigkeiten größer $0,1 \text{ m s}^{-1}$	126
Abb. 18:	Relative Häufigkeit [%] der Tagesmittelwerte der Windgeschwindigkeiten an der Zuluftöffnung des Systems GK während der vier untersuchten Mastdurchgänge (Klassenbreite $0,5 \text{ m s}^{-1}$)	127
Abb. 19:	Beispiele für die unterschiedliche Verschmutzung der Liegeflächen und des Aktivitätsbereiches im System GK in Abhängigkeit von der Innenraumtemperatur und Tiergröße	129
Abb. 20:	Vergleich der selektierten Tagesmittelwerte von Temperatur und relativer Luftfeuchte im Innenraum der Haltungssysteme VSP (Vollspalten, Zwangslüftung) und GK (Getrennte Klimabereiche, freie Lüftung) sowie der Außentemperatur im Verlauf der vier untersuchten Mastdurchgänge	131
Abb. 21:	Vergleich der Abhängigkeit der Temperatur und Luftfeuchte im Innenraum (T_i ; RH_i) der Haltungssysteme VSP (Vollspalten, Zwangslüftung) und GK (Getrennte Klimabereiche, freie Lüftung) von den Außenbedingungen (T_a ; RH_a) (Datenbasis: selektierte Tagesmittelwerte aus den vier untersuchten Mastdurchgängen)	132
Abb. 22:	Selektierte Tagesmittelwerte der Temperaturen und relativen Luftfeuchten in den beiden abgedeckten Liegeflächen des Systems GK (Getrennte Klimabereiche, freie Lüftung) während der vier untersuchten Mastdurchgänge	133
Abb. 23:	Vergleich der selektierten Tagesmittelwerte der Volumenströme pro Tier bzw. bezogen auf die Großvieheinheit der Haltungssysteme VSP (Vollspalten, Zwangslüftung) und GK (Getrennte Klimabereiche, freie Lüftung) im Verlauf der vier untersuchten Mastdurchgänge	135
Abb. 24:	Dynamik des Volumenstromes im System VSP in Abhängigkeit von der Innenraumtemperatur und Temperaturdifferenz am Beispiel von drei aufeinanderfolgenden Messzeiträumen des Mastdurchganges 2	136
Abb. 25:	Beispielhafte Verläufe der Volumenströme in den einzelnen Abluftschächten des Systems GK (getrennte Klimabereiche, freie Lüftung) während einer Winter- und Sommersituation in Abhängigkeit von der Windgeschwindigkeit an der Zuluftöffnung, von den Temperaturen der Zuluft und im Innenraum	137
Abb. 26:	Vergleich der Abhängigkeit des Volumenstromes pro Tier der Haltungssysteme VSP (Vollspalten, Zwangslüftung) und GK (Getrennte Klimabereiche, freie Lüftung) von verschiedenen Einflussvariablen (Datenbasis: selektierte Tagesmittelwerte aus den vier untersuchten Mastdurchgängen) (T_i = Innenraumtemperatur; T_a = Außentemperatur)	138

Abb. 27:	Vergleich der selektierten Tagesmittelwerte der NH_3 -, CH_4 - und CO_2 -Konzentrationen im Innenraum in Verbindung mit den Volumenströmen der Haltungssysteme VSP (Vollspalten, Zwangslüftung) und GK (Getrennte Klimabereiche, freie Lüftung) im Verlauf der vier untersuchten Mastdurchgänge	140
Abb. 28:	Vergleich der selektierten Tagesmittelwerte der NH_3 -, CH_4 - und CO_2 -Konzentrationen in den abgedeckten Liegebereichen des Haltungssystems GK (Getrennte Klimabereiche, freie Lüftung) im Verlauf der vier untersuchten Mastdurchgänge	142
Abb. 29:	Beispielhafter Verlauf der Gaskonzentrationen von Ammoniak (NH_3), Kohlendioxid (CO_2) und Methan (CH_4) im Innenraum und den abgedeckten Liegebereichen des Haltungssystems GK an vier Winter- und Sommertagen (zum Teil unterschiedliche Skalierung)	143
Abb. 30:	PM 10-Konzentrationen im Innenraum des Systems VSP (Vollspalten, Zwangslüftung) mehrerer 24-h-Messungen pro Mastdurchgang	145
Abb. 31:	PM 10-Konzentrationen im Innenraum des Systems GK (Getrennte Klimabereiche, freie Lüftung) mehrerer 24-h-Messungen pro Mastdurchgang	145
Abb. 32:	Vergleich des gemittelten Tagesverlaufes der PM 10-Konzentrationen im Innenraum der Haltungssysteme VSP (Vollspalten, Zwangslüftung) und GK (Getrennte Klimabereiche, freie Lüftung); berechnet aus 13 (VSP) bzw. 14 (GK) 24-h-Messungen aus vier Mastdurchgängen zwischen Herbst 1999 bis Frühjahr 2001	148
Abb. 33:	Vergleich der selektierten Tagesmittelwerte der NH_3 -Emissionen pro Tier bzw. NH_3 -Emissionsraten der Haltungssysteme VSP (Vollspalten, Zwangslüftung) und GK (Getrennte Klimabereiche, freie Lüftung) im Verlauf der vier untersuchten Mastdurchgänge	151
Abb. 34:	Vergleich der selektierten Tagesmittelwerte der CH_4 -Emissionen pro Tier bzw. CH_4 -Emissionsraten der Haltungssysteme VSP (Vollspalten, Zwangslüftung) und GK (Getrennte Klimabereiche, freie Lüftung) im Verlauf der vier untersuchten Mastdurchgänge	152
Abb. 35:	Vergleich der selektierten Tagesmittelwerte der CO_2 -Emissionen pro Tier bzw. CO_2 -Emissionsraten der Haltungssysteme VSP (Vollspalten, Zwangslüftung) und GK (Getrennte Klimabereiche, freie Lüftung) im Verlauf der vier untersuchten Mastdurchgänge	153
Abb. 36:	Vergleich des Einflusses der Außentemperatur (T_a) (obere Grafik) und Innenraumtemperatur (T_i) (untere Grafik) auf die absoluten NH_3 - und CH_4 -Emissionen pro Tier (Datenbasis: selektierte Tagesmittelwerte aus vier Mastdurchgängen) zwischen den Haltungssystemen VSP (Vollspalten, Zwangslüftung) und GK (Getrennte Klimabereiche, freie Lüftung)	157
Abb. 37:	Vergleich des Einflusses des Volumenstromes auf die NH_3 -Abluftkonzentration und absoluten NH_3 -Emissionen pro Tier (Datenbasis: selektierte Tagesmittelwerte aus vier Mastdurchgängen) zwischen den Haltungssystemen VSP (Vollspalten, Zwangslüftung) und GK (Getrennte Klimabereiche, freie Lüftung)	159

Abb. 38:	Vergleich der CO ₂ -Emissionen pro Tier bzw. CO ₂ -Emissionsraten in Abhängigkeit vom Einzeltiergewicht (Datenbasis: selektierte Tagesmittelwerte aus vier Mastdurchgängen) zwischen den Haltungssystemen VSP (Vollspalten, Zwangslüftung) und GK (Getrennte Klimabereiche, freie Lüftung)	160
Abb. 39:	Vergleich des Zusammenhangs zwischen NH ₃ - und CO ₂ -Emission pro Tier (Datenbasis: selektierte Tagesmittelwerte aus vier Mastdurchgängen) zwischen den Haltungssystemen VSP (Vollspalten, Zwangslüftung) und GK (Getrennte Klimabereiche, freie Lüftung)	162
Abb. 40:	Verläufe des Volumenstromes, der Abluftkonzentration sowie Emissionsraten der Gase NH ₃ und CO ₂ für drei Messzeiträume eines Mastdurchganges (März bis Juni 2000) im Haltungssystem VSP „Vollspalten, Zwangslüftung“	165
Abb. 41:	Verlauf von Innenraumtemperatur, Volumenstrom, NH ₃ -Abluftkonzentration und –Emissionsrate an zwei Tagen im Mai (66.-68. Masttag) im Haltungssystem VSP „Vollspalten, Zwangslüftung“	167
Abb. 42:	Verlauf von Innenraumtemperatur, CO ₂ -Abluftkonzentration und CO ₂ -Emissionsrate an drei Tagen im März (18.-20. Masttag) im Haltungssystem VSP „Vollspalten, Zwangslüftung“	168
Abb. 43:	Verläufe der Volumenströme (Gesamtvolumenstrom und Anteil des Solarventilators), der Abluftkonzentration sowie Emissionsrate der Gase NH ₃ und CO ₂ für drei Messzeiträume eines Mastdurchganges (März bis Juni 2000) des Haltungssystems GK „Getrennte Klimabereiche, freie Lüftung“	170
Abb. 44:	Verlauf von Innenraumtemperatur, Volumenstrom, NH ₃ -Abluftkonzentration und –Emissionsrate an zwei Tagen im Mai (66.-68. Masttag) im Haltungssystem GK „Getrennte Klimabereiche, freie Lüftung“	172
Abb. 45:	Abschätzung der Eignung der Versuchseinrichtung zur differenzierten Beurteilung von Haltungssystemen für Mastschweine (nach HARTUNG, E., 2002)	177
<u>Anhang</u>		
Abb. A1:	Vergleich des Einflusses der Außentemperatur (T_a) (obere Grafik) und Innenraumtemperatur (T_i) (untere Grafik) auf die absoluten CO ₂ -Emissionen pro Tier (Datenbasis: selektierte Tagesmittelwerte aus vier Mastdurchgängen) zwischen den Haltungssystemen VSP (Vollspalten, Zwangslüftung) und GK (Getrennte Klimabereiche, freie Lüftung)	233
Abb. A2:	Vergleich des Einflusses des Volumenstromes auf die CH ₄ -Abluftkonzentration und die absoluten CH ₄ -Emissionen pro Tier (Datenbasis: selektierte Tagesmittelwerte aus vier Mastdurchgängen) zwischen den Haltungssystemen VSP (Vollspalten, Zwangslüftung) und GK (Getrennte Klimabereiche, freie Lüftung)	234
Abb. A3:	Vergleich des Einflusses des Volumenstromes auf die CO ₂ -Abluftkonzentration und die absoluten CO ₂ -Emissionen pro Tier (Datenbasis: selektierte Tagesmittelwerte aus vier Mastdurchgängen) zwischen den Haltungssystemen VSP (Vollspalten, Zwangslüftung) und GK (Getrennte Klimabereiche, freie Lüftung)	235

1 EINLEITUNG

"Klasse statt Masse" lautet eine der zentralen Forderungen der aktuellen bundesdeutschen Agrar- und Ernährungspolitik. Die Verbraucher bestimmen die Richtung, nicht die Produzenten (KÜNAST, 2001).

In diesen wenigen Sätzen wird der ausgeprägte Wandel der gesellschaftlichen und politischen Betrachtungsweise der Landwirtschaft wiedergespiegelt. Die Art und Weise sowie Zielsetzung der landwirtschaftlichen Tierhaltung wird kritisch diskutiert. Forderungen nach einer mehr tiergerechten, umweltverträglichen und nachhaltigen Nutztierhaltung, die auch auf eine verbesserte Verbraucherakzeptanz ausgerichtet sind, gewinnen zunehmend an Bedeutung (HARTUNG, E., 2002). Die Ziele des Tierschutzes und Umweltschutzes sind jedoch nur mit einer tragfähigen Produktion zu erreichen (JUNGBLUTH, 2002).

Im Rahmen der umweltpolitischen Diskussion wird dem Sektor Landwirtschaft und der Tierhaltung sowohl hinsichtlich des Beitrages zu den Emissionen klima- und umweltrelevanter Gase als auch zu deren Minderungspotential eine bedeutende Rolle zugewiesen. Beispielsweise wird der Anteil allein der Tierhaltung an den deutschen Ammoniak (NH_3)-Emissionen mit ca. 84 % beziffert, der Beitrag der Landwirtschaft zu den Methan (CH_4)-Emissionen beträgt etwa 44 % (UBA, 2001a).

Neuerungen in den Haltungsverordnungen für landwirtschaftliche Nutztiere, bezüglich beispielsweise des Flächenangebotes und der –beschaffenheit, zwingen zum Umdenken sowie zur Anpassung und Optimierung von bestehenden Haltungssystemen und zur Entwicklung neuer Haltungssysteme. Voraussetzung für eine sachgerechte Umsetzung aktueller und zukünftiger Regelungen zur Umweltwirkung und Tiergerechtigkeit von Tierhaltungsverfahren in der landwirtschaftlichen Praxis, ist die differenzierte Betrachtung und Bewertung von vorhandenen und neu gestalteten Haltungssystemen.

Dem damit verbundenen Handlungs- und Forschungsbedarf wurde am Institut für Agrartechnik der Universität Hohenheim Rechnung getragen, indem umfassende Untersuchungen zur Beurteilung von verschiedenen Haltungssystemen für Mastschweine in einem eigens hierfür entwickelten Versuchsstall durchgeführt wurden (HARTUNG, E., 2002). Der thematische Schwerpunkt der vorliegenden Arbeit liegt auf der Beurteilung und dem Vergleich von zwei Haltungssystemen für Mastschweine mit unterschiedlichen Lüftungsprinzipien hinsichtlich der Stallklimafaktoren und Gasemissionen. Die Ergebnisse der zeitgleichen Untersuchungen zur Beurteilung der Tiergerechtigkeit der verglichenen Haltungssysteme sind BEA (2003) zu entnehmen.

1.1 Problemstellung

Als bisherige Beurteilungsgrundlage für die Umweltwirkung bestehender Mast-schweinehaltungssysteme werden in der Regel vorhandene Daten in der Literatur zu den Emissionen klima- und umweltrelevanter Gase herangezogen und diskutiert. Die Verfügbarkeit und Güte von Daten zu den Einflussfaktoren auf die Freisetzung und die Höhe der stallspezifischen Emissionen ist jedoch noch lückenhaft. Die Datenbasis ist insbesondere für neuere und für frei belüftete Haltungssysteme, im Vergleich zu sogenannten konventionellen Systemen, sowie weiterhin speziell für klimarelevante Gase noch unzureichend (vgl. Kap. 2).

Weiterentwicklungen hinsichtlich der Untersuchungs- und Messmethoden schränken die Vergleichbarkeit und Verlässlichkeit älterer Daten sehr ein, die zudem oftmals nicht über eine hinreichende zeitliche Auflösung zur Darstellung von Tagesverläufen sowie eine ausreichende Messdauer zur Erfassung saisonaler Einflüsse und anderer Langzeiteffekte verfügen. Des weiteren liegen nur wenige Erfahrungen vor mit einer gemeinsamen Betrachtung sowohl der Stallklimafaktoren, die die Haltungsumwelt der Tiere bestimmen, als auch der Emissionen, die den Stoffaustrag aus dem Haltungssystem in die Umwelt beschreiben.

1.2 Zielsetzung

Das Hauptziel der vorliegenden Arbeit ist ein Systemvergleich zwischen einem konventionellen, zwangsbelüfteten und einem neueren, frei belüfteten Haltungssystem für Mastschweine unter praxisnahen Bedingungen hinsichtlich der Stallklimafaktoren und Gasemissionen im Rahmen von zeitlich hoch aufgelösten Langzeitmessungen. Dieses Hauptziel sollte über folgende Teilziele erreicht werden:

- Konzeption eines Mastschweinehaltungssystems mit freier Lüftung, das im Rahmen eines Umbaus eines konventionellen Stalles realisiert werden kann;
- Weiterentwicklung und Anpassung der Messmethode zur Erfassung der Emissionen klima- und umweltrelevanter Gase unter besonderer Berücksichtigung von Haltungssystemen mit freier Lüftung und den daraus resultierenden besonderen Anforderungen an die Volumenstrombestimmung und Emissionsmessung;
- Vergleich der Innenraumluftqualität und Stallklimaparameter zur Bewertung der jeweiligen Haltungsumwelt der Tiere;
- Vergleich der stallspezifischen Emissionen zur Bewertung der Umweltwirkung der Haltungssysteme;
- Vergleich von Tageseffekten und der Sensitivität für verschiedene Einflussfaktoren auf die Emission;
- Ableitung von Hinweisen zur Stallklimagegestaltung und Maßnahmen zur Emissionsminderung.

2 KENNTNISSTAND

2.1 Ammoniak

Die Zunahme der Freisetzung reaktiver Stickstoffverbindungen, wie z.B. Ammoniak (NH_3), und der Schwefeldioxidemissionen durch anthropogene Aktivitäten, führten insbesondere seit den fünfziger Jahren des vorigen Jahrhunderts zur Eutrophierung und Versauerung aquatischer und terrestrischer Ökosysteme. Die **Umweltbelastungen** sind vielfältig und wirken sich direkt oder indirekt auf zahlreiche Prozesse und Regelfunktionen im Stoffhaushalt von Böden, Pflanzen und Gewässern aus. Ökologische Folgen sind u.a. (LAMMEL & FLESSA, 1998; SCHÜTZE et al., 2001; HARDWIGER-FANGMEIER et al., 1994):

- Waldsterben;
- Wurzelschädigungen;
- Sukzession und Artenschwund;
- Nitratanreicherung in Gewässern;
- Eutrophierung.

Eine sicherlich geringere und kaum quantifizierbare Bedeutung hat die indirekte Klimarelevanz von NH_3 . Ein Teil des NH_3 kann atmosphärisch über Hydroxyl-Radikale abgebaut oder bei Gewitterereignissen durch Blitzentladungen zu Stickoxiden oxidiert werden, welche den Ozonhaushalt schädigen. Weiterhin kann in Folge von Nitrifikations- und Denitrifikationsprozessen aus verschiedenen Stickstoffverbindungen auch Lachgas (N_2O) entstehen, welches direkt klimarelevant ist (vgl. Kap. 2.2; Kap. 2.2.3) (AHLGRIMM, 1995).

Für ein besseres Verständnis der Schadstoffquellen und emittierten Schadstoffmengen, des atmosphärischen Transportes (Transmission), der Deposition und Immission sowie ökologischen Auswirkungen wurde das **Critical Loads-Konzept** entwickelt. Unter dem Begriff Critical Loads sind ökosystemspezifische, kritische Belastungsgrenzen für Säure und eutrophierenden Stickstoff (N) zu verstehen. Die langfristige Einhaltung oder Unterschreitung dieser Belastungsgrenzwerte soll nach heutigem Wissen Gewähr dafür bieten, dass ein ausgewähltes Schutzgut (ökologischer Rezeptor) weder akut noch langfristig geschädigt wird (UBA, 2001b; SCHÜTZE et al., 2001). Die Güte der dabei verwendeten Depositions- und Transmissionsmodelle für verschiedene Schadstoffe wird jedoch durch Modellierungsfehler und unzutreffende Annahmen über die den Rechnungen zugrundeliegenden Emissionsdaten stark eingeschränkt (DÄMMGEN & ERISMAN, 2001; UBA, 2001b).

Die Erarbeitung von wirkungsbezogenen Emissionsminderungsstrategien erfolgt dennoch auf der fachlichen Grundlage des Critical-Loads-Konzepts und ist zum Maßstab für das Handeln in der **internationalen Luftreinhaltepolitik** geworden (SCHÜTZE et al, 2001). Für Deutschland wurde das nationale Emissionsminderungsziel für NH₃ im Jahr 2010 von 28 % im Vergleich zum Bezugsjahr 1990 festgelegt; welches auf dem Göteborger Multischadstoffprotokoll (UN/ECE, 1999) im Rahmen des Genfer Luftreinhalteabkommens (UN/ECE, 1996) sowie der NEC-Richtlinie (EG, 2000) basiert. Durch die zusätzlich vorgesehene Reduktion der Schwefeldioxidemission um 90 % und der Stickoxide um 61 % bis zum Jahr 2010, kann die Umweltsituation sich so verbessern, dass auf rund 70 % der Fläche die Critical Loads für Säure annähernd eingehalten werden können. Dadurch wird jedoch die relative Bedeutung von NH₃ an der Versauerung steigen, da es den größten Anteil an der verbleibenden Überschreitung von Critical Loads hat. Dahingegen bliebe die Überschreitung der Critical Loads für eutrophierenden Stickstoff weiterhin auf einem unakzeptablen hohen Niveau und würde für eine Einhaltung der Belastungsgrenzen noch drastischere Minderungen der Emissionen erfordern (SCHÜTZE et al, 2001).

In diesem Zusammenhang wird der **Landwirtschaft** sowohl hinsichtlich des absoluten Beitrages zu den NH₃-Emissionen als auch bezüglich der technischen und ökonomisch sinnvollen Möglichkeiten das größte Emissionsminderungspotential zugerechnet (SCHÜTZE et al, 2001). Die Landwirtschaft bzw. die landwirtschaftliche Tierhaltung tragen mit dem größten Anteil von etwa 80 % bis 95 % (in Abhängigkeit von der Berechnungsmethodik) zu den anthropogen verursachten NH₃-Emissionen bei (AROGO et al., 2001; ASMAN, 1992; BUIJSMAN et al., 1987; HARTUNG, E., 2001a; REITZ, 2000). Für Deutschland wird der Anteil der Landwirtschaft an den nationalen NH₃-Emissionen nach Schätzungen des Umweltbundesamtes mit etwa 84 % beziffert, **Tabelle 1**.

Tab. 1: NH₃-Emissionen nach Sektoren in Deutschland (Stand August 1999) (geändert nach UBA, 2001a)

Einheit	1990		1995 (vorläufige Angaben)		2000 (Schätzung)	
	[kt/a]	[%]	[kt/a]	[%]	[kt/a]	[%]
Insgesamt¹	765		634		626	
Tierhaltung²	655	85,6	533	84,0	525	83,8
Düngeranwendung³	75	9,8	71	11,1	70	11,1
Industrieprozesse⁴	18	2,4	8	1,2	8	1,3
Sonstige Quellen⁵	17	2,2	22	3,5	21	3,4

¹ohne natürliche Quellen; ²Stall, Lagerung und Ausbringung von Wirtschaftsdünger;

³Anwendung N-haltiger Mineraldünger; ⁴ohne energiebedingte Emissionen;

⁵Straßenverkehr, Feuerungsanlagen, DENOX-Anlagen in Kraftwerken

Der Anteil der verschiedenen Tierkategorien an den deutschen NH₃-Emissionen aus der **Tierhaltung** beträgt, in Abhängigkeit von der Berechnungsmethode und den Ausgangsdaten, für Rinder etwa 60-70 %, Schweine 25-30 %, Geflügel 7 % sowie für Schafe und Pferde jeweils ca. 0,6 % (UBA, 2001b). Die Tierhaltung als Emissionsquelle kann wiederum in die Faktoren Stall, Stallmistlagerung, Stallmistausbringung und Weidehaltung unterteilt werden. Der relative Anteil an der NH₃-Emission der Schweinehaltung wird je nach Autor mit 25-40 % im Stall, 11-54 % bei der Stallmistlagerung und 35-70 % bei der Ausbringung beziffert (BUIJSMAN et al., 1987; CARTON & TUNNEY, 1990; HARTUNG, J., 1992; ISERMANN, 1990; JARVIS & PAIN, 1990; RATSCHOW, 1994).

Der landwirtschaftlichen Tierhaltung wird in verschiedenen internationalen und nationalen Regelungen eine zentrale Rolle bei der Umsetzung von NH₃-Emissionsminderungsmaßnahmen zugeordnet. Neben der Verpflichtung zur Erreichung nationaler Emissionshöchstgrenzen beinhaltet das Göteborger Multischadstoffprotokoll (UN/ECE, 1999) auch speziell verpflichtende Mindestmaßnahmen zur Reduktion der NH₃-Emissionen der Landwirtschaft bzw. der Tierhaltung. Bei der Stallhaltung und Lagerung von Wirtschaftsdünger ist eine Reduktion um 20-40 % vorgesehen sowie bei der Ausbringung von Wirtschaftsdüngern um 20 %. Des Weiteren ist von jedem Mitgliedsstaat ein Regelwerk zur „guten fachlichen Praxis der Emissionsminderung“ zu erarbeiten (DÖHLER, 2001).

Im Geltungsbereich der IVU-Richtlinie (EG, 1996) wiederum sollen in einem medienübergreifenden Ansatz speziell die Umweltbelastungen, einer nach Bundes-Immissionsschutzgesetz (BImSchG, 2001) **genehmigungsbedürftigen Anlage** zur Intensivtierhaltung für Geflügel oder Schweine, gering gehalten werden. Hierzu sind Definitionen der „Best Verfügbaren Techniken (BVT)“ notwendig, unter Berücksichtigung von erzielbaren Emissionswerten, Nährstoffeinträgen in Boden und Wasser, Energie- und Rohstoffeinsatz sowie Art und Menge von Abfällen, Managementfaktoren und ökonomischer Daten (UBA, 2001c).

Auf nationaler Ebene sind in diesem Zusammenhang ebenso für einzelne Anlagen das Artikelgesetz vom August 2001 zur Umsetzung der UVP-Änderungsrichtlinie, der IVU-Richtlinie und weiterer EG-Richtlinien zum Umweltschutz (BUNDESGESETZBLATT, 2001) sowie die Neufassung von Abstandsregelungen und technischen Anforderungen (TA-LUFT, 2002) im Genehmigungsverfahren nach Bundes-Immissionsschutzgesetz (BImSchG, 2001) von Bedeutung.

In der Neufassung der TA-Luft wird der Schutz empfindlicher Pflanzen und Ökosysteme betont, d.h. die Immissionen sind unter bestimmten Voraussetzungen unabhängig von der Tierhaltung zu prognostizieren und gesondert zu beurteilen.

Zudem soll ein Mindestabstand von 150 m zu stickstoffempfindlichen Pflanzen und Ökosystemen in Zukunft nicht unterschritten werden (REGULIN & GRIMM, 2001; TA-Luft, 2002; UBA, 2001b).

Für eine umfassende Darstellung der Geltungsbereiche und Inhalte der verschiedenen Maßnahmen auf politischer Ebene wird auf die jeweiligen Gesetzestexte sowie UBA- und KTBL-Veröffentlichungen verwiesen (BIMSCHG, 2001; BUNDESGESETZBLATT, 2001; EG, 1996, KTBL, 2001a; TA-LUFT, 2002; UBA, 2001a,b,c).

Neben den Umwelteffekten von NH_3 -Emissionen sind in der Tierhaltung ebenso die Auswirkungen hoher NH_3 -Konzentrationen auf die Stallluftqualität, das Wohlbefinden und die **Gesundheit von Mensch und Tier** zu berücksichtigen. Schon ab NH_3 -Konzentrationen von 10-20 ppm werden beim Menschen Augenirritationen und Kopfschmerzen beobachtet, bei höheren Werten treten Reizungserscheinungen auf (in BÜSCHER, 1996). Erkrankungen des Respirationstraktes von Landwirten, die in der Regel multifaktoriell bedingt sind, werden u.a. in Zusammenhang mit erhöhten NH_3 -gehalten in der Stallluft gebracht (RIEGER, 2001). Die maximal zulässige Arbeitsplatzkonzentration (MAK) für NH_3 beträgt bei einem achtstündigen Arbeitstag 50 ppm (DFG, 1999). Dieser Grenzwert sollte leicht einzuhalten sein, wenn die Vorschriften bzw. Empfehlungen für die wesentlich geringere maximale NH_3 -Konzentration der Stallluft im Aufenthaltsbereich der Schweine von in der Regel 20 ppm beachtet werden (AEL, 1998; SCHHAVO, 2000). In der Schweiz wird nur eine maximale Dauerkonzentration von 10 ppm NH_3 in der Stallluft toleriert (BVET, 1998) und von verschiedenen Autoren ebenfalls gefordert (siehe MAYER, 1999; BOLLWAHN, 1981; COLE, 1996; KALICH, 1982; von MICKWITZ et al., 1975). Von verschiedenen Autoren wird angenommen, dass ein ursächlicher Zusammenhang besteht zwischen NH_3 -belasteter Luft und verschiedenen Atemwegserkrankungen der Tiere sowie eine höheren Anfälligkeit für Faktorenenerkrankungen und Infekte auftreten kann (siehe KECK, 1997 und MAYER, 1999). Über negative Wirkungen und Einflüsse von erhöhten NH_3 -gehalten in der Luft auf das Tierverhalten (z.B. Verhaltensanomalien) und die Leistungen liegen teilweise widersprüchliche Angaben aus der Literatur vor (siehe AARNINK, 1997; BARTUSSEK et al., 2001; siehe KECK, 1997; siehe MAYER, 1999).

2.1.1 Bildung und Freisetzung

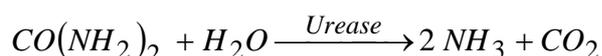
In der Tierhaltung sind die **Exkrememente** das Ausgangssubstrat für die NH_3 -Freisetzung oder anders ausgedrückt der mit Kot und Harn ausgeschiedene N, welcher von den Tieren mit dem Futter aufgenommen aber nicht verwertet wurde. Das Bildungspotenzial für NH_3 wird zum einen von der Art und Menge der Exkrememente und zum anderen letztlich vom Ausmaß der N-Umwandlung beeinflusst. Die Menge und stoffliche Zusammensetzung der Exkrememente hängt von der Retentionskapazität

und somit vor allem von der N-Aufnahme oder/und der Proteinverwertung der Nutztiere ab, die wiederum von den Faktoren Tierart, Nutzungsrichtung, Leistungsniveau, Lebendmasse sowie Menge und Qualität der Futtermittelration bestimmt werden (KIRCHGESSNER et al., 1991a). In der Schweinemast kann davon ausgegangen werden, dass bei einer durchschnittlichen täglichen N-Aufnahme von 55 g lediglich etwa 30 % im Körper retiniert, aber ca. 50 % vorwiegend als Harnstoff mit dem Harn und 20 % als organisch gebundenes bakterielles Protein mit dem Kot ausgeschieden werden (AARNINK, 1997; AROGO et al., 2001; KIRCHGESSNER et al., 1991a).

Die Umwandlung von N-Verbindungen zu molekularem N₂ im Kot-Harn Gemisch unterliegt enzymatischen und mikrobiellen Prozessen und es besteht ein dynamisches Gleichgewicht zwischen den verschiedenen N-Verbindungen Nitrat, Nitrit und Ammoniak (JENSEN, 1974). Der größte Anteil des gebildeten NH₃ schließlich stammt aus dem im Harn vorliegenden Harnstoff, über den etwa 80 % der N-Ausscheidung erfolgt. Die **Bildung und Freisetzung von NH₃** (ausgehend von Harnstoff) erfolgt im Wesentlichen über folgende Prozesse (AARNINK, 1997; AROGO et al., 2001; BROSE, 2000; HARTUNG, E., 1995; KECK, 1997; MONTENY & ERISMAN, 1998):

- Ammonifizierung (NH₃-Bildung durch enzymatische Harnstoff-Hydrolyse);
- Ammoniak (NH₃) - Ammonium (NH₄⁺) Gleichgewicht in einer Lösung;
- NH₃-Freisetzung durch Stoffübergang von gelöstem NH₃ in gasförmiges NH₃.

Bei der **Ammonifizierung** wird der Harnstoff durch hydrolytische Spaltung mit Hilfe des katalysierenden Enzyms Urease in NH₃ und CO₂ zerlegt.

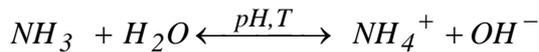


Die Ammonifizierung beginnt schon etwa 20 bis 60 Minuten nach der Harnausscheidung (AARNINK et al., 1992) und ist meist bereits nach zwei Stunden vollständig abgeschlossen (MONTENY & ERISMAN, 1998). Die Geschwindigkeit und Vollständigkeit seiner Umwandlung wird von der Höhe der Harnstoffkonzentration und der temperaturabhängigen Ureaseaktivität positiv beeinflusst. Da letztere unter Praxisbedingungen sehr hoch ist, kann die Harnstoffkonzentration als der eigentliche limitierende Faktor für die NH₃-Freisetzung angesehen werden (BROSE, 2000; HARTUNG, E., 2001a).

Das Enzym Urease ist im Kot enthalten und dies führt im Stall zu einer zunehmenden Beimpfung von Oberflächen mit ureaseaktiven Bakterien. Die Geschwindigkeit und Ausprägung der Ammonifizierung ist davon abhängig, dass Harnstoff und Urease im Flüssigmist oder auf mit Kot verschmutzten Flächen miteinander in Kontakt kommen. Bei Harnstoff, der auf eine unbeimpfte Oberfläche gelangt, kommt es daher zu keiner

ausgeprägten Hydrolyse und NH_3 -Bildung. Ist der Harnstoff gänzlich umgewandelt, geht auch die Bildung von NH_3 aus Nicht-Harnstoff-N-Verbindungen zurück (HARTUNG, E., 1995).

Das bei der Ammonifizierung gebildete NH_3 ist in Wasser außerordentlich leicht löslich. NH_3 reagiert in einer reversiblen Gleichgewichtsreaktion als schwache Base mit den H^+ -Ionen des Wassers, so dass eine Dissoziation in NH_4^+ und OH^- erfolgt.



Das **Ammoniak-Ammonium-Gleichgewicht** und damit das Emissionsverhalten von NH_3 ist dabei entsprechend dem Massenwirkungsgesetz und der Temperaturabhängigkeit der Dissoziationskonstanten sowohl pH- als auch temperaturabhängig. Das Ammoniak-Ammonium-Gleichgewicht verschiebt sich in einer wässrigen Lösung mit steigendem pH-Wert und steigender Temperatur T in Richtung NH_3 und bewirkt somit ein verstärktes Freisetzungspotenzial für NH_3 . Im sauren pH-Bereich liegt nahezu der gesamte N dissoziiert als NH_4^+ vor. Ab pH-Werten größer 7 beginnt der NH_3 -Anteil überproportional anzusteigen und ist bei pH-Werten von 11 und mehr die hauptsächlich vorliegende Form. Eine Gleichverteilung von NH_3 und NH_4^+ in einer wässrigen Lösung besteht je nach Temperatur im leicht alkalischen Bereich bei pH 8,5 bis 9,5 (FRENEY et al., 1983; LOEHR, 1977; MONTENY & ERISMAN, 1998).

Durch den hohen Anteil organischer Säuren, Mineralien und anderer Substanzen hat Flüssigmist eine hohe Pufferkapazität gegenüber pH-Wert Veränderungen. Der pH-Wert von durchmischtem Schweineflüssigmist liegt daher normalerweise im leicht alkalischen Bereich bei pH 7,5 mit einer Standardabweichung von ca. 0,57 (KECK 1997). Es bestehen jedoch Anhaltspunkte dafür, dass der „effektive“ pH-Wert an der Flüssigmistoberfläche mit pH 8,5 bis 9 höher ist und folglich die NH_3 -Freisetzung gerade an der Grenzfläche zwischen flüssiger Phase und Luft durch die Verschiebung des Ammoniak-Ammonium-Gleichgewichtes zugunsten von NH_3 begünstigt wird. Begründet wird der höhere pH-Wert an der Flüssigmistoberfläche mit einer stärkeren Verschiebung im CO_2/NH_3 Verhältnis an der Flüssigmistoberfläche im Vergleich zum restlichen Flüssigmist. Es wurde eine schnellere Freisetzung aber geringere Nachlieferung des „sauren“ CO_2 (pH-Wert senkend) beobachtet, so dass der Anteil des alkalisch wirkenden (pH-Wert steigernden) NH_3 an der Flüssigmistoberfläche größer wird (AARNINK, 1997; HUSTED et al. 1991; Ni et al. 1996; OLESEN & SOMMER, 1993).

Die **Freisetzung von NH₃** in die Luft folgt den Gesetzmäßigkeiten des konvektiven Stoffübergangs von einer flüssigen in die gasförmige Phase. Das Modell des Massentransfers für den Interphasentransport von NH₃ ist generell als Multikomponentensystem zu betrachten, denen eine Fülle von physikalischen Stofftransportmodellen zu Grunde liegen (AROGO et al., 1999; HARTUNG, E., 1995; NI, 1998; VAN DEN WEGHE, 2001). Die folgende Darstellung beschränkt sich somit nur auf die wesentlichsten Zusammenhänge.

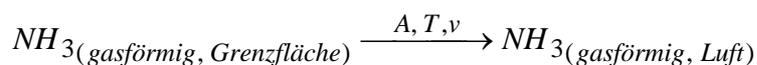
Die treibende Kraft für die NH₃-Freisetzung aus einer wässrigen Lösung ist die Differenz zwischen dem NH₃-Partialdruck in der flüssigen Phase und dem NH₃-Partialdruck in der Atmosphäre an der Phasengrenzschicht über der Lösung. Das Partialdruckgleichgewicht zwischen gelöstem NH₃ und gasförmigen NH₃ wird nach (FRENEY et al., 1983; MONTENY & ERISMAN, 1998) von der stark temperaturabhängigen Henry-Konstante beeinflusst.

Nach FRENEY et al. (1983) bewirkt eine erhöhte Temperatur der Lösung eine Verschiebung des Partialdruckgleichgewichts in Richtung des gasförmigen NH₃ in mehrfacher Weise dadurch, dass

- aufgrund der Verlagerung des Ammoniak-Ammonium-Gleichgewichts und der Verdunstung von Wasser die NH₃-Konzentration in der Lösung zunimmt;
- der NH₃ Partialdruck der Lösung überproportional zunimmt;
- die Löslichkeit des NH₃ in Wasser überproportional abnimmt und
- die Diffusionsgeschwindigkeit zunimmt.

Weiterhin beeinflusst nach KATZ (1996) und PAASS (1993) eine geringe relative Luftfeuchte das Partialdruckgleichgewicht, da ein hohes Wasserdampfsättigungsdefizit die Verdunstung des Wassers aus der Lösung fördert. Folglich kommt es zu einer Aufkonzentration von NH₃ in der Lösung und somit zu einer Steigerung des NH₃-Partialdrucks in der Lösung.

Die Stärke der NH₃-Freisetzung hängt weiterhin von der Größe der Phasengrenzfläche A und dem Stoffübergangskoeffizienten für NH₃ ab, der wiederum positiv mit der Temperatur T und der Luftgeschwindigkeit v über der Grenzschicht korreliert ist (AROGO et al., 1999; MONTENY & ERISMAN, 1998).



Je turbulenter die Luftströmung und je höher die Luftgeschwindigkeit über der Grenzschicht ist, desto mehr gasförmiges NH₃ wird an der Phasengrenzschicht laufend von der emittierenden Oberfläche entfernt (Zwangskonvektion), so dass das

NH₃-Partialdruckgefälle zwischen Atmosphäre und wässriger Lösung erhalten bleibt und die NH₃-Freisetzung anhält (AROGO et al., 1999; HARTUNG, E., 1995).

Vorraussetzung für entsprechende Konzentrationen von gelöstem NH₃ an der Oberfläche ist dann aber auch eine ständige Nachlieferung aus dem NH₃-Pool der tieferen Flüssigkeitsschichten. Bedeutsam ist in diesem Zusammenhang das Verhältnis von Volumen zu Oberfläche der Emissionsquelle. Bei flachen Emissionsquellen ist das Nachlieferungspotenzial schneller erschöpft und die NH₃-Freisetzung klingt ab. Bei tiefen Emissionsquellen kann es zur Schichtenbildung mit einem typischen Profil für mit zunehmender Entfernung von der Kontaktfläche ansteigende NH₃-Konzentrationen kommen. Konvektionsströmungen zwischen den fließenden Übergängen der einzelnen Schichten können die NH₃-Nachlieferung und -Freisetzung beschleunigen (in HARTUNG, E., 1995).

Zusammenfassend lassen sich aus dem bisherigen Verständnis der Bildungs- und Freisetzungsvorgänge folgende Einflussfaktoren auf die Entstehung von NH₃ im Stall ableiten, die im wesentlichen die Grundlage für Modelle zur NH₃-Freisetzung im Stall (z.B.: AARNINK, 1997; NI, 1998) sowie für Emissionsminderungsmaßnahmen darstellen (vgl. Kap. 2.1.2):

- N-Gehalt und Qualität im Futter, N-Retention, N-Ausscheidung;
- Harnstoffkonzentration und Ureaseaktivität;
- pH-Wert;
- Temperatur;
- Partialdruckdifferenz;
- Größe der Grenzfläche;
- Luftströmung und -geschwindigkeit an der Grenzfläche;
- NH₃-Nachlieferungspotenzial der Emissionsquelle.

2.1.2 Einflussfaktoren und Verminderungsstrategien

Aus der Kenntnis und dem Verständnis der Einflussfaktoren auf die NH₃-Bildung und Freisetzung aus den vorhergehenden Kapiteln, ergeben sich Hinweise auf die Wirkung verschiedener Einflussfaktoren auf die NH₃-Emission im komplexen System Stall sowie, daraus wiederum abgeleitet, Ansatzpunkte für Verminderungsstrategien. Maßnahmen zur Abluftreinigung (siehe MARTINEC, 2001), sogenannte "End-of-pipe"-Lösungen, bleiben an dieser Stelle unberücksichtigt.

KRAUSE & MACK (1993) unterteilen das System Stall in die **Kompartimente** Flüssigmist, Boden, Tier sowie Luft und ermitteln nach dem Prinzip der Massenerhaltung die modellhaften Austauschgrößen zwischen den einzelnen Kompartimenten; unter der

Annahme, dass alle vorhandenen Flächen gleichviel, gleichartig und gleichmäßig NH_3 emittieren. Bei einem Verhältnis der stoffabgebenden Oberflächen von Tier, Fußboden und Flüssigmist (konventioneller Stall mit Zwangslüftung auf Flüssigmistbasis) von 3 zu 12 zu 20, werden fast 45 % des NH_3 -Stromes vom Boden an die Luft abgegeben. Der Beitrag des Flüssigmistes beträgt danach etwa 36 %. HENDRIKS (1993) hingegen schätzt, dass etwa 70 % der NH_3 -Emissionen aus dem Bereich unter dem Spaltenboden stammen und 30 % auf dem Boden und an der Stall-einrichtung entstehen, wohingegen ROM (1994) den Kompartimenten Boden und Flüssigmist jeweils 50 % der NH_3 -Emission zuordnet. DONHAM et al. (1988) kommen zu der gegensätzlichen Schlussfolgerung, dass das Flüssigmistlager unter den Spalten nicht die Hauptquelle für NH_3 im Schweinestall sei, sondern die Exkremente auf den Bodenflächen die größte Quelle darstellen.

In Anlehnung an die Unterteilung der Systems Stall in Emissionskompartimente lassen sich mögliche **Minderungsmaßnahmen** wie folgt differenzieren:

- Fütterungstechnische Maßnahmen;
- Maßnahmen bei Haltung und Entmistung;
- Lüftungstechnische Maßnahmen.

Zu den wesentlichen Strategien zur Vermeidung von NH_3 -Emissionen gehören alle **fütterungstechnischen Maßnahmen** zur Steigerung der produktbezogenen N-Effizienz und alle ernährungsphysiologischen Maßnahmen, die das Entstehen und die Ausscheidung von schnell abbaubaren Vorläufersubstanzen für NH_3 senken bzw. vermeiden helfen, **Tabelle 2**.

Tab. 2: Beispiele für Reduktionspotenziale verschiedener fütterungstechnischer Maßnahmen zur NH_3 -Emissionsminderung der Mastschweinehaltung

Maßnahme	Reduktionspotenzial (Anhaltswerte)	Autor
Proteinreduzierte Futterrations; Phasenfütterung	15 bis 45 %	in VAN DEN WEGHE (2001)
Reduzierter Rohproteingehalt der Futterrations	15 bis 20 % 7 % 20 bis 30 %	HEINRICHS (1994) KECK (1997) PFEIFFER et al. (1993)
Multiphasenfütterung i.Vgl. zu Zweiphasenfütterung	10 %	VAN DER PEET-SCHWERING et al. (1997)
Verbesserte Proteinqualität (optimierte Aminosäurezusammensetzung) zusammen mit einer Senkung des Gesamtproteingehaltes der Ration	30 %	ROTH & WINDISCH (2001)
Verschiebung der N-Ausscheidung vom Urin zum Kot durch höheren Anteil bakteriell fermentierbarer Substanzen in der Ration; dadurch Absenkung des pH-Wertes der Exkremente	k.A.	ROTH & WINDISCH (2001)
Zusatz organischer Säuren ins Futter	40 %	DEN BROK et al. (1997a)

Fütterungstechnische Maßnahmen werden derzeit als die kostengünstigsten und am einfachsten umzusetzenden Maßnahmen zur NH_3 -Emissionsminderung angesehen. Ein weiterer Vorteil besteht in der weitgehenden Unabhängigkeit von Gebäudetyp und Haltungssystem. Im Mittel wird bei der Beschreibung der "Best Verfügbaren Techniken" von einer NH_3 -Emissionsminderung von mindestens 20 % durch nährstoffangepasste Fütterung im Vergleich zu einphasiger Fütterung ausgegangen (GRIMM & DÖHLER, 2002). Aus diesem Grund wurde die N-angepasste Fütterung als kurzfristig umsetzbare Maßnahme als Vorschlag für politische Maßnahmen zur NH_3 -Emissionsminderung eingebracht (UBA, 2001b). Die Spannweite der Ergebnisse zum Reduktionspotenzial fütterungstechnischer Maßnahmen (Tabelle 2) weisen jedoch darauf hin, dass sich der kalkulatorische Effekt einer verminderten N-Ausscheidung nicht immer in einer entsprechenden Emissionsminderung zeigt. Der unmittelbare Zusammenhang zwischen N-Aufnahme, N-Ausscheidung und NH_3 -Emission ist nicht abschließend geklärt und wird zudem durch das multifaktorielle Geschehen im System Stall beeinflusst (BÜSCHER, 1996; KECK, 1997; VAN DEN WEGHE, 2001).

Minderungsmaßnahmen, die bei der **Haltungstechnik und der Entmistung** ansetzen, bezwecken zum einen die Reduzierung von emittierenden Oberflächen und somit der NH_3 -Freisetzung im Tierbereich und Entmistungssystem. Zum anderen wird auf eine verminderte NH_3 -Bildung durch beispielsweise Hemmung der Ureaseaktivität, zeitnahe Nitrifikation des anfallenden NH_4^+ oder durch Verschiebung des Ammoniak-Ammonium-Gleichgewichtes zu Lasten von NH_3 im Substrat gezielt, **Tabelle 3.**

Die erzielbaren Emissionsminderungen sind durch Umgestaltung der Haltung und Entmistung unter der Voraussetzung einer angepassten und sorgfältigen Betriebsweise recht hoch. Die Umsetzbarkeit ist jedoch bei bestehenden Stallgebäuden durch notwendige Umbaumaßnahmen und Investitionen nicht kurzfristig gegeben. Bei anstehenden Umbauten und Neubauten hingegen sollten die Möglichkeiten zur Emissionsminderung bei der Gestaltung des Haltungs- und Entmistungssystems genutzt werden. Dabei sind zusätzliche Anforderungen, die sich beispielsweise aus Haltungs- und Hygieneverordnungen ergeben, zu beachten. Weiterhin ist zu prüfen, ob mit einer Minderungsmaßnahme unerwünschte Nebeneffekte verbunden sind. Beispielsweise sind Einstreusysteme sowohl aus hygienischer Sicht (RIEGER, 2001) als auch durch ein hohes N_2O -Emissionspotenzial (GROENESTEIN & FASSEN, 1996) kritisch zu bewerten. Ebenso stellt sich die Frage, ob der Einsatz von Flüssigmistzusätzen und folglich deren Eintrag in den Nährstoffkreislauf wünschenswert ist.

Neben den in Tabelle 3 genannten Einzelmaßnahmen wird derzeit ebenfalls das Stallsystem "Außenklimastall ohne Einstreu" im Vergleich zum zwangsbelüfteten Vollspaltenstall als mögliche Minderungsmaßnahme mit einem Reduktionspotenzial zwischen 20 bis 30 % diskutiert (UBA, 2001b; UBA, 2001c; GRIMM & DÖHLER 2002; VAN DEN WEGHE, 2001). Als vorteilhaft werden die häufig geringeren Temperaturen im Stall in Verbindung mit einer strukturierten Raumaufteilung in Funktionsbereiche angesehen. Problematisch sind jedoch teilweise hohe Gaskonzentrationen im Liegebereich, ungenügender Luftaustausch bei ungünstigen Wind- und Temperaturverhältnissen sowie Einschränkungen bei den Reinigungs- und Desinfektionsmöglichkeiten (GRIMM & DÖHLER, 2002; VAN DEN WEGHE, 2001).

Tab. 3: Beispiele für Reduktionspotenziale von Maßnahmen bei Haltungstechnik und Entmistung zur NH₃-Emissionsminderung der Mastschweinehaltung

Maßnahme	Reduktionspotenzial (Anhaltswerte)	Autor
Haltungstechnik		
Reduzierung der emittierenden Oberfläche/ Bodengestaltung	20 bis 40 %	in VAN DEN WEGHE (2001)
Gruppengröße, perforierter Bodenanteil	25 bis 40 %	in VAN DEN WEGHE (2001)
optimierte Buchtengestaltung: gewölbte Liegefläche, Metallroste im Mistbereich, 10 cm Gülleschlitz i. Vgl. zur niederländischen Standardnorm	30 %	DEN BROK et al. (1997b)
Teilspaltenboden i.Vgl. zu Vollspaltenboden bei Sauberhaltung der planbefestigten Flächen	20 %	STEFFENS et al. (1996)
Reduzierung des Spaltenanteils von 50 % auf 25 % mit Reduzierung der Flüssigmistoberfläche bei Sauberhaltung der planbefestigten Flächen	10 bis 20 %	AARNINK (1997)
Entmistung		
mechanische Entmistung (täglich)	10 bis 40 %	in VAN DEN WEGHE (2001)
Schieber auf Epoxidharzbeschichtung	12 bis 27 %	in KECK (1997)
Spülmist	20 bis 30 %	in VAN DEN WEGHE (2001)
Spülmist mit belüfteter Dünngülle	40 %	HOEKSMAS et al. (1992)
	55 %	HENDRIKS (1993)
Entmisterohre und Spülung mit belüfteter Dünngülle	70 %	HOEKSMAS et al. (1992)
	55 %	HENDRIKS (1993)
	74 %	NAVAROTTO et al. (2000)
V-Rinnen	20 bis 40 %	in VAN DEN WEGHE (2001)
Spülen mit Dünngülle in flachen V-förmigen Kanälen	63 bis 70 %	in KECK (1997)
Schwimmschicht aus Öl	bis zu 50 %	PAHL et al. (2000)
Präseparierung durch Gefälle im Flüssigmistkeller	52 %	NAVAROTTO et al. (2000)
Zusatz organischer Säuren zum Flüssigmist	42-45 %	HENDRIKS & VRIELINK (1997)
	50 %	BEURSKENS-VOERMANS & VAN DER KAA (1997)
Kühlung des Flüssigmistes	75 %	DEN BROK & VERDOES (1997)
	40 bis 60 %	STEFFENS et al. (1996)

Im Rahmen **lüftungstechnischer Maßnahmen** zur NH₃-Emissionsminderung soll durch Beeinflussung der Faktoren Luftgeschwindigkeit, Luftrate und Temperatur speziell die NH₃-Freisetzung, d.h. der Stoffübergang von flüssiger in die gasförmige Phase, verringert werden, **Tabelle 4**. Die ermittelten Reduktionspotenziale und Zusammenhänge beziehen sich zunächst nur auf Ställe mit einer temperaturgeregelten Zwangslüftung.

Tab. 4: Beispiele für Reduktionspotenziale lüftungstechnischer Maßnahmen zur NH₃-Emissionsminderung der Mastschweinehaltung

Maßnahme	Reduktionspotenzial (Anhaltswerte)	Autor
Lüftungssteuerung, Temperatur, Zuluftkühlung, (Erdwärmetauscher)	10 bis 15 %	in VAN DEN WEGHE (2001)
Verringerung des Luftvolumenstromes Verringerung der Temperatur	k.A.	Ni (1998)
Optimierte Lüftungssteuerung mit dem Ziel der Kombination geringst möglicher Luftrate, Temperatur und Gaskonzentration (Simulationsergebnis)	ca. 10 %	BERCKMANS et al. (1994)
Senkung der Innenraumtemperatur um etwa 5 °C mit dadurch ebenfalls entsprechender indirekter Absenkung der Flüssigmisttemperatur	ca. 50 %	ROM & DAHL (2002)
Indirekte Absenkung der Flüssigmisttemperatur durch angepasste Luftführung und Lüftungssteuerung	ca. 10 % pro 1 °C geringere Flüssigmisttemperatur	AARNINK (1997)
Optimierung der Lüftung um geringst mögliche Innenraumtemperaturen zu erhalten; geringe Zulufttemperaturen im Sommer; gleichmäßige und kontrollierte Luftverteilung; Vermeidung von Luftbewegungen über der Flüssigmistoberfläche	k.A.	HARTUNG, J. & PHILIPPS (1994)
Abluffführung: Oberflurabsaugung i. Vgl. zu Unterflurabsaugung	ca. 15 %	STEFFENS et al. (1996)
Impulsarme Zuluftführung	ca. 10 bis 30 %	GUSTAFSSON (1987)
Futterganglüftung mit Oberflurabsaugung i. Vgl. zu Deckenstrahllüftung mit Oberflurabsaugung	10 bis 20 %	KECK (1997)
Futterganglüftung mit Unterflurabsaugung* i. Vgl. zu Deckenstrahllüftung mit Oberflurabsaugung (*Abstand zwischen Ansaugöffnungen und Flüssigmist war > 30 cm; s.u.)	16 bis 23 %	KECK (1997)
Zuluftlochplatten mit Unterflurabsaugung* i. Vgl. zu Deckenstrahllüftung mit Oberflurabsaugung (*Abstand zwischen Ansaugöffnungen und Flüssigmist war > 30 cm; s.u.)	ca. 12 %	KECK (1997)

Im Vergleich zu den bereits genannten Maßnahmen (Tabelle 2, Tabelle 3) sind die Reduktionspotenziale der lüftungstechnischen Maßnahmen (Tabelle 4), die über eine Veränderung der Zu- oder Ablufführung sowie eine nicht näher definierte optimierte Lüftungssteuerung erreichbar sind, mit etwa 10 bis 20 % eher gering. Weiterhin sind die Möglichkeiten durch die eigentliche Aufgabe des Lüftungssystems, ein adäquates Stallklima im Tierbereich zu gewährleisten, limitiert.

Im Bereich der **Abluftführung** muss bei der Unterflurabsaugung beachtet werden, dass ein ausreichender Abstand (größer 30 cm) zwischen den Ansaugöffnungen der Unterflurabsaugung und der Flüssigmistoberfläche besteht. Unter dieser Voraussetzung sind auch bei unterschiedlichen Luftraten die Strömungsgeschwindigkeiten über dem Flüssigmist vernachlässigbar (KECK, 1997; BÜSCHER, 1996). Verschiedene Autoren (BREUM et al., 1990; KECK, 1997; MASSABIE et al., 1998; VON PAPPRITZ, 1991) berichten für Ställe mit Unterflurabsaugung im Vergleich zu Ställen mit Oberflurabsaugung über teilweise geringere Emissionen als auch Gaskonzentrationen im Tierbereich; zum Teil wurden keine nennenswerten Unterschiede hinsichtlich der Emissionen und Gaskonzentrationen in Abhängigkeit von der Abluftführung festgestellt.

Die Art und Anordnung der Zu- und Abluftöffnungen, die Raumkonturen, die Tiere und ihre Wärmeproduktion sowie die Luftrate wirken sich generell sehr unterschiedlich auf das Gaskonzentrationsprofil und das **Strömungsbild** im Stall aus (z.B.: BJERG et al., 2000; DE PRAETERE & VAN DER BIEST, 1989; HEBER et al., 1996; KRAUSE & JANSEN, 1989; SMITH et al., 1999; siehe Ni, 1998). Luftführung und Luftrate beeinflussen ebenfalls das Ausmaß des an sich unerwünschten konvektiven Luftaustausches zwischen Innenraum und Flüssigmistkeller sowie das Strömungsbild über den Flächen (z.B.: AARNINK, 1997; DE PRAETERE & VAN DER BIEST, 1989; siehe KECK, 1997; Ni, 1998; ROM & DAHL, 2002; SVIDT et al., 1998). Schließlich besteht die Möglichkeit, die Einteilung und Einhaltung der Funktionsbereiche und somit die Größe und Lokalisation von verschmutzten Oberflächen durch die Luftführung und Buchtengestaltung zu beeinflussen (AARNINK, 1997).

Ein größeres Reduktionspotenzial (Tabelle 4) beinhaltet eine Absenkung der **Innenraumtemperatur** durch beispielsweise Änderung der Solltemperatur, Ansaugung kühler Zuluft, direkter Zuluftkühlung oder Anpassung der Zuluftführung (AARNINK, 1997; HARTUNG, J. & PHILIPPS, 1994; ROM & DAHL, 2002). OLDENBURG (1989) weist auf den stark positiven Zusammenhang zwischen Zulufttemperatur und NH_3 -Emission hin. Nach AARNINK (1997) und ROM & DAHL (2002) ist bei geringeren Temperaturen der eigentliche die Emissionsminderung bestimmende Faktor jedoch die dann ebenfalls geringere Flüssigmisttemperatur. Ein weiterer mit der Temperatur verbundener Einflussfaktor auf die Emission kann die Zunahme der Verschmutzung der Liegeflächen mit Exkrementen sein, wenn eine bestimmte Temperaturschwelle überschritten wird (AARNINK et al., 2001).

Als Ansatzpunkt für Emissionsminderungsmaßnahmen gilt weiterhin eine Verringerung des **Luftvolumenstromes**. In vielen Untersuchungen an Schweineställen mit einer temperaturgeregelten Zwangslüftung wird der positive Zusammenhang zwischen Temperatur und Volumenstrom, Volumenstrom und Emission sowie die

negative Beziehung zwischen Volumenstrom und Gaskonzentration beschrieben (z.B.: AARNINK, 1997; HARTUNG, J. & PHILIPPS, 1994; KAISER, 1999; KECK, 1997; NI, 1998; RATHMER, 2002).

Da die Emission das Produkt aus Konzentration und Volumenstrom ist, scheint es aus rein rechnerischen Gründen folgerichtig, die Emission über die Lüftrate kontrollieren zu können. Jedoch beeinflusst das Lüftungssystem nicht nur die NH₃-Konzentration sondern auch die Temperatur, Luftgeschwindigkeit an den Oberflächen, relative Luftfeuchte und die Konzentration anderer Gase.

Weiterhin bestehen Wechselbeziehungen zwischen Emission und Konzentration sowie zwischen Konzentration und Freisetzungsrate (BERCKMANS et al., 1994). KRAUSE & JANSEN (1989) merken hierzu an, dass bei niedriger Konzentration mit hohem Volumenstrom mehr Masse an NH₃ emittiert wird als im umgekehrten Fall bei hoher Konzentration und geringem Volumenstrom. NI (1998) zeigt anhand eigener Messergebnisse auf, dass in Ergänzung zur bisherigen Meinung (s.o.) geringe Lüfraten auch mit geringen Konzentrationen einhergehen können (positiver Zusammenhang) oder kein Zusammenhang zwischen Lüftrate und Konzentration nachweisbar ist. Folglich muss der Effekt der Höhe der Lüftrate auf die Emission in Zusammenhang mit dem NH₃-Nachlieferungspotenzial aus den Exkrementen, den Freisetzungsbedingungen, dem Temperatureinfluss auf alle beteiligten Prozesse sowie der Wechselwirkung zwischen Temperatur und Lüftrate gesehen werden.

Für Ställe mit **freier Lüftung** (Außenklimaställe) liegen in der Literatur keine Angaben zum Effekt von gezielten Lüftungstechnischen Maßnahmen vor. Dem Außenklimastall wird jedoch generell aufgrund häufiger niedriger Temperaturen eine geringere Emission zugesprochen, auch wenn bei geringeren Temperaturen und bei ausreichender Windanströmung zudem sehr hohe Volumenströme gemessen werden (NIEBAUM, 2001; RATHMER, 2002).

Abschließend muss bedacht werden, dass sich die Eignung und Güte von Maßnahmen zur Emissionsminderung deutlich unterscheiden können in Hinblick auf eine **nachhaltige Emissionsentlastung** für das gesamte Produktionssystem, die kurz- und mittelfristige Umsetzbarkeit, den Kapitalbedarf und die verfahrenstechnischen Kosten sowie die Überprüfbarkeit der tatsächlich erreichten Reduktion (VAN DEN WEGHE, 2001). Letztlich ist die Betrachtung der gesamten Verfahrenskette vom Stall über die Mistlagerung bis zur Ausbringung notwendig, da Emissionseinsparungen im Stall nicht zu nachfolgend erhöhten Stoffausträgen bei der Lagerung und Ausbringung führen dürfen. Einschränkend ist zu betonen, dass die dargestellten möglichen Reduktionspotenziale (Tabellen 2; 3; 4) sich vornehmlich auf Einzelmaßnahmen beziehen. Die **tatsächliche Emissionsänderung** kann sich im Praxisstall

hiervon deutlich unterscheiden. Ein potenzieller Minderungseffekt einer Maßnahme kann durch weitere Einflussfaktoren überlagert oder kompensiert werden. Die große Variabilität in der Höhe der Emission von verschiedenen Ställen und Haltungssystemen, bzw. unterschiedlichen Messungen, ist ein weiterer Faktor, der den Nachweis und die Übertragbarkeit von Reduktionspotenzialen erschwert.

2.1.3 Innenraumkonzentrationen und Emissionen

Die Größenordnungen von NH_3 -Konzentrationen und Emissionen unterschiedlicher Haltungssysteme für Mastschweine auf Flüssigmist sind in einer exemplarischen Literaturliste in **Tabelle 5** und **Tabelle 6** abgebildet. Es wurden für eine bessere Vergleichbarkeit vornehmlich Untersuchungen ausgewählt, die Angaben zu den Rahmenbedingungen der Messungen sowie angewendeten Messmethoden enthalten. Die eingesetzten Methoden zur Konzentrations- und Volumenstrombestimmung sollten über eine möglichst hohe Genauigkeit und zeitliche Auflösung verfügen (vgl. Kapitel 2.4).

Anhand der in Tabelle 5 zusammengefassten Untersuchungsergebnisse für **zwangsbelüftete Haltungssysteme** mit Flüssigmist (Voll- und Teilspaltenboden) zeigen sich bereits für die Randparameter mittlere Temperatur und mittlerer Volumenstrom deutliche Unterschiede in Abhängigkeit von der Jahreszeit. Die genannten **NH_3 -Konzentrationen** liegen in den meisten Fällen unterhalb von 20 ppm mit in der Regel geringeren Werten in warmen Jahreszeiten und bei höheren Volumenströmen. Höhere Konzentrationen treten in der Regel bei geringen Luftraten auf. Um die Häufigkeit von Grenzwertüberschreitungen zu verringern, schlagen HINZ & LINKE (1998) eine Anpassung der Lüftungssteuerung vor, die eine direkte Kontrolle der NH_3 -Konzentration im Innenraum ermöglicht. Die sehr hohen Konzentrationen bei RATHMER (2002) sind vor allem auf eine starke Verschmutzung der Liegefläche sowie nicht optimale Luftführung zurückzuführen. In Kombination mit zu hohen Proteingehalten im Futter werden diese Faktoren als Hauptursachen für die ebenfalls im Vergleich zu den anderen Autoren sehr hohen NH_3 -Emissionen genannt (RATHMER, 2002).

Abgesehen von den Werten von RATHMER (2002), liegen die in Tabelle 5 genannten **NH_3 -Emissionen** pro Großvieheinheit (GV) aus zwangsbelüfteten Ställen mit Flüssigmist in einer Spannweite von 41 bis 160 g d⁻¹ GV⁻¹. Dies entspricht auf einer Basis von 330 Stalltagen pro Jahr sowie der Annahme, dass ein Mastschwein im Mittel 0,12 GV gleichkommt, einer NH_3 -Emission von 1,6 bis 6,3 kg a⁻¹ Tier⁻¹. In den Niederlanden wird für traditionelle Ställe ein mittlerer Wert von 3 kg a⁻¹ Tier⁻¹ angenommen und Voraussetzung für ein "Groen-Label"-Zertifikat ist eine Emissionsminderung um 50 % auf 1,5 kg a⁻¹ Tier⁻¹ (VERDOES et al., 1996).

Tab. 5: Beispiele für mittlere NH₃-Konzentrationen und -Emissionen bei verschiedenen Rahmenbedingungen zwangsbelüfteter Haltungssysteme mit Flüssigmist für Mastschweine (kursive Werte zum Vergleich umgerechnet mit den Annahmen: 1 Tierplatz entspricht 0,12 GV; 1 ppm NH₃ entspricht etwa 0,7 mg/m³)

Haltungssystem	Konzentrationsbestimmung ^A	Volumenstrombestimmung ^A	Temperatur [°C]	Volumenstrom	NH ₃ -Konzentration	NH ₃ -Emission	Anzahl Messtage/ Messzeitraum	Quelle
Vollspalten ^B	NDIR-Spektroskopie	Messventilator	21	230 m ³ h ⁻¹ GV ⁻¹	22 ppm	116 g d ⁻¹ GV ⁻¹	57 Tage; Oktober-Dezember	KECK (1997)
			22	279 m ³ h ⁻¹ GV ⁻¹	20 ppm	85 g d ⁻¹ GV ⁻¹	80 Tage; April-Juli; Zulufttemperatur < 20°C	
			27	400 m ³ h ⁻¹ GV ⁻¹	10 ppm	61 g d ⁻¹ GV ⁻¹	30 Tage; April-Juli; Zulufttemperatur > 20°C	
Vollspalten	PAS-Multigasmonitor	Messventilator	k. A.	k. A.	k. A.	5,5- 7 g d ⁻¹ Tier ⁻¹ 46- 58 g d ⁻¹ GV ⁻¹	4 Mastdurchgänge mit jeweils etwa 90 Messtagen	KAISER (1999)
Vollspalten	UV-Absorption	Messventilator	k. A.	111-780 m ³ h ⁻¹ GV ⁻¹	k. A.	5-14 g d ⁻¹ Tier ⁻¹ 41-116 g d ⁻¹ GV ⁻¹	1 Jahr (3 Mastdurchgänge) an 5 unterschiedlichen Ställen	HAHNE et al.(1999)
Vollspalten	NH ₃ -Konverter/NO _x -Analysator	Messventilator	21	87 m ³ h ⁻¹ Tier ⁻¹ 725 m ³ h ⁻¹ GV ⁻¹	10-13 ppm ^C	65 g d ⁻¹ GV ⁻¹	2 Monate; März-Mai; in zwei Ställen	HEBER et al. (2000)
			24	163 m ³ h ⁻¹ Tier ⁻¹ 1360 m ³ h ⁻¹ GV ⁻¹	5-6 ppm ^C	121-146 g d ⁻¹ GV ⁻¹	3 Monate; Juni-September; in zwei Ställen	
Vollspalten	PAS-Multigasmonitor	wöchentliche Netzmessung bei unterschiedlichen Lüfterstufen	27	780 m ³ h ⁻¹ GV ⁻¹	5 mg/m ³ ^C 7 ppm	106 g d ⁻¹ GV ⁻¹	70 Tage; erste Hälfte der Mastperiode	NAVAROTTO et al (2000)
Vollspalten	NDIR-Spektroskopie	---	17-25	Raumkonzentration im Winter: über 90 % der Werte > 10 ppm; max 20 bis 48 ppm Raumkonzentration im Sommer: 0 bis 50 % der Werte > 10 ppm; max 14 bis 20 ppm			jeweils 2 Wochen im Winter und Sommer; drei Ställe	MAYER, 1999

^A vgl. Kapitel 2.4; ^B Jungsau (25-105 kg); ^C Abluftkonzentration

Fortsetzung Tab. 5: Beispiele für mittlere NH₃-Konzentrationen und -Emissionen bei verschiedenen Rahmenbedingungen zwangsbelüfteter Haltungssysteme auf Flüssigmist für Mastschweine (kursive Werte zum Vergleich umgerechnet mit den Annahmen: 1 Tierplatz entspricht 0,12 GV; 1 ppm NH₃ entspricht etwa 0,7 mg/m³)

Haltungssystem	Konzentrationsbestimmung ^A	Volumenstrombestimmung ^A	Temperatur [°C]	Volumenstrom	NH ₃ -Konzentration	NH ₃ -Emission	Anzahl Messtage/ Messzeitraum	Quelle
Teilspalten	PAS-Multigasmonitor	Messventilator	19 ^D	537 m ³ h ⁻¹ GV ⁻¹	29 ppm ^E Max 62	278 g d ⁻¹ GV ⁻¹	75 Tage; Februar-Juni (Frühjahr)	RATHMER (2002)
			22 ^D	498 m ³ h ⁻¹ GV ⁻¹	28 ppm ^E Max 45	355 g d ⁻¹ GV ⁻¹	105 Tage; Juni-Oktober (Sommer)	
			18 ^D	265 m ³ h ⁻¹ GV ⁻¹	46 ppm ^E Max 78	216 g d ⁻¹ GV ⁻¹	106 Tage; November-März (Winter)	
Teilspalten	NH ₃ -Konverter/NO _x -Analysator	Messventilator	19	469 m ³ d ⁻¹ Tier ⁻¹ 162 m ³ h ⁻¹ GV ⁻¹	12 mg/m ³ ^C 17 ppm	5,7 g d ⁻¹ Tier ⁻¹ 47,5 g d ⁻¹ GV ⁻¹	104 Tage; Winter	AARNINK (1997)
			23	1285 m ³ d ⁻¹ Tier ⁻¹ 446 m ³ h ⁻¹ GV ⁻¹	5 mg/m ³ ^C 7 ppm	5,9 g d ⁻¹ Tier ⁻¹ 49 g d ⁻¹ GV ⁻¹	104 Tage; Sommer	
Teilspalten	PAS-Multigasmonitor	Messventilator	19	k. A..	k. A..	19,3 g d ⁻¹ Tier ⁻¹ 160 g d ⁻¹ GV ⁻¹	84 Tage	ROM & DAHL (2002)
Teilspalten	NH ₃ -Konverter/NO _x -Analysator	Messventilator	22	38 m ³ h ⁻¹ Tier ⁻¹ 316 m ³ h ⁻¹ GV ⁻¹	16 ppm ^C	9,5 g d ⁻¹ Tier ⁻¹ 78 g d ⁻¹ GV ⁻¹	ca. 450 Tage	VRANKEN et al. (2002)
Teilspalten	NH ₃ -Konverter/NO _x -Analysator	Messventilator	16	421 m ³ h ⁻¹ GV ⁻¹	9 mg/m ³ 13 ppm	92 g d ⁻¹ GV ⁻¹	171 Tage (August-Februar)	NI (1998)
Teilspalten	PAS-Multigasmonitor	Messventilator	19,5-20,5	16-23 m ³ h ⁻¹ Tier ⁻¹ 133-192 m ³ h ⁻¹ GV ⁻¹	bis 25 ppm	72 g d ⁻¹ GV ⁻¹	6 Tage, Winter (Januar)	HINZ & LINKE (1998)
Voll- und Teilspalten	NH ₃ -Konverter/NO _x -Analysator	Wärme- und CO ₂ -Bilanz	20-23	110-646 m ³ h ⁻¹ GV ⁻¹	k. A..	48-60 g d ⁻¹ GV ⁻¹	jeweils 4 Messungen (24h) im Sommer und Winter an etwa 16 Ställen in Nordeuropa	GROOT-KOERKAMP et al. (1998); SEEDORF et al. (1998a;b)
Teilspalten	NDIR-Spektroskopie	---	14-24	Raumkonzentration im Winter: bis 2 % der Werte > 10 ppm; max 11-24 ppm Raumkonzentration im Sommer: 3 bis 85 % der Werte > 10ppm; max 11 bis 36 ppm			jeweils 2 Wochen im Winter und Sommer; drei Ställe	MAYER, 1999

^A vgl. Kapitel 2.4; ^B Jungsaunen (25-105 kg); ^C Abluftkonzentration; ^D Ablufttemperatur; ^E Konzentrationsdifferenz zwischen Abluft und Zuluft

Tab. 6: Beispiele für mittlere NH₃-Konzentrationen und -Emissionen bei verschiedenen Rahmenbedingungen freibelüfteter Haltungssysteme für Mastschweine mit Flüssigmist (kursive Werte zum Vergleich umgerechnet mit den Annahmen: 1 Tierplatz entspricht 0,12 GV; 1 ppm NH₃ entspricht etwa 0,7 mg/m³)

Haltungssystem	Konzentrationsbestimmung ^A	Volumenstrombestimmung ^A	Temperatur [°C]	Volumenstrom	NH ₃ -Konzentration	NH ₃ -Emission	Anzahl Messtage/ Messzeitraum	Quelle
Außenklimastall, Nürtinger System, Offenfirst	PAS Multigasmonitor	Tracergas, kontinuierliche Injektion	k. A.	627 m ³ h ⁻¹ GV ⁻¹	1,6 mg/m ³ ^B 2,3 ppm	23 g d ⁻¹ GV ⁻¹	6 Tage; Sommer	NIEBAUM (2001)
			k. A.	345 m ³ h ⁻¹ GV ⁻¹	4,5 mg/m ³ ^B 6,4 ppm	28 g d ⁻¹ GV ⁻¹	9 Tage; Winter	
Außenklimastall, Nürtinger System, Schachtlüftung	PAS Multigasmonitor	Tracergas, kontinuierliche Injektion	k. A.	502 m ³ h ⁻¹ GV ⁻¹	3,9 mg/m ³ ^B 5,5 ppm	43 g d ⁻¹ GV ⁻¹	11 Tage; Sommer	NIEBAUM (2001)
			k. A.	407 m ³ h ⁻¹ GV ⁻¹	6,6 mg/m ³ ^B 9,4 ppm	57 g d ⁻¹ GV ⁻¹	12 Tage; Winter	
Außenklimastall mit Ruheboxen und Teilspaltenboden	PAS Multigasmonitor	Kapselung; Messventilator	13 ^C	675 m ³ h ⁻¹ GV ⁻¹	6,3 ppm ^D	96 g d ⁻¹ GV ⁻¹	66 Tage; Frühjahr (Februar-Juni)	RATHMER (2002)
			18 ^C	763 m ³ h ⁻¹ GV ⁻¹	9,2 ppm ^D	120 g d ⁻¹ GV ⁻¹	119 Tage; Sommer (Juni-Oktober)	
			6 ^C	403 m ³ h ⁻¹ GV ⁻¹	3,2 ppm ^D	22 g d ⁻¹ GV ⁻¹	109 Tage; Winter (November-März)	
Außenklimastall, Nürtinger System, ohne Einstreu	PAS Multigasmonitor	Tracergas	20-22	k. A.	3-5 ppm	3-4 g d ⁻¹ Tier ⁻¹ 25-33 g d ⁻¹ GV ⁻¹	3 Tage; September	KAISER et al (1998)
Kistenstall, Offenfront	NDIR-Spektroskopie	Temperatur: Aktivitätsbereich: -2 bis 28 °C Kiste: 15 bis 40°C	Konzentration Winter: Aktivitätsbereich: bis 16 % der Werte > 10 ppm, max 14 ppm Kiste: bis 50 % der Werte > 10 ppm, max 22 ppm Konzentration Sommer: Aktivitätsbereich: bis 16 % der Werte > 10 ppm, max 20 ppm Kiste: bis 40-90 % der Werte > 10 ppm, max 30 bis 284 ppm			jeweils 2 Wochen im Winter und Sommer; zwei Ställe	MAYER (1999)	

^A vgl. Kapitel 2.4; ^B Abluftkonzentration; ^C Ablufttemperatur; ^D Konzentrationsdifferenz zwischen Abluft und Zuluft

Im Rahmen der Umsetzung der IVU-Richtlinie und Erstellung von Emissionsinventaren in Deutschland (UBA, 2001b, c) ist eine Festlegung von **NH₃-Emissionsfaktoren** auch für Mastschweinehaltungsverfahren notwendig. Als Standardverfahren wurde der "wärmegeämmte Stall mit Vollspalten, Kleingruppe und einer 1-Phasen-Fütterung" definiert. Die Emissionsfaktoren wurden für folgende Annahmen ermittelt: ein Mastschwein entspricht im Mittel 0,12 GV; 2,5 Mastdurchgänge pro Jahr; 13 kg jährliche N-Ausscheidung pro Tier; durchschnittliche tägliche Zunahme 700 g d⁻¹ Tier⁻¹. Die mittleren NH₃-N-Emissionsfaktoren für Voll- und Teilspaltenbodenställe wurden nach derzeitigem Stand des Wissens im Rahmen einer Expertenschätzung auf 3 kg a⁻¹ Tierplatz⁻¹ mit einer Spanne von 2 bis 5 kg a⁻¹ Tierplatz⁻¹ NH₃-N festgelegt (UBA, 2001b, c).

Die Datenverfügbarkeit für **Mastschweinehaltungssysteme mit freier Lüftung**, in der Regel als Außenklimaställe (UBA, 2001c; KTBL, 1998) bezeichnet, ist noch ausgesprochen begrenzt (Tabelle 6). Sowohl die Anzahl bisheriger Untersuchungen zu Stallklima und Emissionen freibelüfteter Ställe als auch die Dauer der jeweiligen Messungen ist gering. Ein wesentlicher Grund liegt in den besonderen Anforderungen, die durch die freie Lüftung an die Methoden zur Volumenstrombestimmung gestellt werden und eine zuverlässige Emissionsratenbestimmung erschweren (vgl. Kap. 2.4.3.2).

Zumindest aus **stallklimatischer Sicht** muss in einem Außenklimastall zwischen dem Aktivitätsbereich und dem abgedeckten Liegebereich ("Kisten") unterschieden werden. In Abhängigkeit von der Außentemperatur bzw. Jahreszeit und dem Stallgebäude werden im Aktivitätsbereich entsprechende Werte der Temperaturskala gemessen (Tabelle 6). Im Liegebereich sind im Winter durch die Tierbelegung ausreichend warme Temperaturen vorhanden. Im Sommer können die Temperaturen dort jedoch sehr hoch ansteigen (MAYER, 1999). Die NH₃-Raumkonzentrationen sind bei den in Tabelle 5 und Tabelle 6 genannten Beispielen bei Ställen mit freier Lüftung geringer als bei Ställen mit Zwangslüftung. Im Liegebereich sind die Gaskonzentrationen im Winter akzeptabel, wenn die Kisten von den Tieren als Liegefläche genutzt und sauber gehalten werden. Im Sommer kann eine starke Verkotung der Liegeflächen zu enorm hohen NH₃-Konzentrationen in den Kiste führen (MAYER, 1999). In der Literatur finden sich derzeit keine Abschätzungen, wie hoch der Beitrag der Gasfreisetzung innerhalb der vom restlichen Raum abgegrenzten, abgedeckten Liegefläche zur Emission ist.

Die genannten **NH₃-Emissionen** aus freibelüfteten Ställen auf Flüssigmist betragen etwa 22 bis 120 g d⁻¹ GV⁻¹ (Tabelle 6). Dies entspricht auf der Basis von 330 Stalltagen pro Jahr und 0,12 GV pro Tier einem Anhaltswert von etwa 0,8 bis 4,7 kg a⁻¹ Tier⁻¹. Diese Werte sind jedoch auf Grund der geringeren Datenbasis und

Problematik der Volumenstrombestimmung, die vor allem die Gefahr einer Unterschätzung der Emission beinhaltet, als weniger aussagekräftig als die Daten für zwangsbelüftete Ställe (Tabelle 5) einzuschätzen. Im Vergleich zu zwangsbelüfteten Warmställen sehen NIEBAUM (2001) und RATHMER (2002) für freibelüftete Außenklimaställe ein geringeres Emissionspotenzial.

Dieser Ansicht wurde auch bei der Festlegung der nationalen **NH₃-Emissionsfaktoren** (s.o.) im Rahmen erster Schätzungen gefolgt. Außenklimaställen mit Flüssigmist wird ein mittlerer Emissionsfaktor von $2 \text{ kg a}^{-1} \text{ Tierplatz}^{-1} \text{ NH}_3\text{-N}$ zugesprochen (1 Mastschwein entspricht im Mittel 0,12 GV; 2,5 Mastdurchgänge pro Jahr; 13 kg jährliche N-Ausscheidung pro Tier; durchschnittliche tägliche Zunahme $700 \text{ g d}^{-1} \text{ Tier}^{-1}$) (UBA, 2001b,c).

Die Darstellung von mittleren Emissionsfaktoren kann allerdings die große **Streuung der Ergebnisse** (vgl. Tabelle 5, Tabelle 6), bedingt etwa durch unterschiedliche Messmethoden und -bedingungen, Art und Betriebsweise der untersuchten Ställe und die Auswahl der Messzeiträume, nur unzureichend abbilden. Ebenso werden beispielsweise jahres- oder tageszeitliche Einflüsse auf die Höhe und **Dynamik des Emissionsverlaufes** nicht deutlich (UBA, 2001b).

Verschiedene Autoren (z.B.: AARNINK, 1997; HAHNE et al., 1999; HEBER et al., 2000; MASSABIE et al., 1998; OLDENBURG, 1989; RATHMER, 2002) berichten bei Ställen mit Zwangslüftung über einen **jahreszeitlichen Einfluss** auf die NH₃-Emission, der vor allem im Sommer infolge höherer Temperaturen höhere Emissionen bedingen kann. Dabei sind die damit verbundenen temperaturbedingten Änderungen des Volumenstromes und die Auswirkungen auf Luftgeschwindigkeiten und Strömungsbild im Stall sowie die Gaskonzentrationen zu berücksichtigen (vgl. Kap. 2.2.1.2). Diese Wechselwirkungen können auch zu dem gegenteiligen Ergebnis führen, dass in den Herbstmonaten (NI, 1998) oder bei Zulufttemperaturen kleiner 20 °C (KECK, 1997) höhere Emissionen gemessen werden. Nach den Untersuchungen von GROOT-KOERKAMP et al. (1998) lässt sich eine jährliche oder saisonale Variation nicht in Abhängigkeit von der Außentemperatur modellieren. Es konnten nur bei einer begrenzten Anzahl von Messungen signifikante Beziehungen zwischen der NH₃-Konzentration, Emission und Außentemperatur nachgewiesen werden. Die Datenbasis für frei belüftete Ställe ist zur Zeit noch zu gering und teilweise widersprüchlich (Tabelle 6), um gesicherte Aussagen über jahreszeitliche Effekte auf die Emission ableiten zu können.

Mehr Einigkeit der Autoren (z.B.: AARNINK, 1997; NI, 1998; RATHMER, 2002; ROM & DAHL 1998; VRANKEN et al., 2002) scheint bezüglich der Abhängigkeit der NH₃-Emission vom **Tiergewicht** bzw. von der **Zeit nach dem Einstallen** zu bestehen.

Der Faktor "Zeit nach dem Einstellen" oder "Masttag", ist als Indikator für vielfältige Veränderungen der Einflussfaktoren im Mastverlauf von beispielsweise Tiergewicht, Futterzusammensetzung, Flüssigmistzusammensetzung und -menge, Fläche pro Tier, Buchtenverschmutzung, Stallklima und Luftraten anzusehen. Der Faktor "Tiergewicht" wiederum wird unterschiedlich ausgedrückt etwa als Gesamtgewicht im Stall, Einzeltiergewicht oder Stallbelegung in Großvieheinheiten. NI (1998) beobachtete zu Mastbeginn eine geringere NH_3 -Emission pro Tier bzw. höhere, auf die Großvieheinheit bezogene, NH_3 -Emissionsraten bei höheren Gesamtgewichten. AARNINK (1997) und ROM & DAHL (1998) berichten über einen auffallenden kontinuierlichen Anstieg der absoluten NH_3 -Emission pro Tier von Mastbeginn bis -ende bzw. mit steigendem Einzeltiergewicht. RATHMER (2002) weist für die untersuchten Außenklimastallvarianten einen signifikanten positiven Einfluss der Zeit nach dem Einstellen auf die NH_3 -Emission pro Großvieheinheit nach. Für den zwangsbelüfteten Warmstall wurde von RATHMER (2002) hingegen ein negativer Zusammenhang ermittelt, der auf bereits zu Mastbeginn unerwartet hohe Emissionen zurückgeführt wird.

Schließlich unterliegt der Verlauf der NH_3 -Konzentration und -Emission ausgeprägten **tageszeitlichen Schwankungen**, die in einer Größenordnung von +/- 10 % bis 30 % Abweichung vom Tagesdurchschnitt liegen (z.B.: AARNINK, 1997; KAISER, 1999; KECK, 1997; MAYER, 1999; NI, 1998; NIEBAUM, 2001; OLDENBURG, 1989; RATHMER, 2002; ROM & DAHL, 1998). Es ist oftmals eine deutliche **Tag-Nacht Rhythmik** (circadiane Rhythmik) zu beobachten mit in der Regel höheren Emissionen und Konzentrationen tagsüber. Einflussfaktoren sind die entsprechenden Tag-Nacht Unterschiede in der Temperatur und der davon abhängenden Luftrate, die besonders die Übergangsjahreszeiten kennzeichnen. Weiterhin ist bei Schweinen nachts eine wesentlich geringere Aktivität als tagsüber zu verzeichnen (PEDERSEN & ROM, 1998; SMIDT et al., 1991). Im Verlauf des Tages sind zudem weitere kurzzeitige Veränderungen der Konzentration und Emission festzustellen. Diese sind vornehmlich auf verschiedene Tieraktivitätsspitzen zurückzuführen, die auf Grund eines mehrfach beobachteten biphasischen Aktivitätsrhythmus von Schweinen vormittags und nachmittags sowie zu Fütterungszeiten auftreten (AARNINK, 1997; PEDERSEN & ROM, 1998; SMIDT et al., 1991). Die erhöhte Tieraktivität kann mit einer Zunahme der Harnvorgänge verbunden sein (AARNINK, 1997). Weiterhin kann die aktivitätsbedingt erhöhte Wärmeproduktion und Wasserabgabe der Tiere bewirken, dass die Temperatur, Luftfeuchte und Enthalpie der Stallluft sowie die Volumenströme ansteigen (BAUER, 1994; CHRISTIANSON et al., 2002; OLDENBURG, 1989; PEDERSEN & ROM, 1998).

2.2 Klimarelevante Gase

Die in der Erdatmosphäre natürlich vorkommenden wichtigsten klimawirksamen Spurengase sind Wasserdampf (H₂O), Kohlendioxid (CO₂), Ozon (O₃), Distickstoffoxid (Lachgas = N₂O) und Methan (CH₄) (UBA, 2001b). Sie lassen die von der Sonne (vor allem im sichtbaren, kurzwelligen Bereich) auf die Erde fallende, energiereiche Strahlung nahezu ungehindert passieren, absorbieren teilweise aber im Gegenzug von der erwärmten Erde ausgehende langwellige Strahlung. Die von der Erde abgegebene Strahlungsenergie wird deshalb zum großen Teil schon in den unteren Schichten der Atmosphäre wieder absorbiert, erwärmt diese und bewirkt über Strahlungsrückwirkung, dass die mittlere Temperatur auf der Erdoberfläche um etwa 30 bis 33 K höher liegt, als dies bei einer in allen Wellenlängenbereichen transparenten Atmosphäre der Fall wäre. Ohne diesen sogenannten **natürliche Treibhauseffekt** der Atmosphäre läge die mittlere Temperatur auf der Erdoberfläche zwischen -15 °C und -18 °C; statt bei +15 °C. Der natürliche Treibhauseffekt ist somit notwendig für das Leben auf der Erde (BENNDORF, 2001).

Menschliche Aktivitäten, vor allem im Zuge der Industrialisierung, führen über die natürliche Emission von Spurenstoffen hinaus zu einer zusätzlichen Freisetzung klimawirksamer Gase, die die Strahlungsbilanz im System Atmosphäre - Erdoberfläche zusätzlich beeinflussen (**anthropogener Treibhauseffekt**). Die Konzentrationserhöhung von klimawirksamen Gasen in der Atmosphäre bewirkt mithin eine Verstärkung des natürlichen Treibhauseffektes.

Folgende Effekte und Wirkungen des anthropogenen Treibhauseffektes werden nach UBA (2001b), IPCC (2001) und SIMONIS (2002) beispielsweise befürchtet:

- Störung des Gleichgewichts zwischen ozonabbauenden und –aufbauenden Prozessen in der Stratosphäre mit der Folge der Abnahme der stratosphärischen Ozonschichtdicke;
- Zunahme der bodennahen UV-Strahlung (für terrestrische und aquatische Ökosysteme sowie Mensch, Tier und Pflanze schädlich);
- Anstieg der globalen mittleren Oberflächentemperatur;
- Anstieg des Meeresspiegels weltweit;
- Regionale Häufung von Extremereignissen (Temperaturen, Fluten, Dürren, Brandgefahr);
- Direkte und indirekte Wirkungen auf Ernteerträge, Pflanzenkrankheiten und Schädlinge mit starker regionaler Abhängigkeit.

Seit der „Konferenz der Vereinten Nationen über Umwelt und Entwicklung“ von 1992 in Rio de Janeiro haben über 170 Staaten die **Klimarahmenkonvention** unterzeichnet und damit die Basis für globalen Klimaschutz geschaffen (UBA, 2001a).

Laut Artikel 2 der Klimarahmenkonvention ist es das Ziel, „...die Stabilisierung der Treibhausgaskonzentrationen in der Atmosphäre auf einem Niveau zu erreichen, auf dem eine gefährliche anthropogene Störung des Klimasystems verhindert wird. Ein solches Niveau soll innerhalb eines Zeitraumes erreicht werden, der ausreicht, dass sich die Ökosysteme auf natürliche Weise den Klimaänderungen anpassen können, die Nahrungsmittelerzeugung nicht bedroht wird und die wirtschaftliche Entwicklung auf nachhaltige Weise fortgeführt werden kann“.

Die Klimarahmenkonvention verpflichtete die Industrieländer zur Rückführung der Emissionen von CO₂ und anderer, im Montrealer Protokoll nicht geregelter Treibhausgase, bis zum Jahr 2000 auf das Niveau von 1990. Zentrales Anliegen aller fünf bisherigen Vertragsstaatenkonferenzen war die Fortentwicklung der Verpflichtungen zum Klimaschutz. Im **Protokoll von Kioto**, bei der 3. Vertragsstaatenkonferenz im Jahr 1997, verpflichteten sich die entwickelten Länder die gemeinsamen Emissionen der sechs wichtigsten Treibhausgase (CO₂, CH₄, N₂O, H-FKW, FKW und SF₆) in ihrer Summe um mindestens 5 % bis zum Zeitraum 2008-2012 gegenüber den Basisjahren 1990 bzw. 1995 zu verringern. Die bislang angesammelten Beiträge emissionsverursachender Prozesse zum anthropogenen Treibhauseffekt werden global wie folgt geschätzt (UBA, 2001a):

- Verbrennung fossiler Energieträger ca. 50 %
- Chemische Industrie (FCKW und Halone) ca. 20 %
- Waldvernichtung und –abholzung ca. 15 %
- Landwirtschaft und andere Bereiche (Methan durch Rinderhaltung, Reisanbau und Mülldeponien, Lachgas durch Düngung) ca. 15 %

Auf der Basis des Protokolls von Kioto sieht sich die EU zu einer Emissionsminderung der Treibhausgase um 8 % bis zum Zeitraum 2008-12 veranlasst. Die Beiträge (Minderung bzw. Begrenzung des Anstiegs der Emissionen) der Mitgliedsstaaten wurden im „burden-sharing“ (Lastenausgleich) wie folgt vereinbart, **Tabelle 7**. Über das international verpflichtende Minderungsziel hinausgehend hat Deutschland im **Nationalen Klimaschutzprogramm** eine Emissionsminderung der Treibhausgase um 25 % gegenüber dem Bezugsjahr 1990 bis zum Jahr 2005 vorgesehen (UBA, 2001a).

Zur Beschreibung der Klimawirksamkeit der einzelnen Gase wird das sogenannte **GWP (Global Warming Potential)** verwendet. Bei der Berechnung dieser Größe werden hauptsächlich die Absorption von Wärmestrahlung und die Verweilzeit des jeweiligen Gases in der Atmosphäre berücksichtigt. Der GWP-Wert von CO₂ beträgt 1 und die mittlere atmosphärische Verweildauer beträgt ca. 5 bis 10 Jahre. Für die Berechnung der GWP-Werte für alle übrigen Gase stellt CO₂ die Referenz

dar und für Emissionsinventare oder -vergleiche werden die Ergebnisse dann entsprechend in CO₂-Äquivalenten angegeben. Für CH₄ wird eine atmosphärische Lebensdauer von ca. zehn Jahren und ein GWP von 21 (massebezogen, 100-jähriger Zeithorizont) angenommen. Mit einem GWP von 310 (massebezogen, 100-jähriger Zeithorizont) und einer mittleren atmosphärischen Lebensdauer von etwa 150 Jahren weist N₂O bei den oben genannten Gasen das relativ größte Treibhauspotential auf (UBA, 2001a).

Dennoch kommen den CO₂-Emissionen in Europa trotz des geringsten GWP-Wertes auf Grund der wesentlich höheren absoluten Jahresemissionen und bisher geringster Emissionsminderung die größte Bedeutung zu, **Tabelle 8**.

Tab. 7: Beiträge der EU-Staaten zur Emissionsminderung der sechs Treibhausgase (CO₂, CH₄, N₂O, H-FKW, FKW und SF₆) im Rahmen des Kioto-Protokolls bis zum Zeitraum 2008-12 (UBA, 2001a)

Land	Emissionsminderung	Land	Emissionsminderung
Belgien	-7,5 %	Italien	-6,5 %
Dänemark	-21 %	Luxemburg	-28 %
Deutschland	-21 %	Niederlande	-6 %
Finnland	0 %	Österreich	-13 %
Frankreich	0 %	Portugal	27 %
Griechenland	25 %	Schweden	4 %
Großbritannien	-12,5 %	Spanien	15 %
Irland	13 %	EU-Gesamt	-8,0 %

Tab. 8: Emissionen von CO₂, CH₄ und N₂O in der EU 1990 bzw. 1998 in Megatonnen CO₂-Äquivalenten (nach UBA, 2001a)

	1990 [Mt CO ₂ -Äquivalente]	1998	Vergleich 1998 zu 1990 [%]
CO₂ Netto-Emission ¹	3 105 794	3 128 880	0,6
CO₂-Emission ²	3 320 481	3 327 520	0,2
Methan (CH₄)	439 844	367 466	-16,5
Lachgas (N₂O)	398 652	359 561	-9,8
Gesamt ¹	3 944 290	3 850 906	-2,4
Gesamt ²	4 149 509	4 045 632	-2,5

¹ unter Berücksichtigung der CO₂-Bindung in Senken, z.B. Wäldern
² ohne Berücksichtigung von Änderungen der Flächennutzung (Waldfläche)

Im Vergleich zu Europa (Tabelle 8) war die erzielte **Emissionsminderung** in Deutschland zwischen 1990 und 1999 deutlicher und nähert sich den definierten Minderungszielen (s.o.) an, **Tabelle 9**. Die größten Veränderungen waren vor allem durch Umstrukturierungsprozesse in den neuen Bundesländern in Industrie und Landwirtschaft bedingt. Es ist davon auszugehen, dass weitere Emissionsminderungen weniger deutlich und weniger schnell zu erreichen sein werden, zumal vor allem in der Industrie viele Reduktionspotenziale nach bisherigem Stand der Technik bereits weitgehend ausgeschöpft sind. Weiterhin können Emissionsminderungen durch beispielsweise stark zunehmende transportbedingte Emissionen konterkariert werden (UBA, 2001a).

Tab. 9: Entwicklung der Emissionen von CO₂, CH₄ und N₂O und CO₂-Äquivalente in Deutschland von 1990 bis 1999 (nach UBA, 2001a)

	1990	1999 ¹	Vergleich 1999 ¹ zu 1990 [%]
	[kt]		
Kohlendioxid (CO₂)	1 014 500	858 511	-15,4
Methan (CH₄)	5 571	3 271	-41,3
Lachgas (N₂O)	214	141	-34,1
CO₂-Äquivalente²	1 206 761	982 384	-18,6

¹ vorläufige Berechnungsergebnisse; ² incl. H-FKW, CF₄, C₂F₆, C₃F₈, SF₆

Generell ist bei allen Emissionsinventaren zu beachten, dass immer noch größte Unsicherheiten bei der Abschätzung der Emissionen von Treibhausgasen bestehen, da das Wissen über die quellspezifischen Emissionen und Emissionsraten noch sehr unzureichend ist (FREIBAUER & KALTSCHMITT, 2001; WINIWARTER & RYPDAL, 2001).

2.2.1 Kohlendioxid

Die **atmosphärische CO₂-Konzentration** ist seit Beginn der Industrialisierung um etwa 30 % von 280 auf 367 ppmv gestiegen. Würden sich die globalen CO₂-Emissionen auf dem Niveau von 1994 stabilisieren, würde dies bei einem annähernd konstanten Konzentrationsanstieg zu einer atmosphärischen CO₂-Konzentration von etwa 500 ppmv am Ende des 21. Jahrhunderts führen (UBA, 2001a).

CO₂ ist das mengenmäßig wichtigste klimawirksame Gas und wird in Folge anthropogener Aktivitäten in Deutschland vor allem bei der Verbrennung fossiler Energieträger (z.B. Verkehr, Haushalte, Industrie, Heizwerke) emittiert, **Tabelle 10**. Die Landwirtschaft trägt hauptsächlich durch den direkten (Treibstoff u.a.) und indirekten (Dünger-, Futtermittel- und Maschinenherstellung) Verbrauch fossiler Energieträger zu den anthropogenen CO₂-Emissionen bei.

Tab. 10: CO₂-Emissionen nach Emittentengruppen in Deutschland (Stand Januar 2001) (geändert nach UBA, 2001a)

Einheit	1990		1995		1999 (vorläufige Angaben)	
	[Mt/a]	[%]	[Mt/a]	[%]	[Mt/a]	[%]
Insgesamt ^{1,2}	1014		904		859	
Industrieprozesse ³	28	2,9	27	2,9	26	3,0
Übriger Verkehr ⁴	22	2,2	18	2	17	2,0
Straßenverkehr	150	14,8	165	18,2	174	20,3
Haushalte	128	12,6	129	14,3	125	14,6
Kleinverbraucher ⁵	76	7,5	59	6,5	46	5,4
Industriefeuerungen ⁶	213	21	158	17,5	144	16,8
Kraft- und Fernheizwerke ⁷	397	39,2	349	38,6	326	38

¹ohne natürliche Quellen; ²aus Energieverbrauch und Industrieprozessen mit Klimarelevanz; ³ohne energiebedingte Emissionen; ⁴Land-, Forst- und Bauwirtschaft, Militär-, Schienen-, Küsten und Binnenschiffsverkehr, nationaler Luftverkehr; ⁵einschließlich militärische Dienststellen; ⁶übriger Umwandlungsbereich u.a.; ⁷bei Industriekraftwerken nur Stromerzeugung

Die **natürlichen CO₂-Quellen und -Senken** hingegen stehen in einem dynamischen und empfindlichen Gleichgewicht im globalen C-Kreislauf, so dass die **landwirtschaftliche Tierhaltung und Pflanzenproduktion** in Bezug auf den globalen C-Haushalt als weitgehend neutral angesehen werden kann und deshalb in Emissionsinventaren bisher nicht berücksichtigt wird (FREIBAUER & KALTSCHMITT, 2001; OENEMA et al., 2001). Das durch die Tiere veratmete CO₂ wurde vorher durch die verzehrten Pflanzen aus der Atmosphäre aufgenommen. Dies gilt strenggenommen aber nur, wenn bei der Erzeugung der Futtermittel keine fossilen Brennstoffe verwendet wurden (PELCHEN & PETERS, 1994).

Hinsichtlich der CO₂-Senken bestehen noch erhebliche Unsicherheiten. Wichtigste Senke ist der Ozean gefolgt von der CO₂ Aufnahme der Wälder. In der Biosphäre werden durch die Photosynthese Kohlenstoffmengen in der Größenordnung von 120 Mrd. t jährlich aus der Atmosphäre aufgenommen, durch mikrobielle Zersetzung aber auch wieder an diese abgegeben. Bei gleichbleibender Vegetation sind beide Mengen gleich groß, so dass im Mittel keine Veränderung des CO₂-Gehaltes der Atmosphäre eintritt. Die großflächige Zerstörung von Wäldern führt hingegen zu entsprechenden massiven CO₂-Emissionen; weiterhin wirken sich Landnutzungsänderungen oder ein veränderter Einsatz organischer Dünger auf den C-Kreislauf aus (OENEMA et al., 2001; FLESSA, 2002; UBA, 2100b; BEESE et al., 2002).

Im Bereich der **landwirtschaftlichen Tierhaltung** sind insbesondere die Atmung der Nutztiere und die mikrobielle Aktivität in den Tierexkrementen als CO₂-Quellen in

Betracht zu ziehen. HARTUNG, J. & PHILIPPS (1994) beziffern die CO₂-Emission aus der landwirtschaftlichen Nutztierhaltung der alten Bundesländer Deutschlands auf etwa 10 Mt pro Jahr, was etwa 0,05 % der geschätzten globalen CO₂-Emissionen von 20 Gt pro Jahr entspricht.

Die **Wirkungen von CO₂-Konzentrationen in der Stallluft auf Tier und Mensch** sind von größerer Relevanz als die Umwelteffekte durch die CO₂-Emissionen aus der Tierhaltung. Schon ab CO₂-Konzentrationen von 2000 bis 9000 ppm in der Stallluft können nach BUSSE (1993) respiratorische Erkrankungen auftreten. Zwei- bis fünffach höhere CO₂-Konzentrationen führen zu Beeinträchtigungen und Störungen beim Sehen, Atmen, der Motorik und im Blutkreislauf (siehe NI, 1998).

Die zulässige CO₂-Konzentration in Schweineställen soll nach bisherigen Empfehlungen bzw. Richtlinien 3000 bzw. 3500 ppm nicht überschreiten (SCHHAVO, 2000; BVET, 1998). Von verschiedenen Autoren werden jedoch geringere maximale Konzentrationen zwischen 3000 bis 1500 ppm empfohlen oder gefordert (in MAYER, 1999). Der MAK-Wert für CO₂ beträgt 5000 ppm (DFG, 1999). Nach DIN 18 910 (1992) wird der CO₂-Gehalt der Stallluft auch als Leitgröße für die Luftqualität herangezogen und die CO₂-Bilanz wird in die Berechnung der Winterluftrate bzw. Mindestluftrate mit einbezogen.

2.2.1.1 Bildung und Freisetzung

Die bedeutenden CO₂-Quellen in der Tierhaltung sind die Atmung sowie CO₂-Freisetzung infolge von Umsetzungsprozessen der Exkremente.

Für die oxidativen Prozesse des Stoffwechsels benötigt der Körper Sauerstoff (O₂), andererseits entsteht als Endprodukt des Stoffwechsels in den Geweben CO₂. Bei der Respiration gibt der Körper gasförmiges CO₂ nach mehreren Schritten der Umwandlung (Transportform) wieder an die atmosphärische Luft ab (WITKE & PFEIFFER, 1984). Die Expirationsluft von Schweinen enthält etwa 40.000 bis 50.000 ppm CO₂ und stellt somit eine bedeutende Quelle im Stall dar (MAYER, 1999).

Verschiedene **Modelle zur Kalkulation der CO₂-Produktion aus der Atmung** von Schweinen werden in der Literatur diskutiert (VAN'T KLOOSTER & HEITLAGER, 1994; VAN OUWERKERK & PEDERSEN, 1994; siehe NI, 1998; siehe NIEBAUM, 2001). Die Modelle unterscheiden sich vor allem in der Berücksichtigung, Anzahl und Gewichtung von verschiedenen Einflussfaktoren auf die vom Schwein ausgeatmete CO₂-Menge:

- Gewicht (ANDERSEN et al., 1987; MÜLLER & SCHNEIDER, 1985;);
- Gewicht, Futteraufnahme, Verdaulichkeit der Futtermittel, Höhe des Körper(kohlenstoff)ansatzes (KIRCHGESSNER et al., 1991b);

- Futtermittelaufnahme, Futtermittelqualität und –zusammensetzung, Respirationskoeffizient, Umsetzbarkeit der aufgenommenen Bruttoenergie, Effizienz der Ausnutzung der umsetzbaren Energie für Produktion und Leistung (FEDDES & DE SHAZER, 1998);
- Futtermittelaufnahme, Fett- und Proteinretention, verdauliche NfE-Fraktion, verdauliche Rohfaser, verdauliches Rohfett, verdauliches Rohprotein (VAN OUWERKERK & AARNINK, 1992);
- Metabolisches Körpergewicht, Futtermittelaufnahme, Umsetzbare Energie (VAN'T KLOOSTER & HEITLAGER, 1994);
- Gesamtwärmeproduktion (VAN'T KLOOSTER & HEITLAGER, 1994; PEDERSEN et al., 1998)
 - beeinflusst von Respirationskoeffizient, Gewicht, Futtermittelaufnahme, umsetzbare Energie des Futtermittels, Effizienz der Ausnutzung der umsetzbaren Energie für Produktion und Leistung;
- Tiergewicht, Gewichtsabschnitt, Ruhe- oder Aktivitätszustand der Tiere (NI, 1998);
- Gesamtwärmeproduktion, Respiratorischer Quotient, Futtermittelaufnahme, Temperatur, Aktivität (VAN OUWERKERK & PEDERSEN, 1994).

Der Respiratorische Quotient (RQ) bezeichnet das molare Verhältnis zwischen CO₂-Produktion und O₂-Aufnahme und spiegelt Art und Zusammensetzung des Futtermittels wieder, das oxidiert wird. Für Mastschweine beträgt der RQ, je nach Gewichtsabschnitt, bei geringer Fütterungsintensität etwa 0,98 bis 1,02 und bei hoher Fütterungsintensität 1,05 bis 1,14 (VAN OUWERKERK & PEDERSEN, 1994). In den Modellen wird zur Vereinfachung oft ein RQ = 1 für wachsende Schweine verwendet. Mit zunehmendem Alter und Leistungsstatus der Tiere erhöht sich auch die C-Retention im Körper, so dass relativ gesehen pro kg Futtermittel-Trockensubstanz weniger CO₂ ausgeatmet wird (KIRCHGESSNER et al., 1991b). Weiterführende Erläuterungen zur Berechnung der Gesamtwärmeproduktion sowie zu verschiedenen Einflussfaktoren auf die Wärmebilanz sind detailliert in CIGR (1999) und CIGR (2002) dargestellt.

Eine Zusammenstellung der Formeln der einzelnen Modelle zur Berechnung der tierspezifischen CO₂-Produktion von Schweinen geben NI (1998) und NIEBAUM (2001). Ein Vergleich der verschiedenen Modelle ergab nach NI (1998) jedoch noch deutliche Unterschiede in der errechneten CO₂-Abgabe bis zu einem Faktor vier. Die durchschnittliche tierspezifische CO₂-Produktion steigt nach den o.g. Modellen im Gewichtsabschnitt von 35 bis 105 kg meist linear an und beträgt je nach Modell zu Mastbeginn etwa (0,3) 0,8 bis 1,25 kg pro Tag bzw. zu Mastende zwischen (0,6) 1,5 bis 2,25 kg pro Tag. Die eingeklammerten sehr geringen Werte entsprechen der Modellrechnung nach ANDERSON et al. (1987), in der nur das Tiergewicht als alleiniger Einflussfaktor berücksichtigt wird (s.o.). Im Vergleich mit den anderen genannten Modellen (s.o.) ist zu vermuten, dass in der Modellrechnung nach ANDERSON et al. (1987) die tierspezifische CO₂-Abgabe deutlich unterschätzt wird.

Die ausgeatmete CO₂-Menge ist auf Grund der Vielzahl von Faktoren und deren Wechselbeziehungen untereinander entsprechend schwer abzuschätzen. Hinzu kommt, dass bisher in den meisten Modellen die täglichen Schwankungen durch die Tieraktivität nicht ausreichend berücksichtigt wurde.

Die **Tieraktivität** ist ein Hauptfaktor für die Variation der metabolischen Umsatzrate zu unterschiedlichen Tageszeiten. Nach HALTER et al. (1980) werden, beispielsweise je nach Fütterungsregime, ca. 10-28 % des Gesamtenergiebedarfs von Ferkeln für ihre Aktivität benötigt. Das tägliche Aktivitätsmuster wird im wesentlichen von den Fütterungs-, Trink- und Ruhezeiten bestimmt. Um die Genauigkeit der CO₂-Bilanzierung zu verbessern, werden von VAN OUWERKERK & PEDERSEN (1994) Korrekturgleichungen für Schweine dargestellt, die in Abhängigkeit von der Aktivitätsmessung (Echtzeit ja/nein) verwendet werden können. Demnach unterscheidet sich bei Berücksichtigung der Aktivität die CO₂-Produktion vom statischen Tagesdurchschnitt (Modellrechnung und indirekte Messung) um etwa minus 10 % in Ruhephasen und plus 18 % in Aktivitätsphasen. VAN'T KLOOSTER & HEITLAGER (1994) errechneten in Abhängigkeit von der Tieraktivität bei Schweinen einen Verhältnisfaktor von aktueller CO₂-Produktionsrate zum Tagesdurchschnitt zwischen etwa 0,8 und 1,3. PEDERSEN & ROM (1998) fanden im Mittel ein Tag/Nacht-Verhältnis der Tieraktivität von 0,68 und der CO₂- sowie Wärmeproduktion von jeweils 0,8. Etwa 55 % der CO₂-Variation im Tagesverlauf konnte durch die Tieraktivität erklärt werden.

Über das Ausmaß der **CO₂-Bildung und -Freisetzung aus den Exkrementen** besteht noch einige Unsicherheit. CO₂ entsteht neben NH₃ zum einen bei der hydrolytischen Harnstoffspaltung (Ammonifizierung) (vgl. Kap. 2.1.1) im molaren Verhältnis von 1:2. Zum anderen ist der anaerobe Abbau organischer Substanz im Flüssigmist von Bedeutung, bei dem polymere organische Stoffe (Zellulose, Stärke, Eiweiße, Fette etc.) in niedermolekulare Verbindungen und zu CO₂ und H₂ umgewandelt werden. Schließlich entsteht CO₂ neben CH₄ bei der Methanogenese der niedermolekularen Verbindungen (kurzkettigen organischen Säuren) wie z.B. Acetat (CLEMENS & AHLGRIMM, 2001) (vgl. Kap. 2.2.2.1). Anaerobe Bedingungen liegen üblicherweise bei der offenen Flüssigmistlagerung nur lokal im Inneren der Lagerstätte vor. Das dort u.a. gebildete CH₄ diffundiert nach außen, wo es in den größtenteils aeroben Randbereichen wieder zu CO₂ oxidiert wird (BROSE, 2000).

Der Anteil der CO₂-Emission aus den Exkrementen an der Gesamtemission wird im allgemeinen als eher gering eingeschätzt mit ca. 4 % (VAN'T KLOOSTER & HEITLAGER, 1994; VAN OUWERKERK & PEDERSEN, 1994;), 0-4 % (AARNINK et al, 1992) bis zu 8,5 % (CURTIS, 1983), wobei nach NI (1998) diese Abschätzungen nicht mit direkten Messungen an Schweineställen verglichen wurden. Im Rahmen verschiedener eigener Messungen in Schweineställen fand NI (NI et al., 1996; NI, 1998; NI et al. 2000) stark

abweichende Werte in der Größenordnung von ca. 25 bis 45 % Anteil aus den Exkrementen an der CO₂-Gesamtemission. Messungen in unbelegten Schweineställen ergaben in Abhängigkeit von Luftrate und Beheizung CO₂-Emissionen in Höhe von 0,5 bis 7 kg pro Stunde (Ni, 1998; Ni et al., 2000) die auf die CO₂-Freisetzung aus dem Flüssigmistlager zurückgeführt werden. Als Kalkulationsgröße beträgt die CO₂-Emission aus dem Flüssigmist im Durchschnitt 48 % der CO₂-Emission, die durch die Atmung der Tiere bedingt ist (Ni, 1998). Die CO₂-Freisetzung aus den Exkrementen unterliegt im wesentlichen den grundlegenden physikalischen Gesetzmäßigkeiten zum konvektiven Stoffübergang von einer flüssigen in die gasförmige Phase (vgl. Kap. 2.1.1).

2.2.1.2 Einflussfaktoren und Verminderungsstrategien

Da die CO₂-Emissionen aus der Tierhaltung bisher als weitgehend neutral für den C-Kreislauf angesehen werden, wird ihnen im Gegensatz zum NH₃ derzeit noch eine geringe umweltpolitische Bedeutung beigemessen (vgl. Kap. 2.2.1). Bisherige Empfehlungen zur Reduktion von CO₂-Emissionen aus der Landwirtschaft beziehen sich vornehmlich auf Maßnahmen im Bereich der Landnutzung (AHLGRIMM, 1998; OENEMA et al., 2001).

Demzufolge war die gezielte Entwicklung und Überprüfung von technischen **Verminderungsstrategien** in Hinblick auf die CO₂-Emissionen aus der Tierhaltung bisher nicht Gegenstand von Untersuchungen, so dass keine Reduktionspotenziale beziffert werden können. Aus der Darstellung der wesentlichen Zusammenhänge bei der CO₂-Bildung und Freisetzung aus der Tierhaltung (vgl. Kap. 2.2.1.1) ergibt sich eine vereinfachte Zusammenfassung von **Einflussfaktoren** auf die CO₂-Emission, die als Ansatzpunkte für mögliche Minderungsstrategien genutzt werden können.

Die CO₂-Bildung bei der Atmung wird direkt oder indirekt durch folgende Faktoren mitbestimmt:

- (metabolisches) Tiergewicht und Produktionsstatus;
- Respiratorischer Quotient;
- Wärmeproduktion;
- Futteraufnahme, Futterzusammensetzung und –qualität;
- Brutto- und Nettoenergie, umsetzbare Energie, Verdaulichkeit des Futters;
- Nährstoffretention;
- Temperatur;
- Tieraktivität.

Eine Beeinflussung der tierspezifischen CO₂-Produktion ist in gewissem Umfang über fütterungstechnische Maßnahmen denkbar, aber bisher nicht im Praxismaßstab untersucht worden.

Für die CO₂-Bildung und Freisetzung aus den Exkrementen sind die Faktoren relevant, die auch das Ausmaß der NH₃-Bildung (vgl. Kap. 2.1.1) sowie die anaerobe Abbaukette polymerer organischer Stoffe über die Stufen der Hydrolyse, Fermentation und Methanogenese (vgl. Kap. 2.2.2.1) beeinflussen und die Gasfreisetzung begünstigen:

- N-Gehalt und Qualität im Futter, N-Retention, N-Ausscheidung;
- Harnstoffkonzentration und Ureaseaktivität;
- pH-Wert;
- Temperatur;
- Partialdruckdifferenz;
- Größe der Grenzfläche;
- Luftströmung und -geschwindigkeit an der Grenzfläche;
- NH₃-Nachlieferungspotenzial der Emissionsquelle;
- Anaerobe Bedingungen;
- Abbaubarkeit der organischen Substanz;
- Vorhandensein acetogener und methanogener Bakterien.

Untersuchungen von NI (1998) zu Folge steht die CO₂-Freisetzung aus den Exkrementen mit den Faktoren Flüssigmistproduktionsrate, Tiergewicht, Flüssigmisttemperatur und Volumenstrom jeweils in positivem Zusammenhang. Die Beziehungen zwischen der NH₃ und CO₂-Emission (vor allem aus den Exkrementen) werden in NI (1998) eingehend dargestellt und ebenso von KAISER (1999) und NIEBAUM (2001) durch eine hohe Korrelation der NH₃- und CO₂-Emissionen aus Flüssigmistsystemen sowie von BRUNSCH et al. (1995) durch eine hohe Korrelation von NH₃ und CO₂-Konzentrationen beschrieben.

2.2.1.3 Innenraumkonzentrationen und Emissionen

In **Tabelle 11** und **Tabelle 12** sind beispielhaft Ergebnisse zu mittleren CO₂-Konzentrationen und Emissionen unterschiedlicher Haltungssysteme für Mastschweine mit Flüssigmist zusammengestellt. Das Interesse an Daten zu CO₂-Emissionen aus Schweineställen hat sich erst in den letzten Jahren entwickelt, so dass die Datenbasis, speziell für frei belüftete Haltungssysteme, noch recht gering ist. Die Erfassung von CO₂-Konzentrationen als Stallklimaparameter und Indikator für die Luftqualität sowie als Bilanzierungsgröße hatte bisher eine größere Bedeutung.

Tab. 11: Beispiele für mittlere CO₂-Konzentrationen und -Emissionen bei verschiedenen Rahmenbedingungen zwangsbelüfteter Haltungssysteme mit Flüssigmist für Mastschweine (kursive Werte zum Vergleich umgerechnet mit der Annahme: 1 Tierplatz entspricht 0,12 GV)

Haltungssystem	Konzentrationsbestimmung ^A	Volumenstrombestimmung ^A	Temperatur [°C]	Volumenstrom	CO ₂ -Konzentration	CO ₂ -Emission	Anzahl Messtage/ Messzeitraum	Quelle
Vollspalten	PAS-Multigasmonitor	Messventilator	k. A.	k. A.	k. A.	1,4-1,6 kg d ⁻¹ Tier ⁻¹ 11,6-13,3 kg d ⁻¹ GV ⁻¹	4 Mastdurchgänge mit jeweils etwa 90 Messtagen	KAISER (1999)
Vollspalten	IR-PAS CO ₂ -Monitor	Messventilator & Druckdifferenz	20	24,5 m ³ h ⁻¹ Tier ⁻¹ 204 m ³ h ⁻¹ GV ⁻¹	3189 ppm ^B	k. A.	44 Stunden; Stall 1 (März-April)	Ni et al. (2000)
			20	17,5 m ³ h ⁻¹ Tier ⁻¹ 146 m ³ h ⁻¹ GV ⁻¹	3131 ppm ^B	k. A.	44 Stunden; Stall 2 (März-April)	
Vollspalten	IR-Absorption	Messventilator	k. A.	111-780 m ³ h ⁻¹ GV ⁻¹	k. A.	1-3 kg d ⁻¹ Tier ⁻¹ 8,3-25 kg d ⁻¹ GV ⁻¹	1 Jahr (3 Mastdurchgänge) an 5 unterschiedlichen Ställen	HAHNE et al. (1999)
Teilspalten	NDIR-Spektroskopie	Messventilator	16	421 m ³ h ⁻¹ GV ⁻¹	ca. 2000 ppm ^C	1,2-3,6 kg d ⁻¹ Tier ^{-1C} 10-30 kg d ⁻¹ GV ^{-1C}	171 Tage (August-Februar)	Ni (1998)
Teilspalten	PAS-Multigasmonitor	Messventilator	19 ^D	537 m ³ h ⁻¹ GV ⁻¹	1156 Max 2610 ppm ^E	26 kg d ⁻¹ GV ⁻¹	75 Tage; Februar-Juni (Frühjahr)	RATHMER (2002)
			22 ^D	498 m ³ h ⁻¹ GV ⁻¹	957 Max 1539 ppm ^E	31 kg d ⁻¹ GV ⁻¹	105 Tage; Juni-Oktober (Sommer)	
			18 ^D	265 m ³ h ⁻¹ GV ⁻¹	2223 Max 4228 ppm ^E	25 kg d ⁻¹ GV ⁻¹	106 Tage; November-März (Winter)	
Teilspalten	PAS-Multigasmonitor	Messventilator	19,5-20,5	16-23 m ³ h ⁻¹ Tier ^{-1C} 133-192 m ³ h ⁻¹ GV ⁻¹	i.d.R. < 3000 ppm	15 kg d ⁻¹ GV ⁻¹	6 Tage; Winter (Januar)	HINZ & LINKE (1998)
Teilspalten	NDIR-Spektroskopie	---	k. A.	Raumkonzentration im Winter: ca. 1500 bis 2000 ppm ^C Raumkonzentration im Sommer: ca. 500 bis 1000 ppm ^C			an 5 beispielhaften Tagen	MAYER, 1999
Vollspalten	NDIR-Spektroskopie	---	k. A.	Raumkonzentration im Winter: ca. 1500 bis 3200 ppm ^C Raumkonzentration im Sommer: ca. 700 bis 1200 ppm ^C			an 5 beispielhaften Tagen	MAYER, 1999

^A vgl. Kapitel 2.4; ^B Abluftkonzentration; ^C Werte aus Grafik entnommen, ^D Ablufttemperatur; ^E Konzentrationsdifferenz zwischen Abluft und Zuluft

Tab. 12: Beispiele für mittlere CO₂-Konzentrationen und -Emissionen bei verschiedenen Rahmenbedingungen freibelüfteter Haltungssysteme für Mastschweine mit Flüssigmist (kursive Werte zum Vergleich umgerechnet mit der Annahme: 1 Tierplatz entspricht 0,12 GV; 1 ppm CO₂ entspricht 1,8 mg/m³)

Haltungssystem	Konzentrationsbestimmung ^A	Volumenstrombestimmung ^A	Temperatur [°C]	Volumenstrom	CO ₂ -Konzentration	CO ₂ -Emission	Anzahl Messtage/ Messzeitraum	Quelle
Außenklimastall, Nürtinger System, Offenfirst	PAS Multigasmonitor	Tracergas, kontinuierliche Injektion	k. A.	627 m ³ h ⁻¹ GV ⁻¹	1185 mg/m ³ ^B 658 ppm	17 kg d ⁻¹ GV ⁻¹	6 Tage; Sommer	NIEBAUM (2001)
			k. A.	345 m ³ h ⁻¹ GV ⁻¹	2095 mg/m ³ ^B 1163 ppm	14 kg d ⁻¹ GV ⁻¹	9 Tage; Winter	
Außenklimastall, Nürtinger System, Schachtlüftung	PAS Multigasmonitor	Tracergas, kontinuierliche Injektion	k. A.	502 m ³ h ⁻¹ GV ⁻¹	1395 mg/m ³ ^B 775 ppm	16 kg d ⁻¹ GV ⁻¹	11 Tage; Sommer	NIEBAUM (2001)
			k. A.	407 m ³ h ⁻¹ GV ⁻¹	1919 mg/m ³ ^B 1066 ppm	17 kg d ⁻¹ GV ⁻¹	12 Tage; Winter	
Außenklimastall mit Ruheboxen und Teilspaltenboden	PAS Multigasmonitor	Kapselung; Messventilator	13 ^C	675 m ³ h ⁻¹ GV ⁻¹	313 ppm ^D	10 kg d ⁻¹ GV ⁻¹	66 Tage; Frühjahr (Februar-Juni)	RATHMER (2002)
			18 ^C	763 m ³ h ⁻¹ GV ⁻¹	345 ppm ^D	12 kg d ⁻¹ GV ⁻¹	119 Tage; Sommer (Juni-Oktober)	
			6 ^C	403 m ³ h ⁻¹ GV ⁻¹	555 ppm ^D	9 kg d ⁻¹ GV ⁻¹	109 Tage; Winter (November-März)	
Außenklimastall, Trauf-First-Lüftung	Gasdetektor	---	25-30	k.A.	300-1500 ppm	k. A.	90 Tage, Sommer (Juni-September)	CHIUMENTI et al. (1989)
Kistenstall, Offenfront	NDIR-Spektroskopie	k. A.		Konzentration Aktivitätsbereich: ca. 300 bis 500 ppm ^E Konzentration Ruheboxe: ca. 1000 bis 3000 ppm ^E Konzentration Futterautomat: kurzzeitig bis ca. 1200 ppm ^E			an 5 beispielhaften Tagen, Winter	MAYER, 1999

^A vgl. Kapitel 2.4; ^B Abluftkonzentration; ^C Ablufttemperatur; ^D Konzentrationsdifferenz zwischen Abluft und Zuluft, ^E Werte aus Grafik entnommen

Die mittleren **CO₂-Konzentrationen** liegen in der Regel unterhalb von 3500 ppm und sind umgekehrt proportional zum Volumenstrom (Tabelle 11, Tabelle 12), der wiederum vor allem in zwangsbelüfteten Ställen temperaturbedingt im Winter geringer ist als im Sommer (vgl. Kap. 2.1.2). In zwangsbelüfteten Ställen kann unter Winterbedingungen die geringe Luftaustauschrate zu Grenzwertüberschreitungen der CO₂-Innerraumkonzentration führen. In frei belüfteten Ställen ist die mittlere CO₂-Konzentration tendenziell geringer als in zwangsbelüfteten Ställen, was auch im Zusammenhang mit oftmals höheren mittleren Volumenströmen gesehen werden muss (Tabelle 12). Zur Einordnung der von RATHMER (2002) genannten Konzentrationsdifferenz zwischen Abluft und Zuluft, muss zur Beurteilung der vermutlichen Raumkonzentration die atmosphärische CO₂-Hintergrundkonzentration zu den angegebenen Werten addiert werden. Diese beträgt in der Umgebung von Ställen etwa 350 bis 450 ppm (CHILDERS et al., 2001; PEDERSEN et al., 1998). MAYER (1999) zeigt für einen Außenklimastall mit Ruhekisten, dass sich die CO₂-Konzentration im Aktivitätsbereich oft kaum von der atmosphärischen Hintergrundkonzentration unterscheidet. In den Ruhekisten sowie in der Nähe der Futterautomaten ist die höhere CO₂-Konzentration ein Indiz für die Belegungszeit und Belegungsintensität (Tabelle 12).

Die in den Tabelle 11 und Tabelle 12 zitierten **CO₂-Emissionswerte** sind als Summe aus der tierspezifischen CO₂-Produktion und der CO₂-Freisetzung aus den Exkrementen zu verstehen (vgl. Kap. 2.2.1.1). Anhand der zitierten Werte ergibt sich für zwangsbelüftete Ställe auf Flüssigmist eine Spannweite der mittleren CO₂-Emission von 8 bis 30 kg d⁻¹ GV⁻¹ (Tabelle 11) und für frei belüftete Ställe in der Größenordnung von 9 bis 17 kg d⁻¹ GV⁻¹ (Tabelle 12). Zur Abschätzung eines auf ein Jahr und Tier bezogenen **Emissionsfaktors** werden zur Umrechnung 330 Stalltage pro Jahr und 0,12 GV pro Tier angenommen. Es errechnet sich ein Emissionsfaktor von etwa 316 bis 1188 kg a⁻¹ Tier⁻¹ für Haltungssysteme mit Zwangslüftung und für Ställe mit freier Lüftung von ungefähr 356 bis 673 kg a⁻¹ Tier⁻¹.

Die meisten Autoren gehen nicht auf den jeweiligen prozentualen Anteil der Tiere und Exkremente an der Gesamtemission ein. Zur groben Abschätzung des Anteils der **tierspezifischen CO₂-Produktion** an den zitierten Emissionswerten (Tabelle 11, Tabelle 12) dient folgende Vergleichsgröße: Die mittlere tierspezifische CO₂-Produktion liegt je nach Schätzmodell bei einem Tiergewicht von 60 kg (entsprechend 0,12 GV) etwa in einem Bereich zwischen 1 und 1,5 kg d⁻¹ Tier⁻¹ (in NI, 1998, vgl. Kap. 2.2.1.1) bzw. auf Großvieheinheiten bezogen 8 und 16 kg d⁻¹ GV⁻¹.

Kaiser (1999) ermittelt im Rahmen einer C-Bilanz für einen Vollspaltenstall einen **Anteil der Exkremente** an der CO₂-Gesamtemission von durchschnittlich 14 % und eine Schwankungsbreite aus vier Versuchen von 5 bis 18 %. RATHMER (2002) leitet

in Anlehnung an die Untersuchungen von NI (1998) (vgl. Kap 2.2.1.1) für die eigenen Ergebnisse ab, dass der Anteil der CO₂-Freisetzung aus den Exkrementen an der Gesamtemission von Haltungssystem und Messzeitraum beeinflusst wird, und vermutlich im Teilspaltenstall höher als im Außenklimastall war, sowie durch höhere Temperaturen in warmen Jahreszeiten begünstigt wurde. DONHAM et al. (1988) beschreiben für eine Sommer-Mastperiode eine bis um das 7-fache höhere CO₂-Produktion aus den Exkrementen im Vergleich zu einer Winter-Mastperiode.

Generell ist in Übereinstimmung mit Schätzmodellen zur tierspezifischen CO₂-Produktion (vgl. Kap. 2.2.1.1) ein allmählicher, weitgehend linearer Anstieg, der CO₂-Emission mit zunehmenden Tiergewichten bzw. der Mastdauer zu verzeichnen (KAISER, 1999; NI, 1998; RATHMER, 2002).

Die Tieraktivität, die, wie bereits beschrieben, deutlichen tageszeitlichen und ereignisbezogenen Schwankungen unterliegt, beeinflusst direkt den **Tagesverlauf** der CO₂-Konzentration und -Emission (z.B.: COMBERG & WOLFERMANN; 1964; HAHNE ET AL, 1999; HINZ & LINKE, 1998; KAISER, 1999; MAYER, 1999; NI, 1998). Dabei wirken sich mit der Tieraktivität verbundene Änderungen der Temperatur und Luftrate zusätzlich indirekt auf den Verlauf der Konzentration und Emission aus.

2.2.2 Methan

Die **CH₄-Konzentration in der Atmosphäre** ist seit Beginn der Industrialisierung um etwa 145 % auf ca. 1800 ppbv gestiegen. Die Stabilisierung der CH₄-Konzentrationen auf dem heutigen Niveau würde eine Reduktion der globalen anthropogenen CH₄-Emissionen um 8 % voraussetzen (UBA, 2001b).

In der Natur steht CH₄ durch **Bildungs- und Abbauprozesse** in einem dynamischen Gleichgewicht, d.h. es wird durch den anaeroben Abbau organischer Substanz gebildet und gleichzeitig durch Oxidationsvorgänge abgebaut. Die größten Methanmengen natürlichen Ursprungs stammen aus Feuchtgebieten (Sumpfgas). Die wesentlichen globalen **anthropogenen Quellen** sind Reisanbau, Viehhaltung, Erdöl- bzw. Erdgasförderung und -Verteilung, Bergbau und Deponien. Die wichtigste Abbaureaktion von Methan stellt die Umsetzung mit photochemisch in der Atmosphäre gebildeten OH-Radikalen zu CO₂ und H₂O dar (UBA, 2001b). Weiterhin können gut belüftete Acker- und Grünlandböden als Senke durch die Oxidationsleistung methanotropher Bakterien fungieren (FLESSA, 2002).

Global betrachtet, beträgt der Anteil der **Landwirtschaft** etwa 40 % an den CH₄-Gesamtemissionen und ca. 55 % an den anthropogenen CH₄-Emissionen. Weiterhin sind der Reisanbau und die Biomassenverbrennung zusammengenommen von gleich hoher Bedeutung wie die Tierhaltung (OENEMA et al., 2001). In der europäischen Landwirtschaft haben die CH₄-Emissionen aus der **Tierhaltung** mit einem Anteil von etwa 30 bis 50 % an den CH₄-Gesamtemissionen die größte Bedeutung und entstehen zum einen zu etwa 75 % direkt durch den tierischen Stoffwechsel, und zum anderen etwa zu 25 % bei dem anaeroben mikrobiellen Abbau organischer Substanz der Exkremente (VAN'T KLOOSTER, 2001). In Deutschland sind die wichtigsten CH₄-Emittentengruppen die Landwirtschaft, die Abfallwirtschaft und die Gewinnung und Verteilung von Brennstoffen, **Tabelle 13**. Die Menge der deutschen CH₄-Emissionen allein aus der Tierhaltung wird für das Jahr 1999 auf etwa 1240 kt/a geschätzt (DÄMMGEN & LÜTTICH, 2002).

Tab. 13: CH₄-Emissionen nach Emittentengruppen in Deutschland (Stand Januar 2001) (geändert nach UBA, 2001a)

Einheit	1990		1995		1999 (vorläufige Angaben)	
	[kt/a]	[%]	[kt/a]	[%]	[kt/a]	[%]
Insgesamt¹	5571		3894		3271	
Abfallwirtschaft²	1894	34	1029	26,4	794	24,3
Landwirtschaft³	1902	34,1	1559	40	1468	44,9
Industrieprozesse⁴	13	0,2	5	0,1	5	0,1
Gew. u. Vert. von Brennstoffen⁵	1548	27,8	1192	30,6	923	28,2
Übriger Verkehr⁶	3	0,1	2	0,1	2	0,1
Straßenverkehr	63	1,1	29	0,7	19	0,6
Haushalte	119	2,1	59	1,5	44	1,3
Kleinverbraucher⁷	8	0,1	5	0,1	4	0,1
Industriefeuerungen⁸	12	0,2	8	0,2	7	0,2
Kraft- und Fernheizwerke⁹	8	0,1	7	0,2	6	0,2

¹ohne natürliche Quellen; ²Deponien, Abwasserbehandlung, Klärschlammverwertung; ³Fermentation, tierische Abfälle, Klärschlammausbringung; ⁴ohne energiebedingte Emissionen; ⁵Bergbau, lokale Gasverteilungsnetze, Erdöl- und Erdgasförderung; ⁶Land-, Forst- und Bauwirtschaft, Militär-, Schienen-, Küsten- und Binnenschiffsverkehr, nationaler Luftverkehr; ⁷einschließlich militärische Dienststellen; ⁸übriger Umwandlungsbereich u.a.; ⁹bei Industriekraftwerken nur Stromerzeugung

Innerhalb der landwirtschaftlichen Tierhaltung muss hinsichtlich der **stoffwechselbedingten tierspezifischen CH₄-Produktion** zwischen Wiederkäuern (Pansenfermentation) und Monogastriern (Dickdarm-Fermentation) unterschieden werden. Wiederkäuer sind durch ihre besonders angepasste Verdauungsanatomie und Physiologie auf die mikrobielle Fermentation pflanzlicher Gerüstsubstanzen

spezialisiert und stellen somit die größten CH₄-Produzenten unter den landwirtschaftlichen Nutztieren dar (ROTH & WINDISCH, 2001). Bei Schweinen als Monogastriern beträgt die CH₄-Freisetzung pro kg Futter-TS nur etwa 5 % bis 10 % der von Wiederkäuern pro kg Futter-TS gebildeten CH₄-Menge (ROTH & WINDISCH, 2001). Demzufolge beträgt der Anteil der Schweine an den stoffwechselbedingten CH₄-Emissionen von landwirtschaftlichen Nutztieren in Deutschland oder den Niederlanden nur etwa bei 3,4 % bzw. 5 % im Gegensatz zu über 90 % für Milchkühe und Rinder (NIEBAUM, 2001).

Die wesentliche Quelle für die CH₄-Freisetzung im Bereich der Schweinehaltung stellen die **Exkreme** dar. Die Quantifizierung dieser CH₄-Quelle ist jedoch mit großen Unsicherheiten behaftet, zumal unterschiedliche CH₄-Bildungsraten verschiedener Mistarten zu berücksichtigen sind. In der landwirtschaftlichen Tierhaltung haben die Exkreme von Schweinen knapp 40 % Anteil an den CH₄-Emissionen aus den Exkrementen landwirtschaftlicher Nutztiere (HILHORST et al., 2001; VAN DEN WEGHE, 1995).

Über die **Wirkungen von CH₄-Konzentrationen in der Stallluft auf Tier und Mensch** bzw. die Berücksichtigung von CH₄ als Stallklimafaktor ist derzeit aus der Literatur wenig bekannt.

2.2.2.1 Bildung und Freisetzung

Für die CH₄-Emissionen aus der Schweinehaltung ist zwischen der CH₄-Bildung und Freisetzung aus dem Stoffwechsel der Tiere und der aus den Exkrementen zu unterscheiden. Im Grunde jedoch unterliegt die CH₄-Bildung bei beiden Quellen demselben Prozess, der **anaeroben Abbaukette von organischer Substanz** zu CH₄. Polymere organische Stoffe werden in den drei Stufen der Hydrolyse, der Fermentation und Acetogenese von einer komplexen anaeroben Mikrobengemeinschaft im Wesentlichen zu CO₂, H₂ und kurzkettigen Karbonsäuren abgebaut, aus denen im abschließenden Schritt der Methanogenese CH₄ gebildet wird (FINGER, 1999).

Schweine als Monogastrier sind prinzipiell in geringem Umfang in der Lage, im Dick- und Blinddarm Futterstoffe mikrobiell abzubauen. Die CH₄-Bildung ist jedoch limitiert, da bei gebräuchlichen Futterrationen für Schweine die Menge methanogener Substrate, die der enzymatischen Verdauung entgehen und in den Dickdarm gelangen, im Vergleich zur TS-Aufnahme sehr gering ist (ROTH & WINDISCH, 2001).

Der Zusammenhang zwischen dem Gesamtenergiegehalt des aufgenommenen Futters und dem Energieverlust durch die Methanbildung wird als CH₄-Umwandlungsfaktor bezeichnet. Für Schweine werden mittlere CH₄-Umwandlungsfaktoren von 0,6 % (HEYER, 1994) bzw. 0,4 %-0,9 % (CRUTZEN et al., 1986) angenommen

(zum Vergleich: Rinder 2,5 % bis 10 %). Der CH₄-Umwandlungsfaktor, d.h. der Energieverlust durch die CH₄-Bildung, steigt mit einer Verschlechterung des Ernährungszustandes der Tiere sowie abnehmender Futterqualität und kann bei Schweinen bis zu 1 %-2 % betragen (CRUTZEN et al., 1986). Generell ist die CH₄-Bildung im Wesentlichen von dem (metabolischen) Tiergewicht und Produktionsstatus, der Futteraufnahme sowie der Futterverdaulichkeit abhängig, so dass diese Faktoren in Modellen zur stoffwechselbedingten CH₄-Emission von Schweinen Berücksichtigung finden (AHLGRIMM et al., 2000; CIGR 1994; KIRCHGESSNER et al. 1991b; MONTENY et al., 2001). Insgesamt führen eiweiß- und fettreiche Futtermittel zu geringeren CH₄-Bildungsraten als kohlenhydrat- und cellulosereiche Futterrationen mit einem hohen Anteil bakteriell fermentierbarer Substanzen (BFS) (KIRCHGESSNER et al., 1991b). Der Anteil des vom Schwein selbst freigesetzten CH₄ ist zwar gering, sollte jedoch bei Emissionsbilanzen nicht vernachlässigt werden, da er nach CRUTZEN et al. (1986) absolut bis zu 1,5 kg pro Jahr oder nach AHLGRIMM & BREFORD (1998) zwischen 4 bis 8 L CH₄ pro Tag betragen kann.

Die wesentliche CH₄-Quelle in der Schweinehaltung sind die im Innenraum zwischengelagerten **Exkremete** vor allem wegen der Menge sowie des hohen Gehaltes an organischer Substanz (10-23 %) und den vorhandenen anaeroben Mikroorganismen (VAN DEN WEGHE, 1995). Die CH₄-Bildung in den Exkrementen weist Ähnlichkeiten mit den Bildungsprozessen von CH₄ im Tier auf. Die wesentlichste Ähnlichkeit besteht darin, dass die gleichen Bakterien für die Methanproduktion verantwortlich sind. Unterschiede ergeben sich bezüglich der Temperatur (Innenraumtemperatur im Gegensatz zur Körpertemperatur der Tiere), der Homogenität des Substrates (Lagerung: inhomogene Mischung, Verdauungssystem: homogene Mischung) sowie der Art und Verfügbarkeit und des Abbaugrades der Kohlenhydrate (HARTUNG, E. & MONTENY, 2000; MONTENY et al., 2001).

Exkremete von Tieren, die mit energiereichem Futter versorgt werden, enthalten einen größeren Anteil leicht abbaubarer organischer Substanz, die zu einer höheren CH₄-Bildung führt. Die Höhe der CH₄-Emission bei der Lagerung der Exkremete wird zudem positiv von der Lagerzeit, der Temperatur (über 3 °C), dem pH-Wert (zwischen 6-8), einem günstigen C/N-Verhältnis (zwischen 10-16) sowie einem Wassergehalt von über 50 % beeinflusst (HARTUNG, E., 2001b). Bis zu einer Temperatur von 20 °C wird die CH₄-Bildung positiv von der Wachstumsrate der methanogenen Bakterien beeinflusst (Langzeiteffekt) sowie von der CH₄-Bildungsrate in der Lösung (thermodynamischer Effekt) bestimmt (HILHORST et al., 2001). Das Optimum der CH₄-Produktion liegt bei pH 7. In verschiedenen Messungen wurde beobachtet, dass ein pH-Wert von z.B. 6,5 oder 8,3 bereits zu einer Halbierung der CH₄-Emission führte (siehe HILHORST et al., 2001).

Eine Beeinträchtigung der Methanproduktion kann durch Hemmstoffe (z.B. NH_3) bzw. auf die Methanbakterien toxisch wirkende Stoffe (z.B. H_2S) (HARTUNG, E. & MONTENY, 2000) sowie durch gebundenen Sauerstoff z.B. in Nitrat (NO_3) (CLEMENS et al., 2001; VAN DEN WEGHE, 1995) verursacht werden. Wichtigste Voraussetzung für die CH_4 -Bildung sind die Abwesenheit von Sauerstoff, absolute Dunkelheit und ein Redoxpotenzial von -300 mV (HARTUNG, E., 2001b). Nach CLEMENS et al. (2001) ist Flüssigmist ohne Schwimmschicht als anaerob zu betrachten. Nur in den ersten Millimetern des Flüssigmistes ist Sauerstoff in geringen Mengen nachweisbar. Für die Bildung von CH_4 herrschen somit optimale Redoxbedingungen vor.

Zur Berücksichtigung des Einflusses der Entmistungs- und Lagerbedingungen werden gemäß des Angebotes an Sauerstoff als limitierender Faktor unterschiedliche Methankonversionsfaktoren verwendet. Diese geben vereinfacht an, welcher Anteil vom Methanbildungspotential bei einem bestimmten Mistlager oder Mistmanagementsystem sowie verschiedenen Klimabedingungen tatsächlich als Methan emittiert wird (AHLGRIMM & BREFORD, 1998). Für Flüssigmistsysteme der Schweinehaltung mit Innenlagerung der Exkrementen oder offenen Flüssigmistlagern werden verschiedene Methankonversionsfaktoren zwischen 5-20 % genannt (AHLGRIMM & BREFORD, 1998; UBA, 2001b; VAN DEN WEGHE, 1995).

Die CH_4 -Freisetzung aus den Exkrementen erfolgt diffusiv und konvektiv. Blasen auf Gülleoberflächen sind nach CLEMENS et al. (2001) Zeichen des konvektiven Transports. Die CH_4 -Freisetzung folgt prinzipiell den Gesetzmäßigkeiten zum konvektiven Stoffübergang von einer flüssigen in die gasförmige Phase (vgl. Kap. 2.1.1).

Die Höhe der CH_4 -Emission aus einem Haltungssystem als Ergebnis der stoffwechselbedingten CH_4 -Freisetzung und aus den Exkrementen wird zusammengefasst im Wesentlichen von folgenden **Einflussfaktoren** bestimmt:

- (metabolisches) Körpergewicht, tägliche Zunahme, Produktionsstatus;
- Futteraufnahme, -zusammensetzung, -verdaulichkeit (Anteil bakteriell fermentierbarer Substanz);
- Anteil leicht abbaubarer organischer Substanz in den Exkrementen;
- Lagerzeit;
- Abwesenheit von Sauerstoff;
- Temperatur;
- pH-Wert;
- C/N-Verhältnis;
- Wassergehalt;
- Anwesenheit von Hemmstoffen (z.B. Sulfat, Nitrat, Ammoniak).

2.2.2.2 Einflussfaktoren und Verminderungsstrategien

Die Kenntnis und das Verständnis der CH₄-Bildung- und -Freisetzung ist die Basis für Maßnahmen zur Minderung der CH₄-Emissionen aus der praktischen Schweinehaltung. Da die stoffwechselbedingte CH₄-Emission bei Monogastriern sehr gering ist, konzentrieren sich die **Verminderungsstrategien** für die CH₄-Emissionen aus Schweineställen vornehmlich auf die Beeinflussung der CH₄-Bildung und -Freisetzung aus den im Innenraum zwischengelagerten Exkrementen. Die diskutierten Maßnahmen (**Tabelle 14**) basieren in der Regel auf Erfahrungen aus (Labor)-Untersuchungen zu den CH₄-Emissionen bei der Flüssigmistlagerung außerhalb vom Stall. Einen Überblick technischer Ansätze zur Emissionsminderung bei der Flüssigmistlagerung und -aufbereitung geben u.a. CLEMENS et al. (2001), HARTUNG, E. & MONTENY (2000), HILHORST et al. (2001), MONTENY et al. (2001). In der Literatur finden sich bisher kaum Angaben zu den Reduktionspotenzialen verschiedener Verminderungsstrategien auf Grund von Messungen auf Stallebene. Im Allgemeinen werden Maßnahmen, die bereits nachweislich die NH₃-Emissionen verringern und für den Praxiseinsatz geeignet sind, als ebenfalls geeignet für eine CH₄-Emissionsminderung angesehen (FREIBAUER & KALTSCHMITT, 2001; MONTENY et al., 2001).

Tab. 14: Beispiele für verfahrenstechnische Maßnahmen zur CH₄-Emissionsminderung aus Mastschweineställen mit Flüssigmist (Stallebene)

Maßnahme	Reduktionspotenzial (Anhaltswerte)	Autor
schnelle Entfernung der Exkremente aus dem Stall	10-40 %	CLEMENS & AHLGRIMM (2001) MONTENY et al. (2001) HILHORST et al. (2001)
Kühlung des Flüssigmistes	ca. 30-50 %	GROENESTEIN & HUIS IN 'T VELD (1996)
Zusatz von Milchsäure zum Flüssigmist, dadurch Absenkung des pH-Wertes auf 4,6	bis 90 %	BERG & HÖRNIG (1998)
Vermeidung des Luftaustausches durch den Spaltenboden	k.A.	MONTENY et al. (2001)
Belüftung des Flüssigmistes	k.A.	WILLERS et al. (1996)

Die schnelle **Entfernung der Exkremente aus dem Stall** kann in zweierlei Hinsicht zur Emissionsminderung beitragen. Zum einen wird weniger Inokkulum gebildet (älterer Flüssigmist) und somit das CH₄-Bildungspotenzial verringert (MONTENY et al., 2001). Zum anderen kann indirekt der reduzierende Einfluss kühlerer Temperaturen auf die CH₄-Bildung und Freisetzung aus dem Flüssigmist ausgenutzt werden, da die durchschnittlichen Temperaturen im Außenlager wesentlich geringer sind als im Stallraum (HILHORST et al, 2001).

Die **Kühlung des Flüssigmistes** reduziert einerseits direkt die Gasproduktion (DONHAM et al., 1988), und andererseits kann ein Luftaustausch zwischen dem Innenraum und der Luft unter dem Spaltenboden vermindert sein. Die relativ kältere Luft über dem Flüssigmist weist eine größere Dichte auf und wird dadurch gehindert durch die Spalten aufzusteigen (MONTENY et al., 2001).

Eine pH-Wert Absenkung über beispielsweise den **Zusatz von organischen Säuren** weist ein hohes Reduktionspotenzial auf (Tabelle 14). HILHORST et al (2001) beobachteten bei einer Ansäuerung bis zu pH 6 jedoch ebenso höhere Emissionen als bei unbehandeltem Flüssigmist, da Abbauprodukte der organischen Säuren als zusätzliches Substrat für die CH₄-Bildung dienen können. Wenn der pH-Wert unterhalb von pH 4,5 lag, wurden keine weiteren Gasemissionen aus dem Flüssigmist beobachtet. Auf Grund der Gefahr, dass beim Säurezusatz zu Flüssigmist gefährliche Gase freigesetzt werden können und eine unerwünschte starke Schaumbildung auftreten kann, raten HILHORST et al. (2001) letztlich vom Zusatz von Säuren als Verminderungsstrategie im praktischen Einsatz ab. Schließlich ist bisher die Frage ungeklärt, ob durch die Ausbringung von stark angesäuertem Flüssigmist das Bodenleben und die Pflanzenbestände beeinträchtigt werden.

Die **Belüftung des Flüssigmistes** wirkt sich nachteilig auf die Anwesenheit von methanogenen Bakterien aus und kann somit zumindest theoretisch zu einer CH₄-Emissionsminderung führen (MONTENY et al., 2001; WILLERS et al., 1996). Dabei kann die Belüftung jedoch unter Umständen eine Zunahme der N₂O-Emissionen verursachen (vgl: Kap. 2.2.3), so dass auf Grund des wesentlich höheren Global Warming Potential (GWP) von N₂O (vgl. Kap. 2.2) die Bilanz in Bezug auf CO₂-Äquivalente schlechter ausfallen kann (HILHORST et al., 2001).

Um insbesondere die CH₄-Freisetzung aus den Exkrementen zu beeinflussen, sind beispielsweise **lüftungstechnische Maßnahmen** denkbar, wie sie bereits für die Minderung von NH₃-Emissionen diskutiert werden (vgl. Kap. 2.1.2).

Eine abschließende Bewertung oder Empfehlung von Maßnahmen zur Minderung der CH₄-Emission aus dem komplexen System Stall ist auf der Basis der bisher verfügbaren Daten, die vielfach im Wesentlichen auf theoretischen Überlegungen beruhen, verfrüht.

2.2.2.3 Innenraumkonzentrationen und Emissionen

Die Datenbasis zu CH₄-Konzentrationen und -Emissionen für unterschiedliche Mastschweinehaltungssysteme mit Flüssigmist ist relativ begrenzt, **Tabelle 15** und **Tabelle 16**. Auffallend ist die große Spannweite der in Tabelle 15 zitierten Angaben zu CH₄-Konzentrationen und Emissionen aus zwangsbelüfteten Ställen, die teilweise um das fünf- bis zehnfache voneinander abweichen. RATHMER (2002) weist selber auf die enorm hohen eigenen Werte und einen untypischen Verlauf der CH₄-Konzentrationen und -Emissionen im untersuchten Warmstall hin. Als Gründe sind eine starke Verschmutzung der Liegefläche sowie die nicht optimale Luftführung, die in diesem Stall ebenfalls zu sehr hohen NH₃-Emissionen geführt haben (vgl. Tab. 5) anzunehmen.

Lässt man die Ergebnisse von RATHMER (2002) unberücksichtigt, so liegt anhand der in Tabelle 15 genannten Werte die mittlere CH₄-Emission für zwangsbelüftete Ställe mit Flüssigmist zwischen 27 bis 290 g d⁻¹ GV⁻¹. Sowohl die Angaben zur CH₄-Konzentration als auch -Emission für freibelüftete Ställe mit Flüssigmist in Tabelle 16 sind wesentlich geringer. Die CH₄-Emissionen betragen hier 22 bis 84 g d⁻¹ GV⁻¹. Die Umrechnung der Angaben auf 330 Stalltage sowie unter der Annahme, dass 1 Tier 0,12 GV entspricht, resultiert in **CH₄-Emissionsfaktoren** für zwangsbelüftete Ställe mit Flüssigmist von etwa 1 bis 11 kg a⁻¹ Tier⁻¹ und für freibelüftete Ställe mit Flüssigmist von 1 bis 3 kg a⁻¹ Tier⁻¹.

Diese Spanne entspricht weitgehend der Spannweite der Emissionsfaktoren, die auch im Entwurf der Datenblätter zur Beschreibung der "Best-Verfügbaren-Techniken" zu Grunde gelegt wurden. Als Modellwert für zwangsbelüftete Ställe mit Flüssigmist werden 4 kg a⁻¹ Tier⁻¹ angenommen (UBA, 2001c). Eine theoretische Kalkulation der CH₄-Emissionen als Summe aus tierspezifischer CH₄-Abgabe und der geschätzten CH₄-Freisetzung aus den Exkrementen ergibt einen für die Schweinehaltung übergreifenden Emissionsfaktor von etwa 4,8 kg a⁻¹ Tier⁻¹ (MONTENY et al., 2001).

Haltungssysteme mit Tiefstreu (Stroh oder Kompost) sind bezüglich der CH₄-Emissionen in Vergleich zu Haltungsverfahren auf Flüssigmistbasis schlechter (AHLGRIMM & BREFORD, 1998; KAISER, 1999; Niebaum, 2001) oder höchstens als gleichwertig (UBA, 2001c) zu bewerten. Die CH₄-Bildung wird durch reichlich vorhandene organische Substanz als Substrat für die methanogenen Bakterien, die durch die biologischen Umsetzungen erhöhten Temperaturen sowie die durch Verdichtung entstehenden anaeroben Zonen in der Einstreu begünstigt (MONTENY et al., 2001).

Tab. 15: Beispiele für mittlere CH₄-Konzentrationen und -Emissionen bei verschiedenen Rahmenbedingungen zwangsbelüfteter Haltungssysteme mit Flüssigmist für Mastschweine (kursive Werte zum Vergleich umgerechnet mit den Annahmen: 1 Tierplatz entspricht 0,12 GV; 1 ppm CH₄ entspricht 0,66 mg/m³)

Haltungssystem	Konzentrationsbestimmung ^A	Volumenstrombestimmung ^A	Temperatur [°C]	Volumenstrom	CH ₄ -Konzentration	CH ₄ -Emission	Anzahl Messtage/ Messzeitraum	Quelle
Vollspalten	PAS-Multigasmonitor	Messventilator	k. A.	k. A.	k. A.	4,4-6,8 g d ⁻¹ Tier ⁻¹ 36-56 g d ⁻¹ GV ⁻¹	4 Mastdurchgänge mit jeweils etwa 90 Messtagen	KAISER (1999)
Vollspalten	IR-Absorption	Messventilator	k. A.	111-780 m ³ h ⁻¹ GV ⁻¹	k. A.	4,6-34,8 g d ⁻¹ Tier ⁻¹ 38-290 g d ⁻¹ GV ⁻¹	1 Jahr (3 Mastdurchgänge) an 5 unterschiedlichen Ställen	HAHNE et al. (1999)
Vollspalten	NDIR-Spektroskopie	Messventilator	16 ^B	k. A..	10-25 ppm ^{C,D} (an 20 Tagen im April)	27 g d ⁻¹ GV ⁻¹	1 Mastdurchgang (Januar-April)	AHLGRIMM & BREFORD (1998)
			22,4 ^B	k. A..	k. A..	55 g d ⁻¹ GV ⁻¹	1 Mastdurchgang (Sommer)	
Teilspalten	PAS-Multigasmonitor	Messventilator	19 ^E	537 m ³ h ⁻¹ GV ⁻¹	29 Max 60 ppm ^F	264 g d ⁻¹ GV ⁻¹	75 Tage; Februar-Juni (Frühjahr)	RATHMER (2002)
			22 ^E	498 m ³ h ⁻¹ GV ⁻¹	74 Max 216 ppm ^F	768 g d ⁻¹ GV ⁻¹	105 Tage; Juni-Oktober (Sommer)	
			18 ^E	265 m ³ h ⁻¹ GV ⁻¹	94 Max 308 ppm ^F	360 g d ⁻¹ GV ⁻¹	106 Tage; November-März (Winter)	
Teilspalten	PAS-Multigasmonitor	CO ₂ -Bilanz	19-24	hoch (Sommer-luft-rate)	30-49 mg/m ³ ^C 45-74 ppm ^C	196 g d ⁻¹ GV ⁻¹	1 Tag; Sommer	HÖRNIG et al. (2000)
Teilspalten	k. A.	CO ₂ -Bilanz	18-26	12-67 m ³ h ⁻¹ Tier ⁻¹ 100-558 m ³ h ⁻¹ GV ⁻¹	55 ppm ^C	30,4 g d ⁻¹ Tier ^{-1G} 253 g d ⁻¹ GV ⁻¹	4 Ställe; je 1 Tag im Sommer und Winter	GROOT KOERKAMP & UENK (1997)

^A vgl. Kapitel 2.4; ^B Flüssigmisttemperatur; ^C Abluftkonzentration; ^D Werte aus Grafik entnommen, ^E Ablufttemperatur; ^F Konzentrationsdifferenz zwischen Abluft und Zuluft; ^G Keine Korrektur mit der Hintergrundkonzentration (ca. 2.4 ppm), Variationskoeffizient 37 %

Tab. 16: Beispiele für mittlere CH₄-Konzentrationen und -Emissionen bei verschiedenen Rahmenbedingungen freibelüfteter Haltungssysteme für Mastschweine mit Flüssigmist (kursive Werte zum Vergleich umgerechnet mit den Annahmen: 1 Tierplatz entspricht 0,12 GV; 1 ppm CH₄ entspricht 0,66 mg/m³)

Haltungssystem	Konzentrationsbestimmung ^A	Volumenstrombestimmung ^A	Temperatur [°C]	Volumenstrom	CH ₄ -Konzentration	CH ₄ -Emission	Anzahl Messtage/ Messzeitraum	Quelle
Außenklimastall, Nürtinger System, Offenfirst	PAS Multigasmonitor	Tracergas, kontinuierliche Injektion	k. A.	627 m ³ h ⁻¹ GV ⁻¹	5,1 mg/m ³ ^B 7,7 ppm	72 g d ⁻¹ GV ⁻¹	6 Tage; Sommer	NIEBAUM (2001)
			k. A.	345 m ³ h ⁻¹ GV ⁻¹	5,5 mg/m ³ ^B 8,3 ppm	43 g d ⁻¹ GV ⁻¹	9 Tage; Winter	
Außenklimastall, Nürtinger System, Schachtlüftung	PAS Multigasmonitor	Tracergas, kontinuierliche Injektion	k. A.	502 m ³ h ⁻¹ GV ⁻¹	7,5 mg/m ³ ^B 11 ppm	84 g d ⁻¹ GV ⁻¹	11 Tage; Sommer	NIEBAUM (2001)
			k. A.	407 m ³ h ⁻¹ GV ⁻¹	5,5 mg/m ³ ^B 8,3 ppm	63 g d ⁻¹ GV ⁻¹	12 Tage; Winter	
Außenklimastall mit Ruheboxen und Teilspaltenboden	PAS Multigasmonitor	Kapselung; Messventilator	13 ^C	675 m ³ h ⁻¹ GV ⁻¹	3,6 ppm ^D	50 g d ⁻¹ GV ⁻¹	66 Tage; Frühjahr (Februar-Juni)	RATHMER (2002)
			18 ^C	763 m ³ h ⁻¹ GV ⁻¹	6,1 ppm ^D	79 g d ⁻¹ GV ⁻¹	119 Tage; Sommer (Juni-Oktober)	
			6 ^C	403 m ³ h ⁻¹ GV ⁻¹	3,4 ppm ^D	22 g d ⁻¹ GV ⁻¹	109 Tage; Winter (November-März)	
Außenklimastall, Nürtinger System	k. A.	k. A.	k. A.	k. A.	5,6 mg/m ³ ^B 8,5 ppm	54 g d ⁻¹ GV ⁻¹	Spotmessung Winter	BREHME (1997) zitiert in NIEBAUM (2001)

^A vgl. Kapitel 2.4; ^B Abluftkonzentration; ^C Ablufttemperatur; ^D Konzentrationsdifferenz zwischen Abluft und Zuluft

Zum **jahreszeitlichen Einfluss** auf die Höhe der CH₄-Emission werden widersprüchliche Angaben gemacht. HAHNE et al. (1999) beobachteten einen Anstieg der CH₄-Emissionen von der Frühjahrs- bis zur Herbstmast. Während die Stalltemperaturen keinen wesentlichen Einfluss auf die Emissionshöhe aufwiesen, führten die geringeren Luftraten im Herbst mit einer damit verbundenen Reduzierung der O₂-Verfügbarkeit an den emittierenden Oberflächen zu höheren Emissionen (vgl. Kap. 2.2.2.1).

Dahingegen berichten RATHMER (2002) und NIEBAUM (2001) bei allen untersuchten Stallvarianten über höhere Emissionen im Sommer, da die höheren Temperaturen die mikrobielle Aktivität der methanogenen Bakterien fördern (vgl. Kap. 2.2.2.1). Diese Zusammenhänge stehen in Übereinstimmung mit Untersuchungen auf Stallenebene von DONHAM et al. (1988) zur CH₄-Freisetzung aus im Innenraum zwischengelagerten Exkrementen.

Mit zunehmender **Mastdauer** (KAISER, 1999) bzw. Flüssigmistmenge und Lagerdauer (NIEBAUM, 2001) ist ebenfalls ein Anstieg der CH₄-Emissionen zu verzeichnen.

Tagesverläufe der CH₄-Emission werden von den in Tabelle 15 und Tabelle 16 zitierten Autoren nicht dargestellt. Über die Einflüsse auf den Tagesverlauf der CH₄-Konzentration sind nur wenige Angaben zu finden. AHLGRIMM & BREFORD (1998) beobachteten eine starke Streuung der CH₄-Konzentration um den Faktor 2 bis 2,5, wobei jedoch kein deutlicher Tageszyklus beobachtet werden konnte. Es wird von einem Einfluss der Tieraktivität auf die CH₄-Freisetzung der emittierenden Oberflächen ausgegangen. Die Autoren vertreten beispielsweise die These, dass durch das Auftreffen von Kot und Urin der Tiere auf die im Innenraum zwischengelagerten Exkremente durch die Störung der Flüssigmistoberfläche kurzfristig CH₄-Spitzen verursacht werden können.

NIEBAUM (2001) beschreibt für Situationen mit geringer und gleichbleibender Luftrate einen korrespondierenden Anstieg der NH₃- und CH₄-Abluftkonzentration, welches mit der verminderten Verdünnung der Luft begründet wird. Der enge positive Zusammenhang zwischen NH₃ und CH₄-Konzentration, den auch bereits BRUNSCH et al. (1995) beschrieben haben, wird mit dem sehr ähnlichen Emissionsverhalten der beiden Gase erklärt. Es wird jedoch nicht ausgeschlossen, dass dieser Effekt auch methodisch durch Querempfindlichkeiten im Messsystem (vgl. Kap. 2.4.1) verursacht wird (NIEBAUM, 2001).

In Hinblick auf die **Stallluftqualität** werden die gemessenen CH₄-Konzentrationen von den Autoren nicht diskutiert. Weiterhin werden für Außenklimaställe keine Angaben zu den CH₄-Konzentrationen in abgedeckten Liegebereichen gemacht.

2.2.3 Lachgas

Die **atmosphärische N₂O-Konzentration** ist seit Beginn der Industrialisierung von etwa 285 auf etwa 310 ppbv, d.h. um etwa 15 % gestiegen. Die derzeit jährliche Konzentrationszunahme beträgt 0,25 %. Eine Stabilisierung der N₂O-Konzentrationen auf dem heutigen Niveau würde eine Reduktion der anthropogenen Emissionen um über 50 % voraussetzen (UBA, 2001a).

Mikrobielle Umsetzungen von N-Verbindungen in den Böden, die sowohl natürlichen als auch anthropogenen Ursprungs (Hauptquelle: N-Düngung) sein können, sind global die wichtigsten Quellen für N₂O. Dabei wird N₂O als ein sekundäres Reaktionsprodukt aus primären N-Quellen angesehen (LAMMEL & FLESSA, 1998). Der Eintrag von N-Verbindungen in Böden kann direkt, aber auch über Wasser- und Luftpfade erfolgen. Ein direkter Eintrag von N₂O durch die Industrie in die Atmosphäre erfolgt in der Hauptsache durch Emission von N₂O bei der Adipinsäureherstellung und in geringem Umfang durch den Straßenverkehr bei der katalytischen Abgasreinigung. Photochemische Prozesse bauen N₂O im wesentlichen erst in der Stratosphäre ab (UBA, 2001a). Es wird vermutet, dass Böden auch als N₂O-Senken fungieren könnten (OENEMA et al., 2001).

Der Anteil der **Landwirtschaft** an den globalen N₂O-Gesamtemissionen wird auf ca. 39 % beziffert, wobei der Anteil an den anthropogenen N₂O-Emissionen auf etwa 88 % geschätzt wird (OENEMA et al., 2001). Nach FLESSA (2002) beruhen rund 60 % der weltweiten, anthropogenen N₂O-Emissionen auf erhöhten N₂O-Austrägen aus Böden. OLIVIER et al. (1998) weisen darauf hin, dass, bezüglich der Bedeutung und des Anteils an den Gesamt-N₂O-Emissionen aus der Landwirtschaft, der Düngerverbrauch und die Produktion tierischer Exkremente vergleichbar sind. Nach MOSIER et al. (1998) sind die direkten Emissionen von Böden, die direkten Emissionen aus der Tierhaltung sowie die indirekten N₂O-Emissionen (Deposition, Nitratauswaschung, kommunale Abwässer) global durchschnittlich mit jeweils 2,1 Tg N pro Jahr in etwa gleich hoch einzuschätzen.

Auf Grund von enormen N₂O-Emissioneneinsparungen bei Industrieprozessen in den letzten Jahren, ist der Anteil der N₂O-Emissionen aus Land- und Abfallwirtschaft an den deutschen Gesamtemissionen deutlich auf z.Zt. etwa 60 % gestiegen, **Tabelle 17**. Die N₂O-Emissionen aus der deutschen Landwirtschaft stammen zum Großteil aus dem Boden, sind jedoch regional sehr unterschiedlich in Abhängigkeit vom N-Eintrag durch die Düngemittel sowie den Witterungsbedingungen, Bodeneigenschaften sowie den Bewirtschaftungsstrategien. Wirtschaftsdünger sind hierbei genauso zu bewerten wie die Mineraldünger insgesamt. Gegenwärtig wird davon ausgegangen, dass im Mittel ca. 1,25 bis 2,5 % des gedüngten N als N₂O dem

Boden entweicht (FLESSA, 2002). Annähernd 10 % der N₂O-Emissionen aus dem Boden werden dem N-Eintrag bei der Weidehaltung zugeschrieben sowie mehr als 10 % der N-Deposition, die auf NH₃-Emissionen zurückgeführt wird (UBA, 2001b).

Tab. 17: N₂O-Emissionen nach Emittentengruppen in Deutschland (Stand Januar 2001) (geändert nach UBA, 2001a)

Einheit	1990		1995		1999 (vorläufige Angaben)	
	[kt/a]	[%]	[kt/a]	[%]	[kt/a]	[%]
Insgesamt¹	214		209		141	
Land- und Abfallwirtschaft²	89	41,7	81	38,7	83	59,1
Produktverwendung³	6	2,9	6	3	6	4,5
Industrieprozesse⁴	82	38,4	82	39,2	13	9,2
Verkehr⁵	10	4,7	18	8,6	18	13
Haushalte	4	1,9	4	1,9	3	2,1
Kleinverbraucher⁶	2	1,1	1	0,5	1	0,7
Industriefeuerungen⁷	6	2,8	4	1,9	4	2,8
Kraft- und Fernheizwerke⁸	14	6,6	13	6,2	12	8,5

¹ohne natürliche Quellen; ²Mineraldünger- und Wirtschaftsdüngereinsatz; ³Verwendung als Narkosemittel; ⁴ohne energiebedingte Emissionen; ⁵Straßenverkehr, Land-, Forst- und Bauwirtschaft, Militär-, Schienen-, Küsten- und Binnenschiffsverkehr, nationaler Luftverkehr; ⁶einschließlich militärische Dienststellen; ⁷übriger Umwandlungsbereich u.a.; ⁸bei Industriekraftwerken nur Stromerzeugung

Die Vielzahl der beteiligten biologischen Prozesse (Nitrifikation, Denitrifikation, Reduktion von Nitrat zu NH₄⁺ (vgl. Kap 2.2.3.1), sowie die Komplexität der Umweltfaktoren und deren Veränderungen über Zeit und Raum bereiten erhebliche Schwierigkeiten bei der Abschätzung der N₂O-Emissionen (VAN DEN WEGHE, 1995), die wiederum selber eine hohe zeitliche und räumliche Variabilität aufweisen (FLESSA, 2002).

Die bisherige Datengrundlage zu N₂O-Emissionen aus der **Tierhaltung** wird noch als wenig belastbar und sehr dürftig eingeschätzt, was bei der Verwendung in Emissionsinventaren und deren Interpretation berücksichtigt werden muss (FREIBAUER & KALTSCHMITT, 2001). Einigkeit besteht jedoch darin, dass die Art und Dauer der Lagerung der Exkremente im Stall sowie die Art des Stallsystems die N₂O-Emissionen in erheblichem Maße beeinflussen können (in NIEBAUM, 2001.) Für Mastschweine werden in Emissionsinventaren höhere N₂O-Emissionen aus Tiefstreusystemen im Vergleich zu Flüssigmistsystemen angenommen (FREIBAUER & KALTSCHMITT, 2001). Groben Schätzungen zu Folge können etwa 9 kt/a der N₂O-Emission in Deutschland den tierischen Exkrementen zugerechnet werden (AHLGRIMM, 1998).

Die explizite Auswertung von N₂O-Konzentrationen in der Stallluft in Hinblick auf die **Stallluftqualität** und **Wirkungen auf Tier und Mensch** war bisher kaum Gegenstand in Untersuchungen zu den N₂O-Emissionen.

2.2.3.1 Bildung und Freisetzung

Die N₂O-Emissionen, die direkt der landwirtschaftlichen Tierhaltung zugerechnet werden, entstehen unter bestimmten Bedingungen nur als sekundäres Nebenprodukt mikrobiologischer Umwandlungsvorgänge von N-Verbindungen aus den Exkrementen. N₂O wird also nicht wie andere Gase direkt aus primär im Futter oder in den Exkrementen vorliegenden Komponenten produziert. Stoffwechselbedingte N₂O-Emissionen der Tiere selbst sind nicht bekannt und somit vernachlässigbar (MONTENY et al., 2001).

Ausgangspunkt für die N₂O-Bildung aus verschiedenen N-Bindungsformen sind im Anschluss an die Ammonifizierung (vgl. Kap. 2.1.1) die Prozesse der Nitrifikation (Bildung von Nitrat NO₃⁻ aus Ammonium NH₄⁺) bzw. der Denitrifikation (Bildung von molekularem Stickstoff N₂ aus Nitrat NO₃⁻). Die Details der Prozesse bzw. der Prozessbedingungen der N₂O-Bildung sind allgemein jedoch noch sehr wenig verstanden (MONTENY et al, 2001). Die Stärke der N₂O-Bildung hängt von zahlreichen Faktoren ab, die vor allem einen Einfluss auf die Lebensbedingungen der an der Nitrifikation und Denitrifikation beteiligten Mikroorganismen haben.

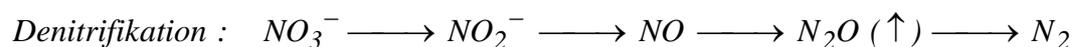
Unter der Voraussetzung einer optimal ablaufenden **Nitrifikation** unter streng aeroben Bedingungen wird kein N₂O als Zwischenprodukt gebildet. Optimale Bedingungen für die N₂O-Bildung bei der Nitrifikation bestehen bei einer hohen NH₄⁺-Konzentration, einer Temperatur von 30 bis 35 °C, einem Wassergehalt von 50 bis 60 %, einer hohen Verfügbarkeit von organischem C und einem pH-Wert von 6 bis 8 (AMON et al., 1998). Treten jedoch lokal O₂-Mangel und somit anaerobe Bedingungen auf, kann N₂O infolge einer unvollständigen Oxidation gebildet werden (HARTUNG, E. & MONTENY, 2000).



Darüber hinaus wird die chemische Umformung von NH₄⁺ zu Nitrit/Nitrat durch hohe NH₃-Konzentrationen und geringe C/N-Verhältnisse beeinflusst, was wiederum die N₂O-Bildung fördert (HARTUNG, E. & MONTENY, 2000).

Bei der vollständig ablaufenden **Denitrifikation** entsteht N₂O nur als ein Zwischenprodukt bei der Reduktion von Nitrat/Nitrit zu N₂ unter anaeroben Bedingungen. Neben dem O₂-Mangel sind als weitere Voraussetzungen für die Denitrifikation eine

Temperatur unter 10 °C, ein Wassergehalt unter 80 %, eine hohe Verfügbarkeit von organischem C und ein pH-Wert von 6 bis 8 zu nennen (AMON et al., 1998). Kritische Faktoren für die Denitrifikation sind hingegen die Anwesenheit (oder genau genommen die Abwesenheit) von Denitrifikanten, die ein breites Spektrum von heterotrophen Bakterien, Sauerstoff, Nitrat und Nitrit und leicht oxidierbarer organischer Substanz (C-Quelle für Bakterien) darstellen (MONTENY et al., 2001). Unter diesen Umständen wird der letzte Reduktionsschritt von N_2O zu N_2 gehemmt, so dass mehr N in Form von N_2O gebunden wird als in molekularem N (N_2) (BÜSCHER, 1996).



Die Bestimmungsfaktoren des N_2O/N_2 -Verhältnisses bei der Denitrifikation sind in **Tabelle 18** dargestellt.

Tab. 18: Bestimmungsfaktoren des N_2O/N_2 -Verhältnisses bei der Denitrifikation (nach BEESE, 1994)

Faktoren	Erhöht das N_2O/N_2 -Verhältnis
(NO_3^-) oder (NO_2^-)	Steigende Konzentration des Elektronenakzeptors
Sauerstoff	Anstieg des Sauerstoffpartialdrucks
Kohlenstoff	Abnahme der C-Verfügbarkeit
pH	Sinkender pH-Wert
Temperatur	Sinkende Temperatur
Enzym-Status	Erniedrigte N_2O -Reduktase-Aktivität

Grundsätzlich kann die N_2O -Bildung in den Exkrementen durch parallel ablaufende Nitrifikations- und Denitrifikationsprozesse bedingt sein, sofern die Bedingungen für die jeweils beteiligten Bakteriengruppen nicht optimal sind (HÜTHER et al., 1997). Nach GROENESTEIN & VAN FASSEN (1996) ist in Festmist- und Flüssigmistsystemen jedoch vor allem der Nitrifikationsprozess von herausragender Bedeutung. Dabei ist eine nennenswerte N_2O -Bildung aus im Innenraum zwischengelagertem Flüssigmist wesentlich unwahrscheinlicher als die N_2O -Bildung und Freisetzung aus Festmistverfahren (MONTENY et al., 2001).

Flüssigmist emittiert kein oder nur sehr wenig N_2O , da die Bedingungen für die Nitrifikation und Denitrifikation durch ein geringes O_2 - und Nitratangebot schlecht sind. Wenn jedoch auf der Flüssigmistoberfläche eine künstliche oder natürliche Schwimmschicht aus organischem Material vorhanden ist, die u.a. das Eindringen von O_2 in oberflächennahe Flüssigkeitsschichten ermöglicht, können sich dort nitrifizierende Bakterien ansiedeln (AHLGRIMM et al., 2000; HÜTHER et al., 1997).

Weiterhin ist der dort vorhandene $\text{NH}_3/\text{NH}_4^+$ -Gehalt des Flüssigmistes relevant (vgl. Kap. 2.1.1). NH_3 , einerseits als Substrat der Nitrifikanten, kann andererseits bei hohen Konzentrationen hemmend bis toxisch auf die Mikroorganismen wirken (HÜTHER et al., 1997; MONTENY et al., 2001).

Einstreusysteme sowie Festmiststapel sind eine wichtige Quelle für N_2O -Emissionen, da Nitrifikations- und Denitrifikationsprozesse in dichten, nassen und semi-anaeroben Zonen des Mistes auftreten (AHLGRIMM et al., 2000). Die Höhe der N_2O -Emission aus Festmist ist also vor allem von der Durchlüftbarkeit des Materials abhängig (HÜTHER et al., 1997). Bei Untersuchungen von GROENESTEIN & VAN FASSEN (1996) an einem Kompoststall (Mischung von Exkrementen und Einstreu), bei dem der Kompost mit Additiven zur Immobilisierung von NH_4^+ durch Bakterienwachstum versetzt wurde, konnte ein sehr hohes Potenzial zur N_2O -Bildung beobachtet werden, welches vorrangig durch die geringe O_2 -Verfügbarkeit im kompakten Kompost verursacht wurde.

Die N_2O -Freisetzung schließlich unterliegt im Wesentlichen den grundlegenden physikalischen Gesetzmäßigkeiten zum konvektiven Stoffübergang von einer flüssigen in die gasförmige Phase (vgl. Kap. 2.1.1).

2.2.3.2 Einflussfaktoren und Verminderungsstrategien

Nach bisherigem Kenntnisstand beeinflussen folgende Faktoren die N_2O -Bildung (im Sinne eines sekundären Reaktionsproduktes der Umwandlung der N-Bindungsformen) aus den Exkrementen bei den komplexen Prozessen der Nitrifikation und Denitrifikation (vgl. Kap. 2.1.1; Kap. 2.2.3.1):

- O_2 -Angebot/Verfügbarkeit;
- Temperatur;
- pH-Wert;
- Wassergehalt;
- Verfügbarkeit von organischem C;
- C/N-Verhältnis;
- Exkrementart und -zusammensetzung (Festmist oder Flüssigmist);
- $\text{NH}_3/\text{NH}_4^+$ Konzentration in den Exkrementen;
- Nitrat/Nitrit-Konzentration;
- Hemmstoffe.

Generell ergeben sich Ansätze für Minderungsstrategien für N_2O -Emissionen aus der Schweinehaltung zunächst am Ausgangspunkt der N_2O -Bildung, d.h. bei der Zusammensetzung und dem Gehalt der N-Bindungsformen in den Exkrementen (VAN DEN WEGHE, 1995).

Die Möglichkeiten zur Beeinflussung des N-Gehaltes in den Exkrementen und des Ammoniak-Ammonium-Gleichgewichtes sind eingehend in Kap. 2.1.1 und Kap. 2.1.2 beschrieben. Schließlich sind theoretisch alle Maßnahmen denkbar, die einen vollständigen Ablauf der Nitrifikation und Denitrifikation begünstigen, so dass N_2O als unerwünschtes Nebenprodukt nicht gebildet wird (OENEMA et al., 2001).

Die gezielte Überprüfung von praktischen Maßnahmen zur Minderung der N_2O -Emissionen auf Stallebene war bisher nicht Gegenstand von Untersuchungen. Die in **Tabelle 19** dargestellten Ansätze zur N_2O -Minderung basieren hauptsächlich auf theoretischen Überlegungen oder wurden bei der Interpretation von Messergebnissen und aus Untersuchungen zur Mistlagerung abgeleitet (z.B.: AMON et al., 1998; CLEMENS & AHLGRIMM, 2001; siehe JUNGBLUTH et al., 2001; UBA, 2001b, c). Dabei ist zu berücksichtigen, dass eine N_2O -Minderung unter Umständen mit einer unerwünschten Erhöhung der NH_3 -Emissionen verbunden sein kann und umgekehrt; sowohl im Stall selber als auch bei nachfolgender Lagerung und Ausbringung (z.B.: CLEMENS & AHLGRIMM, 2001; GROENESTEIN & VAN FAASSEN, 1996; KAISER, 1999; SCHÜRER & REITZ, 1998; UBA 2001b, c). Schließlich sind Maßnahmen anwendbar, die speziell die Gasfreisetzung durch Beeinflussung des konvektiven Stoffüberganges reduzieren (vgl. Kap. 2.1.1).

Tab. 19: Beispiele für mögliche Maßnahmen zur N_2O -Emissionsminderung aus Mastschweineeställen

Maßnahme	Autor
Verbesserung der N-Effizienz bzw. Verringerung der N-Ausscheidung und des N-Gehaltes in den Exkrementen	OENEMA et al. (2001) VAN DEN WEGHE (1995)
Vermeidung von Krustenbildung, organischer Substanz bzw. Stroh auf der Flüssigmistoberfläche	AHLGRIMM et al. (2002) CLEMENS & AHLGRIMM (2001)
Anaerobe Lagerung von Flüssigmist	OENEMA et al. (2001)
Vermeidung der Entstehung anaerober Zonen im Festmist	AHLGRIMM et al. 2002 GROENESTEIN & VAN FASSEN (1996) KAISER (1999)
Vorzug von Flüssigmistsystemen im Vergleich zu Festmistsystemen	GROENESTEIN & VAN FASSEN (1996) FREIBAUER & KALTSCHMITT (2001) KAISER (1999) SNEATH et al. (1997) UBA (2001b, c)
Ansäuerung des Flüssigmistes	BERG & HÖRNIG (1998) HILHORST et al. (2001)
Einsatz von Nitrifikations-Inhibitoren	OENEMA et al. (2001)
Schnelle Entfernung der Exkremente aus dem Stall	FREIBAUER & KALTSCHMITT (2001)
Kühle Temperaturen	FREIBAUER & KALTSCHMITT (2001)

Aufgrund bestehender methodischer Probleme bei der Messung von N_2O -Emissionen (Vgl. Kap. 2.4.1) und der Einflüsse anderer Parameter ist gegenwärtig eine gesicherte Quantifizierung oder Angabe von Reduktionspotenzialen nicht möglich (FREIBAUER & KALTSCHMITT, 2001; HARTUNG, E. & MONTENY, 2000; UBA, 2001b).

2.2.3.3 Innenraumkonzentrationen und Emissionen

Die Verfügbarkeit von Daten zu N₂O-Emissionen aus Mastschweinehaltungssystemen mit Flüssigmist (**Tabelle 20**; **Tabelle 21**) ist derzeit noch äußerst gering und wird als sehr ungenau eingeschätzt (FREIBAUER & KALTSCHMITT, 2001; UBA 2001b, c). Dies liegt zum Teil an den sehr geringen N₂O-Konzentrationen im Stall, die mit den eingesetzten Analysemethoden nicht gesichert von der Hintergrundkonzentration differenziert werden konnten (GROENESTEIN & VAN FAASSEN, 1996; GROOT KOERKAMP & UENK, 1997; HARTUNG, E. & MONTENY, 2000; NIEBAUM, 2001; RATHMER, 2002). Die mittlere N₂O-Hintergrundkonzentration in der Umgebung von Ställen beträgt nach Messungen von CHILDERS et al. (2001) etwa 0,3 bis 0,33 ppm.

Aus den in den Tabelle 20 und Tabelle 21 genannten Werten ergibt sich eine Spannweite möglicher **N₂O-Emissionsfaktoren** für Mastschweineställe auf Flüssigmist von etwa 0,02 - 0,3 kg a⁻¹ Tier⁻¹ (Annahmen: 1 Jahr entspricht 330 Stalltagen, 1 Tier entspricht 0,12 GV).

In den Entwürfen der Datenblätter zur Beschreibung der "Best Verfügbaren Techniken" wird für zwangsbelüftete Ställe auf Flüssigmist eine Spannweite der N₂O-Emission von ebenfalls 0,02 - 0,31 kg a⁻¹ Tier⁻¹ genannt. Als Modellwert werden vorläufig 0,1 kg a⁻¹ Tier⁻¹ angenommen. Für Außenklimaställe auf Flüssigmist wird eine geringere Spannweite der N₂O-Emission von 0,18 - 0,22 kg a⁻¹ Tier⁻¹ angesetzt und auf die Angabe eines Modellwertes verzichtet. Dem wesentlich höheren N₂O-Emissionspotenzial von Tiefstreusystemen (vgl. Kap. 2.2.3.1) mit Zwangslüftung wird mit dem Modellwert von 2,5 kg a⁻¹ Tier⁻¹ entsprochen (UBA, 2001c).

Angaben zu jahreszeitlichen oder tageszeitlichen Einflüssen auf die Höhe und den Verlauf von N₂O-Konzentration und -Emission werden von den verschiedenen Autoren (Tab. 20; Tab. 21) nicht gemacht.

Tab. 20: Beispiele für mittlere N₂O-Konzentrationen und -Emissionen bei verschiedenen Rahmenbedingungen zwangsbelüfteter Haltungssysteme mit Flüssigmist für Mastschweine (kursive Werte zum Vergleich umgerechnet mit den Annahmen: 1 Tierplatz entspricht 0,12 GV; 1 Jahr entspricht 330 Stalltagen)

Haltungssystem	Konzentrationsbestimmung ^A	Volumenstrombestimmung ^A	Temperatur [°C]	Volumenstrom	N ₂ O-Konzentration	N ₂ O-Emission	Anzahl Messtage/ Messzeitraum	Quelle
Vollspalten	PAS-Multigasmonitor	Messventilator	k. A.	k. A.	k. A.	0,06-0,12 g d ⁻¹ Tier ⁻¹ 0,5-1 g d ⁻¹ GV ⁻¹	4 Mastdurchgänge mit jeweils etwa 90 Messtagen	KAISER (1999)
Vollspalten	IR-Absorption	Messventilator	k. A.	111-780 m ³ h ⁻¹ GV ⁻¹	k. A.	17-135 g a ⁻¹ Tier ⁻¹ 0,43-3,4 g d ⁻¹ GV ⁻¹	1 Jahr (3 Mastdurchgänge) an 5 unterschiedlichen Ställen	HAHNE et al. (1999)
Teilspalten	PAS-Multigasmonitor	Messventilator	19 ^B	537 m ³ h ⁻¹ GV ⁻¹	nicht gesichert nachweisbar		75 Tage; Februar-Juni (Frühjahr)	RATHMER (2002)
			22 ^B	498 m ³ h ⁻¹ GV ⁻¹	0,128 Max 0,453 ppm ^C	3,6 g d ⁻¹ GV ⁻¹	105 Tage; Juni-Oktober (Sommer)	
			18 ^B	265 m ³ h ⁻¹ GV ⁻¹	0,3 Max 0,8 ppm ^C	3,1 g d ⁻¹ GV ⁻¹	106 Tage; November-März (Winter)	
Spaltenboden	NDIR-Spektroskopie	k. A.	k. A.	k. A.	k. A.	0,44 g d ⁻¹ Tier ⁻¹ 3,6 g d ⁻¹ GV ⁻¹	zitiert in NIEBAUM (2001):	HOY et al. (1997)
						0,94 g d ⁻¹ Tier ⁻¹ 7,8 g d ⁻¹ GV ⁻¹		THELOSEN & VOERMANS. (1993)

^A vgl. Kapitel 2.4; ^B Ablufttemperatur; ^C Konzentrationsdifferenz zwischen Abluft und Zuluft

Tab. 21: Beispiele für mittlere N₂O-Konzentrationen und -Emissionen bei verschiedenen Rahmenbedingungen freibelüfteter Haltungssysteme für Mastschweine mit Flüssigmist (kursive Werte zum Vergleich umgerechnet mit den Annahmen: 1 Tierplatz entspricht 0,12 GV; 1 ppm N₂O entspricht 1,8 mg/m³)

Haltungssystem	Konzentrationsbestimmung ^A	Volumenstrombestimmung ^A	Temperatur [°C]	Volumenstrom	N ₂ O-Konzentration	N ₂ O-Emission	Anzahl Messtage/ Messzeitraum	Quelle
Außenklimastall, Nürtinger System, Offenfirst	PAS Multigasmonitor	Tracergas, kontinuierliche Injektion	k. A.	627 m ³ h ⁻¹ GV ⁻¹	nicht nachweisbar		6 Tage; Sommer	NIEBAUM (2001)
			k. A.	345 m ³ h ⁻¹ GV ⁻¹	0,68 0,38	mg/m ³ ^B ppm	2,77 g d ⁻¹ GV ⁻¹	
Außenklimastall, Nürtinger System, Schachtlüftung	PAS Multigasmonitor	Tracergas, kontinuierliche Injektion	k. A.	502 m ³ h ⁻¹ GV ⁻¹	nicht nachweisbar		11 Tage; Sommer	NIEBAUM (2001)
			k. A.	407 m ³ h ⁻¹ GV ⁻¹	0,77 0,43	mg/m ³ ^B ppm	3,76 g d ⁻¹ GV ⁻¹	
Außenklimastall mit Ruheboxen und Teilspaltenboden	PAS Multigasmonitor	Kapselung; Messventilator	13 ^C	675 m ³ h ⁻¹ GV ⁻¹	nicht gesichert nachweisbar		66 Tage; Frühjahr (Februar-Juni)	RATHMER (2002)
			18 ^C	763 m ³ h ⁻¹ GV ⁻¹	nicht gesichert nachweisbar		119 Tage; Sommer (Juni-Oktober)	
			6 ^C	403 m ³ h ⁻¹ GV ⁻¹	nicht gesichert nachweisbar		109 Tage; Winter (November-März)	
Außenklimastall, Nürtinger System	k. A.	k. A.	k. A.	k. A.	k. A.	4,3 bis 7 g d ⁻¹ GV ⁻¹	Spotmessung Winter	BREHME (1997) zitiert in RATHMER (2002)

^A vgl. Kapitel 2.4; ^B Abluftkonzentration; ^C Ablufttemperatur

2.3 Staub (Particulate Matter)

Feste Partikeln, welche durch mechanische Prozesse in Gase oder Luft gelangen oder von dieser aufgewirbelt werden, werden in der Regel als **Staub(-partikeln)** bezeichnet. Staub gehört zu den **Aerosolen**, d.h. Gasen oder Luft, in der flüssige und/oder feste Partikeln über einen längeren Zeitraum in feinst verteilter Form vorliegen. Diese luftgetragenen Partikeln können sowohl belebt als auch unbelebt sein. Aerosole, die Partikeln beinhalten, die biologischer Herkunft oder biologisch aktiv sind (was sowohl auf belebte als auch unbelebte Partikeln zutreffen kann) werden als **Bioaerosole** bezeichnet. Bioaerosole können z.B. infektiös, toxisch oder pharmakologisch auf den Organismus wirken oder allergische Reaktionen bedingen (HARTUNG, J. & SEEDORF, 1999; HINDS, 1999). International sowie in Regelwerken findet zur Kennzeichnung von Aerosolen und Stäuben zunehmend der Begriff "**Particulate Matter (PM)**" Verwendung (HINZ, 2002).

Stäube decken einen weiten Bereich unterschiedlichster Größenklassen vom submikronen Bereich ($<1 \mu\text{m}$) bis zu mehr als $100 \mu\text{m}$ ab und sind normalerweise ungleichmäßig (*irregular*). Zur Differenzierung von Partikelgrößenklassen hat sich der Bezug auf die Eindringtiefe in den menschlichen Atmungsapparat durchgesetzt. Die Definitionen sind somit nur größenabhängig und berücksichtigen nicht die Partikelzusammensetzung oder Qualität und Wirkung eines Bioaerosols (HINZ, 2002). In der Größenkonvention (EN, 1993) wurden kritische obere aerodynamische Partikeldurchmesser (D_{ae}) entsprechend einer 50%-igen Abscheideeffizienz (D_{50}) der Partikelsammlung festgelegt. Die Bezeichnung der Größenfraktionen orientiert sich an dem oberen kritischen Partikeldurchmesser und umfasst kumulativ alle Partikeln bis zu diesem oberen Durchmesser (EN, 1993).

- PM 100 = Einatembarer (*inhalable*) Staub: Der Massenteil aller Schwebstoffe, der durch Mund und Nase eingeatmet wird.
- PM 10 = Thorakale (*thoracic*) Fraktion: Der Massenteil der eingeatmeten Partikeln, der über den Kehlkopf hinaus vordringt.
- PM 2,5 = Alveolengängige (*respirable*) Fraktion: Der Massenteil der eingeatmeten Partikeln, der bis in die nichtcilierten Luftwege vordringt.

Durch Differenzbildung können zwei weitere Größenfraktionen berechnet werden:

- PM 100 - PM 10 = Extrathorakale Fraktion: Der Massenteil der eingeatmeten Partikeln, der nicht über den Kehlkopf hinaus vordringt.
- PM 10 - PM 2,5 = Tracheobronchiale Fraktion: Der Massenteil der eingeatmeten Partikeln, der über den Kehlkopf hinaus vordringt, aber nicht in die nichtcilierten Luftwege gelangt.

In der Literatur werden im deutschen und englischen Sprachgebrauch und in Bezug auf ältere Regelungen weiterhin folgende Bezeichnungen zur Differenzierung von Größenklassen verwendet:

- PM 100: Gesamtstaub (*Total Dust*)
- PM 20: Inhalierbarer Staub (*Inhalable Dust*)
- PM 4: Alveolengängiger Staub, Feinstaub (*Respirable Dust*)
- PM 5: Alveolengängiger Staub, Feinstaub (*Respirable Dust*)
- PM 0,1: Ultrafeiner Staub

In zahlreichen Veröffentlichungen werden die verschiedenen Bezeichnungen und speziell die Begriffe "*inhalable*, Feinstaub, alveolengängiger Staub, *respirable*" parallel verwendet, wobei jedoch nicht genau angegeben wird, für welche Größenfraktion (PM 100, PM 10; PM 5, PM 4, PM 2,5) die Messungen durchgeführt wurden bzw. welche Begriffsdefinition (alt oder neu) zugrunde liegt. Dies schränkt die Vergleichbarkeit verschiedener Messungen sehr ein und erschwert die eindeutige Zuordnung von Größenfraktionen zu den in der Literatur verwendeten Begriffen. Im Folgenden werden deshalb die Bezeichnungen so wiedergegeben, wie sie von den jeweiligen Autoren verwendet wurden.

Die Relevanz von Staub im Kontext der Landwirtschaft ergibt sich aus der möglichen **gesundheitsschädlichen Wirkung** für Mensch und Tier, die stark von der Art des Staubes (organisch oder anorganische Inhaltsstoffe), den auf den Partikeln angelagerten Stoffen (z.B. Mikroorganismen und Toxine) und dem Partikeldurchmesser abhängen. Besonders der alveolengängige (Fein-)staub ist kritisch, da seine Halbwertszeit Monate bis mehrere Jahre betragen kann. Nach ZEITLER (1988) können die Effekte mechanischer, infektiöser, immunsuppressiver, allergischer oder toxischer Natur sein. Die möglichen gesundheitlichen Effekte können wie folgt zusammengefasst werden (HARTUNG, J., 2002; ZEITLER 1988):

- Hohe Staubkonzentrationen: Reizungen, Überlastung der Lungenreinigungsfunktion, Läsionen an Schleimhäuten;
- Spezifische Mikroorganismen: Infektiöse Effekte durch pathogene Keime;
- Staub, Mikroorganismen und Gase: unspezifische Wirkung, Belastung der Abwehrmechanismen, Verminderung der Krankheitsresistenz;
- Mikroorganismen und Staub:
 - Allergisierende Wirkung, Überempfindlichkeitsreaktionen
 - Toxische Effekte: Intoxikation durch Bakterien-(Pilz-)toxine.

Im Stall ist die Auslösung und das Ausmaß von respiratorischen Erkrankungen und damit verbundener möglicher Leistungseinbußen in der Regel multifaktoriell bedingt. Parameter wie Stallklima, Gaskonzentrationen, Hygiene oder Einstreu sowie die

Vordisposition und der Immunstatus von Mensch und Tier sind zu berücksichtigen (HARTUNG, J., 2002).

In der Industrie ist eine maximale Arbeitsplatzkonzentration von $1,5 \text{ mg m}^{-3}$ des alveolengängigen Staubes (früher: Feinstaub) und von 4 mg m^{-3} des einatembaren Anteils (früher: Gesamtstaub) zulässig (DFG, 1998). Spezielle gesetzliche Regelungen über die zulässige Staubmassenkonzentration im Schweinestall sind bisher nicht formuliert worden. Die Empfehlungen verschiedener Autoren (in MAYER, 1999; in SEEDORF & HARTUNG, J., 2002) zur maximalen Gesamtstaubkonzentration (PM 100) im Stall variieren zwischen 2,5 bis 8 mg m^{-3} . Für respirablen (alveolengängigen) Staub empfehlen DONHAM & CUMRO (1999) eine maximale Konzentration von $0,23 \text{ mg m}^{-3}$.

Im Rahmen dieser Arbeit wird nicht detaillierter auf verschiedene staubbezogene Krankheitsbilder und epidemiologische Studien bei Mensch und Tier eingegangen. Für weiterführende Erläuterungen wird beispielhaft auf folgende Arbeiten (DEMMERS, 2002; HELLICKSON et al., 1989; JANSEN & FEDDES, 1995; RIEGER, 2001; SEEDORF & HARTUNG, J., 2002; ZHANG et al., 1998) sowie verschiedene Beiträge in DANISH INSTITUTE OF AGRICULTURAL SCIENCES (1999) verwiesen.

Das gesundheitsschädigende Potenzial speziell feiner Partikeln (PM 10, PM 2,5) ist Anlass für **internationale und nationale Regelungen** zur Kontrolle der PM-Konzentrationen in der Atmosphäre. Feine Partikeln in der Atmosphäre werden zum einen direkt aus verschiedenen natürlichen und anthropogenen Quellen freigesetzt. Zum anderen werden sekundäre Aerosole aus vorausgegangenen gasförmigen Emissionen von SO_2 , NO_x , NH_3 und VOC's gebildet (DÄMMGEN, 2002). Die typische Verweilzeit von feinen Partikeln beträgt zwischen 10 bis 100 Stunden, in der die Aerosole mit der Luftmasse über weite Entfernungen und somit grenzüberschreitend transportiert werden. Eine indirekte **Umweltwirkung** ist beispielsweise durch trockene und nasse Deposition der sekundär Aerosole oder die Bildung bodennahen Ozons gegeben. Deshalb ist die Erforschung, Inventarisierung (PM 10; PM 2,5), und Minderung von atmosphärischen PM-Konzentrationen Gegenstand internationaler Übereinkommen der Europäischen Union und UN-Kommission (UN-ECE Convention on Long-Range Transboundary Air Pollution; Genfer Luftreinhalteabkommen). Die Bemühungen zielen auf eine Harmonisierung der europaweiten Maßnahmen und auf eine Aufnahme der PM-Thematik in das zu überarbeitende Göteborger Multischadstoffprotokoll im Jahr 2005 (KLIMONT & AMANN, 2002).

Die mit Hilfe des RAINS-Modelles (Regional Air Pollution Information and Simulation) geschätzte Entwicklung der PM 10 und PM 2,5 Emissionen in Europa sind in **Tabelle 22** zusammengefasst.

Tab. 22: Schätzung der PM 10 und PM 2,5 Emissionen in Europa zwischen 1990 und 2010 und Beitrag des landwirtschaftlichen Sektors (RAINS-Modell) (nach KLIMONT & AMANN, 2002)

	PM 10			PM 2,5		
	1990	2000	2010	1990	2000	2010
Emission [Tg]						
E U - 15	2044	1135	804	1098	774	518
Nicht EU-Länder	5818	3143	2785	2665	1494	1365
Europa Gesamt	7862	4277	3589	3764	2268	1883
Landwirtschaft [%]						
E U - 15	4,6	8,6	11,9	1,7	2,4	3,5
Nicht EU-Länder	2,0	2,8	4,0	0,9	1,2	1,6
Europa Gesamt	2,7	4,3	5,8	1,1	1,6	2,2

Demnach wird erwartet, dass die PM-Emissionen zukünftig insgesamt abnehmen, jedoch der relative Beitrag aus der **Landwirtschaft** zunimmt. Dies ist weniger eine Konsequenz zunehmender PM-Emissionen aus der Landwirtschaft als vielmehr durch deutliche Emissionsminderungen in anderen Sektoren (v.a. Energiegewinnung, Verbrennungsmotoren, Verkehr) bedingt (KLIMONT & AMANN, 2002). Innerhalb des landwirtschaftlichen Sektors ist die **Tierhaltung** die größte PM-Quelle mit abnehmenden Anteilen von der Geflügel-, über die Schweine- zur Rinderhaltung (PHILIPPS et al., 2002; SEEDORF, 2000). Die Geflügel- und Schweinehaltung sind schätzungsweise für 57 % bzw. 32 % der PM 10 Emissionen sowie 50 % bzw. 30 % der PM 2,5 Emissionen verantwortlich (KLIMONT & AMANN, 2002).

Generell ist für PM-Inventare anzumerken, dass im Gegenteil zu Gasen, die unabhängig von der Quelle immer dieselbe chemische Zusammensetzung haben, die Qualität von Partikeln in Abhängigkeit von der Quelle sehr verschieden sein kann und somit die Partikeln auch ein unterschiedliches gesundheitsgefährdendes Potenzial aufweisen können. Weiterhin ist mehr Wissen über die quelltypische Partikelgrößenverteilung notwendig (PHILIPPS et al., 2002).

Auf nationaler Ebene wird dem Schutzgedanken für Umwelt und Bevölkerung beispielsweise im Rahmen des Genehmigungsverfahrens von Stallanlagen bei der Neufassung der **TA-Luft** entsprochen. Zum einen ist die Emission von Gesamtstaub einer Stallanlage geregelt, die einen Massenstrom von $0,2 \text{ kg h}^{-1}$ bzw. eine Konzentration von 20 mg m^{-3} nicht überschreiten darf. Dieser Grenzwert entspricht in etwa 1800 Schweinen, 16.600 Stück Geflügel oder 1800 Rindern (GRIMM & ECKHOFF, 2002). Zusätzlich zur Begrenzung der Emission sind in der Neufassung der TA-Luft Grenzwerte für die Immission von PM 10-Konzentrationen festgelegt worden, die maximal $40 \text{ } \mu\text{g m}^{-3}$ über ein Jahr bzw. $50 \text{ } \mu\text{g m}^{-3}$ über 24 Stunden betragen darf. Diese Grenzwerte stimmen mit den seitens der EU vorgeschlagenen Höchstwerten für die PM 10-Umgebungskonzentration ab dem Jahr 2005 überein. Im Jahr 2010 soll die maximale PM 10-Konzentration in der Umgebungsluft höchstens $20 \text{ } \mu\text{g m}^{-3}$ im Jahresdurchschnitt betragen (EU, 1998).

2.3.1 Charakterisierung von Schwebstaub in Schweineställen

Die luftgetragenen Partikeln (Schwebstaub) in und aus Nutztierställen werden zu den komplex zusammengesetzten Stäuben gezählt und lassen sich zusammenfassend durch fünf wesentliche Besonderheiten charakterisieren (verändert und ergänzt nach HARTUNG, E., 2002):

- Vorhandensein unbelebter und belebter oder biologisch aktiver Partikeln (bilden mit Gas/Luft die Bioaerosole) d. h. einer großen Bandbreite von Mikroorganismen (Bakterien, Hefen, Pilze, Viren, Protozoen, Milben, etc.) aber auch Endo- und Mykotoxinen, welche teilweise pathogen bzw. infektiös sind (HARTUNG, J. 2002);
- Luftgetragene Partikeln kommen meist nicht isoliert als Staubpartikeln, Mikroorganismen oder Bioaerosolkomponenten vor, sondern sie sind mit und an Staubpartikeln, in sogenannten Clustern, assoziiert, die stark variierende Keimbelastungen aufweisen können (SEEDORF, 2000);
- Sehr hohe und von einer starken Dynamik geprägte Partikelkonzentrationen, die in der Regel die in Arbeits- oder Wohngebäuden vorhandenen Konzentrationen um ein Vielfaches übersteigen (HARTUNG J., 1999; ZHANG, 1999);
- Staubpartikeln sind Träger von Geruchs- und/oder Schadstoffen (HAMMOND et al., 1975; SEEDORF, 2000; TAKAI et al., 1998; ZHANG, 1999);
- Die Partikeln unterliegen starken dynamischen Veränderungen zwischen partikelbildenden Prozessen (Kondensation, Sublimation und Dispersion) und partikelvernichtenden Prozessen (Sedimentation, Diffusion und Koagulation). Triebkräfte dieser Dynamik sind mechanische Vorgänge im Stall wie Fütterungs-, Reinigungs- und Pflegearbeiten sowie die Bewegungsaktivität der Tiere und die Luftbewegung. Auch Abtrocknungsvorgänge, also thermische Kräfte, spielen eine Rolle (TAKAI et al., 1998; ZEITLER, 1988).

Eine Vielzahl von verschiedenen Komponenten werden in Bioaerosolen aus der Nutztierhaltung gefunden, **Tabelle 23**. Der größte Teil der Luftkeime ist den Gattungen Staphylokokken und Streptokokken zuzuordnen, die etwa zu 80 % an der Gesamtkeimflora in der Stallluft beteiligt sind (SEEDORF, 2000).

Tab. 23: Komponenten von Bioaerosolen aus der Nutztierhaltung (nach DONHAM, 1993; HARTUNG, J., 1999)

Futterbestandteile:	Getreidestaub; Antibiotika, Wachstumsförderer	Infektionserreger; Schimmelpilze; Pollen; Getreidemilben; Insektenbestandteile
Tierische Proteine:	Urin; Epithelien, Serum	Gram-negative Bakterien; Endotoxine; Mykotoxine
Fäkalien:	Darmflora und -epithelien, mikrobielle Flora, unverdaute Nahrungsbestandteile	β-1,3-Glukan-Histamin; Mikrobielle Proteasen; Biogene Amine; Partikelgebundene Gase (z. B. NH ₃); Mineralstäube; Pharmazeutika

Die Zusammensetzung der Partikeln ist abhängig von der Herkunft des Partikels. Im Stall sind die wichtigsten primären **Quellen** Futter, Einstreu, Hautpartikel, Haare, Exkremente und Abrieb vom Stallinventar. Die Partikelformen sind sehr vielfältig und sind zum einen durch die Quelle und zum anderen von nachfolgenden physikalischen und chemischen Veränderungen geprägt (SEEDORF & HARTUNG, J., 2002). Vergleiche der chemischen Zusammensetzung und mikroskopischen Eigenschaften der Partikeln mit möglichen Quellen in einem Schweinestall von AARNINK et al. (1999) ergaben, dass der Staub im Stall hauptsächlich von Futter und Hautzellen und zu einem geringeren Anteil auch von den Exkrementen abstammt. Für eine organische Zusammensetzung des Stallstaubes sprechen Rohproteingehalte von ca. 50 % der Gesamtmasse (AARNINK et al., 1999; SEEDORF, 2000). SCHNEIDER et al. (2001) fanden im Rahmen einer Elementanalyse von Stallpartikeln vornehmlich Partikeln biogener Herkunft im Größenbereich D 0,6 μm - 20 μm .

Weiterhin erfolgt ein Eintrag von Partikeln von außen in den Stallraum. Das **Hintergrundaerosol** weist typischerweise eine hohe Anzahl sehr kleiner Partikeln $D < 0,1 \mu\text{m}$ im "Nuclei-Mode" auf. Die Volumen (oder Massen)-Verteilung des Hintergrundaerosols ist bimodal ("Accumulation Mode" und "Coarse-Particle Mode") und hat einen Sattelpunkt im D 1-3 μm Bereich (HINDS, 1999). SCHNEIDER et al. (2001) zeigen auf, dass Partikeln in der Stallluft von $D < 0,6 \mu\text{m}$ eine sehr ähnliche chemische Zusammensetzung wie das typisch sulfatische Hintergrundaerosol haben. Partikeln des Hintergrundaerosols mit $D > 1 \mu\text{m}$ zeichneten sich qualitativ durch hohe Anteile bodenbürtiger Stoffe (z.B. Silikate, Eisenoxide) und durch das Fehlen von Phosphor aus.

Staub hat **hygroskopische Eigenschaften**, d.h. die Partikeln sind je nach stofflicher Qualität in der Lage, Wassermoleküle zu binden. Durch Aufnahme von Wasserdampf werden die Partikeln schwerer oder es tritt eine feuchtebedingte Clusterbildung größerer Partikeln auf, so dass die Sedimentation begünstigt ist (HEBER et al., 1988; SEEDORF & HARTUNG, J., 2002). Durch die Feuchtigkeit der Atemluft vergrößert sich der Durchmesser des Staubpartikels, wodurch das Ausatmen des Partikels nicht mehr möglich ist (MAYER, 1999.) Ähnliche Effekte zeigen sich, wenn Partikeln über feuchte Oberflächen z.B. im Flüssigmistlager geführt werden und dies zu einer veränderten Partikelgrößen- und Partikelmassenverteilung führt. Diese Partikeln zeichnen sich qualitativ als "mixed particles" durch hohe Gehalte an P, N, K und Ca aus (SCHNEIDER et al., 2001).

Die **Partikelgrößenverteilung** der Stallluft eines Schweinestalles im Vergleich zur Umgebungsluft weist eine ebenso bimodale Verteilung, jedoch eine deutliche Zunahme von Partikeln vornehmlich biogener Herkunft im "Coarse-Mode" und "Accumulation-Mode" auf (SCHNEIDER et al., 2001).

In der Literatur (in MAYER, 1999; in SEEDORF & HARTUNG, J., 2002) wird der prozentuale Anteil der **Anzahl** von PM 10 Partikeln am Gesamtstaub (PM 100) mit über 90 % beziffert, wobei allein der Anteil für die PM 5 Fraktion bereits zwischen 60 % bis 80 % liegt. Bei der Partikelmassenverteilung beanspruchen die wenigen großen Partikeln den größten **Masseanteil** und die in der Mehrheit vorliegenden kleinen Partikeln machen nur einen sehr geringen Gewichtsanteil aus (SEEDORF & HARTUNG, J., 2002). AARNINK et al. (1999) beziffern den Gewichtsanteil von Partikeln im Schweinestall mit $D > 9 \mu\text{m}$ mit etwa 44 %. Der Massenanteil der alveolengängigen Fraktion wird unterschiedlich mit 6 % bis 20 % bewertet. (siehe GUSTAFSSON, 1999b; siehe MAYER, 1999; SEEDORF & HARTUNG, J., 2002).

2.3.2 Verminderungsstrategien

Der Schwerpunkt der nachfolgend dargestellten Verminderungsstrategien liegt auf der Verminderung der Staubkonzentration der Stallluft mit dem Ziel, die Luftqualität für die Tiere und die im Stall arbeitenden Menschen zu verbessern. Von sekundärer Bedeutung ist in diesem Zusammenhang eine eventuell damit verbundene Minderung der Staubemissionen, die nur in wenigen Untersuchungen ebenfalls gemessen wurde. Die Autoren gehen in der Regel davon aus, dass die Staubemissionen gesenkt werden, wenn die Konzentrationen im Innenraum vermindert werden. Bei dieser Annahme bleibt jedoch einschränkend zu beachten, dass sich die Staubkonzentration und Partikelgrößenverteilung räumlich deutlich unterscheiden können und folglich auch stark abhängig von dem jeweiligen Messpunkt sind (WANG et al., 2000). Dynamische Veränderungen der Staubkonzentration und Partikelgrößenverteilung bei dem Weg der Partikeln durch den Stall zur Abluftöffnung (SCHNEIDER et al., 2001) sind ebenso zu berücksichtigen.

Die prinzipiellen Mechanismen, die den Maßnahmen zur Minderung der Staubkonzentration in der Stallluft zu Grunde liegen, sind:

- Verringerung der Staubfreisetzung aus den primären Quellen wie v.a. dem Futter, der Einstreu, von den Flächen;
- Senkung der Schwebstaubkonzentration durch Förderung partikelvernichtender Prozesse (s.o.), z.B. der Sedimentierung durch Änderung der Ladung, Dichte oder des Volumens der Partikeln oder durch Förderung des Abtransportes der Partikeln durch die Lüftung;
- "Stabilisierung" und Bindung des Staubes zur Verminderung des durch Verwirbelung daraus wieder entstehenden Schwebstaubes;
- Einschränkung von staubaufwirbelnden Vorgängen;
- Vermeidung der Staubaufwirbelung durch die Luftführung;
- Entfernung der Partikeln aus der Stallluft.

Tabelle 24 gibt eine Übersicht über staubmindernde Maßnahmen im Stall und mögliche Reduktionspotenziale. Techniken außerhalb des Stalls, beispielsweise durch Abluftreinigung oder Staubfänger (z.B. PEDERSEN et al., 2000; SEEDORF et al., 1999a; BOTTCHE et al., 1999), bleiben im Rahmen dieser Arbeit unberücksichtigt. Weiterführende Erläuterungen zu der praktischen Umsetzung und ökonomischen Beurteilung der aufgeführten Maßnahmen sind den jeweiligen Quellen zu entnehmen.

In Tabelle 24 wurden zur Bezeichnung des jeweilig untersuchten Staubparameters die Begriffe verwendet, wie sie von den Autoren vorgegeben wurden. Eine eindeutige Zuordnung zu einer Größenfraktion ist nur eingeschränkt möglich (vgl. Kap. 2.3). Es fällt auf, dass bisher nur wenige Untersuchungen konform zur Größenklassifikation nach EN 481 (EN, 1993) durchgeführt wurden.

Die Spanne möglicher Reduktionspotenziale durch verfahrenstechnische Maßnahmen zur Staubkonzentrationsminderung in der Stallluft ist sehr weit. Von besonderem Interesse ist aus gesundheitlicher Sicht eine möglichst große Minderung des Feinstaubes. Die größte Beachtung finden derzeit Methoden, die durch **Verwendung von Wasser und/oder Öl** die Staubpartikeln binden und eine Zurückwandlung in luftgetragene Partikeln (Schwebstaub) möglichst einschränken. Bei der Versprühung von Wasser und vor allem Öl ist jedoch zu beachten, dass die Tröpfchen groß genug sind, um ein ebenfalls unerwünschtes Einatmen von luftgetragenen Öltröpfen (Aerosole) zu verhindern (PEDERSEN et al., 2000).

Der Einfluss der **Fütterungstechnik** auf die Staubkonzentration ist nicht eindeutig. Zum einen werden bei einer rationierten Fütterung mehrere hohe Peaks der Staubkonzentration während der Fütterungszeiten verursacht. Bei ad libitum Futtervorlage ist ein gleichmäßigerer Verlauf der Staubkonzentration zu erwarten (DAWSON, 1991). ROBERTSON (1992) bestimmte bei rationierter Fütterung signifikant höhere Staubkonzentrationen im Vergleich zu einer ad libitum Fütterung. Die Vorteile eines feuchten bzw. nassen Futters relativieren sich, wenn das Futter stark auf Flächen und Tiere verspritzt wird, was nach Abtrocknung eine bedeutende Quelle für die Partikelfreisetzung darstellt (DAWSON, 1991). NILSSON (1982) fand nur geringfügige Unterschiede in der Gesamtstaubkonzentration bei Verabreichung von Nass- oder Trockenfutter.

Tab. 24: Beispiele für verfahrenstechnische Maßnahmen zur Minderung der Schwebstaubkonzentration in der Innenraumluf von Schweineställen

Maßnahme	Staubparameter (vgl. Kap. 2.3)	Reduktionspotenzial (Anhaltswerte)	Autor
Verzicht auf Stroh	Schwebstaub	5-35 %	CIGR (1994)
Nassfütterung statt Trockenfütterung	Schwebstaub <i>Total dust respirable (PM 5)</i>	5-35 % ca. 35-65 % ca. 20-35 %	CIGR (1994); ATTWOOD et al. (1987) TAKAI & PEDERSEN (2000) TAKAI & PEDERSEN (2000)
Fetzzusatz zum Futter	Schwebstaub <i>Total dust respirable (PM 5)</i>	20-55 % 40 % 40-60 %	CIGR (1994) TAKAI et al. (1996) TAKAI et al. (1996)
Rapsölapplikator am Futterautomaten zum Auftragen von Öl auf den Tierrücken beim Fressen	<i>Total inhalable respirable</i>	37-81 % 41-59 %	OSMAN et al. (1999)
Applikation von Öl direkt auf die Tiere	<i>Total dust respirable</i>	95 % 50-95 %	GUSTAFSSON (1999a)
Vernebelung/Versprühung von Wasser	Schwebstaub <i>respirable PM 10</i> <i>Total dust respirable (PM 5)</i>	15-55 % bis 60 % 7 % ca. 30 % ca. 10-15 %	CIGR (1994) GUSTAFSSON (1994) ROELOFS & BINNENDIJK (2001) TAKAI & PEDERSEN (2000) TAKAI & PEDERSEN (2000)
Vernebelung/Versprühung von Pflanzenöl	Schwebstaub Gesamtstaub <i>respirable PM 10</i> <i>PM 5</i> <i>Total dust Inhalable respirable (PM 5)</i>	40-95 % 18 % 50-90 % 20 % 55 % 59 % 79 % 65 %	CIGR (1994) BÖNSCH & HOY (1996) GUSTAFSSON (1994) ROELOFS & BINNENDIJK (2001) ROELOFS & BINNENDIJK (2001) PASZEK et al. (2001) PASZEK et al. (2001) PASZEK et al. (2001)
Vernebelung/Versprühung von Pflanzenöl in Abhängigkeit von der Tieraktivität (aktivitätsgesteuert)	<i>Total dust respirabel (PM 5)</i>	ca. 35-100 % ca. 45-100 %	TAKAI & PEDERSEN (2000)
Ionisierung der Stallluft	<i>Total dust respirable</i>	10 % 40-60 % 30 %	PEDERSEN (1989) TAKAI et al. (1998) PEDERSEN (1989)
Erhöhung der Luftwechselrate	Partikelanzahl Partikelmasse	k. A.. k. A.	BUNDY (1984) HEBER et al. (1988)
Deckenstrahl Lüftung und Oberflurabsaugung i. Vgl. zu Impulsarme Zuluftführung mit Unterflurabsaugung	<i>Total dust respirable</i>	kein Effekt 77 %	GUSTAFSSON (1999a)
Optimierung der Zuluftführung	Schwebstaub	15-55 %	CIGR (1994)
wöchentliches Waschen von Schweinen und Oberflächen	Schwebstaub	bis 15 %	CIGR (1994)
Abduschen von Flächen und Abtrennungen	Schwebstaub	bis 30 %	CIGR (1994)
Absaugen des Staubes von den Oberflächen	Schwebstaub	bis 10 % kein Effekt	CIGR (1994) GUSTAFSSON (1999a)

2.3.3 Innenraumkonzentrationen und Einflussfaktoren

In **Tabelle 25** sind beispielhafte Ergebnisse (ohne Einsatz einer Minderungsmaßnahme, vgl. Kap. 2.3.2) zur mittleren Schwebstaubkonzentration sowie der Rahmenbedingungen im Innenraum von Mastschweinställen mit Flüssigmist und Zwangslüftung bzw. freier Lüftung zusammengefasst. Zur Bezeichnung des jeweilig untersuchten Staubparameters wurden die Begriffe verwendet, wie sie von den Autoren vorgegeben wurden (vgl. Kap. 2.3).

Aus mehreren Untersuchungen sind Beziehungen zwischen der mittleren Staubkonzentration und der Wirkung unterschiedlicher **Einflussgrößen** bekannt. Generell ist zu beachten, dass der Bezug auf eine Einflussgröße nur eine Vereinfachung der komplexen Wechselbeziehungen zwischen den verschiedenen Parametern darstellt. Der Staub im Stall ist grundsätzlich ein multifaktorielles Problem (ATTWOOD et al., 1987; GUINGAND, 1999). Dies ist auch die Ursache für zum Teil widersprüchliche Ergebnisse bezüglich der Wirkung nachfolgender Einflussfaktoren.

Die mittlere Schwebstaubkonzentration (i.d.R. Massenkonzentration) kann nach bisherigem Kenntnisstand umso höher sein, je größer bzw. höher folgende Faktoren sind (positiver Einfluss):

- Alter der Tiere (GUINGAND, 1999; GUSTAFSSON, 1999b);
- Anzahl der Tiere, Tiergewicht (GUSTAFSSON, 1999b; NONNENMANN et al., 1999), Belegungsdichte (Tiere pro m²) (ATTWOOD et al., 1987);
- Größe der Flächen, auf die sich der Staub ablagern kann (GUINGAND, 1999);
- Volumenstrom:
 - Da durch höhere Volumenströme die Staubbildungsrate gefördert wird (TIELEN, 1984; WANG et al., 1999;);
 - Partikelanzahlkonzentration der Partikeln mit $D_{0,3-0,5}$ µm steigt mit höheren Volumenströmen an (GUSTAFSSON, 1999b);
 - Höhere Partikelanzahlkonzentrationen im Sommer (TIELEN, 1984);
- Temperaturdifferenz zwischen Innen und Außen (HEBER et al., 1988);
- Schnelle Abtrocknung der Exkremete auf verschmutzten Flächen bzw. auf verschmutzten Tieren (fördert Übergang in Schwebstaub) (BANHAZI & CARGILL, 1999);
- Verschmutzung (HEBER et al., 1988);
- Tieraktivität (Fütterungsinduziert, Tagesperiodik, Tag/Nacht Unterschied; Aufschreckung durch Kontrollgänge) (z.B.: BATEL, 1977; MAYER, 1999; PEDERSEN & TAKAI, 1999; RIEGER, 2001; SCHNEIDER et al., 2001; ZEITLER, 1988);
- Relative Luftfeuchte in Bezug auf die Partikelanzahl (bei einer geringen Differenz zwischen minimalen und maximalen Luftfeuchten) (GUARINO & NAVAROTTO, 1999).

Tab. 25: Beispiele für mittlere Schwebstaubkonzentrationen bei verschiedenen Rahmenbedingungen unterschiedlicher Haltungssysteme für Mastschweine (ohne Anwendung einer staubmindernden Maßnahme)

	Haltungssystem	Konzentrationsbestimmung ^A	Temperatur [°C]	Relative Luftfeuchte [%]	Partikelgrößenfraktion/ Bezeichnung ^B	Schwebstaubkonzentration [mg m ⁻³]	Beprobungszeitraum	Messzeitraum	Quelle
Zwangslüftung	Spaltenboden	Gravimetrisch Glasfaserfilter	27 (21 bis 34)	48 (32 bis 67)	<i>inhalable respirable</i> (PM 4)	1,03 (0,08-2,54) 0,1 (0,02-0,24)	wöchentlich 24-48 h 15 Proben	1 Mastdurchgang	PREDICALA et al. (2000)
	Spaltenboden	Gravimetrisch Glasfaserfilter	15,4	56	<i>Total dust</i>	2,89 (SD 0,59) ^C	3 mal wöchentlich 48-72 h	7 Wochen (15. Oktober - 29. November)	LEMAY et al. (2000)
	Vollspaltenboden	Streulichtphotometer	23	38	thorakal (PM 10) alveolengängig (PM 4)	0,3 - 0,38 0,08 - 0,91	k. A.	1 Stall, 1 Tag	RIEGER (2001)
	Teilspalten	Gravimetrisch Glasfaserfilter	13-17	58-76	<i>Total dust respirabel</i> (PM 5)	1,99 (SD 0,68) ^C 0,124 (SD 0,055) ^C	8 Proben 24 h	4 Wochen	TAKAI et al, (1996)
	Teilspalten	Gravimetrisch Glasfaserfilter	k. A.	k.A.	<i>Total dust respirabel</i> (PM 5)	0,78 - 1,91 0,09 - 0,3	5 bis 23 Proben pro Versuch	5 Versuche	GUSTAFSSON (1999a)
	Zwangslüftung	Gravimetrisch Glasfaserfilter	22 (14 bis 33)	64 (42 bis 79)	<i>Total dust</i>	6,9 (0,6 - 20,6)	60 Minuten pro Stallbesuch	32 Ställe	HEBER et al. (1988)
	Voll- und Teilspaltenboden	Gravimetrisch Glasfaserfilter	20-23	64-67	<i>inhalable respirable</i> (PM 100) <i>respirable</i> (PM 5)	2,08 - 2,67 0,16 - 0,29	je 4 Messungen (24 h) im Sommer und Winter	an etwa 16 Ställen in Nordeuropa	TAKAI et al. (1998) SEEDORF et al. (1998a, b)
Spaltenboden	Gravimetrisch Glasfaserfilter	20-22	68	<i>Inhalable</i>	1,39	2 mal pro Woche	3 Monate (Mitte Dezember - Mitte März)	NONNENMANN et al. (1999)	
Freie Lüftung	Spaltenboden	Gravimetrisch Glasfaserfilter	26 (17 bis 33)	46 (24 bis 72)	<i>inhalable respirable</i> (PM 4)	1,1 (0,14-2,3) 0,08 (0,01-0,23)	wöchentlich 24-48 h	1 Mastdurchgang	PREDICALA et al. (2000)
	Nürtinger System	Gravimetrisch Glasfaserfilter	9	99	Einatembarer (Gesamt-)Staub	1,2 (1,1 - 1,3)	30 min an zwei Messpunkten	1 Tag (März)	LORENZ & STEFFENS (1995)
	Trauf-First Lüftung Tiefstreu	Gravimetrisch Glasfaserfilter	k. A.	k. A.	<i>Total dust respirabel</i> (PM 5)	0,19 - 0,91 0,034 - 0,215	6 bis 23 Proben pro Versuch	5 Versuche	GUSTAFSSON (1999a)
	Freie Lüftung	Gravimetrisch Glasfaserfilter	21 (6 bis 38)	64 (26 bis 100)	<i>Total dust</i>	8,8 (0,4 - 38)	60 Minuten pro Stallbesuch	56 Ställe	HEBER et al. (1988)

^A vgl. Kapitel 2.4.2; ^B vgl. Definitionen und Anmerkungen in Kapitel 2.3; ^C Standardabweichung (SD)

Die mittlere Staubkonzentration kann hingegen umso geringer sein, je größer bzw. höher nachstehende Einflussfaktoren sind (negativer Einfluss):

- Alter der Tiere beim Vergleich von Ferkeln mit Mastschweinen (je älter, desto weniger Aktivität, relativ weniger Tiere pro Fläche, geringere Raumtemperaturen und somit höhere Luftraten) (ATTWOOD et al., 1987);
- Volumenstrom:
 - Welcher bei einer temperaturgeregelten Zwangslüftung im Sommer höher als im Winter ist (ATTWOOD et al., 1987; GUINGAND, 1999; TAKAI et al., 1998) und bei einer freien Lüftung im Winter höher als im Sommer sein kann (MAYER, 1999);
 - Je höher der Volumenstrom desto größer der Verdünnungseffekt (GUARINO & NAVAROTTO, 1999; TAKAI et al., 1998; WANG et al., 2000);
 - Temperatur (mit Einfluss auf Volumenstrom) (GUARINO & NAVAROTTO, 1999; HEBER et al., 1988) auch bei Partikelanzahlkonzentration (HEBER et al., 1988);
 - Partikelanzahlkonzentration von Partikeln $D > 1 \mu\text{m}$ verringert sich bei hohen Volumenströmen (GUSTAFSSON, 1999b);
- Relative Luftfeuchte:
 - Bei einer großen Differenz zwischen minimalen und maximalen Luftfeuchten (HEBER et al., 1988);
 - Ab einer relativen Luftfeuchte von ca. 70 % können die Partikeln gebundenes und kondensiertes Wasser enthalten, was die Partikelaggregation fördert (TAKAI et al., 1998);
 - Feuchte Flächen binden den Sedimentstaub (TAKAI et al., 1998).

Die Frage, inwieweit die Schwebstaubkonzentration durch die Art des Lüftungssystems (**freie Lüftung oder Zwangslüftung**) beeinflusst wird, kann noch nicht eindeutig beantwortet werden. PREDICALA et al. (2000) konnten während eines Mastdurchganges bei warmen bis milden Umgebungstemperaturen, im Rahmen von zeitgleichen Vergleichsmessungen, keinen signifikanten Unterschied in Temperatur, Luftfeuchte und in der Schwebstaubkonzentration zwischen einem Mastschweinstall mit freier Lüftung und Zwangslüftung nachweisen (Tabelle 25). GUSTAFSSON (1999a) fand in einem frei belüfteten Stall mit Tiefstreu signifikant geringere Staubkonzentrationen (52 bis 75 % Minderung) im Vergleich zu einem zwangsbelüfteten Teilspaltenbodenstall (Tabelle 25). Eine mögliche Erklärung für die deutlich geringeren Staubkonzentrationen des frei belüfteten Stalles sieht der Autor in den im Vergleich höheren Luftfeuchten und in den sehr hohen Volumenströmen vor allem im Frühjahr, Sommer und Herbst. HEBER et al. (1988) fanden, im Rahmen von Messungen in mehreren Praxisställen mit unterschiedlichen Lüftungsprinzipien, signifikant höhere Staubkonzentrationen in den frei belüfteten Ställen. Insgesamt wurde jedoch auch für alle Ställe und Messungen eine umgekehrt proportionale Beziehung zwischen relativer Luftfeuchte und Staubkonzentration nachgewiesen.

Bei Vergleichen der Gesamtstaubkonzentration in einem frei belüfteten Kistenstall mit zwangsbelüfteten Teil- und Vollspaltenbodenställen bestimmte MAYER (1999) eine wesentlich geringere Überschreitungshäufigkeit des Orientierungswertes von 6 mg m^{-3} sowie geringere Maximalwerte in der Raumluft (Aktivitätsbereich) des Kistenstalles. Er führt dies auf den vor allem im Winter sehr guten und wesentlich höheren Luftaustausch zurück. Weiterhin ist den stallklimatischen Beobachtungen zu entnehmen (MAYER, 1999), dass im Aktivitätsbereich des Kistenstalles höhere und wesentlich häufiger relative Luftfeuchten über 80 % gemessen wurden als in den zwangsbelüfteten Ställen. Die Staubkonzentrationen in den nicht belüfteten Ruhekisten waren hingegen sehr hoch. Sie stehen in Zusammenhang zur Nutzungsintensität durch die Tiere, die bei kühlen Außentemperaturen entsprechend hoch war (MAYER, 1999).

2.4 Methoden zur Erfassung und Beurteilung von Stallklima und Emissionen

Die Beurteilung der Umweltgerechtigkeit von Haltungssystemen für landwirtschaftliche Nutztiere dient nach HARTUNG, E. (2002) dem Zweck, dass:

- Schädliche Umweltwirkungen vermieden oder vermindert werden;
- Ein nachhaltiger und optimaler Ressourceneinsatz gewährleistet wird;
- Momentane und zu erwartende gesetzgeberische und gesellschaftspolitische Forderungen befriedigt werden;
- Flexibel auf neue Erkenntnisse reagiert wird.

Vorraussetzungen für eine Erfassung und Beurteilung der Umweltwirkungen, die von der Nutztierhaltung ausgehen können, sind:

- Die Festlegung von System- und Beurteilungsgrenzen;
- Die Bestimmung umweltrelevanter Parameter bzw. Stoffflüsse;
- Die Kontrolle der Stoffflüsse und ihrer Dynamik mittels Quantifizierung und Bilanzierung;
- Die Beschreibung und Quantifizierung der Einflüsse auf, und Wechselwirkungen zwischen den verschiedenen Parametern.

Bei der Beurteilung der Umweltwirkung **eines Haltungssystems auf die umgebende Umwelt** steht die Kontrolle und Quantifizierung der dynamischen Stoffeinträge in das System und Stoffausträge aus dem System anhand von Stoffraten (Stoffmengen pro Zeiteinheit und gemeinsamer Bezugsgröße) im Vordergrund. Bei Anlagen zur Tierhaltung bezeichnet der Begriff **Emission** den Austrag von gasförmigen und partikulären Stoffen mit dem Abluftvolumenstrom und wird über das Produkt aus Stoffkonzentration und Luftvolumenstrom (pro Zeiteinheit) berechnet.

Bei der Beurteilung der **Umwelt innerhalb eines Haltungssystems** gilt das Hauptaugenmerk der Quantifizierung von Stoffgehalten (Konzentrationen) in der das Tier und den Menschen umgebenden Stallluft, denen eine negative Beeinflussung der Lebens- und Arbeitsbedingungen nachgewiesen oder stark vermutet wird.

Zur Umschreibung der Umwelt innerhalb eines Haltungssystems wird der weit gefasste Begriff **Stallklima** verwendet. Stallklima beinhaltet eine Fülle von Einzel-elementen wie Lufttemperatur, Luftgeschwindigkeit, Luftfeuchte, Lichtverhältnisse, Staub- und Keimgehalte sowie chemische Zusammensetzung der Stallluft. Alle diese Größen können sich einzeln, kombiniert oder auch kumulativ auf Leistung, Gesundheit und Wohlbefinden auswirken (VAN DEN WEGHE, 1998).

Die nachfolgenden Kapitel enthalten zunächst eine Übersicht über verschiedene Messverfahren zur Bestimmung von Gas- und Staubkonzentrationen sowie von Abluftvolumenströmen, die für eine Erfassung von Stallklimaparametern und Emissionen notwendig sind. Im Anschluss wird detaillierter auf die Durchführung von Untersuchungen zu Stallklima und Emissionen hinsichtlich allgemeiner Anforderungen, Probenahme, Datenaufbereitung sowie Qualitätssicherung eingegangen.

2.4.1 Bestimmung von Gaskonzentrationen

Allgemein können diskontinuierliche und kontinuierliche Verfahren zur Bestimmung von Gaskonzentrationen unterschieden werden. Im Folgenden wird nur auf die Methoden näher eingegangen, die zur Zeit national und international die größte Bedeutung zur Beschreibung von Stallklima und Emissionen aufweisen. Zur Erfassung von NH_3 -, CO_2 - und CH_4 -Konzentrationen in und aus dem Stall haben sich kontinuierlich arbeitende Messgeräte etabliert, wohingegen für die N_2O -Konzentrationsbestimmung weiterhin auch noch diskontinuierliche Verfahren angewendet werden, **Tabelle 26**. Beispiele für Anwendungen in der Literatur sind in vorgenannten Tabellen (5; 6; 11; 12; 15; 16; 20; 21) sowie in HARTUNG, E. (2002) und RATHMER (2002) enthalten.

Die N_2O -Messung in Ställen mit NDIR- und PAS-Geräten unterliegt gewissen Einschränkungen. Die Ursache liegt in den oftmals sehr geringen N_2O -Konzentrationen im Stall, die sich in der Regel kaum von der natürlichen atmosphärischen Hintergrundkonzentration unterscheiden (vgl. Kap. 2.2.3.3). Durch häufige und exakte Kalibrierungen oder über diskontinuierliche Parallelmessungen mit Flammenionisationsdetektoren (FID) oder Gaschromatographen (GC/ECD) können die Aussagekraft der Messungen verbessert und die Einschränkungen zum Teil kompensiert werden (BROSE, 2000; KAISER, 1999; RATHMER, 2002; NIEBAUM, 2001).

Tab. 26: Messverfahren zur Bestimmung der Konzentrationen von NH₃, CO₂, CH₄, und N₂O in und aus Nutztierställen (verändert nach HARTUNG, E., 2002)

Messverfahren	Gase	Bemerkungen
NH ₃ -Konverter und NO _x -Analyse kontinuierlich	NH ₃	Gute Eignung, Standardverfahren in den Niederlanden
NDIR Nichtdispersive Infrarot-Spektroskopie kontinuierlich	NH ₃ CO ₂ CH ₄	Gute Eignung, Gefahr der Wasserdampf- und CO ₂ -Querempfindlichkeit zu beachten
	N ₂ O	Nachweisgrenze in der Regel nicht ausreichend
PAS-IR Photoakustische Infrarot-Spektroskopie kontinuierlich	NH ₃ CO ₂ CH ₄	Gute Eignung, Messung quasikontinuierlich (30 bis 300 s pro Messpunkt)
	N ₂ O	Nachweisgrenze zur Zeit noch nicht ausreichend; bei neuen PAS-Gerätegenerationen soll die Nachweisgrenze im ppb-Bereich liegen
FTIR Fouriertransformierte IR-Spektroskopie kontinuierlich	NH ₃	In der Regel höhere Messgenauigkeit und niedrigere Nachweisgrenze als NDIR- oder PAS-Verfahren
	CO ₂	Kein Praxiseinsatz, relativ zu teuer
	CH ₄ N ₂ O	In der Regel höhere Messgenauigkeit und niedrigere Nachweisgrenze als NDIR- oder PAS-Verfahren
GC Gaschromatographie diskontinuierlich	N ₂ O	eingeschränkte Eignung, da nur Analyse von Einzelproben; Nachweisgrenze im ppb-Bereich

Eine umfangreiche Beschreibung der Messverfahren und -prinzipien geben beispielsweise BAUMBACH (1990), BROSE (2000), KTBL (2001b), HARTUNG, E., (1995), NIEBAUM (2001) und RATHMER (2002). Im Folgenden wird deshalb ausschließlich auf die Grundlagen der NDIR-Spektroskopie eingegangen, da diese Methode für die eigenen Untersuchungen (vgl. Kap 3.3) die größte Bedeutung hatte.

Die **IR-Molekülspektroskopie** beruht auf der Absorption elektromagnetischer Strahlung im Infrarot bei Wellenlängen, die für eine bestimmte Molekülgruppe charakteristisch sind. Durch die Bestrahlung im IR-Bereich werden Molekülschwingungen, aber auch Rotationen angeregt. Die Gase nehmen dabei in bestimmten Wellenlängenbereichen (Absorptionsbanden) Energie auf und bedingen durch die Absorption eine Abnahme der Strahlungsintensität. Die Messmethode basiert auf dem Lambert-Beer'schen Gesetz, nach dem das logarithmische Verhältnis der Intensitäten eines Lichtstrahles vor und hinter einer Gasprobe proportional zur Konzentration des absorbierenden Gases und zur Länge der Messzelle ist. Bei der **Nichtdispersiven Infrarot (NDIR)-Spektroskopie** wird die Strahlung im gesamten IR-Bereich ausgesendet; es findet also keine spektrale Zerlegung der von der Strahlungsquelle ausgehenden IR-Strahlung durch dispergierende optische Komponenten statt. Bei NDIR-Geräten wird das breite Spektrum des Strahlers zur Selektivierung durch optische Filter und selektive Detektoren eingeschränkt; möglichst auf einen kleinen Frequenzbereich mit hoher Absorption des zu untersuchenden Gases (BAUMBACH, 1990; HEISE, 1996).

Entscheidend für eine gute Eignung der Geräte ist, dass möglichst geringe **Querempfindlichkeiten** zwischen den für die Messung der jeweiligen Gase ausgewählten Spektralbereiche bzw. -linien bestehen. Insbesondere Wasserdampf und Kohlendioxid in der Gasprobe führen auf Grund ihres weiten Absorptionsspektrums zu Querempfindlichkeiten. Diese können im Messgerät direkt oder bei Miterfassung der Störgrößen nachträglich rechnerisch kompensiert werden.

Am Beispiel des verbreiteten NDIR-Gerätes *Binos 4b* der Fa. Rosemount, welches unter anderem auch in den eigenen Untersuchungen verwendet wurde (vgl. Kap. 3.3), werden im Folgenden kurz das physikalische Messprinzip sowie ein beispielhafter Geräteaufbau beschrieben. Grundsätzlich unterscheiden sich verschiedene NDIR-Geräte vornehmlich hinsichtlich ihrer Strahlungsquelle, der Art der Modulation der Infrarotstrahlung sowie der Art der Detektion.

Bei dem Gerät *Binos 4b* durchläuft die von einer Heizwendel abgegebene Infrarotstrahlung in zwei Strahlungsbündeln gleicher Intensität eine aus Mess- und Vergleichsseite bestehende Analysenküvette sowie eine Filterküvette. Die Filterküvette, gefüllt mit einem bestimmten "Störgas", dient der Absorption störender Wellenlängenbereiche aus dem Strahlungsspektrum, um unerwünschte Querempfindlichkeiten zu unterdrücken. Die Strahlung durchläuft anschließend ein Lichtzerhacker- oder Chopperrad, welches abwechselnd die Strahlen aus Mess- und Vergleichsseite freigibt und auf einen selektiven pneumatischen IR-Strahlungsdetektor treffen lässt. Die Selektivität des Detektors für das zu messende Gas wird erreicht, indem dieser mit dem selben infrarotaktiven Gas gefüllt ist; somit ist der Detektor nur innerhalb des vom Füllgas bestimmten Wellenlängenbereiches für Strahlung empfindlich. Der pneumatische Detektor besteht aus der gasgefüllten Absorptionskammer, in die die IR-Strahlung durch ein Fenster eindringen kann, sowie aus einer die Absorptionskammer ringförmig umgebenden Ausgleichskammer. Wird nun im Detektor ein Teil der Strahlung absorbiert, dehnt sich das erwärmte Gas aus und strömt zum Teil durch einen Verbindungskanal in die Ausgleichskammer. Diese Strömung wird von einem Strömungsfühler erfasst und in ein elektrisches Spannungssignal umgesetzt (BAUMBACH, 1990; HEISE, 1996; REINHARDT, 2002).

Zusammenfassend lassen sich verschiedene grundsätzliche Anforderungen an die Messdurchführung und Messgeräte zur kontinuierlichen Bestimmung von Gaskonzentrationen in und aus landwirtschaftlichen Nutztierställen formulieren, **Tabelle 27**.

Tab. 27: Anforderungen an die Messdurchführung und Messgeräte zur kontinuierlichen Bestimmung der Gaskonzentrationen von NH₃, CO₂, CH₄, und N₂O in und aus landwirtschaftlichen Nutztierställen (nach HARTUNG, E., 2002)

Aspekt	Anforderung
Messbereich	NH ₃ : 0,1 - 100 ppm
	CO ₂ : 300 - 5000 ppm
	CH ₄ : 1 - 200 ppm
	N ₂ O: 0,3 - 10 ppm
Auflösung	< 1% vom Messendwert
Nachweisgrenze	< atmosphärische Hintergrundkonzentration
Selektivität	Kompensation bekannter Querempfindlichkeiten
Probenahme	Vermeidung von Adsorption, Diffusion und Kondensation bzw. Absorption
Zeitliche Messwertauflösung	Abhängig von der Messaufgabe; Abstimmung der Messwert-erfassung auf gerätespezifische Anstiegs- und Abklingzeiten (inklusive Spülzeiten) sowie Totzeiten in Messleitungen und Messkammern
Wartung / Kalibrierung	mindestens wöchentliche Gerätekontrolle und eventuell -wartung, Nullpunktjustierung und Kalibrierung
Umgebungsanforderungen	Robust und tauglich für Langzeitmessungen im Praxiseinsatz

2.4.2 Bestimmung von Staubkonzentrationen

Die nachfolgende Einordnung der Methoden zur Bestimmung von Staubkonzentrationen basiert im wesentlichen auf der zusammenfassenden Darstellung in HARTUNG, E. (2002). Weiterführend werden in HINDS (1999) die verschiedenen Messprinzipien ausführlich beschrieben und in mehreren Beiträgen in HINZ et al. (2002) für Anwendungen in der Landwirtschaft diskutiert.

Die **quantitative Erfassung von luftgetragenen Partikeln** erfolgt im allgemeinen mit den in **Tabelle 28** aufgeführten kontinuierlichen und diskontinuierlichen Messmethoden (HOFMANN et al., 1999). In der vorliegenden Arbeit werden nur die kontinuierlichen Methoden näher beschrieben. Für weiterführende Angaben zu den diskontinuierlichen Methoden wird auf die Literaturbeispiele in Tabelle 28 verwiesen. Die Bestimmung der Partikelkonzentration von Schwebstaub erfolgt in Abhängigkeit von den gewählten Messmethoden und verwendeten Geräten entweder auf der Basis der Partikelmasse pro Kubikmeter Luft (mg m^{-3}) als Partikelmassenkonzentration oder auf der Basis der Partikelanzahl pro Kubikmeter oder Liter Luft ($n \text{ m}^{-3}$ bzw. $n \text{ L}$) als Partikelanzahlkonzentration und gegebenenfalls jeweils als Partikelgrößenverteilung (HOFMANN et al., 1999; Tabelle 28).

Tab. 28: Einteilung von Messparametern und Messmethoden zur quantitativen und qualitativen Erfassung von luftgetragenen Partikeln (verändert nach HARTUNG, E., 2002)

Parameter und Literaturbeispiele	Mess- und Analysemethoden
Partikelmassenkonzentration (GUINGAND, 1999; HINDS, 1999; HOFMANN et al., 1999; PHILLIPS et al., 1998; SEINFELD & PANDIS, 1997; WANG et al., 1999)	Glasfaserfilter (GFF) ** - Gesamtstaub: mind. 3 h bei 2,0 L min ⁻¹ - Feinstaub: mind. 6 h bei 1,9 L min ⁻¹ und vorgeschaltetem Cyklon Impaktor (Einfach- und Kaskadenimpaktor) ** Passivsammler** Tapered Element Oscillating Microbalance (TEOM)* Optische Messgeräte (Streulichtphotometer)*
Partikelgröße (HINDS, 1999)	Vorkonditionierung, d. h. Vorschalten von Filtern entsprechend dem ISO Standard Optische Partikelzähler (OPC) * Impaktor (Einfach- und Kaskadenimpaktor) **
Partikelanzahlkonzentration (HINDS, 1999; HINZ et al., 2002; MAYER, 1999; RIEGER, 2001; SCHNEIDER et al., 2002; SEEDORF et al., 1999b; SEINFELD & PANDIS, 1997)	Optische Partikelzähler (OPC)*
Partikelgrößenverteilung: Nach Anzahl (HINDS, 1999; HINZ et al., 2002; RIEGER, 2001; SCHNEIDER et al., 2002;; SEEDORF et al., 1999b)	Optische Partikelzähler (OPC)*
Nach Masse (HINDS, 1999; SCHNEIDER et al., 2001)	Kaskadenimpaktor (z. B. Anderson-Sammler) ** Glasfaserfilter mit entsprechenden Vorsätzen**
Partikelbelastung; chemische Zusammensetzung (adsorbierte Bestandteile) (AARNINK et al., 1999; BÖHM, et al., 1985; SCHNEIDER, et al., 2001; WIESER et al., 1980)	Chemische Analyse** Portable Direkteinlass-Massenspektrometer* Electron-probe X-ray-micro analysis**

*kontinuierliche Messmethoden; **diskontinuierliche Messmethoden

Eine quasi-kontinuierliche Ermittlung der Partikelmassenkonzentration ist mit **TEOM-Geräten** (Tapered Element Oscillating Microbalance) möglich (HINDS, 1999). Bei diesem Messverfahren werden die Partikeln auf einem auswechselbaren Glasfaserfilter, der wiederum auf einem Schwingquarz sitzt, für eine kurze Zeit abgeschieden. Durch die zeitweise Partikelbelastung ändert sich die Schwingfrequenz des Quarzes in Abhängigkeit von der Beladungsmasse. Um zu erreichen, dass die Partikelabscheidung möglichst immer unter niedriger (und daher auch relativ konstanter) Luftfeuchtigkeit erfolgt, wird die Probeluft bei dem TEOM-Gerät auf mindestens 50 °C erwärmt.

Eine ebenfalls kontinuierliche Methode zur Berechnung der Partikelmassenkonzentration stellen optische Verfahren nach dem Prinzip der **Streulichtphotometrie** dar. Das in der Luftprobe durch die Aerosole gestreute Licht wird von der Partikelgröße, -form sowie dem Brechungsindex der Partikeln beeinflusst und steht somit auch in Beziehung zur Partikelmasse (HINDS, 1999; MAYER, 1999; SEINFELD & PANDIS, 1997). Mit Hilfe einer seitens des Herstellers durchgeführten Vorkalibrierung an Hand einer Standard-Partikelgrößenverteilung, kann aus dem im Gerät erzeugten Streulicht die Partikelmassenkonzentration näherungsweise berechnet werden. Da sich aber die typische Partikelgrößenverteilung an den Messorten von der Standardverteilung unterscheiden kann, sollten die Geräte auf die „vor-Ort-Bedingungen“ kalibriert bzw. regelmäßig mit anderen Messmethoden kontrolliert werden. Dies ist vor allem dann der Fall, wenn sich die Partikelform stark von der idealisierten Kugelform des aerodynamischen Durchmessers (D_{ae}) unterscheidet, wie z. B. bei Holzstaub.

Durch austauschbare Vorabscheider im Einlasssystem von einem Partikelmessgerät kann eine bewusste Abscheidung von Partikeln oberhalb einer definierten Grenze der Partikelgröße erreicht werden (HINDS, 1999). So können z. B. durch den Vorsatz eines PM-10 Vorabscheiders bzw. Einlasssystems nur noch Partikeln mit einem $D_{ae} < 10 \mu\text{m}$ bestimmt werden. Deshalb kann durch eine definierte Vorkonditionierung mittels unterschiedlicher Vorabscheider eine indirekte Bestimmung von Partikelgrößenbereichen bzw. Partikelgrößenverteilungen vorgenommen werden.

Eine kontinuierliche Zählung der Anzahl von Partikeln pro Menge Probenluft innerhalb definierter Größenklassen kann durch **optische Partikelzähler (OPC)** vorgenommen werden. Die OPC funktionieren ähnlich wie die bereits oben beschriebenen Messgeräte zur Bestimmung der Partikelmassenkonzentration nach dem Funktionsprinzip der Streulichtphotometrie (HINDS, 1999; SEINFELD & PANDIS, 1997). Der Einsatz optischer Partikelzähler (OPC) findet in der Regel seine Schranken, wenn Probenluft mit sehr hoher Luftfeuchtigkeit, d. h. $> 90 \%$ relativer Luftfeuchte (z. B. aus Abluft von Biofiltern oder -wäschern), analysiert werden soll, da es durch die sehr feinen Wassertropfen zu Fehlmessungen kommen kann. Bei solchen Proben kommen optische Partikelzähler zum Einsatz, die speziell für die Bestimmung der Anzahl und Größe von sich in Flüssigkeiten befindenden Partikeln konstruiert sind (SEEDORF et al., 1999b).

2.4.3 Volumenstrombestimmung

Die Quantifizierung der durch den Stall durch das Lüftungssystem verlassenden Luftmenge (Volumenstrombestimmung) ermöglicht durch Multiplikation mit der jeweiligen Stoffkonzentration in der Stallabluft die Erfassung, Kontrolle und Bilanzierung von Stoffemissionen. Hauptaufgaben von Lüftungssystemen in der Tierhaltung sind die Zufuhr von Frischluft in den Tierbereich (Luftaustausch) und die Abfuhr von überschüssiger Wärme, von Wasserdampf und von Schadgasen, um ein adäquates Stallklima zu gewährleisten.

Soll der Abluftvolumenstrom aus einem System bestimmt werden, hat zunächst eine Erfassung und Beschreibung aller Zu- und Abluftöffnungen des Systems zu erfolgen. Liegt ein geschlossenes System vor, kann unter der Voraussetzung der Druckkonstanz die Zuluft- gleich der Abluftmenge gesetzt werden, d. h. es ist ausreichend entweder den Gesamtzuluftvolumenstrom oder den Gesamtabluftvolumenstrom zu bestimmen.

2.4.3.1 Zwangslüftung

Tierställe bzw. -abteile mit einem **Zwangslüftungssystem**, bei denen Ventilatoren die für den Luftwechsel notwendigen Druckunterschiede erzeugen, werden im allgemeinen als weitgehend geschlossene Systeme betrachtet. Trotzdem sollten die zu untersuchenden Systeme im Vorfeld, an Hand von Nebelproben bei minimaler Winter- und maximaler Sommerlufrate sowie möglichst bei hohen Windgeschwindigkeiten bzw. ungünstigen Anströmungsbedingungen, auf unerwünschte Leckluftströme hin untersucht und diese, wenn vorhanden, beseitigt werden.

Folgende **Messmethoden** stehen theoretisch zur Ermittlung des Luftvolumenstromes in zwangsbelüfteten Stallanlagen zur Verfügung (nach BÜSCHER et al., 2001):

- Direkte Volumenstrombestimmung;
 - Messventilatoren;
 - Differenzdruckmessung mit Normblenden;
 - Ein-Punkt-Messung (bei Kenntnis des Strömungsprofils).
- Indirekte Volumenstrombestimmung (durch Messung der Luftgeschwindigkeit bzw. Erfassung des Strömungsprofils und Multiplikation mit der Fläche der Abluftöffnung);
 - Schleifenmethode mit Anemometer;
 - Raster- oder Netzmessung mit Anemometer.

In der breiten Praxis der Emissionsmessungen hat sich der Einsatz von Messventilatoren inzwischen international als robustes und genaues Standardsystem etabliert (vgl. Tab 5; 11; 15; 20) (BÜSCHER et al., 2001; HARTUNG, E., 2002).

Messventilatoren basieren auf dem Prinzip des Flügelrad-Anemometers, sind jedoch im Idealfall über den gesamten Kanal- bzw. Strömungsquerschnitt ausgehend. Die Flügelräder der Messventilatoren werden durch den Luftstrom in eine Drehbewegung versetzt. Die Flügeldrehzahl ist oberhalb einer bestimmten Drehzahlgrenze ("Trägheitsgrenze") proportional zur Luftgeschwindigkeit und bei entsprechender Kalibrierung ebenso zur Höhe des Luftvolumenstromes. Die Kalibrierung auf den für ihren Einsatz notwendigen Messbereich erfolgt möglichst schon im späteren Einbauzustand des Messventilators an einem Ventilatorprüfstand. Für eine Messung ist der in der Regel lineare Bereich der Kalibrierkurve relevant. Weitere Angaben zu den messtechnischen Kenngrößen von Messventilatoren und Hinweise zu ihrer Verwendung geben BÜSCHER et al. (2001).

2.4.3.2 Freie Lüftung

Bei Systemen mit **freier Lüftung** oder einer Kombination von freier und Zwangslüftung kann nicht von einem geschlossenen System ausgegangen werden. Es ist zu erwarten, dass zeitweise Leckluftströme auftreten, da nicht immer die gesamte Zuluft ausschließlich durch die Zuluftöffnungen und/oder die gesamte Abluft nur durch die Abluftöffnungen in bzw. aus dem System gelangt (BROSE, 2000; DEMMERS et al., 2000). Darüber hinaus liegen bei freien Lüftungssystemen meist sowohl flächenförmige Zu- als auch Abluftöffnungen vor, so dass im Unterschied zu zwangsbelüfteten Systemen (definierte Abluftpunkte; deshalb punktförmige Emissionsquelle), Ställe mit freier Lüftung als diffuse Emissionsquellen bezeichnet werden.

Bei freien Lüftungssystemen sind die treibenden **Kräfte für den Luftaustausch** Druckgradienten am Gebäude, da Druckunterschiede immer zu Luftbewegungen mit dem Ziel des Druckausgleiches induziert werden. Die wichtigsten Faktoren sind, vereinfacht zusammengefasst, Dichteunterschiede zwischen warmen und kalten Luftmassen (Schwerkraftlüftung) sowie unterschiedliche Winddrücke auf den windzugewandten bzw. -abgewandten Gebäudeseiten (windinduzierte Lüftung). Treten thermischer Auftrieb und Windeffekte gleichzeitig auf (Kombinationseffekte), so addieren sich die jeweiligen thermischen als auch windinduzierten Druckdifferenzen zu einer gesamten Druckdifferenz. Ab einer Windgeschwindigkeit von 1,5 m/s überwiegt der Windeffekt den thermischen Auftrieb deutlich (in BROSE, 2000; in NIEBAUM, 2001).

Die **Bestimmung des Abluftvolumenstromes aus frei belüfteten Stallsystemen** stellt im Vergleich zu Zwangslüftungssystemen besondere Anforderungen an die Messmethoden und –geräte. Die repräsentative Erfassung des gesamten Volumenstromes gestaltet sich schwierig sowohl aus räumlichen Gründen (Anordnung, Größe und Form der Ab- und Zuluffflächen), durch geringe Luftgeschwindigkeiten an großflächigen Öffnungen als auch durch die mögliche Umkehrung von Zu- und Abluftströmen (BROSE, 2000). Grundsätzlich kommen zur Volumenstrombestimmung an frei belüfteten Ställen entweder Bilanzmethoden oder ähnlich wie bei Zwangslüftungssystemen Messventilatoren zur Anwendung.

Die Grundlage für **Bilanzmethoden** ist das Gesetz von der Erhaltung der Masse. Hierbei wird zunächst angenommen, dass sich die Frischluft und die Bilanzgröße mit der Stallluft ideal vermischen, also die Abluftkonzentration eines Stoffes gleich der gemittelten Stallluftkonzentration ist (idealer Mischer; Rührkesseltheorie). Unter diesen Bedingungen entspricht die Änderung des Stoffgehaltes der Stallluft der Differenz aus Stoffquellen und Senken. Stoffquellen sind der Stoffstrom, der mit der Frischluft in den Raum eintritt und die Stoffströme, die im Stall freigesetzt werden. Stoffsenken sind der Stoffstrom, der mit der Abluft aus dem Raum abgeführt wird und Senken im Stall, die Stoffe der Raumluft entziehen (z.B. durch Absorption, Adsorption, chemische Reaktionen). Bilanzierungsgrößen können systemeigene Substanzen (Wasserdampf, Wärme, CO₂) oder systemfremde Stoffe (Gase, Radioisotope, Partikeln) sein (MÜLLER, 2001).

Wenn ansonsten alle Größen der Bilanzgleichung bekannt sind, kann der Volumenstrom berechnet werden. Voraussetzung ist hierfür jedoch, dass es während der Untersuchungen zu keinen Leckluft(-stoff-)strömen kommt, d.h. zu Stoffströmen, die ihre Flussrichtung unbemerkt und willkürlich ändern. Weiterhin muss eine repräsentative räumliche und zeitliche Beprobung (vgl. Kap 2.4.4.2) der zu bilanzierenden Stoffkonzentration und die Kenntnis aller Stoffquellen und Stoffsenken gewährleistet sein.

Tabelle 29 fasst verschiedene Bilanzmethoden zur Volumenstrombestimmung aus frei belüfteten Ställen mit kurzen Anmerkungen zur Eignung der Methoden zusammen. Für weiterführende Erläuterungen zu den einzelnen Methoden wird auf die jeweiligen Literaturangaben in Tabelle 29 sowie beispielhaft auf folgende Autoren verwiesen (BROSE, 2000; HARTUNG, E., 2002; MÜLLER, 2001; NIEBAUM, 2001; RATHMER, 2002).

Tab. 29: Bilanzmethoden zur Bestimmung des Luftvolumenstromes bei freier Lüftung (nach HARTUNG, E., 2002)

Methoden	Bemerkung	Autoren
Stoffbilanzmethode CO ₂ -Bilanz	15-20 % Fehler auf der Basis von Tagesmittelwerten; genaue Kenntnis der CO ₂ -Produktion im Stall notwendig (vgl. Kap. 2.2.1.1)	GROOT KOERKAMP et al. (1998) PEDERSEN et al. (1998) PHILLIPS et al. (1998) SCHOLTENS & VAN'T OOSTER (1994) VAN'T KLOOSTER & HEITLAGER (1994)
Wasserdampfbilanz	Abschätzung der Wasserdampfproduktion ist unsicherer als die der CO ₂ -Produktion	PEDERSEN et al. (1998)
Tracergasmethode	Vollständige Durchmischung der Stallluft ist Voraussetzung	DEMMERS et al. (1997)
<i>Abklingmethode</i>	keine kontinuierliche Volumenstrombestimmung möglich	SEIPELT (1999)
<i>Konstante Injektion</i>	Bis 9 % Fehler, wenn die Tracergaskonzentrationen nur an den Zu- und Abluftöffnungen bestimmt werden; sicherste Tracergasmethode	BARBER & OGLILVIE (1984) in DEMMERS et al. (2000) DEMMERS et al. (2000) SCHOLTENS & VAN'T OOSTER (1994)
<i>Konstante Konzentration</i>	Hoher apparativer Aufwand und Regelaufwand	
Wärmebilanzmethode	Sehr große Unsicherheiten durch vielfältige und stark unterschiedliche Quellen und Senken; hoher technischer Aufwand	GROOT KOERKAMP et al. (1998) PEDERSEN et al. (1998) SCHOLTENS & VAN'T OOSTER (1994)
Druckdifferenzmethode	Noch große Unsicherheiten; nur bei hohen Windgeschwindigkeiten anwendbar; großer technischer Aufwand	DEMMERS et al. (1998) SCHOLTENS & VAN'T OOSTER (1994) ZHOU et al. (1997)

Zum Einsatz von **Messventilatoren** zur direkten Volumenstrommessung bei freier Lüftung gibt es bisher zwei unterschiedliche methodische Ansätze. Beide Ansätze stellen den Versuch dar, die bereits für Zwangslüftungssysteme (vgl. Kap. 2.4.3.1) beschriebenen Vorteile der Volumenstrommessung mit Messventilatoren auch für den Einsatz für verschiedene Arten von freien Lüftungssystemen zu nutzen (HARTUNG, E., 2002):

- Prinzip der "großen dynamischen Kammer" nach RATHMER (2002) für diffuse Emissionsquellen, wie z.B. Querlüftungen;
- "Flaschenhalsprinzip" mit Leckluftfratenbestimmung nach BROSE (2000) für halb-diffuse Emissionsquellen wie z.B. Schachtlüftungen.

Bei dem methodischen Ansatz von RATHMER (2002) handelt es sich um eine Erweiterung der offenen dynamischen Kammermethode (AMON, 1998; REITZ, 2000) durch Kapselung (Einhausung) eines Stallabteiles (Emissionsquelle), so dass der gesamte

Raum als **große dynamische Kammer** dient. Bei RATHMER (2002) wurden zwei identische, nebeneinanderliegende Versuchsabteile eines Außenklimastalles mit Spaceboards (Querlüftung) voneinander bzw. von dem restlichen Stallraum eines Praxisstalles abgetrennt. Das erste Abteil blieb unverändert und diente als frei gelüftetes Referenzabteil. Das zweite Abteil wurde nachträglich bautechnisch vollständig gekapselt und mit einem Zwangslüftungssystem versehen. An der in Hauptwindrichtung gelegenen Stallseite wurde ein trichterförmiger Vorbau an die Außenwände angesetzt, durch den die Luft in den Stall eintrat. Auf der windabgewandten Stallseite wurden analog ein Ablufttrichter mit einem Abluftventilator sowie ein Abluftkanal, in dem der Messventilator zur Volumenstrombestimmung positioniert war, angebracht. Um in dem gekapselten Versuchsabteil möglichst realitätsnahe Lüftungsraten und Temperaturen zu erzielen, diente als Führungsgröße der Lüftungssteuerung die Temperatur im nicht gekapselten frei belüfteten Referenzabteil.

Der gewählte Ansatz modifiziert somit einen quer- oder längsbelüfteten Stall ohne Firstabluftöffnungen in ein Abteil mit einer gesteuerten Zwangs-Querlüftung und ist daher besonders für die Volumenstrombestimmung bei windinduzierten (s.o.) Lüftungssystemen geeignet. Die Schranken dieser Methode ergeben sich bei niedrigen Wind- und damit Luftgeschwindigkeiten bzw. bei Windstille, oder bei einer Veränderung der tatsächlichen Windanströmungsrichtung entgegen der durch das Zwangslüftungssystem im gekapselten Versuchsabteil festgelegten Hauptanströmungsrichtung. Hierbei kann es ebenso zu eventuellen Leckluftströmen kommen wie bei kurzzeitigen Windereignissen (Windböen). Bei diesen kann aber zusätzlich die Gefahr bestehen, dass die Ansprechzeit und der Regelbereich der Abluftregelung an Grenzen stößt. Ebenso kann die allein temperaturbestimmte Volumenstromregelung nicht immer garantieren, dass in dem Referenz- und dem Versuchsabteil neben den gleichen Temperaturen auch identische Luftströmungen herrschen. Hierzu wäre die gleichzeitige Messung von Luftströmungsgeschwindigkeiten an repräsentativ ausgewählten Orten im Referenz- und Untersuchungsabteil notwendig (HARTUNG, E. 2002).

Der zweite methodische Ansatz zur kontinuierlichen Bestimmung des Volumenstromes bei freien Lüftungssystemen nach dem „**Flaschenhalsprinzip**“, soll seine Anwendung insbesondere bei der Schwerkraftlüftung finden, bei der die gesamte Abluft über Firstöffnungen entweichen soll. Die zu untersuchenden Ställe bzw. Stallabteile werden bei dieser Methode zunächst durch eventuell nachträgliche bautechnische Maßnahmen zu einer Schacht- bzw. Kaminlüftung modifiziert (BROSE, 2000). Anschließend werden in alle vorhandenen Abluftschächte Messventilatoren zur Bestimmung des Gesamtabluftvolumenstromes eingebaut.

Bei der Wahl einer Schacht- bzw. Kaminform ist zu berücksichtigen, dass die Messgenauigkeit eines Messventilators bei Einbau in einem Rechteckkanal geringer

ist als bei einem runden Kanal. Je kleiner der Anteil der "Messfläche" (durch den Messventilator erfasste Fläche) an der Gesamtfläche ist, umso ungenauer sind die Messwerte (BÜSCHER et al., 2001). Deshalb ist eine Kalibrierung des Messventilators mit Hilfe eines geeigneten Referenzsystems möglichst vergleichbar zu den späteren Messbedingungen vorzunehmen (HARTUNG, E., 2002).

Der grundsätzliche Charakter und die Wirkungsweise einer freien Lüftung wird durch die Bündelung des Abluftstromes in mehreren Schächten bewahrt, aber es kann dadurch auch vermehrt zu Leckluftströmen durch die Zuluftöffnungen in den Seiten- oder Giebelwänden kommen. Diese Gefahr steigt mit zunehmender Größe und Form der Zuluftöffnungen an, d. h. hin zu z. B. Offenfrontställen, bei denen der Anteil der durch die Firstöffnungen entweichenden Abluft zu gering für eine Ermittlung des Gesamtabluftvolumenstroms wird. Die Fläche der jeweiligen Abluftöffnungen sollte eine gewisse Größe nicht überschreiten (ca. 1 – 1,5 m²), damit die sich in Abhängigkeit von Abluftfläche und aktuellem Volumenstrom im Abluftschacht ergebende Luftgeschwindigkeit nicht soweit verringert, dass sie nicht mehr in der Lage ist, die Ansprechschwelle des Messventilators zu überschreiten (HARTUNG, E., 2002).

BROSE (2000) konnte zeigen, dass durch eine kontinuierliche Messung und vergleichende Auswertung der CO₂-Konzentration an allen Zu- und Abluftstellen eines Stallsystems, eine Bestimmung des zeitlichen Anteils von Leckluftströmen vorgenommen und somit bei der nachfolgenden Emissionsratenbestimmung berücksichtigt werden kann. Ideal wäre allerdings eine Methode, mit der nicht nur der zeitliche Anteil sondern auch die Menge an Leckluft quantifiziert werden könnte. Bei Anwendung auf freie Lüftungssysteme, mit räumlich begrenzten Zu- und Abluftöffnungen der modifizierten Schachtlüftung nach dem Flaschenhalsprinzip, kann unter den von BROSE (2000) postulierten Idealbedingungen eine Bestimmung des Gesamtabluftvolumenstroms mit hoher Messgenauigkeit erzielt werden:

- Luftdichte Schließung aller Stallöffnungen, die nicht zum Lüftungssystem gehören;
- Windanströmungsgeschwindigkeiten von kleiner 1,5 bis 2 m s⁻¹;
- Hohe Temperaturdifferenz zwischen innen und außen von größer 8-10 K.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass die beschriebenen Methoden zur Bestimmung des Luftvolumenstromes aus Stallsystemen, mit einer freien oder einer Kombination aus freier und Zwangslüftung, mit teilweise sehr starken Unsicherheiten behaftet sind (vgl. Tab. 29) und/oder sich nur sehr bedingt für eine kontinuierliche Erfassung eignen. Die Auswahl einer geeigneten Methode wird daher im Wesentlichen von den jeweiligen Anforderungen an die Genauigkeit und Kontinuität der zu erwartenden Messergebnisse bestimmt. Da es aber, unabhängig von der gewählten

Methode zur Volumenstrombestimmung, bei allen frei belüfteten Stallsystemen zu Leckluftströmen kommen kann, sollte versucht werden, ihren zeitlichen und mengenmäßigen Anteil möglichst genau zu quantifizieren (HARTUNG, E., 2002).

2.4.4 Durchführung von Untersuchungen zu Stallklima und Emissionen

2.4.4.1 Allgemeine Anforderungen

Anwendungsorientierte Untersuchungen werden im Allgemeinen unter kontrollierten aber variierenden und möglichst praxisnahen Versuchsbedingungen durchgeführt. Die hierbei ermittelten Ergebnisse können aber nur dann als Empfehlungen an die Praxis weitergegeben werden, wenn die Variation der Reaktion unterschiedlich behandelter Versuchseinheiten bei heterogenen und sich verändernden Verhältnissen (Randparameter, tages- und jahreszeitliche Schwankungen, Management, etc.) ermittelt wurden. Das Ziel anwendungsorientierter Untersuchungen ist die Varianten-, Anpassungs-, oder Neuentwicklung von Haltungssystemen und/oder deren Bestandteilen zur Verbesserung der Tierhaltung im Vergleich zu vorhandenen Systemen. Die Vergleiche werden hierbei entweder (nach HARTUNG, E., 2002)

- zwischen unterschiedlichen Tierställen bzw. Versuchseinrichtungen (Versuchseinrichtung = Versuchseinheit) oder,
- innerhalb eines Tierstalls bzw. einer Versuchseinrichtung zwischen unterschiedlichen Versuchseinheiten (Abteile, Buchten bzw. Tiergruppen oder Einzeltiere = Versuchseinheit) durchgeführt.

Die **Konzentration und Emission von Schadgasen** sowie der Volumenstrom weisen eine sehr ausgeprägte tageszeitliche und teilweise jahreszeitliche Dynamik auf (vgl. Kap. 2.1.3; 2.2.1.3; 2.2.2.3; 2.2.3.3; 2.3.3). Um die verschiedenen dynamischen Veränderungen bei Messungen entsprechend erfassen und im Ergebnis abbilden zu können, wurden für die Messung von Emissionen von HARTUNG, E., (1995) und JUNGBLUTH & BÜSCHER (1996) als Minimalanforderungen formuliert:

- Kontinuierliche Messung der Luftrate und der Gaskonzentration;
- Langzeitversuche zur Beschreibung tages- und jahreszeitlicher Effekte.

AMON (1998) stellt aus denselben Gründen detaillierte Anforderungen an Untersuchungen zur Quantifizierung von Schadgasen in und aus landwirtschaftlichen Nutztierställen, **Tabelle 30**. Die begründeten Anforderungen in Tabelle 30 betonen zudem im Sinne einer ganzheitlichen Betrachtungsweise die Berücksichtigung der gesamten Verfahrenskette sowie die parallele Erfassung aller Schadgase und wesentlicher Einflussfaktoren anzustreben, wie z.B. Witterungsbedingungen oder verfahrenstechnische Kenngrößen.

Tab. 30: Anforderungen an die Durchführung von Untersuchungen zur Quantifizierung von Schadgasen in und aus landwirtschaftlichen Nutztierställen (nach AMON, 1998 und HARTUNG, E., 2002)

Anforderungen	Begründung
Gleichzeitige Erfassung von NH ₃ , CH ₄ , N ₂ O und CO ₂ der gesamten Verfahrenskette Emissionsmessungen in der Praxis	Verbesserung der Umweltverträglichkeit landwirtschaftlicher Verfahren Realitätsnahe Emissionsraten
Zeitlich und örtlich repräsentative Beprobung aller Messparameter Kontinuierliche und exakte Erfassung der Konzentration von NH ₃ , CH ₄ , N ₂ O und CO ₂	Emittierende Substrate sind inhomogen zusammengesetzt Tages- und jahreszeitliche Schwankungen der Emissionsrate
Gleichzeitige Erfassung von Gaskonzentration und Luftrate Erfassung emissionsbeeinflussender Randparameter Erfassung und Bilanzierung der systemspezifischen Stoffflüsse	Ermittlung der Emission und Emissionsraten Beschreibung von Ursache-Wirkungszusammenhängen Quantifizierung der Einflussparameter Entwicklung emissionsmindernder Strategien
Darstellung der Emissionsraten auf standardisierter Basis	Nutz- und Vergleichbarkeit von Literaturangaben

Zur Sicherstellung eines internationalen Vergleichs und der Nutzbarkeit der Daten, ist die Darstellung von **Emissionsraten** auf einer standardisierten Basis notwendig. Dies gilt grundsätzlich für alle zu quantifizierenden Abluftinhaltsstoffe. Die Berechnung von Emissionsraten stellt die zwingend notwendige Voraussetzung dar, um verschiedene Haltungsverfahren bzw. Versuchseinheiten auch für unterschiedliche Tierarten miteinander vergleichen zu können. Als ideale Bezugsgröße für die Emissionsrate, die sich aus der Division von Emission (geförderte Stoffmasse pro Zeiteinheit z. B. mg s⁻¹) und Bezugsgröße berechnet, bietet sich die Lebendmasse (LM) der Tiere in Großvieheinheiten (GV; GV = 500 kg LM) an. Als eine weitere denkbare Bezugsgröße würde sich auch die metabolische Körperlebensmasse (LM^{0,75}) eignen (HARTUNG, E., 2002).

Zur Darstellung von **Emissionsfaktoren** im Rahmen der Emissionsinventarisierung ist international der Bezug auf ein(en) Tier(-platz) und ein Jahr üblich (UBA, 2001b, c; FREIBAUER & KALTSCHMITT, 2001). Um Fehlinterpretationen zu vermeiden, müssen die Bezugsgrößen und Rahmenbedingungen (Haltung, Fütterung, Entmistung, Lüftung, Messzeitpunkte und Messzeiträume) klar definiert werden (GROOT KOERKAMP et al., 1998). Es ist zu erläutern, welche Anzahl von Tieren (durchschnittlich, maximal) im Stall angenommen wurde. Der Begriff "Tierplatz" impliziert in der Regel die maximale Tieranzahl im Stall. Die zeitliche Bezugsgröße "Jahr" kann nur auf die Anzahl Tage, in denen der Stall belegt ist (tatsächlich, durchschnittlich, allgemeine Faustzahl), bezogen sein. Wenn jedoch die Grundlage für angegebene Emissionsfaktoren, entgegen der in Tabelle 30 genannten Anforderungen, nur kurzzeitige Messungen sind, ist die Hochrechnung auf eine durchschnittliche Jahresemission kritisch.

2.4.4.2 Probenahme

Sowohl die Stallklimaparameter als auch die Emissionen von Nutztierställen unterliegen **räumlichen und zeitlichen Abhängigkeiten** (vgl. Kap. 2.4.4.1), die bei der Probenahme berücksichtigt werden müssen, wenn möglichst repräsentative Ergebnisse erzielt werden sollen.

Das stallinterne Strömungsfeld übt z.B. einen großen **räumlichen Einfluss** mit Wirkung auf die Gas- oder Partikelkonzentrationsverteilung im Stallraum aus. Im Stall liegt in der Regel ein inhomogenes vertikales und horizontales Konzentrationsfeld vor, das unter anderem von der Art des Lüftungssystems, der Anordnung der Zu- und Abluftöffnungen, der Höhe des Volumenstromes sowie der Stallmöblierung beeinflusst wird (BREHME, 2001). Die räumliche Abhängigkeit erfordert den Einsatz mehrerer Messpunkte bzw. macht eine an die jeweilige Messaufgabe (z.B. Bestimmung der Luftqualität im Tierbereich oder Quantifizierung der Emission) angepasste Auswahl von Messpunkten notwendig (HARTUNG, E., 2002; BREHME, 2001).

Die verschiedenen Kriterien für eine **räumlich repräsentative Probenahme** lassen sich wie folgt zusammenfassen (verändert und ergänzt nach HARTUNG, E., 2002):

- Zur Bestimmung von Gas- und Staubkonzentrationen im Stallinnenraum:
 - Je nach Fragestellung Messpunkte auf Höhe der Atemzone und/oder des Stallpersonals;
 - Randomisierte Verteilung der Messpunkte oder Platzierung aufgrund von Ergebnissen von Vorversuchen;
 - Messpunkte an verschiedenen für die Raumluftrömung typischen Orten;
 - Je nach Fragestellung Beprobung aller Messpunkte mit Hilfe einer sogenannten Messspinne (d.h. eine sich in mehrere gleichlange "Äste" verzweigende Messleitung) oder nacheinander durch jeweils eine eigene Messleitung durch ein gemeinsames Analysegerät oder Beprobung jedes Messpunktes mit je einem Analysegerät;
 - Länge und Material von Ansaugleitungen muss an die Erfassung von Gas- oder Staubkonzentrationen angepasst sein, um Stoffverluste durch Absorption, Adsorption und Kondensation zu verhindern.
- Zur Bestimmung von Gas- und Staubkonzentrationen in der Stallabluft:
 - Repräsentative Beprobung des gesamten Abluftquerschnittes mit Hilfe einer Messspinne;
 - Beprobung der jeweiligen Zuluft- bzw. Hintergrundkonzentration und Abluftkonzentration eines Systems möglichst zeitgleich und kontinuierlich oder in einer möglichst nahen zeitlichen Abfolge (< 10 Minuten); idealerweise innerhalb des Zeitraumes eines Raumluftwechsels;
 - Bei Erfassung von Staubkonzentrationen Beachtung der Erfordernisse für eine isokinetische Probenahme.

- Bei Beprobung mehrerer Messstellen nacheinander mit i.d.R. nur einem verfügbaren Gerät (quasi-kontinuierlich) innerhalb einer Messsequenz:
 - Messsequenz möglichst kurz halten aber ausreichend lang, dass gerätespezifische Anstiegs- und Abklingzeiten, Spülzeiten im Gerät und Totzeiten in Messleitungen berücksichtigt werden, um eine Messwertverschleppung zu verhindern;
 - Beprobungsreihenfolge der Messstellen möglichst randomisieren, um systematische Einflüsse der Messreihenfolge und des Messortes auf die Ergebnisse ausschließen zu können.
- Bei Beprobung mehrerer Messstellen mit mehreren Geräten:
 - Randomisierter Wechsel der Geräte, um einen systematischen Einfluss des Gerätes auf die Ergebnisse ausschließen zu können.

Zeitliche Einflussfaktoren auf Stallklima und Emissionen sind beispielsweise Jahreszeit, Mastabschnitt, Tagesgang und Fütterungszeiten. Als Mindestanforderungen an die **zeitliche Auflösung der Probenahme** und damit an die Messwertaufassung von Stoffkonzentrationen, Volumenstrom und weiterer relevanter Randparameter sollten bei periodischen Messungen oder Langzeitmessungen (zumindest über ein Jahr) die folgenden Kriterien berücksichtigt werden (nach HARTUNG, E., 2002):

- Zur Beschreibung jahreszeitlicher Effekte:
 - Messungen unter Sommer-, Winter- und Übergangsjahreszeitbedingungen (OGINK & KLARENBEEK, 1997; WATHES et al., 1998);
 - Mindestens vier Wiederholungen pro Variante bzw. Behandlung pro Jahreszeit (GROOT KOERKAMP et al., 1998);
 - Mindestens drei bis fünf jeweils einwöchige Messperioden, je nach Länge des Haltungsabschnitts der Tiere (SMITS et al., 2000);
 - Messzyklus ≤ 1 Stunde (Messzyklus = Zeitraum in dem alle zu beprobenden Messorte mindestens einmal parallel oder nacheinander beprobt werden).
- Zur Beschreibung tageszeitlicher Effekte:
 - Zuzüglich der Anforderungen zur Beschreibung jahreszeitlicher Effekte sollte eine möglichst kontinuierliche Messung während des gesamten Haltungsabschnittes und
 - Messzyklen ≤ 15 Minuten erreicht werden, um auch kurzfristige Konzentrationsveränderungen erfassen zu können. Dabei sind jedoch gerätespezifische Anstiegs- und Abklingzeiten, Spülzeiten im Gerät und Totzeiten in Messleitungen zu beachten, um eine Messwertverschleppung zu verhindern.

2.4.4.3 Datenaufbereitung und Qualitätskontrolle

Bei der **Datenaufbereitung** der erfassten Messwerte hat zu Anfang eine eingehende Plausibilitätskontrolle anhand genau definierter Prüfkriterien zu erfolgen. Hiermit sollen „falsche“ Daten, welche z. B. durch Defekte oder Ausfälle einzelner oder mehrerer Messsensoren oder –geräte sowie durch unzureichende Randbedingungen (z. B. Leckluftströme; vgl. Kap. 2.4.3.2) entstehen können, entsprechend berücksichtigt oder eliminiert werden (BROSE, 2000; PHILLIPS et al., 1998). Wenn die Datenanzahl durch eine entsprechende zeitliche Auflösung hoch ist, sollte auf eine Interpolation von fehlenden Messwerten verzichtet werden. Die weitere Datenaufbereitung zur Beschreibung jahreszeitlicher Effekte sowie zum Vergleich unterschiedlicher Haltungssysteme erfolgt im Allgemeinen auf der Ebene von durchschnittlichen Tages- oder Wochenwerten (WATHES et al., 1998). Diese werden im Allgemeinen an Hand der Kennwerte der deskriptiven Statistik auf Basis der mindestens stündlich erfassten Messwerte berechnet (d. h. bei Messzyklen ≤ 1 Stunde ist $n \geq 24$). Hierbei sollten Maximum und Minimum, arithmetischer Mittelwert, Median, Standardfehler, Standardabweichung sowie die Varianz der Tageswerte berechnet werden. Darüber hinaus bietet sich die Ermittlung von zwölfstündigen Tages- (6:00 – 18:00 Uhr) und Nachtdurchschnittswerten (18:00 – 6:00 Uhr) an. Durch sie kann bereits eine erste einschätzende Beschreibung tageszeitlicher Effekte erfolgen (PHILLIPS et al., 1998; SEEDORF et al., 1998b; TAKAI et al., 1998).

Den wesentlichen Grundstein für eine **Datenqualitätskontrolle und Datenqualitätssicherung** der erhobenen Messdaten stellt das Wissen über die maximale „Datenunsicherheit“ der verwendeten Messkette dar (DE SAEGER, 1999; MUNNS, 1999; SNEEK et al., 1999). Daher sollte die Empfindlichkeit und Genauigkeit des gesamten Messsystems bzw. der Messkette und der Datenaufbereitung, wenn möglich, bereits bekannt sein oder in Vorversuchen bestimmt werden.

Um eine nationale und internationale Standardisierung und Qualitätssicherung zu erreichen, wird seit 1991 vom europäischen Komitee zur „Erarbeitung von Messmethoden zur Bestimmung der Luftverschmutzung“ (CEN/TC 264 – Air Quality) versucht, ebensolche Standards zu entwickeln (MUNNS, 1999). Aufgrund der bisherigen Erfahrungen und vor dem Hintergrund einer EU-weiten Einführung weiterer Qualitätssicherungssysteme, können die Messmethoden bzw. -ketten in Abhängigkeit vom jeweiligen Qualitätssystem und dem damit verbundenen Niveau der Datenqualität in drei aufeinander aufbauende Qualitätsstufen eingeteilt werden (DE SAEGER, 1999):

1. Stufe: Qualitäts-Kontrolle (QK):

- Kriterien für die Auswahl des Messortes (repräsentatives Praxissystem);
- Übereinstimmung der Messmethode mit einer Referenzmethode;
- Periodische Kalibration sowie gute Gerätepflege und –wartung.

2. Stufe: Qualitäts-Sicherung (QS):

- Kriterien zur Optimierung der Messortauswahl im Rahmen internationaler Netzwerke;
- Einführung von standardisierten oder validierten Messmethoden;
- Regelmäßige Teilnahme an Ring-Kalibrationen.

3. Stufe: Qualitäts-Zertifizierung (QZ) von Messstellen (inklusive Stufe 1 und 2):

- Einführung eines standardisierten Qualitätssystems;
- Einführung eines Standard-Messprotokolls;
- Aus- und Weiterbildung des Personals sowie Durchführung interner und externer Audits.

Tabelle 31 gibt eine Übersicht, mit welchen Datenunsicherheiten in Abhängigkeit von der gewählten Qualitätsstufe zu rechnen ist. Die dort angegebenen Werte basieren im Wesentlichen auf den Erfahrungen der EU-Qualitätssicherungsprogramme für SO₂ und NO₂.

Tab. 31: Zu erwartende prozentuale Datenunsicherheiten bei der Bestimmung von Luftschadstoffen in Abhängigkeit von der Qualitätsstufe der Messketten (nach HARTUNG, E., 2002; verändert nach DE SAEGER, 1999)

Fehlerquellen	Erwartbare maximale Datenunsicherheit bei:		
	1. Stufe (QK)	2. Stufe (QK + QS)	3. Stufe (QK+ QS + QZ)
Repräsentativität: Kriterien Messortauswahl Mikro-skalige Bedingungen	+/- 30 %	+/- 15 %	+/- 10 %
Beprobung: Verluste in der Probenahmekette	- 25 %	- 20 %	- 15 %
Kalibrationskette: Erstkalibration Transfer des Standards Kalibration vor Ort	+/- 20 %	+/- 15 %	+/- 10 %
Messgeräteaktion: Genauigkeit, Stabilität, Linearität, Selektivität Umwelt- und Randbedingungen Pflege und Wartung	+/- 20 %	+/- 15 %	+/- 10 %
Angestrebte Datenunsicherheit	+/- 45 %	+/- 30 %	+/- 20 %

QK = Qualitätskontrolle; QS = Qualitätssicherung; QZ = Qualitätszertifizierung

Es kann davon ausgegangen werden, dass ca. 40 % der „EU-Monitoring-Networks“ entsprechend der ersten Qualitätsstufe (QK), ca. 40 % entsprechend der zweiten (QK + QS) und ca. 15 % entsprechend der dritten (QK + QS + QZ) arbeiten (DE SAEGER, 1999). Die Abschätzungen der zu erwartenden Datenunsicherheit bei der Bestimmung von Luftschadstoffen in Tabelle 31 zeigen, dass diese zum größten Teil ihre Ursache in unsachgemäßer Beprobung, Kalibration und Messgerätehandhabung haben. Die beschriebenen Zusammenhänge gelten grundsätzlich für alle zu erfassenden umweltrelevanten Parameter (Schadgase, Aerosole) und verdeutlichen die Wichtigkeit der Durchführung von Vorversuchen zur Bestimmung der Nachweisgrenzen, Empfindlichkeit sowie Genauigkeit des gesamten verwendeten Messsystems.

3 EIGENE UNTERSUCHUNGEN - MATERIAL UND METHODE

Die Anpassung und Weiterentwicklung der Messmethoden zur kontinuierlichen Bestimmung von Stallklimaparametern und Stallemissionen im Rahmen von Langzeituntersuchungen sowie die Realisierung und Untersuchung eines alternativen Haltungssystems für Mastschweine, waren wesentliche Bestandteile der Zielsetzung und Aufgabenstellung. Aus diesem Grunde werden auch Material und Methode im Rahmen dieser Arbeit entsprechend ausführlich dargestellt.

3.1 Versuchsstall für Mastschweine und Haltungssysteme

Die Untersuchungen zum Vergleich von Stallklima und Emissionen aus zwei Haltungssystemen für Mastschweine mit unterschiedlichen Lüftungsprinzipien wurden im **Versuchsstall für Mastschweine** (HAUSER, 1999; HARTUNG, E. et al., 1999; HARTUNG, E., 2002) der Universität Hohenheim auf der Versuchsstation für Tierhaltung, Tierzucht und Kleintierzucht "Unterer Lindenhof" in Eningen u. Achalm, Landkreis Reutlingen durchgeführt. Am Standort, der auf einer Höhe von 480 m über NN liegt, ergeben sich im Jahresdurchschnitt Temperaturen von 7,0 °C und Gesamtniederschlagsmengen von 865 mm (PEITZ, 2000). Für die dort vorhandenen Stallanlagen sind Außenlufttemperaturen für den Winter von -14 °C und für den Sommer von < 26°C anzunehmen (PEITZ, 2000). Die Hauptwindrichtungen des Standortes liegen, von der Topographie unterstützt, in westlicher und östlicher Richtung.

Der Versuchsstall ist in eine in Nord-Süd-Richtung verlaufende Gebäudehülle als eigenständiger, geschlossener Komplex integriert worden. Die Längsachse des genutzten Gebäudeteils verläuft in Nord-Süd-Richtung. Nach Norden schließt sich ein Stall für Jungrinder an. Westlich befindet sich in einem Abstand von etwa 10 m ein 4,20 m hoher Milchviehstall. Die Ost- und Westseiten können vom Wind weitgehend frei angeströmt werden.

Auf Grund der Konzeption und Unterteilung des Versuchsstalles in zwei räumlich getrennte Abteile mit gleichen Abmessungen in einem Gebäude sind die Voraussetzungen für anwendungsorientierte Untersuchungen und Systemvergleiche unter praxisähnlichen, kontrollierbaren Bedingungen gegeben. Das Abteil bzw. die Tiergruppe ist dann die entsprechende Versuchseinheit (HARTUNG, E., 2002). Die Umgebungsbedingungen, Tierbetreuung und Routinearbeiten sind bei beiden Abteilen im Parallel- und Rein-Raus-Betrieb als gleich anzusehen. Das System der geschlossenen Schweineproduktion auf der Versuchsstation „Unterer Lindenhof“ implizierte, dass für die Untersuchungen ausschließlich Mastschweine aus der eigenen Nachzucht der Versuchsstation verwendet wurden. Somit konnte eine

einheitliche Genetik, Herkunft und Betreuung der Versuchstiere sichergestellt werden.

Am Institut für Agrartechnik der Universität Hohenheim wurde der Frage nachgegangen, ob eine Umbaulösung für Vollspaltenställe den wachsenden Anforderungen an die Tier- und Umweltgerechtigkeit entsprechen und eine Alternative zum Neubau darstellen kann. Hierzu wurde, ausgehend von einem vorhandenen Vollspaltenbodensystem mit Zwangslüftung im Hohenheimer Versuchsstall für Mastschweine (HAUSER, 1999; STUBBE, 2000), eine Umbaulösung entworfen und umgesetzt, die die Vorteile der einstreulosen Verfahren mit denen neuerer Haltungssysteme mit getrennten Klima- und Funktionsbereichen kombiniert (GALLMANN et al., 2000; HARTUNG, E., 2002). Das südliche der bisher identischen Abteile blieb als Referenzsystem **Vollspaltenboden mit Zwangslüftung ("VSP")** weitgehend unverändert und das nördliche Abteil wurde im Rahmen dieser Arbeit in ein Haltungssystem mit **getrennten Klimabereichen, teilperforiertem Boden und freier Lüftung ("GK")** umgebaut (GALLMANN et al., 2000; HARTUNG, E., 2002).

Die Auswahl des Haltungssystems GK erfolgte in Abstimmung mit dem zu diesem Zeitpunkt tätigen nationalen Arbeitsgruppen zur Bestimmung von Emissionsfaktoren aus verschiedenen Mastschweinehaltungsverfahren (Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft Braunschweig-Völkenrode; Forschungs- und Studienzentrum für Veredelungswirtschaft Weser-Ems in Vechta; Landtechnik Weihenstephan) und in Abgrenzung zu bereits laufenden Forschungsvorhaben an unterschiedlichen frei belüfteten Mastschweineställen (z.B. NIEBAUM, 2001; RATHMER, 2002).

In **Abbildung 1** sind die Ausführungen der beiden Stallsysteme anhand des Grundrisses des Versuchsstalles skizziert. **Abbildung 2** zeigt einen Schnitt des Versuchsstalles bzw. des südlichen Abteiles mit dem Referenzsystem VSP. Die Abteile bzw. Haltungssysteme sind kammartig zum Vorraum angeordnet und befinden sich wegen des ebenerdig aufgesetzten Flüssigmistkellers in 1,60 m Höhe über Bodenniveau. Die Stallbelegung erfolgte in beiden Abteilen zeitgleich im Rein-Raus-Betrieb mit durchschnittlichen Ein- und Ausstallgewichten von 25 kg bzw. 110 kg pro Tier und einer Mastdauer von etwa 110 Tagen (vgl. Kap. 4.2.1.2).

Systembedingte Unterschiede zwischen den Haltungssystemen ergaben sich für die Bereiche Aufstallung und Lüftung, wohingegen das Fütterungssystem und Entmistungssystem in beiden Haltungssystemen gleich waren. Im neuentwickelten System GK als Umbaulösung wurden im Laufe der Untersuchungen einige Veränderungen an der Aufstallung und Betriebsweise (vgl. Kap. 3.2) notwendig, um die Funktionssicherheit der Lüftung und die Einhaltung der Funktionsbereiche der Tiere zu verbessern.

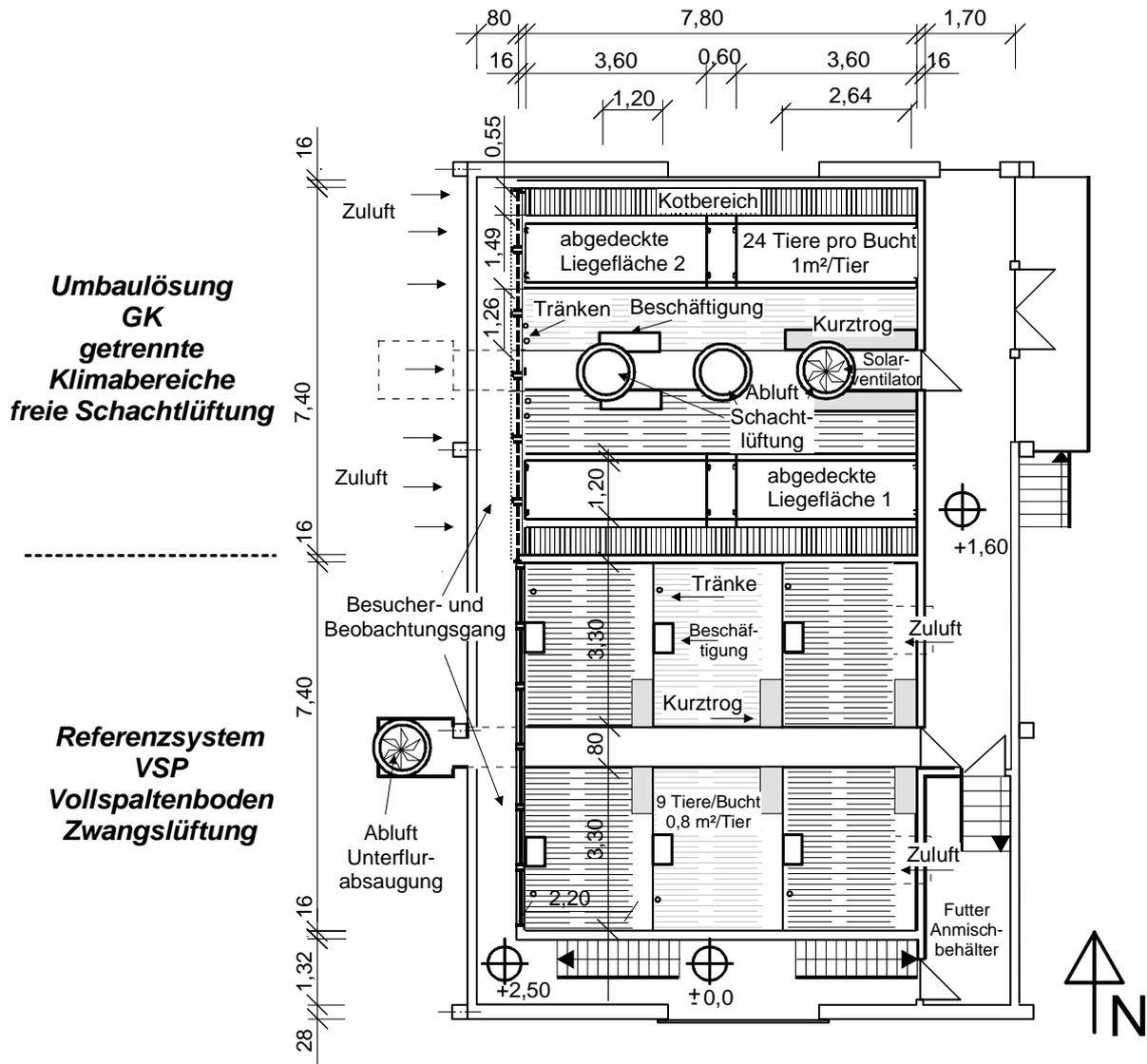


Abb. 1: Grundriss des Versuchsstalles und der Haltungssysteme

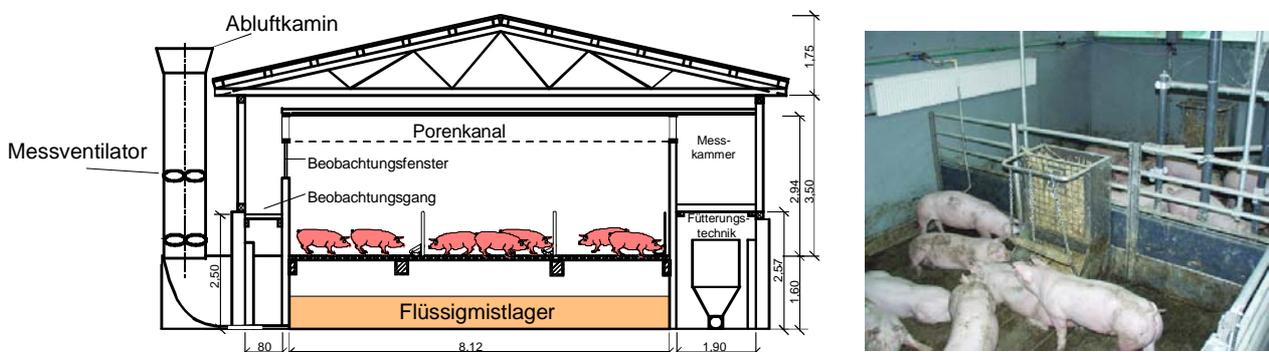


Abb. 2: Schnitt und Blick in den Versuchsstall im südlichen Abteil mit dem Haltungssystem VSP

Aufstallung - Haltungssystem Vollspalten (VSP)

Das System VSP war mit Betonvollspaltenbodenelementen ausgelegt und in sechs Buchten à neun Tiere unterteilt, Abbildung 1. Jede Bucht war mit einem Kurz-Quertrog, Beschäftigungsautomaten mit Strohcontainer, Ketten und Beißholz (STUBBE, 2000) sowie einer Nippeltränke ausgestattet. Die Netto-Grundfläche pro Tier betrug 0,8 m². Auf der westlichen Abteilseite gewährleistete eine Fensterfront von ca. 6 m² den Einfall von Tageslicht. Zusätzlich wurde ganzjährig die künstliche Stallbeleuchtung über ein Lichtprogramm von 8:00 Uhr bis 20:00 Uhr verwendet.

Lüftung - Haltungssystem Vollspalten (VSP)

Das als Unterdrucklüftung ausgelegte Zwangslüftungssystem erfolgte zuluftseitig mit Porenkanälen und abluftseitig mit einer Unterflurabsaugung, **Abbildung 3**. Die Zuluft gelangte über den Vorraum in zwei 1,50 m breite und 0,50 m hohe, wärmegeämmte Porenkanäle (Luftdurchsatz = 450 m³ h⁻¹ m⁻²) mit Zuluftpendelklappen, die parallel zum Kontrollgang mittig über den Buchten angeordnet waren. Die Abluft wurde über 24 Öffnungen (0,10 • 0,40 m) in den Flüssigmistkanalwänden in einen Sammelkanal unter dem Kontrollgang abgesaugt (Abbildung 3).

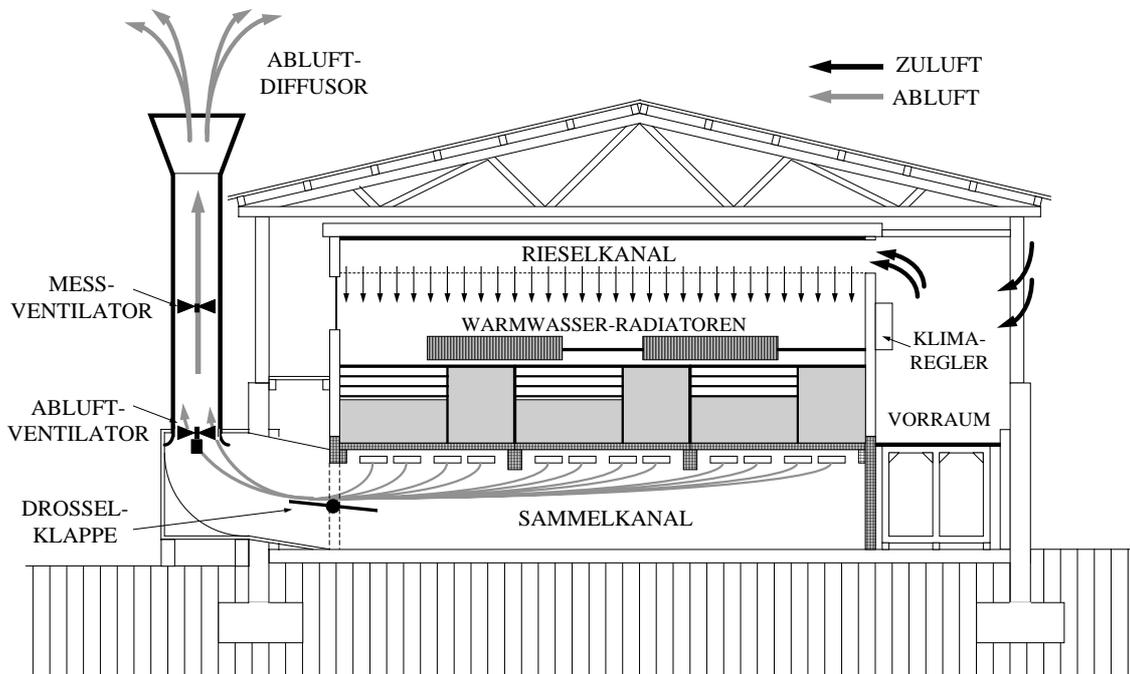


Abb. 3: Schematischer Aufbau des Lüftungssystems im System Vollspalten (VSP) (nach HAUSER, 1999)

Der Abluftsammelkanal führte zum außerhalb der Gebäudehülle liegenden Abluftkamin, der zur Minderung des Anlagengegendruckes mit einem Abluftdiffusor ausgestattet war. Im Übergangsbereich vom Sammelkanal zum Abluftkamin wurde zur zusätzlichen Regulierung des Abluftvolumenstroms je eine Drosselklappe pro Abluftkanal installiert. In den Abluftkaminen ($D = 0,63 \text{ m}$) wurden jeweils ein Abluftventilator und ein Messventilator integriert. Das System VSP war mit einem Energiesparventilator ausgestattet, der eine maximale Leistung von $11\,400 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ bei 30 Pa aufwies. Die Regelung der Lüftungsanlage und Heizung (Warmwasserradiatoren) erfolgte mit Hilfe eines Stallklimareglers, mit dem unterschiedliche lineare, zeitgeführte Temperaturkurven abgefahren werden konnten.

Die eingestellte Temperaturkurve sah in der Regel eine allmähliche lineare Abnahme der Solltemperatur von 22 °C auf 18 °C in 100 Tagen vor. Die maximale Lüftungsrate wurde im Verlauf der Untersuchungen auf 50% bis 60% der maximalen Lüfterleistung begrenzt, die nach Berechnungen gemäss DIN 18 910 (1992) für diesen Stall bzw. diese Stallbelegung ausreichten.

Aufstallung - Haltungssystem Getrennte Klimabereiche (GK)

Das System GK wies zwei größere Buchten à 24 Tiere mit jeweils zwei äußeren perforierten Flächenanteilen und einem abgedeckten, planbefestigten Liegebereich auf. Die Netto-Grundfläche pro Tier betrug 1 m^2 mit einem Anteil der Liegefläche von $0,4 \text{ m}^2$. Jede Bucht verfügte über einen Kurz-Längstrog, zwei Beschäftigungsautomaten und zwei Nippeltränken (Abbildung 1). An der westlichen Abteilseite gewährte die Zuluftfläche (**Abbildung 4**) den Einfall von Tageslicht. Zusätzlich wurde ganzjährig die künstliche Stallbeleuchtung über ein Lichtprogramm von 8:00 Uhr bis 20:00 Uhr verwendet.

Die Buchten waren auf der Längsachse in drei Flächen unterteilt. Wandseitig befand sich jeweils ein 55 cm breiter Spaltenbereich, der vor allem als Kotgang und Ausweichlauffläche dienen sollte. Der bereits vorhandene Betonspaltenboden wurde durch Kunststoffroste ausgetauscht, um den Kotdurchtritt zu verbessern. Mittig schloss sich die $1,20 \text{ m}$ breite planbefestigte, abgedeckte Liegefläche an. Gangseitig wiederum war eine breitere Betonspaltenfläche vorhanden, an der Trog, Beschäftigungsautomaten und Tränken angeordnet waren und die entsprechend als Aktivitätsbereich einzuordnen war, Abbildung 1 und Abbildung 4.

Die Liegefläche bestand aus vorgefertigten, leicht gewölbten Betonelementen, die auf den vorhandenen Betonvollspaltenboden aufgelegt wurden. Die Bodenelemente waren mit einem integrierten Rohrsystem ausgestattet, welches die Beheizung oder Kühlung mit Wasser ermöglichte. Im praktischen Betrieb wurde in der Regel nur die Beheizung der Liegefläche beim Einstallen und als Steuerinstrument zur Einhaltung

der Funktionsbereiche eingesetzt. Die Liegefläche war zunächst durch einen mittigen Durchgang in zwei abgedeckte Liegebereiche pro Bucht aufgeteilt. Später wurde dieser Durchgang (vgl. Abb. 1) an die westliche Stirnseite der Bucht verlegt und es wurde zusätzlich an diesem Durchgang eine temperaturgeregelte Sprühanlage zur Evaporationskühlung der Schweine ("Schweinedusche") installiert.

Zur Liegeflächenabdeckung wurden Hartschaumplatten verwendet, die an den beiden Längsseiten mit einem undurchsichtigen Vorhang versehen waren, so dass die Tiere auf beiden Längsseiten in und aus dem Liegebereich gelangen konnten, Abbildung 4. Die Stirnseiten waren durch die Buchtenwände bzw. die Durchgangabtrennung begrenzt. Die aufgehängte Abdeckung konnte mit Hilfe eines Wickelmotors zur besseren Tierkontrolle und Reinigung hochgezogen werden und bot die Möglichkeit zur stufenlosen Höhenverstellung. Die lichte Höhe der Liegeflächenabdeckung im geschlossenen Zustand wurde von zunächst 75 cm auf 1,10 m erweitert, um das Luftvolumen über dem Liegebereich zu erhöhen. Während des Stallbetriebes zeigte sich, dass kein weiterer Bedarf zur Anpassung und Variation der Höhe ebenso wie der Breite der Liegeflächenabdeckung bestand. Um die Luftqualität im Liegebereich besser kontrollieren zu können, wurden später zur Abführung von belasteter Abluft manuell verstellbare Öffnungen in die Abdeckung eingebracht.

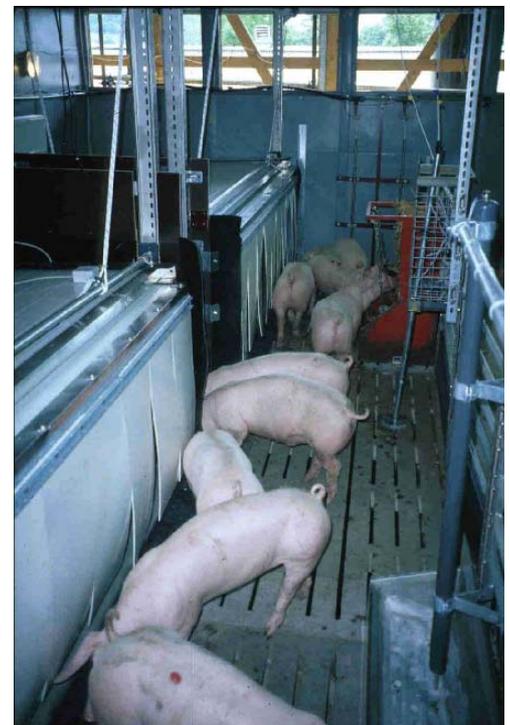
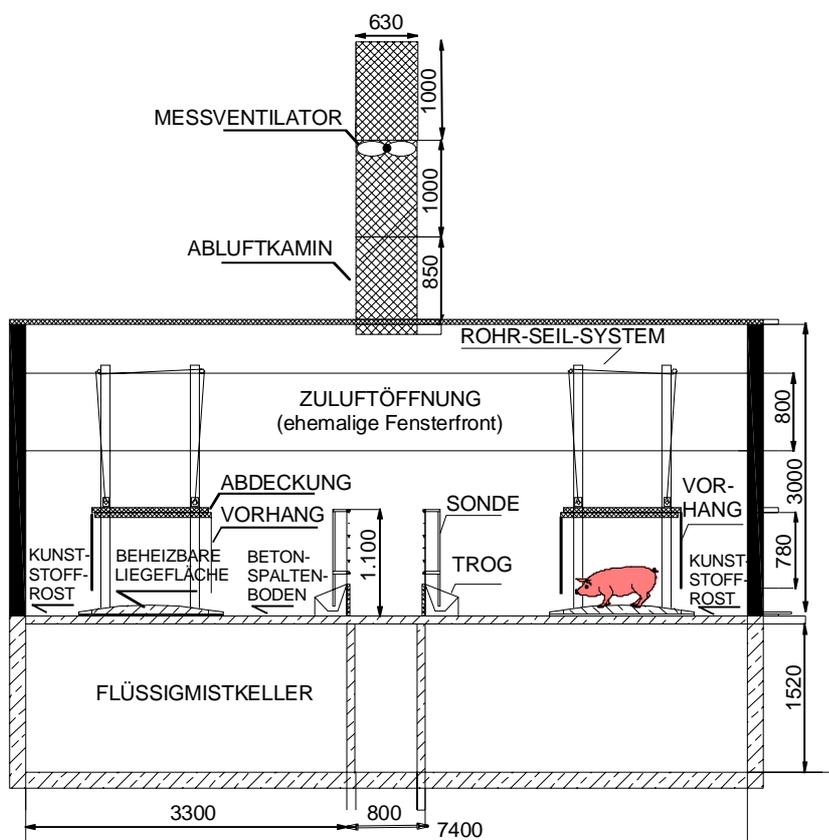


Abb. 4: Schnitt und Blick in den Stall im nördlichen Abteil mit dem Haltungssystem Getrennte Klimabereiche (GK)

Lüftung - Haltungssystem Getrennte Klimabereiche (GK)

Das Lüftungssystem wurde im Zuge der Realisierung des Systems GK als Umbau-
lösung von einem vormals Zwangslüftungssystem in ein freies Lüftungssystem in
Form einer Schwerkraft-Schachtlüftung umgewandelt. Für die Trennung der Klima-
bereiche wurden im Stallinnenraum weitgehend Außenklimabedingungen angestrebt.
Die wärmegeämmte Stall-Innenhülle blieb bis auf die neuen Zu- und Abluft-
öffnungen bestehen. Die bisherigen Zuluftöffnungen sowie Öffnungen für die Unter-
flurabsaugung und den zentralen Abluftkamin wurden stillgelegt und verschlossen.

Abluftseitig wurden oberflur mittig über dem Kontrollgang drei runde Abluftschächte
($D = 63 \text{ cm}$) inklusive Messventilatoren eingesetzt, Abbildung 1 und Abbildung 4. Der
östliche Kamin wurde zusätzlich mit einem Solarventilator ausgestattet. Er diente zur
optionalen Stützventilation und Aufrechterhaltung eines Mindestvolumenstromes bei
Wetterlagen, während derer die Temperaturdifferenz und der Winddruck als
Antriebskräfte für die natürliche Ventilation nicht ausreichten. Die Drehzahl des
Ventilators konnte später zusätzlich in Abhängigkeit von der Innenraumtemperatur
geregelt werden. Der Solarventilator wurde in der Regel nur an kritischen warmen
Tagen der Übergangsjahreszeiten und im Sommer betrieben. Wenn der Solar-
ventilator aktiviert war, förderte er einen konstanten Mindestvolumenstrom von etwa
 $2000 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$. In Abhängigkeit von der Innenraumtemperatur und der gewählten Ein-
stellung der Temperaturregelung war ein Anstieg bis $6000 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ erreichbar. Weiter-
hin konnte alternativ manuell eine konstante Drehzahl des Solarventilators unab-
hängig von der Temperatur eingestellt werden.

Die Zuluft gelangte durch eine 80 cm breite Öffnung (ehemalige Fensterfront,
Abbildung 4) ab 1,70 m über Stallbodenniveau, deren Öffnungshöhe durch ein tem-
peraturgeregeltes Wickelrollo variiert werden konnte, auf der gesamten westlichen
Stallbreite in den Innenraum, Abbildung 1. Die maximale Zuluftfläche betrug 6 m^2 .

Fütterung - Systeme Vollspalten (VSP) und Getrennte Klimabereiche (GK)

Die Fütterung erfolgte in beiden Haltungssystemen mittels einer Sensor-
flüssigfütterung mit 16 Fütterungszeiten von 6:00 bis 22:00 Uhr, **Tabelle 32**. Das
Tier/Fressplatz-Verhältnis betrug am Kurztrog 3:1. Im Mastverlauf wurden vier unter-
schiedliche Futterrationen in Abhängigkeit vom durchschnittlichen Tiergewicht (Vor-
mast, Mittelmast, Endmast ab 70 kg, Endmast ab 90 kg) verwendet, **Tabelle 33**. Der
Wechsel der Futterration erfolgte jeweils zeitgleich in beiden Haltungssystemen. Die
auf der Versuchsstation gemischten Futterrationen basierten in unterschiedlichen An-
teilen auf den Hauptkomponenten Gerste, Triticale, Weizen, Hafer und Soja, sowie
den Zusätzen von Sojaöl, Mineralfutter und Kalziumcarbonat.

Tab. 32: Fütterungszeiten der Sensorflüssigfütterung

Morgens	Mittags	Nachmittags	Abends
6:00	10:30	16:30	19:30
6:20	12:00	17:00	20:00
7:30	13:30	18:00	21:00
9:00	15:00	18:30	22:00

Tab. 33: Inhaltsstoffe der Futtermationen in der Frischsubstanz (FS)

Ration	Vormast < 50 kg LG	Mittelmast 50-70 kg LG	Endmast 70 70-90 kg LG	Endmast 90 > 90 kg LG
Inhaltsstoffe				
Trockensubstanz [%]	88,3	87,7	87,9	87,9
Umsetzbare Energie ME [MJ kg⁻¹ FS]	13,3	13,6	13,2	13,1
Rohprotein [g kg⁻¹ FS]	179	175	164	149
Lysin [g kg⁻¹ FS]	11,2	8,66	9,66	8,68
Methionin + Cystein [g kg⁻¹ FS]	6	5,86	5,73	5,38
Threonin [g kg⁻¹ FS]	6,9	6,44	6,11	5,51
Tryptophan [g kg⁻¹ FS]	2,3	2,19	2,02	1,82
Kalzium [g kg⁻¹ FS]	11,5	2	8,2	8,3
Verdaulicher Phosphor [g kg⁻¹ FS]	6,1	5,7	5,3	4,5
Rohfaser [g kg⁻¹ FS]	36	40	41	45

Entmistung - Systeme Vollspalten (VSP) und Getrennte Klimabereiche (GK)

Zur Entmistung wurde in beiden Abteilen des Versuchsstalles bzw. in beiden Haltungssystemen der Flüssigmist in jeweils zwei Behältern beidseitig des Kontrollganges über den gesamten Mastdurchgang gesammelt, im Innenraum zwischengelagert und erst nach dem Ausstallen über Eimerverschlüsse abgelassen. Auch bei maximaler Flüssigmisthöhe war die Einhaltung eines Mindestabstands zwischen Flüssigmistoberfläche und den Absaugöffnungen der Unterflurabsaugung von mehr als 30 cm gewährleistet (HARTUNG, E., 2002; HAUSER, 1999).

Tabelle 34 gibt eine zusammenfassende Kurzbeschreibung der untersuchten Haltungssysteme im Versuchsstall für Mastschweine.

Tab. 34: Kurzbeschreibung und Vergleich der untersuchten Haltungssysteme

	Referenzsystem VSP Vollspalten	Umbaulösung GK Getrennte Klimabereiche
Aufstallung		
Buchteneinteilung	6 Buchten á 9 Tiere	2 Buchten á 24 Tiere
Buchtenabmessungen ohne Trogfläche	3,30 x 2,20 m	7,80 x 3,30 m
Nettofläche pro Tier	0,8 m ²	1 m ²
Raumvolumen pro Tier	3,5 m ³	3,9 m ³
Lauffläche	Betonvollspalten	gangseitig Betonspalten wandseitig Kunststoffroste
Liegefläche	Betonvollspalten	planbefestigt Beton-Kunsthazelelemente beheizbar/kühlbar 1,50 m breit; 0,4 m ² /Tier
Liegeflächen- abdeckung	entfällt	Hartschaumstoffplatten mit manuell verstellbaren Öffnungen je 1,20 m breit; 1,10 m hoch; beidseitig Streifenvorhänge
Trogranordnung	Einzelquertrog	Längstrog
Tränken	1 Nippeltränke pro Bucht (1 Tränke pro 9 Tiere)	2 Nippeltränken pro Bucht (1 Tränke pro 12 Tiere)
Beschäftigung	1 Beschäftigungsautomat pro Bucht (pro 9 Tiere)	2 Beschäftigungsautomaten pro Bucht (1 Automat pro 12 Tiere)
Lüftung		
Zuluft	Unterdruck-Zwangslüftung Unterflurabsaugung Porenkanal mittig über jeder Buchtenreihe Zuluftpendelklappen	Freie Lüftung Schwerkraft-Schachtlüftung 0,8 x 7,40 große Öffnung ab 1,70 m über Stallbodenniveau über die gesamte westliche Abteilseite; temperaturgeregeltes Wickelrollo zur Querschnittsanpassung
Abluft	zentrale Unterflur- absaugung; beidseitige Absaugöffnungen entlang des gesamten Futterganges; temperaturgeregelte Abluft- drosselklappe; 1 Abluftkamin (D = 63 cm); Energiesparventilator	3 runde Abluftschächte oberflur mittig über Futtergang mit jeweils D= 63 cm; östlicher Kamin zusätzlich mit temperaturgeregeltem Solarventilator zur optionalen Stützventilation ausgestattet
Fütterung	Flüssigfütterung mit Füllstandssensoren im Trog Tier-Fressplatzverhältnis 3:1 16 Mahlzeiten von 6:00 bis 22:00 Uhr Vierphasige nährstoffangepasste Fütterung	
Entmistung	Flüssigentmistung mit Zwischenlagerung der Exkremente im Innenraum über jeweils einen Mastdurchgang in jeweils einem Behälter beidseitig des Futterganges Eimerverschlüsse	

3.2 Untersuchungszeiträume

Die Hauptversuche erstreckten sich über vier aufeinanderfolgende Mastdurchgänge à etwa 16 Wochen zu unterschiedlichen Jahreszeiten von Oktober 1999 bis April 2001, **Tabelle 35**. Ein vorgeschalteter Mastdurchgang diente im Rahmen von Voruntersuchungen vornehmlich zur Anpassung und Überprüfung der Messmethodik. Wie aus Tabelle 35 ersichtlich wird, konnten durch den zeitlichen Ablauf Daten für Übergangsjahreszeiten mit einer hohen tageszeitlichen Variation und für saisonale Effekte an warmen und kalten Tagen jeweils zu Mastanfang und –ende erhoben werden. Die Messungen wurden kontinuierlich über den gesamten Untersuchungszeitraum in hoher zeitlicher Auflösung (vgl. Kap. 3.3) durchgeführt. Auf die genaue Anzahl der jeweiligen Messtage und verwertbaren Datensätzen wird in Kap. 3.4 und in den Tabellen im Anhang eingegangen. Weitere Angaben zu verschiedenen Randbedingungen, die die vier Hauptuntersuchungszeiträume kennzeichneten, sind den Ergebnissen (vgl. Kap. 4.2.1) zu entnehmen.

Tab. 35: Vergleich der Hauptuntersuchungszeiträume und Haltungssysteme

	Anzahl Tiere	durchschnittliches Anfangs- und Endgewicht kg Tier ⁻¹	GV*	Außen- Temperatur °C
Mastdurchgang 1 (MD 1) 18.10.99 – 14.01.00				
Haltungssystem VSP	54	32 - 91	3,5 – 9,8	5,6
Haltungssystem GK	48	35 - 98	3,4 – 9,4	(-4,6 – 15,8)
Mastdurchgang 2 (MD 2) 28.02.00 – 06.06.00	Veränderungen System GK: Temperaturregelung Solarventilator; manuell verstellbare Abluftöffnungen in Liegeflächenabdeckung eingebracht			
Haltungssystem VSP	54	27 - 105	2,9 – 11,4	13,3
Haltungssystem GK	48	27 - 109	2,6 – 10,5	(1,7 – 22,4)
Mastdurchgang 3 (MD 3) 14.08.00 – 01.12.00	Veränderungen System GK: Verlegung eines mittigen Kontrollganges zwischen den Liegebereichen von der Buchtenmitte an die westliche Stirnseite der Bucht; Installation einer temperaturgeregelten Sprühanlage zur Evaporationskühlung			
Haltungssystem VSP	54	20 - 99	2,2 – 10,7	12,8
Haltungssystem GK	48	23 - 110	2,2 – 10,6	(5,5 – 21,2)
Mastdurchgang 4 (MD 4) 15.01.01 – 27.04.01				
Haltungssystem VSP	54	26 - 108	2,8 - 11,7	6,8
Haltungssystem GK	48	25 - 105	2,4 – 10,1	(-1,8 – 18,4)

* GV = Großvieheinheit entsprechend 500 kg Lebendgewicht

VSP: Vollspalten -Zwangslüftung; GK: Getrennte Klimabereiche - freie Lüftung

Parallel zu den eigenen Untersuchungen wurden in denselben Zeiträumen von BEA (2003) die Haltungssysteme unter dem Gesichtspunkt der Tiergerechtigkeit untersucht. Mit Hilfe von Video- und Direktbeobachtungen wurden Daten zu Ruhe-, Sozial-, Spiel-, und Erkundungsverhalten erhoben sowie Integument, Gesundheit und Leistung beurteilt.

Die eigenen Untersuchungen waren vornehmlich als vergleichende anwendungsorientierte Langzeitmessungen ausgelegt. Für die Auswertung und Bewertung der Daten folgt hieraus, dass einerseits anhand der "Wiederholungen" an einem Haltungssystem nachgewiesen werden kann, wie hoch die Schwankungsbreite der Ergebnisse allein innerhalb eines Haltungssystems auch bei vergleichbaren Rahmenbedingungen im Verlauf verschiedener Mastdurchgänge ist. Andererseits können Unterschiede zwischen den Haltungssystemen dementsprechend nur dann nachgewiesen werden, wenn die Variation innerhalb eines Systems geringer ist als die Variation zwischen den Systemen.

Für die Analyse und den Vergleich von tagszeitlichen Effekten bei Stallklima und Emissionen wurden nach Sichtung zahlreicher Tagesverläufe vornehmlich drei, für verschiedene und charakteristische Situationen (Betriebszustände im Stall) typische Messzeiträume von 4 bis 5 Tagen des zweiten Mastdurchganges (März bis Juni 2000) ausgewählt, anhand derer Zusammenhänge, beispielsweise zwischen Temperatur, Volumenstrom, Gaskonzentration und Emission am deutlichsten aufgezeigt werden konnten. In Kap. 4.2.3.7 werden die für den Vergleich tageszeitlicher Effekte ausgewählten Messzeiträume genauer beschrieben.

3.3 Räumliche und zeitliche Probenahme sowie Messgrößen

Die Anordnung der Messstellen im Einzelnen und der verschiedenen Messparameter ist **Abbildung 5** zu entnehmen. Eine Aufstellung der erfassten Messgrößen mit Angaben zu den verwendeten Messgeräten und Abtastraten bzw. der Erfassungshäufigkeit über die Mittelwertbildung enthält **Tabelle 36**.

Die **räumliche Verteilung der Messstellen** und möglichst repräsentative Beprobung erfolgte für die Bilanzierung der Stoffströme im Rahmen der Emissionsmessung unter der Maßgabe, alle Zu- und Abluftöffnungen zu berücksichtigen. Durch entsprechende Verzweigung der Teflonschläuche (Messspinne; vgl. Kap. 2.4.4.2) wurde von jeder Zu- und Abluftöffnung eine Luftmischprobe aus mehreren Entnahmepunkten entnommen. Zusätzliche Messstellen im Innenraum, Liegebereich und Flüssigmistkeller dienten als Stichproben zur Beurteilung der Stallluftqualität und besseren Beschreibung des Freisetzungsgeschehens.

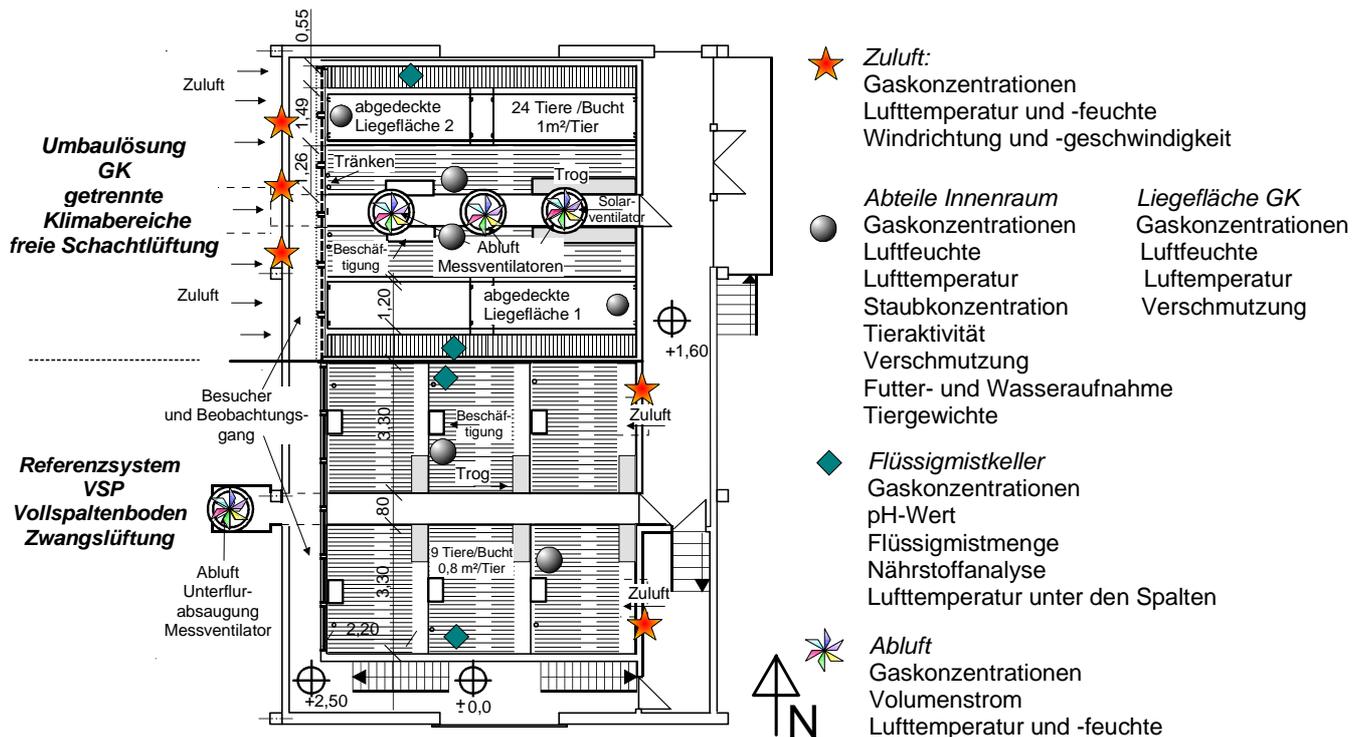


Abb. 5: Anordnung der Messstellen und Messgrößen

Die Gaskonzentrationen, Temperatur und relative Luftfeuchte wurden insgesamt an vier (System VSP) bzw. acht (System GK) Messstellen bestimmt. Durch die Ausführung der freien Lüftung des Systems GK als Schachtlüftung war es genau wie im Abluftkamin des Systems VSP möglich, eine kontinuierliche Volumenstrombestimmung mit kalibrierten Messventilatoren (vgl. Kap. 4.1.1) in allen vier Abluftöffnungen zu realisieren.

Für die Berechnung von Emissionsraten ist es notwendig, die Menge aller Abluftvolumenströme zu erfassen. Besonders bei frei belüfteten Ställen tritt jedoch das Problem auf, dass Luft aus dem Innenraum nicht nur durch die vorgesehenen Abluftöffnungen den Stall verlässt, sondern als Leckluft zum Teil auch aus den Zuluftöffnungen entweicht (vgl. Kap. 2.4.3.2). Leckluftströme sind anhand der an der Zuluftöffnung auftretenden höheren CO_2 -Konzentration der entweichenden Innenraumluft im Vergleich zur Hintergrundkonzentration der Zuluft erkennbar. Hierzu wurde an der Zuluftöffnung des Systems GK eine gesonderte Bestimmung der CO_2 -Konzentration abwechselnd in zwei verschiedenen Höhen mit einer Erfassungshäufigkeit von 75 s vorgesehen (Tabelle 36; Abbildung 5).

Die Windrichtung und Windgeschwindigkeit wurde zur Beschreibung der Windverhältnisse ebenfalls an der Zuluftöffnung des Systems GK an der westlichen Stallseite gemessen (Tabelle 36; Abbildung 5).

Tab. 36: Übersicht der Messgrößen und Messgeräte

Messgröße	Messgerät/-prinzip	Messbereich/ Genauigkeit	Messhäufigkeit pro Messstelle	Abtast- rate
Kontinuierliche Erfassung				
NH ₃	NDIR-Spektroskopie BINOS 4b Fa. Rosemount	0 - 100 ppm ± 1 ppm	Zuluft, Abluft: je alle 15 min	1 s
CO ₂	NDIR-Spektroskopie UNOR 610 Fa. Maihak	0 - 10000 ppm ± 10 ppm	Innenräume, Flüssigmistkeller: je 1 x pro Stunde	
CH ₄	NDIR-Spektroskopie UNOR 610 Fa. Maihak	0 - 300 ppm ± 3 ppm		
CO ₂ Zuluftöffnung System GK	NDIR-Spektroskopie ULTRAMAT U22 Fa. Siemens	0 - 5000 ppm ± 50 ppm	alle 75 s	1 s
Volumenstrom	Messventilator	200 - 10000 m ³ /h ± 20 ppm	Mittelwerte alle 10 s und 3 min	1 s
Lufttemperatur	PT 100 (Widerstand)	-30 - +70 °C ± 1 °C	Mittelwerte alle 5 min	10 s
Relative Luftfeuchte	Kapazitive Feuchtesensoren	0 - 100 % ± 1 %	Mittelwerte alle 5 min	10 s
Tieraktivität (PEDERSEN & PEDERSEN, 1995)	Passiv-Infrarot- Detektor	0 -5 V Skalenwert	Mittelwert alle 30 s	1 s
Staub	Streulicht-Photometer	0,001 - 100 mg/m ³ ± 0,001 mg/m ³	bis 4 Messungen pro Mastdurchgang über 48 bis 72 h Mittelwerte alle 30 s	1 s
<u>Wetterstation:</u> Windrichtung	360 ° Potentiometer	0° - 360° ± 10 %	Mittelwertbildung alle 5 min	1 s
Windgeschwindigkeit	Löffelradanemometer	0,1-128 m/s ± 10 %		
Helligkeit	Fotowiderstand	1 - 200000 Lx ± 20 %		
Diskontinuierliche Erfassung				
N ₂ O	Shimadzu- Gaschromatograph ECD-Detektor	untere Nachweisgrenze 0,30 ppm ± 7 %	Stichproben (vgl. Kap. 4.1.2)	---
Wasserverbrauch	Elektrischer Impulsgeber	L ± 0,1 L	1 x wöchentlich Ablesung	---
<u>Flüssigmist:</u> Menge; Pegelstand	Messung der Füllstandshöhe	---	1 x wöchentlich je eine Probe aus jedem Flüssigmistbehälter	---
pH-Wert	pH-Meter; Bestimmung im Labor an Probe	0 14 pH ± 0,1 pH		
Gesamtstickstoff; löslicher Stickstoff	Kjeldahlverfahren	---		
Kalium, Phosphor Trockenmasse	(Flammen)- photometrie Trocknung	---		
<u>Leistungsdaten der Mastschweine:</u> tägliche Zunahmen	Wiegen	---	etwa alle 4 Wochen	---
Futtermittelnutzung	Futtermittelnutzung	---	wöchentlich	---
Tier-/Flächen- verschmutzung	Erhebungsbogen	---		

Generell wurde es als sinnvoll erachtet, eine hohe **zeitliche Auflösung** unter Berücksichtigung der Einpegelzeit des jeweiligen Messgerätes oder -sensors zu wählen, um Schwankungen der Messgrößen und kurzzeitige Ereignisse und Veränderungen sichtbar machen zu können.

Zur **Konzentrationsbestimmung von NH₃, CO₂ und CH₄** wurde jeweils ein spezifisches Gasanalysegerät nach dem Prinzip der Nichtdispersiven Infrarotspektroskopie (NDIR) genutzt (vgl. Kap. 2.4.1). Die zeitgleiche Bestimmung der Gaskonzentrationen von NH₃, CO₂ und CH₄ konnte nur quasi-kontinuierlich für die einzelnen Messstellen nacheinander erfolgen. Hierbei betrug die Beprobungszeit pro Messstelle 150 s bei einer Einpegelzeit von 120 s, so dass nur die Messwerte der letzten 30 s (Abtastrate = 1 s) gemittelt und abgespeichert wurden. Die notwendige Beprobungszeit wurde in Voruntersuchungen mit Prüfgasen für die Gegebenheiten im Versuchsstall ermittelt. Bei der Festlegung der Beprobungszeit wurden die maximalen Totzeiten in den Teflonschläuchen sowie die Anstiegs- und Abklingzeiten der Geräte ermittelt und auch die teilweise hohen Gaskonzentrationsunterschiede zwischen den Messstellen berücksichtigt. Durch eine entsprechende Leitungsführung der Teflonschläuche von den Abteilen zur Messkammer wurde erreicht, dass die Probenluft nur Temperaturveränderungen von geringeren zu höheren Temperaturen ausgesetzt war. Somit konnte sichergestellt werden, dass keine Kondensation von Wasserdampf der Probenluft in den Schläuchen auftrat. In diesem Fall konnte auf eine Dämmung und Beheizung der Schläuche verzichtet werden.

Über einen Messstellenumschalter wurde die jeweilige Probenluft der einzelnen Messstellen über je einen Teflonschlauch in eine Laborflasche (Reservoirgefäß) gesaugt, woraus wiederum die Gasanalytoren mittels eigener Pumpen ihr Probenvolumen bezogen. Hierbei erfolgte jeweils zeitgleich eine Bestimmung der relativen Luftfeuchte und Temperatur der Probenluft, um daraus den Wasserdampfgehalt der Luft an der jeweiligen Messstelle zu berechnen. Diese Größe wurde für die nachträgliche rechnerische Korrektur der gemessenen Gaskonzentrationen um die entsprechende Wasserdampfquerempfindlichkeit bei der NH₃- und CH₄-Messung benötigt (vgl. Kap. 4.1.2).

Die **Abfolge der Beprobung** der Gaskonzentrationen an den verschiedenen Messstellen war darauf ausgelegt, dass sowohl die Beprobung der jeweiligen Zuluft und Abluft eines Systems direkt hintereinander als auch ein Vergleich der beiden Haltungssysteme möglichst oft und dicht hintereinander erfolgte, **Tabelle 37**. Innerhalb von 15 min war die Beprobung der Zu- und Abluftstellen beider Haltungssysteme abgeschlossen (Tabelle 37). Die Messstellen im Innenraum, in den Liegebereichen und im Flüssigmistkeller wurden nur einmal pro Stunde ebenfalls innerhalb von 15 min beprobt.

Tab. 37: Unterteilung der Beprobungsreihenfolge der Messstellen zur quasi-kontinuierlichen Konzentrationsbestimmung von NH₃, CO₂ und CH₄

1. Zyklus (15 min)	2. Zyklus (15 min)	3. Zyklus (15 min)	4. Zyklus (15 min)
VSP Abluft	VSP Abluft	VSP Abluft	VSP Innenraum
VSP Zuluft	VSP Zuluft	VSP Zuluft	VSP Flüssigmistkeller
GK Zuluft	GK Zuluft	GK Zuluft	GK Innenraum
GK Abluft 1	GK Abluft 1	GK Abluft 1	GK Flüssigmistkeller
GK Abluft 2	GK Abluft 2	GK Abluft 2	GK Liegefläche 1
GK Abluft 3	GK Abluft 3	GK Abluft 3	GK Liegefläche 2

VSP = Haltungssystem Vollspalten; GK = Haltungssystem Getrennte Klimabereiche

Somit erfolgte innerhalb einer Stunde dreimal hintereinander für 15 min die Bestimmung der Gaskonzentrationen für die Emissionsberechnung und einmal anschließend die Beprobung der restlichen Messstellen (Tabelle 37). Es wurde auf eine Randomisierung der Beprobungsabfolge zugunsten der gewünschten zeitnahen Beprobung von Zu- und Abluft bzw. für den Systemvergleich verzichtet. Voruntersuchungen haben gezeigt, dass ein systematischer Einfluss der Beprobungsreihenfolge auf die Gaskonzentration weitgehend ausgeschlossen werden konnte (vgl. Kap. 4.1.2).

Die **Volumenstrombestimmung** in allen vier Abluftkaminen erfolgte zeitgleich mit Messventilatoren, die den gesamten Abluftquerschnitt erfassten und im Abstand von 1,7 m hinter dem Abluftventilator (System VSP) bzw. von der unteren Schachtoffnung (System GK) eingebaut waren. Mit einem Frequenz-Spannungs-Wandler wurde die Umdrehungsfrequenz der Messventilatoren in ein Spannungssignal umgewandelt. Der lineare Zusammenhang zwischen Signalspannung und Volumenstrom wurde bei der Kalibrierung jedes Messventilators an einem Ventilatorprüfstand ermittelt (vgl. Kap. 4.1.1).

Zur Bestimmung der **Staubkonzentration** standen sechs Streulichtphotometer (vgl. Kap. 2.4.2) "DusttrackTM" der Firma TSI zur Verfügung. Die Geräte geben eine Staubmassenkonzentration aus, die mittels eines internen Kalibrierungsfaktors aus der Partikelanzahl und -größe berechnet wird. Das Streulicht ist abhängig von der Partikelgröße, dem Refraktionsindex und den lichtabsorbierenden Eigenschaften der Partikel. Durch den Aufsatz eines entsprechenden Einlasskopfes konnte die Messung für PM 10, PM 2,5 oder PM 1,0 (vgl. Kap. 2.3) durchgeführt werden.

Parallele Staubmessungen wurden bis zu viermal pro Mastdurchgang für eine Dauer von 48 bis 72 Stunden bei einer Abtastrate von 1 s und Mittelwertbildung alle 30 s im Innenraum der beiden Haltungssysteme durchgeführt. Für die Auswertung wurden die Messwerte des in der Regel ungestörten zweiten Messtages von 0:00 bis 24:00 Uhr herangezogen. Die Messstelle befand sich etwa 1 m über dem Boden in

der Nähe des Kontrollganges und des Troges. Ergänzend wurden Vergleichsmessungen mit einem optischen Partikelzähler (vgl. Kap. 2.4.2) ("DustcheckTM"; Grimm Inc. Model 1.108), der über die Partikelanzahl- und -größenverteilung Aufschluss gibt, durchgeführt (SCHNEIDER et al., 2001).

Zur Erfassung der durchschnittlichen **Tieraktivität** wurden in beiden Haltungssystemen je zwei Passiv-Infrarot-Detektoren, die modifizierten handelsüblichen Bewegungsmeldern entsprechen (PEDERSEN & PEDERSEN, 1995), verwendet. Je ein Aktivitätssensor wurde über einer Buchtenreihe an der Decke befestigt. Im Gegensatz zum System VSP wurden im System GK die Sensoren nicht waagrecht zum Boden installiert, sondern in einer Bucht mehr "in Blickrichtung" auf die Beschäftigungsautomaten und in der anderen Bucht mehr "mit Blick" auf den Trog ausgerichtet (vgl. Abbildung 5).

Die Änderung des Spannungssignals der Aktivitätssensoren spiegelt sehr gut die Änderungen der durchschnittlichen Aktivität einer Tiergruppe im vom Sensor erfassten Bereich wieder. Dabei besteht jedoch keine proportionale Abhängigkeit zwischen der Anzahl der aktiven Tiere und der Signalthöhe (PEDERSEN & PEDERSEN, 1995). Dennoch kann mit Hilfe einer parallelen Tierbeobachtung in gewissem Umfang der Signalverlauf mit dem mittleren Aktivitätsmuster einer Tiergruppe, das beispielsweise durch Fütterungszeiten und Tag/Nacht-Unterschiede gekennzeichnet ist, in Übereinstimmung gebracht werden. Des Weiteren gibt das Aktivitätssignal Aufschluss über Zeiten mit plötzlich erhöhter Aktivität der Tiergruppe, die Ursache für sprunghafte Änderungen der Stallklimaparameter und Emissionen sein können.

Alle weiteren kontinuierlich erfassten Messgrößen wurden an den verschiedenen Messstellen ebenso zeitgleich mit einer maximalen zeitlichen Auflösung von 5 min aufgenommen (Tabelle 36). Die PC-gestützte Datenerfassung sowie Ansteuerung des Messstellenumschalters erfolgte mit Hilfe der Software Labtech NotebookTM für Windows, Version 9.2.

Die **N₂O-Konzentrationsbestimmung** konnte im Rahmen dieser Untersuchungen nur stichprobenartig durchgeführt werden, da kein kontinuierlich arbeitendes Messgerät zur Verfügung stand, das eine zuverlässige N₂O-Konzentrationsbestimmung der Stallluftproben mit einer entsprechend notwendigen feinen Auflösung gewährleisten konnte. Die punktuelle Erhebung der N₂O-Konzentrationen aus mittels Vacutainern entnommenen Luftproben und anschließender Analyse am Gaschromatographen, erlaubte somit nur eine Einschätzung der stallspezifischen N₂O-Konzentrations- und Emissionshöhe. Die Auswertung und Umrechnung der vom Gaschromatographen ausgegebenen Peak-Areas in N₂O-Konzentrationen sowie die Anwendung von Drift- und Druckkorrektur sind in MOTZ (2003) beschrieben.

3.4 Datenaufbereitung und Emissionsberechnung

Im Rahmen der wöchentlichen Routinearbeiten erfolgte die Wartung und Kontrolle der Messgeräte vor Ort am Versuchsstall. Des Weiteren war eine tägliche Kontrolle der Messwerterfassung, Überwachung der Messwerte und Funktion der Sensoren durch Zugriff auf den Messrechner über eine Modemverbindung vom Arbeitsplatz aus möglich. Im Folgenden wird insbesondere genauer auf die Verfahrensweise der Datenkontrolle und -aufbereitung bei der Erfassung der NH_3 -, CO_2 - und CH_4 -Konzentrationen und der Emissionsberechnung eingegangen. Die grundsätzliche Vorgehensweise, regelmäßig gerätespezifische Kalibrier- und Wartungsmaßnahmen durchzuführen, die Messwerte einer Plausibilitätsprüfung zu unterziehen sowie die Daten für verschiedene Fragestellungen entsprechend aufzubereiten, galt für die weiteren Messgrößen entsprechend.

Mit dem Ziel, nur zuverlässige Daten für die weitere Auswertung zu selektieren, umfasste die **Datenaufbereitung**:

- Drift- und Wasserdampfkorrekturen der Gaskonzentrationen;
- Bestimmung von Leckluftzeiträumen anhand der Prüfkriterien CO_2 -Konzentration an der Zuluftöffnung, Höhe der Volumenströme und Anströmung des Stalles;
- Plausibilität und Vollständigkeit der Datensätze;
- Berücksichtigung technischer Defekte und besonderer Ereignisse.

Die Gaskonzentrationen von NH_3 , CO_2 und CH_4 wurden zunächst um die im jeweiligen Abspeicherzeitraum (i.d.R. eine Woche) erfasste **Nullpunktdrift** korrigiert. Die monatliche Überprüfung der **Empfindlichkeitsdrift** der Gasanalysegeräte ergab so geringe Abweichungen, dass eine Korrektur der Einzelwerte nicht notwendig wurde. Des Weiteren erfolgte ein Abzug der gerätespezifischen **Wasserdampfquerempfindlichkeit** bei der NH_3 - und CH_4 -Messung von den erfassten Gaskonzentrationen, das durch die Bestimmung des Wasserdampfgehaltes der Luft an den verschiedenen Messstellen über die gesamte Messdauer möglich wurde. Die im Rahmen einer eingehenden Plausibilitätsprüfung als fehlerhaft erkannten Messwerte wurden nicht weiter verwendet. Auf eine Interpolation von Messwerten für fehlende Zeiträume konnte auf Grund der ausreichenden Datenmenge und Datendichte verzichtet werden.

Anhand erhöhter CO_2 -Konzentrationen im Vergleich zur Hintergrundkonzentration an Stallöffnungen, die eigentlich als Zuluftöffnungen dienen, konnte sehr gut erkannt werden, wenn an diesen Stellen Luft als **Leckluftstrom** aus dem Stall austrat (vgl. Kap. 2.4.3.2). Die Luftmenge (Volumenstrom) dieser ungewollten Leckluftströme konnte jedoch nicht zuverlässig bestimmt werden. Somit mussten Zeiträume, in

denen Leckluftströme anhand der oben genannten Prüfkriterien detektiert wurden, von der Emissionsberechnung ausgeschlossen werden.

Weiterhin musste ein Teil der Daten aufgrund von **technischen Defekten** am Messwerterfassungssystem, allgemeinen Betriebsstörungen sowie Pumpendefekten oder **Undichtigkeiten am Messsystem** verworfen werden. Letztere konnten aufgrund nur geringfügig geringerer Gaskonzentrationswerte während der laufenden Messungen nur unzureichend erkannt werden. Eine Selektion dieser Messwerte war oftmals erst im Vergleich zu allen Daten der Messreihen möglich. Es wurden ausschließlich selektierte Daten für weitere Auswertungen und Berechnungen verwendet. Unsichere Daten und Zeiträume wurden vollständig verworfen.

Die **Auswertung der Langzeitmessungen** erfolgte auf der Basis von Tagesmittelwerten. In die Berechnung der Tagesmittelwerte gingen alle Einzelmessungen von 0:00 bis 24:00 Uhr ein. In Abhängigkeit von der Messhäufigkeit pro Stunde basierten die Tagesmittelwerte der Volumenströme auf $n = 576$ Einzelwerten, die Emissionsraten, Zu- und Abluftkonzentrationen auf $n = 72$, alle weiteren Konzentrationen auf $n = 12$ sowie die Temperaturen, relativen Luftfeuchten und Winddaten auf $n = 288$ Einzelwerten. Für die Darstellung von Ergebnissen anhand von Tagesmittelwerten galt:

- Verwendung nur von vollständig gemessenen Tagen über 24 Stunden;
- Ausschluss von Tagen mit außergewöhnlichen Umgebungsbedingungen (z.B. Sturm, Orkan) und von Tagen, an denen die Messung durch externe Einflüsse, die wöchentliche Routine, Aktionen und Reparaturen im Stall und am Messsystem gestört wurden (i.d.R. etwa 20 Tage pro Mastdurchgang).

Durch die notwendige und kritische Datenselektion standen in Abhängigkeit vom Messzeitraum und der Messgröße nur etwa 30 % - 60 % der Messtage eines Mastdurchganges für die Ergebnisdarstellung zur Verfügung. Im Rahmen von praktischen Untersuchungen ist es nicht ungewöhnlich, wenn ein großer Anteil der Daten verworfen werden muss (BROSE, 2000; RATHMER, 2002; NIEBAUM, 2001). Daher ist es wichtig, kontinuierliche Daten zur Verfügung zu haben, die einerseits eine eingehende Plausibilitätsprüfung erst ermöglichen, und andererseits nach Selektion noch genügend Aussagekraft zum Nachweis von tages- und jahreszeitlichen oder kurzzeitigen Effekten aufweisen. Durch die Langzeitmessung wiederum erhöht sich die Chance, für verschiedene Randbedingungen zuverlässige Daten zu erhalten und durch Wiederholungen bestätigen zu können.

Zur **Berechnung des Emissionsmassenstromes** der Gase i (NH_3 , CO_2 und CH_4) wurde für jede Abluftöffnung getrennt von der dort gemessenen Abluftkonzentration die herrschende Hintergrundkonzentration ($c_i^{\text{Abluft}} - c_i^{\text{Zuluft}}$) abgezogen und das Ergebnis mit dem jeweiligen Abluftvolumenstrom \dot{V} multipliziert. Die Gesamtemission des Haltungssystems GK ergab sich durch Addition der an den drei Abluftöffnungen berechneten Emission. Für die Hintergrundkonzentration wurde für jeden Emissionsmesszyklus (Tabelle 37) die niedrigere der an beiden Systemen auf entgegengesetzten Stallseiten (Ost; West; Abbildung 5) erfassten Zuluftkonzentrationen verwendet. Da an der Zuluftöffnung des Haltungssystems GK durch Austritt von Innenraumluft (Leckluft) höhere Konzentrationen auftreten konnten (s.o.), hätte sich durch Abzug dieser hohen Werte allein wegen des Rechenganges eine extrem niedrige Emission ergeben. Es wird davon ausgegangen, dass bei der beschriebenen Vorgehensweise Schwankungen in der Hintergrundkonzentration, z.B. durch den landwirtschaftlichen Betrieb und die benachbarten Ställe, ausreichend berücksichtigt wurden.

$$E_i = \dot{V} \cdot \left(c_i^{\text{Abluft}} - c_i^{\text{Zuluft}} \right) \quad \text{mit} \quad c_i^{\text{Zuluft}} = \text{Min} \left(c_i^{\text{Zuluft Ost}} ; c_i^{\text{Zuluft West}} \right)$$

Einheiten: Emission E_i [g/h]

Volumenstrom \dot{V} [m^3/h]

Gaskonzentration c_i [mg/m^3] $\times 10^{-3}$

Die Ausgabe der analysierten Gaskonzentration erfolgte in der volumenbezogenen Einheit [ppm]. Für die Emissionsberechnung musste diese in die massebezogene Konzentrationseinheit [mg/m^3] übertragen werden. Folgende Umrechnungsfaktoren wurden unter der Annahme von 1013 hPa und 20 °C verwendet:

- NH_3 : 1 ppm = 0,7084 mg/m^3
- CO_2 : 1 ppm = 1,8307 mg/m^3
- CH_4 : 1 ppm = 0,6673 mg/m^3
- N_2O : 1 ppm = 1,8308 mg/m^3

Durch Bezug des Emissionsmassenstromes [g h^{-1} oder g d^{-1}] auf die Tiermasse in Großvieheinheiten [GV], entsprechend 500 kg Lebendgewicht, ergibt sich die Emissionsrate [$\text{g h}^{-1} \text{GV}^{-1}$ oder $\text{g d}^{-1} \text{GV}^{-1}$] und damit eine Möglichkeit zum gewichtsunabhängigen Vergleich der Ergebnisse über den Mastverlauf sowie generell auch zum tierartunabhängigen Vergleich mit Literaturangaben (vgl. Kap. 2.4.4.3). Die Tiergewichte wurden anhand fünfmaliger Einzeltierwiegungen von Mastbeginn bis –ende über den gesamten Mastverlauf, auf die einzelnen Messwerte bezogen, interpoliert.

3.5 Statistische Methoden

Die Berechnung statistischer Kenngrößen sowie die statistische Datenanalyse wurde mit dem Programmsystem SPSS für Windows 11.0 durchgeführt. Die theoretischen Grundlagen basieren im wesentlichen auf den Ausführungen in PRECHT (1987) und BÜHL & ZÖFEL (1999).

Im Rahmen einer **explorativen Datenanalyse** erfolgte die Berechnung der Kenngrößen der beschreibenden Statistik mit Mittelwert, Median, Perzentile, Standardabweichung und Varianz der Datensätze. Die grafische Darstellung und der Vergleich der Kenngrößen verschiedener Datensätze erfolgte als Box-Plots mit Hilfe der Software Microcal Origin 6.0 G. Die horizontalen Linie der Box zeigen die 25-, 50 (Median)- und 75-Perzentile an. Das quadratische Symbol in der Box steht für den Mittelwert. Der Begrenzungsstrich am Fehlerbalken außerhalb der Box symbolisiert die 5- und 95-Perzentile. Das Kreuz und der Strich außerhalb des Fehlerbalkens stehen für die 1- und 99-Perzentile bzw. 0- und 100-Perzentile.

Vor der Auswahl statistischer Analysen und Testverfahren galt es zunächst für die in der Regel intervallskalierten Datensätze zu prüfen, ob eine Normalverteilung der Werte gegeben war und ob es sich bei den zu vergleichenden Stichproben um unabhängige oder abhängige Stichproben handelte.

Die Überprüfung der **Normalverteilung** wurde mit dem Kolmogorov-Smirnov-Test vorgenommen. Die meisten Datensätze mussten als nicht hinreichend normalverteilt eingestuft werden. Auch durch verschiedene Verfahren der Datentransformation (BÜHL & ZÖFEL, 1999) konnte keine hinreichende Normalverteilung erreicht werden. Deshalb wurden zur statistischen Datenanalyse in der Regel nicht-parametrische Testverfahren ausgewählt.

Bei Fragestellungen zum Vergleich der Haltungssysteme und zum Vergleich von Untersuchungszeiträumen (Mastdurchgängen) wurden die **Stichproben** "Haltungssystem" bzw. "Mastdurchgang" als unabhängig eingestuft. Dahingegen wurden Stichproben für Analysen innerhalb eines Haltungssystems und/oder Untersuchungszeitraumes als abhängig betrachtet und es war eine hohe Autokorrelation der Werte im Zeitverlauf zu erwarten.

Folgende statistische Verfahren wurden bei der **vergleichenden Ergebnisauswertung** und -darstellung verwendet:

- Vergleich der Mittelwerte von zwei unabhängigen Stichproben: U-Test nach Mann und Whitney;

- Vergleich von mehr als zwei unabhängigen Stichproben: H-Test nach Kruskal-Wallis;
- Vergleich der Mittelwerte von zwei abhängigen Stichproben: Wilcoxon-Test;
- Vergleich von mehr als zwei abhängigen Stichproben: Friedman-Test.

Die Überprüfung von **Wechselbeziehungen und Einflussfaktoren** erfolgte über die Berechnung von:

- Rangkorrelationskoeffizienten nach Spearman und Kendall;
- Partiiellen Korrelationen;
- einfachen lineare Regressionen;
- multiplen linearen Regressionen.

Die **Korrelationsanalyse** untersucht den Grad des linearen Zusammenhangs zwischen zwei Variablen, ohne dass eine der Variablen als abhängig oder unabhängig betrachtet wird. Bei jedem solchen bivariaten Zusammenhangsmaß gründet sich die Berechnung auf die Bildung von Wertepaaren, die aus den zugrundeliegenden abhängigen Stichproben gebildet werden. Der Korrelationskoeffizient r kann Werte zwischen -1 und 1 annehmen (PRECHT, 1987).

In der **Regressionsanalyse** hingegen unterscheidet man eine abhängige Variable (auch zu erklärende Variable bzw. Zielgröße genannt) und eine oder mehrere unabhängige Variablen (auch als erklärende Variablen bzw. Einflussgrößen bezeichnet). Die Regressionsanalyse versucht den "Zusammenhang im Mittel" zwischen der Zielgröße und der (den) Einflussgröße(n) als Funktion darzustellen. Das Bestimmtheitsmaß R^2 kann Werte zwischen 0 und 1 annehmen und bezeichnet den Quotienten aus erklärter Variation und Gesamtvariation. Je größer der Teil der Gesamtvariation ist, der durch die Regression erklärbar ist, desto besser passt sich die Regressionsfunktion den Beobachtungspunkten an (PRECHT, 1987).

Die multiple lineare Regressionsanalyse wurde nach der „Schrittweisen-Methode“ durchgeführt. Es wurden nacheinander die erklärenden Variablen mit dem höchsten partiellen Korrelationskoeffizienten mit der abhängigen Variablen in die Gleichung aufgenommen, soweit der zugehörige Regressionskoeffizient signifikant war. Die erklärenden Variablen können dabei selbst untereinander korreliert sein, was bei der Schätzung der Koeffizienten berücksichtigt wird, um Scheinkorrelationen auszuschließen. Generell muss einschränkend erwähnt werden, dass die Voraussetzungen Linearität und Normalverteilung der Versuchsdaten in der Regel nicht gewährleistet waren. Ein hohes Bestimmtheitsmaß sowie eine Normalverteilung der standardisierten Residuen erlauben die Annahme, dass der gegebene Zusammenhang als linear angesehen werden kann (BÜHL & ZÖFEL, 1999). Eine Verletzung der Normalverteilungsvoraussetzung wird in diesem Zusammenhang als nicht sehr gravierend angesehen (NIEBAUM, 2001; RATHMER, 2002).

4 EIGENE UNTERSUCHUNGEN - ERGEBNISSE

Verschiedene Voruntersuchungen dienten zur Einschätzung der Eignung und Empfindlichkeit des Messsystems für die anwendungsorientierte Messung von Stallklima und Emissionen. Anschließend werden die Ergebnisse der Langzeitmessung zum Vergleich der Haltungssysteme dargestellt. Schließlich erfolgt anhand von ausgewählten Messzeiträumen eine Gegenüberstellung beispielhafter Tagesverläufe der Stallklimafaktoren und Emissionen in beiden Haltungssystemen.

4.1 Eignung und Empfindlichkeit des Messsystems

Die Darstellung von Ergebnissen zur Eignung und Empfindlichkeit des Messsystems beschränkt sich auf die wesentlichen Faktoren Volumenstrom- und Gaskonzentrationsbestimmung sowie den Nachweis von Leckluftströmen. Die Ausführungen dienen als Ergänzung zu den bereits in Kap. 3.4 eingehend erläuterten Maßnahmen zur Qualitätskontrolle im Zuge einer eingehenden Datenaufbereitung und kritischen Datenselektion.

4.1.1 Volumenstrombestimmung - Kalibrierung der Messventilatoren

Zur kontinuierlichen Volumenstrombestimmung wurden Messventilatoren, die den gesamten Strömungsquerschnitt erfassen, eingesetzt (vgl. Kap. 2.4.3.1; Kap. 3.3). Mit einem Frequenz-Spannungs-Wandler wurde die Umdrehungsfrequenz der Messventilatoren in ein Spannungssignal umgewandelt. Der Zusammenhang zwischen Spannungssignal und Volumenstrom wurde durch **Kalibrierung an einem Ventilatorprüfstand** (saugseitiger Kammerprüfstand nach DIN 24163) des Instituts für Agrartechnik der Universität Hohenheim ermittelt. Der Volumenstrom am Prüfstand ist eine Funktion des Differenzdruckes und der Luftdichte. Bei der Berechnung sind weiterhin die Expansionszahl der Luft, sowie Parameter des Prüfstandes mit Durchflusszahl und Öffnungsquerschnitt zu berücksichtigen (BOHL, 1994). Die Verwendung von zwei unterschiedlichen Einlassdüsen (150 mm und 225 mm) sowie die Veränderung der Prüfstandsventilator Drehzahl ermöglichte die Kalibrierung jedes Messventilators für den notwendigen Messbereich bis zu einem Volumenstrom von ca. $8000 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$.

Die Kalibrierung erfolgte ähnlich den späteren Einbaubedingungen im Stall für die gesamte Einheit Abluftkamin mit Messventilator. Dabei entsprach der Abstand vor dem Messventilator der späteren Einbausituation im Stall, wogegen der Abstand nach dem Messventilator während der Kalibrierung geringer war. Durchmesser und Material des zur Kalibrierung verwendeten Abluftkamins stimmten mit den Kaminen

im Stall überein. Um eventuelle Einflüsse der Messwerterfassung auf das Spannungssignal kompensieren zu können, wurden bei der Kalibrierung der Frequenz-Spannungs-Wandler, die notwendigen Kabel, Kabellängen und Anschlüsse verwendet, wie sie bei den Messungen im Stall später zum Einsatz kamen.

Zunächst wurde untersucht, ob bei den gegebenen Verhältnissen, der Einsatz eines **Strömungsgleichrichters** notwendig war bzw. dieser einen Einfluss auf die Kalibriergerade hat. Gleichrichter werden empfohlen, wenn der Messventilator hinter dem Lüftungsventilator auf der Druckseite eingebaut wird, und somit dem druckseitigen Drall in Förderrichtung des Ventilators ausgesetzt ist (BÜSCHER et al., 2001). Der Vergleich der Kalibrierung eines Messventilators mit und ohne Gleichrichter wurde mit der kleinen Einlassdüse (150 mm) vorgenommen, so dass der Messbereich bei diesem Versuch nur bis $4000 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ betrug, **Abbildung 6**.

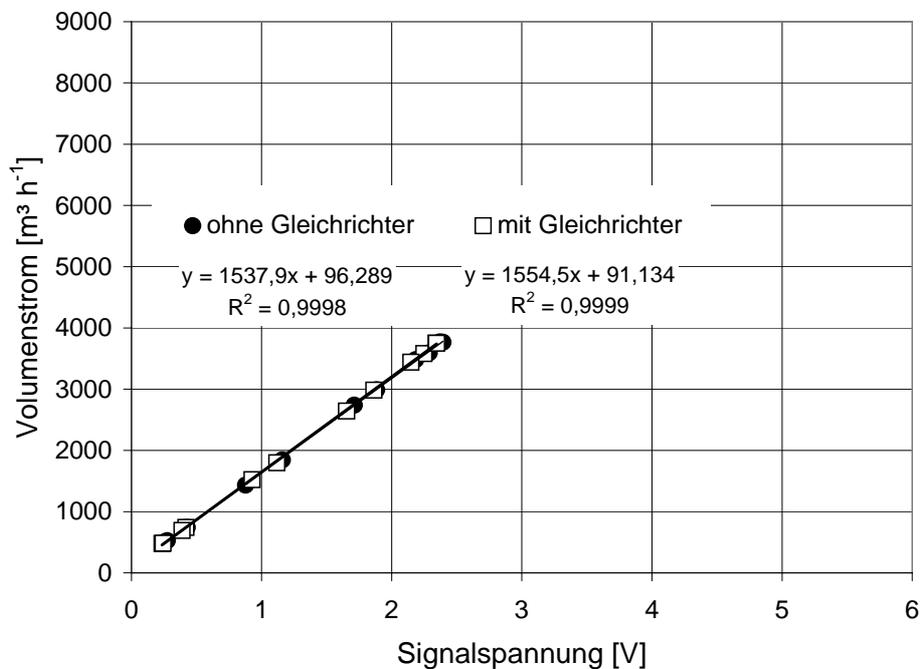


Abb. 6: Vergleich der Kalibriergeraden (bis $4000 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$) eines Messventilators bei Einbau mit und ohne Gleichrichter

Der Einfluss des Gleichrichters war im gegebenen Einbauzustand vernachlässigbar und bewirkte keine wesentliche Verbesserung der Kalibriergeraden. Deshalb konnte für die eigenen Untersuchungen auf den Einbau von Gleichrichtern, die den Nachteil haben, den Strömungswiderstand zu erhöhen, verzichtet werden.

Da Langzeitmessungen geplant waren, galt es zu prüfen, welchen Einfluss die **Einsatzdauer** und eine zunehmende **Verschmutzung** des Messventilators auf die Kalibriergerade ausüben. Hierzu wurde ein neuer Messventilator kalibriert und im

Rahmen von Voruntersuchungen im System VSP im Versuchsstall eingebaut. Nach etwa einem Jahr wurde der Messventilator wieder ausgebaut und nochmals am Prüfstand kalibriert, **Abbildung 7**.

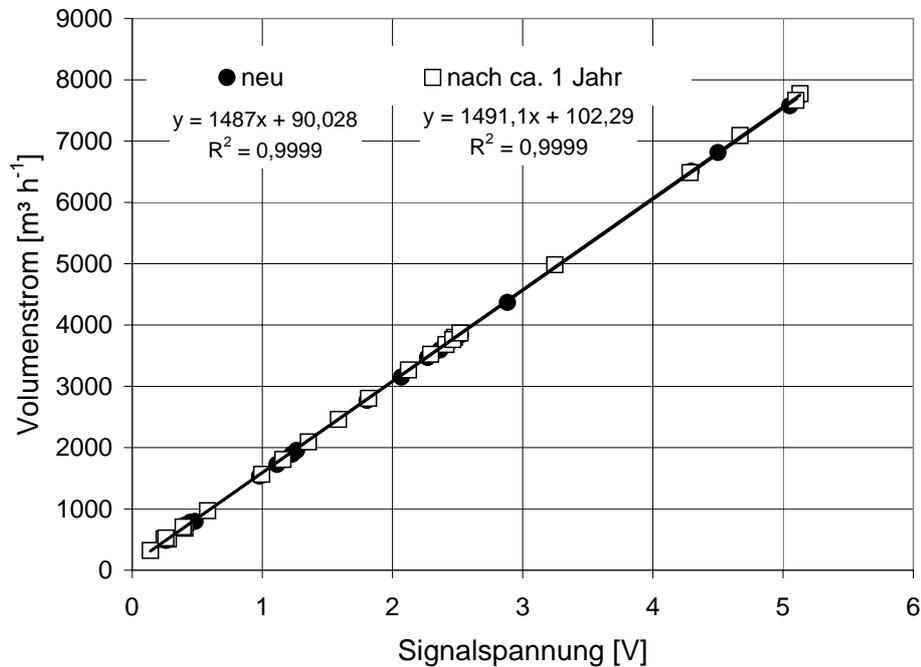


Abb. 7: Vergleich der Kalibriergeraden eines neuen Messventilators und nach einem Jahr Einsatz im Abluftkamin des Systems Vollspalten

Die Veränderung der Kalibriergeraden über die Zeit war bei dem untersuchten Messventilator und den Einsatzbedingungen im System VSP marginal. Diese Beobachtung deckt sich mit Ergebnissen von BROSE (2000), BÜSCHER et al., (2001), KECK (1997) und MARTINEC (2001), die die Kalibrierung der Messventilatoren in einem unterschiedlichen zeitlichen Abstand von sechs Monaten bis zu zwei Jahren nach Einbau wiederholten.

Der Vergleich der **Kalibriergeraden der vier Messventilatoren**, die zur Volumenstrombestimmung in den Abluftschächten der Haltungssysteme VSP und GK (West, Mitte, Ost) (vgl. Abb. 5) verwendet wurden, zeigt, dass ein deutlicher Unterschied zwischen einzelnen Messventilatoren bestehen kann, **Abbildung 8**. Dabei handelt es sich um zwei unterschiedliche Gruppen von Messventilatoren, die im Abstand von einem Jahr angeschafft wurden. Die Messventilatoren "VSP" und "GK Mitte" weisen einen flacheren Anstieg der Kalibriergeraden auf. Diese Messventilatoren waren bereits etwa ein Jahr im Versuchsstall im Einsatz (vgl. Abb. 7). Die Kalibriergeraden der ebenso baugleichen Messventilatoren "GK West" und "GK Ost", die ein Jahr später neu angeschafft wurden, zeigen einen steileren Anstieg (Abbildung 8).

KECK (1997) beobachtete ebenfalls Unterschiede im Kalibrierergebnis durch den Einfluss der Fertigungstoleranz zwischen neuen baugleichen Messventilatoren.

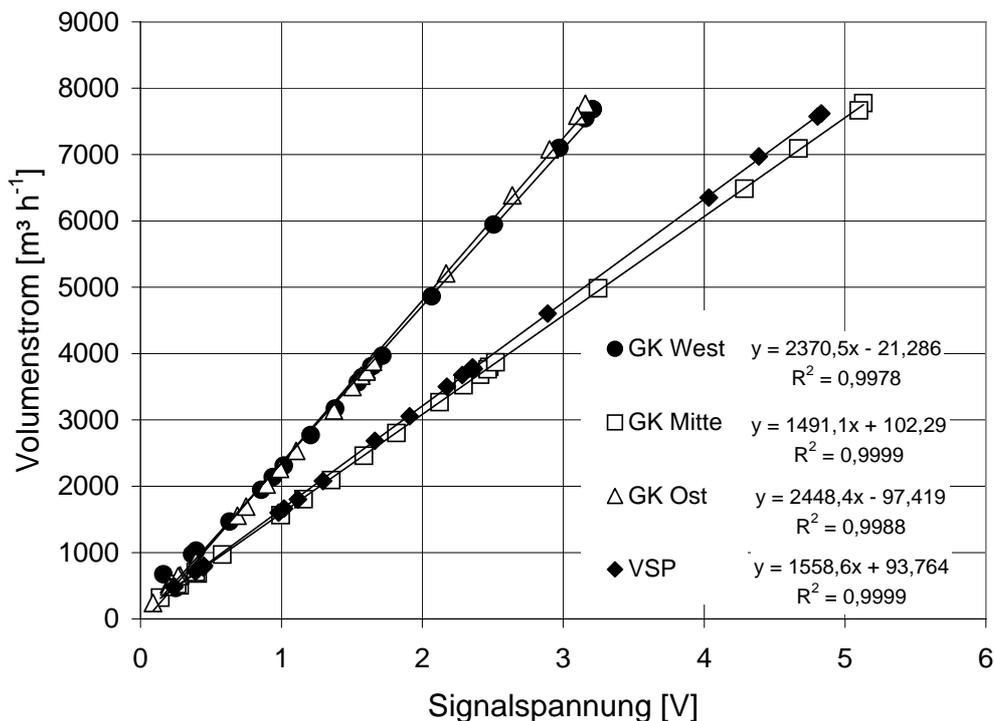


Abb. 8: Vergleich der Kalibriergeraden der Messventilatoren, die in den Untersuchungen zum Vergleich der Haltungssysteme VSP und GK verwendet wurden (VSP: System Vollspalten, Zwangslüftung; GK: System Getrennte Klimabereiche; freie Lüftung)

Die Ergebnisse verdeutlichen die Notwendigkeit der Kalibrierung jedes einzelnen Messventilators, möglichst unter vergleichbaren Bedingungen wie im späteren Einsatz. Eine Veränderung der Kalibriergeraden während des Untersuchungszeitraumes war hingegen nicht zu erwarten, wenn die grundlegende technische Funktion der Messventilatoren (z.B. Achslagerung; Flügelbefestigung und -stellung) gewährleistet ist.

Abschließend ist anzumerken, dass die **untere Nachweisgrenze** von der jeweiligen Trägheitsgrenze der Achslagerung abhängig ist (BÜSCHER et al., 2001). Die untere Nachweisgrenze lag bei den verwendeten Messventilatoren zwischen $240 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ und $480 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ (Abbildung 8). Im zwangsbelüfteten System VSP stellt die untere Nachweisgrenze kein Hindernis dar, da ein Volumenstrom von etwa $2000 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ faktisch kaum unterschritten wurde. Im System GK mit freier Lüftung wurde hingegen bei schlechten Lüftungsverhältnissen die untere Nachweisgrenze erreicht. Der Luftstrom der freien Lüftung reichte zeitweise nicht aus, um die Messventilatoren im System GK in eine Drehbewegung zu versetzen.

4.1.2 Gaskonzentrationsbestimmung

Die Gase NH_3 , CO_2 und CH_4 wurden quasi-kontinuierlich mit einem jeweils spezifischen Gerät basierend auf der NDIR-Spektroskopie erfasst (vgl. Kap. 2.4.1; Kap. 3.3). Im Rahmen der Voruntersuchungen wurde überprüft, inwieweit sich die bestehende Wasserdampfquerempfindlichkeit bei der Messung von NH_3 und CH_4 auf das Messergebnis auswirkt und wie diese an den verschiedenen Messstellen kompensiert werden kann. Des Weiteren galt es zu kontrollieren, ob die zeitliche Abfolge der Messstellenbeprobung (vgl. Tab. 37) das Messergebnis beeinflusst. Die Bestimmung von N_2O -Konzentrationen konnte nur stichprobenartig durch Entnahme von Vacutainerproben und Laborauswertung am Gaschromatographen erfolgen (vgl. Kap. 3.3). Die Frage war, ob diese Vorgehensweise eine anschließende N_2O -Emissionsberechnung für die untersuchten Haltungssysteme erlaubt.

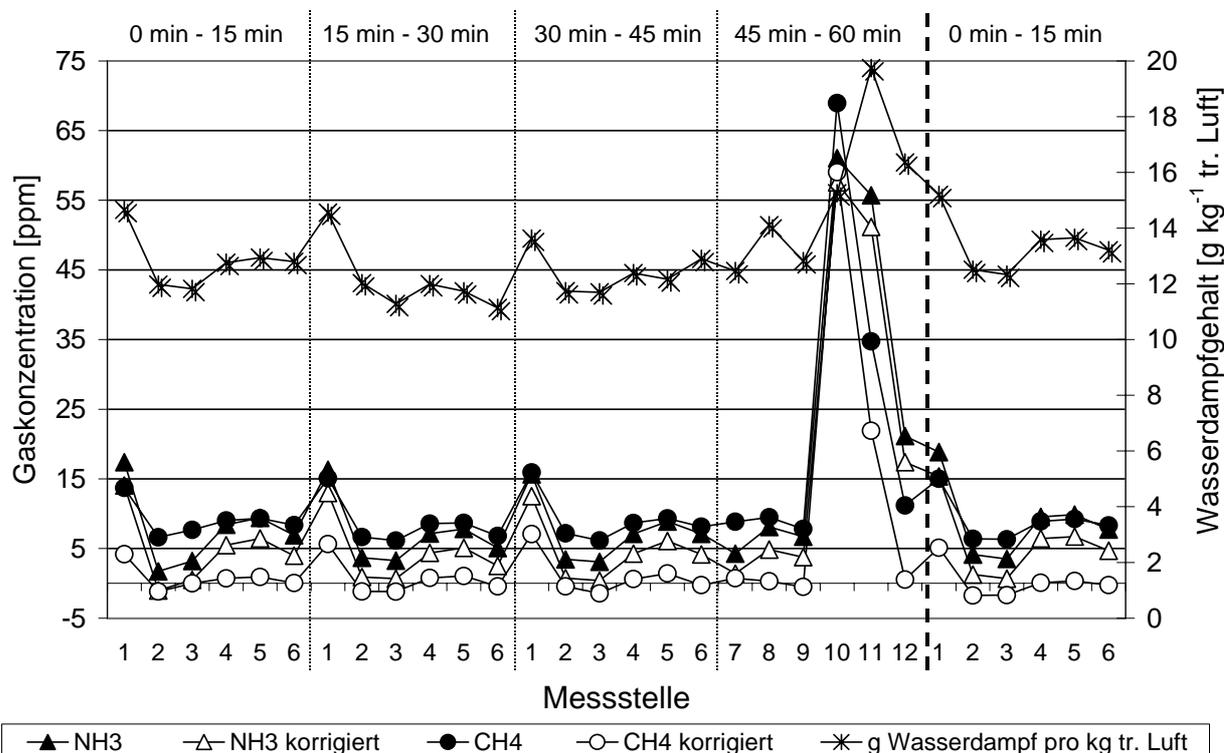
Wasserdampfquerempfindlichkeit bei der NH_3 - und CH_4 -Bestimmung

BROSE (2000) führte für die in den eigenen Untersuchungen verwendeten spektroskopisch arbeitenden Messgeräte (vgl. Tab. 36) umfangreiche Untersuchungen zur Höhe der Beeinflussung durch Störgase (v.a. Wasserdampf, CO_2 , CH_4 und NH_3) bei der Konzentrationsbestimmung durch. Gegenüber den Gasen ergab eine Analyse mit zertifizierten Prüfgasen bekannter Konzentration keine bzw., im Vergleich zum zu messenden Konzentrationsbereich im Stall, vernachlässigbar kleine Querempfindlichkeiten.

Eine Querempfindlichkeit zu Wasserdampf war bei der CO_2 -Konzentrationsbestimmung nicht nachweisbar. Bei den Messgeräten für NH_3 und CH_4 bestand jedoch ein linearer Zusammenhang der Querempfindlichkeiten bei unterschiedlichen Wasserdampfgehalten der Luft. Diese betrug 0,23 ppm pro g Wasserdampf pro kg trockene Luft für das NH_3 -Messgerät und 0,64 ppm pro g Wasserdampf pro kg trockene Luft für das CH_4 -Messgerät. Da eine Kompensation der Wasserdampfquerempfindlichkeit bereits im Gerät während der Messung nicht gegeben war, musste der Wasserdampfgehalt in der Probenluft gesondert bestimmt werden, um anschließend die Messwerte nachträglich rechnerisch um die jeweilige Querempfindlichkeit korrigieren zu können.

Der Wasserdampfgehalt in der (trockenen) Probenluft von der jeweiligen Messstelle errechnete sich aus den zeitgleich zur Gaskonzentrationsbestimmung ermittelten Temperatur und relativen Feuchte der Probenluft (vgl. Kap. 3.3) unter Berücksichtigung des daraus zu berechnenden Sättigungsdampfdruckes.

In Abhängigkeit von der Messstelle im Versuchsstall unterschied sich der Wasserdampfgehalt der Probenluft deutlich, **Abbildung 9**. Bei dem in Abbildung 9 dargestellten Ausschnitt schwankt der Wasserdampfgehalt der Probenluft in einem Bereich von 12 bis 20 g kg⁻¹ trockene Luft, welches in diesem Fall einer gerätespezifischen Wasserdampfquerempfindlichkeit bei NH₃ von 2,7 bis 4,6 ppm und bei CH₄ von 7,8 bis 13 ppm entsprach. Die höchsten Wasserdampfgehalte in der Probenluft wurden in der Regel bei den Messstellen im Flüssigmistkanal und in den abgedeckten Liegebereichen des Haltungssystems GK gemessen. Das Ergebnis verdeutlicht die Notwendigkeit, bei bestehenden Querempfindlichkeiten die Höhe des Störfaktors jeweils für jede Messstelle einzeln zu quantifizieren.



0 - 15 min	15 - 30 min	30 - 45 min	45 - 60 min
1 VSP Abluft	1 VSP Abluft	1 VSP Abluft	7 VSP Innenraum
2 VSP Zuluft	2 VSP Zuluft	2 VSP Zuluft	8 VSP Flüssigmistkeller
3 GK Zuluft	3 GK Zuluft	3 GK Zuluft	9 GK Innenraum
4 GK Abluft 1	4 GK Abluft 1	4 GK Abluft 1	10 GK Flüssigmistkeller
5 GK Abluft 2	5 GK Abluft 2	5 GK Abluft 2	11 GK Liegefläche 1
6 GK Abluft 3	6 GK Abluft 3	6 GK Abluft 3	12 GK Liegefläche 2

VSP = Haltungssystem Vollspalten; GK = Haltungssystem Getrennte Klimabereiche

Abb. 9: Einfluss der Wasserdampfquerempfindlichkeit sowie Beprobungsreihenfolge der Messstellen auf das Messergebnis von NH₃ und CH₄ (korrigiert = Abzug der gerätespezifischen Querempfindlichkeit von 0,23 ppm NH₃ pro g Wasserdampf pro kg trockene Luft bzw. von 0,64 ppm CH₄ pro g Wasserdampf pro kg trockene Luft)

Bei den vergleichsweise geringen CH_4 -Konzentrationen im Stall fiel auf, dass nach Abzug der Wasserdampfquerempfindlichkeit an den Messstellen 2 bis 6 im gezeigten Ausschnitt (Abbildung 9) keine Konzentrationen mehr nachweisbar waren bzw. zum Teil negative Werte errechnet wurden. Dieser Effekt zeigt die untere Grenze des sicher erfassbaren CH_4 -Messbereiches auf, die von der Summe der Messungenauigkeiten des CH_4 -Gasanalysators und der Temperatur- und Feuchtefühler mitbestimmt wird. Daher musste grundsätzlich geprüft werden, ob und wann Unterschiede zwischen den Haltungssystemen bezüglich der CH_4 -Konzentration und -Emission mit dem Messsystem überhaupt nachweisbar und quantifizierbar waren. Bei am Messgerät angezeigten Messwerten kleiner 10 ppm konnte davon ausgegangen werden, dass im Wesentlichen Wasserdampf und nicht CH_4 die Resultate des hier verwendeten Messgerätes bedingte.

Einfluss der Beprobungsreihenfolge und der Messzeit pro Messstelle

Abbildung 9 zeigt ebenfalls einen für die Untersuchungen repräsentativen Ausschnitt zur unterschiedlichen Höhe der NH_3 - und CH_4 -Konzentrationen in Abhängigkeit von der Messstelle sowie in Abhängigkeit von der gewählten Beprobungsreihenfolge der Messstellen (vgl. auch Tab. 37). Die in Voruntersuchungen ermittelte Beprobungszeit von 150 sec pro Messstelle teilt sich in 120 s Einpegelzeit und 30 s Erfassungszeit auf (vgl. Kap. 3.3; Tab. 36). Die Einpegelzeit war für die durchgeführten Untersuchungen ausreichend, um beim Messstellenwechsel, auch bei sehr unterschiedlichen Gaskonzentrationen, den der Messstelle entsprechenden Gaskonzentrationsbereich zu erfassen, ohne dass es zu einer Messwertverschleppung kam.

Bestimmung der N_2O -Konzentration

Während des zweiten bis vierten Untersuchungszeitraumes (vgl. Tab. 35) wurden stichprobenartig Luftproben (Vacutainerfüllungen) zur N_2O -Konzentrationsbestimmung am Gaschromatographen von den einzelnen Messstellen im Versuchsstall entnommen (vgl. Kap. 3.3). Insgesamt waren neun Stichprobenmessungen nutzbar. Die Füllung der Vacutainer erfolgte während der 30 s Erfassungszeit an der jeweiligen Messstelle. Die Proben wurden aus der Zuleitung zur Probenluftsammlflasche, die den Gasmessgeräten vorgeschaltet war, entnommen (vgl. Kap. 3.3). Die Auswertung und Umrechnung der vom Gaschromatographen ausgegebenen Peak-Areas in N_2O -Konzentrationen sowie die Anwendung von Drift- und Druckkorrektur ist in MOTZ (2003) und SCHÜRER (2001) beschrieben.

Abbildung 10 zeigt die Spannweite der an den verschiedenen Messstellen bestimmten N_2O -Konzentrationen aus bis zu zehn Stichprobenmessungen. Die Fehlerbalken stehen für die mittlere GC-Nachweisgenauigkeit von $\pm 7\%$.

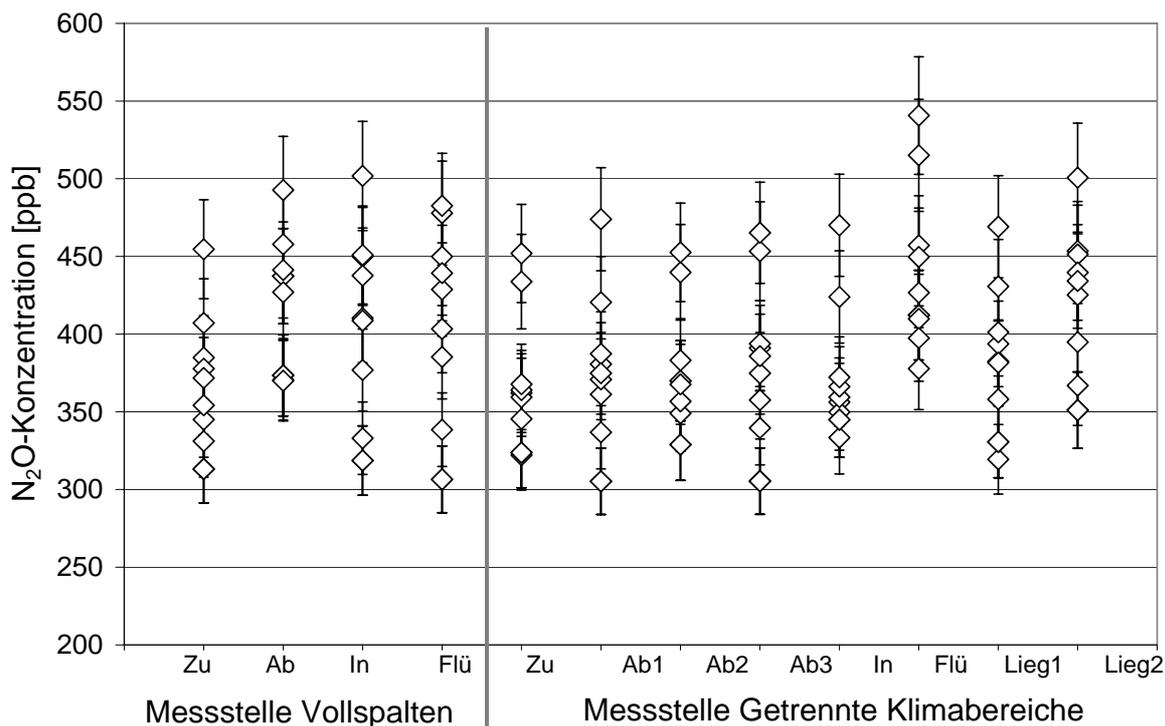


Abb. 10: N₂O-Konzentration an verschiedenen Messstellen aus bis zu 10 Stichprobenmessungen (Fehlerbalken entspricht mittlerer GC-Nachweisgenauigkeit von +/- 7 %) (Zu = Zuluft; Ab = Abluft; In = Innenraum; Flü = Flüssigmistkeller; Lieg = Liegebereich; vgl. Abb. 5)

Aus den Ergebnissen (Abbildung 10) lässt sich ablesen, dass zwar eine Tendenz zu geringeren Konzentrationen in der Zuluft und höheren Werten in Abluft, im Innenraum und Flüssigmistkeller vorhanden war, aber keine signifikanten Unterschiede in der N₂O-Konzentration in Abhängigkeit von der Messstelle nachweisbar waren. Die ebenfalls mit dem GC ermittelten CO₂- und CH₄-Konzentrationen der Luftproben, die eine sehr gute Übereinstimmung mit den NDIR-spektroskopisch gemessenen Werten zeigten, wiesen hingegen für die jeweilige Messstelle typische Werte auf. Somit wurde gefolgert, dass die Luftproben bzw. Vacutainerfüllungen an sich repräsentativ für die Messstellen waren.

Die N₂O-Konzentrationen in der Zuluft wichen zum Teil deutlich von der mittleren atmosphärischen Hintergrundkonzentration von etwa 310 bis 330 ppb (vgl. Kap. 2.2.3; Kap. 2.2.3.3) ab, was in diesen Fällen nicht auf Leckluftereignisse, sondern eher auf Ungenauigkeiten bei der Probenahme und Analyse zurückzuführen ist. Eine Differenz aus Zu- und Abluftkonzentration, d.h. eine N₂O-Freisetzung im Stall und Austrag als N₂O-Emission war bei den durchgeführten Messungen meist nicht eindeutig nachweisbar oder der Differenzbetrag war negativ. Es gibt jedoch bisher keine Hinweise aus der Literatur, dass Ställe als N₂O-Senken fungieren könnten.

Aus den oben genannten Gründen wird im Folgenden von einer weiteren Darstellung von N₂O-Konzentrationen und -Emissionen abgesehen, da die Datenunsicherheit der Stichprobenmessungen als hierfür zu hoch einzuschätzen ist.

4.1.3 Nachweis von Leckluftströmen

Eine korrekte Emissionsmessung und -berechnung setzt eine vollständige Erfassung aller Luftströme, die den Stall verlassen, voraus (vgl. Kap. 2.4.3). Vor allem bei frei belüfteten Ställen muss jedoch davon ausgegangen werden, dass die Innenraumluft den Stall nicht nur durch die vorgesehenen Abluftöffnungen mit einer Volumstrommessung verlässt, sondern unter Umständen auch aus anderen Stallöffnungen, die eigentlich als Zuluftöffnung dienen, austritt.

Aus diesem Grunde wurde zum Nachweis von Leckluftströmen an der Zuluftöffnung des Haltungssystems GK eine gesonderte Messstelle zur zeitlich hoch aufgelösten Beprobung der CO₂-Konzentration installiert (vgl. Kap. 3.3; Tab. 36). In einem zeitlichen Abstand von 75 s wurde während des gesamten Untersuchungszeitraumes jeweils abwechselnd mittels verzweigter Teflonschläuche der obere und untere Bereich der Zuluftöffnung beprobt. **Abbildung 11** zeigt einen beispielhaften Verlauf der CO₂-Konzentrationen und Windgeschwindigkeit an der Zuluftöffnung sowie des Gesamtabluftvolumenstromes des Systems GK an drei kritischen Sommertagen mit hohem Leckluftanteil.

Bei geringeren Leckluftströmen gelangte die wärmere Innenraumluft nur im oberen Bereich der Zuluftöffnung aus dem Abteil, wohingegen im unteren Bereich Außenluft mit einer typischen Hintergrundkonzentration (ca. 380 ppm, vgl. Kap. 2.2.1; Kap. 2.2.1.3) in den Stall eindrang. Wurden jedoch auch am unteren Messpunkt höhere CO₂-Konzentrationen erfasst, bedeutete dies, dass wahrscheinlich auf der gesamten Zuluftfläche Leckluft auftrat. Das Auftreten von Leckluftströmen im Haltungssystem GK ist insbesondere unter Sommerbedingungen im Zusammenhang mit der Funktionsweise der freien Lüftung zu sehen. Besonders an warmen und windstillen Tagen ist die Funktion der freien Lüftung eingeschränkt, wenn die für den Luftaustausch notwendigen Kräfte Temperaturdifferenz und Winddruck fehlen (vgl. Kap. 2.4.3.2). Einen Anhaltspunkt hierzu liefert der leicht gegenläufige Verlauf von Volumenstrom und Windgeschwindigkeit zum Auftreten von Leckluftströmen in **Abbildung 11**.

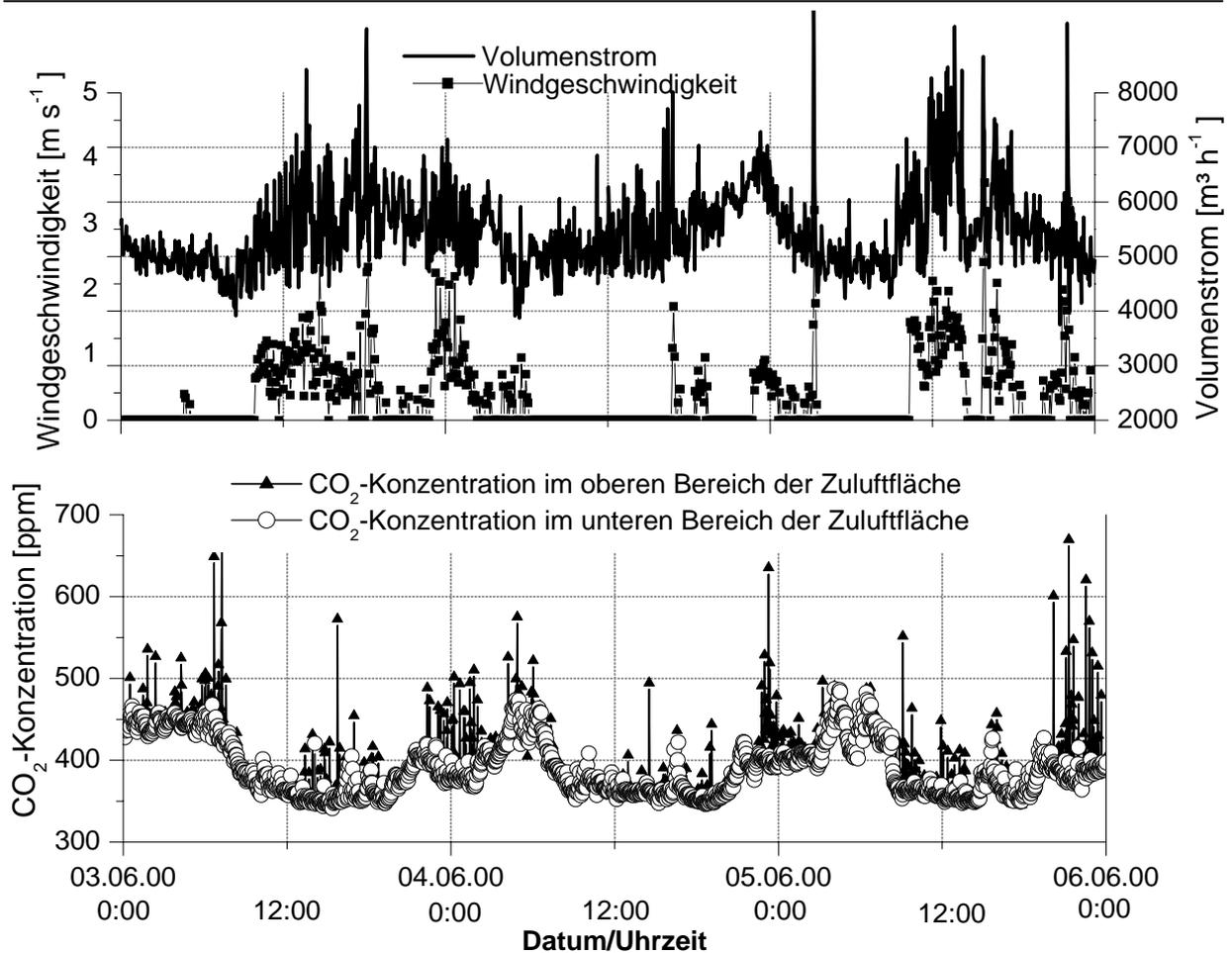


Abb. 11: Beispielhafter Verlauf der CO₂-Konzentration und Windgeschwindigkeit an der Zuluftöffnung sowie des Gesamtabluftvolumenstromes des Haltungssystems GK (Getrennte Klimabereiche; freie Schachtlüftung)

Insgesamt ergab die Auswertung der CO₂-Konzentrationen an der Zuluftöffnung des Systems GK, dass zwar erhöhte CO₂-Werte gemessen werden, diese jedoch in der Regel nur kurzzeitig auftraten und starken Schwankungen unterlagen. Ein deutlicher Abfall der an den Abluftöffnungen bestimmten Emissionen durch Leckluftereignisse, wie BROSE (2000) an einem frei belüfteten Milchviehstall beobachtete, konnte hier nicht nachgewiesen werden. Im Tagesmittel waren die CO₂-Konzentrationen an der Zuluft nicht höher als im System VSP. Es wird vermutet, dass die an der Zuluftöffnung anhand erhöhter Gaskonzentrationen detektierte Innenraumluft in vielen Fällen das System nicht wie ein Abluftstrom verließ, sondern auch immer wieder mit der Zuluft in den Stall gedrückt wurde.

Da auch beim zwangsbelüfteten System VSP bei geringen Lüftungsraten im Winter, trotz des im Innenraum zu erwartenden Unterdrucks Leckluftströme auftreten können, wurde auch dort eine Überprüfung der CO₂-Konzentrationen an den Zuluftöffnungen vorgenommen. Es waren im Rahmen der eigenen Untersuchungen am System VSP jedoch keine Leckluftströme nachweisbar.

4.2 Vergleich der Haltungssysteme - Ergebnisse der Langzeitmessung

Der Vergleich der Haltungssysteme "Vollspalten - Zwangslüftung (VSP)" und "Getrennte Klimabereiche - freie Lüftung (GK)" erfolgt für die Randbedingungen, Stallklimafaktoren und Emissionen über vier Untersuchungszeiträume (Mastdurchgänge). Die Darstellung und Auswertung der Langzeitmessung erfolgt für die kontinuierlich erhobenen Daten (vgl. Kap. 3.3) auf Basis der Tagesmittelwerte. Tageszeitliche Effekte werden beispielhaft für kurze Zeiträume anhand der Verläufe verschiedener Parameter mit der jeweiligen zeitlichen Auflösung (vgl. Tab. 36) aufgezeigt. In diesem Kapitel werden die Ergebnisse vornehmlich in grafischer Form dargestellt. Aus Gründen der Übersichtlichkeit ist die tabellarische Zusammenfassung und Verknüpfung der jeweiligen Messergebnisse mit Kennzeichnung der Signifikanzen von Mittelwertunterschieden zwischen den Mastdurchgängen und Haltungssystemen im Anhang enthalten (Tab. A1 bis A6).

4.2.1 Randbedingungen der Mastdurchgänge

Die Beschreibung der Mastdurchgänge hinsichtlich der zeitlichen Einordnung, Entwicklung der Tiergewichte bzw. Stallbelegung, Flüssigkeitsparameter sowie Windverhältnisse dient der besseren Einordnung der nachfolgenden Ergebnisse zu Stallklimafaktoren und Emissionen.

4.2.1.1 Jahreszeitliche Einordnung

Im Rahmen der Versuchsplanung wurden die Untersuchungszeiträume (vgl. Tab. 35) zur Überprüfung jahreszeitlicher Einflüsse so gewählt, dass mit hoher Wahrscheinlichkeit zwei Mastdurchgänge (MD) (MD 1: Oktober - Dezember; MD 4: Januar - April) einen ähnlich hohen Anteil kalter Tage und zwei Mastdurchgänge (MD 2: Februar - Juni; MD 3: August - Dezember) einen ähnlich hohen Anteil wärmerer Tage aufweisen. Dieses Ziel wurde erreicht, da wie beabsichtigt keine signifikanten Unterschiede in der Außentemperatur zwischen den Mastdurchgängen MD 1 und MD 4 sowie MD 2 und MD 3 bestanden (Tab. A5-a). Die Unterschiede in der Außentemperatur waren hingegen bei den anderen paarweisen Vergleichen der Mastdurchgänge (MD 1-2; MD 1-3; MD 2-4; MD 3-4) signifikant (Tab. A5).

Für die nachfolgenden Ergebnisse und Analysen ist jedoch bereits an diesem Punkt zu betonen, dass hinsichtlich aller weiteren Rahmenbedingungen und Einflussfaktoren kein einheitliches Bild der Vergleichbarkeit bzw. Unterschiedlichkeit der Mastdurchgänge zu zeichnen war (vgl. Kap. 3.2; Tab. A5).

4.2.1.2 Stallbelegung und Leistung

Bedingt durch die unterschiedliche Gestaltung der Haltungssysteme bzgl. des Flächenangebots pro Tier, wurden im System VSP 54 Tiere und im System GK 48 Tiere eingestallt (vgl. Tab. 34). Ein weiterer Grund für die teilweise unterschiedliche Stallbelegung lag in leicht voneinander abweichenden Einstallgewichten (vgl. Tab. 35), **Abbildung 12**. Die Stallbelegung wurde aus den realen Tiergewichten bei den Wiegungen, multipliziert mit der Tierzahl, für die restlichen Masttage zwischen den Wiegeterminen interpoliert.

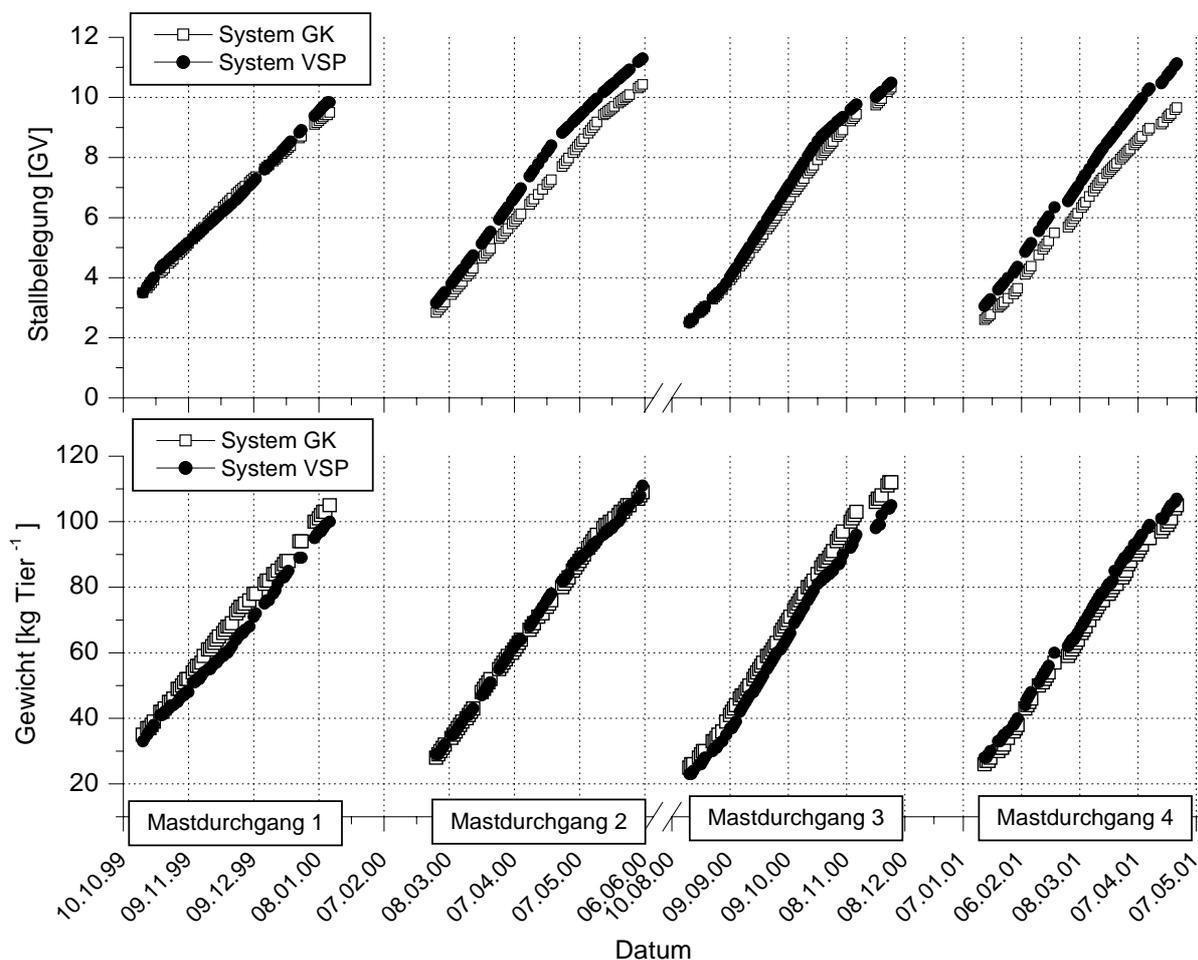


Abb. 12: Vergleich der Stallbelegung in Großvieheinheiten sowie des Durchschnittsgewichts pro Tier zwischen den Haltungssystemen und Mastdurchgängen (VSP: Vollspalten, Zwangslüftung; GK: Getrennte Klimabereiche, freie Lüftung)

Signifikante Mittelwertunterschiede in der Stallbelegung in GV zwischen den Haltungssystemen wurden lediglich im Mastdurchgang 4 nachgewiesen (Tab. A4-a). Innerhalb des Systems VSP wurden leicht signifikante Unterschiede in der Stallbelegung zwischen den Mastdurchgängen 1 und 4 bzw. 2 und 3 festgestellt (Tab. A5-a).

Die ansonsten geringfügigen Unterschiede in der Stallbelegung sind für den späteren Vergleich von Stallklimafaktoren und Emissionen weniger bedeutsam, wenn die Ergebnisse auf Großvieheinheiten bezogen und somit "normiert" werden. Bei der Darstellung von absoluten Werten hingegen tritt ein Einfluss der Stallbelegung eher hervor. Da im Rahmen dieser Untersuchungen zwei Haltungssysteme mit gleichen äußeren Abmessungen verglichen wurden, jedoch systembedingte Unterschiede beispielsweise hinsichtlich der Tierzahl, Stallbelegung, Fläche und Raumvolumen pro Tier existierten (vgl. Tab. 34), muss beachtet werden, dass sich diese Faktoren gegebenenfalls unterschiedlich auf die Ergebnisse (z.B. Gasfreisetzung) auswirken können. Problematisch ist jedoch aufgrund der vielen Einflussfaktoren in diesem Zusammenhang der eindeutige Nachweis von Ursache-Wirkungszusammenhängen.

Hinsichtlich der täglichen Zunahmen wurden durchweg sehr gute Leistungen in beiden Haltungssystemen erzielt, **Tabelle 38**. Die Unterschiede zwischen den Mastdurchgängen bzw. Haltungssystemen waren nicht signifikant. Die Futterverwertung konnte nicht für beide Haltungssysteme getrennt erfasst werden. Im gesamten Stall lag die Futterverwertung während der vier Mastdurchgänge im Mittel zwischen 2,83 und 3,03 kg Futter pro kg Zuwachs. Die unterschiedlichen Futterrationen, die im Rahmen der vierphasigen nährstoffangepassten Fütterung während eines Mastdurchganges zum Einsatz kamen, wurden bereits in Kap. 3.1 und Tab. 33 dargestellt.

Tab. 38: Tägliche Zunahmen pro Tier in den Haltungssystemen Vollspalten, Zwangslüftung (VSP) und Getrennte Klimabereiche, freie Lüftung (GK) während der vier untersuchten Mastdurchgänge

Tgl. Zunahme [g Tier⁻¹ d⁻¹]	Mastdurchgang 1 Okt 99 - Jan 00	Mastdurchgang 2 Feb 00 - Juni 00	Mastdurchgang 3 Aug 00 - Dez 00	Mastdurchgang 4 Jan 01 - Apr 01
System VSP	0,775	0,846	0,784	0,864
System GK	0,800	0,872	0,848	0,838

4.2.1.3 Flüssigmistparameter

In regelmäßigen Abständen wurden über jeden Mastdurchgang verteilt Stichproben aus dem im Innenraum zwischengelagerten Flüssigmist (vgl. Abb. 5, Tab. 36) entnommen, um einen Eindruck über die Flüssigmistzusammensetzung und deren Entwicklung zu gewinnen. Eine im klassischen Sinne repräsentative Beprobung des inhomogenen Flüssigmistes war kaum möglich, ohne die Flüssigmistzusammensetzung und -struktur sowie die Stabilisierung des Flüssigmistes im Sinne einer Emissionsquelle zu stören. Aus diesem Grunde weisen die nachfolgend dargestellten Flüssigmistparameter eine hohe Standardabweichung auf und können nur als Anhaltswerte dienen, **Tabelle 39**.

Tab. 39: Zusammenfassung der durchschnittlichen Flüssigmistparameter anhand der aus vier Mastdurchgängen entnommenen Proben (VSP: Vollspalten, Zwangslüftung; GK: Getrennte Klimabereiche, freie Lüftung)

	System VSP (n = 61)			System GK (n = 63)		
	Mittelwert	Median	Standardabweichung	Mittelwert	Median	Standardabweichung
TS-Gehalt [%]	6,5	6,3	2,2	8,2	7,8	3,3
N-Gesamt in FS [g kg⁻¹]	5,6	5,9	1,0	6,5	6,4	1,6
NH₄-N in FS [g kg⁻¹]	3,4	3,6	0,9	3,6	3,6	0,9
Anteil NH₄-N an N-Gesamt [%]	61	60	12	57	57	10
pH-Wert	7,4	7,3	0,3	7,2	7,2	0,2
Mittlerer Flüssigmistanfall	0,006 m ³ Tier ⁻¹ d ⁻¹			0,006 m ³ Tier ⁻¹ d ⁻¹		

TS: Trockensubstanz; FS: Frischsubstanz

Die Einzelwerte, aus denen die in Tabelle 39 genannten Mittelwerte berechnet wurden, werden für die Parameter pH-Wert, Anteil des NH₄-N am Gesamt-N und NH₄-N-Gehalt in der Frischsubstanz (FS) in den **Abbildungen 13; 14; 15** aufgezeigt. Die Zunahme der Flüssigmistmenge über den Mastverlauf verdeutlicht der Anstieg des mittleren Flüssigmistpegels in **Abbildung 16**. Sowohl in der Flüssigmistmenge als auch -zusammensetzung waren keine bedeutenden Unterschiede zwischen den Haltungssystemen und Mastdurchgängen nachweisbar. Trotz aller Einschränkungen ist jedoch eine Zunahme des NH₄-N-Anteils und -Gehaltes der Flüssigmistproben (Abb. 14; Abb. 15) mit steigenden Flüssigmistmengen im Mastverlauf (Abb. 16) zu erkennen.

Abschließend bleibt festzustellen, dass die untersuchten Flüssigmistparameter einen für die Mastschweinehaltung und eine N-angepasste Mehrphasenfütterung normalen Wertebereich aufwiesen (BOXBERGER et al., 1994). Eine gezielte Untersuchung von Wechselbeziehungen zwischen Flüssigmistzusammensetzung und Gasfreisetzung bzw. Emissionen war auf Grund der begrenzten zeitlichen und räumlichen Auflösung der Flüssigmistproben nicht verlässlich durchführbar und wurde daher nicht vorgenommen.

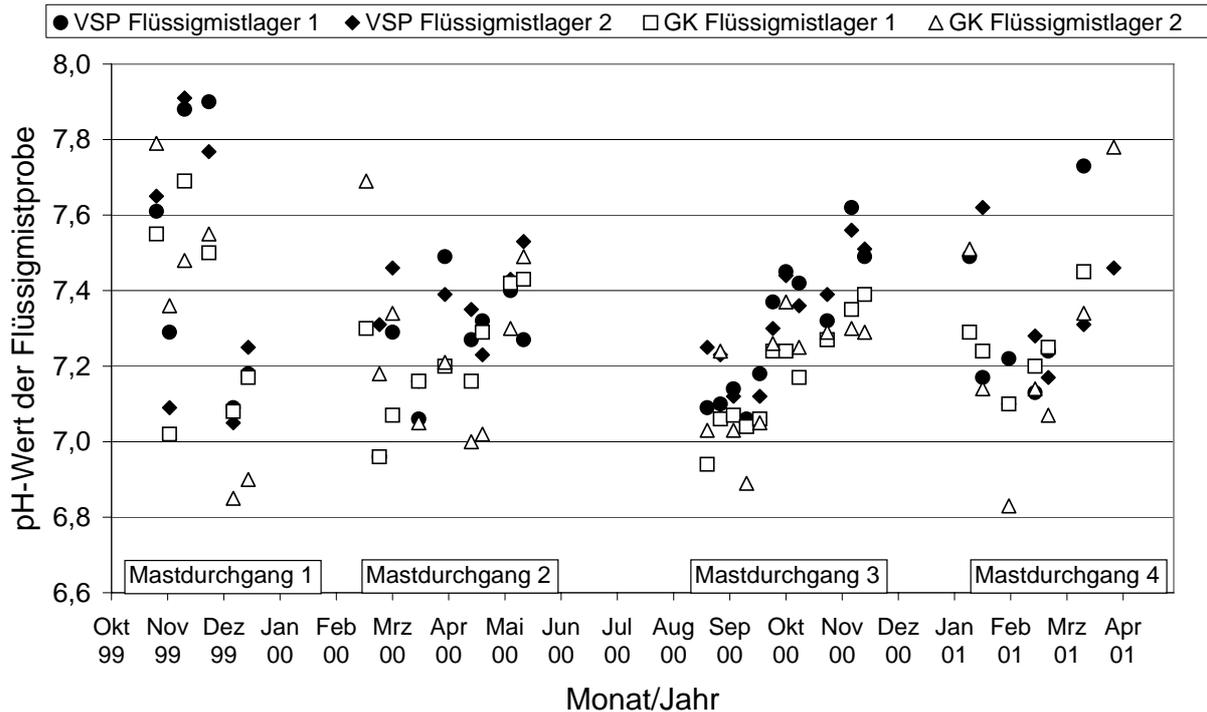


Abb. 13: Vergleich der pH-Werte der Flüssigmistproben aus zwei Haltungssystemen und vier Mastdurchgängen (VSP: Haltungssystem Vollspalten, Zwangslüftung; GK: Haltungssystem Getrennte Klimabereiche, freie Lüftung)

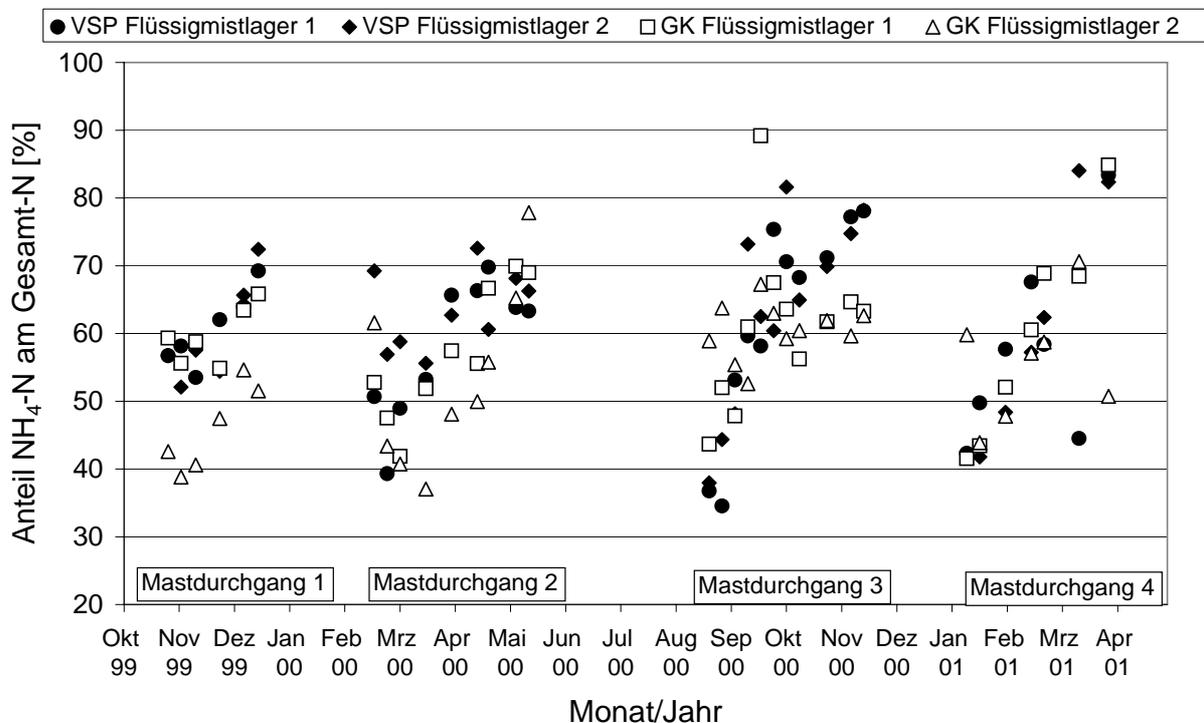


Abb. 14: Vergleich des prozentualen Anteils des $\text{NH}_4\text{-N}$ am Gesamt-N der Flüssigmistproben aus zwei Haltungssystemen und vier Mastdurchgängen (VSP: Haltungssystem Vollspalten, Zwangslüftung; GK: Haltungssystem Getrennte Klimabereiche, freie Lüftung)

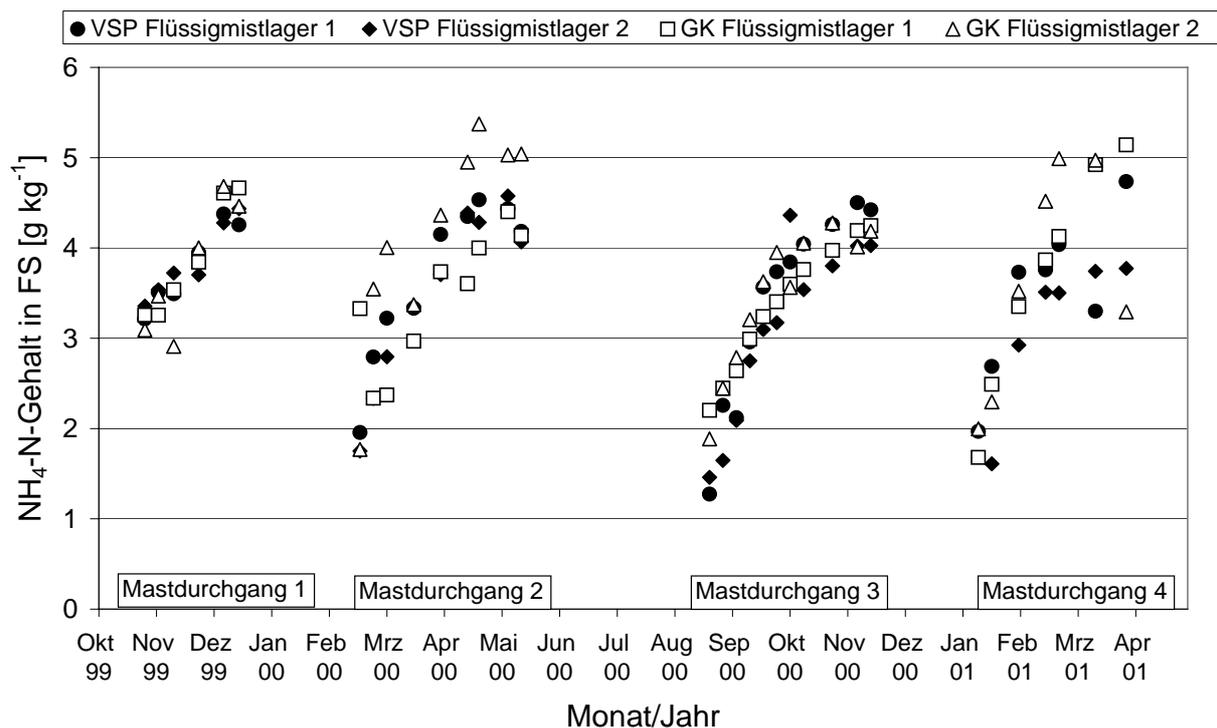


Abb. 15: Vergleich des $\text{NH}_4\text{-N}$ -Gehaltes in der Frischsubstanz (FS) der Flüssigmistproben aus zwei Haltungssystemen und vier Mastdurchgängen (VSP: Haltungssystem Vollspalten, Zwangslüftung; GK: Haltungssystem Getrennte Klimabereiche, freie Lüftung)

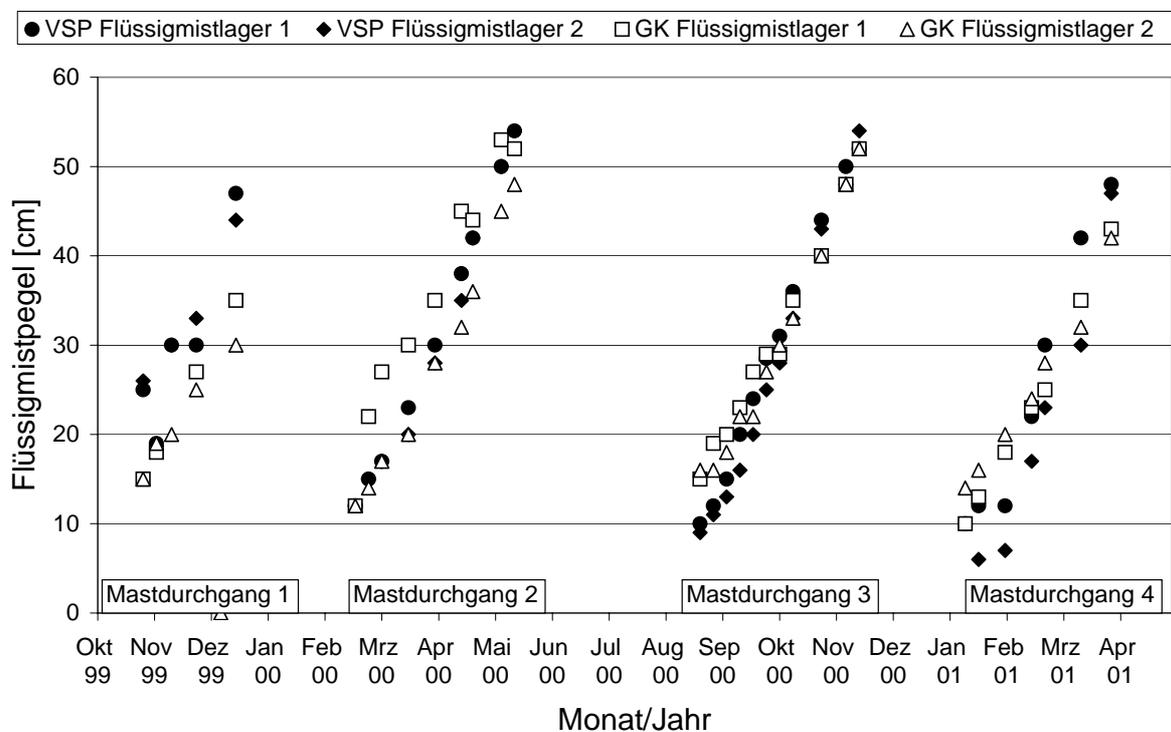


Abb. 16: Anstieg des Flüssigmistpegels im Mastverlauf (VSP: Haltungssystem Vollspalten, Zwangslüftung; GK: Haltungssystem Getrennte Klimabereiche, freie Lüftung)

4.2.1.4 Windverhältnisse

Im Zusammenhang mit der freien Lüftung im System GK galt es zu prüfen, ob trotz umgebender Gebäude eine ausreichende Windanströmung an der Zuluftöffnung des Systems GK (vgl. Kap 3.1) gewährleistet war. Die Zuluftöffnung des Systems GK war in die für den Standort des Versuchsstalles typische westliche Hauptwindrichtung ausgerichtet (vgl. Abb. 1; Abb. 5). Die Messung von Windgeschwindigkeit und Windrichtung wurde direkt vor der Zuluftöffnung in etwa 3,50 m Höhe über Grund und etwa 1,40 m Abstand zur Zuluftöffnung durchgeführt. Durch diese Anordnung der Windmessstelle war jedoch die Erfassung von östlichen Winden durch den Gebäudeschatten nicht möglich.

Abbildung 17 fasst die relativen Häufigkeiten der Tagesmittelwerte der Windrichtung während der vier untersuchten Mastdurchgänge in Windgeschwindigkeitsklassen zusammen. Es wird ersichtlich, dass während der Mastdurchgänge MD 2, MD 3 und MD 4 die Zuluftöffnung des Systems zu etwa gleich hohen Anteilen (keine signifikanten Unterschiede, Tab. A5-a) aus Süd-West bis West, sowie zu geringeren Anteilen aus Nord-West und Süd-Süd-West angeströmt wurde. Während Mastdurchgang 1 wurde ein deutlich höherer Anteil von Winden aus West-West-Nord beobachtet, so dass die paarweisen Mittelwertunterschiede zwischen Mastdurchgang 1 und den anderen Mastdurchgängen jeweils signifikant waren (vgl. Tab. A5-a).

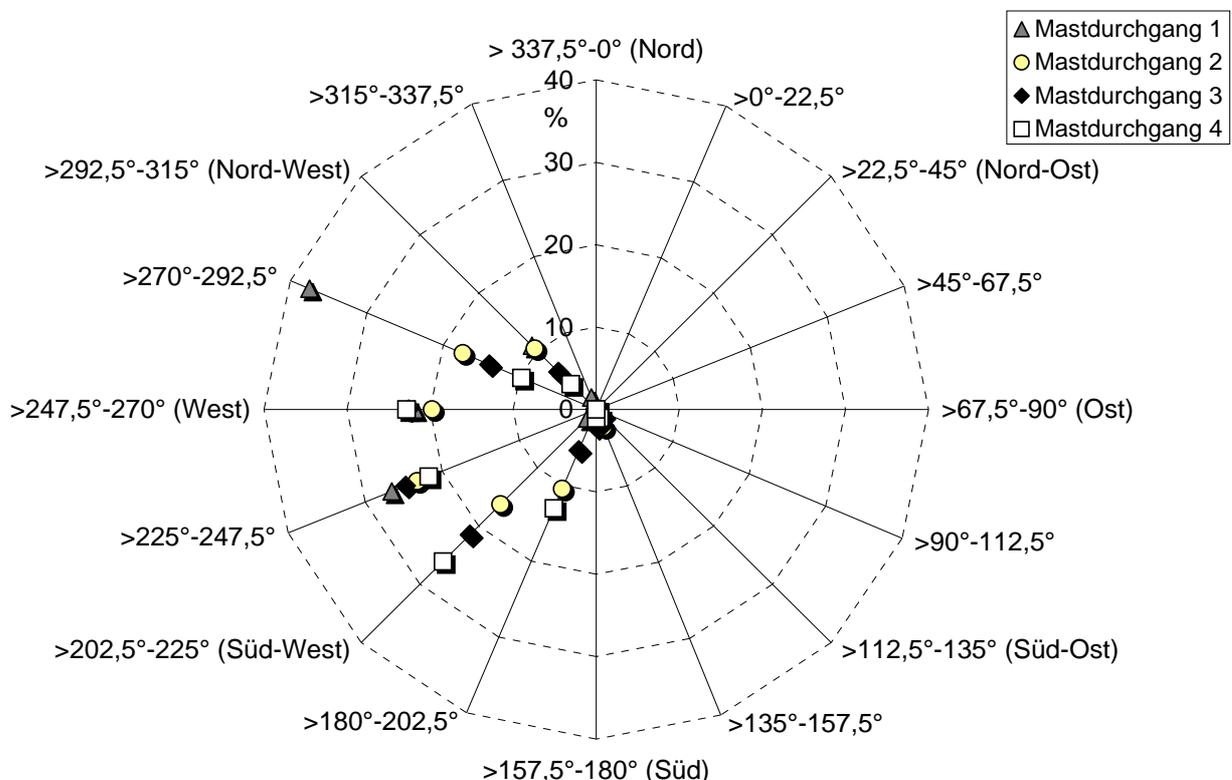


Abb. 17: Relative Häufigkeit [%] der Tagesmittelwerte der Windrichtung [°] an der Zuluftöffnung des Systems GK während der vier untersuchten Mastdurchgänge (Klassenbreite der Windrichtung 22,5 °) bei Windgeschwindigkeiten größer 0,1 m s⁻¹

Weiterhin hat die Windgeschwindigkeit Bedeutung für die Funktion der freien Lüftung, die von thermischen und windinduzierten Effekten beeinflusst wird. Im Allgemeinen wird davon ausgegangen, dass ab Windgeschwindigkeiten von $> 1,5 \text{ m s}^{-1}$ (gemessen in 10 m Höhe) der Anteil von windinduzierten Effekten den Anteil thermischer Effekte überwiegt (vgl. Kap. 2.4.3.2). Zur Einordnung der Windgeschwindigkeiten an der Zuluftöffnung des Systems GK (gemessen jedoch nur in 3,50 m Höhe) sind die relativen Häufigkeiten der Tagesmittelwerte der Windgeschwindigkeiten während der vier untersuchten Mastdurchgänge in Windgeschwindigkeitsklassen aufgetragen, **Abbildung 18**.

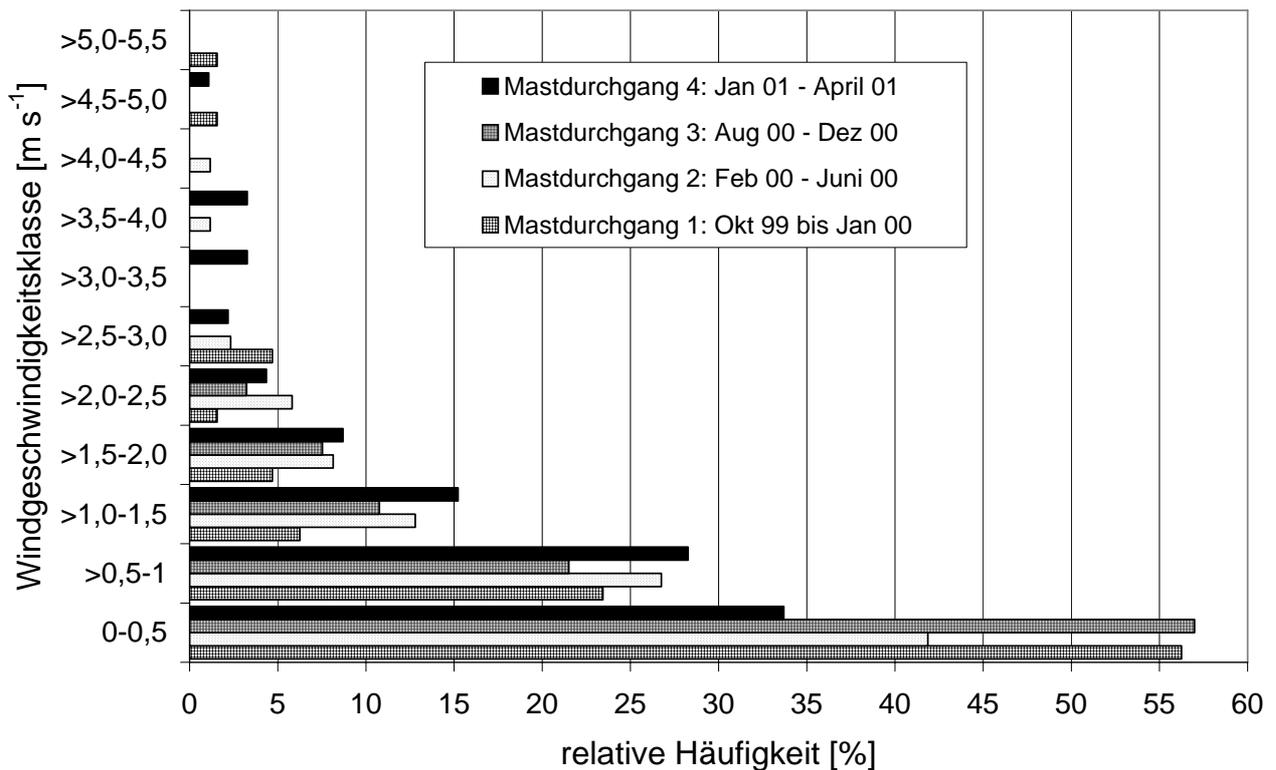


Abb. 18: Relative Häufigkeit [%] der Tagesmittelwerte der Windgeschwindigkeiten an der Zuluftöffnung des Systems GK während der vier untersuchten Mastdurchgänge (Klassenbreite $0,5 \text{ m s}^{-1}$)

Tendenziell wurden in den "winterlichen" Mastdurchgängen MD 1 und MD 4 öfter sehr hohe Windgeschwindigkeiten gemessen, die durch Sturm und Orkanereignisse in diesen Zeiträumen bedingt waren. Die höchsten Anteile von sehr geringen Windgeschwindigkeiten $< 0,5 \text{ m s}^{-1}$ waren in den Mastdurchgängen MD 1 und MD 3 zu verzeichnen. Nur in Mastdurchgang 4 lag der Gesamtmittelwert der Windgeschwindigkeiten über 1 m s^{-1} (Tab. A1-a bis Tab. A4-a). Teilt man die Klassierung der gemessenen Windgeschwindigkeiten nur in Werte kleiner oder größer einer Windgeschwindigkeit von $1,5 \text{ m s}^{-1}$ auf, so lagen in allen Mastdurchgängen 75 % bis 95 % der Tagesmittelwerte unterhalb von $1,5 \text{ m s}^{-1}$.

Der paarweise Mittelwertvergleich ergab für die verschiedenen Kombinationen dreimal signifikante und dreimal nicht signifikante Unterschiede zwischen den Mastdurchgängen (Tab. A5-a), ohne jedoch ein jahreszeitliches Muster oder Beziehungen zur Windrichtung erkennen zu lassen.

4.2.1.5 Verschmutzung

Die Verschmutzung der Bodenflächen mit Exkrementen in den untersuchten Abteilen wurde während der wöchentlichen Routine dokumentiert. Im System VSP konnte die Flächenverschmutzung in allen Mastdurchgängen als relativ gering eingestuft werden. In der Regel konzentrierte sich die Verschmutzung auf einen deutlich abgegrenzten Bereich an den Tränken und entlang der Buchtenrückwand (vgl. Abb. 1). Zu Mastbeginn war der Anteil der verschmutzten Flächen im System VSP tendenziell höher und verringerte sich mit zunehmendem Wachstum und Platzbedarf der Tiere. Die Flächen waren selten feucht bzw. die verschmutzten Bereiche trockneten recht schnell ab.

Im System GK muss zwischen den abgedeckten Liegebereichen und dem Aktivitätsbereich unterschieden werden. Die Verschmutzung der abgedeckten Liegeflächen war oftmals bei höheren Temperaturen und bei geringerem Liegeflächenplatzbedarf der jüngeren Tiere erheblich, **Abbildung 19**. Die Flächen im Aktivitätsbereich waren sehr unterschiedlich stark verschmutzt und dann aber in der Regel sehr feucht. Die Flächen trockneten wegen der recht hohen relativen Luftfeuchten (vgl. Kap. 4.2.2.1) nur schlecht ab. Durch die starke Strukturierung der Buchten im System GK entstanden Bereiche mit relativ wenig Tierverkehr (z.B. entlang der Buchtenrückwände), so dass dort die Exkremente nicht immer ausreichend durchgetreten wurden (Abbildung 19).

Die Beobachtungen zur Verschmutzung der Flächen mit Exkrementen in den beiden Haltungssystemen decken sich gut mit Erfahrungen aus der Literatur mit ähnlichen Stallsystemen (z.B. AARNINK, 1997; MAYER, 1999). Weiterführende Angaben zur Flächen- und Tierverschmutzung in Beziehung zum Tierverhalten und anderen Einflussfaktoren sind in BEA (2003) enthalten.

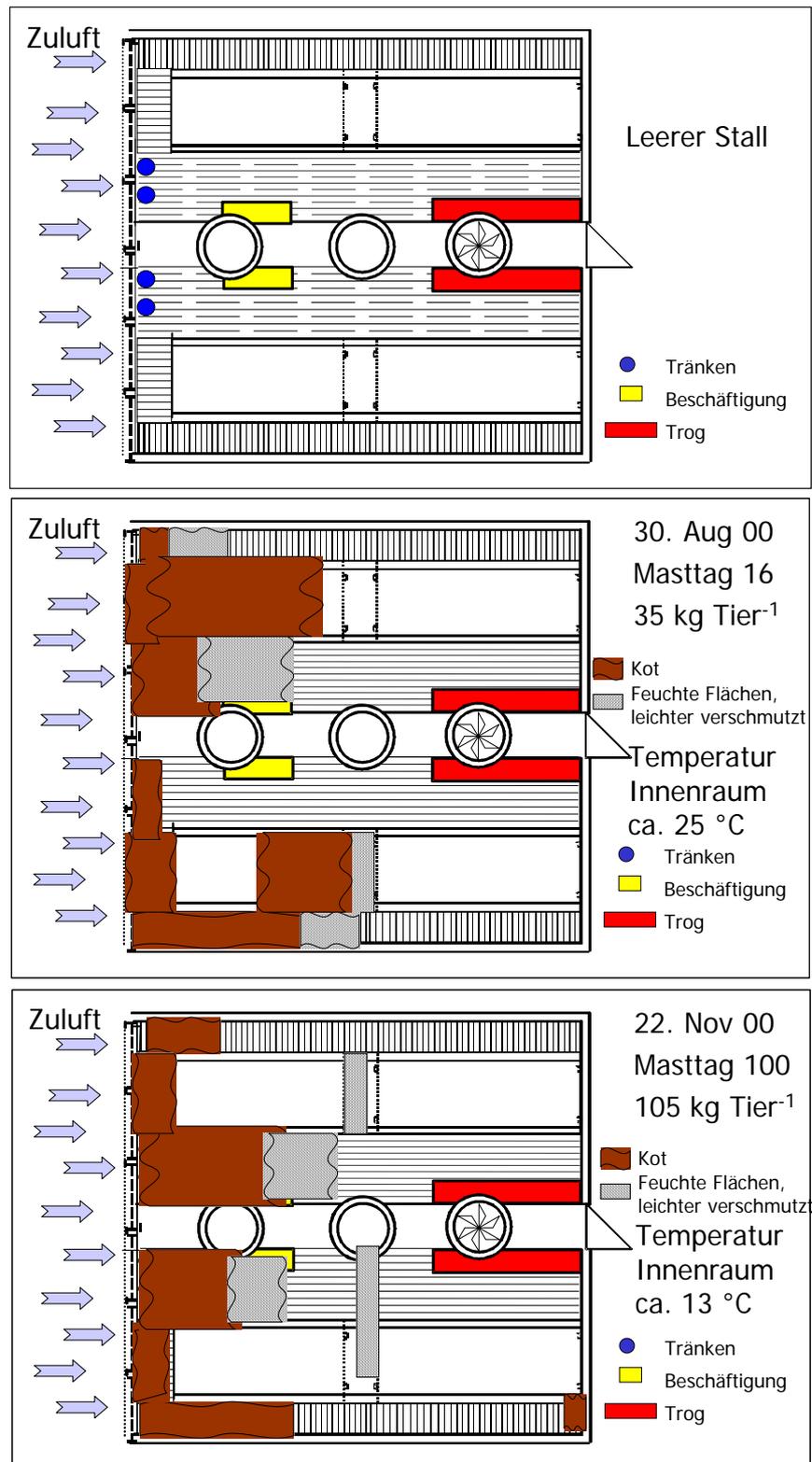


Abb. 19: Beispiele für die unterschiedliche Verschmutzung der Liegeflächen und des Aktivitätsbereiches im System GK in Abhängigkeit von der Innentemperatur und Tiergröße (vgl. auch Abb. 1; Kap. 3.1)

4.2.2 Stallklimafaktoren

Die Ergebnisse zum Stallklima werden im Folgenden für die beiden untersuchten Haltungssysteme "Vollspalten, Zwangslüftung (VSP)" und "Getrennte Klimabereiche, freie Lüftung (GK)" nacheinander für die Faktoren Temperatur und Luftfeuchte, Volumenströme, Gaskonzentrationen sowie Staubkonzentrationen beschrieben. Im Anhang sind die wesentlichen Parameter getrennt nach Mastdurchgängen tabellarisch zusammengefasst (Tab. A1-A6).

4.2.2.1 Temperatur und relative Luftfeuchte

Innenraum

Die Tagesmittelwerte von Temperatur und relativer Luftfeuchte im Innenraum der beiden Haltungssysteme sowie der Außentemperatur im Verlauf der vier untersuchten Mastdurchgänge werden in **Abbildung 20** aufgezeigt.

Im frei belüfteten System GK wird systembedingt ein paralleler Verlauf von Außen- und **Innenraumtemperatur** beobachtet, mit einer entsprechenden jahreszeitlichen Spannweite der tagesmittleren Temperaturen im Innenraum von 0°C bis 25 °C. Im zwangsbelüfteten System VSP hingegen wurde die Solltemperatur im Innenraum von der Stallklimaregelung vorgegeben. Die Temperaturregelung sah eine Absenkung der Innenraumtemperatur im Mastverlauf von 22° auf 18 °C vor, mit Ausnahme des Mastdurchganges 1 mit einer Absenkung bis auf 16 °C. Aus **Abbildung 20** wird jedoch ersichtlich, dass die tatsächlichen Innenraumtemperaturen in den Mastdurchgängen MD 2, MD 3 und MD 4 vor allem an warmen Tagen und zum Ende der Mast über der gewünschten Solltemperatur lagen. Dies zeugt von der Problematik, dass bei hohen Außentemperaturen und somit durch Ansaugung sehr warmer Luft eine Absenkung der Innenraumtemperatur unterhalb der Zulufttemperatur durch die Lüftungssteuerung nicht mehr möglich ist, wenn die Wirkung des Gebäudepuffers ausgereizt ist.

Die gemessenen Innenraumtemperaturen waren im Mittel der einzelnen Mastdurchgänge im System GK um etwa 20 % bis 50 % signifikant geringer als im System VSP (Tab. A1-A4). Weiterhin unterschieden sich die Innenraumtemperaturen innerhalb der Haltungssysteme und zwischen den einzelnen Mastdurchgängen bei allen paarweisen Vergleichen signifikant (Tab. A5).

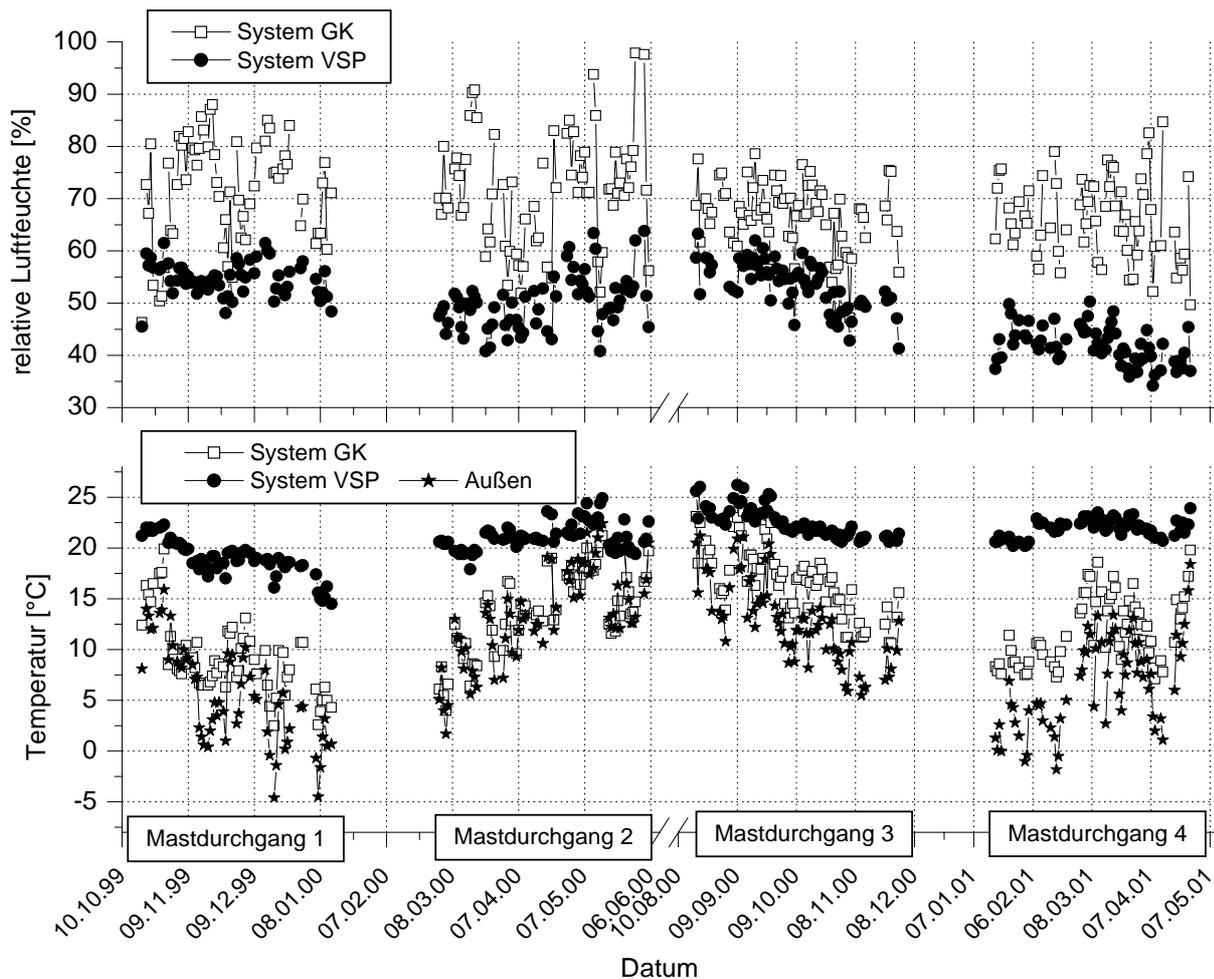


Abb. 20: Vergleich der selektierten Tagesmittelwerte von Temperatur und relativer Luftfeuchte im Innenraum der Haltungssysteme VSP (Vollspalten, Zwangslüftung) und GK (Getrennte Klimabereiche, freie Lüftung) sowie der Außentemperatur im Verlauf der vier untersuchten Mastdurchgänge

Die **relativen Luftfeuchten** hingegen überstiegen im System GK in allen Mastdurchgängen die Werte im System VSP signifikant um etwa 20 % bis 30 % (Tab. A1-A4). Die Unterschiede zwischen den Mastdurchgängen waren häufig signifikant (Tab. A5). Im System GK bestand wiederum bedingt durch das freie Lüftungssystem ein klarer Zusammenhang zur außen herrschenden Luftfeuchte und war besonders an Regentagen entsprechend hoch. Die Luftfeuchte im zwangsbelüfteten System VSP war generell recht niedrig und ist vor allem im Mastdurchgang 4 als zu gering einzustufen, wenn man sich an verschiedenen Empfehlungen zur relativen Luftfeuchte im Tierbereich von etwa 40 % bis 80 % (Optimalbereich 60 %-80 %) orientiert (BÜSCHER, 1992; MAYER, 1999).

Abbildung 21 verdeutlicht anhand der Tagesmittelwerte über alle Mastdurchgänge hinweg die unterschiedlich starke Abhängigkeit und Spannweite von Temperatur und relativer Luftfeuchte im Innenraum der Systeme VSP und GK von den Außenbedingungen, die in den anders gearteten Lüftungssystemen begründet liegt.

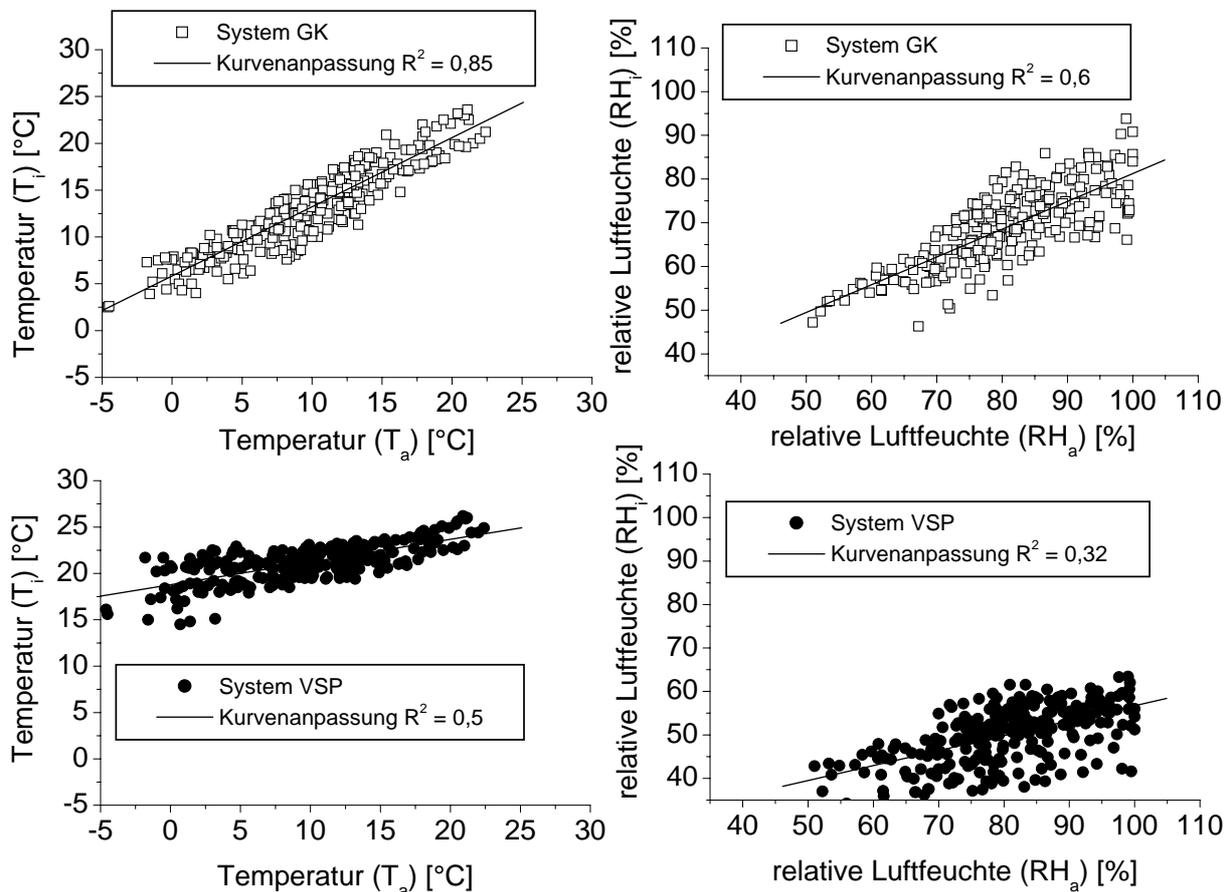


Abb 21: Vergleich der Abhängigkeit der Temperatur und Luftfeuchte im Innenraum (T_i ; RH_i) der Haltungssysteme VSP (Vollspalten, Zwangslüftung) und GK (Getrennte Klimabereiche, freie Lüftung) von den Außenbedingungen (T_a ; RH_a) (Datenbasis: selektierte Tagesmittelwerte aus den vier untersuchten Mastdurchgängen)

Abschließend bleibt festzuhalten, dass die Temperatur- und Feuchtebedingungen in beiden Haltungssystemen gut mit Werten aus Praxisställen sowie den Rahmenbedingungen in anderen stallklimatischen Untersuchungen und bei Emissionsmessungen übereinstimmen (vgl. Tab. 5; 6; 11; 12; 15; 16; 20; 21; 25).

Liegeflächen System GK

Im System GK sollen im Sinne der Trennung der Klimabereiche die abgedeckten Liegebereiche vor allem bei kalten Außen- bzw. Innenraumbedingungen als Zonen dienen, in denen, entsprechend den Temperaturansprüchen der Tiere, ausreichend hohe Temperaturen herrschen. Die Erwärmung der abgedeckten Liegebereiche erfolgte zum einen über die Wärmeabgabe der Tiere selbst sowie zusätzlich durch die optionale Beheizung der Bodenplatten in den Liegebereichen. **Abbildung 22** vergleicht die Tagesmittelwerte der Temperaturen und relativen Luftfeuchten in den beiden abgedeckten Liegeflächen (vgl. Abb. 5) des Systems GK während der vier untersuchten Mastdurchgänge.

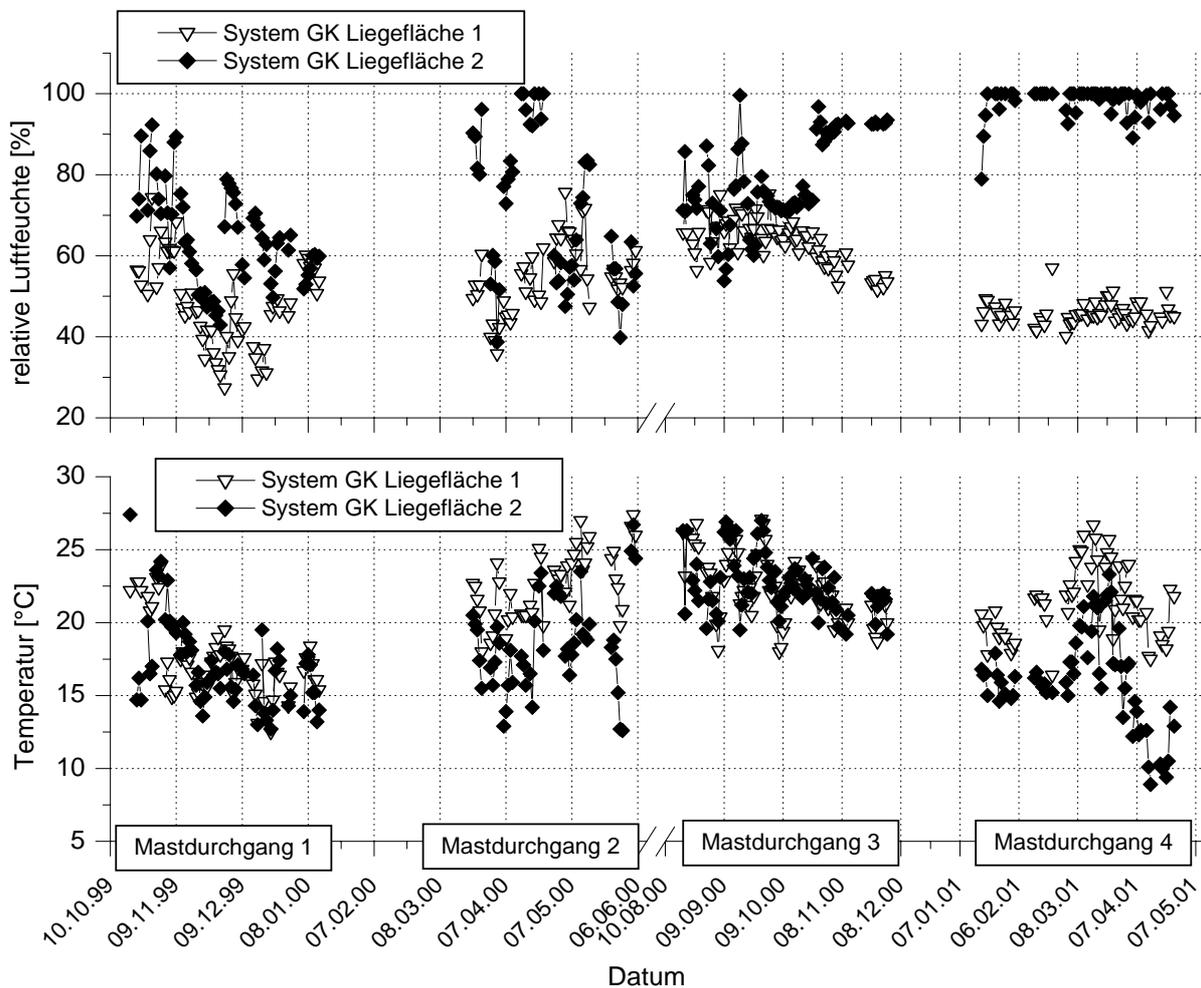


Abb. 22: Selektierte Tagesmittelwerte der Temperaturen und relativen Luftfeuchten in den beiden abgedeckten Liegeflächen des Systems GK (Getrennte Klimabereiche, freie Lüftung) während der vier untersuchten Mastdurchgänge

Den Temperaturansprüchen der Tiere konnte bei ansonsten kalten Bedingungen in den abgedeckten Liegebereichen weitestgehend entsprochen werden. Die mittleren Temperaturen der jeweiligen Mastdurchgänge lagen mit etwa 16 °C bis 23 °C in der Regel über den Innenraumtemperaturen (vgl. Abb. 20; Tab. A1-A4). Während Mastdurchgang 1 waren die Temperaturen im Liegebereich überwiegend geringer als in den Mastdurchgängen MD 2 und MD 3.

An warmen Tagen passte sich die Temperatur in der abgedeckten Liegefläche (Abbildung 22) der Innenraumtemperatur an oder überstieg diese sogar (vgl. Abb. 20), wobei dann die Tiere jedoch weniger die vorgesehene Liegefläche als mehr den Aktivitätsbereich zum Liegen nutzten. Die Umkehrung der Funktionsbereiche ging oft mit einer zunehmenden Verschmutzung der Flächen einher (vgl. Kap. 4.2.1.5; Abb. 19). Ein deutliches Anzeichen für eine starke Verschmutzung der Liegeflächen sind die sehr hohen relativen Luftfeuchten bei 100 % in Verbindung mit oftmals geringeren Temperaturen vor allem in Liegefläche 2 (Abbildung 22). Der Temperatur- und Feuchtesensor war sehr nah am Boden auf "Nasenhöhe" der liegenden Tiere am westlichen Ende des Liegebereiches 2 angebracht (vgl. Abb. 5); ein Bereich im Stall, der sehr oft und stark verschmutzt war (vgl. Abb.19). Die Liegefläche 1 wurde in der Regel weniger verschmutzt und mehr zum Liegen genutzt, so dass die Temperaturen und relativen Luftfeuchten einen moderateren Verlauf zeigen (Abbildung 22).

4.2.2.2 Volumenströme

Klare Unterschiede zwischen den Haltungssystemen und den Mastdurchgängen bestanden in der Höhe und Spannweite der Volumenströme, bedingt durch die unterschiedlichen Lüftungsprinzipien Zwangslüftung im System VSP und freie Lüftung im System GK, **Abbildung 23**.

Die Darstellungsweise der Volumenströme pro Tier drückt bei gleichbleibender Tierzahl die Veränderung der absoluten Höhe und der Unterschiede der Volumenströme aus. Die Volumenströme pro Tier im frei belüfteten System GK lagen im Mittel der Mastdurchgänge um 98 % (MD 1), 65% (MD 2), 29 % (MD 3) bzw. 77 % (MD 4) signifikant deutlich über den Volumenströmen im System VSP (Tab. A1-A4). In der Literatur wird ebenfalls mehrfach über deutlich höhere Luftraten bei frei belüfteten Schweineställen im Vergleich zu zwangsbilüfteten Ställen berichtet (vgl. Tab. 5; 6; 11; 12; 15; 16; 20; 21; 25).

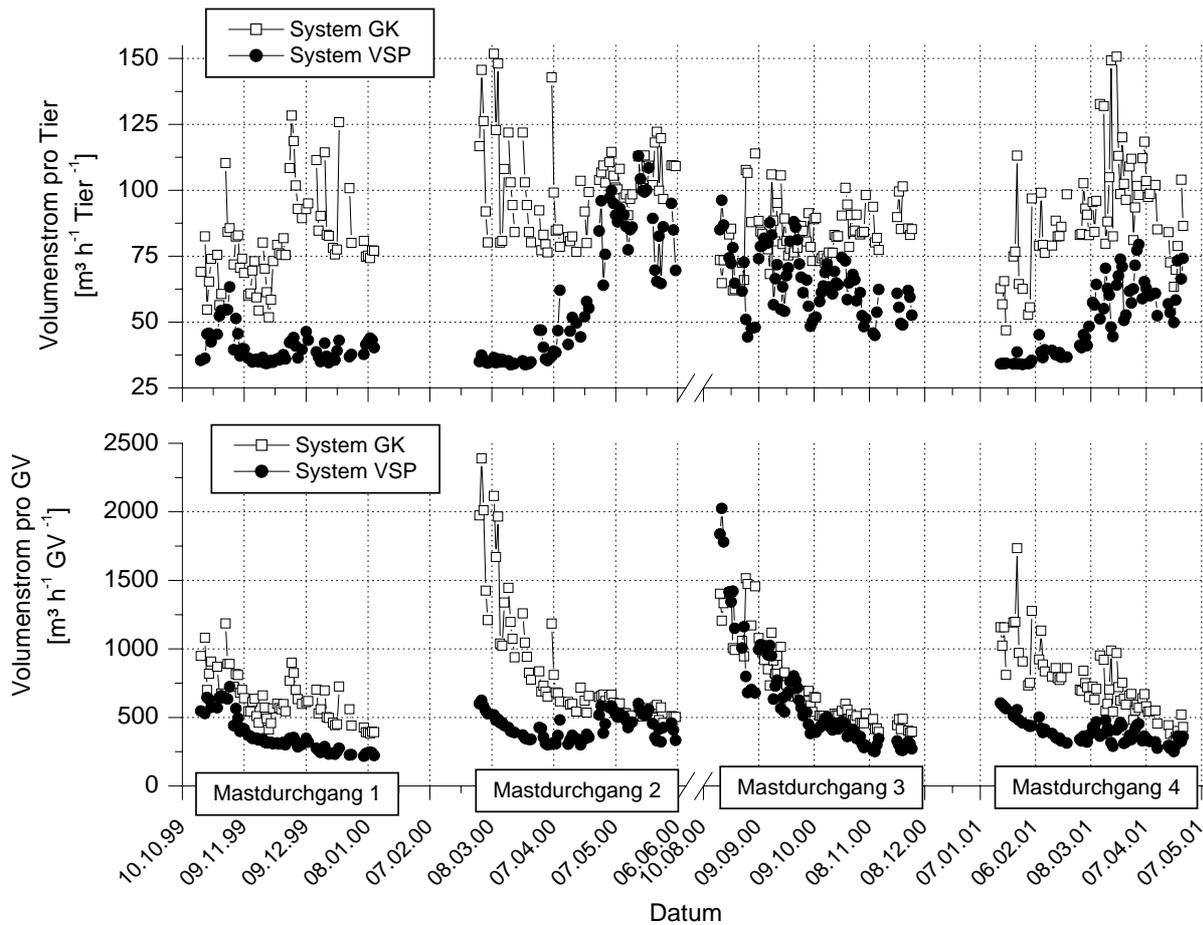


Abb. 23: Vergleich der selektierten Tagesmittelwerte der Volumenströme pro Tier bzw. bezogen auf die Großvieheinheit der Haltungssysteme VSP (Vollspalten, Zwangslüftung) und GK (Getrennte Klimabereiche, freie Lüftung) im Verlauf der vier untersuchten Mastdurchgänge

Durch den Bezug der Volumenströme in Abbildung 23 auf die beim Rein-Raus-Verfahren konstant ansteigende Stallbelegung in Großvieheinheiten (GV) (vgl. Kap. 4.2.1.2, Abb. 12) wird deutlich, dass die Veränderung der Stallbelegung in GV stärker ist als die absolute Veränderung der Volumenströme, so dass die Werte auf die GV bezogen abnehmen. Durch die "Normierung" der Werte auf GV veränderten sich die Unterschiede zwischen den Haltungssystemen ggf. um 10 % bis 30 % (Tab. A1-A4). In Abhängigkeit von der Bezugsgröße sind ebenfalls unterschiedliche Signifikanzen der Mittelwertunterschiede der Volumenströme zwischen den Mastdurchgängen innerhalb eines Haltungssystems festzustellen (Tab. A5).

Die Volumenströme der Zwangslüftung im System VSP waren in ihrer Spannweite von 30 bis $110 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1} \text{ Tier}^{-1}$ begrenzt und bestimmt durch die Dimensionierung der Sommer- und Winterluftrate nach DIN 18 910 (1992) und die Stallklimaregelung zur Einhaltung der Solltemperatur. Am Beispiel von Mastdurchgang 2 wird die Spannweite der Volumenströme beim Wechsel von sehr geringen Volumenströmen

(Winterluftfrate: kalte Jahreszeit und kleine Tiere zu Mastbeginn) zu hohen Volumenströmen (Sommerluftfrate; warme Jahreszeit und gleichzeitig große Tiere zu Mastende) besonders deutlich (Abbildung 23). Die Höhe der Volumenströme steht in guter Übereinstimmung mit verschiedenen Angaben aus der Literatur (vgl. Tab. 5; 6; 11; 12; 15; 16; 20; 21; 25).

Tageszeitliche Schwankungen des Volumenstromes im System VSP waren vor allem durch Temperaturschwankungen der Zuluft bzw. der Temperaturdifferenz zwischen Innenraum und Umgebung bestimmt, beispielsweise durch deutliche Tag-Nacht-Amplituden in den Übergangsjahreszeiten. Weiterhin konnten während der Fütterungszeiten kurzzeitige Volumenstromanstiege beobachtet werden, da infolge der erhöhten Tieraktivität die Raumtemperatur anstieg und dieser Anstieg ggf. durch die Stallklimaregelung durch Erhöhung der Ventilator Drehzahl kompensiert wurde.

Abbildung 24 zeigt beispielhaft für drei Messzeiträume des Mastdurchgangs 2 die unterschiedliche Dynamik des Volumenstromes im System VSP in Abhängigkeit von der Innenraumtemperatur und Temperaturdifferenz. Lagen keine deutlichen Temperaturänderungen vor, verhielt sich der Volumenstrom sehr konstant. Bei Temperaturveränderungen verlief der Volumenstrom parallel zur Innenraumtemperatur und entgegengesetzt zur Temperaturdifferenz.

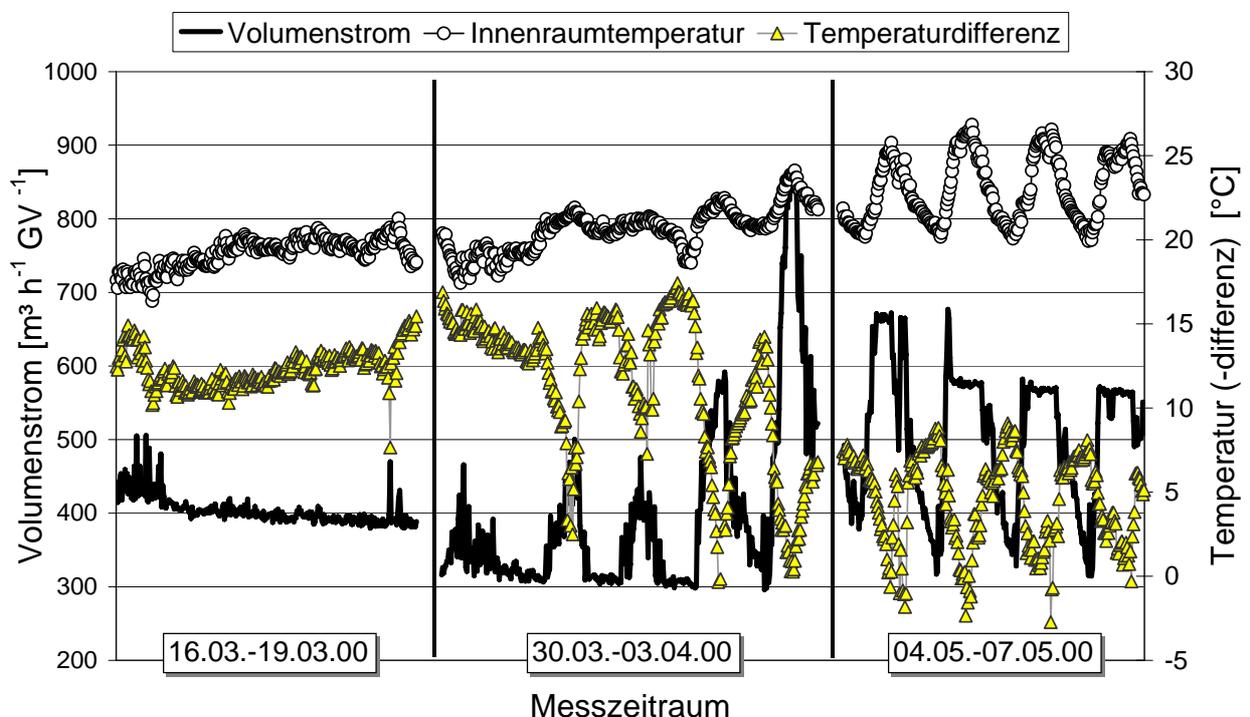


Abb. 24: Dynamik des Volumenstromes im System VSP in Abhängigkeit von der Innenraumtemperatur und Temperaturdifferenz am Beispiel von drei aufeinanderfolgenden Messzeiträumen des Mastdurchganges 2

Im frei belüfteten System GK ist der in **Abbildung 25** dargestellte Gesamtvolumenstrom die Summe aus den Volumenströmen der drei Abluftschächte (vgl. Abb. 5). Im Vergleich zum System VSP traten zu allen Jahreszeiten stärkere und kurzzeitigere Volumenstromschwankungen auf. Anhand zwei beispielhafter Verläufe in **Abbildung 25** während einer Winter- bzw. Sommersituation wird ersichtlich, dass die Volumenströme im System GK zum einen deutlich von der Windgeschwindigkeit an der Zuluftöffnung beeinflusst wurden. Zum anderen wirkte sich an warmen Tagen der Einsatz des temperaturgeregelten Solarventilators deutlich auf die Höhe und den Verlauf des Gesamtvolumenstromes aus.

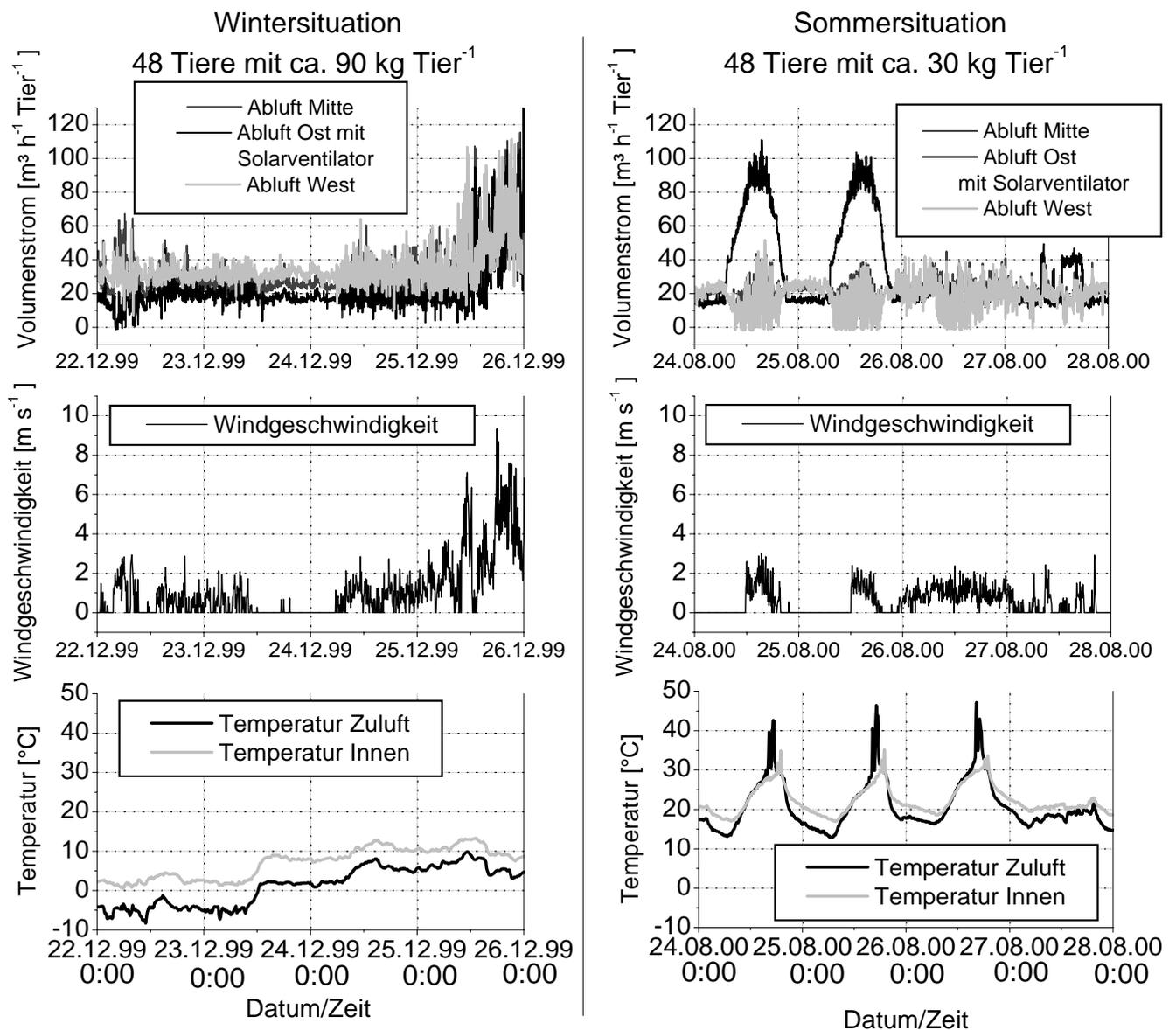


Abb. 25: Beispielhafte Verläufe der Volumenströme in den einzelnen Abluftschächten des Systems GK (getrennte Klimabereiche, freie Lüftung) während einer Winter- und Sommersituation in Abhängigkeit von der Windgeschwindigkeit an der Zuluftöffnung, von den Temperaturen der Zuluft und im Innenraum

Die oben beschriebenen Einflüsse auf die Volumenströme in den unterschiedlichen Haltungs- bzw. Lüftungssystemen lassen sich, ebenso basierend auf allen selektierten Tagesmittelwerten aller vier untersuchten Mastdurchgänge, in abgeschwächter Form nachweisen, **Abbildung 26**. Besonders hervorzuheben ist, dass im System GK ein klarer Einfluss der Temperaturdifferenz auf den Volumenstrom kaum nachzuweisen ist. Die Windgeschwindigkeit an der Zuluftöffnung war auch bei bereits kleineren Windgeschwindigkeiten ($< 1,5 \text{ m s}^{-1}$; vgl. Kap. 4.2.1.4) wesentlich bedeutender für die Höhe des Volumenstromes.

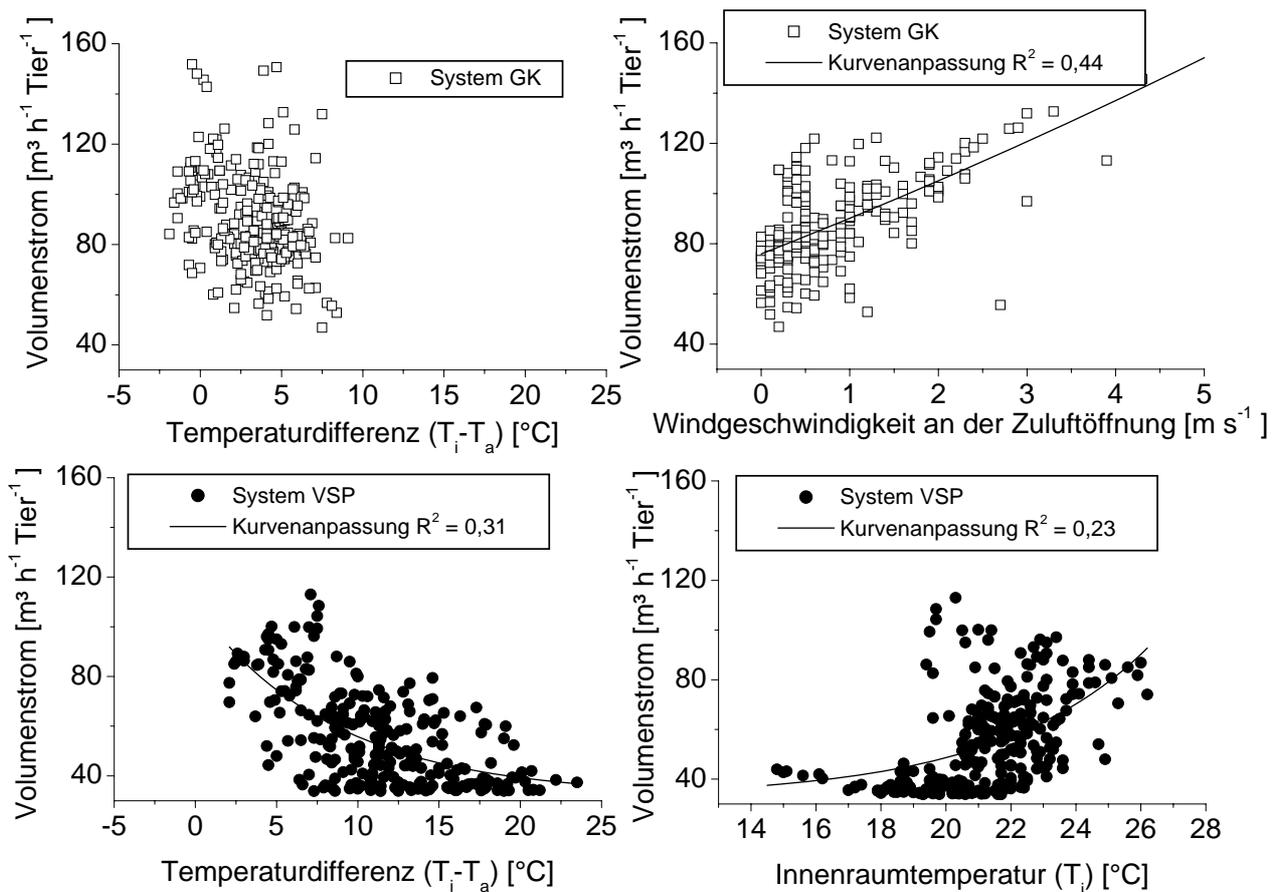


Abb. 26: Vergleich der Abhängigkeit des Volumenstromes pro Tier der Haltungssysteme VSP (Vollspalten, Zwangslüftung) und GK (Getrennte Klimabereiche, freie Lüftung) von verschiedenen Einflussvariablen (Datenbasis: selektierte Tagesmittelwerte aus den vier untersuchten Mastdurchgängen) (T_i = Innenraumtemperatur; T_a = Außentemperatur)

4.2.2.3 Konzentrationen von Ammoniak, Kohlendioxid und Methan

Innenraum

In **Abbildung 27** werden die Verläufe der Tagesmittelwerte der NH_3 -, CO_2 - und CH_4 -Konzentrationen im Innenraum der beiden Haltungssysteme, in Verbindung mit den Volumenströmen über die vier untersuchten Mastdurchgänge hinweg, miteinander verglichen. Die Datenkontrolle und -selektion (vgl. Kap. 3.4) resultierte bei den Gaskonzentrationen in einem sehr hohen Datenausschluss von NH_3 in Mastdurchgang 1 und von CO_2 und CH_4 in Mastdurchgang 4 (Tab. A1-A4).

Die NH_3 -Konzentrationen im Innenraum unterscheiden sich in **Abbildung 27** bis auf wenige Einzelwerte zwar optisch kaum voneinander, dennoch wurden die Mittelwertunterschiede zwischen den Systemen bis auf je eine Ausnahme als signifikant eingestuft (Tab. A1-A4, Tab. A5). In Hinblick auf die Beurteilung der Luftqualität im Tierbereich werden in beiden Systemen die NH_3 -Konzentrationen im Innenraum auch im Vergleich zu Literaturangaben (vgl. Kap. 2.1.3; Tab 5; 6) als sehr niedrig eingestuft und somit positiv bewertet. Im Mittel über die gesamten Mastdurchgänge betragen die NH_3 -Konzentrationen im Innenraum nur 6 ppm bis 12 ppm mit einer Tendenz zu höheren Werten in den "winterlichen" Mastdurchgängen MD 1 und MD 4 (Tab. A1-A4).

Die CH_4 -Konzentrationen im Innenraum lagen im Mittel der Mastdurchgänge im System VSP (etwa 6 ppm bis 10 ppm) signifikant um etwa 40 % bis 50 % höher als die Werte des Systems GK (etwa 3 ppm bis 5 ppm). Bis auf zwei Ausnahmen waren die Unterschiede zwischen den Mastdurchgängen ebenso signifikant (Tab. A5), ohne dass jedoch Beziehungen zur Jahreszeit oder anderen Faktoren erkennbar waren. Die Werte für das System VSP liegen deutlich unter den in **Tabelle 15** genannten Werten für zwangsbelüftete Ställe, die sich jedoch nicht auf die Innenraum- sondern auf die Abluftkonzentration beziehen. Der Wertebereich für das System GK ähnelt den Literaturangaben (jedoch wiederum nur zu Abluftkonzentrationen) von frei belüfteten Systemen (vgl. Tab. 16). Zusammenfassend werden die CH_4 -Konzentrationen im Innenraum beider Systeme als sehr gering eingestuft, zumal sie sich oft nur wenig von den Zuluftkonzentrationen unterschieden.

Als die Hauptquellen für NH_3 und CH_4 sind der im Innenraum zwischengelagerte Flüssigmist und die mit Exkrementen verschmutzten Oberflächen anzusehen (vgl. Kap. 2.1.1; Kap. 2.2.2.1). Die primär tierspezifischen und sekundär aus den Exkrementen stammenden CO_2 -Konzentrationen (vgl. Kap. 2.2.1.1) betragen im Innenraum des Systems VSP im Mittel (1100 -1800 ppm) das zwei- bis dreifache der Konzentrationen im System GK (620 -730 ppm) (Tab. A1-A4).

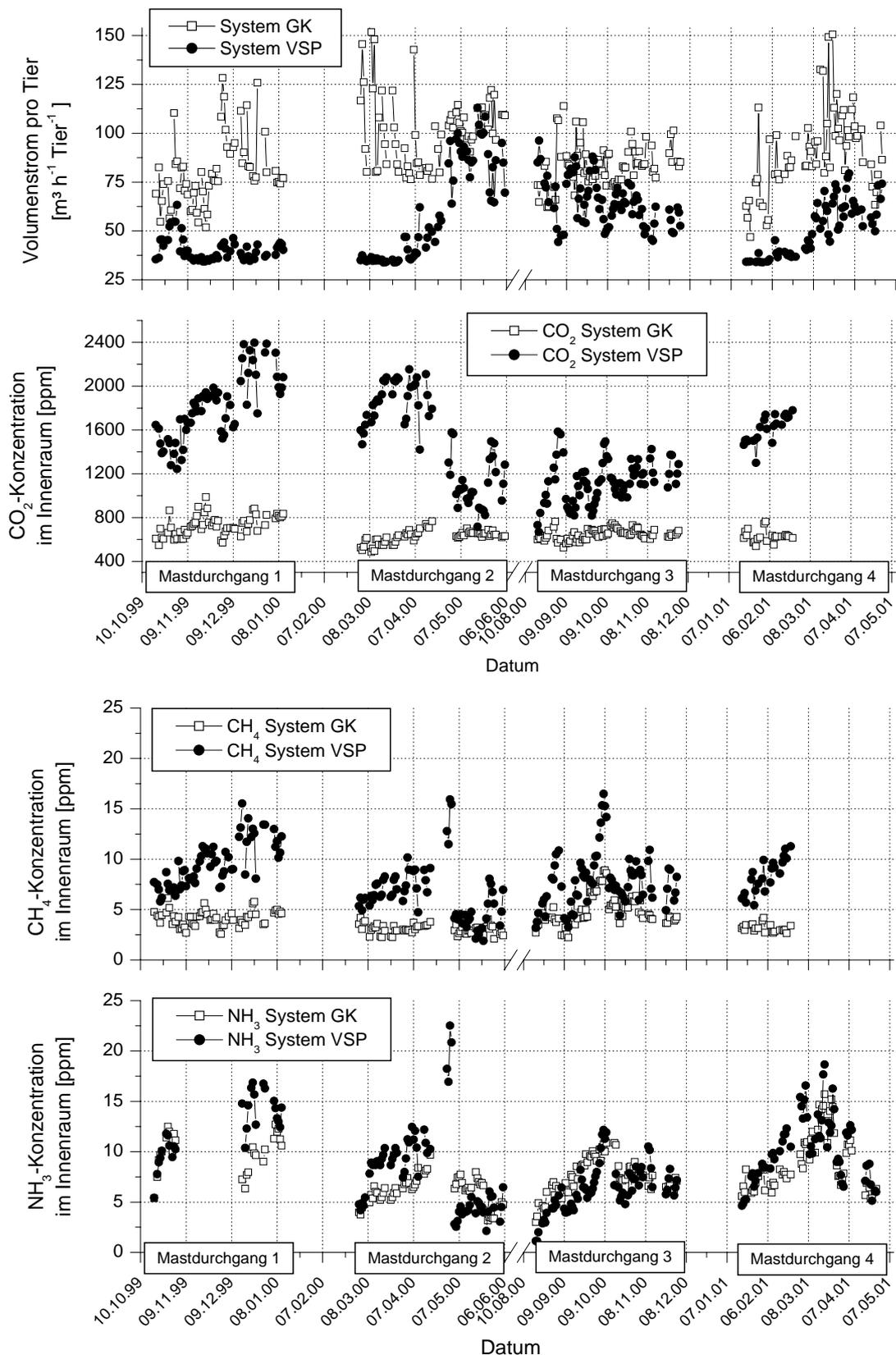


Abb. 27: Vergleich der selektierten Tagesmittelwerte der NH₃-, CH₄- und CO₂-Konzentrationen im Innenraum in Verbindung mit den Volumenströmen der Haltungssysteme VSP (Vollspalten, Zwangslüftung) und GK (Getrennte Klimabereiche, freie Lüftung) im Verlauf der vier untersuchten Mastdurchgänge

Die Unterschiede in der Höhe der CO₂-Konzentrationen zwischen den Mastdurchgängen waren innerhalb des Systems VSP öfter signifikant als im System GK (Tab. A5). Für das zwangsbelüftete System VSP ist eine Tendenz zu höheren CO₂-Konzentrationen bei geringeren Volumenströmen, die wiederum jahreszeitlich beeinflusst sind (Vgl. Kap. 4.2.2.2), besonders gut am Beispiel des Mastdurchganges 2 erkennbar (Abbildung 27). Insgesamt können die CO₂-Konzentrationen im Innenraum beider Haltungssysteme im Vergleich zur und in Übereinstimmung mit der Literatur (vgl. Tab. 11; 12) als gering und folglich hinsichtlich der Luftqualität als sehr gut eingestuft werden.

Eine Begründung für die zumindest bei CO₂ und CH₄ deutlich geringeren Konzentrationen im Innenraum des Systems GK wird vornehmlich in der geringeren Tierzahl, den höheren Volumenströmen und in den geringeren Temperaturen vermutet. Weshalb die Unterschiede bei NH₃ nicht so klar hervortreten, konnte anhand der zur Verfügung stehenden Daten und Erkenntnisse nicht abschließend geklärt werden.

Generell ist zu beachten, dass die Messung der Innenraumkonzentrationen an je zwei Messstellen nicht repräsentativ für den gesamten Tierbereich bzw. Raum sein kann (vgl. Kap. 2.4.4.2; Kap. 3.3). Weiterhin ist zu klären, ob die Gaskonzentrationen in den abgedeckten Liegeflächen (s.u.) in Zusammenhang mit den Innenraumkonzentrationen zu sehen sind. Auf weiterführende Zusammenhänge zwischen Volumenstrom und Konzentration sowie ausgewählte tageszeitliche Effekte wird im anschließenden Kapitel 4.2.3 bei den Ergebnissen zu den Emissionen eingegangen.

Liegeflächen System GK

Da sich im System GK in Abhängigkeit von den Temperaturverhältnissen und -bedürfnissen die Tiere in den abgedeckten Liegeflächen aufhalten, müssen für eine Beurteilung der Luftqualität die dort herrschenden Gaskonzentrationen ebenso berücksichtigt werden, **Abbildung 28**.

Die NH₃-Konzentrationen an der Messstelle in der Liegefläche 2 betragen wesentlich häufiger mehr als 20 ppm mit Spitzenwerten bis zu 75 ppm und lagen bis auf Mastdurchgang 3 über den Werten der Liegefläche 1 (Tab. A1-A4). Diese hohen und negativ zu bewertenden Werte sind im Wesentlichen auf die an der Messstelle im Liegebereich 2 starke Verschmutzung zurückzuführen, die bereits in Kap. 4.2.1.5 beschrieben wurde. Dieser Zusammenhang wird ebenso von MAYER (1999) herausgestellt, der über sehr hohe NH₃-Konzentrationen bis zu 100 ppm und mehr infolge von Flächenverschmutzung berichtet (vgl. Kap. 2.1.3; Tab. 6).

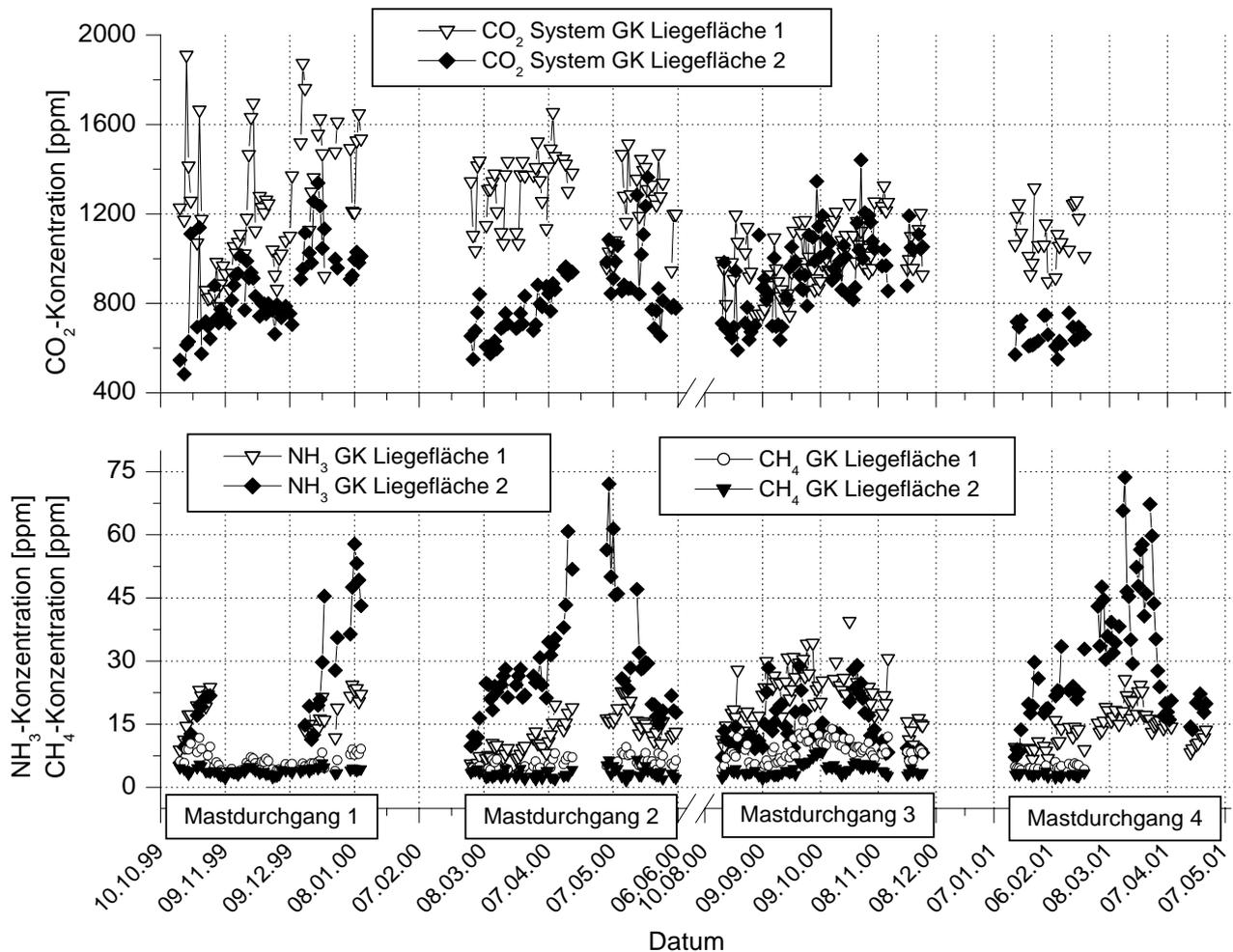


Abb. 28: Vergleich der selektierten Tagesmittelwerte der NH₃-, CH₄- und CO₂-Konzentrationen in den abgedeckten Liegebereichen des Haltungssystems GK (Getrennte Klimabereiche, freie Lüftung) im Verlauf der vier untersuchten Mastdurchgänge

Die CH₄-Konzentrationen in den Liegeflächen (Abbildung 28) unterschieden sich mit 3 ppm bis 5 ppm in Liegefläche 2 kaum von den Konzentrationen im Innenraum (vgl. Abb. 27), wohingegen die Werte in Liegefläche 1 mit 5 ppm bis 9 ppm leicht höher lagen. Dieses Ergebnis ist zunächst irritierend, da zu erwarten gewesen wäre, dass mit zunehmender Verschmutzung auch die CH₄-Konzentrationen ansteigen. Dabei ist zu berücksichtigen, dass wiederum die ebenso sehr hohen Luftfeuchten in Liegefläche 2 oftmals eine größere Wasserdampfkorrektur der Messwerte (vgl. Kap. 4.1.2) bedingten. Es wird vermutet, dass ein Teil der Unterschiede der CH₄-Konzentrationen durch Ungenauigkeiten bei der Wasserdampfkorrektur verursacht wurden. Schließlich war zu beobachten, dass die CH₄-Konzentrationen generell wesentlich geringer und stärker gedämpft als die NH₃- und CO₂-Konzentrationen auf kurzfristige Veränderungen reagierten und deren Höhe im Innenraum und den abgedeckten Liegeflächen als eher vernachlässigbar einzustufen ist.

Hohe CO_2 -Konzentrationen in den abgedeckten Liegeflächen sind ein Indiz für die Anwesenheit von Tieren bzw. die tatsächliche Nutzung als Liegefläche (vgl. Kap. 2.2.1.3). Aus Abbildung 28 wird anhand der CO_2 -Konzentrationen deutlich, dass die in der Regel eher saubere Liegefläche 1 stärker zum Liegen genutzt wurde (vgl. auch Abb. 19).

Die Entwicklung der Gaskonzentrationen in den beiden abgedeckten Liegeflächen im Vergleich zum Innenraum zeigt beispielhaft für je vier winterliche und für je vier sommerliche Tage **Abbildung 29**.

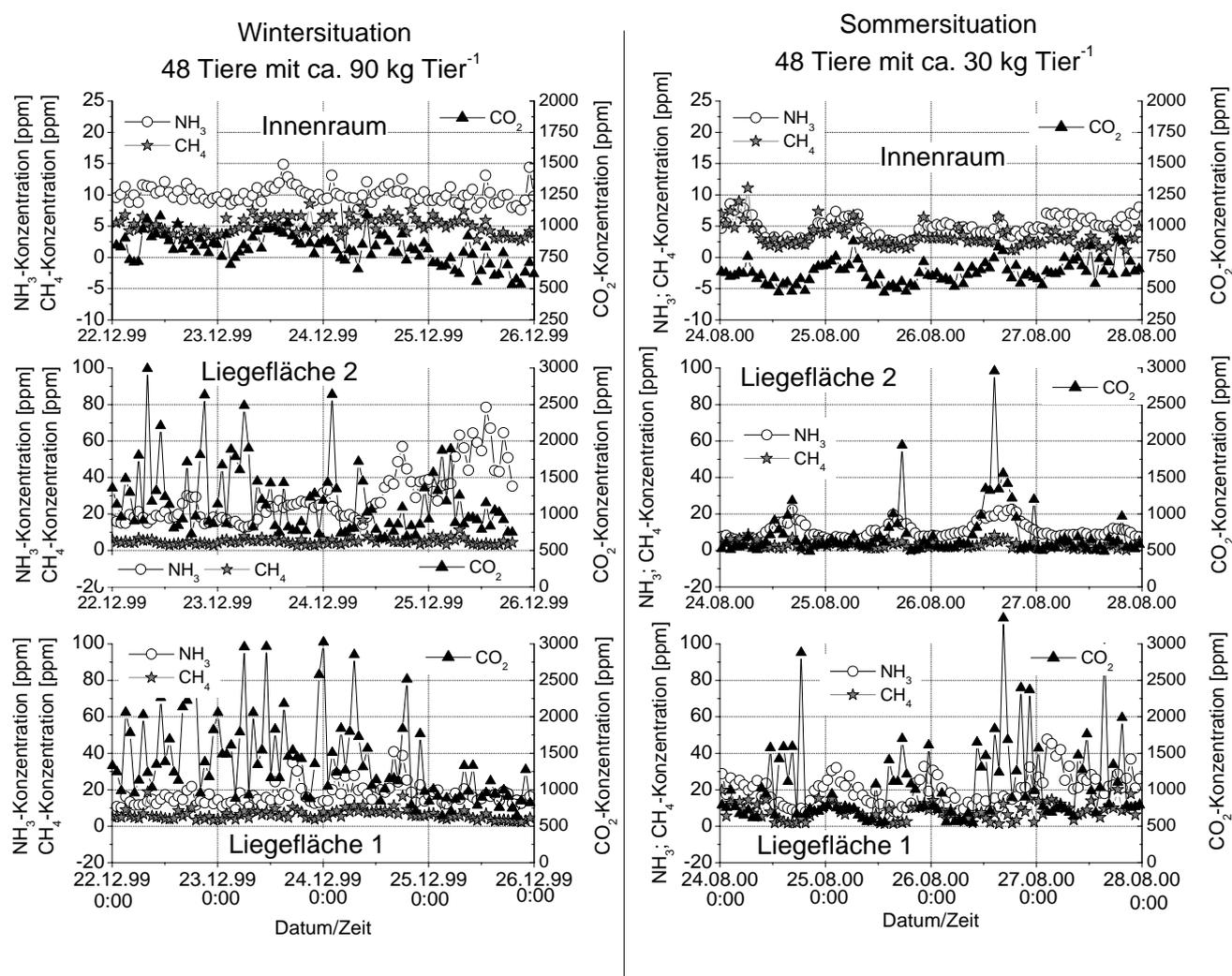


Abb. 29: Beispielhafter Verlauf der Gaskonzentrationen von NH_3 , CO_2 und CH_4 im Innenraum und den abgedeckten Liegebereichen des Haltungssystems GK (Getrennte Klimabereiche, freie Lüftung) an vier Winter- und Sommertagen (zum Teil unterschiedliche Skalierung)

Im Winter wurde die Liegefläche wesentlich stärker und häufiger allein auf Grund des Temperaturvorteils im Vergleich zum Innenraum benötigt und genutzt. Bei Nutzung der Liegefläche wurden kurzzeitig CO₂-Werte bis hin zum Grenzwert von 3000 ppm gemessen (Abbildung 29). Die starken Schwankungen der CO₂-Konzentrationen lassen sich zum Teil durch die häufigen Fütterungszeiten (vgl. Kap. 2.2.1.3; Tab. 32) erklären, die zu vermehrter Aktivität am Trog und Unterbrechung der Liegezeiten führten. Im Sommer lagen die meisten Tiere vor allem auf Grund der hohen Temperaturen außerhalb der abgedeckten Liegebereiche, so dass die CO₂-Konzentrationen dort geringer ausfallen und weniger Peaks aufweisen (Abbildung 29). Vor allem der Liegebereich 2 wurde wegen der starken Verschmutzung nicht mehr zum Liegen genutzt (vgl. Abb. 19). Im Winter wurde der Liegebereich 2 ebenfalls mit steigenden Innenraumtemperaturen (vgl. Abb. 20) wieder stärker verschmutzt, was sich in NH₃-Konzentrationen bis zu 80 ppm widerspiegelt, wohingegen im sauberen Liegebereich 1 der Grenzwert von 20 ppm fast immer knapp eingehalten werden konnte (Abbildung 29). Im Sommer wurde dieser jedoch auch im Liegebereich 1 oft mit Werten bis zu 40 ppm überschritten (Abbildung 29).

Ab dem Mastdurchgang 2 bestand die Möglichkeit, mit Hilfe manuell verstellbarer Abluftöffnungen in den Liegeflächenabdeckungen, diese zu "entlüften" (vgl. Tab. 35). In der Regel wurde davon während warmer Zeiträume Gebrauch gemacht, wobei die Öffnungen dann durchweg geöffnet waren. Es ist jedoch anhand der Daten keine eindeutige Beziehung zwischen der Höhe der Gaskonzentrationswerte in den abgedeckten Liegeflächen und den Zeiträumen mit offenen oder geschlossenen Entlüftungsöffnungen nachweisbar. Weiterhin war kein direkter Einfluss der Gaskonzentrationen in den abgedeckten Liegeflächen auf die Konzentrationen im Innenraum erkennbar, wenn die Liegeflächen geöffnet wurden ("Käseglockenprinzip"). Vermutlich erfolgte die Durchmischung mit der Innenraumluft sowie Verdünnung durch die Luft wesentlich schneller, als es mit der gegebenen zeitlichen Beprobungsabfolge zu erfassen war (vgl. Kap. 3.3; Tab. 37).

4.2.2.4 Staubkonzentrationen

In Ergänzung zu den o.g. Untersuchungen zu Stallklima und Luftqualität wurden weiterhin Messungen der Staubkonzentrationen der Größenfraktionen PM 10 sowie PM 2,5 und PM 1,0 (vgl. Kap. 2.3) nur im Innenraum durchgeführt (vgl. Kap. 3.3). In den **Abbildungen 30 und 31** (vgl. Kap. 3.5) sind die zu den jeweiligen Messzeitpunkten (Masttag) je Mastdurchgang bestimmten PM 10 Konzentrationen über 24 h im Innenraum der untersuchten Haltungssysteme VSP und GK unter Angabe der tagesmittleren Volumenströme pro GV dargestellt. Die Ergebnisse im einzelnen zur Höhe und Spannweite der PM 10 sowie PM 2,5 und PM 1,0 Konzentrationen in Verbindung mit den Randbedingungen Stallbelegung, Temperatur, Luftfeuchte und Volumenstrom sind im Anhang in **Tabelle A6** zusammenfassend aufgeführt.

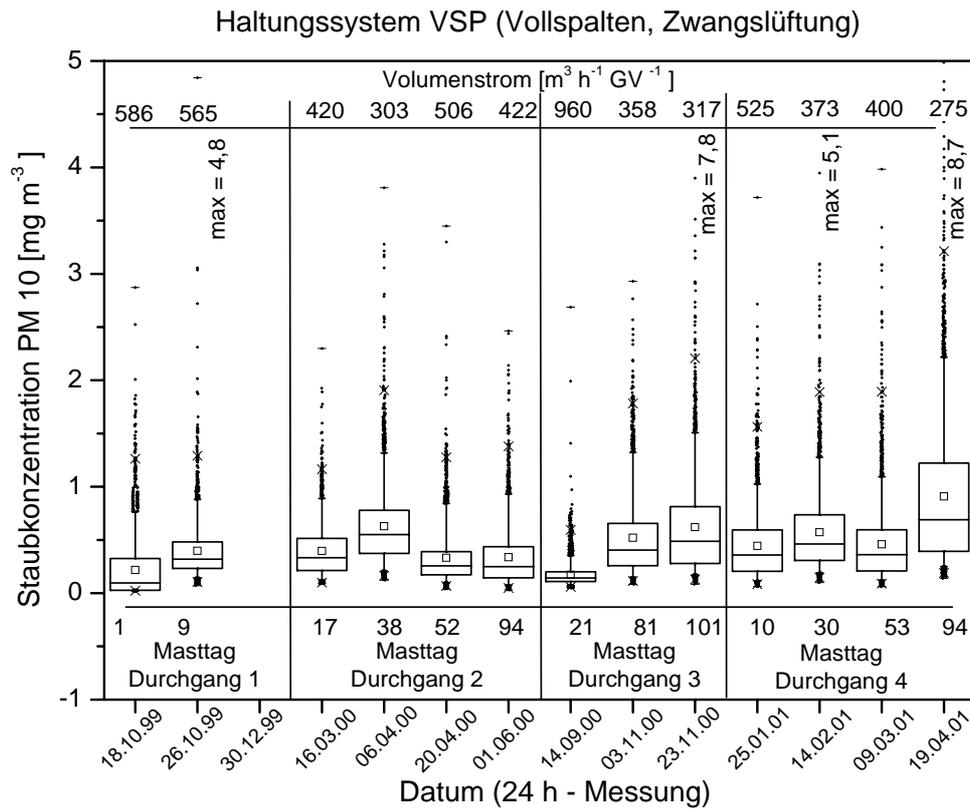


Abb. 30: PM 10-Konzentrationen im Innenraum des Systems VSP (Vollspalten, Zwangslüftung) mehrerer 24-h-Messungen pro Mastdurchgang

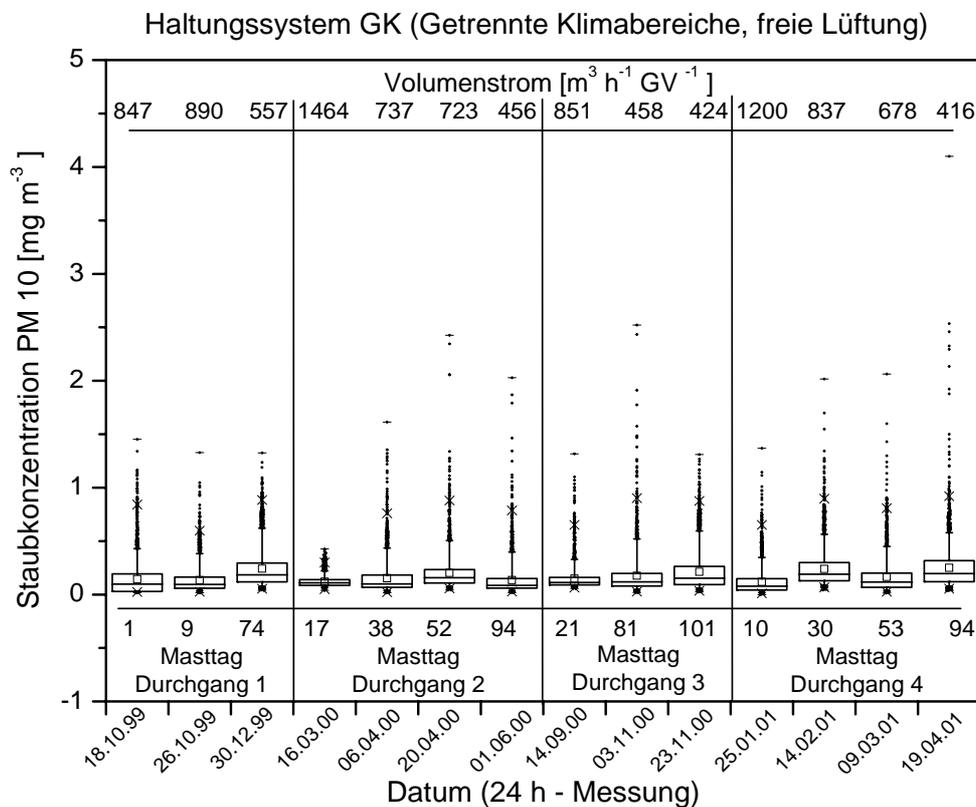


Abb. 31: PM 10-Konzentrationen im Innenraum des Systems GK (Getrennte Klimabereiche, freie Lüftung) mehrerer 24-h-Messungen pro Mastdurchgang

Aus den Abbildung 30 und Abbildung 31 wird ersichtlich, dass in der Regel bedeutend höhere PM 10-Konzentrationen im Innenraum des Systems VSP sowohl hinsichtlich des Mittelwertes als auch des Medians, der Spannweite und Maxima im Vergleich zum System GK gemessen wurden. Diese Beobachtung gilt analog für die Ergebnisse zur PM 2,5 und PM 1,0 Konzentration (Tab. A6). Eine Ausnahme stellt die Messung am 21. Masttag des Mastdurchgang 3 dar, während der sich die PM 10 und PM 1,0 Konzentrationen zwischen den Systemen kaum unterschieden. Dies ist vor allem darauf zurückzuführen, dass die Werte zu diesem Zeitpunkt innerhalb des Systems VSP deutlich geringer waren als bei den sonstigen Messungen im System VSP (Abb. 30, Tab. A6). Dies kann zum Teil wahrscheinlich auf den sehr hohen Volumenstrom pro Großvieheinheit (GV) bei dieser Messung zurückgeführt werden.

Im Mittel aller Messungen betrug die PM 10-Konzentration im Innenraum des System VSP $0,46 \text{ mg m}^{-3}$ und im System GK $0,17 \text{ mg m}^{-3}$. Die PM 2,5-Konzentrationen beliefen sich im Mittel aller Messungen auf $0,15 \text{ mg m}^{-3}$ (System VSP) bzw. $0,07 \text{ mg m}^{-3}$ (System GK). Ebenfalls für die PM 1,0-Konzentrationen wurden im Mittel aller Messungen im System VSP mit $0,12 \text{ mg m}^{-3}$ doppelt so hohe Werte gemessen als im System GK mit $0,06 \text{ mg m}^{-3}$ (Tab. A6). Die eigenen Ergebnisse zu den beiden Stallsystemen liegen in ähnlichen Wertebereichen, die in der Literatur genannt werden, wobei jedoch die Vergleichbarkeit der absoluten Zahlen durch den Bezug auf dort verwendete andere Größenfraktionen eingeschränkt ist (vgl. Kap. 2.3; Tab. 25).

Zur Klärung, ob Abhängigkeiten zwischen den möglichen Einflussfaktoren Masttag, Temperatur, Luftfeuchte und Volumenströme (vgl. Kap. 2.3.3) und den PM-Konzentrationen innerhalb eines Systems bestanden, wurden die jeweiligen Korrelations- bzw. Regressionsfaktoren überprüft. In beiden Haltungssystemen konnte eine signifikant negative Beziehung jeweils nur zwischen dem Einflussfaktor Volumenstrom pro Großvieheinheit (GV) und der PM-Konzentration nachgewiesen werden (Bsp: PM 10: System VSP $r = -0,789$; System GK $r = -0,589$). Die entsprechenden Regressionskoeffizienten (System VSP: $R^2 = 0,622$; System GK: $R^2 = 0,347$) verdeutlichen, dass etwa 62 % (System VSP) bzw. 35 % (System GK) der Variation der durchschnittlichen PM-Konzentrationen durch die Variation der mittleren Volumenströme pro GV erklärbar waren.

Die negativen Korrelationskoeffizienten deuten darauf hin, dass bis zu einem gewissen Grad (neben weiteren Wechselbeziehungen zwischen den Einflussfaktoren, vgl. Kap. 4.2.2.1; Kap. 4.2.2.2) die mittlere PM-Konzentration im Innenraum bei zunehmenden Volumenströmen pro GV abnahm bzw. bei abnehmenden Volumenströmen pro GV anstieg. Diese Beobachtung deckt sich zwar prinzipiell mit Erfahrungen aus der Literatur (vgl. Kap. 2.3.3, Tab. 25), wonach höhere Volumenströme verdünnend auf die Staubkonzentrationen im Innenraum wirken können.

Jedoch ist im Vergleich zu Literaturangaben hier zu berücksichtigen, dass keine eindeutigen Abhängigkeiten zwischen den absoluten Volumenströmen pro Tier nachweisbar waren. Die Volumenströme pro GV wiederum beinhalten bereits durch den Bezug auf die in diesen Untersuchungen kontinuierlich ansteigenden GV (vgl. Abb. 12) einen zeitlichen Faktor (Masttag) und die Zunahme der Einzeltiergewichte, die wiederum auch mit Änderungen im Platzbedarf der Tiere verbunden sind; alles Faktoren, die nach Angaben aus der Literatur ebenfalls die Staubkonzentrationen beeinflussen (vgl. Kap. 2.3.3).

Das generell geringere Niveau der PM-Konzentrationen im freibelüfteten System GK wird hauptsächlich auf die, im Vergleich zum zwangsbelüfteten System VSP, höheren Luftfeuchten, höheren Anteile feuchter Flächen und höheren Volumenströme zurückgeführt (vgl. Kap. 4.2.2.1; Kap. 4.2.2.2; Tab. A1-A6). Diese Einschätzung beruht im Wesentlichen auf den Darstellungen in der Literatur zu Einflussfaktoren auf die Staubkonzentration und zu Haltungssystemunterschieden (vgl. Kap. 2.3.3). Ein weiterer Erklärungsansatz für die wesentlich geringeren PM-Konzentrationen im Innenraum des Systems GK kann sich aus der Überlegung ergeben, dass vermutlich ein großer Teil des Staubes in den abgedeckten Liegebereichen verbleibt und sich somit nicht auf den Staubgehalt in der Raumluft auswirkt.

Weiterhin bleibt zu berücksichtigen, dass Unterschiede auch in wechselnden Strömungsbildern und Staubkonzentrationsprofilen im Raum bedingt sein können (vgl. Kap. 2.3.2), die bei nur je einer Messstelle pro Haltungssystem nicht erfasst werden können.

Neben den mittleren Staubkonzentrationen im Innenraum sind in Hinblick auf die Belastung für den Atmungsapparat von Mensch und Tier die Häufigkeit und Dauer von sehr hohen Werten im Tagesverlauf von besonderer Bedeutung. **Abbildung 32** vergleicht den aus den jeweiligen Messungen gemittelten Tagesgang der PM 10-Konzentrationen im Innenraum der Haltungssysteme VSP und GK.

Der Tagesverlauf der PM 10-Konzentrationen in Abbildung 32 war in beiden Haltungssystemen deutlich durch ausgeprägte Peaks während der häufigen Fütterungszeiten (Sensor-Flüssigfütterung) (vgl. Tab. 32) zwischen 6:00 und 22:30 Uhr gekennzeichnet. Der Anstieg der PM 10-Konzentrationen während der Fütterungszeiten auf zwei- bis sechsfach höhere Werte als zwischen den Fütterungszeiten geschah innerhalb weniger Minuten. Die Fütterung induzierte in der Regel eine sprunghafte Zunahme der Aktivität der gesamten, oft bis zur Fütterung ruhenden, Tiergruppe. Die anschließende Abnahme der Konzentrationen (und Tieraktivität) hingegen dauerte bis zu 30 Minuten. Außerhalb der Fütterungszeiten nachts, bzw. zwischen den Fütterungszeiten im Tagesverlauf, waren die PM 10-Konzentrationen im Mittel deutlich

geringer und ebenso durch geringere Peaks gekennzeichnet. Die Tieraktivität war zu diesen Zeiten reduziert und weniger durch Gruppen- als mehr durch Einzeltieraktivitäten z.B. an den Beschäftigungsautomaten gekennzeichnet.

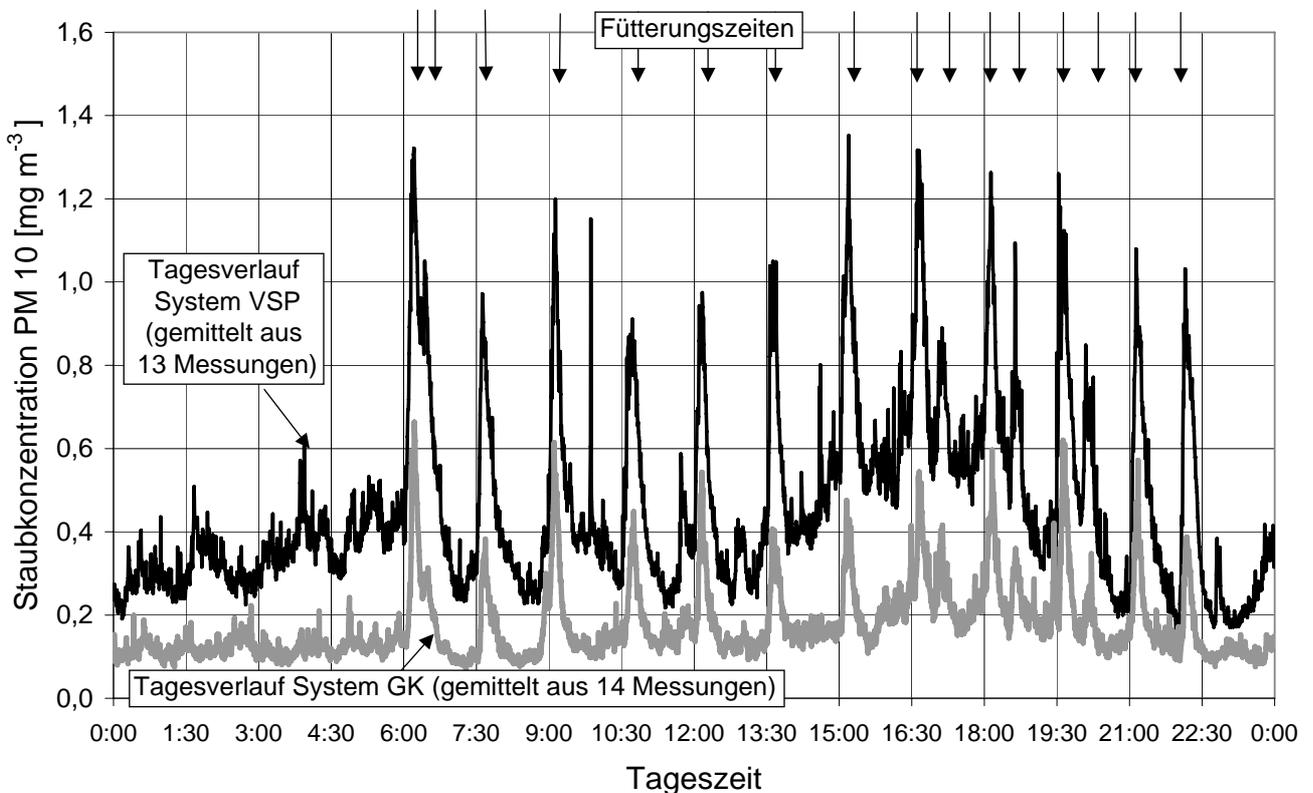


Abb. 32: Vergleich des gemittelten Tagesverlaufes der PM 10-Konzentrationen im Innenraum der Haltungssysteme VSP (Vollspalten, Zwangslüftung) und GK (Getrennte Klimabereiche, freie Lüftung); berechnet aus 13 (VSP) bzw. 14 (GK) 24-h-Messungen aus vier Mastdurchgängen zwischen Herbst 1999 bis Frühjahr 2001

Der in der Literatur mehrfach beschriebene biphasische Aktivitätsrhythmus von Schweinen (vgl. Kap. 2.1.3; Kap. 2.2.1.1) wurde durch die Fütterungsstrategie teilweise überlagert. Die Tagesverläufe der Staubkonzentrationen (Abbildung 32) in beiden Haltungssystemen lassen jedoch nachmittags ein generell höheres Niveau der Werte erkennen. Die Tagesverläufe der PM 2,5 und PM 1,0 Konzentrationen verhielten sich analog zu der Darstellung in Abbildung 32.

Das höhere Niveau der Staubkonzentrationen am Nachmittag kann als Hinweis auf eine insgesamt stärkere Aktivität auch zwischen den Fütterungszeiten in diesen Stunden, entsprechend des natürlichen Aktivitätsrhythmus, gewertet werden. Im System GK ist in diesem Zusammenhang zudem anzumerken, dass sich tagsüber oft mehr Tiere außerhalb der abgedeckten Liegebereiche aufhielten als morgens und spätabends. Es ist zu vermuten, dass der Auftrieb der Tiere zur Fütterung sich bei

Aufenthalt der Tiere außerhalb der abgedeckten Liegeflächen im System GK stärker auf die Staubkonzentrationen im Innenraum auswirkte, als wenn die Tiere in den abgedeckten Liegeflächen aufstehen und ein Großteil des Staubes dort aufgewirbelt wird und dann auch dort verbleibt.

Da im Innenraum des Systems GK sowohl die mittleren PM-Konzentrationen (Abb. 31; 32, Tab. A6) als auch die Peaks im Tagesverlauf (Abb. 32) deutlich geringer waren als im System VSP, wird entsprechend die Staubbelastung im Innenraum des Systems GK als wesentlich niedriger und somit positiv für die Stallluftqualität eingestuft. Für die abgedeckten Liegebereiche stehen keine eigene Ergebnisse zur Verfügung. Messungen von MAYER (1999) in Kistenställen (vgl. Kap. 2.3.3) lassen jedoch auch für das System GK vermuten, dass bei hoher Nutzungsintensität der Liegeflächen mit dort sehr (unerwünscht) hohen Konzentrationen zu rechnen ist.

4.2.3 Emissionen von Ammoniak, Kohlendioxid und Methan

Die Beschreibung der Ergebnisse zu Randbedingungen der Mastdurchgänge und Stallklimafaktoren hat bisher aufgezeigt, dass sich die Mastschweinehaltungssysteme "Vollspalten, Zwangslüftung (VSP)" und "Getrennte Klimabereiche, freie Lüftung (GK)" in vielen Parametern deutlich unterscheiden. In der Folge galt es zu prüfen, ob sich diese Unterschiede auch bei der Quantifizierung der Gasemissionen und Beurteilung der Umweltwirkung der Haltungssysteme widerspiegeln.

Die Emissionen von NH_3 , CO_2 und CH_4 werden aus dem Produkt aus Abluftkonzentrationen und Volumenströmen berechnet. Es ist dabei wichtig zu verstehen, dass die Emissionen de facto aus dem dynamischen Wechselspiel verschiedener Einflussgrößen im komplexen System Stall resultieren. Die Einflüsse, wie beispielsweise die verschiedenen Stallklimafaktoren, können sich unterschiedlich auf die jeweiligen Prozesse der Gasbildung und -freisetzung, das Konzentrationsprofil im Stall, auf die Volumenströme selber und schließlich den Stoffaustrag aus dem Stall auswirken (vgl. Kap. 2).

An Hand von Messergebnissen auf Stallebene unter praxisähnlichen Bedingungen ist es nur eingeschränkt möglich, in der Literatur dargestellte und aus Laboruntersuchungen bekannte Zusammenhänge direkt und eindeutig nachzuvollziehen. Die vielfältigen Faktorkombinationen können sich je nach Stalltyp und Lüftungsprinzip sehr unterschiedlich auf die Wirkungsweise und -richtung der Einflüsse auf die Emission auswirken. Aus der Literatur ist entsprechend eine große Streuung und Variabilität der Emissionsdaten bekannt (vgl. Tab. 5; 6; 11; 12; 15; 16) und folglich für die eigenen Ergebnisse zu erwarten.

Im Folgenden liegt der Schwerpunkt auf dem Vergleich der Höhe und der zeitlichen Entwicklung der Emissionen aus den beiden Haltungssystemen. Mit Hilfe ausgewählter Parameter wird anschließend für die beiden Haltungssysteme geprüft, ob sich anhand der gesamten Datensätze, trotz der hohen Variabilität der Faktoren zwischen den Mastdurchgängen (Tab. A5), Wechselbeziehungen herauskristallisieren lassen. Anhand von beispielhaften Tagesverläufen sollen Ansatzpunkte zur Beeinflussung des Tagesverlaufes im Rahmen von Maßnahmen zur Emissionskontrolle und Emissionsminderung erarbeitet werden.

4.2.3.1 Veränderung der Emissionen im Mastverlauf

In **Abbildung 33**, **Abbildung 34** und **Abbildung 35** sind die zeitlichen Verläufe der Tagesmittelwerte der absoluten Emissionen pro Tier bzw. die Emissionsraten pro Großvieheinheit (GV) von NH_3 , CH_4 und CO_2 für die beiden untersuchten Haltungssysteme im Vergleich dargestellt. In den **Tabellen A1-A5** sind die Ergebnisse mit Angabe der signifikanten Mittelwertunterschiede zwischen den Haltungssystemen bzw. Mastdurchgängen zusammengefasst. Für die Ergebnisse zu den Emissionen ist anzumerken, dass im Zuge der Datenselektion (vgl. Kap. 3.4) für NH_3 im Mastdurchgang 1 bzw. für CO_2 und CH_4 im Mastdurchgang 4 nur etwa 20 % bis 30 % der Messtage berücksichtigt werden konnten (vgl. Kap. 4.2.2.3).

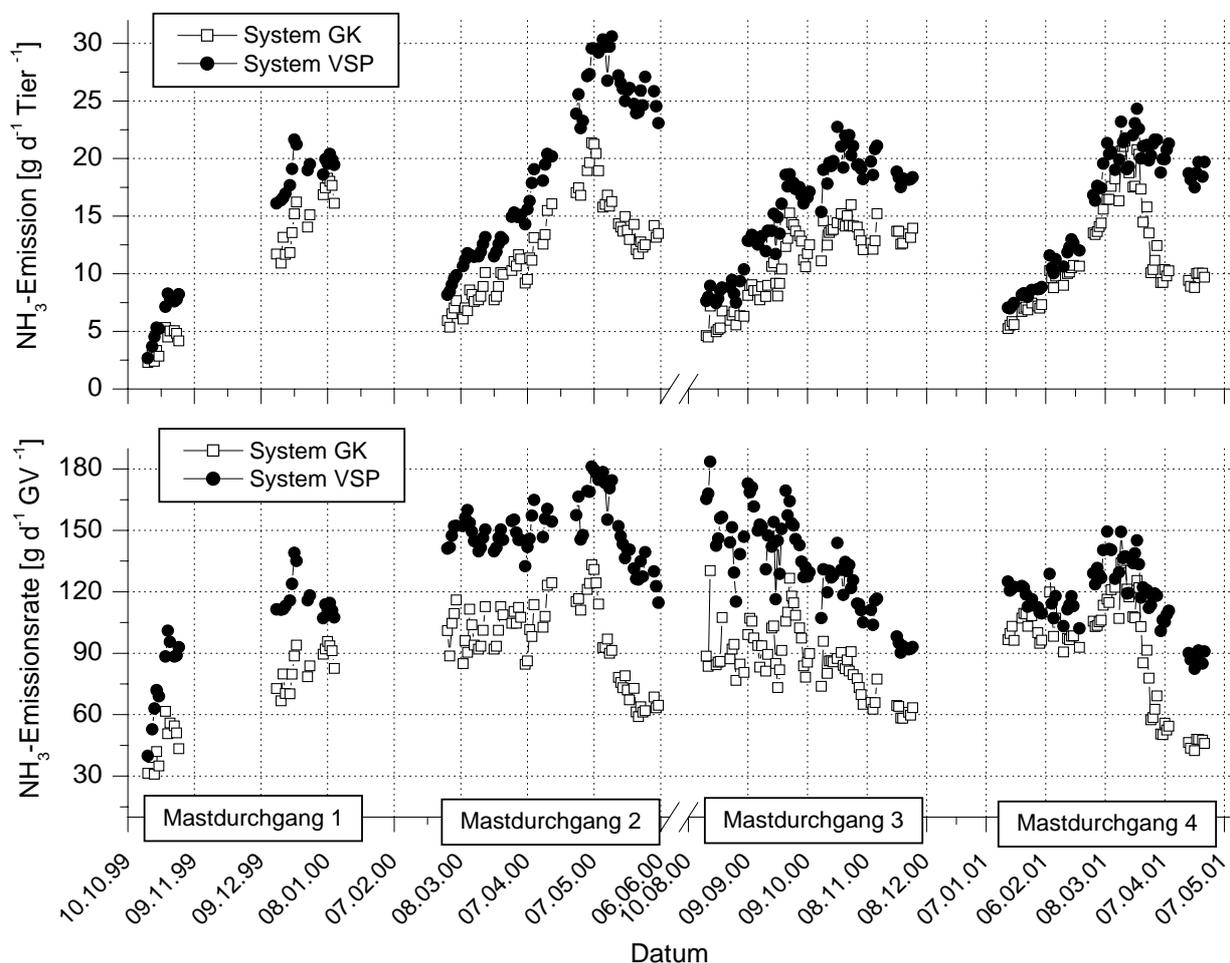


Abb. 33: Vergleich der selektierten Tagesmittelwerte der NH_3 -Emissionen pro Tier bzw. NH_3 -Emissionsraten der Haltungssysteme VSP (Vollspalten, Zwangslüftung) und GK (Getrennte Klimabereiche, freie Lüftung) im Verlauf der vier untersuchten Mastdurchgänge

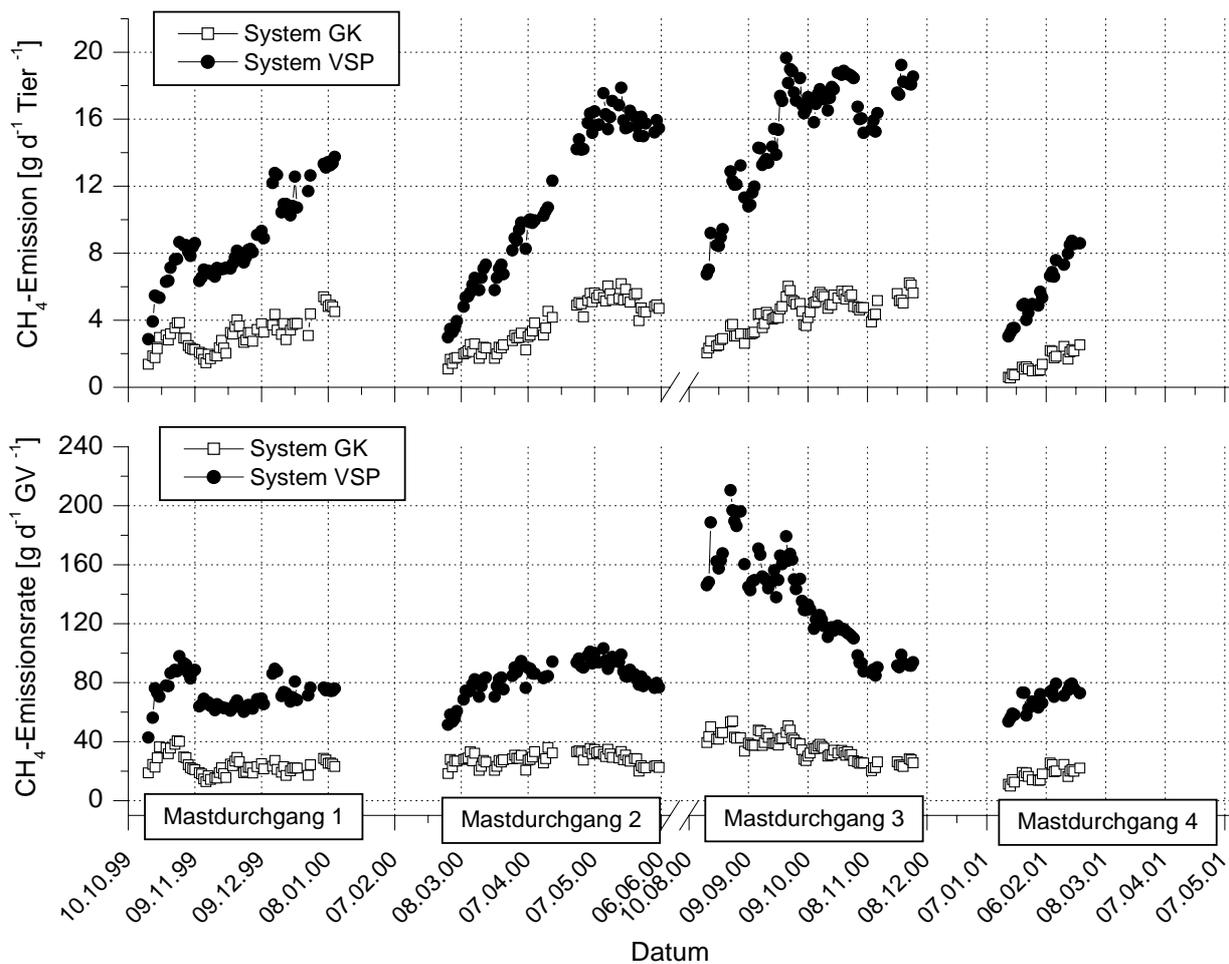


Abb. 34: Vergleich der selektierten Tagesmittelwerte der CH₄-Emissionen pro Tier bzw. CH₄-Emissionsraten der Haltungssysteme VSP (Vollspalten, Zwangslüftung) und GK (Getrennte Klimabereiche, freie Lüftung) im Verlauf der vier untersuchten Mastdurchgänge

An Hand der zeitlichen Verläufe der Emissionen aller drei Gase (Abbildung 33, Abbildung 34, Abbildung 35) ist festzustellen, dass sich die absoluten Emissionen pro Tier mit zunehmender Mastdauer (und somit zunehmenden Einzeltiergewichten) prinzipiell erhöhen. Dabei zeigt sich besonders am Emissionsverlauf des Systems VSP bei allen Gasen, dass die Emissionen ungefähr ab dem 60. Masttag ein Maximum erreichen und während der letzten rund 30 Masttage (Gewichtsabschnitt ab etwa größer 90 kg Tier⁻¹) wieder abnehmen. Im System GK ist dieser Emissionsverlauf pro Tier im Vergleich zum System VSP bei den NH₃-Emissionen ähnlich stark ausgeprägt, jedoch bei den CH₄- und CO₂-Emissionen nur deutlich abgeschwächt zu erkennen.

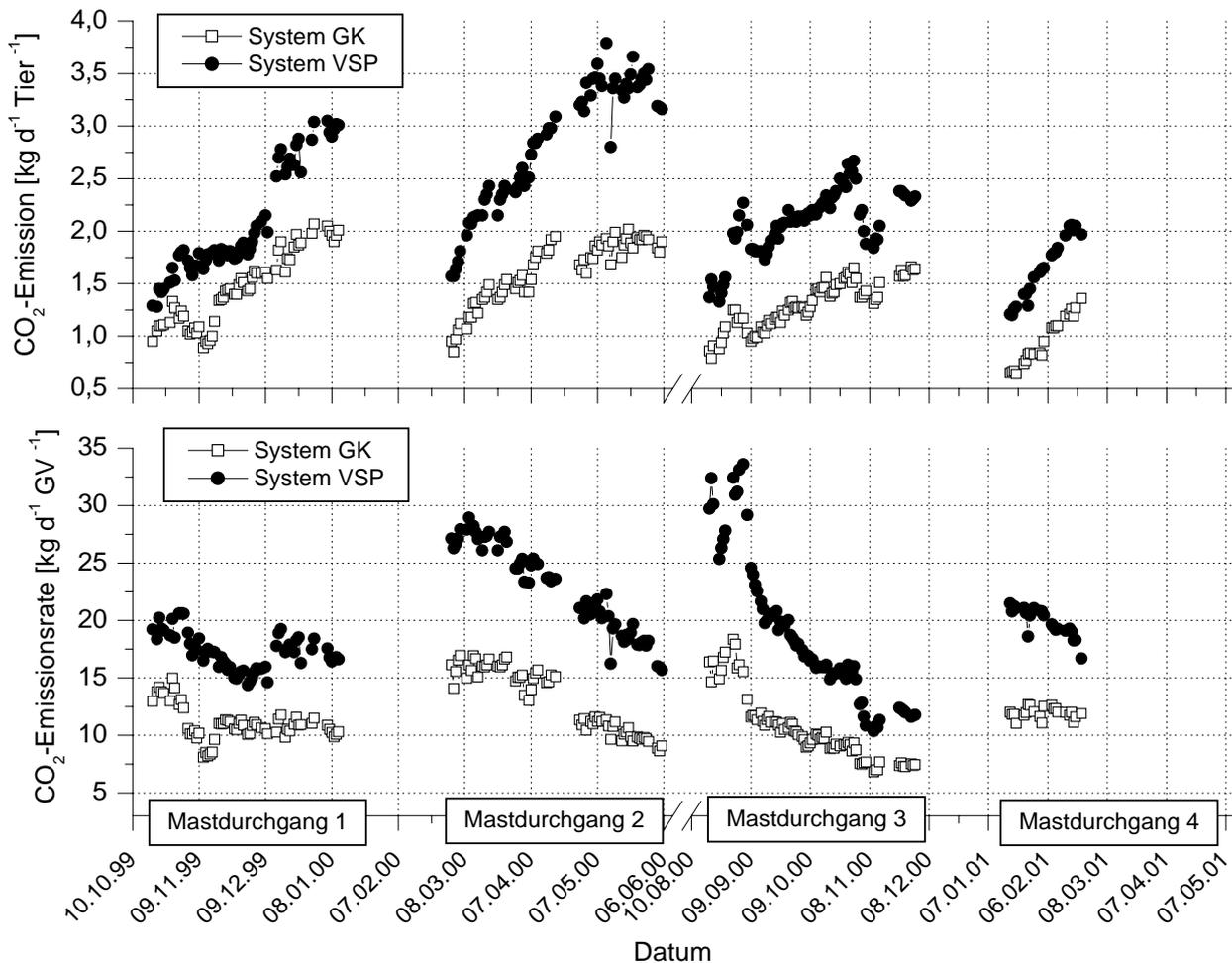


Abb. 35: Vergleich der selektierten Tagesmittelwerte der CO₂-Emissionen pro Tier bzw. CO₂-Emissionsraten der Haltungssysteme VSP (Vollspalten, Zwangslüftung) und GK (Getrennte Klimabereiche, freie Lüftung) im Verlauf der vier untersuchten Mastdurchgänge

Werden die Emissionen jeweils auf die kontinuierlich zunehmende Stallbelegung in GV (vgl. Abb. 12) bezogen, sind ähnlich, wie bei der Darstellung der Volumenströme pro GV (vgl. Abb. 23), abnehmende Emissionsraten zu beobachten (Abbildung 33, Abbildung 34, Abbildung 35). Besonders deutlich tritt dieser Effekt bei allen Gasen und bei beiden Haltungssystemen im Mastdurchgang 3 hervor. Der Mastdurchgang 3 zeichnete sich im Vergleich zu den anderen Mastdurchgängen dadurch aus, dass die Veränderungen der Stallklimafaktoren beider Haltungssysteme im Mastverlauf am geringsten waren (vgl. Kap. 4.2.2, Abb. 20; 23; 27). Deshalb kann angenommen werden, dass die möglichen Einflussfaktoren auf die Emission im Mastdurchgang 3 weniger stark den Einfluss der Mastdauer bzw. Stallbelegung überlagerten bzw. kompensierten.

In der Literatur ist vor allem für NH_3 sowohl eine Abnahme der Emissionsraten pro GV als auch ein Anstieg der absoluten Emissionen mit zunehmender Mastdauer beschrieben (vgl. Kap. 2.1.3), wobei jedoch nicht explizit über ein "Abknicken" der absoluten Emissionen zu Mastende berichtet wird. In einer Darstellung in AARNINK (1997) ist jedoch ein zu den eigenen Ergebnissen sehr ähnlicher Emissionsverlauf zu finden.

Zur Erklärung der zu Mastende wieder abnehmenden absoluten Emissionen können verschiedene Faktoren in die Überlegungen einbezogen werden. Zum einen erhöht sich mit ansteigenden Tiergewichten bzw. zunehmender Tiergröße der Platzbedarf der Tiere. Folglich verringert sich der Anteil freier (nicht mit Tieren belegter) Flächen im Stall, was sich auch in einer Reduzierung von verschmutzten (emittierenden) Oberflächen widerspiegeln kann. Diese Effekte können insbesondere für die NH_3 - und CH_4 -Emissionen relevant sein, deren Hauptquelle die Exkremente sind (vgl. Kap. 2.1.1; Kap. 2.2.2.1). Weiterhin ist nach Untersuchungen von BEA (2003), beispielsweise mit zunehmenden Alter der Tiere, weniger Spielverhalten zu beobachten. Es wird vermutet, dass sich die individuelle Tieraktivität insgesamt zu Mastende verringert, die sich auch in einer verringerten CO_2 -Abgabe pro Tier äußern könnte. Darüber hinaus verringert sich die relative CO_2 -Abgabe pro kg Lebendgewicht mit zunehmenden Tieralter, beispielsweise durch erhöhte C-Retention im Körper. Verschiedene Modelle zur tierspezifischen CO_2 -Produktion zeigen eine lineare Zunahme der CO_2 -Produktion mit steigenden Einzeltiergewichten (vgl. Kap. 2.2.1.1). Diesen Modellen liegt in der Regel aber eine abnehmende CO_2 -Abgabe pro kg Lebendgewicht der Tiere zugrunde.

4.2.3.2 Vergleich der Emissionen zwischen den Haltungssystemen

Aus Abbildung 33, Abbildung 34 und Abbildung 35 sowie den Tabellen A1-A4 wird deutlich, dass die Emissionen pro Tier und Emissionsraten pro GV von NH_3 , CH_4 und CO_2 aus dem System GK signifikant geringer waren als aus dem System VSP. Am deutlichsten unterschieden sich die CH_4 -Emissionen zwischen den Haltungssystemen. Im System GK waren die CH_4 -Emissionen im Mittel aller Durchgänge um zwei Drittel geringer als im System VSP. Dabei ist zu berücksichtigen, dass die gemessenen CH_4 -Konzentrationen im System GK an sich sehr gering waren und nah an der Nachweisgrenze lagen (vgl. Kap. 4.1.2; Kap. 4.2.2.3). Die NH_3 -Emissionen, die ähnlichen Bildungs- und Freisetzungsbedingungen wie die CH_4 -Emissionen unterliegen (vgl. Kap. 2.1.1; Kap. 2.2.2.1), waren im Mittel aller Durchgänge im System GK nur um etwa ein Drittel geringer als im System VSP. Die CO_2 -Emissionen wiederum waren im System GK um etwa ein Drittel bis zur Hälfte geringer als im System VSP.

Die Signifikanzen der Unterschiede zwischen den Mastdurchgängen sind in Abhängigkeit vom Stallsystem, Gas sowie der Bezugsgröße sehr verschieden (Tab. A5). Auffallend sind bei allen paarweisen Vergleichen der Mastdurchgänge die nicht signifikanten Unterschiede in der NH_3 -Emission pro Tier des Systems GK. Insgesamt war eine hohe Variation aller Ergebnisse zwischen den Mastdurchgängen zu erwarten.

Bei der Interpretation der deutlichen Systemunterschiede in den Emissionen ist zunächst noch einmal auf die ebenfalls deutlichen Unterschiede in den Stallklimafaktoren als Einflussgrößen zu verweisen (vgl. Kap. 4.2.2). Vereinfacht zusammengefasst waren im System GK in der Regel höhere Luftfeuchten, geringere Temperaturen, höhere Volumenströme, mehr Verschmutzung und leicht geringere Gaskonzentrationen im Innenraum beobachtet worden.

Bei der Emissionsberechnung sind jedoch nicht die Gaskonzentrationen im Innenraum, sondern die Konzentrationen in der Abluft relevant. Im System VSP waren die Abluftkonzentrationen von NH_3 und CH_4 im zentralen Abluftkamin der Unterflurabsaugung etwa doppelt so hoch wie im Innenraum. Die CO_2 -Konzentrationen waren nur um ca. 100 bis 200 ppm erhöht (vgl. Tab. A1-A4). Im System GK mit oberflur angeordneten Abluftschächten wurden nur geringfügige Unterschiede zwischen Innenraum- und Abluftkonzentration festgestellt. Insgesamt vergrößerte sich demzufolge der Unterschied zwischen den Haltungssystemen bei den Abluftkonzentrationen im Vergleich zu den Innenraumkonzentrationen.

In den Untersuchungen von BÜSCHER (1996) und KECK (1997) wurden ebenfalls in Abhängigkeit vom Abluftpunkt unterschiedlich ausgeprägte NH_3 -Konzentrationsgradienten zwischen Innenraum und Abluft bestimmt. Bei der von BÜSCHER (1996) und KECK (1997) beschriebenen Unterflurabsaugung wurden, vergleichbar zu den eigenen Untersuchungen, geringe NH_3 -Innenraumkonzentrationen und um etwa 10 ppm höhere Abluftkonzentrationen gemessen. Die Ergebnisse zur Unterflurabsaugung haben gezeigt, dass ein guter Luftaustausch im Tierbereich gegeben war. Weiterhin zeigte sich im Abluftstrom eine Aufkonzentration der Schadgase, die aus dem Stallraum aufgenommen, im zentralen Absaugkanal zusammengeführt und über den Abluftkamin abgeführt wurden.

Die Emissionen von NH_3 , CH_4 und CO_2 waren im System GK durchweg geringer als im System VSP (Abb. 33; 34; 35; Tab A1-A4). Anhand der eigenen Untersuchungen und vielfältigen Wechselbeziehungen ist jedoch der direkte Nachweis von Ursache-Wirkungsbeziehungen nur eingeschränkt möglich. Für die Unterschiede der NH_3 - und CH_4 -Emissionen muss die Erklärung in unterschiedlichen Bildungs- und Freisetzungsbedingungen für NH_3 und CH_4 aus den Exkrementen und verschmutzten

Oberflächen sowie dem Nachlieferungspotenzial dieser Quellen liegen. In der Literatur wird vor allem der positive und somit emissionsfördernde Temperatureinfluss auf alle Prozesse herausgestellt sowie weiterhin der Einfluss des Volumenstromes (der jedoch je nach Lüftungssystem unterschiedlich temperaturabhängig ist) diskutiert. Diese Argumentation dient in der Literatur in der Regel auch zur Erklärung oder Ableitung jahreszeitlicher Effekte. Für die CO₂-Emissionen ist die Frage zu klären, wie hoch der tierspezifische Anteil im Vergleich zu einer möglichen CO₂-Freisetzung aus den Exkrementen einzuschätzen ist (vgl. Kap. 2.2.1.3) und ob darin die Begründung für den deutlichen Unterschied zwischen den Haltungssystemen liegen kann.

4.2.3.3 Einfluss der Temperatur auf der Basis der Tagesmittelwerte

Am Beispiel der absoluten NH₃- und CH₄-Emissionen der beiden Haltungssysteme wird geprüft, ob sich ein alleiniger Einfluss der Außentemperatur als jahreszeitliche Kenngröße sowie Innenraumtemperatur auf die Höhe der Emissionen (Datenbasis: selektierte Tagesmittelwerte aus vier Mastdurchgängen) nachweisen lässt, **Abbildung 36**. Die eingezeichneten Hilfslinien in den einzelnen Grafiken in **Abbildung 36** teilen die Messpunkte an der Hälfte des jeweiligen Wertebereiches (X- und Y-Achse).

Bei dieser Darstellungsweise ist zu erkennen, dass keine jahreszeitlichen Effekte in Abhängigkeit vom Tagesmittelwert der Außentemperatur nachzuweisen sind (**Abbildung 36**, obere Grafik). Diese Einschätzung deckt sich mit den Erfahrungen von GROOT KOERKAMP et al. (1998) (vgl. Kap. 2.1.3). Es sind ähnlich viele Werte oberhalb und unterhalb von 10 °C zu finden, die sich gleichmäßig auf den jeweiligen Wertebereich der NH₃- bzw. CH₄-Emission in den Haltungssystemen aufteilen (**Abbildung 36**; obere Grafik). Ein analoges Bild ergab sich für die CO₂-Emissionen, die im Anhang dargestellt sind (**Abbildung A1**). Auch beim Vergleich der einzelnen Mastdurchgänge und Emissionsverläufe, lässt sich keine eindeutige jahreszeitliche Komponente bestätigen (**Abb. 33; 34; 35; Tab. A1-A4**).

Ob innerhalb der beiden Haltungssysteme ein Einfluss der Innenraumtemperatur auf die absoluten Emissionen von NH₃ und CH₄ vorhanden war, klärt ebenfalls **Abbildung 36** (untere Grafik). Die eingezeichneten Hilfslinien unterteilen die Messpunkte bei der Hälfte des jeweiligen Wertebereiches (X- und Y-Achse). Zunächst wird der Unterschied des Temperaturwertebereiches im Innenraum (vgl. **Abb. 20**) zwischen den Haltungssystemen deutlich. Im System GK sind keine vermehrten höheren Emissionen bei höheren Innenraumtemperaturen zu beobachten. Im System VSP liegen die meisten Messergebnisse bei tagesmittleren Innenraumtemperaturen über 20 °C. Es ist jedoch vergleichbar wie im System GK keine Häufung von hohen Emissionen bei höheren Temperaturen festzustellen.

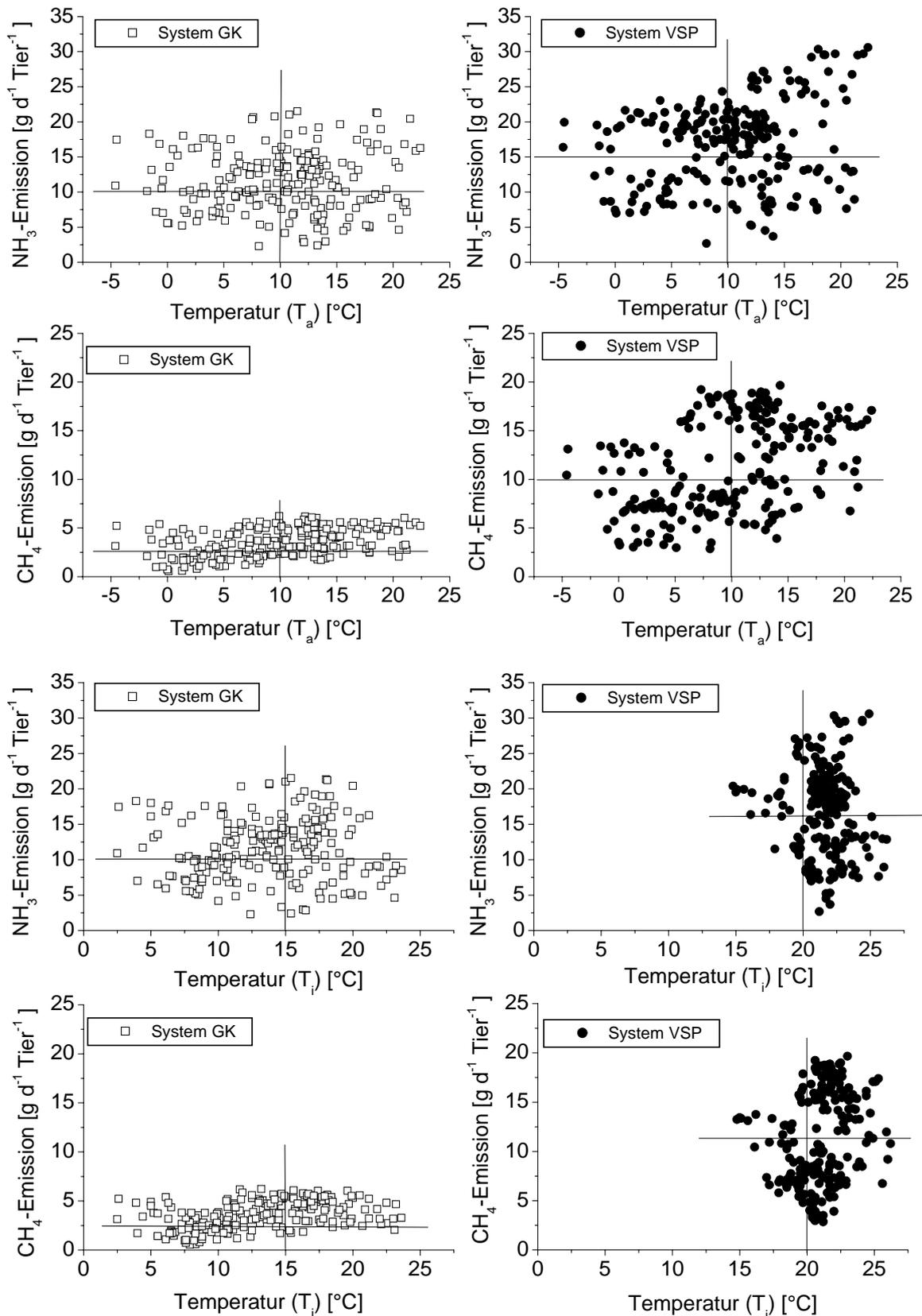


Abb. 36: Vergleich des Einflusses der Außentemperatur (T_a) (obere Grafik) und Innenraumtemperatur (T_i) (untere Grafik) auf die absoluten NH_3 - und CH_4 -Emissionen pro Tier (Datenbasis: selektierte Tagesmittelwerte aus vier Mastdurchgängen) zwischen den Haltungssystemen VSP (Vollspalten, Zwangslüftung) und GK (Getrennte Klimabereiche, freie Lüftung)

4.2.3.4 Einfluss des Volumenstromes auf der Basis der Tagesmittelwerte

In der Literatur wird zum einen (überwiegend für zwangsbelüftete Ställe) berichtet, dass ansteigende Volumenströme eine Abnahme der Gaskonzentrationen (Verdünnungseffekt) und Zunahme der Emissionen bewirken können. Es gibt jedoch auch mehrere Hinweise, dass auch geringe Volumenströme mit geringen Konzentrationen einhergehen können oder kein Zusammenhang zwischen Volumenstrom und Konzentration nachweisbar ist (vgl. Kap. 2.1.2).

Letztlich muss der Einfluss des Volumenstromes auf die Emission in Zusammenhang mit dem Nachlieferungspotenzial der Emissionsquellen, den jeweiligen Einflüssen auf die Bildungs- und Freisetzungsbedingungen sowie der Wechselwirkung zwischen Temperatur und Lufrate gesehen werden (vgl. Kap. 2.1.3).

Am Beispiel von NH_3 wird in **Abbildung 37** getrennt für die Haltungssysteme VSP und GK der jeweilige Einfluss des Volumenstromes auf die Abluftkonzentration und Emission untersucht. Die entsprechenden Abbildungen für CH_4 und CO_2 sind im Anhang enthalten (Abb. A2 und Abb. A3). Die eingezeichneten Kurvenanpassungen sind lediglich als optische Führungslinien zu verstehen.

Trotz der großen Streuung der Einzelwerte, die die Unterschiedlichkeit der vier untersuchten Mastdurchgänge kennzeichnen, ist im System VSP eine Tendenz zu abnehmenden Abluftkonzentrationen und zunehmenden absoluten Emissionen gegeben, wenn die Volumenströme ansteigen. Im System GK sind hingegen über alle Tagesmittelwerte keine klaren Beziehungen zwischen Volumenstrom, Abluftkonzentration und Emission zu erkennen (Abbildung 37; Abbildung A2; A3). Im System VSP wird der Volumenstrom positiv von der Innenraumtemperatur und negativ von der Temperaturdifferenz beeinflusst. Im System GK ist die Windgeschwindigkeit die bestimmende Größe und der Temperatureinfluss ist nur sehr gering, solange der temperaturgeregelte Solarventilator nicht eingesetzt wurde (vgl. Kap. 4.2.2.2; Abb. 24; Abb. 25).

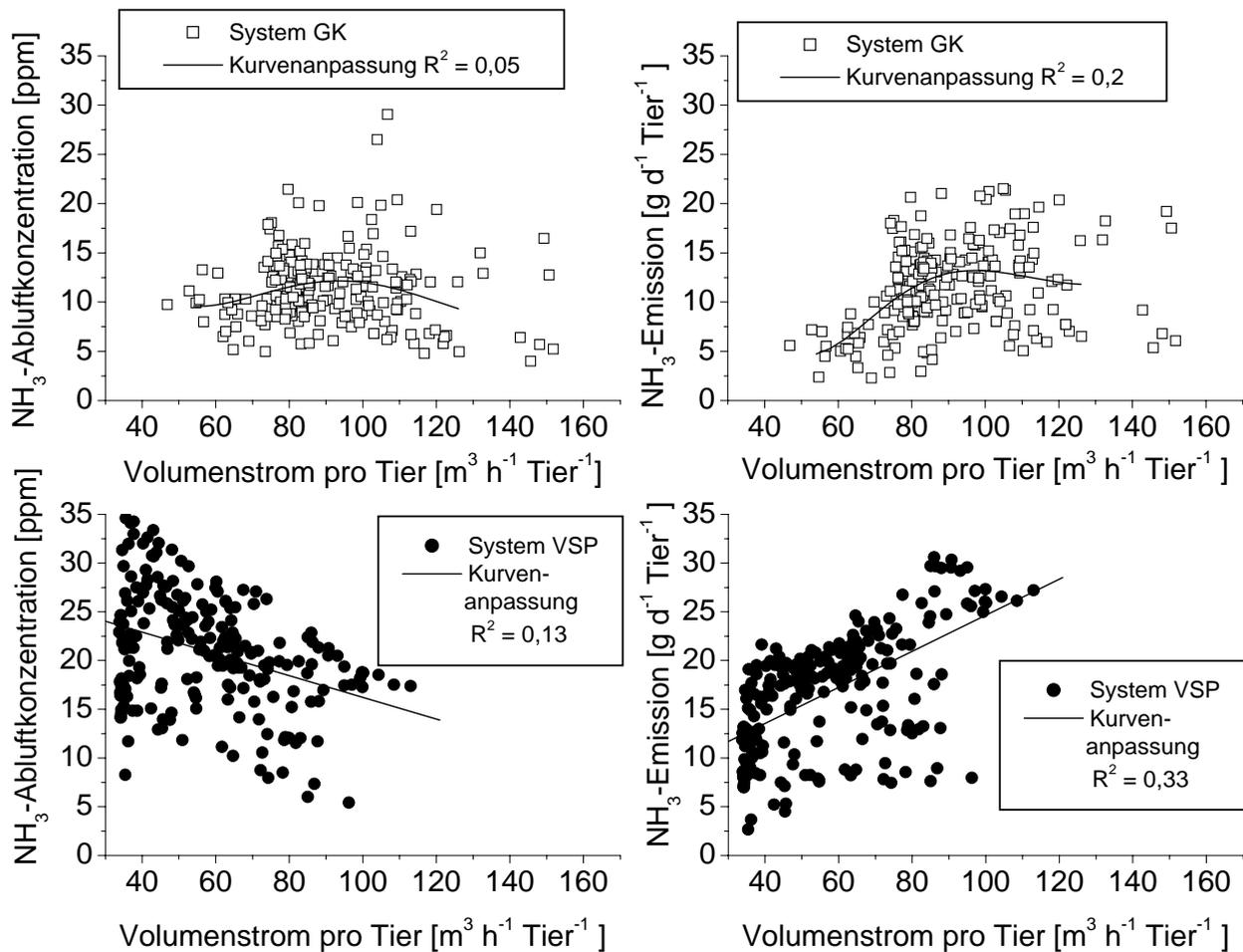


Abb. 37: Vergleich des Einflusses des Volumenstromes auf die NH₃-Abluftkonzentration und absoluten NH₃-Emissionen pro Tier (Datenbasis: selektierte Tagesmittelwerte aus vier Mastdurchgängen) zwischen den Haltungssystemen VSP (Vollspalten, Zwangslüftung) und GK (Getrennte Klimabereiche, freie Lüftung)

4.2.3.5 Vergleich der Kohlendioxidemissionen mit einer Abschätzung der tierspezifischen Kohlendioxidproduktion

Abbildung 38 zeigt getrennt für die beiden Haltungssysteme die tagesmittleren CO₂-Emissionen aus allen Mastdurchgängen in Abhängigkeit vom Einzeltiergewicht. Die CO₂-Emission setzt sich aus der tierspezifischen CO₂-Produktion (Atmung) und einer CO₂-Freisetzung aus den Exkrementen zusammen (vgl. Kap. 2.2.1.1). Zum Vergleich sind jeweils die CO₂-Massenströme nach DIN 18 910 (1992) zur Abschätzung der physiologischen Stoffwechsellistung aufgeführt. Im System GK stimmt der Wertebereich der eigenen Messungen gut mit der Abschätzung nach DIN 18 910 überein. Im System VSP hingegen liegen alle Messwerte um 50 % bis 100 % und mehr über

den Werten nach DIN 18 910. Des Weiteren weisen die CO₂-Emissionen des Systems VSP eine wesentlich größere Streuung der Messergebnisse im Vergleich zum System GK auf. In weiteren Modellen zur tierspezifischen CO₂-Produktion (vgl. Kap. 2.2.1.1) werden im Vergleich zur DIN 18 910 ähnliche Werte zwischen 0,8 bis 1,25 kg d⁻¹ Tier⁻¹ (35 kg LG) und 1,5 bis 2,25 kg d⁻¹ Tier⁻¹ (105 kg LG) ermittelt, so dass auch im Vergleich zu anderen Modellen die Messergebnisse zur CO₂-Emission im System VSP deutlich höher liegen. Da die Tierherkünfte, Futterzusammensetzung und täglichen Zunahmen in beiden Haltungssystemen vergleichbar waren (vgl. Kap. 3.1), kann die große Differenz der CO₂-Emissionen zwischen den Systemen nicht auf diese Faktoren, die die tierspezifische CO₂-Produktion mitbestimmen (vgl. Kap. 2.2.1.1), zurückgeführt werden.

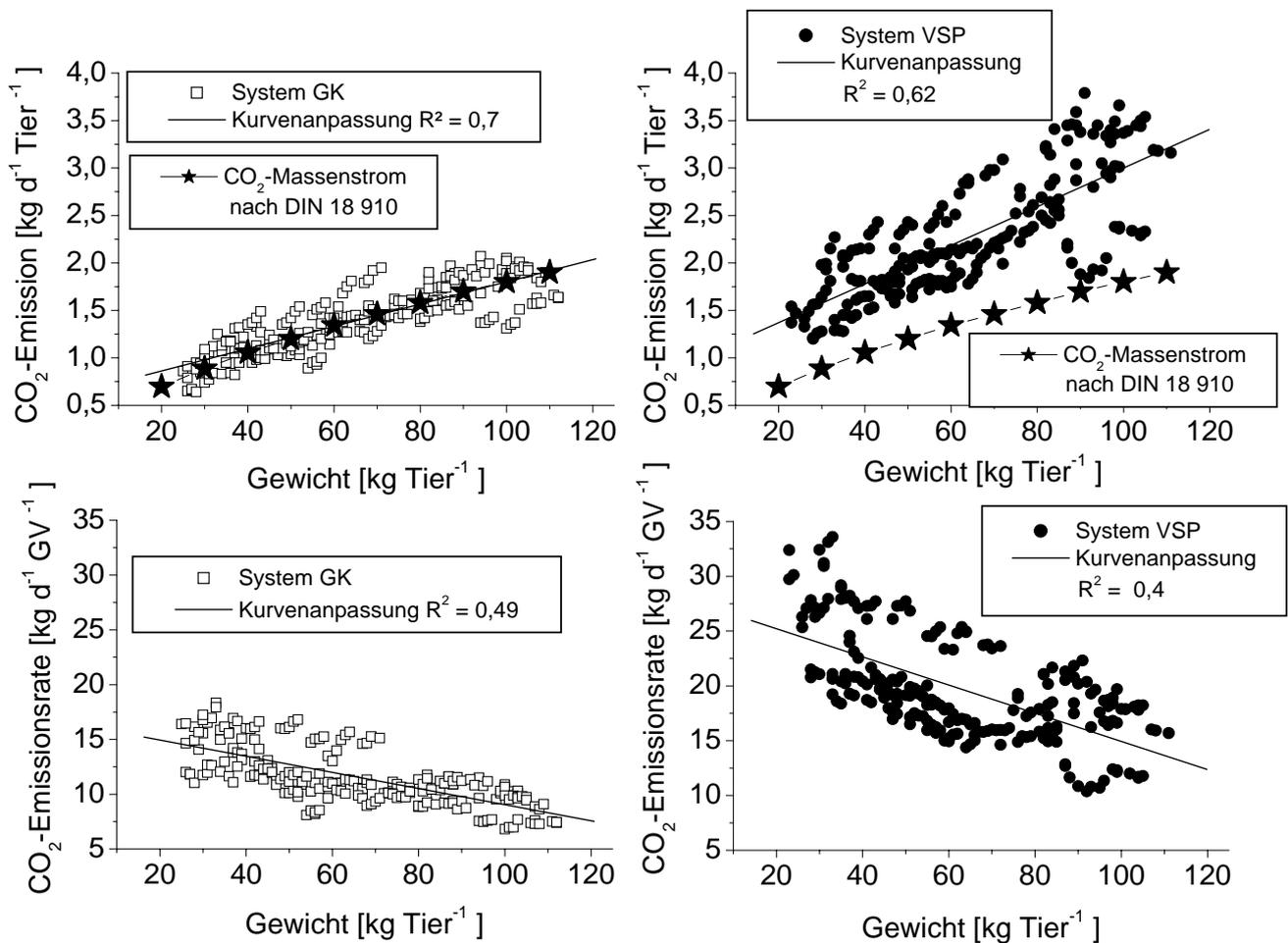


Abb. 38: Vergleich der CO₂-Emissionen pro Tier bzw. CO₂-Emissionsraten in Abhängigkeit vom Einzeltiergewicht (Datenbasis: selektierte Tagesmittlerwerte aus vier Mastdurchgängen) zwischen den Haltungssystemen VSP (Vollspalten, Zwangslüftung) und GK (Getrennte Klimabereiche, freie Lüftung)

Für das System GK leitet sich anhand der Vergleiche mit Modellen zur tier-spezifischen CO₂-Produktion (Abbildung 38) zunächst die Annahme ab, dass die Gesamtemission hauptsächlich den Tieren entstammt. Weiterhin ist zu erwägen, dass in den Zeiten, in denen die Tiere die abgedeckten Liegebereiche aufsuchten und zum Ruhen nutzten, sich vermutlich das meiste CO₂ in den abgedeckten Liegebereichen ansammelte ("Käseglockenprinzip"). Es war nicht nachzuweisen, ob und inwieweit sich das CO₂ aus den abgedeckten Liegebereichen mit der Raumluft vermischt, über die Abluft abgeführt und als Emission detektiert wird. Eine ähnliche Überlegung ist für die Gaskonzentrationen unter den Spalten über dem Flüssigmist anzustellen.

Im System VSP muss nach bisherigem Kenntnisstand (vgl. Kap. 2.2.1.2) davon ausgegangen werden, dass ein wesentlich größerer Anteil der CO₂-Gesamtemission aus den Exkrementen freigesetzt und mit der Abluft abgeführt wurde. Dabei müssten die durchschnittlich höheren Temperaturen (vgl. Abb. 20) die CO₂-Freisetzung aus den Exkrementen wesentlich stärker gefördert haben, als dies bei den geringeren Temperaturen im System GK der Fall war. Dieser Erklärungsansatz wird gestützt von der Beobachtung, dass im System VSP auch höhere NH₃-Emissionen gemessen wurden als im System GK (vgl. Abb. 33). Aus den Grundlagen zur Bildung und Freisetzung von NH₃ ist bekannt, dass bei der Ammonifizierung von Harnstoff je zwei Moleküle NH₃ und ein Molekül CO₂ gebildet werden (vgl. Kap. 2.1.1; Kap. 2.2.1.1). Folglich müsste mit einer erhöhten NH₃-Emission immer auch eine erhöhte CO₂-Emission verbunden sein.

4.2.3.6 Zusammenhang zwischen Ammoniakemission und Kohlendioxidemission

Mehrere Autoren (vgl. Kap. 2.2.1.3) berichten über einen signifikanten Zusammenhang zwischen der NH₃- und CO₂-Emission aus Flüssigmistssystemen, der anhand der eigenen Ergebnisse auf der Basis der Tagesmittelwerte in beiden Haltungssystemen nachvollzogen werden kann, **Abbildung 39**.

Die Erklärung wird von den Autoren in vergleichbaren Bedingungen für die Bildung und Freisetzung von CO₂ und NH₃ aus den Exkrementen gesehen. Weiterhin entsteht, wie oben erwähnt (vgl. Kap. 4.2.3.5), bei der NH₃-Bildung zwangsweise auch immer CO₂ im Verhältnis von zwei Molekülen NH₃ zu einem Molekül CO₂. Betrachtet man die parallele Zunahme der CO₂- und NH₃-Emissionen im Mastverlauf, d.h. mit zunehmenden Tiergewichten bzw. der Stallbelegung (vgl. Kap. 4.2.3.1; Abb. 33; Abb. 35), erscheint es naheliegend, darin ebenfalls eine Ursache für die berechneten Regressionskoeffizienten zu sehen.

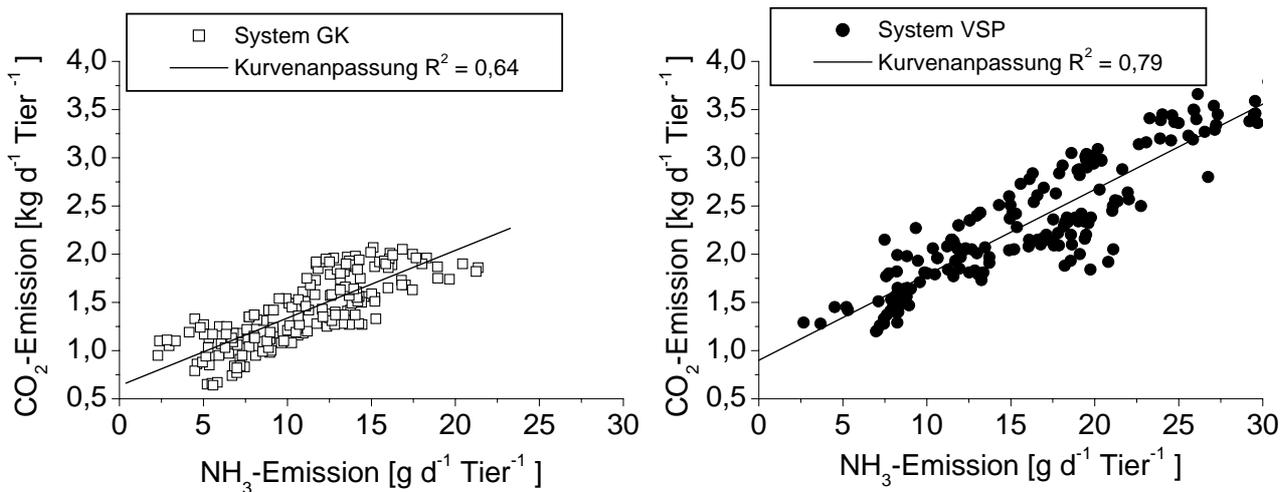


Abb. 39: Vergleich des Zusammenhangs zwischen NH₃- und CO₂-Emission pro Tier (Datenbasis: selektierte Tagesmittelwerte aus vier Mastdurchgängen) zwischen den Haltungssystemen VSP (Vollspalten, Zwangslüftung) und GK (Getrennte Klimabereiche, freie Lüftung)

4.2.3.7 Tageszeitliche Effekte und Ansätze zur Emissionskontrolle im Tagesverlauf - Regressionsmodelle

Es galt, getrennt für die beiden Haltungssysteme "Vollspalten, Zwangslüftung VSP" und "Getrennte Klimabereiche, freie Lüftung GK", die Frage zu klären, durch welche Faktoren Emissionsspitzen im Tagesverlauf verursacht werden und inwieweit Ansatzpunkte zur Beeinflussung des Tagesverlaufs im Rahmen von Maßnahmen zur Emissionskontrolle und -minderung bestehen.

Die Berechnung von mittleren Tagesverläufen über größere Zeiträume ergab kein befriedigendes Ergebnis, da bei Einzelsituationen sichtbare Effekte durch diese Darstellungsweise zu stark gedämpft wurden und somit den Aussagegehalt minderte. Im Folgenden wird nur auf die Dynamik der Konzentrationen und Emissionen von NH₃ und CO₂ eingegangen, da für die CH₄-Emissionen bei unterschiedlichsten Konstellationen kein klarer Tagesgang nachgewiesen werden konnte.

Die Analyse von Tagesverläufen erfolgt exemplarisch für drei repräsentativ ausgewählte Messzeiträume von vier bis fünf Tagen des zweiten Mastdurchganges (März bis Juni 2000) (vgl. Kap. 3.2), anhand derer typische Zusammenhänge zwischen beispielsweise Temperatur, Volumenstrom, Gaskonzentration und Emission für unterschiedliche Situationen aufgezeigt werden können. Für eine bessere Vergleichbarkeit der Ergebnisse, unabhängig vom Tiergewicht, wurden die Volumenströme und Emissionen jeweils auf eine Großvieheinheit bezogen.

Die grafische Darstellung und visuelle Überprüfung von zahlreichen Tagesverläufen der Emission und verschiedenen Randbedingungen sowie die Auswertung der Literatur, führte zu einer Auswahl wahrscheinlicher Einflussfaktoren auf den NH₃- und CO₂- Emissionsverlauf. Um die Komplexität der Zusammenhänge und die Stärke des Einflusses auf die Emission zu untersuchen, wurden wiederum, getrennt für jedes Haltungssystem, Variablen festgelegt, die für eine multiple lineare Regressionsanalyse (für jeden Messzeitraum getrennt) herangezogen wurden.

Zusätzlich wurde bei der Auswahl und Begrenzung der zu prüfenden Variablen aus praktischen Erwägungen für abzuleitende Emissionsminderungsstrategien berücksichtigt, ob die Variable kontinuierlich messbar ist und gegebenenfalls in einer Stallklimaaufnahme und -steuerung mit vertretbarem Aufwand einsetzbar wäre. Diese wurden in einer zweiten Analyse von reduzierten Regressionsmodellen getestet (vgl. Kap. 4.2.3.7.3). **Tabelle 40** fasst die Auswahl der Variablen für jedes Haltungssystem zusammen.

Tab. 40: Auswahl der Variablen für eine multiple Regressionsanalyse zur Untersuchung von Bestimmungsfaktoren auf den tageszeitlichen Verlauf der Emission

	System VSP (Vollspalten, Zwangslüftung)		System GK (Getrennte Klimabereiche, freie Lüftung)	
	NH ₃ -Emission [g h ⁻¹ GV ⁻¹]	CO ₂ -Emission [g h ⁻¹ GV ⁻¹]	NH ₃ -Emission [g h ⁻¹ GV ⁻¹]	CO ₂ -Emission [g h ⁻¹ GV ⁻¹]
Tag (6:00 – 22:00 Uhr) oder Nacht (22:00 bis 6:00) *	X R	X R	X R	X R
Innenraumtemperatur [°C]	X R	X R	X R	X R
Außentemperatur [°C]	X R	X R	X R	X R
Temperaturdifferenz [°C]	X R	X R	X R	X R
Volumenstrom [m ³ h ⁻¹ GV ⁻¹]	X R	X R	X R	X R
Innenraumkonzentration von NH ₃ und CO ₂ [ppm]	X R (nur CO ₂)			
Abluftkonzentration von NH ₃ und CO ₂ [ppm]	X	X	X	X
Gaskonzentration unter den Spalten von NH ₃ und CO ₂ [ppm] **			X	X
Solarventilator zugeschaltet (Ja/Nein)			X	X
NH ₃ -Emission [g h ⁻¹ GV ⁻¹] ***		X		X
CO ₂ -Emission [g h ⁻¹ GV ⁻¹] ***	X		X	

* Tag/Nacht Rhythmus anhand der Fütterungszeiten (ca. alle 1,5 h zwischen 6:00 bis 22:00 Uhr) festgelegt (vgl. Tab. 32)

** Einfluss eines nächtlichen Luftaustausches durch den Spaltenboden (abnehmende Gaskonzentrationen) auf die Emission ? (BROSE, 2000)

*** Korrelation zwischen NH₃ und CO₂-Emission

X: Allgemeines Regressionsmodell R: Reduziertes Regressionsmodell

Die Beschreibung der Ergebnisse erfolgt für beide Haltungs- und Lüftungssysteme getrennt. Dabei soll vor allem auf grundlegende Zusammenhänge zwischen der Temperatur, dem Volumenstrom, der Gaskonzentration und der Tag/Nacht Dynamik eingegangen werden und Unterschiede zwischen den Haltungssystemen verdeutlicht werden. Die Beschreibung der Ergebnisse der Regressionsanalyse wird auf die erklärenden Variablen mit dem größten Einfluss (Bestimmtheitsmaß) auf den Emissionsverlauf beschränkt.

4.2.3.7.1 Haltungssystem "Vollspalten, Zwangslüftung (VSP)"

Die Randbedingungen und mittleren Gaskonzentrationen und Emissionen während der drei exemplarisch ausgewählten Messzeiträume des zweiten Mastdurchganges (vgl. Kap. 4.2.3.7) sind in **Tabelle 41** zusammengefasst. In **Abbildung 40** sind die Verläufe des Volumenstromes, der Abluftkonzentration sowie der Emissionsraten der Gase NH₃ und CO₂ in den ausgewählten Messzeiträumen übereinander dargestellt.

Tab. 41: Zusammenfassung der Randbedingungen und mittleren Gaskonzentrationen und Emissionsraten von NH₃ und CO₂ für drei Messzeiträume eines Mastdurchganges (März bis Juni 2000) im Haltungssystem VSP "Vollspalten, Zwangslüftung" (Mittelwert und Standardabweichung)

Messzeitraum	1	2	3
Datum	16.03.-19.03.00	30.03.-03.04.00	04.05.-07.05.00
Masttag	Masttage: 17-20	Masttage: 31-35	Masttage: 66-69
Anzahl Werte	283	351	288
Stallbelegung [GV]	4,6 +/- 0,1	6 +/- 0,2	10,8 +/- 0,06
Außentemperatur [°C]	6,8 +/- 1,4	9,1 +/- 5,5	18,5 +/- 4,5
Innenraumtemperatur [°C]	19,2 +/- 0,9	20,6 +/- 1,3	23,0 +/- 1,9
Temperaturdifferenz [K]	12 +/- 1,1	11,5 +/- 4,4	4,5 +/- 2,8
Volumenstrom [m ³ h ⁻¹ GV ⁻¹]	404 +/- 19	396 +/- 122	504 +/- 92
NH ₃ -Abluftkonzentration [ppm]	23,2 +/- 1,7	25,3 +/- 3,4	22 +/- 2,8
NH ₃ -Emissionsrate [g h ⁻¹ GV ⁻¹]	6,0 +/- 0,37	6,2 +/- 0,78	7,3 +/- 1,0
CO ₂ -Abluftkonzentration [ppm]	1941 +/- 240	1895 +/- 342	1352 +/- 166
CO ₂ -Emissionsrate [g h ⁻¹ GV ⁻¹]	1131 +/- 168	1027 +/- 178	850 +/- 166

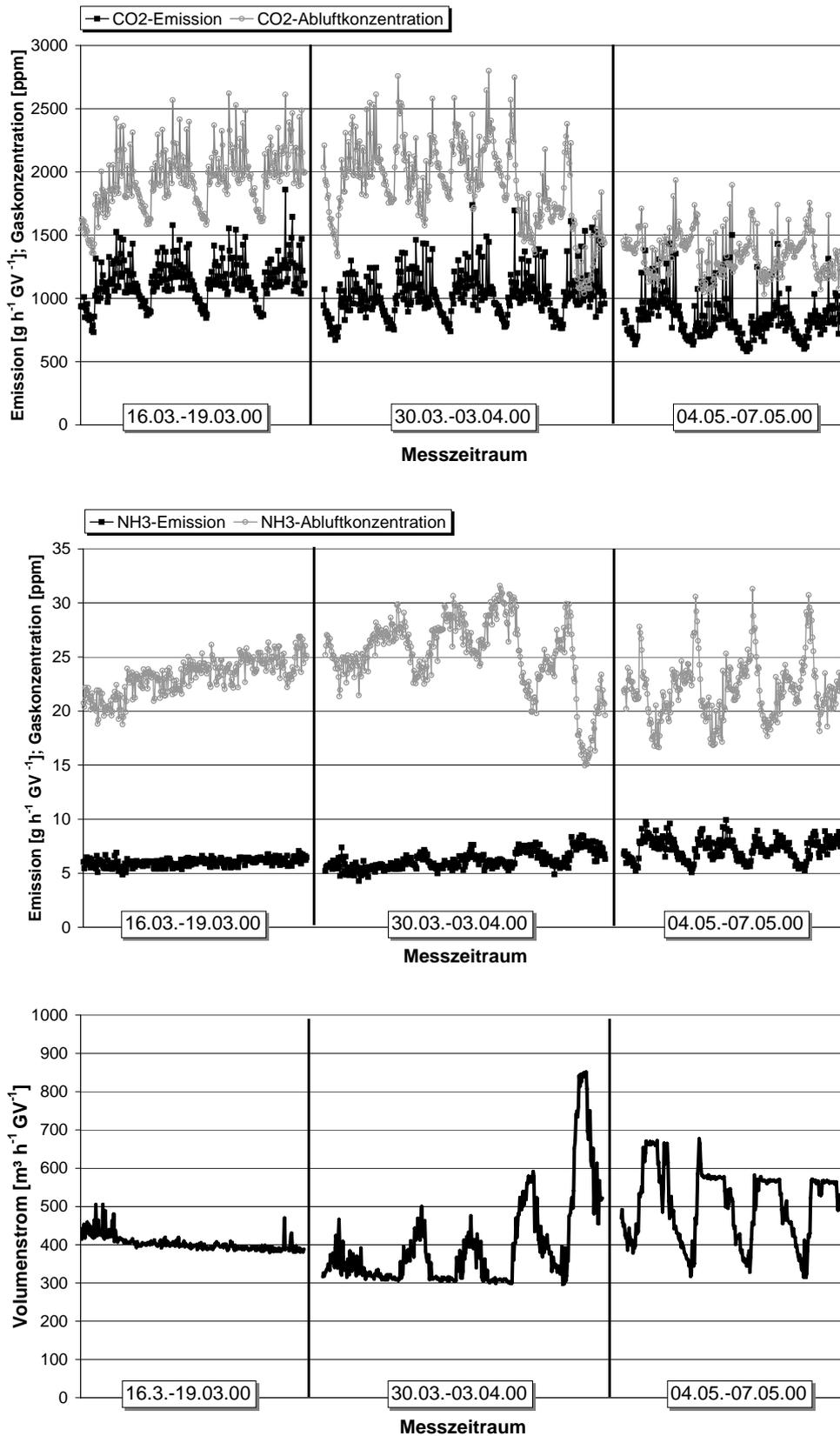


Abb. 40: Verläufe des Volumenstromes, der Abluftkonzentration sowie Emissionsraten der Gase NH₃ und CO₂ für drei Messzeiträume eines Mastdurchganges (März bis Juni 2000) im Haltungssystem VSP „Vollspalten, Zwangslüftung“

Im Messzeitraum 1 ist der Volumenstrom weitgehend konstant und entspricht der Minimalluftrate. In den Messzeiträumen 2 und 3 zeigt sich eine deutliche Tag-Nacht-Rhythmik auch in Abhängigkeit von der Außentemperatur (vgl. Kap. 4.2.2.2). Die NH_3 -Abluftkonzentration verläuft gegenläufig zu den schwankenden Volumenströmen, was auf einen Verdünnungseffekt der Gaskonzentration durch höhere Volumenströme hinweist. Die NH_3 -Emission verläuft weitgehend parallel zum Volumenstrom und ist somit erhöht, wenn der Volumenstrom erhöht ist.

In **Abbildung 41** sind diese Zusammenhänge bei einer zeitlichen Auflösung von zwei Tagen des Messzeitraumes 3 genauer dargestellt. Es zeigt sich vor allem am Beispiel des zweiten Tages, dass mit dem steilen Anstieg des Volumenstromes ab 6:00 Uhr zunächst ebenso ein deutlicher Anstieg der NH_3 -Emission sowie ein Abfall der nächtlich erhöhten NH_3 -Konzentration verbunden ist. Nachdem jedoch die maximale Luftrate erreicht ist, wird zunächst eine Abnahme von NH_3 -Emission und -Konzentration verzeichnet. Wenn im Verlauf des Tages die Innenraumtemperatur trotz maximaler Luftrate weiter ansteigt und verzögert im Lauf des Tages ebenfalls ihr Maximum erreicht hat, steigen jedoch Gaskonzentration und Emission wieder an.

Die Regressionsanalyse (vgl. Tab. 40) für die NH_3 -Emission ergab in den drei ausgewählten Messzeiträumen (vgl. Tab. 41) zusammengefasst folgende Ergebnisse:

- Messzeitraum 1 (vergleichsweise konstante Volumenströme, Abbildung 40):
 - erklärte Varianz von 97 % der NH_3 -Emission durch die NH_3 -Abluftkonzentration ($R^2=0,61$; stark positiv korreliert) und den Volumenstrom ($R^2=0,36$; leicht negativ korreliert);
 - erklärte Varianz von 50 % der NH_3 -Abluftkonzentration durch die Variablen Innenraumtemperatur, Tag/Nacht.
- Messzeitraum 2 und 3 (schwankende Volumenströme, Abbildung 40)
 - erklärte Varianz von 95 % durch den Volumenstrom ($R^2=0,55$; positiv korreliert) und die NH_3 -Abluftkonzentration ($R^2=0,4$; negativ korreliert).

Der Verlauf der größtenteils tierspezifischen CO_2 -Konzentration und -Emission (Abbildung 40) zeigt eine deutliche Tag/Nacht Dynamik sowie starke Fluktuationen tagsüber. Vor allem im Messzeitraum 1, bei konstanten Volumenströmen und im Vergleich zur NH_3 -Emission, wird eine weitgehende Unabhängigkeit vom Volumenstrom deutlich. In **Abbildung 42** ist der Verlauf der Innenraumtemperatur, CO_2 -Konzentration, und CO_2 -Emissionsrate für drei Tage des Messzeitraumes 1 abgebildet. Die starken Fluktuationen in der CO_2 -Konzentration und -Emission am Tag werden hauptsächlich auf die häufigen Fütterungszeiten im etwa 1,5 Stunden Abstand in der Zeit von 6:00 bis 22:00 Uhr zurückgeführt (vgl. Tab. 32; Abb. 32). Anhand der in Abbildung 41 gezeigten Tagesverläufe der NH_3 -Emission können ebenfalls kurzzeitige Emissionsspitzen der Emissionen während der Fütterungszeiten nachvollzogen werden.

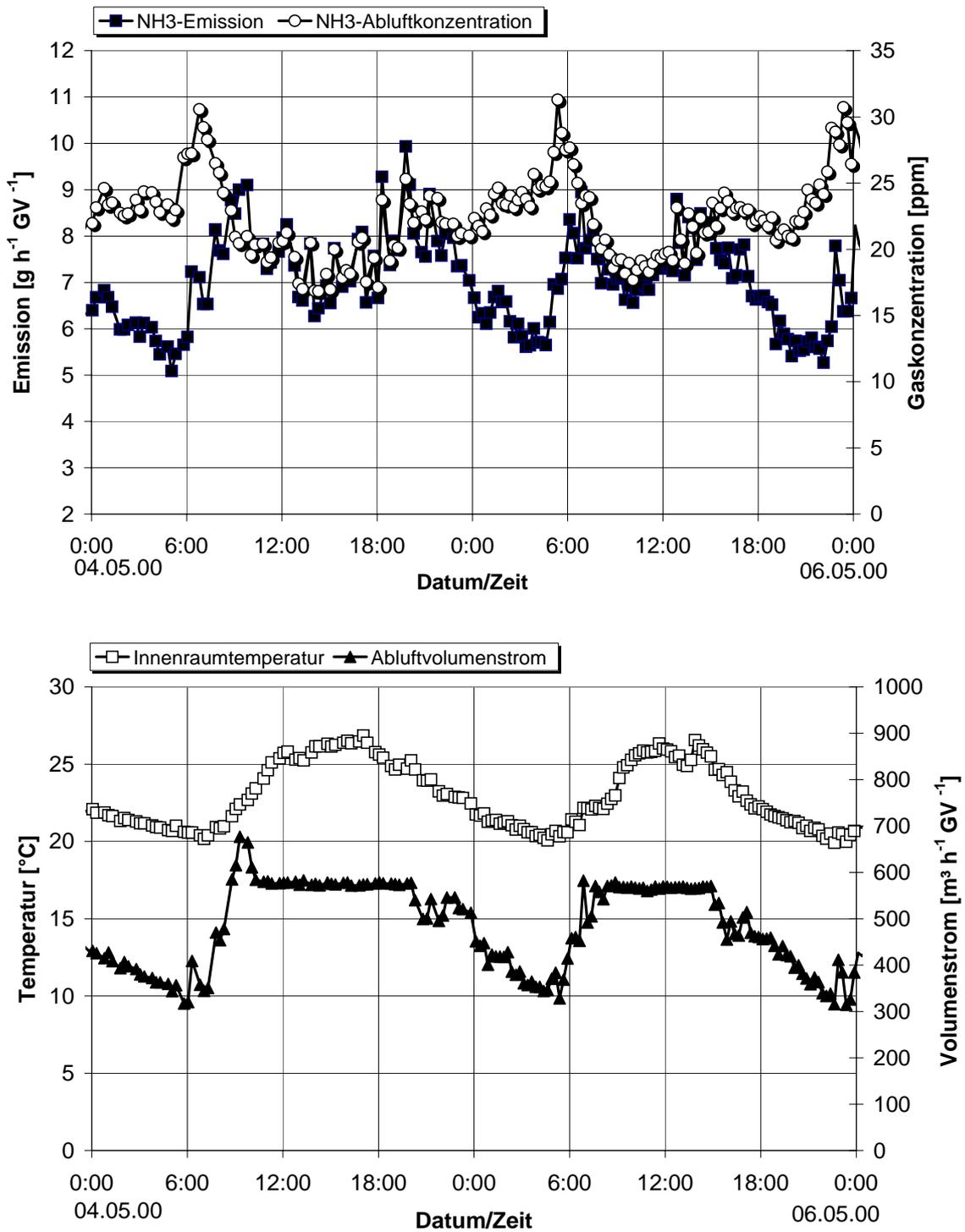


Abb. 41: Verlauf von Innenraumtemperatur, Volumenstrom, NH₃-Abluftkonzentration und –Emissionsrate an zwei Tagen im Mai (66.-68. Masttag) im Haltungssystem VSP „Vollspalten, Zwangslüftung“

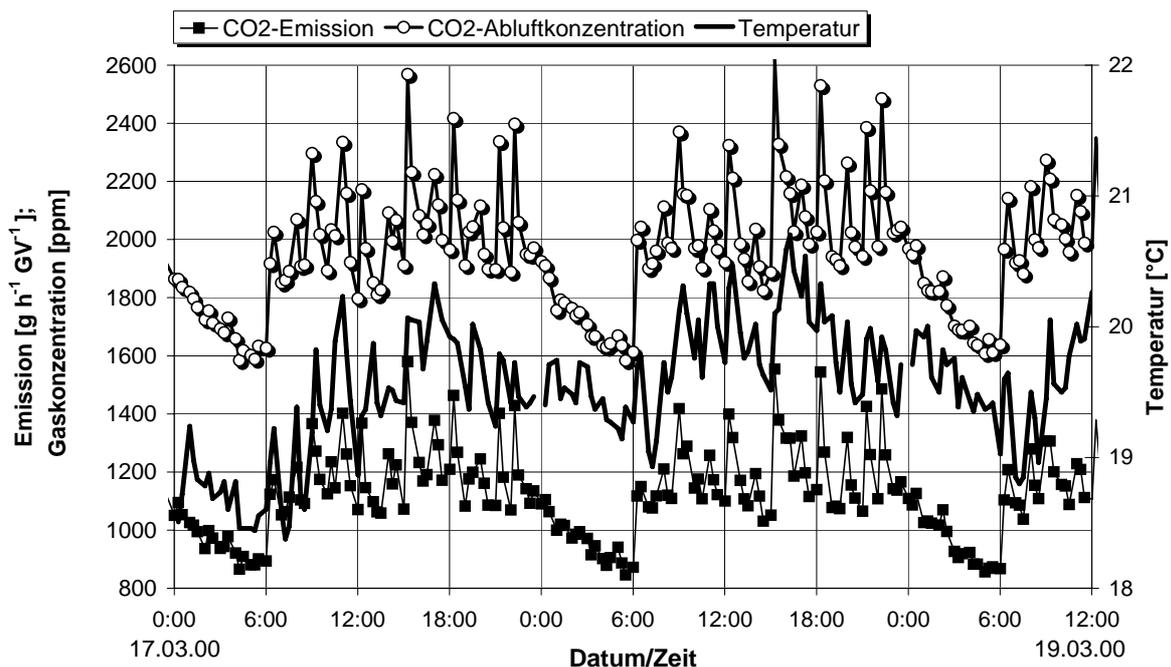


Abb. 42: Verlauf von Innenraumtemperatur, CO₂-Abluftkonzentration und CO₂-Emissionsrate an drei Tagen im März (18.-20. Masttag) im Haltungssystem VSP „Vollspalten, Zwangslüftung“

Die Regressionsanalyse (vgl. Tab. 40) für die CO₂-Emission ergab in den drei ausgewählten Messzeiträumen (vgl. Tab. 41) zusammengefasst folgende Ergebnisse:

- Messzeitraum 1:
 - erklärte Varianz von 91 % der CO₂-Emission durch die CO₂-Abluftkonzentration;
 - erklärte Varianz von 50 % der CO₂-Abluftkonzentration durch die Variablen Innenraumtemperatur, Tag/Nacht.
- Messzeitraum 2:
 - erklärte Varianz von 80 % durch die Einflussfaktoren Volumenstrom ($R^2=0,5$), Tag/Nacht ($R^2=0,2$) und Abluftkonzentration ($R^2=0,1$); jeweils positiv mit CO₂-Emission korreliert.
- Messzeitraum 3:
 - erklärte Varianz von 88 % durch den Einfluss der NH₃-Emission ($R^2=0,4$; positiv korreliert), und CO₂-Abluftkonzentration ($R^2=0,18$; positiv korreliert), sowie den Einfluss der NH₃-Abluftkonzentration ($R^2=0,3$; negativ korreliert).

Für zwangsbelüftete Warmställe wird in der Regel zum einen ein proportionaler Zusammenhang zwischen Volumenstrom, Temperatur und Emission beschrieben, zum anderen wird über abnehmende Gaskonzentrationen bei Volumenstromerhöhung berichtet (AARNINK, 1997; KAISER, 1999; KECK, 1997; RATHMER, 2002).

KECK (1997) beobachtete jedoch Unterschiede im gemittelten Tagesgang in Abhängigkeit von der Zulufttemperatur. Bei Zulufttemperaturen über 20 °C erreichte die NH₃-Emission ihr Maximum bereits einige Zeit vor dem Maximum des Volumenstromes. Bei Zulufttemperaturen unter 20 °C wurde ein weitgehend paralleler sinusförmiger Verlauf von Volumenstrom und Emission beschrieben. AARNINK (1997) beschreibt eine deutliche Abhängigkeit des Tagesverlaufes von der Tieraktivität mit Unterschieden zwischen Tag und Nacht sowie nachvollziehbare Emissionspeaks während erhöhter Aktivitätsphasen der Tiere, im Zuge derer die Wärmeproduktion der Tiere erhöht war und somit die Innenraumtemperatur und der Volumenstrom anstiegen.

4.2.3.7.2 Haltungssystem "Getrennte Klimabereiche (GK)"

Tabelle 42 gibt einen Überblick über die Randbedingungen und mittleren Gaskonzentrationen und Emissionen während der drei exemplarisch ausgewählten Messzeiträume des zweiten Mastdurchganges. In **Abbildung 43** sind die Verläufe der Volumenströme, der Abluftkonzentration sowie Emissionen der Gase NH₃ und CO₂ in den ausgewählten Messzeiträumen übereinander dargestellt.

Tab. 42: Zusammenfassung der Randbedingungen und mittleren Gaskonzentrationen und Emissionsraten von NH₃ und CO₂ für drei Messzeiträume eines Mastdurchganges (März bis Juni 2000) im Haltungssystem GK „Getrennte Klimabereiche, freie Lüftung“ (Mittelwert und Standardabweichung)

Messzeitraum	1		2		3	
Datum	16.03.-19.03.00		30.03.-03.04.00		04.05.-07.05.00	
Masttag	Masttage: 17-20		Masttage: 31-35		Masttage: 66-69	
Anzahl Werte	283		351		288	
Stallbelegung [GV]	4,2	+/- 0,1	5,4	+/- 0,12	9,9	+/- 0,05
Außentemperatur [°C]	6,8	+/- 1,4	9,1	+/- 5,5	18,5	+/- 4,5
Innenraumtemperatur [°C]	8,0	+/- 1,2	11,2	+/- 4,5	18	+/- 3
Temperaturdifferenz [°C]	1,2	+/- 0,8	2	+/- 1,8	0,5	+/- 1,8
Volumenstrom [m ³ h ⁻¹ GV ⁻¹]	1182	+/- 340	876	+/- 346	564	+/- 95
NH ₃ -Abluftkonzentration [ppm]	7,4	+/- 1,5	9,6	+/- 2,6	7,3	+/- 2
NH ₃ -Emissionsrate [g h ⁻¹ GV ⁻¹]	4,2	+/- 0,6	4,0	+/- 0,8	3,8	+/- 0,6
CO ₂ -Abluftkonzentration [ppm]	740	+/- 96	828	+/- 135	840	+/- 98
CO ₂ -Emissionsrate [g h ⁻¹ GV ⁻¹]	675	+/- 150	607	+/- 120	460	+/- 72

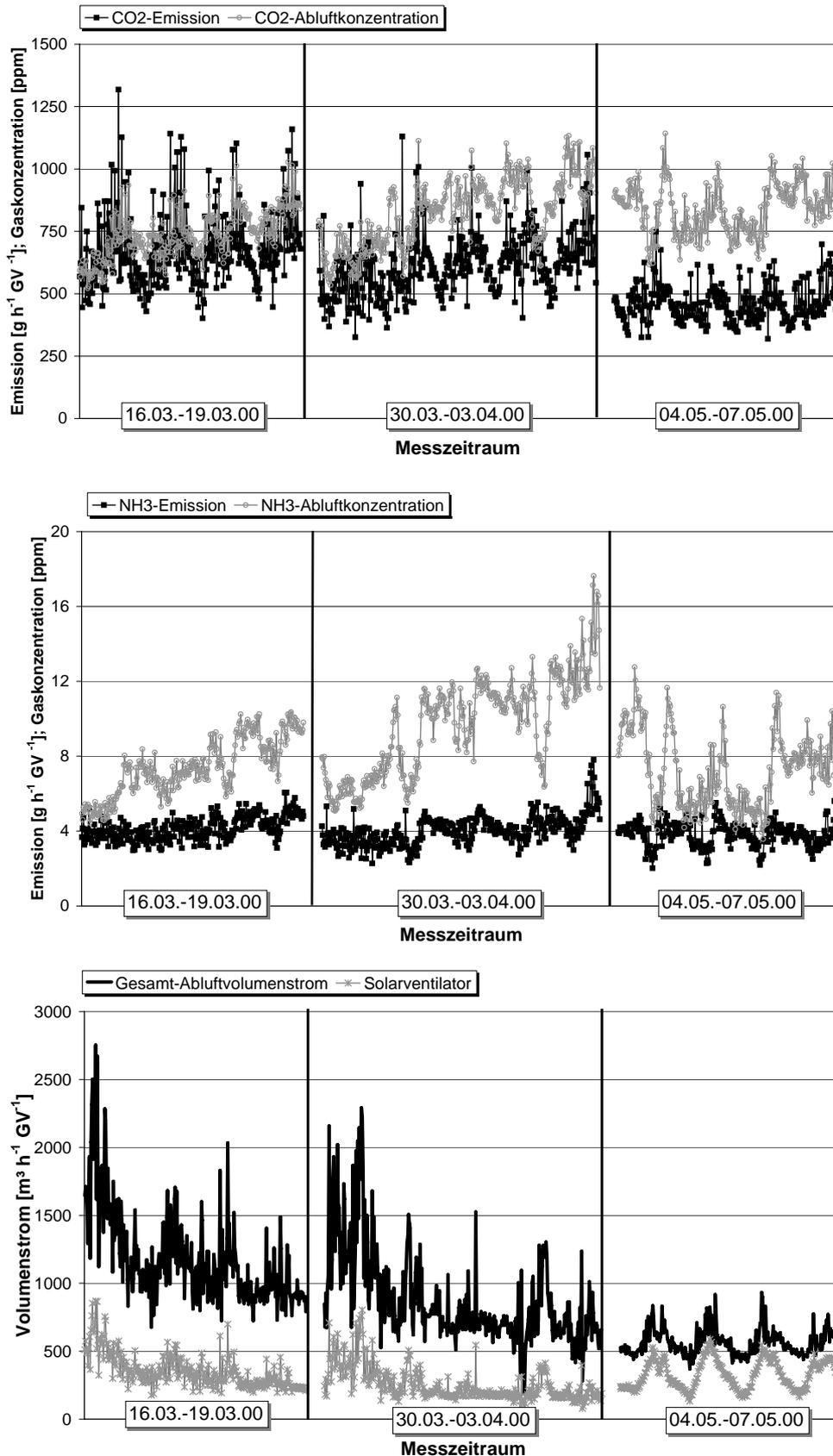


Abb. 43: Verläufe der Volumenströme (Gesamtvolumenstrom und Anteil des Solarventilators), der Abluftkonzentration sowie Emissionsrate der Gase NH₃ und CO₂ für drei Messzeiträume eines Mastdurchganges (März bis Juni 2000) des Haltungssystems GK „Getrennte Klimabereiche, freie Lüftung“

Bei Betrachtung der Randbedingungen (Tabelle 42) und Verläufe (Abbildung 43) werden zunächst grundsätzliche Unterschiede zum Haltungssystem VSP (Tabelle 41; Abbildung 40) deutlich. Im Messzeitraum 1 und 2 ist der Volumenstrom weniger vom Temperaturverlauf als von den Windverhältnissen beeinflusst (vgl. Kap. 4.2.2.2; Abb. 26). Im Messzeitraum 3 wird deutlich, dass an windstillen Tagen mit geringer Temperaturdifferenz der natürliche Luftaustausch stark eingeschränkt ist und eine angemessene Lüfrate ohne den Einsatz des temperaturgeregelten Solarventilators nicht erreicht worden wäre.

Hinsichtlich der Zusammenhänge zwischen Volumenstrom und NH_3 -Emission zeigen sich im System GK gegensätzliche Effekte zum System VSP. Eine Zunahme des Volumenstromes bewirkt sowohl eine Abnahme der NH_3 -Abluftkonzentration als auch der NH_3 -Emission. Dieser Effekt zeigt sich auch noch im Messzeitraum 3, obwohl hier Ähnlichkeiten der Volumenströme zu einer Zwangslüftung bestehen, da der temperaturgeregelte Solarventilator im Einsatz war, **Abbildung 44**.

Die Regressionsanalyse (vgl. Tab. 40) für die NH_3 -Emission ergab in den drei ausgewählten Messzeiträumen (vgl. Tab. 42) zusammengefasst folgende Ergebnisse:

- Messzeitraum 1 und 2:
 - erklärte Varianz von 90 % durch die mit der NH_3 -Emission positiv korrelierten Variablen NH_3 -Abluftkonzentration ($R^2=0,4$); CO_2 -Emission ($R^2=0,15$); CO_2 -Abluftkonzentration ($R^2=0,15$) sowie die umgekehrt proportionale Beziehung zum Volumenstrom ($R^2=0,2$).
- Messzeitraum 3:
 - erklärte Varianz von 70 % durch den Einfluss von Temperaturdifferenz ($R^2=0,3$) und CO_2 -Emission ($R^2=0,4$) (beide positiv mit der NH_3 -Emission korreliert); sowie weiterhin ein gegenläufiger Zusammenhang zwischen Volumenstrom und NH_3 -Emission.

Bei sehr hohen Volumenströmen und geringen Temperaturen unterschied sich im System GK die Abluftkonzentration oftmals nur geringfügig von der Hintergrundkonzentration. Es wird vermutet, dass das NH_3 -Nachlieferungspotenzial des Stallsystems GK aufgrund niedrigerer Temperaturen geringer und langsamer ist, sowie auf Grund der Strukturierung des Haltungssystems und der Anordnung der Abluftschächte, trotz hoher Volumenströme, keine gleichmäßige Überströmung von emittierenden Oberflächen erfolgte. Weiterhin ist zu berücksichtigen, dass sich bei kühlen Bedingungen (d.h. dann bei hohen Volumenströmen und geringen Emissionen) die Tiere vorwiegend in den abgedeckten Liegebereichen aufhielten, jedoch der Beitrag der Gaskonzentrationen in den abgedeckten Liegebereichen zur Emission unklar ist.

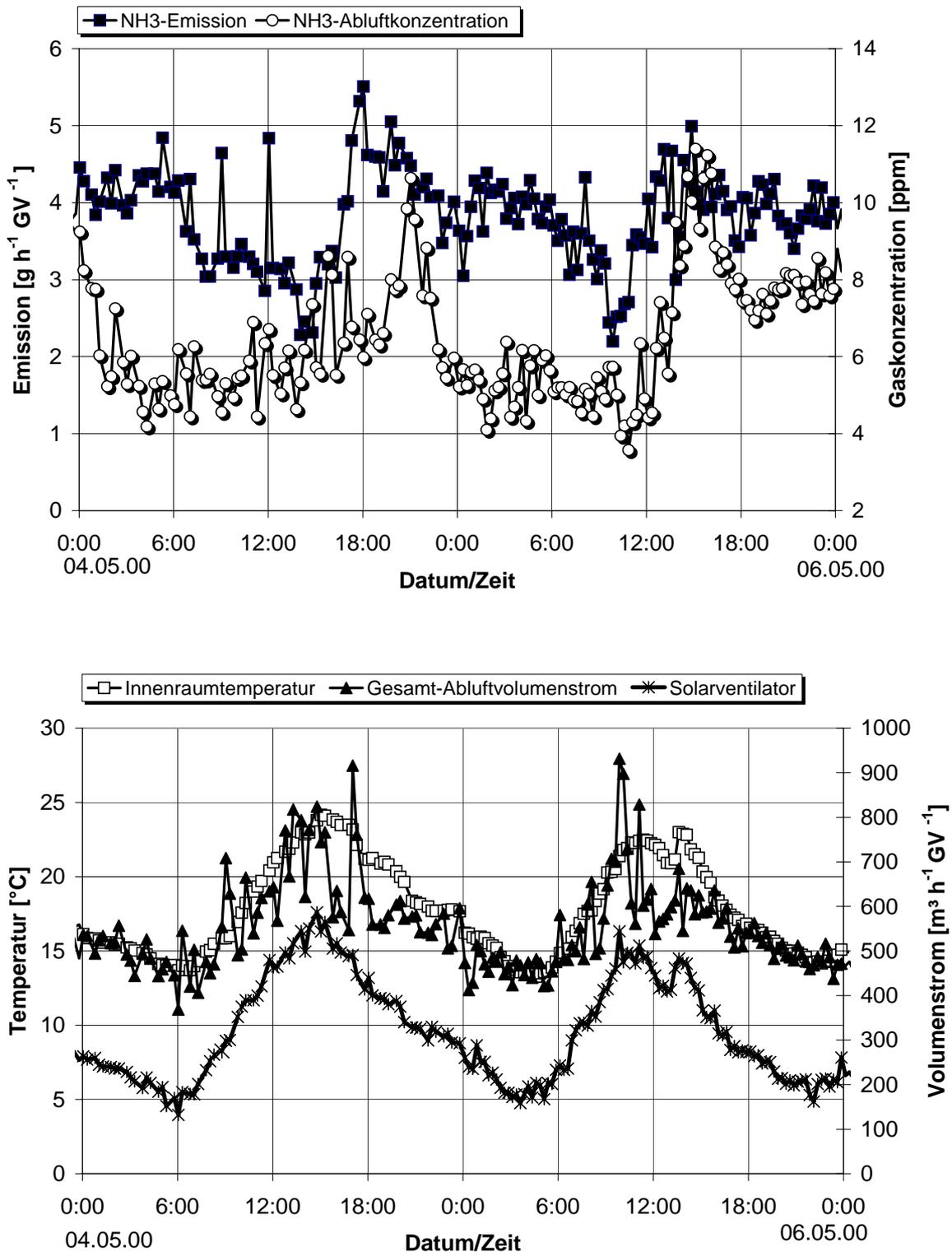


Abb. 44: Verlauf von Innenraumtemperatur, Volumenstrom, NH₃-Abluftkonzentration und -Emissionsrate an zwei Tagen im Mai (66.-68. Masttag) im Haltungssystem GK „Getrennte Klimabereiche, freie Lüftung“

Für die Tagesverläufe der CO₂-Konzentration und -Emission im Haltungssystem GK gilt ebenso wie im Haltungssystem VSP, dass diese durch die Aktivitätsspitzen während der Fütterung stark bestimmt werden.

Die Regressionsanalyse (vgl. Tab. 40) für die CO₂-Emission ergab in den drei ausgewählten Messzeiträumen (vgl. Tab. 42) zusammengefasst folgende Ergebnisse:

- Messzeitraum 1:
 - erklärte Varianz von 85 % der CO₂-Emission durch die jeweils positiv korrelierten Variablen CO₂-Abluftkonzentration ($R^2=0,4$); NH₃-Abluftkonzentration ($R^2=0,23$); NH₃-Emission ($R^2=0,2$) und Außentemperatur ($R^2=0,12$).
- Messzeitraum 2:
 - ähnlich wie Messzeitraum 1 mit einer erklärten Varianz von 85 %; zusätzliche Berücksichtigung der Variablen Tag/Nacht
- Messzeitraum 3:
 - erklärte Varianz von 70 % durch die jeweils positiv mit der CO₂-Emission korrelierten Variablen NH₃-Emission ($R^2=0,35$) und Temperaturdifferenz ($R^2=0,15$) sowie durch die Variablen CO₂- und NH₃-Konzentration; Tag/Nacht; Volumenstrom und Temperatur (zusammen $R^2=0,2$).

In der Literatur finden sich für Schweineställe mit freier Lüftung und getrennten Klimabereichen nur wenige Angaben zum Tagesverlauf der Emission. NIEBAUM (2001) beobachtete auch eine Abnahme der Gaskonzentrationen bei hohen Volumenströmen, macht aber keine Angaben zum Verlauf der entsprechenden Emission. RATHMER (2002) beschreibt ebenfalls für die untersuchten Außenklimastall-Versuchsabteile geringere NH₃-Abluftkonzentrationen durch den Verdünnungseffekt des Volumenstromes und vermutete eine geringere Bildung und Freisetzung aufgrund niedrigerer Temperaturen. Die NH₃-Emission der Außenklima-Versuchsabteile in den Untersuchungen von RATHMER (2002) waren, auf der Basis von Tagesmittelwerten über den gesamten Untersuchungszeitraum, sowohl positiv mit der Temperatur als auch, abweichend von den eigenen Ergebnissen, ebenso positiv mit dem Volumenstrom korreliert. Zeitlich hoch aufgelöste Tagesverläufe werden jedoch nicht dargestellt.

4.2.3.7.3 Reduziertes Regressionsmodell

Anhand der ausgewählten Messzeiträume sollte ergänzend geprüft werden, zu welchem Anteil die Emissionen allein mit Variablen, die in einer markttypischen Stallklimasteuerung aufgezeichnet und verwendet werden könnten, zu erklären sind. Hieraus könnten sich Ansatzpunkte für eine Beeinflussung des Tagesverlaufs der Emission ergeben, die als mögliche Emissionsminderungsstrategie dienen könnte.

Die Variablen Tag/Nacht, Innen- und Außentemperatur, Temperaturdifferenz, Volumenstrom und CO₂-Innenraumkonzentration wurden für das reduzierte Regressionsmodell ausgewählt (Tabelle 40). Die Ergebnisse sind je nach Messzeitraum und Haltungssystem sowie zu prüfender Gasemission sehr unterschiedlich und sind in **Tabelle 43** zusammengefasst.

Tab. 43: Anteil der erklärbaren Varianz der Emissionsraten von NH₃ und CO₂ für drei Messzeiträume eines Mastdurchganges (März bis Juni 2000) im reduzierten Regressionsmodell

Haltungssystem	Vollspalten Zwangslüftung (VSP)			Getrennte Klimabereiche freie Lüftung (GK)			
	Messzeitraum	1	2	3	1	2	3
NH ₃ -Emission		12 %	75 %	68 %	52 %	59 %	64 %
CO ₂ -Emission		46 %	47 %	39 %	21 %	28 %	18 %

Erklärende Variablen:
Tag/Nacht; Innenraumtemperatur; Außentemperatur; Temperaturdifferenz;
Volumenstrom; CO₂-Innenraumkonzentration

Die Wirkungsrichtung der gegebenenfalls im Rahmen einer Emissionsminderungsstrategie beeinflussbaren Variablen drückt sich im Vorzeichen des jeweiligen Korrelationskoeffizienten aus. Mit Ausnahme des Messzeitraumes 1 waren im Haltungssystem VSP die Gasemission sowie Volumenstrom und Temperatur positiv bzw. mit der Temperaturdifferenz negativ korreliert. Im Haltungssystem GK hingegen zeigte sich eine negative Korrelation der Gasemission mit dem Volumenstrom sowie in den Messzeiträumen 1 und 2 eine positive Korrelation mit der Innenraumtemperatur und Temperaturdifferenz.

4.2.3.7.4 Wirkung und mögliche Anwendung

Die Auswertung von beispielhaften Tagesverläufen der NH_3 - und CO_2 -Emissionen und verschiedener Einflussfaktoren hat für das Haltungssysteme VSP mit Zwangslüftung gezeigt, dass:

- Die NH_3 -Emissionen bei fluktuierenden Volumenströmen vorwiegend durch die Faktoren Volumenstrom (positiv korreliert) und Abluftkonzentration (negativ korreliert) erklärt werden.
- Die Tag/Nacht-Dynamik der NH_3 -Emission hauptsächlich durch die Dynamik des Temperaturverlaufes und folglich des Volumenstromes bestimmt ist sowie kurzzeitige Spitzen auf die fütterungsbedingte Tieraktivität zurückgeführt werden können.
- Die Tag/Nacht-Dynamik der CO_2 -Emission hingegen hauptsächlich durch die fütterungsbedingte Tieraktivität zu erklären ist, in dessen Folge die CO_2 -Abluftkonzentration und Temperatur proportional zur CO_2 -Emission ansteigen, und sekundär auf durch im Tagesgang parallel verlaufende Volumenströme und dadurch bedingte Änderungen der Gaskonzentration und NH_3 -Emission zurückgeführt werden können.

Die wichtigsten Beobachtungen für das Haltungssystem GK mit freier Lüftung im Vergleich zum System VSP sind:

- Die Höhe und Fluktuation der Volumenströme sind wesentlich größer; die Temperaturen, Gaskonzentrationen und -emissionen sind in der Regel deutlich geringer als im System VSP.
- Im Gegensatz zum System VSP verläuft die NH_3 -Emission umgekehrt proportional zum Volumenstrom, d.h. dass steigende Volumenströme eine Abnahme der Emission bedingen.
- Der Volumenstrom der freien Lüftung ist im Gegensatz zu einer temperaturgeregelten Zwangslüftung zum einen stark von den Windverhältnissen beeinflusst sowie weiterhin positiv mit der Temperaturdifferenz und negativ mit der Innenraumtemperatur korreliert.
- Die Beeinflussungsmöglichkeiten für das Haltungssystem GK sind auf Grund der freien Lüftung und Strukturierung des Raumes schwieriger.

Das Potential von Emissionsminderungsmaßnahmen, die mit Hilfe einer angepassten Stallklimaauzeichnung und -steuerung an einer Begrenzung von kurzzeitigen Emissionsspitzen im Tagesverlauf ansetzen, ist aufgrund der deutlichen Dynamik der stallspezifischen Emissionen gegeben. Die Auswahl möglicher Steuerungsgrößen ist jedoch an das jeweilige Haltungs- und Lüftungssystem bzw. an die jeweiligen Faktoren, die die Dynamik der Emissionen bestimmen, anzupassen. Weiterhin müssen die unterschiedlichen Quellen sowie Bildungs- und Freisetzungsbedingungen für die stallspezifischen Emissionen berücksichtigt werden.

5 DISKUSSION

Ziel der Untersuchungen war ein Systemvergleich zwischen einem konventionellen, zwangsbelüfteten und einem neueren, frei belüfteten Haltungssystem für Mastschweine unter praxisnahen Bedingungen hinsichtlich der Stallklimafaktoren und Gasemissionen im Rahmen von zeitlichen hoch aufgelösten Langzeitmessungen. Im Folgenden wird zunächst die Eignung der gewählten Vorgehensweise und Messmethodik für die Erreichung des vorgenommenen Zieles diskutiert sowie die erlangte Datenbasis und Datenqualität beurteilt. Vor diesem Hintergrund werden im Anschluss die gewonnenen Ergebnisse zu den Stallklimafaktoren und Gasemissionen vergleichend bewertet und eingeordnet.

5.1 Bewertung der Vorgehensweise

5.1.1 Versuchsstall und Haltungssysteme

Der Vergleich der Haltungssysteme wurde im **Versuchsstall für Mastschweine** auf der Versuchsstation für Tierhaltung, Tierzucht und Kleintierzucht "Unterer Lindenhof" der Universität Hohenheim durchgeführt. Der Versuchsstall bietet durch seine Konzeption und Unterteilung in zwei räumlich getrennte Abteile sehr gute Voraussetzungen für anwendungsorientierte Untersuchungen zur Beurteilung von Haltungssystemen. Als besonders vorteilhaft ist die Möglichkeit zur Durchführung von Vergleichsuntersuchungen unter sonst gleichen (Umgebungs-) Bedingungen hervorzuheben. Zur Beurteilung der Stallklimafaktoren und Umweltgerechtigkeit bildeten die Abteile des Versuchsstalles die Versuchseinheit. Die Einbettung des Stallbetriebes in die Abläufe der Versuchsstation (z.B. durch die Bereitstellung der Tiere und des Futters) sowie die engagierte Beteiligung der Mitarbeiter der Versuchsstation waren eine ideale Grundlage zur Versuchsdurchführung. Sie dienten der Sicherstellung eines praxisnahen Stallbetriebs und ermöglichten eine dichte Dokumentation aller Vorgänge am Stall.

HARTUNG, E. (2002) hat im Rahmen vorausgehender Untersuchungen die Eignung des Versuchsstalles für Mastschweine, im Sinne einer Versuchseinrichtung zur Beurteilung von gesamten Haltungssystemen oder einzelnen Komponenten von Haltungssystemen, evaluiert. Im Ergebnis wird die Versuchseinrichtung für eine Weiterentwicklung von Haltungssystemen unter praxisähnlichen Bedingungen als auch für eine vergleichende Beurteilung von Haltungssystemen hinsichtlich der Tier- und Umweltgerechtigkeit als sehr geeignet eingestuft. **Abbildung 45** fasst die Eignung der Versuchseinrichtung für verschiedene Fragestellungen in einer abschätzenden Gesamtbewertung zusammen.

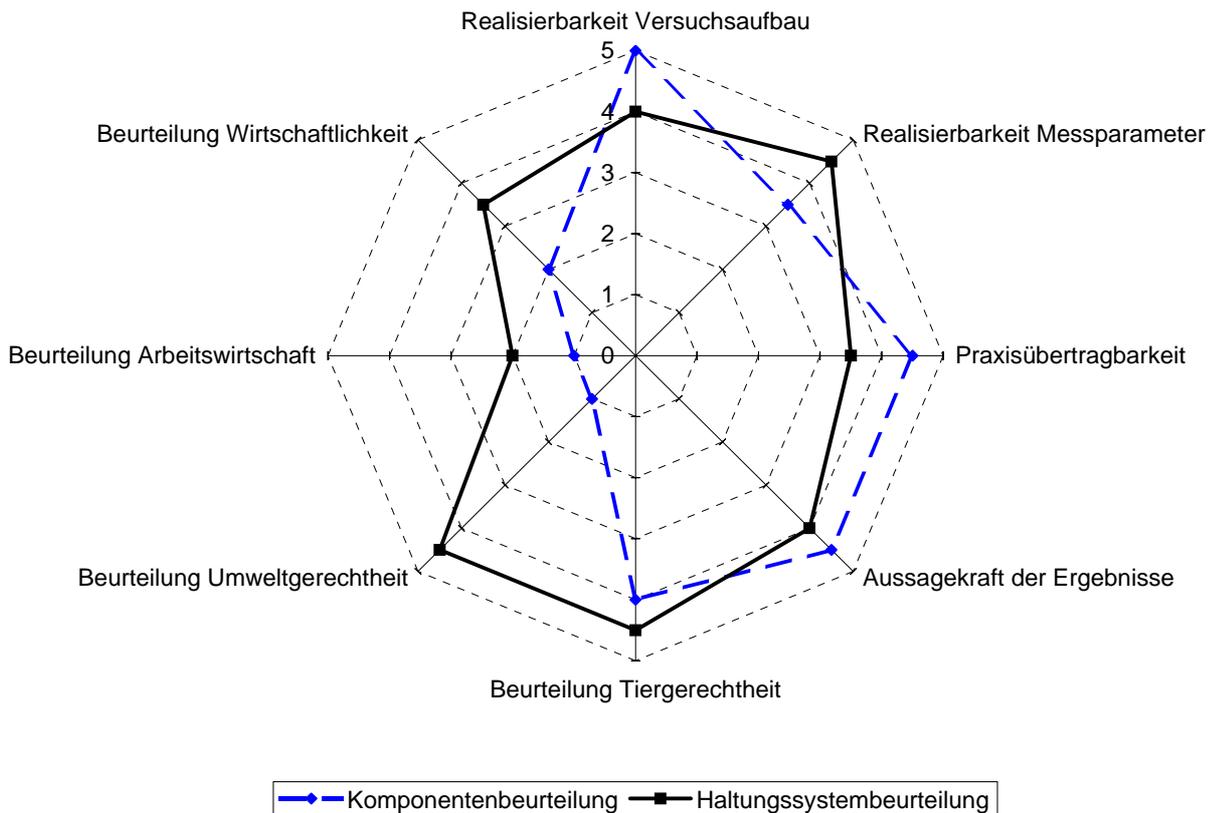


Abb. 45: Abschätzung der Eignung der Versuchseinrichtung zur differenzierten Beurteilung von Haltungssystemen für Mastschweine (nach HARTUNG, E., 2002)

Für die eigenen Untersuchungen waren die Eignung der Versuchseinrichtung hinsichtlich der Faktoren Realisierbarkeit der Messparameter, Praxisübertragbarkeit, Aussagekraft der Ergebnisse und Beurteilung der Umweltgerechtigkeit von Haltungssystemen von besonderer Bedeutung. Basierend auf den eigenen umfangreichen Untersuchungen wird, entsprechend der Einschätzung von Hartung, E. (2002) (Abbildung 45), die Eignung des Versuchsstalles für die vergleichende Bearbeitung von Fragestellungen zu Stallklima und Emissionen aus unterschiedlichen Haltungssystemen als sehr gut eingestuft.

Bei der Ausgestaltung und Betriebsweise der zu untersuchenden **Haltungssysteme** wurde sehr viel Wert auf Praxisnähe und -tauglichkeit sowie die Verwendung aktueller Techniken bei Aufstallung, Lüftung und Fütterung gelegt.

Das Haltungssystem "**Vollspalten, Zwangslüftung VSP**" entsprach vor allem in den Punkten Aufstallung (Kleingruppen, Betonvollspaltenboden), Lüftung (Impulsarme Zuluftführung und Unterflurabsaugung) und Stallbelegung im "Rein-Raus-Betrieb", dieser in der Praxis weitverbreiteten und deshalb als "konventionell" bezeichneten Haltungssystemform.

Die Fütterung war als Sensorflüssigfütterung ausgelegt; einem Fütterungsverfahren, das in den letzten Jahren Verbreitung fand. Die Fütterungsstrategie sah eine nährstoffangepasste vierphasige Fütterung vor, die als gute fachliche Praxis sowohl aus ökonomischen Gesichtspunkten als auch in Hinblick auf den Stickstoffkreislauf und die NH_3 -Emissionen zu werten ist. Für die Entmistung ist anzumerken, dass aus gebäudetechnischen und versuchstechnischen Gründen eine Sammlung und Zwischenlagerung der Exkreme im Innenraum über den gesamten Mastdurchgang vorgenommen werden musste. Diese Verfahrensweise ermöglichte jedoch nicht die Umsetzung von Maßnahmen zur Emissionsminderung bei der Entmistung durch, beispielsweise, eine zügige Entfernung der Exkreme aus dem Stall (vgl. Tab. 3; Tab. 14). In Hinblick auf aktuelle und zukünftige gesetzliche Regelungen zur Tierhaltung hatten die Tiere in jeder Bucht kontinuierlichen Zugang zu Beschäftigung mit Stroh, Ketten und einem Holzbalken an Beschäftigungsautomaten. Weiterhin war das Flächenangebot pro Tier etwas großzügiger bemessen. Die Übertragbarkeit des Systems VSP auf größere Einheiten (Stallgebäude) war durch praxisübliche Abmessungen gegeben. Im Rahmen der Vergleichsuntersuchungen diente das System VSP, als herkömmliche und weitverbreitete Haltungsform, als Referenzsystem.

Vor dem Hintergrund aktueller wachsender Anforderungen an die Haltung von Schweinen, hinsichtlich beispielsweise des Flächenangebotes, der Flächengestaltung oder Raumaufteilung, wurde das Haltungssystem **"Getrennte Klimabereiche, freie Lüftung GK"** als mögliche Umbaulösung für konventionelle Ställe mit Zwangslüftung konzipiert und im Versuchsstall realisiert. Die Ausgestaltung des Systems GK sah die Kombination von arbeitswirtschaftlichen und hygienischen Vorteilen einstreuloser Verfahren mit möglichen Vorteilen der Trennung von Klima- und Funktionsbereichen und freier Lüftungssysteme vor. Die Konzeption und Anpassung der Aufstallung (zwei Buchten mit mittig angeordneten abgedeckten Liegebereichen), Fütterung (siehe System VSP), und Lüftung (Schwerkraft-Schachtlüftung) des Systems GK an die gegebenen Raummaße im Versuchsstall wird als gut gelungen beurteilt. Weiterhin zeichnete sich die Umbaulösung durch eine hohe Aktualität aus hinsichtlich politischer Diskussionen als auch bezüglich der landwirtschaftlichen Praxis durch dort zunehmendes Interesse an Außenklimaställen.

Die Funktion des Systems GK war vor allem in kalten Perioden im Jahresverlauf zufriedenstellend. Warme Zeiträume waren problematischer, da die Einhaltung der Funktionsbereiche nicht gewährleistet war und die Liegeflächen oft stark verschmutzt wurden. Des weiteren war ein ausreichender Luftaustausch allein durch die freie Lüftung nicht immer gewährleistet, so dass die Zuschaltung eines Stütz-(Solar)-ventilators notwendig wurde. Für Fütterung, Beschäftigung und Entmistung gelten dieselben Anmerkungen, wie für das System VSP (s.o.). Eine Übertragbarkeit des Systems GK als Prinziplösung auf größere Einheiten (Stallgebäude) ist denkbar.

Durch die besonderen Anforderungen an die Gestaltung der Zu- und Abluftöffnungen sowie die Trennung der Funktionsbereiche müssen die Umbaueignung des Gebäudes und Anpassungsmöglichkeiten an vorhandene Abmessungen jeweils geprüft werden.

5.1.2 Versuchsplanung und -durchführung

Die gewählte **Versuchsplanung und -durchführung** wird insgesamt als sehr gut geeignet und auch notwendig erachtet, um der Zielsetzung der Untersuchungen umfassend gerecht zu werden.

Die weitgehend kontinuierlichen Messungen an beiden Haltungssystemen im Parallelbetrieb, über die Gesamtdauer von vier aufeinanderfolgenden Mastdurchgängen zu unterschiedlichen Jahreszeiten, ergaben eine umfangreiche Datenbasis. Die Variabilität der Ergebnisse, allein zwischen den Mastdurchgängen innerhalb eines Haltungssystems, verdeutlicht die Wichtigkeit und Erfordernis von Langzeitmessungen, damit sich eine anschließende Beurteilung der Ergebnisse auf eine repräsentative Datenbasis stützen kann. Die gemeinsame Erfassung der Stallklimafaktoren und Emissionen wird, im Vergleich zu in der Literatur vielfach vorgenommenen Einzelbetrachtungen, als besonders vorteilhaft angesehen, da diese Vorgehensweise eine differenziertere Beurteilung der Haltungssysteme ermöglicht und Wechselwirkungen zwischen Stallklimafaktoren und -Emissionen besser berücksichtigt. Die hohe zeitliche Auflösung bei der Messwerterfassung war schließlich Grundlage für die Beschreibung, den Nachweis und das Verständnis von tageszeitlichen Effekten und von kurzzeitigen Einflüssen auf den Verlauf der Stallklimafaktoren und der stallspezifischen Emissionen.

Um Unterschiede zwischen den Haltungssystemen auf die wesentlichen verfahrenstechnischen Besonderheiten hinsichtlich Aufstallung und Lüftung zurückführen zu können, wurden weitere mögliche Einflüsse durch gleiche Umgebungsbedingungen, Tiere, Fütterung und Entmistung in beiden Haltungssystemen nachweislich minimiert.

Die ausgewählten **Messgrößen, verwendeten Messgeräte bzw. -methoden** sowie die **räumliche und zeitliche Probenahme** waren bis auf wenige Ausnahmen grundsätzlich sehr gut zur Beantwortung von Fragestellungen zu Stallklima und Emissionen unter Berücksichtigung von verschiedenen Randparametern im Rahmen von Langzeituntersuchungen geeignet. Eine hohe Genauigkeit und Sensitivität wurde beispielsweise bei der Bestimmung der Konzentrationen von NH_3 , CO_2 und CH_4 , der Volumenströme und der Erkennung von Leckluftströmen erreicht.

Einige Besonderheiten und/oder Einschränkungen bezüglich der Messmethoden und Probenahme sind jedoch gesondert hervorzuheben und zu berücksichtigen:

- Das unerwünschte Austreten von Leckluftströmen konnte zwar sehr gut anhand erhöhter CO₂-Konzentrationen nachgewiesen werden, jedoch bestand keine Möglichkeit zur Quantifizierung von Leckluftströmen.
- Die Volumenstrombestimmung konnte in beiden Haltungssystemen mit hoher Genauigkeit und Langzeitstabilität mittels kalibrierter Messventilatoren kontinuierlich durchgeführt werden. Im System GK mit freier Lüftung reichte jedoch bei schlechten Lüftungsverhältnissen der Luftstrom zeitweise nicht mehr aus, die Messventilatoren in eine Drehbewegung zu versetzen (untere Nachweisgrenze).
- Die nachgewiesene Wasserdampfquerempfindlichkeit bei der NH₃- und CH₄-Messung machte eine nachträgliche Korrektur der Einzelwerte um den gesondert erfassten Wasserdampfgehalt der Luft erforderlich. Die rechnerische Korrektur von geringen CH₄-Konzentrationen beispielsweise in der Zuluft und im System GK im unteren Messbereich des CH₄-Gasanalysators hatte jedoch teilweise negative CH₄-Konzentrationen zur Folge.
- Im Rahmen von Stichprobenmessungen der N₂O-Konzentrationen konnten, mit der gegebenen Genauigkeit der GC-Analyse und der zeitlichen Auflösung der Proben, keine Unterschiede zwischen den verschiedenen Messstellen und im Vergleich zur Umgebungsluft nachgewiesen werden. Die Werte waren nicht für eine Berechnung von N₂O-Emissionen geeignet.
- Bei der quasi-kontinuierlichen Gaskonzentrationsbestimmung von NH₃, CO₂ und CH₄ wurde auf eine Randomisierung der zeitlichen Beprobungsabfolge zugunsten einer zeitnahen und häufigen (3 x pro Stunde) Beprobung der Zu- und Abluftstellen zur Emissionsberechnung verzichtet. Zur Beschreibung der Luftqualität konnten die Gaskonzentrationen im Innenraum bzw. in den abgedeckten Liegeflächen deshalb nur 1 x pro Stunde erfasst werden. Kurzzeitige Veränderungen und Beziehungen zur Emission waren deshalb nur eingeschränkt nachweisbar.
- Bei der räumlichen Probenahme der Gaskonzentrationen wurden alle Zu- und Abluftstellen berücksichtigt und eine repräsentative Beprobung der definierten Zu- und Abluftquerschnitte, beispielsweise durch Verzweigung der Teflonschläuche, angestrebt. Die ausgewählten Messstellen zur Bestimmung von Gas- und Staubkonzentrationen im Innenraum und in den abgedeckten Liegeflächen hingegen können nur als Stichproben für den gesamten Stallraum bzw. die Liegeflächen angesehen werden.
- Die Ergebnisse zu den Flüssigmistparametern, die anhand von regelmäßig entnommenen Flüssigmistproben bestimmt wurden, können nur als Anhaltswerte für die Flüssigmistzusammensetzung dienen und zeigen eine Tendenz der zeitlichen Veränderung der Flüssigmistzusammensetzung im Verlauf der Mastdurchgänge an. Eine repräsentative Beprobung des sehr inhomogenen Flüssigmistes war nicht realisierbar, ohne die Stabilisierung des Flüssigmistes im Sinne einer Emissionsquelle zu stören. Eine gezielte Untersuchung von Wechselbeziehungen zwischen Flüssigmistzusammensetzung und Gasfreisetzung bzw. -Emission war auf Grund der begrenzten zeitlichen und räumlichen Auflösung der Flüssigmistproben nicht verlässlich durchführbar.
- Eine kontinuierliche Erfassung der Staubkonzentrationen über den gesamten Untersuchungszeitraum war mit der gegebenen Geräteausstattung nicht möglich. Deshalb wurden pro Mastdurchgang nur jeweils drei bis vier Messungen über 24 h im Innenraum der Haltungssysteme für verschiedene Größfraktionen durchgeführt.

5.2 Bewertung der Datenqualität

Regelmäßige Kalibrierroutinen, Messgeräte- und Messwertkontrollen sowie eine umfassende Dokumentation aller Vorgänge am Stall, dienen der Sicherung einer hohen Zuverlässigkeit der laufenden Messungen. Im Zuge einer eingehenden Ergebnisprüfung und konsequenten Datenkontrolle wurden anhand definierter Selektionskriterien schließlich die Datensätze ausgewählt, die für eine weitere Ergebnisdarstellung und den Vergleich der Haltungssysteme verwertbar waren. Im Rahmen der Datenselektion zeigte sich, dass einige Messfehler (v.a. durch Undichtigkeiten im Messsystem) während der laufenden Messungen nicht sichtbar wurden, und erst im Vergleich zu allen Daten der Messreihen erkannt werden konnten. Dies führte bei den Messgrößen NH_3 im Mastdurchgang 1 bzw. CO_2 und CH_4 im Mastdurchgang 4 zu einer sehr hohen Ausschlussquote (rund 70 %) der jeweils um die 100 Messtage. Weiterhin ist zu berücksichtigen, dass auch, bei ansonsten gut verlaufenden Messungen, im Normalfall dennoch mindestens 30% bis 40% der Messtage über den gesamten Messzeitraum verteilt von einer weiteren Ergebnisdarstellung und Interpretation auszuschließen waren. Dabei ist nochmals zu verdeutlichen, dass beispielsweise allein der Ausschluss der wöchentlichen Kalibrierroutinen schon etwa 10 % bis 20 % der Messtage erfordert. Diese Höhe der Ausschlussquote deckt sich gut mit Erfahrungswerten aus der Literatur (z.B. BROSE, 2000, NIEBAUM, 2001; RATHMER, 2002,) und ist nicht ungewöhnlich für anwendungsorientierte Emissionsmessungen auf Stallebene, wenn die Datenselektion konsequent vorgenommen wird. Diese Beobachtungen unterstreichen und rechtfertigen nochmals die Notwendigkeit von Langzeitmessungen, um eine verlässliche Datenbasis gewinnen zu können.

Die aus den Maßnahmen der Datenkontrolle und -selektion resultierende Datenqualität kann entsprechend der dreistufigen Aufteilung von Qualitätsstufen nach DE SAEGER (1999) (vgl. Kap. 2.4.4.3) größtenteils auf Höhe der zweiten Stufe (Qualitätssicherung) eingeordnet werden. Auf Höhe der zweiten Qualitätsstufe ist jedoch immer noch mit einer Datenunsicherheit von +/- 30 % zu rechnen (vgl. Tab. 31). Es bleibt aber festzuhalten, dass in den letzten Jahren im Bereich der Messung von Stallklimaparametern und stallspezifischen Emissionen deutliche Fortschritte, sowohl hinsichtlich der Verfügbarkeit, als auch der Anwendungsweise der Methoden gemacht wurden, und die resultierende Datenqualität auch der eigenen Messungen in diesem Zusammenhang sehr positiv zu bewerten ist.

5.3 Bewertung und Einordnung der Ergebnisse

Im Folgenden liegt der Schwerpunkt auf dem Vergleich und der Beurteilung der untersuchten Haltungssysteme "Vollspalten, Zwangslüftung VSP (Referenzsystem)" und "Getrennte Klimabereiche GK (Umbaulösung)" hinsichtlich der Stallklimafaktoren und Emissionen sowie verschiedener Wechselwirkungen. Eine Diskussion der absoluten Messwerte im einzelnen auch im Vergleich zu Literaturwerten (vgl. Tab. 5; 6; 11; 12; 15; 16; 25) ist in diesem Zusammenhang nur eingeschränkt von Nutzen, da sich die Versuchsbedingungen und die jeweilige Datenbasis stark unterscheiden und die Literaturangaben aus diesen Gründen stark streuen. Sowohl die eigenen Ergebnisse (vgl. Tab. A1-A6) als auch die Angaben aus der Literatur sind immer das Resultat vielfältiger und unterschiedlicher Faktorkombinationen, die sich je nach Stalltyp und Lüftungsprinzip sehr stark unterscheiden können. Deshalb ist es nicht angemessen, die Messergebnisse in Abhängigkeit vom Übereinstimmungsgrad mit Literaturangaben im Sinne von "richtig" oder "falsch" oder "besser" oder "schlechter" zu diskutieren. Aus diesen Gründen wurde nur eine grobe Einordnung der eigenen Messwerte in den Wertebereich, der sich aus verschiedenen Literaturangaben ergab, als sinnvoll erachtet. Die Überprüfung grundlegender, in der Literatur diskutierter Zusammenhänge, wurde bereits an gegebener Stelle im Ergebnisteil beschrieben.

Im Mittelpunkt dieser Diskussion stehen demzufolge die eigenen Messergebnisse in Hinblick auf eine vergleichende Beurteilung der untersuchten Haltungssysteme für Mastschweine mit unterschiedlichen Lüftungsprinzipien.

5.3.1 Stallklimafaktoren

Gegenstand der Untersuchungen waren die Stallklimaparameter Temperatur und Luftfeuchte, Volumenströme, sowie Konzentrationen von NH_3 , CO_2 und CH_4 und Staub zur Beschreibung der Haltungsumwelt der Tiere. Zu berücksichtigen ist, dass die Beurteilung der Haltungsumwelt im System GK sowohl den Innenraum als auch die abgedeckten Liegebereiche umfasst. In den abgedeckten Liegebereichen konnten jedoch nur die Faktoren Temperatur, Luftfeuchte und Gaskonzentrationen berücksichtigt werden. Wie bereits in Kap. 5.1.2 angesprochen, mussten Messstellen für die Erfassung der Stallklimafaktoren im Innenraum bzw. den abgedeckten Liegeflächen festgelegt werden, die für die Fragestellung als geeignet angesehen wurden. Es kann jedoch nicht davon ausgegangen werden, dass die gewählten Messstellen als repräsentativ für den gesamten Stallraum gelten können, denn es sind beispielsweise Unterschiede in der Gaskonzentrations- oder Staubkonzentrationsverteilung im Raum zu erwarten und diese werden wiederum von unterschiedlichen Faktoren beeinflusst (vgl. Kap. 2; Kap. 2.4.4.2).

Tabelle 44 dient zur qualitativen Einordnung und vergleichenden Beurteilung der verschiedenen Stallklimafaktoren in den beiden untersuchten Haltungssystemen. Diese Einschätzung basiert zum einen auf den Messergebnissen (vgl. Kap. 4.2.2) und dem Kenntnisstand. Weiterhin sind bei der qualitativen Einordnung auch Erfahrungen mit dem Stallbetrieb und Beobachtungen des Stallpersonals, das sich täglich im Stall aufhielt, eingeflossen. Letzteres spiegelt natürlich zu einem gewissen Teil das jeweilige subjektive Empfinden der Personen wieder. Dies zeichnet einen guten Tierhalter aber gerade aus, dass er sich bei der Stallklimagegestaltung und -beurteilung nicht nur von Messwerten leiten lässt, sondern auch in Bezug auf seine Erfahrungen und Tierbeobachtungen reflektiert.

Die Beurteilung der Stallklimafaktoren in Tabelle 44 gibt ebenfalls Hinweise auf problematische Zeiträume und Bedingungen, in denen die Einhaltung eines adäquaten Stallklimas nicht oder nur sehr eingeschränkt realisierbar war. Hieraus leiten sich mögliche Ansätze zur Stallklimaverbesserung ab. Das Temperaturniveau im System VSP war im Mittel mit Werten in der Regel bei und über 20 °C höher, als für Mast-schweine notwendig gewesen wäre. Es hätte ggf. eine stärkere Absenkung der Soll-temperaturkurve im Mastverlauf vorgesehen werden können. Des weiteren waren die Stalltemperaturen an heißen Tagen deutlich zu hoch. Im System VSP wäre unter Umständen eine entsprechende Zuluftkonditionierung (Kühlung und/oder Befeuch-tung) hilfreich gewesen, um zum einen zu hohe Temperaturen an heißen Tagen zu vermeiden und zum anderen die recht niedrige relative Luftfeuchte im Innenraum anzuheben. Offen bleibt die Frage, inwieweit sich mit diesen Maßnahmen verbundene, in der Regel geringere Volumenströme auf die Luftqualität (Gas- und Staubkonzentrationen) ausgewirkt hätten.

Die Beeinflussungs- und Steuerungsmöglichkeiten von Stallklimafaktoren im Haltungssystem GK sind durch die weitgehende Abhängigkeit von der Außenluft bzw. Windgeschwindigkeit (Volumenströme) generell geringer und stellen höhere Anforderungen an den Tierhalter. Festzuhalten bleibt, dass an warmen und wind-stillen Tagen eine zusätzliche Möglichkeit zur Stützventilation erforderlich war. Die Funktion des Haltungssystems GK hängt weitestgehend davon ab, inwieweit tatsäch-lich eine Trennung der Klimabereiche vorhanden war. Ansonsten war die Einhaltung der Funktionsbereiche durch die Tiere nicht gewährleistet und das Problem einer zunehmenden Verschmutzung der Liegeflächen kaum in den Griff zu bekommen. Die zwar oft sehr gute Luftqualität (Gas- und Staubkonzentrationen) im Innenraum wurde durch die Probleme in den abgedeckten Liegeflächen teilweise aufgewogen.

Tab. 44: Einordnung und vergleichende Beurteilung der verschiedenen Stallklimafaktoren in den beiden untersuchten Haltungssystemen VSP (Vollspalten, Zwangslüftung) und GK (Getrennte Klimabereiche, freie Lüftung)

Stallklimafaktor	System VSP (Vollspalten, Zwangslüftung)	System GK (Getrennte Klimabereiche, freie Lüftung)
Temperatur	ausreichend im Tagesmittel häufig ≥ 20 °C vorgesehene Temperaturabsenkung im Mastverlauf nicht immer umsetzbar im Winter teilweise zusätzliche Beheizung notwendig an heißen Tagen zu warm	Innenraum: abhängig von Außentemperatur an heißen Tagen zu warm Abgedeckte Liegeflächen: angemessen, wenn von den Tieren genutzt Beheizung der Bodenplatten war oft notwendig
Relative Luftfeuchte	im unteren Bereich des Optimalbereiches (60-80 %) teilweise als sehr trocken empfunden	Innenraum: abhängig von Außenluft innerhalb und teilweise oberhalb des Optimalbereiches Abgedeckte Liegeflächen: geringer als im Innenraum bei Nutzung durch die Tiere und Beheizung der Bodenplatten Indikator für starke Verschmutzung der Liegeflächen
Volumenstrom	Dimensionierung nach DIN 18910 ausreichend und angemessen positiv von Innenraumtemperatur und negativ von Temperaturdifferenz beeinflusst	deutliche und hauptsächliche Abhängigkeit von der Windgeschwindigkeit an der Zuluftöffnung an kühlen Tagen und bei Wind ausreichend bzw. sehr hoch an warmen und windstillen Tagen unzureichend, wenn keine zusätzliche Stützventilation durch temperaturgeregelten Solarventilator vorgenommen wurde
Konzentrationen von NH₃, CO₂, CH₄	insgesamt gering und unterhalb empfohlener Grenzwerte von 20 ppm NH ₃ und 3000 ppm CO ₂ bei geringen Volumenströmen tendenziell höher als bei hohen Volumenströmen guter und angemessener Luftaustausch im Tierbereich Im Winter dennoch als unangenehm empfunden	Innenraum: sehr gering Abgedeckte Liegeflächen: abhängig vom Verschmutzungsgrad und der Anwesenheit der Tiere in den abgedeckten Liegeflächen bei starker Verschmutzung unzumutbar hohe NH ₃ -Konzentrationen
Staubkonzentration PM₁₀ PM_{2,5} PM_{1,0}	vergleichbar mit Literaturangaben subjektiv empfunden hoch deutliche Peaks während der Fütterungszeiten geringer bei hohen Volumenströmen pro GV	Innenraum: (keine Messungen für abgedeckte Liegeflächen vorhanden) deutlich geringer als im System VSP und subjektiv als angenehmer beurteilt deutliche Peaks während der Fütterungszeiten geringer bei hohen Volumenströmen pro GV

5.3.2 Emissionen

Die Beurteilung der Umweltwirkung der beiden Haltungssysteme "Vollspalten, Zwangslüftung VSP" und "Getrennte Klimabereiche, freie Lüftung GK" beruht auf den Messungen der NH_3 -, CO_2 - und CH_4 -Emissionen. **Tabelle 45** bietet eine Übersicht der wesentlichen Ergebnisse und Wirkungsweise der untersuchten Einflussfaktoren auf die Emissionen, die sich auf der Basis aller selektierten Tagesmittelwerte und beispielhafter Tagesverläufe ergaben.

Es bleibt zu betonen, dass die gemessenen Emissionen immer das Resultat des multifaktoriellen Geschehens im komplexen System Stall sind und auch Literaturangaben entsprechend zu bewerten und einzuordnen sind. Deshalb sind die Mittelwertunterschiede zwischen den Mastdurchgängen innerhalb eines Systems meist signifikant, ist der alleinige Einfluss eines Faktors auf die Emission in der Regel schwer nachweisbar und die Wirkungsrichtung und Empfindlichkeit für verschiedene Einflussfaktoren zwischen den Haltungssystemen sehr unterschiedlich. Am Beispiel des nicht direkt nachweisbaren Einflusses von Außen- oder Innenraumtemperatur auf die Emission wird deutlich, dass die Temperaturen weniger direkt als vielmehr indirekt, durch ihre enge Verbindung zum Volumenstrom, auf das Emissionsgeschehen wirken (Tabelle 45).

Im Vergleich zu Angaben aus der Literatur liegen die gemessenen NH_3 -Emissionsraten tendenziell im oberen Drittel der im Kapitel Kenntnisstand dargelegten Werte (vgl. Tab. 5; Tab. 6) für ähnliche Haltungssysteme. Die CH_4 -Emissionsraten sind bei beiden Haltungssystemen im Vergleich zu Literaturangaben (vgl. Tab. 15; Tab. 16) eher geringer. Die CO_2 -Emissionsraten passen sich recht gut in den von verschiedenen Autoren genannten Wertebereich (vgl. Tab. 11; Tab. 12) ein. Der Vergleich der Haltungssysteme hinsichtlich der Emissionen führt zu dem Ergebnis, dass die Umweltwirkung des Systems GK, aufgrund durchweg niedriger Emissionen, geringer als im System VSP einzuschätzen ist. Für das System VSP bleibt jedoch festzuhalten, dass die ermittelten Emissionen durchaus im Bereich der Empfehlungen bzw. Definitionen der "Best Verfügbaren Techniken (BVT)" liegen (vgl. Kap. 2.1.3; Kap. 2.2.1.3; Kap. 2.2.2.3).

Zur Darstellung von Emissionsfaktoren zum Beispiel in Emissionsinventaren, bei der Beschreibung der "Best Verfügbare Techniken" oder "Guten fachlichen Praxis" sowie in weiteren Regelwerken, wird üblicherweise die Emission auf einen Tierplatz und ein Jahr bezogen. Die Verwendung von Emissionsfaktoren bietet jedoch Spielraum für Fehlinterpretationen, wenn die Bezugsgrößen und Rahmenbedingungen der Messungen nur unzureichend definiert und beschrieben wurden.

Weiterhin ist der Begriff "pro Tierplatz" oder "pro Tier" nicht immer eindeutig definiert. Es ist oft unklar, welche Anzahl von Tieren (durchschnittlich, maximal, während der Messung) der Berechnung zu Grunde liegt. Mit der zeitlichen Bezugsgröße "Jahr" kann sowohl ein Kalenderjahr als auch die Anzahl Tage, in denen der Stall belegt war, gemeint sein. Bei Letzterem werden wiederum unterschiedliche Definitionen verwendet (z.B. 300 Tage; 330 Tage; durchschnittlich; tatsächlich; Anzahl Mastdurchgänge pro Jahr). Schließlich kann unter anderem wegen des großen zeitlichen Einflusses auf die Emissionshöhe im Mastverlauf eine Hochrechnung von Kurzzeitmessungen auf eine durchschnittliche Jahresemission die tatsächlichen Gegebenheiten verzerren.

Bei der Darstellung der eigenen Ergebnisse wird wegen der Unklarheiten bei der Berechnung von Emissionen pro Tier-(platz) und Jahr konsequenterweise auf die Nennung von Emissionsfaktoren verzichtet. Zur Sicherstellung der Vergleichbarkeit und Nutzbarkeit der Daten wird der Angabe von Emissionsraten auf der standardisierten Bezugsbasis von Großvieheinheiten der Vorzug gegeben (vgl. Kap. 2.4.4.1; Kap. 3.4).

Der unterschiedliche Einfluss des Volumenstromes auf Abluftkonzentration und Emission in beiden Haltungssystemen ist auch im Vergleich zum allgemeinen Kenntnisstand besonders hervorzuheben, da dieses Phänomen Potenzial für die Entwicklung von Lüftungstechnischen Maßnahmen zur Emissionsminderung bietet. Die Analyse von Tagesverläufen hat ebenso gezeigt, dass mit Hilfe einer angepassten Stallklimaaufzeichnung und -steuerung Chancen für Emissionsminderungsmaßnahmen durch Begrenzung kurzzeitiger Emissionsspitzen abzuleiten sind. Der Anteil der erklärbaren Varianz der Emissionen durch einfach zu messende Größen wie Tag/Nacht, Temperaturen und Temperaturdifferenz, Volumenstrom und CO₂-Konzentration, kann in Abhängigkeit vom Messzeitraum und Haltungssystem sehr gering (< 20%), jedoch auch sehr hoch (> 70%) sein.

Einige Fragen waren im Rahmen dieser Untersuchungen und auch im Vergleich zu anderen Literaturquellen nicht abschließend zu klären. Die Begründung für deutlich geringere Konzentrationen und Emissionen frei belüfteter Ställe wird in der Regel in den meist geringeren Temperaturen gesehen. Grundlage für diese Argumentation ist die Kenntnis über den positiven Einfluss der Temperatur bei vielen Prozessen der Gasbildung und -freisetzung. Bei Messungen auf Stallebene und durch die Wechselwirkungen zum Volumenstrom ist ein eindeutiger Nachweis jedoch noch nicht gelungen.

Tab. 45: Zusammenfassung der Ergebnisse zum Vergleich der Emissionen von NH₃, CH₄ und CO₂ und verschiedener Einflussfaktoren und Randbedingungen

Haltungssystem Mastdurchgang	System VSP *				System GK *			
	MD 1	MD 2	MD 3	MD 4	MD 1	MD 2	MD 3	MD 4
NH₃-Emission Mittelwerte (gerundet) [g d ⁻¹ GV ⁻¹]	100	150	134	118	67	96	86	93
CH₄-Emission Mittelwerte (gerundet) [g d ⁻¹ GV ⁻¹]	72	83	134	69	24	28	36	18
CO₂-Emission Mittelwerte (gerundet) [kg d ⁻¹ GV ⁻¹]	17	22	19	20	11	13	11	12
Vergleich der Emissionsraten aus beiden Haltungssystemen	Emissionen durchweg geringer aus dem System GK							
Vergleich der Emissionsraten zwischen den Mastdurchgängen	meist signifikant				meist signifikant			
Vergleich mit Wertebereichen aus der Literatur für ähnliche Haltungssysteme	NH ₃ : im oberen Drittel von Literaturwerten CH ₄ : eher geringer als Literaturwerte CO ₂ : ähnlicher Wertebereich							
Vergleich der Abluftkonzentrationen	Abluftkonzentrationen im System VSP meist deutlich höher, im System GK nur geringfügig über Zuluftkonzentrationen							
Vergleich der Volumenströme	Volumenströme im System GK meist höher							
Einfluss der Temperaturdifferenz auf den Volumenstrom	negativ				wenn neben dem Einfluss der Windgeschwindigkeit nachweisbar, dann eher positiv			
Einfluss der Innenraumtemperatur auf den Volumenstrom	positiv				wenn neben dem Einfluss der Windgeschwindigkeit nachweisbar, dann eher negativ			
Vergleich der Temperaturen	Temperaturen im System GK meist deutlich geringer							
Vergleich der Verschmutzung	System GK öfter stärker verschmutzt							
Vergleich der Stallbelegung, Fütterung, Flüssigmistparameter	keine nennenswerten Unterschiede							
Einfluss der Mastdauer (zunehmenden Einzeltiergewichte bzw. Stallbelegung)	Anstieg der absoluten Emissionen pro Tier; Abfall der Emissionsraten pro GV							
Vergleich der CO₂-Emissionen pro Tier mit Schätzmodellen zur tierspezifischen CO₂-Produktion	Emissionen deutlich höher als Schätzmodelle				Wertebereich stimmt gut überein			
Korrelation zwischen NH₃- und CO₂-Emission pro Tier	positiv signifikant				positiv signifikant			
Einfluss der Außentemperatur/ Nachweis jahreszeitlicher Effekte	nicht nachweisbar				nicht nachweisbar			
Einfluss der Innenraumtemperatur auf die Emissionen pro Tier	nicht nachweisbar				nicht nachweisbar			
Einfluss steigender Volumenströme auf die Abluftkonzentrationen	negativ				positiv oder undifferenziert			
Einfluss steigender Volumenströme auf die Emissionen pro Tier	meist positiv				negativ oder undifferenziert			
Einfluss der Fütterungszeiten (Tieraktivität) und Tag/Nacht Unterschiede auf den Tagesverlauf der Emissionsraten	positiv				positiv			
* VSP = Vollspalten, Zwangslüftung	GK = Getrennte Klimabereiche, freie Lüftung							

Weiterhin ungeklärt ist die Frage der Unterschiede in den CO₂-Emissionen bzw. die Abschätzung des Anteils der tierspezifischen CO₂-Produktion im Vergleich zur CO₂-Freisetzung aus den Exkrementen und der dieses Verhältnis bestimmenden Einflussfaktoren. In diesem Zusammenhang wird teilweise auf eine hohe Korrelation der CO₂-Emissionen mit den NH₃-Emissionen verwiesen, die auch in den eigenen Untersuchungen nachvollzogen werden konnte. Ob diese jedoch tatsächlich ursächlich miteinander im Zusammenhang stehen, bleibt zunächst offen.

Eine hohe Korrelation zwischen den NH₃- und CO₂-Emissionen könnte jedoch ungeachtet dieser Unklarheiten für die Durchführung von Emissionsmessungen mit dem Ziel der Reduzierung des Messaufwandes interessant sein. Denn die Messung von CO₂-Konzentrationen ist in der Regel mit weniger Aufwand zu realisieren, da die Geräte vergleichsweise günstig und robust sind und kaum Querempfindlichkeiten zu anderen Stoffen bestehen. Durch regelmäßige Parallelmessungen der NH₃-Konzentrationen ließe sich die Beziehung zwischen CO₂ und NH₃ für den jeweiligen Stall herstellen, so dass ggf. keine kontinuierliche Messung der NH₃-Konzentrationen notwendig wäre. Diese Vorgehensweise würde es auch ermöglichen, mit nur einem NH₃-Messgerät mehrere Ställe abwechselnd zu beproben, während an den Ställen weiterhin eine kontinuierliche CO₂-Messung durchgeführt würde. Dies böte, basierend auf dem jeweiligen Zusammenhang zwischen CO₂ und NH₃ die Möglichkeit, eine gute Abschätzung der NH₃-Emissionen für die Zeiträume zwischen den tatsächlichen NH₃-Messpunkten zu treffen. Ob diese Vorgehensweise wirklich geeignet ist, müsste natürlich zunächst in entsprechenden Untersuchungen validiert werden.

5.4 Weiterführende Untersuchungen und Forschungsbedarf

Aus den umfangreichen Ergebnissen der vorliegenden Untersuchungen ergeben sich verschiedenen Ansatzpunkte und interessante Fragestellungen für weiterführende Untersuchungen und erweiterte Forschungsvorhaben:

- Wie lässt sich die Messung von Leckluftströmen vor allem in frei belüfteten Ställen und deren Quantifizierung verbessern?
- Wie lassen sich geringe N₂O-Konzentrationen und –Emissionen auf Stallenebene kontinuierlich mit einer hohen Genauigkeit erfassen und was sind die Haupteinflussfaktoren ?
- Wie lässt sich die Luftströmung im Stall, vor allem bei stark strukturierten Haltungssystemen, und deren Einfluss auf die Gasfreisetzung genauer beschreiben?
- Unter welchen Bedingungen, bei welchen (kritischen) Temperaturen, bzw. bei welchen Lüftungssystemen ist eine Volumenstromerhöhung oder Volumenstromreduzierung für eine Emissionsbegrenzung sinnvoll?

- Können die im reduzierten Regressionsmodell vorgeschlagenen Parameter als Eingangsgrößen für eine innovative Lüftungssteuerung, mit dem Ziel der Emissionsminderung und Vermeidung von kurzzeitigen Emissionsspitzen bei Gewährleistung eines adäquaten Stallklimas, genutzt werden?
- Wie hoch ist der Beitrag von verschmutzten Oberflächen zur Emission in Abhängigkeit von der Strukturierung des Stallraumes, der Temperatur und der Luftführung?
- Wie bedeutsam sind pH-Wert-Änderungen an der Flüssigmistoberfläche und an verschmutzten Oberflächen für die Höhe und Dynamik der Gasfreisetzung und lassen sich diese beeinflussen?
- Wie hoch ist der Anteil der CO₂-Freisetzung aus den Exkrementen und von welchen Faktoren wird dieser beeinflusst?
- Lassen sich aus den Kenntnissen über geringere Emissionen aus frei belüfteten Schweineställen Emissionsminderungsstrategien für zwangsbelüftete Ställe ableiten und erfolgreich umsetzen?

Hinsichtlich der Emissionen klimarelevanter Gase für verschiedene Haltungverfahren und Stallsysteme für Kälber, Bullen, Geflügel, Ferkel und Sauen, sind der Kenntnisstand und die Datenbasis derzeit noch sehr gering und bedürfen einer Ergänzung durch belastbare Daten und Messungen auf Stallebene. Weiterhin stellt sich die Frage nach der Messung und Bewertung von Emissionen bei der Außenhaltung (Ausläufe, Laufhöfe, Weide) von landwirtschaftlichen Nutztieren. Schließlich muss geprüft werden, inwieweit aktuelle Änderungen und Forderungen in den Haltungsverordnungen für landwirtschaftliche Nutztiere (Flächenangebot und Flächengestaltung, Einstreu, Beschäftigung u.a.) umweltverträglich und tiergerecht umgesetzt werden können.

6 ZUSAMMENFASSUNG

Die landwirtschaftliche Nutztierhaltung und Mastschweinehaltung, im Besonderen, wird in Bezug auf die Tier- und Umweltgerechtigkeit der Haltungsverfahren, die Nachhaltigkeit der landwirtschaftlichen Produktion und bezüglich der Verbraucherakzeptanz kontrovers diskutiert. Eine umfassende Darstellung und Auswertung des bisherigen Kenntnisstandes zu Stallklimafaktoren und Gasemissionen von Mastschweinehaltungssystemen ergab, dass bisher nur wenig belastbare und vergleichbare Daten zum einen für neuere und frei belüftete Mastschweinehaltungssysteme und zum anderen für klimarelevante Gase vorliegen. Folglich sind die Möglichkeiten für eine differenzierte Beurteilung eingeschränkt.

Hauptziel der Arbeit war es daher, einen Systemvergleich zwischen einem konventionellen, zwangsbelüfteten und einem neueren, frei belüfteten Haltungssystem für Mastschweine unter praxisnahen Bedingungen hinsichtlich der Stallklimafaktoren und Gasemissionen vorzunehmen und eine entsprechende Datenbasis anhand zeitlich hoch aufgelöster Langzeitmessungen zu erstellen.

Der Vergleich der Haltungssysteme erfolgte zeitgleich in zwei räumlich getrennten Abteilen im Versuchsstall für Mastschweine der Universität Hohenheim auf der Versuchsstation für Tierhaltung, Tierzucht und Kleintierzucht "Unterer Lindenhof". Im Rahmen der Untersuchungen diente ein praxisübliches Haltungssystem (Vollspaltenboden, sechs Kleingruppen mit je neun Tieren, Zwangslüftung - Unterflurabsaugung) als Referenzsystem. Als Vergleichssystem wurde eine Umbaulösung für zwangsbelüftete Ställe mit getrennten Klimabereichen und freier Lüftung konzipiert und im Versuchsstall realisiert. Dieses Haltungssystem zeichnete sich durch zwei größere Gruppen mit je 24 Tieren, Spaltenboden im Aktivitätsbereich und je eine planbefestigte, abgedeckte Liegefläche pro Bucht aus. Die freie Lüftung war als Schwerkraft-Schachtlüftung (drei Schächte) ausgelegt, mit der Möglichkeit zur optionalen Stützventilation mit einem Solarventilator in einem Abluftschacht. Es bestanden keine Unterschiede zwischen den Haltungssystemen bei der Fütterung (Sensor-Flüssigfütterung, nährstoffangepasste Vier-Phasen Fütterung), Beschäftigung, Entmistung und im Stallmanagement (Rein-Raus-Betrieb; gleiche Tierherkünfte).

Die für die Stallklima- und Emissionsbeurteilung relevanten Messgrößen Temperaturen, Luftfeuchten, Abluftvolumenströme, Gaskonzentrationen von NH_3 , CO_2 und CH_4 , Tieraktivität sowie Windgeschwindigkeit und -richtung, wurden mit hoher zeitlicher Auflösung erfasst. Ergänzend wurden in regelmäßigen Abständen Flüssigmistproben analysiert, Staubkonzentrationsmessungen durchgeführt sowie der Verschmutzungsgrad der Flächen, die Tiergewichte sowie Leistungs- bzw. Fütterungsdaten erhoben.

Die Eignung der Versuchsdurchführung und Empfindlichkeit des Messsystems wurde eingehend überprüft und mit wenigen Einschränkungen als sehr gut geeignet für die Messaufgabe eingestuft. Im Zuge einer konsequenten Datenkontrolle, Prüfung der Plausibilität der Datensätze und kritischen Ergebnisprüfung, wurden an Hand definierter Selektionskriterien schließlich die Datensätze ausgewählt, die für eine weitere Auswertung und den Vergleich der Haltungssysteme geeignet waren. Von insgesamt 400 Messtagen aus vier Mastdurchgängen wurden je nach Messgröße zwischen 230 bis 270 belastbare Tagesdatensätze selektiert. Eine Ausnahme stellen die Daten zu Staubkonzentrationen dar, da diese nur an je drei bis vier Terminen pro Mastdurchgang gemessen wurden, aus denen 14 belastbare Tagesdatensätze selektiert und für die weitere Auswertung übernommen wurden.

Es bestanden hinsichtlich der Stallklimafaktoren deutliche Unterschiede zwischen den Haltungssystemen "Vollspaltenboden, Zwangslüftung (VSP)" und "Getrennte Klimabereiche, freie Lüftung (GK)", die maßgeblich durch die unterschiedlichen Lüftungsprinzipien bedingt waren. Im Vergleich zum Referenzsystem VSP waren, durch die weitgehende Abhängigkeit von den Außenbedingungen, die Temperaturen im Innenraum des Systems GK geringer sowie die Luftfeuchten höher. In den abgedeckten Liegeflächen des Systems GK stand den Tieren jedoch an kalten Tagen eine Zone mit ausreichend hohen Temperaturen zur Verfügung. Die ermittelten Volumenströme bei freier Lüftung im System GK waren meist deutlich höher als im System VSP mit einer temperaturgeregelten Zwangslüftung. Sie waren stark abhängig von der Windanströmung an der Zuluftöffnung. An warmen und eher windstillen Tagen war die Zuschaltung des Solarventilators zur Stützventilation im System GK zur Gewährleistung eines adäquaten Luftaustausches notwendig.

Die Konzentrationen von NH_3 , CO_2 und CH_4 im Innenraum waren bei beiden Haltungssystemen akzeptabel, dabei im System GK geringer als im System VSP, und ließen auf einen ausreichenden Luftaustausch im Tierbereich schließen. In den abgedeckten Liegeflächen des Systems GK war die Luftqualität jedoch in Abhängigkeit von der Verschmutzung häufig unzureichend. Das Ausmaß der Verschmutzung der Liegeflächen war in Abhängigkeit von den Temperaturen (Umkehrung der Funktionsbereiche an heißen Tagen) und bei geringerer Platzausnutzung kleiner Tiere zum Teil erheblich.

Die Staubkonzentrationen (PM 10; PM 2,5; PM 1,0) im Innenraum waren im System GK bei allen Messungen um etwa zwei Drittel geringer als im System VSP. Es bestand aber in beiden Haltungssystemen eine negative Korrelation der Staubkonzentrationen mit den Volumenströmen pro Großvieheinheit. In beiden Haltungssystemen erreichten die Staubkonzentrationen während der Fütterungszeiten durch die erhöhte Tieraktivität zwei- bis sechsfach höhere Werte als zwischen den Fütterungen.

Der Vergleich der mittleren Emissionsraten von NH_3 , CO_2 und CH_4 ergab für jeden Mastdurchgang signifikante Unterschiede zwischen den Haltungssystemen mit durchweg geringeren Emissionsraten des Haltungssystems GK. Die vielfältigen dynamischen Wechselbeziehungen zwischen den verschiedenen Einflussfaktoren im komplexen System Stall zeigten sich in ebenso signifikanten Unterschieden zwischen den Mastdurchgängen innerhalb eines Haltungssystems. Anhand der Datensätze war aus diesen Gründen ein saisonaler Effekt auf die Höhe der Emissionen nicht nachweisbar.

Die Begründung für die deutlich höheren Konzentrationen und Emissionen im System VSP wird nach bisherigem Kenntnisstand in dem generell und anhaltend höheren Temperaturniveau gesehen, das nachweislich einen positiven Einfluss auf viele beteiligte Prozesse bei der Gasbildung und -freisetzung aus den Exkrementen hat. Die Emissionen im Referenzsystem VSP waren jedoch nicht untypisch höher als in vergleichbaren Stallsystemen, die in der Literatur beschrieben werden. In beiden Haltungssystemen hing die Entwicklung der Emissionen im Zeitverlauf eines Mastdurchganges vorwiegend von den Tiergewichten bzw. der Mastdauer ab. Zunehmende Tiergewichte bzw. Mastdauer bewirkten einen Anstieg der absoluten Emissionen pro Tier, jedoch eine Abnahme der Emissionsraten (pro Großvieheinheit).

Sowohl die Betrachtung der Tagesmittelwerte als auch die Analyse von charakteristischen Tagesverläufen ergab einen unterschiedlichen Einfluss des Volumenstromes auf die Abluftkonzentration bzw. Emission in beiden Haltungssystemen. Ansteigende Volumenströme resultierten im System VSP mit Zwangslüftung in einer Verringerung der Abluftkonzentration (Verdünnungseffekt) und einer Erhöhung der Emission. Im System GK waren die Beziehungen nicht immer eindeutig oder es waren gegenteilige Effekte zu beobachten. Eine Erhöhung des Volumenstromes hatte teilweise eine Erhöhung der Abluftkonzentration und Verringerung der Emission zur Folge. In beiden Haltungssystemen waren weiterhin kurzzeitige Emissionsspitzen von NH_3 und CO_2 im Tagesverlauf auf eine erhöhte Tieraktivität während der Fütterungszeiten zurückzuführen. Die Analyse von beispielhaften Tagesverläufen im Rahmen von ausgewählten Regressionsmodellen hat weiterhin gezeigt, dass eine angepasste und erweiterte Stallklimaaufzeichnung und -steuerung Potenziale zur Emissionsminderung und Begrenzung von Emissionsspitzen durch lüftungstechnische Maßnahmen aufweist.

Die im Rahmen der Langzeitmessungen gewonnenen umfangreichen Datensätze für zwei unterschiedliche Haltungssysteme, tragen zu einem besseren Verständnis des Stallklimas, der stallspezifischen Emissionen sowie der Vor- und Nachteile verschiedener Haltungs- und Lüftungssysteme bei und leisten einen wichtigen Beitrag zur Erweiterung des Kenntnisstandes.

7 SUMMARY

The agricultural animal husbandry and in particular the housing conditions for fattening pigs are controversially disputed concerning the environmentally and animal friendliness of the housing conditions, the sustainability of the agricultural production systems and with regard to the consumer demands and acceptance. A comprehensive presentation and interpretation of the state of knowledge with concern to the environment for the pigs (indoor climate) and the gas emissions of pig houses showed, that the availability and comparability of the existing data is limited. Especially little experience with and only few data for newer and, in particular, naturally ventilated housing systems in comparison with so-called conventional systems on the one hand, and climatically relevant gases such as methane and nitrous oxide on the other hand, limit the possibilities for a thorough evaluation of different housing systems.

Hence, the main goal of this work was to carry out a system comparison of two different housing systems for fattening pigs with regard to indoor climate and the gas emission and to derive a corresponding data basis in the frame of long-term measurements with a high temporal resolution.

The housing systems to be compared were a conventional stable with fully slatted floor and a conversion solution designed as a kennel housing system with natural ventilation. The system comparison of the two different housing systems for fattening pigs was carried out in two spatially separated compartments of the experimental pig facility for fattening pigs in Hohenheim. During the investigations the conventional practical housing system served as reference system and featured fully slatted floor, six small groups with nine pigs each, forced ventilation with underfloor extraction. As comparison system a conversion solution for forced ventilated pig houses was developed and realized. It was designed as a kennel housing system with separate climatic areas and with natural ventilation. The kennel housing system consisted of two larger animal groups with 24 pigs each, it showed slatted floor at the activity area and a level concrete covered lying area for resting. The natural ventilation system in the kennel housing system was designed as a gravity shaft system with an additional, solar-powered fan in one chimney for optional supporting ventilation. No differences between the housing systems existed concerning feeding (sensor liquid feeding, four-phases nutrient adjusted feeding), occupation, demanuring, stocking management (all in - all out) and the animals origin.

The relevant measuring parameters for evaluating the indoor climate and gas emissions as temperature, humidity, ventilation rate, gas concentrations (NH_3 , CO_2 , CH_4), animal activity, wind speed and wind direction were registered with a high temporal resolution.

In addition at regular intervals also manure samples were analysed, dust concentration measurements were carried out as well as data concerning the floor soiling, the animal weight, weight gain and feed conversion ratio were documented.

The experimental lay-out and measuring concept were carefully examined and were only with little reservations proven to be very suitable for the measuring task. As a result of a consequent data control, plausibility check and critical evaluation of the measurement values with help of defined selection criteria, only those data sets were selected, which were suitable for further data processing and the comparison of the two different housing systems. All in all about 230 to 270 reliable daily data sets were selected out of 400 measuring days of four fattening periods. The dust measurements were only carried out during three to four dates per fattening period, thus only 14 reliable daily data sets were available.

Between the housing systems "fully slatted floor, forced ventilation (FSF)" and "kennel housing, natural ventilation (KN)" a clear difference existed concerning the indoor climate mainly due to the different ventilation systems. In comparison to the forced ventilated reference system FSF, the KN housing system showed a lower indoor temperature and a higher relative humidity. But inside the kennels, especially during cold surrounding conditions, the pigs found an appropriate warm resting area. The air flow rates of the natural ventilation of system KN were most of the time clearly higher than the values achieved by the temperature controlled forced ventilation at system FSF. The air exchange achieved by the natural ventilation of system KN was highly dependent on the wind conditions at the inlet air opening. During warm and windless days it was necessary to switch on the additional solar fan for supporting ventilation to ensure an adequate air exchange.

At both housing systems the indoor concentrations of NH_3 , CO_2 and CH_4 were acceptable, but at the same time lower at system KN than at system FSF, so it can be concluded, that the air exchange in the animals area was sufficient. Inside the kennels of the system KN the air quality was strongly dependent on the soiling with animals' droppings, especially during warm days, when the pigs tend to switch the functional areas. Depending on the temperature and given the lower resting area requirements of the younger animals, some of the covered resting areas were heavily soiled.

The indoor dust concentrations (PM 10; PM 2,5; PM 1,0) were during all measurements about two third lower at system KN than at system FSF. For all data sets a negative correlation between dust concentration and air flow rate per livestock unit LU (500 kg live weight) was determined. At both housing systems the dust concentrations during feeding were due to the increased animal activity two to six times higher than between the feeding times.

Comparing the mean emission rates of NH_3 , CO_2 und CH_4 , significant differences between the housing systems with entirely lower emission rates of the natural ventilated system KN were found during all four fattening periods under investigation. Due to manifold dynamic interrelations between the different influencing factors on the emissions at such complex systems as animal houses, also significant differences between the fattening periods within one housing systems were found. Therefore a seasonal effect on the emissions could not be proven on basis of the gained data sets.

Higher concentrations and emissions at the forced ventilated system FSF are due to the state of knowledge, normally explained by the higher temperatures inside the room, which promote many processes during gas formation and gas release from manure. However, the emission at the system FSF were not untypical higher than reported from literature for comparable housing systems. At both housing systems the course of the emissions showed a clear relation to the increasing fattening duration respectively animal weights. The absolute emissions per pig also increased whereas the emission rates per livestock unit (LU) decreased.

Considering both the daily mean values and typical daily courses of the gas emissions, different relationships between air flow rate, exhaust air concentration and emission were found between the two housing systems. At the forced ventilated housing system FSF as a result of increasing air flow rates the exhaust air concentrations were lowered (diluting effect) but the emissions raised up. At the natural ventilated housing system KN the relations were not always clear or opposite effects were observed. Increasing air flow rates resulted partly in just as increased exhaust air concentrations but following lower emissions. At both housing systems short emissions peaks of NH_3 and CO_2 can be explained by an increased animal activity during feeding. The analysis of exemplary daily courses within well chosen regression models showed, that an adjusted stall climate recording and –control offers opportunities for emission mitigation strategies by cutting of short term emission peaks for example.

The extensive data sets gained from long term measurements for two different housing systems for fattening pigs with different ventilation strategies are considered to be an important contribution to a better understanding of the indoor climate, the emissions from animal houses, the advantages and disadvantages of various housing and ventilation systems and to the extension of the state of knowledge.

8 LITERATUR

- AARNINK, A.J.A. (1997): Ammonia emission from houses for growing pigs as affected by pen design, indoor climate and behaviour. Dissertation Landbouwniversiteit Wageningen, ISSN 90-5485-662-9
- AARNINK A.J.A., E.N.J. VAN OUWERKERK & M.W.A. VERSTEGEN (1992): A mathematical model for estimating the amount and composition of pig slurry from fattening pigs. *Livestock Production Science* 31, pp. 133/147
- AARNINK, A.J.A., P.F.M.M. ROELOFS, H. ELLEN & H. GUNNIK (1999): Dust Sources in Animal Houses. In: Proceedings of the International Symposium "Dust Control in Animal Production Facilities", Danish Institute of Agricultural Sciences, Research Centre Bygholm, 8700 Horsens Denmark (Eds.), pp. 34/40, ISBN 87-88976-35-1
- AARNINK, A.J.A., J.W. SCHRAMA, R.J.E. VERHEIJEN & J. STEFANOWSKA (2001): Pen Fouling in Pig Houses Affected by Temperature. In: Proceedings of the 6th International Symposium Livestock Environment VI, 21-23 Mai, Louisville, Kentucky, USA, ASAE St. Joseph, Michigan, pp. 180/186
- AEL (Arbeitsgemeinschaft für Elektrizitätsanwendung in der Landwirtschaft e.V.) (1998): Berechnungs- und Planungsgrundlagen für das Klima in Ställen. AEL-Schriftenreihe Heft 17, Hrsg: AEL, Frankfurt
- AHLGRIMM, H.-J.(1995): Beitrag der Landwirtschaft zur Emission klimarelevanter Spurengase – Möglichkeiten zur Reduktion? *Landbauforschung Völkenrode* 45, Nr. 4, S. 191/204
- AHLGRIMM, H.-J. (1998): Emissions of Climate Gases from Agriculture – Possibilities for Reduction? International Conference on Agricultural Engineering, Oslo, Norwegen, Paper-No. 98-E-018
- AHLGRIMM, H.-J. & J. BREFORD (1998): Methanemissionen aus der Schweinemast. *Landbauforschung Völkenrode*, Nr. 1, S. 26/34
- AHLGRIMM, H.-J., J. BREFORD & W. ASENDORF (2000): Methane and Nitrous Oxide Emissions from different Forms of Pig Fattening. International Conference on Agricultural Engineering, Warwick, England, Paper-No. 00-AP-032
- AHLGRIMM, H.-J., J. BREFORD & W. ASENDORF (2002): Methane and Nitrous Oxide Emissions from different Forms of Pig Fattening. International Conference on Agricultural Engineering, Budapest, Hungary, Paper-No. 02-SE-061
- AMON, B. (1998): NH₃-, N₂O- und CH₄-Emissionen aus der Festmistanbindehaltung für Milchvieh, Stall - Lagerung - Ausbringung. Forschungsbericht Agrartechnik, VDI-MEG Schrift 331, Dissertation Universität für Bodenkultur, Wien, ISSN 0931-6264

- AMON, B., T. AMON & J. BOXBERGER (1998): Untersuchungen der Ammoniakemissionen in der Landwirtschaft Österreichs zur Ermittlung der Reduktionspotentiale und Reduktionsmöglichkeiten. Forschungsprojekt Nr. L 883/94, Institut für Land-, Umwelt und Energietechnik der Universität für Bodenkultur, Wien
- ANDERSON, G.A., R.J. SMITH, D.S. BUNDY & E.G. HAMMOND (1987): Model to predict gaseous contaminants in swine confinement buildings. *J. Agric. Engng Res.* (37), pp. 235/253, zitiert in Ni (1998)
- AROGO, J., R.H. ZHANG, G.L. RISKOWSKI, L.L. CHRISTIANSON & D.L. DAY (1999): Mass Transfer Coefficient of Ammonia in Liquid Swine Manure and Aqueous Solutions. *J. Agric. Engng Res.* (73), pp. 77/86
- AROGO, J., P.W. WESTERMAN, A.J. HEBER, W.P. ROBARGE & J.J. CLASSEN (2001): Ammonia in Animal Production - A Review. ASAE Annual International Meeting, Sacramento, California, USA, 30.07. - 01.08.2001, Paper-No. 01-4089, ASAE St. Joseph, Michigan
- ASMAN, W.A.H. (1992): Ammonia emission in Europe: Updated emission and emission variations. Report no. 228471008, National Institute of Public Health and Environmental Protection, Bilthoven, Niederlande
- ATTWOOD, P., R. BROUWER, P. RUIGEWAARD, P. VERSLOOT, R. DE WIT, D. HEEDERICK & J.S.M. BOLEIJ (1987): A Study of the Relationship Between Airborne Contaminants and Environmental Factors in Dutch Swine Confinement Buildings. *Am. Ind. Hyg. Assoc. J.* (48), pp. 743/744
- BANHAZI, T. & C. CARGILL (1999): Survey of Pig Sheds in Australia - Preliminary Results. In: Proceedings of the International Symposium "Dust Control in Animal Production Facilities", Danish Institute of Agricultural Sciences, Research Centre Bygholm, 8700 Horsens Denmark (Eds.), ISBN 87-88976-35-1, pp. 76/82
- BARBER, E.M. & J.R. OGILVIE (1984): Interpretation of tracer gas experiments in ventilation research. *J. agric. Engng Res.* (30), pp. 57/63
- BARTUSSEK, H., A. STEINWIDDER, A. HAUSLEITNER, J. GASTEINER, A. SCHAUER & T. GUGGENBERGER (2001): Die Auswirkung schlechter Stallluft als Folge geringer Luftraten auf Mastleistung und Gesundheit von Mastschweinen. Tagungsband 5. Internationale Tagung „Bau, Technik und Umwelt in der landwirtschaftlichen Nutztierhaltung“, 6./7. März 2001, Universität Hohenheim, Institut für Agrartechnik, S. 320/325, ISBN 3-9805559-5-X
- BATEL, W. (1977): Geruchsstoff-, Staub- und Lärmbelastung in Anlagen der Tierproduktion, gemessen im Verlauf eines Jahres - Zweiter Bericht. *Grundl. Landtechnik* Bd. 27, Nr. 3, S. 83/87
- BAUER, W. (1994): Zusammenhang von Tierverhalten und Stallluftzustand. *Tierärztl. Umschau* (49), S. 38/42
- BAUMBACH, G. (1990): Luftreinhaltung. Entstehung, Ausbreitung und Wirkung von Luftverunreinigungen - Meßtechnik, Emissionsminderung und Vorschriften. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New-York, ISBN 3-540-52677-3

- BEA, W. (2003): Vergleich von zwei Haltungssystemen für Mastschweine mit unterschiedlichen Lüftungsprinzipien - Beurteilung der Tiergerechtigkeit. Dissertation Universität Hohenheim, in Vorbereitung
- BEESE (1994): Studie D: Gasförmige Stickstoffverbindungen - Stickoxide und Distickstoffoxide. In: Enquete-Kommission "Schutz der Erdatmosphäre" (Hrsg.), Studienprogramm Landwirtschaft, Economica-Verlag, Bonn, zitiert in NIEBAUM (2001); VAN DEN WEGHE (1995)
- BEESE, F., R. BRUMME, H. SCHULTE-BISPING & R. TEEPE (2002): Spurengashaushalte von Waldökosystemen. Schriftenreihe agrarspectrum Band 34 "Umweltrelevante Spurengase in der Land- und Forstwirtschaft: Herausforderungen für Wissenschaft, Politik und Praxis", Hrsg.: Vorstand des Dachverbandes Agrarforschung, VerlagsUnionAgrar, Frankfurt-München-Münster, S. 53/63
- BENNDORF, R.: (2001): Klimarelevante Wirkungen von Lachgas und Methan. KTBL-UBA Symposium – Emissionen der Tierhaltung und Beste Verfügbare Techniken zur Emissionsminderung, Bildungszentrum Banz, 03./05.12.2001, Vorabversion der Beiträge, KTBL-Schrift 406, in Druck
- BERCKMANS, D., J. NI, J. COENEGRACHTS & E. VRANKEN (1994): Influence of the control of the ventilation rate on ammonia emission in a pig house. ASAE International Winter Meeting, Atlanta, Georgia, USA, 13-16 December 1994, paper no. 944589, ASAE St. Joseph, Michigan, USA
- BERG, W. & G. HÖRNIG (1998): New Measures to Reduce Emissions from Animal Husbandry and their Assessment. International Conference on Agricultural Engineering AgEng Oslo, Norwegen, Paper-No. 98-E-047
- BEURSKENS-VOERMANS, M.P. & C.C.R. VAN DER KAA (1997): Lowering ammonia emission by cooling down the manure of weaned piglets. In: Research Reports 1997, Research Institute of Pig Husbandry, Rosmalen, Niederlande (Ed.), ISSN 1385-5883, p. 33
- BlMSCHG (2001): Gesetz zum Schutz vor schädlichen Umwelteinwirkungen durch Luftverunreinigungen, Geräusche, Erschütterungen und ähnliche Vorgänge ("Bundesimmissionsschutzgesetz") in der Fassung vom 14. Mai 1990 (BGBl. I, S. 880), zuletzt geändert durch Art. 1 des Gesetzes vom 09. September 2001 (BGBl. I, S. 2331), zitiert in UBA, 2001c
- BJERG, B., K. SVIDT, G. ZHANG & S. MORSING (2000): The Effects of Pen Partitions at Thermal Pig Simulators on Airflow in a Livestock Test Room. J. agric. Engng Res. (77), 3, pp. 317/326
- BOHL, W. (1994): Technische Strömungslehre. 10. Auflage, Vogel Verlag, Würzburg
- BÖHM, R., T. KAPR, H.U. SCHMITT, J. ALBRECHT & P. WIESER (1985): Application of the laser microbe mass analyser (LAMMA) to the differentiation of single bacterial cells. J. Anal. Appl. Pyrol., 8, 449f, zitiert in HARTUNG, E. (2002)
- BOLLWAHN, W. (1981): Krankheit und Leistungsminderung durch Haltungsfehler. SUS-Schweinezucht und Schweinemast 29, 9, S. 314/318, zitiert in MAYER (1999)

- BÖNSCH, S. & S. HOY (1996): Untersuchungen der Schwebstaubkonzentration bei Tiefstreuhaltung unter Berücksichtigung der Aktivität von Mastschweinen und bei Anwendung einer Aerosolapplikation. Berl. Münch. Tierärztl. Wschr. (109), H. 10, S. 388/391
- BOTTCHER, R.W., R.D. MUNILLA, K.M. KEENER, K.E. PARBST & G.L. VAN WICKLEN (1999): Windbreak Walls and Wet Scrubbers for Reducing Odourous Dust Emissions from Tunnel Ventilated Swine Buildings. In: Proceedings of the International Symposium on Dust Control in Animal Production Facilities, 30.5.-2.6.1999, Aarhus, Denmark, Research Centre Bygholm, P.O. Box 536, DK-8700 Horsens, ISBN 87-88976-35-1, pp. 186/193
- BOXBERGER, J., H. EICHHORN & H. SEUFERT (1994): Stallmist fest und flüssig - Entmisten, Lagern, Ausbringen. Hrsg.: Bundesverband der Deutschen Zementindustrie, Köln, 2. überarb. und erw. Auflage, Beton-Verlag, Düsseldorf, ISBN 3-7640-0324-3
- BREHME, G. (1997): Modellierung des Ausbreitungsverhaltens und Quantifizierung der gasförmigen Emissionen in einem einstreulosen Mastschweinstall mit freier Lüftung. Diplomarbeit des Fachbereiches Agrarwissenschaften der Universität Göttingen, zitiert in NIEBAUM (2001)
- BREHME, G. (2001): Örtliche und zeitliche Probenahme. In: Messmethoden für Ammoniak-Emissionen aus der Tierhaltung. KTBL-Schrift 401, ISBN 3-7843-2130-5, S. 26/36
- BREUM, N.O., H. TAKAI & H.B. ROM (1990): Upward vs. Downward Ventilation Air Flow in a Swine House. Transactions of the ASAE (33), 5, pp. 1693/1699
- BROSE, G. (2000): Emission von klimarelevanten Gasen, Ammoniak und Geruch aus einem Milchviehstall mit Schwerkraftlüftung. Forschungsbericht Agrartechnik VDI-MEG Schrift 362, Dissertation Universität Hohenheim, ISSN 0931-6264
- BRUNSCH, R., O. KAUFMANN & S. GURK (1995): Ergebnisse von Analysen gasförmiger Emissionen aus Tierhaltungen. Agrartechnische Forschung (1), H. 1, S. 73/83
- BÜHL, A. & P. ZÖFEL (1999): SPSS Version 8. Eine Einführung in die moderne Datenanalyse unter Windows. Fünfte überarbeitete und erweiterte Auflage, Addison-Wesley-Longman Verlag, ISBN 3-8273-1432-1
- BUIJSMAN, E., H.F.M. MAAS & W.A.H. ASMAN (1987): Anthropogenic NH₃ emissions in Europe. Atmospheric Environment 21, 5, p. 1009-1022
- BUNDESGESETZBLATT (2001): Gesetz zur Umsetzung der UVP-Änderungsrichtlinie, der IVU-Richtlinie und weiterer EG-Richtlinien zum Umweltschutz. BGBl. I Nr. 40, ausgegeben zu Bonn am 02. August 2001, S. 1950
- BUNDY, D.S. (1984): Rate of dust decay as affected by relative humidity, ionisation and air movement. Transactions of the ASAE, 27, 3, pp. 865/870
- BÜSCHER, W. (1992): Experimentelle Untersuchungen zur Luftführung in Stallanlagen. Dissertation Universität Bonn, Bericht 15 der Arbeitsgemeinschaft für Elektrizitätsanwendung in der Landwirtschaft (AEL) e.V., Essen

- BÜSCHER, W. (1996): Ammoniakfreisetzung aus zwangsbelüfteten Stallanlagen mit Flüssigentmischung – Ansätze zu deren Reduzierung. Habilitationsschrift, November 1996, Agrartechnische Berichte, Institut für Agrartechnik und Landesanstalt für landwirtschaftliches Maschinen- und Bauwesen, Universität Hohenheim, 70593 Stuttgart
- BÜSCHER, W., S. NESER & A. GRONAUER (2001): Messmethoden zur Luftvolumenstrombestimmung in zwangsbelüfteten Ställen. In: Messmethoden für Ammoniak-Emissionen aus der Tierhaltung. KTBL-Schrift 401, ISBN 3-7843-2130-5, S. 110/111
- BUSSE, F.-W. (1993): Comparison measurements of the house climate in swine stables with and without respiratory diseases or cannibalism. In: 4th International Symposium of Livestock Environment, Collins, E. and C. Boon (Eds.), 6-9 July, University of Warwick, England, ASAE St. Joseph, Michigan, USA, pp. 904/908
- BVET (Bundesamt für Veterinärwesen) (1998): Richtlinien für die Haltung von Schweinen. Richtlinie 800.106.03 (3) Tierschutz, Bern, Schweiz, zitiert in MAYER (1999)
- CARTON, O.T. & H. TUNNEY (1990): Policy for ammonia emissions in Ireland. In: Odour and ammonia emissions from livestock farming. Elsevier Applied science; London and New York, pp. 166/168, zitiert in NIEBAUM (2001)
- CHILDERS, J.W., E.L. THOMPSON, D.B. HARRIS, D.A. KIRCHGESSNER, M. CLAYTON, D.F. NATSCHKE & W.J. PHILLIPS (2001): Multi-pollutant concentration measurement around a concentrated swine production facility using open-path FTIR spectrometry. Atmospheric Environment (35), pp. 1923/1936
- CHIUMENTI, R. L. DONANTONI & S. GUERCINI (1989): Natural versus mechanical ventilation: A comparison study between two fattening piggeries carried out in summer. Land and Water Use, pp. 1321/1329, ISBN 90-6191-980-0
- CHRISTIANSON, S.K., S.P. LEMAY, C. LAGUE, J.F. PATIENCE & E.M. BARBER (2002): Moisture Production from Grower-finisher Pigs - Field Measurements Compared with Theoretical Values. ASAE Annual Meeting/CIGR XV the World Congress, 28.-31.07.2002, Chicago, USA, Paper-No. 024183, ASAE, St. Joseph, Michigan, USA
- CIGR (Commission International du Génie Rural) (1994): Aerial Environment in Animal Housing. Concentrations in and Emissions from Farm Buildings. Report of the CIGR Working Group No. 13: Climatization and Environmental Control in Animal Housing. CIGR Working Group Report Series No. 94.1, zitiert in NIEBAUM (2001) und PEDERSEN et al. (2000)
- CIGR (Commission International du Génie Rural) (1999): Environment for Animals. In: CIGR Handbook of Agricultural Engineering, Volume II, Part I, Ed. CIGR, ASAE St. Joseph, Michigan, USA, pp. 31/54
- CIGR (Commission International du Génie Rural) (2002): Draft of the 4th Report of Working Group 13 on Climatization of Animal Houses - Heat and moisture production on animal and house level. Ed. S. Pedersen, July 2002, pp. 1/42

- CLEMENS, J. & H.-J. AHLGRIMM (2001): Greenhouse gases from animal husbandry: mitigation options. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 60, pp. 287/300
- CLEMENS, J., M. WOLTER, S. WULF & H.-J. AHLGRIMM (2001): Lachgas- und Methan-Emissionen bei der Lagerung und Ausbringung von Wirtschaftsdüngern. KTBL-UBA Symposium – Emissionen der Tierhaltung und Beste Verfügbare Techniken zur Emissionsminderung, Bildungszentrum Banz, 03./05.12.2001, Vorabversion der Beiträge, KTBL-Schrift 406, in Druck
- COLE, D.J.A. (1996): Warum schlechte Stallluft den Schweinen schadet. *SUS-Schweinezucht und Schweinemast* 3, S. 13, zitiert in MAYER (1999)
- COMBERG, G. & H.-F. WOLFERMANN (1964): Der Kohlendioxyd-, Ammoniak und Schwefelwasserstoffgehalt der Stallluft von Rinder und Schweineställen mit Gitterrost und Spaltenboden. In: *Berichte über Stallklimafaktoren - Wärme, Feuchte, Gaskonzentrationen*, ALB-Bericht Nr. 22, ALB Frankfurt/Main (Hrsg.), S. 19/25
- CRUTZEN, P.J., I. ASELMANN & W. SEILER (1986): Methane production by domestic animals, wild ruminants, other herbivorous fauna and humans. *Tellus*, 38B, pp. 271/284
- CURTIS, S.E. (1983): *Environment Management in Animal Agriculture*. Iowa State University Press, Ames, Iowa, USA, 409 pp, zitiert in VAN OUWERKERK & PEDERSEN (1994)
- DÄMMGEN, U. (2002): Fine particles and their constituents in Germany - results of denuder filter measurements. *Landbauforschung Völkenrode, Sonderheft* 235, pp. 181/188
- DÄMMGEN, U. & J.-W. ERISMAN (2001): Transmission und Deposition von Ammoniak und Ammonium. KTBL-UBA Symposium – Emissionen der Tierhaltung und Beste Verfügbare Techniken zur Emissionsminderung, Bildungszentrum Banz, 03./05.12.2001, Vorabversion der Beiträge, KTBL-Schrift 406, in Druck
- DÄMMGEN, U. & M. LÜTTICH (2002): Spurengasemissionen aus der deutschen Tierhaltung. *Schriftenreihe agrarspectrum Band 34 "Umweltrelevante Spurengase in der Land- und Forstwirtschaft: Herausforderungen für Wissenschaft, Politik und Praxis"*, Hrsg.: Vorstand des Dachverbandes Agrarforschung, Verlags-UnionAgrar, Frankfurt-München-Münster, S. 39/52
- DANISH INSTITUTE OF AGRICULTURAL SCIENCES (ED.) (1999): *Proceedings of the International Symposium on Dust Control in Animal Production Facilities*, 30.5.-2.6.1999, Aarhus, Denmark, Research Centre Bygholm, P.O. Box 536, DK-8700 Horsens, ISBN 87-88976-35-1
- DAWSON, J. (1991): Reducing Dust in Livestock Buildings. *Farm Building & Engineering* (8), 1, pp. 36/38
- DE PRAETERE, K. & W. VAN DER BIEST (1989): Airflow patterns and their relation to ammonia distribution. *Land and Water Use*, Dodd & Grace (Eds), Balkema, Rotterdam, pp. 1457/1464

- DE SAEGER, E. (1999): Concept of quality assurance and establishment of reference methods for the implementation of EU air quality directives. In: Neuere Entwicklungen bei der Messung und Beurteilung der Luftqualität. Internationales Kolloquium, 27. - 29. 4.1999, VDI-Berichte Nr. 1443, pp. 29/37
- DEMMERS, T. (2002): Production and disease effects of dust and ammonia on the weaner pig. Landbauforschung Völkenrode, Sonderheft 235, pp. 129/138
- DEMMERS, T.G.M., V.R. PHILLIPS, L.S. SHORT, L.R. BURGESS, R.P. HOXEY & C.M. WATHES (1997): Validation of ventilation rate measurement methods and the ammonia emission from a naturally ventilated animal UK dairy and beef unit. In: Proceedings of the International Symposium "Ammonia and Odour Control from Animal Production Facilities", EurAgEng, Vinkeloord, The Netherlands, 6.-10.10.1997, pp. 219/230
- DEMMERS T.G.M., L.R. BURGESS, J.L. SHORT, V.R. PHILLIPS, J.A. CLARK & C.M. WATHES (1998): First experiments with methods to measure ammonia emissions from naturally ventilated cattle buildings in the U.K. Atmospheric Environment (32), pp. 285/293
- DEMMERS T.G.M., L.R. BURGESS, V.R. PHILLIPS, J.A. CLARK & C.M. WATHES (2000): Assessment of techniques for measuring the ventilation rate, using an experimental building section. J. agric. Engng Res. (76), pp. 71/81
- DEN BROK, G.M. & N. VERDOES (1997): Slurry cooling to reduce ammonia emission from pig houses. In: Proceedings of the International Symposium on Ammonia and Odour Control from Animal Production Facilities, Volume 2, Vinkeloord, The Netherlands, pp. 441/447
- DEN BROK, G.M., J.G.L. HENDRIKS, M.G.M. VRIELINK & C.M.C. VAN DER PEET-SCHWERING (1997a): Urinary pH, ammonia emission and performance of fattening pigs, after the addition of a mixture of organic acids, mainly benzoic acid, to the feed. In: Research Reports 1997, Research Institute of Pig Husbandry, Rosmalen, Niederlande (Ed.), ISSN 1385-5883, pp. 29/30
- DEN BROK, G.M., M.G.M. VRIELINK, M.P. BEURSKENS & C.E.P. VAN BRAKEL (1997b): Ammonia emission and costs of a few housing systems. In: Research Reports 1997, Research Institute of Pig Husbandry, Rosmalen, Niederlande (Ed.), ISSN 1385-5883, p. 18
- DFG (DEUTSCHE FORSCHUNGSGEMEINSCHAFT) (1998): MAK- und BAT-Werte Liste. Deutsche Forschungsgemeinschaft und Senatskommission zur Prüfung gesundheitsschädlicher Arbeitsstoffe. Pressereferat der Deutschen Forschungsgemeinschaft, Bonn
- DFG (DEUTSCHE FORSCHUNGSGEMEINSCHAFT) (1999): Mitteilung der Senatskommission zur Prüfung gesundheitsschädlicher Arbeitsstoffe (MAK- und BAT-Werte-Liste), VCH Verlagsgesellschaft mbH, Weinheim
- DIN 18 910 (1992): Wärmeschutz geschlossener Ställe. Wärmedämmung und Lüftung, Planungs- und Berechnungsgrundlagen. Beuth Verlag, Berlin, Mai 1992

- DÖHLER, H. (2001): Gute fachliche Praxis der Ammoniak-Emissionsminderung in der Tier- und Pflanzenproduktion. KTBL-UBA Symposium – Emissionen der Tierhaltung und Beste Verfügbare Techniken zur Emissionsminderung, Bildungszentrum Banz, 03./05.12.2001, Vorabversion der Beiträge, KTBL-Schrift 406, in Druck
- DONHAM, K.J. (1993): Respiratory disease hazards to workers in livestock and poultry confined structures. *Sem. Respir. Med.*, 14, pp. 49/59
- DONHAM, K.J. & D. CUMRO (1999): Setting Maximum Dust Exposure Levels for People and Animals in Livestock Facilities. In: *Proceedings of the International Symposium on Dust Control in Animal Production Facilities*, 30.5.-2.6.1999, Aarhus, Denmark, Research Centre Bygholm, P.O. Box 536, DK-8700 Horsens, ISBN 87-88976-35-1, pp. 93/110
- DONHAM, K.J., J. YEGGY & R.R. DAGUE (1988): Production Rates of Toxic Gases from Liquid Swine Manure: Health Implications for Workers and Animals in Swine Confinement Buildings. *Biological Wastes* (24), pp. 161/173
- EG (EUROPÄISCHE GEMEINSCHAFT) (1996): Richtlinie 96/61/EG des Rates vom 27. September 1996 über die integrierte Vermeidung und Verminderung der Umweltverschmutzung ("IVU-Richtlinie"). *Amtsblatt Nr. L 257 vom 10.10.1996*, S. 26/40, zitiert in UBA (2001b)
- EG (EUROPÄISCHE GEMEINSCHAFT) (2000): Proposal for a Directive of the European Parliament and of the Council on national emission ceilings for certain atmospheric pollutants. (2000/C 56/E 10), vom 29.02.2000. *Official Journal of the European Communities*, C 56/34-39, zitiert in UBA (2001b)
- EN (EUROPÄISCHE NORM) (1993): DIN/EN 481. Arbeitsplatzatmosphäre: Festlegung der Teilchengrößenverteilung zur Messung luftgetragener Partikel. Deutsche Fassung EN 481: 1993. Beuth Verlag, Bonn
- EU (EUROPÄISCHE UNION) (1998): Proposal for a council directive relating to limit values for sulphur dioxide, oxides of nitrogen, particulate matter and lead in ambient air. DG I 9687/98, 6th July 1998
- FEDDES, J.J.R. & J.A. DE SHAZER (1998): Feed consumption as a parameter for establishing minimum ventilation rates. *Transactions of the ASAE*, Vol. 31, 2, pp. 571/575, zitiert in Ni (1998), NIEBAUM (2001)
- FINGER, T. (1999): Methanbildung beim Wiederkäuer nach Zulage teilgeschützter Fette in vitro und in vivo. Dissertation Universität Hohenheim, Institut für Tierernährung
- FLESSA, H. (2002): Acker- und Grünlandflächen als Quellen und Senken klimarelevanter Spurengase. *Schriftenreihe agrarspectrum Band 34 "Umweltrelevante Spurengase in der Land- und Forstwirtschaft: Herausforderungen für Wissenschaft, Politik und Praxis"*, Hrsg.: Vorstand des Dachverbandes Agrarforschung, VerlagsUnionAgrar, Frankfurt-München-Münster, S. 26/38

- FREIBAUER, A. & M. KALTSCHMITT (Hrsg.) (2001): Biogenic Greenhouse Gas Emissions from Agriculture in Europe. European Summary Report (Project Report Task 3) of the EU Concerted Action FAIR3-CT96-1877, Forschungsbericht Band 78, Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung (IER), Universität Stuttgart, ISSN 0938-1228
- FRENEY, J.R., J.R. SIMPSON & O.T. DENMEAD (1983): Volatilization of ammonia. In: Gaseous loss of nitrogen from plant-soil systems, developments in plant and soil science (9), Hrsg.: Freney, J.R. & J.R. Simpson, Martinus Nijhoff Publishers, Dordrecht (Niederlande), pp. 1/33
- GALLMANN, E., W. BEA & E. HARTUNG (2000): Umbaulösung für Vollspaltenstall. Landtechnik (55), 3, S. 252/253
- GRIMM, E. & H. DÖHLER (2002): Anforderungen steigen weiter. DLG-Mitteilungen 5, S. 24/26
- GRIMM, E. & W. ECKHOF (2002): Assessment of immission of dust and micro-organismen as part of permitting procedures for livestock management installations - legal basis and methods. Landbauforschung Völkenrode, Sonderheft 235, pp. 7/19
- GROENESTEIN, C.M. & J.H.W. HUIS IN 'T VELD (1996): Praktijkonderzoek naar de ammoniakemissie van stallen XXVII. IMAG-DLO Wageningen, The Netherlands, Rapport 96-1003, zitiert in HILHORST et al. (2001)
- GROENESTEIN, C.M. & H.H. VAN FAASSEN (1996): Volatilization of Ammonia, Nitrous Oxide and Nitric Oxide in Deep-litter Systems for Fattening Pigs. J. agric. Engng Res. (65), pp. 269/274
- GROOT KOERKAMP, P.W.G. & G.H. UENK (1997): Climatic Conditions and Aerial Pollutants in and Emissions from Commercial Animal Production Systems in the Netherlands. In: Proceedings of the International Symposium "Ammonia and Odour Control from Animal Production Facilities" Vol. 1, 6.-10. October 1997, J.A.M. Voermans & G.J. Monteny (Eds.), ISBN 90-9011059-3, pp. 139/144
- GROOT KOERKAMP, P.W.G., J.H.M. METZ, G.H. UENK, V.R. PHILLIPS, M.R. HOLDEN, R.W. SNEATH, J.L. SHORT, R.P. WHITE, J. HARTUNG, J. SEEDORF, M. SCHRÖDER, K.H. LINKERT, S. PEDERSEN, H. TAKAI, J.O. JOHNSEN & C.M. WATHES (1998): Concentrations and Emissions of Ammonia in Livestock Buildings in Northern Europe. J. agric. Engng Res. (70), pp. 79/95
- GUARINO, M. & P. NAVAROTTO (1999): Dustiness in a Piggery: a New System to Reduce Airborne Particles. In: Proceedings of the International Symposium "Dust Control in Animal Production Facilities", Danish Institute of Agricultural Sciences, Research Centre Bygholm, 8700 Horsens Denmark (Eds.), ISBN 87-88976-35-1, pp. 343/349
- GUINGAND, N. (1999): Dust Concentrations in Piggeries: Influence of Season, Age of Pigs, Type of Floor and Feed Presentation in Farrowing, Post-Weaning and Finishing Rooms. In: Proceedings of the International Symposium "Dust Control in Animal Production Facilities", Danish Institute of Agricultural Sciences, Research Centre Bygholm, 8700 Horsens Denmark (Eds.), ISBN 87-88976-35-1; pp. 69/75

- GUSTAFSSON, G. (1987): Reduction of ammonia in swine houses. Latest Developments in Livestock Housing. Sem. of the 2nd Technical Section of the CIGR, Illinois, S. 9/22
- GUSTAFSSON, G. (1994): Efficiency of different dust reducing methods in pig houses. In: Proceedings of the XII World Congress on Agricultural Engineering, 29.8.-1.9.1994, Milano, Italy, Volume 1, pp. 551/558
- GUSTAFSSON, G. (1999a): Factors affecting the Release and Concentration of Dust in Pig Houses. J. agric. Engng Res. (74), pp. 379/390
- GUSTAFSSON, G. (1999b): Measures against Dust in Pig Houses. In: Proceedings of the International Symposium "Dust Control in Animal Production Facilities", Danish Institute of Agricultural Sciences, Research Centre Bygholm, 8700 Horsens Denmark (Eds.), ISBN 87-88976-35-1, pp. 244/252
- HAHNE, J., D. HESSE & K.-D. VORLOP (1999): Spurengasemissionen aus der Mast-schweinehaltung. Landtechnik (54), 3, S. 180/181
- HALTER, H.M., C. WENK & A. SCHÜRCH (1980): Effect of feeding level and feed composition on energy utilisation, physical activity and growth performance of piglets. In: L.E. Mount (Ed.), Studies in Agricultural and Food Science, Butterworths, London, pp. 395/398, zitiert in VAN OUWERKERK & PEDERSEN (1994)
- HAMMOND, E.G., C. FEDLER & G. JUNK (1975): Identification of Dust-Borne Odours on Swine Confinement Facilities. Transactions of the ASAE, pp. 1186/1189
- HARDWIGER-FANGMEIER, A., A. FANGMEIER & H.-J. JÄGER (1994): Ammoniak in der bodennahen Atmosphäre - Emissionen, Immissionen und Auswirkungen auf terrestrische Ökosysteme. Hrsg.: Ministerium für Umwelt, Raumordnung und Landwirtschaft des Landes Nordrhein-Westfalen, Forschungsbericht Nr. 28, Düsseldorf
- HARTUNG, E. (1995): Entwicklung einer Meßmethode und Grundlagenuntersuchungen zur Ammoniakfreisetzung aus Flüssigmist. Forschungsbericht Agrartechnik VDI-MEG Schrift 275, Dissertation Universität Hohenheim, ISSN 0931-6264
- HARTUNG, E. (2001a): Ammoniak-Emissionen der Rinderhaltung und Minderungsmaßnahmen. KTBL-UBA Symposium - Emissionen der Tierhaltung und Beste Verfügbare Techniken zur Emissionsminderung, Bildungszentrum Banz, 03./05.12.2001, Vorabversion der Beiträge, KTBL-Schrift 406, in Druck
- HARTUNG, E. (2001b): Methan- und Lachgas-Emissionen der Rinder-, Schweine- und Geflügelhaltung. KTBL-UBA Symposium - Emissionen der Tierhaltung und Beste Verfügbare Techniken zur Emissionsminderung, Bildungszentrum Banz, 03./05.12.2001, Vorabversion der Beiträge, KTBL-Schrift 406, in Druck
- HARTUNG, E. (2002): Konzeption, Realisierung und Evaluierung einer Versuchseinrichtung zur Entwicklung und differenzierten Beurteilung von Haltungssystemen für Mastschweine. Forschungsbericht Agrartechnik VDI-MEG Schrift 392, Habilitationsschrift Universität Hohenheim, Institut für Agrartechnik, ISSN 0931-6264

- HARTUNG, E. & G.J. MONTENY (2000): Emission von Methan (CH₄) und Lachgas (N₂O) aus der Tierhaltung. *Agrartechnische Forschung*, 6, Heft 4, S. 62/69
- HARTUNG, E., A. HAUSER, E. GALLMANN & A. STUBBE (1999): Die tier- und umweltgerechte Mastschweinehaltung ist das Ziel. *Landtechnik* (53), 4, S. 236/237
- HARTUNG, J. (1992): Emission und Kontrolle von Gasen und Geruchsstoffen aus Ställen und Dunglagern. *Zentralblatt für Hygiene und Umweltmedizin* 192, S. 389/418
- HARTUNG, J. (1999): Airborne emissions from animal production and its impact on environment and man. *KTBL-Schrift* 270, Darmstadt, zitiert in HARTUNG, E. (2002)
- HARTUNG, J. (2002): Effects of bioaerosol related particulate matter on animal health. *Landbauforschung Völkenrode, Sonderheft* 235, pp. 119/123
- HARTUNG, J. & V.R. PHILLIPS (1994): Control of Gaseous Emissions from Livestock Buildings and Manure Stores. *J.agric. Engng Res.* (57), pp. 173/189
- HARTUNG, J. & J. SEEDORF (1999): Characterization of airborne dust in livestock housing and its effects on animal and environment. In: *Proceedings of the International Symposium "Dust Control in Animal Production Facilities"*, Danish Institute of Agricultural Sciences, Research Centre Bygholm, 8700 Horsens Denmark (Eds.), pp. 141/153, ISBN 87-88976-35-1
- HAUSER, A. (1999): Konzeption und Planung eines Versuchsstalles für Mastschweine. Diplomarbeit, Institut für Agrartechnik, Universität Hohenheim
- HEBER, A.J., M. STROIK, J.L. NELSEN & D.A. NICHOLS (1988): Influence of Environmental Factors on Concentrations and Inorganic Content of Aerial Dust in Swine Finishing Buildings. *Transactions of the ASAE* (31), 3, pp. 875/881
- HEBER, A.J., C.R. BOON & M.W. PEUGH (1996): Air Patterns and Turbulence in an Experimental Livestock Building. *J. agric. Engng Res.* (64), pp. 209/226
- HEBER, A.J., J.Q. NI, T.T. LIM, C.A. DIEHL, A.L. SUTTON, R.K. DUGGITALA, B.L. HAYMORE, D.T. KELLY & V.I. ADAMCHUK (2000): Effect of a Manure Additive on Ammonia Emission from Swine Finishing Buildings. *Transactions of the ASAE* (43), 6, pp. 1895/1902
- HEINRICHS, P. (1994): Einfluss einer eiweißreduzierten Fütterung von Mastschweinen auf die Stickstoffbilanzen sowie die Mast- und Schlachtleistungen. *Forschungsbericht Agrartechnik VDI-MEG Schrift* 257, Dissertation Christian-Albrechts-Universität zu Kiel, ISSN 0931-6264
- HEISE, H.M. (1996): IR-Gasanalytik. In: *Infrarotspektroskopie - Highlights aus dem Analytiker-Taschenbuch*. Hrsg.: Günzler et al.; Springer Verlag, Berlin-Heidelberg-New-York, ISBN 3-540-59376-4, S. 1/68
- HELLICKSON, M.A., E.H. SCHLENKER, M.A. SCHIPULL, D.P. FROELICH & R.R. PARRY (1989): Effects of dust and gases on laborers in livestock confinement buildings. *Land and Water Use*, pp. 1471/1479

- HENDRIKS, H. (1993): Reduzierung von Ammoniakemissionen - Praktische Erfahrungen in den Niederlanden. *Landtechnik* (49), Nr. 11, S. 572/573
- HENDRIKS, J.G.L. & M.G.M. VRIELINK (1997): Reducing ammonia emission from pig houses by adding or producing organic acids in pig slurry. In: *Proceedings of the International Symposium on Ammonia and Odour Control from Animal Production Facilities, Volume 2, Vinkeloord, The Netherlands*, pp. 459/501
- HEYER, J. (1994): Methan. In: *Enquete-Kommission "Schutz der Erdatmosphäre" (Hrsg.), Landwirtschaft, Studienprogramm, Economica-Verlag, Bonn, zitiert in NIEBAUM (2001)*
- HILHORST, M.A., H.C. WILLERS, C.M. GROENESTEIN & G.J. MONTENY (2001): Effective Strategies to Reduce Methane Emissions from Livestock. ASAE-paper 01-4070, ASAE Annual International Meeting 30.7./1.8. 2001, Sacramento, California, USA, ASAE St. Joseph, Michigan, USA
- HINDS, W.C. (1999): *Aerosol Technology. Properties, Behavior and Measurement of Airborne Particles. 2nd Edition, A Wiley-Interscience Publication, John Wiley & Sons, Inc., New York, Chichester, Weinheim, Brisbane, Singapore, Toronto, ISBN 0-471-19410-7*
- HINZ, T. (2002): PM in and from agriculture - introduction and overview. *Landbauforschung Völkenrode, Sonderheft 235*, pp. 1/6
- HINZ, T. & S. LINKE (1998): A Comprehensive Experimental Study of Aerial Pollutants in and Emissions from Livestock Buildings. Part 2: Results. *J. agric. Engng Res.* (70), pp. 119/129
- HINZ, T., B. RÖNNPAGEL & S. LINKE (Hrsg.) (2002): *Particulate Matter in and from Agriculture. Landbauforschung Völkenrode, Sonderheft 235, ISBN 3-933140-58-7*
- HOEKSMAN, P., N. VERDOES, J. OOSTHOEK & J.A.M. VOERMANS (1992): Reduction of ammonia volatilization from pig houses using aerated slurry as recirculation liquid. *Livestock Production Science* 31, pp. 121/132
- HOFMANN, R.; E.-M. BECK, R. BÖHM, G. DANNEBERG, S. GERBL-RIEGER, E. GÖTTLICH, A. KOCH, M. KÜHNER, V. KUMMER, K. LIEBL, W. MARTENS, T. MISSEL, A. NEFF, U. PALMGREN, R. RABE, B. SCHILLING, F. SCHNEIDER, F. TILKES & P. WIESER (1999): Erfassung von luftgetragenen kultivierbaren Mikroorganismen aus Kompostierungsanlagen - Emissionen und Immission. In: *Eikmann, T. & R. Hofmann (Hrsg.): Stand von Wissenschaft, Forschung und Technik zu siedlungshygienischen Aspekten der Abfallentsorgung und -verwertung, Kommission Reinhaltung der Luft (KRDL) im VDI und DIN, Band 30*
- HÖRNIG, G., U. STOLLBERG, L. FENYVESI & L. MÁTYÁS (2000): Environmentally relevant emissions from modernized fattening pig houses in Hungary. In: *Proceedings of the 9th International Conference in the FAO ESCORENA Network on Recycling of Agricultural, Municipal and Industrial Residues in Agriculture (RAMIRAN 2000), F. Sangiorgi (Ed.), Gargnano, Italy, 6-9 September 2000*, pp. 127/132

- HOY, S., K. MÜLLER & R. WILLIG (1997): Ammoniak und Lachgasemissionen. Auswirkungen verschiedener Tiefstreuhaltungssysteme für Mastschweine. Landtechnik (52), H. 1, S. 40/41, zitiert in NIEBAUM (2001)
- HUSTED S., L.S. JENSEN & S.S. JØRGENSEN (1991): Reducing ammonia loss from cattle slurry by the use of acidifying additives: the role of the buffer system. J. Sci. Food Agr. 57, pp. 335/349, zitiert in AARNINK (1997)
- HÜTHER, L., F. SCHUCHARDT, H.-J. AHLGRIMM & K.-D. VORLOP (1997): Einflußfaktoren für die Lachgasfreisetzung bei der Lagerung/Kompostierung tierischer Exkrememente. Jahresbericht 1996 der Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft, Braunschweig-Völkenrode (Hrsg.), Braunschweig, S. 98/99
- IPPC (Intergovernmental Panel on Climate Change) (2001): Third Assessment Report, Working Group I, Working Group II, Cambridge University Press
- ISERMANN, K. (1990): Ammoniakemissionen der Landwirtschaft als Bestandteil ihrer Stickstoffbilanz und Lösungsansätze zur hinreichenden Minderung. In: Ammoniak in der Umwelt - Kreisläufe, Wirkungen, Minderung. KTBL-VDI Symposium, FAL-Braunschweig, 10.-12.10.1990, Hrsg: KTBL Darmstadt, VDI Düsseldorf, S. 1.1/1.76
- JANSEN, A. & J.J.R. FEDDES (1995): Effect of airborne dust on health and performance of growing pigs. Canadian Agricultural Engineering (37), No. 3, pp. 211/215
- JARVIS, S.C. & B.F. PAIN (1990): Ammonia volatilization from agricultural land. In: Proceedings No. 298, Hrsg: The Fertilizer Society, London (Großbritannien), pp. 1/35, zitiert in NIEBAUM (2001)
- JENSEN, F.-H. (1974): Geruchsminderung durch Umwälzbelüftung. KTBL-Schrift 186, Münster, zitiert in KECK (1997)
- JUNGBLUTH, T. (2002): Handlungsbedarf und Ausblick. Neue Wege in der Tierhaltung. KTBL-Schrift 408, S. 182/186, ISBN 3-7843-2137-2
- JUNGBLUTH, T. & W. BÜSCHER (1996): Aktuelle Arbeiten aus Landtechnik und landwirtschaftlichen Bauwesen: Reduzierung der Ammoniakemissionen aus Stallanlagen - Bewertung von Maßnahmen. KTBL-Arbeitspapier 233, Darmstadt
- JUNGBLUTH, T., E. HARTUNG & G. BROSE (2001): Greenhouse gas emissions from animal houses and manure stores. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 60, pp. 133-145
- KAISER, S. (1999): Analyse und Bewertung eines Zweiraumkompoststalles für Mastschweine unter besonderer Berücksichtigung der gasförmigen Stoffströme. Forschungsbericht Agrartechnik VDI-MEG Schrift 334, Dissertation Georg-August-Universität Göttingen, ISSN 0931-6264
- KAISER, S., G. BREHME & H. VAN DEN WEGHE (1998): Quantifizierung umwelt- und klimarelevanter Emissionen aus einem frei gelüfteten Mastschweinestall. Abschlußbericht des BML-Modellvorhabens "Innovative Stallssysteme für eine umweltverträgliche Mastschweinehaltung", 1995/97, Darmstadt, zitiert in VAN DEN WEGHE (1998)

- KALICH, J. (1982): Einfluss von Gerüchen und Schadgaskonzentrationen im Stall auf die tierische Leistung. KTBL-Schrift 272, Stallklima und Geruchsbelästigung, Teil 2, S. 71/76, Darmstadt, zitiert in MAYER (1999)
- KATZ, P. (1996): Ammoniakemissionen nach der Gülleanwendung auf Grünland. Dissertation Eidgenössische Technische Hochschule Zürich (Schweiz), Nr. 11382
- KECK, M. (1997): Beeinflussung von Raumluftqualität und Ammoniakemissionen aus der Schweinehaltung durch verfahrenstechnische Maßnahmen. Forschungsbericht Agrartechnik VDI-MEG Schrift 299, Dissertation Universität Hohenheim, ISSN 0931-6264
- KIRCHGESSNER, M., F.X. ROTH & M. KREUTZER (1991a): Bestimmungsfaktoren der Güllecharakteristik beim Schwein. 3. Einfluss von N-Zufuhr und Aminosäurezusammensetzung des Futters. *Agribiol. Res.* (44), 4, S. 345/356
- KIRCHGESSNER, M., M. KREUZER, H.L. MÜLLER & W. WINDISCH (1991b): Release of methane and carbon dioxide by the pig. *Agribiol. Res.* (44), 2-3, S. 103/113
- KLIMONT, Z. & M. AMANN (2002): European control strategy for fine particles: the potential role of agriculture. *Landbauforschung Völkenrode, Sonderheft 235*, pp. 29/35
- KRAUSE, K.-H. & J. JANSSEN (1989): Kontinuierliche Ammoniakmessungen in Ställen. *Grundlagen der Landtechnik* (39), H. 2, S. 52/65
- KRAUSE, K.-H. & H.-D. MACK (1993): Zur Ausbreitung von Ammoniakemissionen. *Landtechnik* (49), Nr. 11, S. 566/568
- KTBL (Hrsg.) (Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft) (1998): Außenklimaställe für Schweine. Positionspapier, KTBL, Darmstadt
- KTBL (Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft) (2001a): KTBL-UBA Symposium – Emissionen der Tierhaltung und Beste Verfügbare Techniken zur Emissionsminderung, Bildungszentrum Banz, 03./05.12.2001, Vorabversion der Beiträge, KTBL-Schrift 406, Darmstadt, in Druck
- KTBL (Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft) (2001b): Messmethoden für Ammoniak-Emissionen. KTBL-Schrift 401, Darmstadt
- KÜNST, R. (2001): Begrüßung und Eröffnung. 4. aid-Forum "Klasse statt Masse - Landwirtschaftliche Nutztierhaltung und Verbraucherschutz", 12.6.2001, Wissenschaftszentrum Bonn
- LAMMEL, G. & H. FLESSA (1998): Anthropogene Störungen des Stickstoff-Kreislaufs – Ökotoxikologische Dimension. *UWSF - Z. Umweltchem. Ökotox.* (10), 5, S. 295/305
- LEMAY, S.P., L. CHENARD, E.M. BARBER & R. FENGLER (2000): Optimization of a sprinkling system using undiluted canola oil for dust control in pig buildings. In: *Proceedings of the 2nd International Conference on Air Pollution from Agricultural Operations*, 9-11 October 2000, Des Moines, Iowa, USA, ASAE St. Joseph, Michigan (Ed.), pp. 337/344

- LOEHR, R.C. (1977): Pollution Control for Agriculture. Academic Press, New York
- LORENZ, F. & G. STEFFENS (1995): Geruchs-, Ammoniak- und Staubkonzentrationen der Luft in Mastschweine- und Ferkelaufzuchtställen nach dem Nürtinger System und Bewertung der Gerüche hinsichtlich des Immissionsschutzes. Bericht U 4-6.2, Landwirtschaftskammer Weser-Ems, 26121 Oldenburg
- MARTINEC, M. (2001): Optimierung von Biofiltern in der Landwirtschaft. Forschungsbericht Agrartechnik VDI-MEG Schrift 377, Dissertation Universität Hohenheim, ISSN 0931-6264
- MASSABIE, P., R. GRANIER & N. GUINGAND (1998): Influence of air flow rate and ventilation system on ammonia levels in pig fattening units. International Conference on Agricultural Engineering, AgEng 98 Oslo, Norway, Paper-No. 98-E-006
- MAYER, C. (1999): Stallklimatische, ethologische und klinische Untersuchungen zur Tiergerechtigkeit unterschiedlicher Haltungssysteme in der Schweinemast. Schriftenreihe der Eidgenössischen Forschungsanstalt für Agrarwirtschaft und Landtechnik FAT Nr. 50, Dissertation Technische Universität München, ISSN 0257-9200
- MOSIER, A., C. KROEZE, C. NEVISON, O. OENEMA, S. SEITZINGER & O. VAN CLEEMPUT (1998): Closing the global N₂O budget: nitrous oxide emissions through the agricultural nitrogen cycle. Nutrient Cycling in Agroecosystems (52), pp. 225/248, zitiert in OENEMA ET AL. (2001)
- MONTENY, G.J. & J.W. ERISMAN (1998): Ammonia emission from dairy cow buildings: a review of measurement techniques, influencing factors, and possibilities for reduction. Netherlands Journal of Agricultural Science 46, pp. 225/247
- MONTENY, G.J., C.M. GROENESTEIN & M.A. HILHORST (2001): Interactions and coupling between emissions of methane and nitrous oxide from animal husbandry. Nutrient Cycling in Agroecosystems, (60), pp. 123/132
- MOTZ, I. (2003): Einfluss von Bodenbearbeitung, Düngung und Fruchtfolge auf die Lachgasemissionen aus Ackerflächen. Dissertation Universität Hohenheim, Institut für Agrartechnik, in Druck
- MÜLLER, J. (2001): Bilanzmethoden zur Luftvolumenstromermittlung in frei gelüfteten Ställen. In: Messmethoden für Ammoniak-Emissionen aus der Tierhaltung. KTBL-Schrift 401, ISBN 3-7843-2130-5, S. 122/133
- MÜLLER, W. & B. SCHNEIDER (1985): Zur Frage des Wärme-, Wasserdampf- und CO₂-Anfalls in Milchvieh- und Schweinemastställen. 1. Mitteilung: Vorläufige Planungsdaten für den Einsatz von Wärmetauschern und Wärmepumpen in Nutztierställen. Tierärztl. Umschau (40), 4, S. 274/280, zitiert in NIEBAUM (2001)
- MUNNS, D.D.B.H. (1999): Developments in measurement of air pollution - EU directives and CEN/TC 264. In: Neuere Entwicklungen bei der Messung und Beurteilung der Luftqualität. Internationales Kolloquium, 27. - 29. 4.1999, VDI-Berichte Nr. 1443, pp. 21-27

- NAVAROTTO, P., G. BONAZZI, C. FABBRI & M. GUARINO (2000): New systems of manure removal to reduce gas emissions in existing pig housing. In: Proceedings of the 9th International Conference in the FAO ESCORENA Network on Recycling of Agricultural, Municipal and Industrial Residues in Agriculture (RAMIRAN 2000), F. Sangiorgi (Ed.), Gargnano, Italy, 6-9 September 2000, pp. 381/383
- Ni, J. (1998): Emission of Carbon Dioxide and Ammonia from Mechanically Ventilated Pig House. Doctoraatsproefschrift Nr. 338 aan de Faculteit Landbouwkundige en Toegpaste Biologische Wetenschappen van de K.U. Leuven (Dissertation Katholieke Universiteit Leuven, Belgien)
- Ni, J., J. HENDRIKS, D. BERCKMANS & C. VINCKIER (1996): Ammonia Release "CO₂ factor" in commercial swine house. ASAE paper 964094, ASAE Annual International Meeting, 14./18.7.1996, Phoenix, Arizona, USA, ASAE St. Joseph, Michigan
- Ni, J., A.J. HEBER, C.A. DIEHL & T.T. LIM (2000): Ammonia, Hydrogen Sulphide and Carbon Dioxide Release from Pig Manure in Under-floor Deep Pits. J. agric. Engng Res. (77), 1, pp. 53/66
- NIEBAUM, A. (2001): Quantifizierung gasförmiger Emissionen aus quer gelüfteten Außenklimaställen für Mastschweine mit Hilfe der Tracergas-Technik. Forschungsbericht Agrartechnik VDI-MEG Schrift 370, Dissertation Georg-August Universität Göttingen, ISSN 0931-6264
- NILSSON, C. (1982): Dust Investigations in Pig Houses. Report 25, Department of Farm Buildings, Swedish University of Agricultural Sciences, Lund, Sweden, zitiert in GUSTAFFSON (1999a)
- NONNENMANN, M.W., R.H. RAUTIAINEN, K.J. DONHAM, S.P. KIRYCHUK, S.J. REYNOLDS, P.T. O'SHAUGHNESSY & P.S. THORNE (1999): Vegetable Oil Sprinkling as a Dust Reduction Method in a Swine Confinement. In: Proceedings of the International Symposium "Dust Control in Animal Production Facilities", Danish Institute of Agricultural Sciences, Research Centre Bygholm, 8700 Horsens Denmark (Eds.), ISBN 87-88976-35-1, pp. 271/278
- OENEMA, O., G. VELTHOF & P. KUIKMAN (2001): Technical and policy aspects of strategies to decrease greenhouse gas emissions from agriculture. Nutrient Cycling in Agroecosystems (60), pp. 301/315
- OGINK, N.W.M. & J.V. KLARENBEK (1997): Evaluation of a standard sampling method for determination of odour emission from animal housing systems and calibration of the Dutch pig odour unit into standardised odour units. In: Proceedings of the International Symposium "Ammonia and Odour Control from Animal Production Facilities", EurAgEng, Vinkeloord, The Netherlands, 6.-10.10.1997, pp. 231/238
- OLDENBURG, J. (1989): Emissionen aus der Tierproduktion bei verschiedenen Haltungsverfahren. In: Schriftenreihe der Agrarwissenschaftlichen Fakultät der Universität Kiel, Heft 71, S. 97/105, ISSN 0340-8892
- OLESEN, J.E. & S.G. SOMMER (1993): Modelling effects of wind speed and surface cover on ammonia volatilization from stored pig slurry. Atmospheric Environment 27A (16), pp. 2567/2574, zitiert in AARNINK (1997)

- OLIVIER, J.G.J., A.F. BOUWMAN, K.W. VAN DER HOEK & J.J.M. BERDOWSKI (1998): Global air emission inventories for anthropogenic sources of NO_x, NH₃ and N₂O in 1990. In: K.W. van der Hoek et al. (Eds.). Nitrogen, the Confer-N-s. First International Nitrogen Conference 1990, Elsevier, Amsterdam, pp. 135/148, zitiert in HARTUNG & MONTENY (2000)
- OSMAN, S.P.L., R.M. KAY & J.E. OWEN (1999): Dust Reduction in Pig Buildings using an Applicator to Spread Oil Directly onto Pigs. Proceedings of the International Symposium on Dust Control in Animal Production Facilities, 30.5.-2.6.1999, Aarhus, Denmark, Research Centre Bygholm, P.O. Box 536, DK-8700 Horsens, ISBN 87-88976-35-1, pp. 253/260
- PAHL, O., A.G. WILLIAMS, R.W. SNEATH, J. GOODMAN, L. TAYLOR, R.J. GODWIN & M.J. HANN (2000): Reducing ammonia emissions from pig production - experiences with oil and foam as a cover material for slurry under slats. In: Proceedings of the 2nd International Conference on Air Pollution from Agricultural Operations, 9-11 October 2000, Des Moines, Iowa, USA, ASAE St. Joseph, Michigan (Ed.), pp. 100/107
- PAASS, F. (1993): Ammoniakemissionen nach Gülledüngung auf Grünland. Dissertation Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn, Institut für Pflanzenbau, Lehrstuhl für Allgemeinen Pflanzenbau
- PASZEK, D.A., L.D. JACOBSEN, V.J. JOHNSON & R.E. NICOLAI (2001): Design and Measurement of an Oil Sprinkling System to Control Dust, Odour, and Gases in and from a Curtain-Sided Pig Finishing Barn. ASAE Annual International Meeting, 30.07.-01.08.2001, Sacramento, California, USA, Paper-No. 014076, ASAE St. Joseph, Michigan, USA
- PEDERSEN, S. (1989): Dust and gases in livestock buildings. In: Proceedings of the 11th International Congress on Agricultural Engineering, 4.-8.9.1989, Dublin, pp. 1489/1494
- PEDERSEN, S. & C.B. PEDERSEN (1995): Animal Activity Measured by Infrared Detectors. J. agric. Engng Res. (61), pp. 239/246
- PEDERSEN, S. & H.B. ROM (1998): Diurnal Variation in Heat Production from Pigs in Relation to Animal Activity. International Conference on Agricultural Engineering, AgEng 1998, Oslo, Norway, Paper-No.: 98-B-025
- PEDERSEN, S., H. TAKAI, J.O. JOHNSEN, J.H.M. METZ, P.W.G. GROOT KOERKAMP, G.H. UENK, V.R. PHILLIPS, M.R. HOLDEN, R.W. SNEATH, J.L. SHORT, R.P. WHITE, J. HARTUNG, J. SEEDORF, M. SCHRÖDER, K.H. LINKERT & C.M. WATHES (1998): A Comparison of Three Balance Methods for Calculating Ventilation Rates in Livestock Buildings. J. agric. Engng Res. (70), pp. 25-37
- PEDERSEN, S. & H. TAKAI (1999): Dust Response to Animal Activity. In: Proceedings of the International Symposium "Dust Control in Animal Production Facilities", Danish Institute of Agricultural Sciences, Research Centre Bygholm, 8700 Horsens Denmark (Eds.), ISBN 87-88976-35-1, pp. 306/309
- PEDERSEN, S., M. NONNENMANN, R. RAUTIAINEN, T.G.M. DEMMERS, T. BANHAZI & M. LYNGBYE (2000): Dust in Pig Buildings. Journal of Agricultural Safety and Health (6), 4, pp. 261/274

- PEITZ, L. (2000): Jahresbericht des Ausschusses der Versuchsstation. Versuchsstation für Tierhaltung, Tierzucht und Kleintierzucht "Unterer Lindenhof" der Universität Hohenheim.
- PELCHEN, A. & J. PETERS (1994): Schadgase aus der Tierhaltung – Auswirkungen auf den Treibhauseffekt. *Entwicklung + ländlicher Raum*, 1/94, S. 20/24
- PFEIFFER, A., F. ARENDS, H.-J. LANGHOLZ & G. STEFFENS (1993): The influence of various pig housing systems and dietary protein levels and the amount of ammonia emissions in the case of fattening pigs. In: *Proceedings of the 1st International Symposium on Nitrogen Flow in Pig Production and Environmental Consequences*, Wageningen, Niederlande, pp. 313/317, zitiert in STEFFENS et al. (1996)
- PHILLIPS, V.R., M.R. HOLDEN, R.W. SNEATH, J.L. SHORT, R.P. WHITE, J. HARTUNG, J. SEEDORF, M. SCHRÖDER, K.H. LINKERT, S. PEDERSEN, H. TAKAI, J.O. JOHNSEN, P.W.G. GROOT KOERKAMP, G.H. UENK, R. SCHOLTENS, J.H.M. METZ & C.M. WATHES (1998): The Development of robust methods for measuring concentrations and emission rates of gaseous and particulate air pollutants in livestock buildings. *J. agric. Engn. Res.* (70), 1, pp. 11/24
- PHILLIPS, V.R., S. BRUSH, R. SNEATH, A.A. SIMON & C. WATHES (2002): Creating an inventory of agricultural PM emissions. *Landbauforschung Völkenrode*, Sonderheft 235, pp. 21/28
- PRECHT, M. (1987): *Bio-Statistik. Eine Einführung für Studierende der biologischen Wissenschaften*. Vierte erweiterte Auflage, R. Oldenbourg Verlag, München, Wien, ISBN 3-486-20477-7
- PREDICALA, B.Z., R.G. MAGHIRANG, J.E. URBAN, K.S. OCFEMIA, R.D. GOODBAND & M.L. PRETERIE (2000): Characterization of Particulate Matter in Naturally and Fan-ventilated Swine Barns. In: *Proceedings of the 2nd International Conference on Air Pollution from Agricultural Operations*, 9-11 October 2000, Des Moines, Iowa, USA, ASAE St. Joseph, Michigan (Ed.), pp. 321/328
- RATHMER, B. (2002): Vergleich klima- und umweltrelevanter Emissionen aus Haltungssystemen für Mastschweine. Forschungsbericht Agrartechnik VDI-MEG Schrift 386, Dissertation Technische Universität München, ISSN 0931-6264
- RATSCHOW, J.-P. (1994): Vermeidungs- und Verminderungsstrategien für Umweltbelastungen aus Tierhaltungen. Landwirtschaftskammer Westfalen-Lippe, Münster, zitiert in NIEBAUM (2001)
- REGULIN, K. & E. GRIMM (2001): Beurteilung der Umweltwirkungen von Ammoniak in Genehmigungsverfahren landwirtschaftlicher Bauvorhaben – rechtliche Grundlagen und Methoden. *KTBL-UBA Symposium – Emissionen der Tierhaltung und Beste Verfügbare Techniken zur Emissionsminderung*, Bildungszentrum Banz, 03./05.12.2001, Vorabversion der Beiträge, *KTBL-Schrift 406*, in Druck
- REINHARDT, T. (2002): Photoakustischer Nachweis von Ammoniak mit Diodenlasern im Spektralbereich des Nahen Infrarot. Dissertation Universität Hohenheim, Fakultät Allgemeine und Angewandte Naturwissenschaften, Institut für Physik

- REITZ, P. (2000): Untersuchungen zur Reduzierung der Ammoniakemissionen nach der Ausbringung von Rinderflüssigmist auf Grünland. Forschungsbericht Agrartechnik VDI-MEG Schrift 350, Dissertation Universität Hohenheim, ISSN 0931-6264
- RIEGER, M.-A. (2001): Biologische Belastungen der Beschäftigten in der Landwirtschaft. Habilitationsschrift, Fachbereich Sicherheitstechnik, Bergische Universität - Gesamthochschule Wuppertal
- ROBERTSON, J.F. (1992): Dust and ammonia in pig buildings. Farm Building Progress (110), Aberdeen, Scotland, pp. 19-24
- ROELOFS, P.F.M.M. & G.P. BINNENDIJK (2001): Verlagen van het stofgehalte in varkensstallen door periodiek vernevelen van een olie-emulsië (Reduction of dust concentration in pig facilities by regular spraying of an oil emulsion). Praktijkonderzoek Veehouderij, Rapport 208, 8203 AD Lelystad, Netherlands, ISSN 0169-3689
- ROM, H.B. (1994): Nitrogen flow and ammonia emission in fattening pig units. In: Gasanalytik in der Nutztierhaltung und Landwirtschaft, Berlin, 22.-23.11.1994, pp. 1/8
- ROM, H.B. & P.J. DAHL (1998): A model for prediction of ammonia emission from fattening pigs with respect to seasonal and diurnal fluctuations. International Conference on Agricultural Engineering AgEng 1998, Oslo, Norway, paper-no. 98-E-007
- ROM, H.B. & P.J. DAHL (2002): Influence of Room Temperature on Ammonia Emission from Confined Slaughter Pig Units. International Conference on Agricultural Engineering AgEng 2002, Budapest, Hungary, paper-no. 02-SE-025
- ROTH, F.X. & W. WINDISCH (2001): Strategies of animal nutrition decreasing the environmental impact of animal husbandry. XXVI Annual Meeting of the Chilean Society for Animal Production, International Symposium on Animal Production and Environmental Issues, Pontificia Universidad Catolica de Chile, 25./27. 07. 2001. (<http://www.ktbl.de/umwelt/recht/chile/tieremission.htm>)
- SCHHAVO (2000): Verordnung zum Schutz von Schweinen bei Stallhaltung ("Schweinehaltungsverordnung") vom 19. Dezember 1972 (BGBl. I, S. 2509) in der Fassung der Bekanntmachung vom 21. Dezember 1994 (BGBl. I, S. 3930), zuletzt geändert durch Art. 4a der Verordnung vom 18. April 2000 (BGBl. S. 531), seit 25.10.2001 außer Kraft
- SCHNEIDER, F., T. ENGELHARDT & P.H. WIESER (2001): Characterization of Aerosol Particles from Animal Husbandry with Single Particle Analytic Techniques. ASAE Annual International Meeting, 30.07.-01.08.2001, Sacramento, California, USA, Paper-No. 014010, ASAE St. Joseph, Michigan, USA
- SCHNEIDER, F., T. ENGELHARDT & P.H. WIESER (2002): Properties of airborne dust from pig husbandries and their effects on measurement. Landbauforschung Völkenrode, Sonderheft 235, pp. 163/168

- SCHOLTENS, R. & A. VAN 'T OOSTER (1994): Performance and accuracy of methods for measuring natural ventilation rates and ammonia emissions from naturally ventilated livestock houses. International Conference on Agricultural Engineering, AgEng, Milano 29.08.-01.09.1994, pp. 1/13
- SCHÜRER, E. (2001): Lachgas- und Methanemissionen nach der Ausbringung von Gülle auf Grünland im Allgäu. Dissertation Universität Hohenheim, Institut für Agrartechnik, Mensch & Buch Verlag, Berlin, ISBN 3-89820-408-1
- SCHÜRER, E. & P. REITZ (1998): Emissionen von Ammoniak und Lachgas. Einfluß des Ausbringverfahrens von Flüssigmist. Landtechnik (53), S. 36/36
- SCHÜTZE, G., H.-D. GREGOR & T. SPRANGER (2001): Ökologische Wirkungen von Ammoniak. KTBL-UBA Symposium – Emissionen der Tierhaltung und Beste Verfügbare Techniken zur Emissionsminderung, Bildungszentrum Banz, 03./05.12.2001, Vorabversion der Beiträge, KTBL-Schrift 406, in Druck
- SEEDORF, J. (2000): Emissionen von luftgetragenen Stäuben und Mikroorganismen. Landtechnik (55), Nr. 2, S. 182/183
- SEEDORF, J. & J. HARTUNG (2002): Stäube und Mikroorganismen in der Tierhaltung. KTBL-Schrift 393, Darmstadt, ISBN 3-7843-2145-3
- SEEDORF, J., J. HARTUNG, M. SCHRÖDER, K.-H. LINKERT, S. PEDERSEN, H. TAKAI, J.O. JOHNSEN, J.H.M. METZ, P.W.G. GROOT KOERKAMP, G.H. UENK, V.R. PHILLIPS, M.R. HOLDEN, R.W. SNEATH, J.L. SHORT, R.P. WHITE & C.M. WATHES (1998a): A Survey of Ventilation Rates in Livestock Buildings in Northern Europe. J. agric. Engng Res. (70), pp. 39-47
- SEEDORF, J., J. HARTUNG, M. SCHRÖDER, K.-H. LINKERT, S. PEDERSEN, H. TAKAI, J.O. JOHNSEN, J.H.M. METZ, P.W.G. GROOT KOERKAMP, G.H. UENK, V.R. PHILLIPS, M.R. HOLDEN, R.W. SNEATH, J.L. SHORT, R.P. WHITE & C.M. WATHES (1998b): Temperature and Moisture Conditions in Livestock Buildings in Northern Europe. J. agric. Engng Res. (70), pp. 49-57
- SEEDORF, J., J. HARTUNG, A. ROSS & G. STEFFENS (1999a): Bioaerosol Reduction Efficiencies of Biofilters and Bioscrubbers. In: Proceedings of the International Symposium on Dust Control in Animal Production Facilities, 30.5.-2.6.1999, Aarhus, Denmark, Research Centre Bygholm, P.O. Box 536, DK-8700 Horsens, ISBN 87-88976-35-1, pp. 322/328
- SEEDORF, J., J. HARTUNG & M. KLOTZ (1999b): An optical particle counter for liquid-dispersed livestock dust. In: Proceedings of the International Symposium on Dust Control in Animal Production Facilities, 30.5.-2.6.1999, Aarhus, Denmark, Research Centre Bygholm, P.O. Box 536, DK-8700 Horsens, ISBN 87-88976-35-1, pp. 289/294
- SEINFELD, J.H. & S.N. PANDIS (1997): Atmospheric chemistry and physics. John Wiley & Sons, New York
- SEIPELT, F. (1999): Quantifizierung und Bewertung gasförmiger Emissionen aus frei gelüfteten Milchviehställen mit Trauf-First-Lüftung. Forschungsbericht Agrartechnik, VDI-MEG-Schrift 336, Dissertation Georg-August-Universität Göttingen, ISSN 0931-6264

- SIMONIS, U.E. (2002): Klimawandel - eine weltweite Gefährdung. Informationen zur politischen Bildung Nr. 274, S. 40/43
- SMIDT, D., J. LAEDEWIG & C. SCHLICHTING (1991): Tagesrhythmus und Zeitverschiebung - ein Tierschutzproblem? Dtsch. tierärztl. Wschr. (98), 1-40, Heft 1, S. 19/23
- SMITH, J.H., C.R. BOON, A.J.F. WEBSTER & C.M. WATHES (1999): Measurement of the Effect of Animals on Airflow in an Experimental Piggery. J. Agric. Engng Res. (72), pp. 105/112
- SMITS, M.C.J., J. OENEMA, H.F.M. AARTS & G.J. MONTENY (2000): Monitoring ammonia emissions on dairy farms in the framework of Dutch nutrient policy. Abstracts of the International Conference on Agricultural Engineering into the Third Millennium, EurAgEng, University of Warwick, UK, 2.-7. July 2000, pp. 89/90
- SNEATH, R.W., V.R. PHILLIPS, T.G.M. DEMMERS, L.R. BURGESS, J.L. SHORT & S.K. WELCH (1997): Long term measurements of greenhouse gas emissions from UK livestock buildings. In: Proceedings of the 5th International Symposium, Bloomington, Minnesota, pp. 146/153, ASAE St. Joseph, Michigan, zitiert in Ni et al. (2000)
- SNEEK, E., P. BLINKSBJERG & S. NEWSTEAD (1999): European network on comparative air emission measurements - status and possibilities. In: Neuere Entwicklungen bei der Messung und Beurteilung der Luftqualität, 27. - 29. 4.1999, VDI-Berichte Nr. 1443, pp. 47/63
- STEFFENS, G., A. PFEIFFER & F. LORENZ (1996): Aktuelle Problematik der derzeitigen Produktionsformen in der Schweinehaltung - Ökologische Aspekte - . Tierärztliche Umschau 51, S. 290/298
- STUBBE, A. (2000): Entwicklung und Beurteilung einer Beschäftigungstechnik für Mastschweine in intensiven Haltungssystemen. Forschungsbericht Agrartechnik, VDI-MEG-Schrift Nr. 358, Dissertation Universität Hohenheim, ISSN 0931-6264
- SVIDT, K., B. BJERG, S. MORSING & G. ZHANG (1998): Modelling of Airflow through a slatted floor by CFD. International Conference on Agricultural Engineering AgEng 1998, Oslo, Norway, paper-no. 98-B-038
- TAKAI, H., L.D. JACOBSEN & S. PEDERSEN (1996): Reduction of Dust Concentration and Exposure in Pig Buildings by Adding Animal Fat in Feed. J. agric. Engng Res. (63), pp. 113/120
- TAKAI, H., S. PEDERSEN, J.O. JOHNSEN, J.H.M. METZ, P.W.G. GROOT KOERKAMP, G.H. UENK, V.R. PHILLIPS, M.R. HOLDEN, R.W. SNEATH, J.L. SHORT, R.P. WHITE, J. HARTUNG, J. SEEDORF, M. SCHRÖDER, K.H. LINKERT & C.M. WATHES (1998): Concentrations and emissions of airborne dust in livestock buildings in northern Europe. J. agric. Engng Res. (70), pp. 49/58
- TAKAI, H. & S. PEDERSEN (2000): A Comparison Study of different Dust Control Methods in Pig Buildings. Applied Engineering in Agriculture (16), 3, pp. 269/277

- TA-LUFT (2002): Erste Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Bundes-Immissionschutzgesetz (Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft - TA-Luft). Kabinettsbeschluss vom 12. Dezember 2001, Beschluss des Bundesrates, Drucksache 393/02 vom 26. April 2002 (http://www.bmu.de/download/b_taluft.php)
- THELOSEN, J.G.M. & J.A.M. VOERMANS (1993): Comparison of two deep litter systems for fattening pigs with a traditional housing system: Influence on some environmental aspects. In: Workshop deep litter systems for pig farming, Rosmalen, Netherlands, pp. 26/35
- TIELEN, M.J.M. (1984): Einige Ursachen für die Variation der Staubkonzentration im Mastschweinestall. Tagungsbericht: Dust in animal houses. International Society of Animal Hygiene, Hannover, S. 28/30
- UBA (Umweltbundesamt) (2001a): Daten zur Umwelt – Der Zustand der Umwelt in Deutschland 2000. Erich Schmidt Verlag, Berlin, ISBN 3-503-05973-3
- UBA (Umweltbundesamt) (2001b): Anpassung der deutschen Methodik zur rechnerischen Emissionsermittlung an internationale Richtlinien sowie Erfassung und Prognose der Ammoniak-Emissionen der deutschen Landwirtschaft und Szenarien zu deren Minderung bis zum Jahre 2010. Abschlussbericht zum Projekt UBA F+E-Vorhaben FKZ 299 42 245/02, BLE Vorhaben 99HS022, Umweltbundesamt, Berlin
- UBA (Umweltbundesamt) (2001c): Entwurf: Erstellung eines Gutachtens für einen deutschen Beitrag zur Vollzugsvorbereitung zur Umsetzung der IVU-Richtlinie für den Bereich Intensivtierhaltung, UBA Vorhaben FKZ 360 08 001, Stand November 2001, KTBL Darmstadt; Umweltbundesamt, Berlin; erschienen als UBA-Text 75/02 "Beste verfügbare Technik in der Intensivtierhaltung", ISSN 0722-186X (2002)
- UN/ECE (Wirtschaftskommission der Vereinten Nationen) (1996): 1979 Convention on Long-Range Transboundary Air Pollution and its protocols ("Genfer Luftreinhalteabkommen"). UN/ECE, New York and Geneva, zitiert in UBA (2001b)
- UN/ECE (Wirtschaftskommission der Vereinten Nationen) (1999): Protocol to the 1979 Convention on Long-Range Transboundary Air Pollution to Abate Acidification, Eutrophication and Ground-Level Ozone ("Göteborger Multischadstoffprotokoll"). UN/ECE, New York and Geneva, zitiert in UBA (2001b)
- VAN DEN WEGHE, H. (1995): Tierhaltung und Umwelt. In: Tagungsband zur 2. Internationalen Tagung Bau und Technik in der landwirtschaftlichen Nutztierhaltung, 14./15.3.1995, Potsdam-Bornim, Institut für Agrartechnik Bornim e.V., S. 31/39
- VAN DEN WEGHE, H. (1998): Lüftung, Emissionsverhalten. In: KTBL Positionspapier "Außenklimaställe für Schweine", KTBL (Hrsg.), Darmstadt, S. 29/32
- VAN DEN WEGHE, H. (2001): Emissionen der Schweinehaltung und Minderungsmaßnahmen. KTBL-UBA Symposium – Emissionen der Tierhaltung und Beste Verfügbare Techniken zur Emissionsminderung, Bildungszentrum Banz, 03./05.12.2001, Vorabversion der Beiträge, KTBL-Schrift 406, in Druck

- VAN DER PEET-SCHWERING, C.M.C., M.P. BEURSKENS-VOERMANS & N. VERDOES (1997): Effect of multi phase feeding on the ammonia emission of growing-finishing pig facilities. In: Research Reports 1997, Research Institute of Pig Husbandry, Rosmalen, Niederlande (Ed.), ISSN 1385-5883, p. 22
- VAN OUWERKERK, E.N.J. & A.J.A. AARNINK (1992): Gas production of fattening pigs. International Conference on Agricultural Engineering, 1.6.-4.6.1992, Uppsala, Schweden, paper no. 920207, p. 16, zitiert in Ni (1998), NIEBAUM (2001)
- VAN OUWERKERK, E.N.J. & S. PEDERSEN (1994): Application of the carbon dioxide mass balance method to evaluate ventilation rates in livestock buildings. In: Proceedings of the XII CIGR World Congress on Agricultural Engineering, Vol. I, 29.8.-1.9.1994, Milano, Italien, pp. 516/529
- VAN'T KLOOSTER, C.E. (2001): Environmental technology in pig and poultry production. XXVI Annual Meeting of the Chilean Society for Animal Production, International Symposium on Animal Production and Environmental Issues, Pontificia Universidad Catholica de Chile, 25./27. 07. 2001. (<http://www.ktbl.de/umwelt/recht/chile/tieremission.htm>)
- VAN'T KLOOSTER, C.E. & B.P. HEITLAGER (1994): Determination of Minimum Ventilation Rate in Pig Houses with Natural Ventilation based on Carbon Dioxide Balance. J. agric. Engng Res. (57), pp. 279/287
- VERDOES, N., J.A.M. VOERMANS & C.E.P. VAN BRAKEL (1996): New Housing Systems for pigs: Dutch Policy, Ammonia Emission and Costs. In: Proceedings of the International Conference on Air Pollution from Agricultural Operations, 7-9 February, Kansas City, Missouri, USA, pp. 103/109
- VON MICKWITZ, G., H. BÖRGER & J. KOTZ (1975): Die Beurteilung der Lüftung im Schweinestall an Hand eines NH₃-Stallklimaspiegels unter Zugrundelegung einer NH₃-Dauerkonzentration von maximal 10 ppm. Der praktische Tierarzt 4, S. 230/240, zitiert in MAYER (1999)
- VON PAPPRIITZ, C.-L. (1991): Lüftungssystem beeinflusst Ammoniak-Gehalt im Schweinestall. Schweine-Zucht und Schweine-Mast (39), 12, S. 398/402
- VFRANKEN, E., S. CLEAS & D. BERCKMANS (2002): Development of a shortened procedure for the determination of ammonia emission from livestock buildings. International Conference on Agricultural Engineering, AgEng Budapest, Hungary, paper-No. 02-SE-063
- WANG, X., Y. ZHANG & G.L. RISKOWSKI (1999): Dust Spatial Distribution in a Typical Swine Building. In: Proceedings of the International Symposium "Dust Control in Animal Production Facilities", Danish Institute of Agricultural Sciences, Research Centre Bygholm, 8700 Horsens Denmark (Eds.), ISBN 87-88976-35-1, pp. 48/55
- WANG, X., Y. ZHANG, L.Y. ZHAO & G.L. RISKOWSKI (2000): Effect of Ventilation Rate on Dust Spatial Distribution in Mechanically Ventilated Airspace. Transactions of the ASAE (43), 6, pp. 1877/1884

- WATHES, C.M., V.R. PHILLIPS, M.R. HOLDEN, R.W. SNEATH, J.L. SHORT, R.P. WHITE, J. HARTUNG, J. SEEDORF, M. SCHRÖDER, K.H. LINKERT, S. PEDERSEN, H. TAKAI, J.O. JOHNSEN, P.W.G. GROOT KOERKAMP, G.H. UENK, J.H.M. METZ, T. HINZ, V. CASPARY & S. LINKE (1998): Emissions of Aerial Pollutants in Livestock Buildings in Northern Europe: Overview of a Multinational Project. *J. agric. Engng Res.* (70), pp. 3/9
- WIESER, P.H., R. WURSTER & H. SEILER (1980): Identification of airborne particles by laser induced mass spectroscopy. *Atmos. Environ.*, 14, S. 484/496, zitiert in HARTUNG, E. (2002)
- WILLERS, H.C., P.J.L. DERIKX, P.W.J. TEN HAVE & T.K. VIJN (1996): Emission of ammonia and nitrous oxide from aerobic treatment of veal calve slurry. *J. agric. Engng Res.* (63), pp. 345/352, zitiert in MONTENY et al. (2001)
- WINIWARTER, W. & K. RYPDAL (2001): Assessing the uncertainty associated with national greenhouse gas emission inventories: a case study for Austria. *Atmospheric Environment* (35), pp. 5425/5540
- WITKE, G. & E. PFEIFFER (1984): *Physiologie der Haustiere*. Pareys Studentexte 1. völlig neubearbeitete Auflage, Verlag Paul Parey, Berlin, Hamburg, zitiert in NIEBAUM (2001)
- ZEITLER, M. (1988): Hygienische Bedeutung des Staubes und Keimgehaltes der Stallluft. *Bayer. Landwirtschaftl. Jahrbuch* 65, S. 151/165
- ZHANG, Y. (1999): Do away with the dust. *Pig Progress* 15, pp. 10/14
- ZHANG, Y., A. TANAKA, J.A. DOSMAN, A. SENTHISELVAN, E.M. BARBER, S.P. KIRYCHUK, L.E. HOLFELD & T.S. HURST (1998): Acute Respiratory Responses of Human Subjects to Air Quality in a Swine Building. *J. agric. Engng Res.* (70), pp. 367/373
- ZHOU, H., J.J.R. FEDDES, J.J. LEONARD & R. BORG (1997): Application of a computer model for naturally ventilated livestock buildings in Alberta under summer conditions. *Canadian Agricultural Engineering* (39), pp. 327/334

9 ANHANG

Tabellen

- Tab. A1-a: Zusammenfassung von Randbedingungen und Stallklimafaktoren im Mastdurchgang 1 (18.10.99-14.01.00; 88 Messtage) auf der Basis von selektierten Tagesmittelwerten (n = Anzahl verwertbarer Messtage)
- Tab. A1-b: Zusammenfassung von Randbedingungen und Emissionen im Mastdurchgang 1 (18.10.99-14.01.00; 88 Messtage) auf der Basis von selektierten Tagesmittelwerten (n = Anzahl verwertbarer Messtage)
- Tab. A2-a: Zusammenfassung von Randbedingungen und Stallklimafaktoren im Mastdurchgang 2 (28.02.00-06.06.00; 100 Messtage) auf der Basis von selektierten Tagesmittelwerten (n = Anzahl verwertbarer Messtage)
- Tab. A2-b: Zusammenfassung von Randbedingungen und Emissionen im Mastdurchgang 2 (28.02.00-06.06.00; 100 Messtage) auf der Basis von selektierten Tagesmittelwerten (n = Anzahl verwertbarer Messtage)
- Tab. A3-a: Zusammenfassung von Randbedingungen und Stallklimafaktoren im Mastdurchgang 3 (14.08.00-01.12.00; 110 Messtage) auf der Basis von selektierten Tagesmittelwerten (n = Anzahl verwertbarer Messtage)
- Tab. A3-b: Zusammenfassung von Randbedingungen und Emissionen im Mastdurchgang 3 (14.08.00-01.12.00; 110 Messtage) auf der Basis von selektierten Tagesmittelwerten (n = Anzahl verwertbarer Messtage)
- Tab. A4-a: Zusammenfassung von Randbedingungen und Stallklimafaktoren im Mastdurchgang 4 (15.01.01-27.04.01; 102 Messtage) auf der Basis von selektierten Tagesmittelwerten (n = Anzahl verwertbarer Messtage)
- Tab. A4-b: Zusammenfassung von Randbedingungen und Emissionen im Mastdurchgang 4 (15.01.01-27.04.01; 102 Messtage) auf der Basis von selektierten Tagesmittelwerten (n = Anzahl verwertbarer Messtage)
- Tab. A5-a: Signifikanzen des paarweisen Mittelwertvergleiches von vier Mastdurchgängen von Randbedingungen und Stallklimafaktoren (U-Test nach Mann & Whitney)
- Tab. A5-b: Signifikanzen des paarweisen Mittelwertvergleiches von vier Mastdurchgängen von Randbedingungen und Emissionen (U-Test nach Mann & Whitney)
- Tab. A6: Vergleich von Randbedingungen und Staubkonzentrationen mehrerer 24 h-Messungen in den Haltungssystemen Vollspalten, Zwangslüftung (VSP) und Getrennte Klimabereiche, freie Lüftung (GK)

Abbildungen

- Abb. A1: Vergleich des Einflusses der Außentemperatur (T_a) (obere Grafik) und Innenraumtemperatur (T_i) (untere Grafik) auf die absoluten CO_2 -Emissionen pro Tier (Datenbasis: selektierte Tagesmittelwerte aus vier Mastdurchgängen) zwischen den Haltungssystemen VSP (Vollspalten, Zwangslüftung) und GK (Getrennte Klimabereiche, freie Lüftung)
- Abb. A2: Vergleich des Einflusses des Volumenstromes auf die CH_4 -Abluftkonzentration und die absoluten CH_4 -Emissionen pro Tier (Datenbasis: selektierte Tagesmittelwerte aus vier Mastdurchgängen) zwischen den Haltungssystemen VSP (Vollspalten, Zwangslüftung) und GK (Getrennte Klimabereiche, freie Lüftung)
- Abb. A3: Vergleich des Einflusses des Volumenstromes auf die CO_2 -Abluftkonzentration und die absoluten CO_2 -Emissionen pro Tier (Datenbasis: selektierte Tagesmittelwerte aus vier Mastdurchgängen) zwischen den Haltungssystemen VSP (Vollspalten, Zwangslüftung) und GK (Getrennte Klimabereiche, freie Lüftung)

Tab. A1-a: Zusammenfassung von Randbedingungen und Stallklimafaktoren im Mastdurchgang 1 (18.10.99-14.01.00; 88 Messtage) auf der Basis von selektierten Tagesmittelwerten (n = Anzahl verwertbarer Messtage)

Messstelle	Parameter	System VSP Vollspalten, Zwangslüftung			System GK Getrennte Klimabereiche, freie Lüftung			Verhältnis- faktor		
		n	Mittelwert/ +/- Standard- abweichung	Median	n	Mittelwert/ +/- Standard- abweichung	Median	Mittelwert GK : VSP **		
Außen	Temperatur T_a [°C]	61	5,6	4,8	5,0	61	5,6	4,8	5,0	
	relative Luftfeuchte [%]	59	84,0	7,5	83,6	59	84,0	7,5	83,6	
	Windgeschwindigkeit [m s ⁻¹] *	64	0,7	1,0	0,4	64	0,7	1,0	0,4	
	Windrichtung [°] *	64	265	23,4	270	64	265	23,4	270	
	NH ₃ -Konzentration [ppm]	27	5,3	2,6	3,8	27	5,2	2,0	4,5	
	CO ₂ -Konzentration [ppm]	60	434	24,3	434	58	506	63,3	502,5	
	CH ₄ -Konzentration [ppm]	60	3,3	0,9	3,2	60	3,3	0,6	3,3	
Innenraum	Temperatur T_i [°C]	61	18,9	1,8	18,8	61	9,1	3,7	8,5	0,48
	Temperaturdifferenz $T_i - T_a$	61	13,3	3,4	13,3	61	3,5	2,2	3,9	0,26
	relative Luftfeuchte [%]	61	54,6	3,2	54,6	61	71,8	10,0	73,0	1,31
	NH ₃ -Konzentration [ppm]	27	12,0	2,9	12,4	27	9,9	1,9	10,2	0,82
	CO ₂ -Konzentration [ppm]	60	1815,1	295,2	1828,9	60	727,9	94,4	720,4	0,40
	CH ₄ -Konzentration [ppm]	60	9,6	2,3	9,1	60	4,2	0,7	4,2	0,43
	Stallbelegung [GV]	64	6,6	1,8	6,3	64	6,5	1,7	6,5	0,9 n.s.
Liegefläche 1	Temperatur [°C]	entfällt			63	17,3	2,6	17,1		
	relative Luftfeuchte [%]				62	48,1	10,8	47,4		
	NH ₃ -Konzentration [ppm]				27	18,0	4,4	18,8		
	CO ₂ -Konzentration [ppm]				60	1230,9	290,0	1193,6		
	CH ₄ -Konzentration [ppm]				60	6,0	2,0	5,6		
Liegefläche 2	Temperatur [°C]	entfällt			63	17,0	2,9	16,5		
	relative Luftfeuchte [%]				62	64,2	12,1	63,2		
	NH ₃ -Konzentration [ppm]				27	25,7	14,9	20,8		
	CO ₂ -Konzentration [ppm]				60	862,4	179,2	823,1		
	CH ₄ -Konzentration [ppm]				60	3,8	0,7	3,9		

* gemessen an der Zuluftöffnung des Systems GK; Windrichtungen: 0°/360° = Nord, 90° = Ost, 180° = Süd, 270° = West

** soweit nicht anders gekennzeichnet sind die Mittelwertunterschiede der Haltungssysteme bei $P < 0,05$ signifikant; n.s. = nicht signifikant (U-Test nach Mann & Whitney)

Tab. A1-b: Zusammenfassung von Randbedingungen und Emissionen im Mastdurchgang 1 (18.10.99-14.01.00; 88 Messtage) auf der Basis von selektierten Tagesmittelwerten (n = Anzahl verwertbarer Messtage)

Messstelle	Parameter	System VSP Vollspalten, Zwangslüftung			System GK Getrennte Klimabereiche, freie Lüftung			Verhältnis- faktor		
		n	Mittelwert/ +/- Standard- abweichung	Median	n	Mittelwert/ +/- Standard- abweichung	Median	Mittelwert GK : VSP ****		
Unter den Spalten	Temperatur [°C]	Vergleichbar mit Abluft			nicht gemessen					
	NH ₃ -Konzentration [ppm]	27	27,0	12,5	31,1	27	35,3	13,2	33,7	1,3
	CO ₂ -Konzentration [ppm]	60	1964,4	388,1	1942,5	60	935,3	199,5	905,0	0,47
	CH ₄ -Konzentration [ppm]	60	17,8	6,9	16,1	60	7,8	1,4	7,7	0,44
Abluft	Temperatur [°C]	61	17,9	1,7	18,0	61	11,1	3,7	11,1	0,62
	relative Luftfeuchte [%]	61	59,8	4,7	58,9	nicht verwertbar				
	NH ₃ -Konzentration [ppm] *	27	24,8	8,9	29,6	27	12,6	3,0	12,1	0,50
	CO ₂ -Konzentration [ppm] *	60	1619,9	354,8	1558,3	60	842,1	128,5	829,0	0,52
	CH ₄ -Konzentration [ppm] *	60	16,4	4,4	15,5	60	5,0	1,1	5,2	0,30
	Volumenstrom [m ³ h ⁻¹ Tier ⁻¹] **	60	40,4	6,2	38,2	60	80,3	17,4	77,2	1,98
	Volumenstrom [m ³ h ⁻¹ GV ⁻¹] **	60	368,9	137,7	319,4	60	631,7	177,4	604,9	1,71
	NH ₃ -Emission [g d ⁻¹ Tier ⁻¹]	27	13,7	6,6	16,5	27	10,3	5,8	11,7	0,75
	NH ₃ -Emissionsrate [g d ⁻¹ GV ⁻¹]	27	100,4	23,9	110,6	27	67,5	21,4	70,3	0,67
	CO ₂ -Emission [kg d ⁻¹ Tier ⁻¹]	60	2,0	0,5	1,8	60	1,4	0,3	1,4	0,70
	CO ₂ -Emissionsrate [kg d ⁻¹ GV ⁻¹]	60	17,3	1,6	17,2	60	11,0	1,5	10,8	0,63
	CH ₄ -Emission [g d ⁻¹ Tier ⁻¹]	60	8,7	2,6	8,0	60	3,1	0,9	3,1	0,36
CH ₄ -Emissionsrate [g d ⁻¹ GV ⁻¹]	60	72,4	10,7	70,3	60	23,6	6,3	22,6	0,33	

* Abluftkonzentration System GK = gemittelt aus den drei Abluftschächten

** Volumenstrom GK = Summe aus den drei Abluftschächten

*** hochgerechnet auf 1 Jahr = 330 Stalltage

**** die Mittelwertunterschiede der Haltungssysteme sind bei $P < 0,05$ signifikant (U-Test nach Mann & Whitney)

Tab. A2-a: Zusammenfassung von Randbedingungen und Stallklimafaktoren im Mastdurchgang 2 (28.02.00-06.06.00; 100 Messtage) auf der Basis von selektierten Tagesmittelwerten (n = Anzahl verwertbarer Messtage)

Messstelle	Parameter	System VSP Vollspalten, Zwangslüftung			System GK Getrennte Klimabereiche, freie Lüftung			Verhältnis- faktor		
		n	Mittelwert/ +/- Standard- abweichung	Median	n	Mittelwert/ +/- Standard- abweichung	Median	Mittelwert GK : VSP **		
Außen	Temperatur T_a [°C]	68	13,3	4,7	13,0	68	13,3	4,7	13,0	
	relative Luftfeuchte [%]	66	77,1	12,3	76,8	66	77,1	12,3	76,8	
	Windgeschwindigkeit [m s ⁻¹] *	74	0,9	0,8	0,6	74	0,9	0,8	0,6	
	Windrichtung [°] *	74	243	35	241	74	243	35	241	
	NH ₃ -Konzentration [ppm]	64	1,9	1,2	2,0	62	1,9	0,9	2,3	
	CO ₂ -Konzentration [ppm]	60	423,3	16,5	422,6	64	436,9	26	431,0	
	CH ₄ -Konzentration [ppm]	64	2,7	1,1	2,5	64	2,2	0,6	2,3	
Innenraum	Temperatur T_i [°C]	68	21,1	1,4	20,9	68	13,8	4,0	13,7	0,65
	Temperaturdifferenz $T_i - T_a$	68	7,8	3,7	7,4	67	0,5	1,1	0,7	0,06
	relative Luftfeuchte [%]	68	50,0	5,2	50,0	68	71,8	10,8	71,7	1,42
	NH ₃ -Konzentration [ppm]	64	7,7	4,2	7,4	60	6,0	1,4	6,3	0,77 n.s.
	CO ₂ -Konzentration [ppm]	64	1509,5	435,2	1572,1	60	625,8	59,3	634,0	0,41
	CH ₄ -Konzentration [ppm]	64	6,5	2,8	6,3	60	3,0	0,4	2,9	0,46
	Stallbelegung [GV]	68	7,5	2,5	7,8	68	6,8	2,4	6,8	0,9 n.s.
Liegefläche 1	Temperatur [°C]	entfällt			48	22,5	2,4	22,7		
	relative Luftfeuchte [%]				48	54,8	8,9	54,6		
	NH ₃ -Konzentration [ppm]				60	12,4	4,6	12,3		
	CO ₂ -Konzentration [ppm]				60	1287,5	161,3	1321,5		
	CH ₄ -Konzentration [ppm]				60	5,5	1,5	5,2		
Liegefläche 2	Temperatur [°C]	entfällt			48	18,5	3,2	18,2		
	relative Luftfeuchte [%]				48	70,9	18,6	68,8		
	NH ₃ -Konzentration [ppm]				59	28,7	13,2	25,3		
	CO ₂ -Konzentration [ppm]				59	823,6	170	798,0		
	CH ₄ -Konzentration [ppm]				60	3,2	1,0	3,0		

* gemessen an der Zuluftöffnung des Systems GK; Windrichtungen: 0°/360° = Nord, 90° = Ost, 180° = Süd, 270° = West

** soweit nicht anders gekennzeichnet sind die Mittelwertunterschiede der Haltungssysteme bei $P < 0,05$ signifikant; n.s. = nicht signifikant (U-Test nach Mann & Whitney)

Tab. A2-b: Zusammenfassung von Randbedingungen und Emissionen im Mastdurchgang 2 (28.02.00-06.06.00; 100 Messtage) auf der Basis von selektierten Tagesmittelwerten (n = Anzahl verwertbarer Messtage)

Messstelle	Parameter	System VSP Vollspalten, Zwangslüftung			System GK Getrennte Klimabereiche, freie Lüftung			Verhältnis- faktor		
		n	Mittelwert/ +/- Standard- abweichung	Median	n	Mittelwert/ +/- Standard- abweichung	Median	Mittelwert GK : VSP ****		
Unter den Spalten	Temperatur [°C]	Vergleichbar mit Abluft			69	14,4	5,4			
	NH ₃ -Konzentration [ppm]	60	17,1	6,7	18,0	60	29,7	8,4	31,8	1,73
	CO ₂ -Konzentration [ppm]	60	1770,2	268,7	1738,7	59	996,2	408,5	891,9	0,56
	CH ₄ -Konzentration [ppm]	60	10,9	4,2	10,7	60	10,0	5,6	8,7	0,91 n.s.
Abluft	Temperatur [°C]	68	20,8	2,4	20,7	68	16,3	4,5	16,9	0,78
	relative Luftfeuchte [%]	62	56,5	6,2	56,2	68	66,1	10,1	64,4	1,16
	NH ₃ -Konzentration [ppm] *	62	21,4	3,3	21,4	64	10,6	4,5	9,7	0,49
	CO ₂ -Konzentration [ppm] *	64	1578,1	306,3	1549,7	64	813,0	100,5	830,7	0,51
	CH ₄ -Konzentration [ppm] *	64	13,4	2,6	13,1	64	4,3	0,8	4,3	0,32
	Volumenstrom [m ³ h ⁻¹ Tier ⁻¹] **	68	61,3	26,0	51,8	68	101,6	17,6	100,9	1,65
	Volumenstrom [m ³ h ⁻¹ GV ⁻¹] **	68	436,7	92,1	426,4	68	836,3	448,5	651,1	1,91
	NH ₃ -Emission [g d ⁻¹ Tier ⁻¹]	64	19,6	7,1	19,8	63	12,3	4,0	12,3	0,62
	NH ₃ -Emissionsrate [g d ⁻¹ GV ⁻¹]	64	149,9	14,6	147,5	63	96,3	19,5	98,1	0,64
	CO ₂ -Emission [kg d ⁻¹ Tier ⁻¹]	63	2,8	0,6	2,9	64	1,6	0,3	1,7	0,57
	CO ₂ -Emissionsrate [kg d ⁻¹ GV ⁻¹]	64	22,8	3,8	23,4	64	13,0	2,7	13,7	0,57
	CH ₄ -Emission [g d ⁻¹ Tier ⁻¹]	64	11,2	4,6	10,6	64	3,7	1,4	3,9	0,33
CH ₄ -Emissionsrate [g d ⁻¹ GV ⁻¹]	64	83,5	11,4	84,2	64	28,2	4,2	28,3	0,33	

* Abluftkonzentration System GK = gemittelt aus den drei Abluftschächten

** Volumenstrom GK = Summe aus den drei Abluftschächten

*** hochgerechnet auf 1 Jahr = 330 Stalltage

**** die Mittelwertunterschiede der Haltungssysteme sind bei $P < 0,05$ signifikant soweit nicht als n.s. (nicht signifikant) gekennzeichnet (U-Test nach Mann & Whitney)

Tab. A3-a: Zusammenfassung von Randbedingungen und Stallklimafaktoren im Mastdurchgang 3 (14.08.00-01.12.00; 110 Messtage) auf der Basis von selektierten Tagesmittelwerten (n = Anzahl verwertbarer Messtage)

Messstelle	Parameter	System VSP Vollspalten, Zwangslüftung			System GK Getrennte Klimabereiche, freie Lüftung			Verhältnis- faktor		
		n	Mittelwert/ +/- Standard- abweichung	Median	n	Mittelwert/ +/- Standard- abweichung	Median	Mittelwert GK : VSP **		
Außen	Temperatur T_a [°C]	73	12,8	4,1	12,8	73	12,8	4,1	12,8	
	relative Luftfeuchte [%]	73	82,9	11,0	81,8	73	82,9	11,0	81,8	
	Windgeschwindigkeit [m s ⁻¹] *	87	0,6	0,5	0,5	87	0,6	0,5	0,5	
	Windrichtung [°] *	87	240,4	36,4	238,5	87	240,4	36,4	238,5	
	NH ₃ -Konzentration [ppm]	69	3,0	1,3	2,6	69	2,9	1,2	2,7	
	CO ₂ -Konzentration [ppm]	74	428,0	19,8	428,9	74	448,7	30,6	443,9	
	CH ₄ -Konzentration [ppm]	74	3,9	1,4	3,6	74	3,5	1,4	3,2	
Innenraum	Temperatur T_i [°C]	73	22,5	1,4	22,0	73	16,8	3,3	16,8	0,74
	Temperaturdifferenz $T_i - T_a$	73	9,6	2,7	9,6	73	3,9	1,2	4,1	0,40
	relative Luftfeuchte [%]	69	53,5	4,6	54,3	73	66,9	6,1	67,5	1,25
	NH ₃ -Konzentration [ppm]	69	6,4	2,3	6,3	69	7,6	1,7	7,5	1,18
	CO ₂ -Konzentration [ppm]	74	1126,5	193,1	1122,2	74	648,1	48,0	644,8	0,57
	CH ₄ -Konzentration [ppm]	74	7,8	2,7	7,6	74	4,9	1,5	4,4	0,62
	Stallbelegung [GV]	74	6,6	2,4	6,7	74	6,4	2,3	6,4	0.97 n.s.
Liegefläche 1	Temperatur [°C]	entfällt			73	22,4	2,2	22,2		
	relative Luftfeuchte [%]				73	63,6	5,7	64,3		
	NH ₃ -Konzentration [ppm]				69	22,0	6,1	22,5		
	CO ₂ -Konzentration [ppm]				74	1003,5	140,0	978,8		
	CH ₄ -Konzentration [ppm]				74	8,9	2,5	8,8		
Liegefläche 2	Temperatur [°C]	entfällt			73	22,6	1,9	22,3		
	relative Luftfeuchte [%]				73	78,0	11,0	74,9		
	NH ₃ -Konzentration [ppm]				69	14,2	5,6	12,4		
	CO ₂ -Konzentration [ppm]				74	939,6	176,5	963,3		
	CH ₄ -Konzentration [ppm]				74	4,3	1,5	3,9		

* gemessen an der Zuluftöffnung des Systems GK; Windrichtungen: 0°/360° = Nord, 90° = Ost, 180° = Süd, 270° = West

** soweit nicht anders gekennzeichnet sind die Mittelwertunterschiede der Haltungssysteme bei $P < 0,05$ signifikant; n.s. = nicht signifikant (U-Test nach Mann & Whitney)

Tab. A3-b: Zusammenfassung von Randbedingungen und Emissionen im Mastdurchgang 3 (14.08.00-01.12.00; 110 Messtage) auf der Basis von selektierten Tagesmittelwerten (n = Anzahl verwertbarer Messtage)

Messstelle	Parameter	System VSP Vollspalten, Zwangslüftung			System GK Getrennte Klimabereiche, freie Lüftung			Verhältnis- faktor		
		n	Mittelwert/ +/- Standard- abweichung	Median	n	Mittelwert/ +/-Standard- abweichung	Median	Mittelwert GK : VSP ****		
Unter den Spalten	Temperatur [°C]	Vergleichbar mit Abluft			73	16,8	2,9	16,9		
	NH ₃ -Konzentration [ppm]	69	13,8	4,9	14,6	69	33,8	4,5	32,3	2,44
	CO ₂ -Konzentration [ppm]	74	1240,6	218,8	1260,6	74	873,2	128,6	847,3	0,70
	CH ₄ -Konzentration [ppm]	74	15,8	5,2	16,0	74	14,5	3,3	14,3	0,9
Abluft	Temperatur [°C]	73	21,5	1,8	21,3	64	17,8	3,1	18,1	0,82
	relative Luftfeuchte [%]	73	66,3	3,9	66,6	55	65,3	6,8	66,9	0,98 n.s.
	NH ₃ -Konzentration [ppm] *	69	17,7	5,4	19,2	69	10,8	2,6	11,6	0,61
	CO ₂ -Konzentration [ppm] *	74	1187,6	188,9	1220,7	74	785,1	65,7	793,0	0,66
	CH ₄ -Konzentration [ppm] *	74	18,9	5,1	19,6	74	6,5	1,7	6,4	0,34
	Volumenstrom [m ³ h ⁻¹ Tier ⁻¹] **	74	64,8	12,2	63,9	74	84,01	10,5	83,3	1,29
	Volumenstrom [m ³ h ⁻¹ GV ⁻¹] **	74	643,9	388,3	494,9	74	731,2	310,5	645,6	1,13
	NH ₃ -Emission [g d ⁻¹ Tier ⁻¹]	69	15,8	4,3	17,3	69	11,0	3,2	12,3	0,69
	NH ₃ -Emissionsrate [g d ⁻¹ GV ⁻¹]	69	134,0	22,7	131,9	69	86,4	15,9	85,5	0,64
	CO ₂ -Emission [kg d ⁻¹ Tier ⁻¹]	74	2,0	0,3	2,1	74	1,3	0,2	1,3	0,65
	CO ₂ -Emissionsrate [kg d ⁻¹ GV ⁻¹]	74	18,8	6,2	16,9	74	10,6	2,9	10,0	0,56
	CH ₄ -Emission [g d ⁻¹ Tier ⁻¹]	74	15,4	3,2	16,5	74	4,5	1,0	4,6	0,29
CH ₄ -Emissionsrate [g d ⁻¹ GV ⁻¹]	74	134,6	31,3	134,1	74	35,9	8,0	36,8	0,26	

* Abluftkonzentration System GK = gemittelt aus den drei Abluftschächten

** Volumenstrom GK = Summe aus den drei Abluftschächten

*** hochgerechnet auf 1 Jahr = 330 Stalltage

**** die Mittelwertunterschiede der Haltungssysteme sind bei $P < 0,05$ signifikant soweit nicht als n.s. (nicht signifikant) gekennzeichnet (U-Test nach Mann & Whitney)

Tab. A4-a: Zusammenfassung von Randbedingungen und Stallklimafaktoren im Mastdurchgang 4 (15.01.01-27.04.01; 102 Messtage) auf der Basis von selektierten Tagesmittelwerten (n = Anzahl verwertbarer Messtage)

Messstelle	Parameter	System VSP Vollspalten, Zwangslüftung			System GK Getrennte Klimabereiche, freie Lüftung			Verhältnis- faktor		
		n	Mittelwert/ +/- Standard- abweichung	Median	n	Mittelwert/ +/- Standard- abweichung	Median	Mittelwert GK : VSP **		
Außen	Temperatur T_a [°C]	64	6,7	4,5	7,1	64	6,7	4,5	7,1	
	relative Luftfeuchte [%]	64	77,7	9,6	77,8	64	77,7	9,6	77,8	
	Windgeschwindigkeit [m s ⁻¹] *	75	1,2	1,0	1,0	75	1,2	1,0	1,0	
	Windrichtung [°] *	75	233,2	31,7	233,7	75	233,2	31,7	233,7	
	NH ₃ -Konzentration [ppm]	62	3,9	1,9	3,1	62	5,1	1,9	4,7	
	CO ₂ -Konzentration [ppm]	22	454,9	29,4	447,8	22	523,6	49,3	526,1	
	CH ₄ -Konzentration [ppm]	22	4,1	0,9	3,9	22	2,9	0,4	3,0	
Innenraum	Temperatur T_i [°C]	64	21,9	0,9	21,9	64	11,8	3,3	10,9	0,53
	Temperaturdifferenz $T_i - T_a$	64	15,2	3,9	14,8	64	5,1	1,6	5,1	0,33
	relative Luftfeuchte [%]	64	41,8	3,6	41,5	64	66,2	7,7	65,4	1,58
	NH ₃ -Konzentration [ppm]	62	10,3	3,3	9,9	62	9,0	2,8	8,2	0,87
	CO ₂ -Konzentration [ppm]	22	1606,2	124,5	1631,3	22	629,3	54,1	627,5	0,39
	CH ₄ -Konzentration [ppm]	22	8,3	1,7	8,3	22	3,1	0,4	3,0	0,37
	Stallbelegung [GV]	64	7,3	2,4	7,7	64	6,4	2,1	6,8	0,87
Liegefläche 1	Temperatur [°C]	entfällt			61	21,3	2,4	21,2		
	relative Luftfeuchte [%]				61	45,8	2,8	45,3		
	NH ₃ -Konzentration [ppm]				62	14,2	4,3	14,2		
	CO ₂ -Konzentration [ppm]				22	1098,0	119,5	1067,7		
	CH ₄ -Konzentration [ppm]				22	4,7	0,6	4,5		
Liegefläche 2	Temperatur [°C]	entfällt			61	16,1	3,3	16,2		
	relative Luftfeuchte [%]				61	98,1	3,7	100		
	NH ₃ -Konzentration [ppm]				62	30,7	15,4	24,9		
	CO ₂ -Konzentration [ppm]				22	656,5	58,1	638,7		
	CH ₄ -Konzentration [ppm]				22	2,9	0,4	3,0		

* gemessen an der Zuluftöffnung des Systems GK; Windrichtungen: 0°/360° = Nord, 90° = Ost, 180° = Süd, 270° = West

** die Mittelwertunterschiede der Haltungssysteme sind bei $P < 0,05$ signifikant (U-Test nach Mann & Whitney)

Tab. A4-b: Zusammenfassung von Randbedingungen und Emissionen im Mastdurchgang 4 (15.01.01-27.04.01; 102 Messtage) auf der Basis von selektierten Tagesmittelwerten (n = Anzahl verwertbarer Messtage)

Messstelle	Parameter	System VSP Vollspalten, Zwangslüftung			System GK Getrennte Klimabereiche, freie Lüftung			Verhältnis- faktor		
		n	Mittelwert/ +/- Standard- abweichung	Median	n	Mittelwert/ +/-Standard- abweichung	Median	Mittelwert GK : VSP ****		
Unter den Spalten	Temperatur [°C]	Vergleichbar mit Abluft			60	10,9	3,5	10,2		
	NH ₃ -Konzentration [ppm]	62	23,3	5,2	23,8	62	24,6	7,9	25,5	1,05 n.s.
	CO ₂ -Konzentration [ppm]	22	1598,5	138,4	1617,9	22	639,3	52,4	649,3	0,39
	CH ₄ -Konzentration [ppm]	22	14,5	3,1	14,1	22	4,9	1,0	4,8	0,33
Abluft	Temperatur [°C]	64	19,3	1,4	19,5	64	13,0	3,1	12,3	0,67
	relative Luftfeuchte [%]	64	58,6	4,5	58,9	64	70,4	8,6	70,0	1,20
	NH ₃ -Konzentration [ppm] *	62	22,6	4,8	22,4	62	12,0	3,8	10,4	0,53
	CO ₂ -Konzentration [ppm] *	22	1475,9	152,1	1492,4	22	742,0	58,5	748,7	0,50
	CH ₄ -Konzentration [ppm] *	22	12,7	2,7	12,3	22	3,9	0,4	4,0	0,30
	Volumenstrom [m ³ h ⁻¹ Tier ⁻¹] **	64	51,1	13,6	50,9	64	90,8	21,1	88,2	1,77
	Volumenstrom [m ³ h ⁻¹ GV ⁻¹] **	64	393,6	82,0	369,8	64	748,1	252,8	713,7	1,9
	NH ₃ -Emission [g d ⁻¹ Tier ⁻¹]	62	16,3	5,3	18,7	62	12,0	4,5	10,3	0,73
	NH ₃ -Emissionsrate [g d ⁻¹ GV ⁻¹]	62	117,9	15,7	118,4	62	92,7	26,7	99,8	0,78
	CO ₂ -Emission [kg d ⁻¹ Tier ⁻¹]	22	1,6	0,3	1,6	22	0,9	0,2	0,9	0,56
	CO ₂ -Emissionsrate [kg d ⁻¹ GV ⁻¹]	22	19,8	1,2	20,0	22	11,9	0,5	11,9	0,6
	CH ₄ -Emission [g d ⁻¹ Tier ⁻¹]	22	5,9	1,9	5,5	22	1,4	0,6	1,3	0,24
CH ₄ -Emissionsrate [g d ⁻¹ GV ⁻¹]	22	68,7	8,0	71,6	22	17,8	4,3	18,5	0,26	

* Abluftkonzentration System GK = gemittelt aus den drei Abluftschächten

** Volumenstrom GK = Summe aus den drei Abluftschächten

*** hochgerechnet auf 1 Jahr = 330 Stalltage

**** die Mittelwertunterschiede der Haltungssysteme sind bei $P < 0,05$ signifikant soweit nicht als n.s. (nicht signifikant) gekennzeichnet (U-Test nach Mann & Whitney)

Tab. A5-a: Signifikanzen des paarweisen Mittelwertvergleiches von vier Mastdurchgängen von den Randbedingungen und Stallklimafaktoren (U-Test nach Mann & Whitney)

Mess- stelle	Parameter	System VSP Vollspalten, Zwangslüftung						System GK Getrennte Klimabereiche, freie Lüftung					
		Vergleich Mastdurchgang Nr.		1; 2	1; 3	1; 4	2; 3	2; 4	3; 4	1; 2	1; 3	1; 4	2; 3
Außen	Temperatur T_a [°C]	***	***	n.s.	n.s.	***	***	***	***	n.s.	n.s.	***	***
	relative Luftfeuchte [%]	***	n.s.	***	**	n.s.	*	***	n.s.	***	**	n.s.	*
	Windgeschwindigkeit [m s ⁻¹]	**	n.s.	***	n.s.	n.s.	***	**	n.s.	***	n.s.	n.s.	***
	Windrichtung [°]	***	***	***	n.s.	n.s.	n.s.	***	***	***	n.s.	n.s.	n.s.
	NH ₃ -Konzentration [ppm]	***	***	**	***	***	*	***	***	n.s.	***	***	***
	CO ₂ -Konzentration [ppm]	*	n.s.	**	n.s.	***	***	***	***	n.s.	**	***	***
	CH ₄ -Konzentration [ppm]	***	*	**	***	***	n.s.	***	n.s.	**	***	***	n.s.
Innen- raum	Temperatur T_i [°C]	***	***	***	***	***	*	***	***	***	***	*	***
	Temperaturdifferenz $T_i - T_a$	***	***	*	***	***	***	***	n.s.	***	***	***	***
	relative Luftfeuchte [%]	***	n.s.	***	***	***	***	n.s.	***	***	**	*	n.s.
	NH ₃ -Konzentration [ppm]	***	***	**	n.s.	***	***	***	***	*	***	***	*
	CO ₂ -Konzentration [ppm]	***	***	**	***	n.s.	***	***	***	***	n.s.	n.s.	n.s.
	CH ₄ -Konzentration [ppm]	***	***	*	***	***	n.s.	***	**	***	***	n.s.	***
	Stallbelegung [GV]	n.s.	n.s.	*	*	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
Liege- fläche 1	Temperatur [°C]	entfällt						***	***	***	n.s.	*	**
	relative Luftfeuchte [%]							***	***	n.s.	***	***	***
	NH ₃ -Konzentration [ppm]							***	**	***	***	*	***
	CO ₂ -Konzentration [ppm]							n.s.	***	n.s.	***	***	**
	CH ₄ -Konzentration [ppm]							n.s.	***	*	***	n.s.	***
Liege- fläche 2	Temperatur [°C]	entfällt						**	***	n.s.	***	***	***
	relative Luftfeuchte [%]							n.s.	***	***	**	***	***
	NH ₃ -Konzentration [ppm]							n.s.	***	n.s.	***	n.s.	***
	CO ₂ -Konzentration [ppm]							n.s.	*	***	*	***	***
	CH ₄ -Konzentration [ppm]							***	n.s.	***	n.s.	n.s.	***
n.s.	nicht signifikant (P > 0,05)												
*	signifikant (P ≤ 0,05)												
**	sehr signifikant (P ≤ 0,01)												
***	höchst signifikant (P ≤ 0,001)												

Tab. A5-b: Signifikanzen des paarweisen Mittelwertvergleiches von vier Mastdurchgängen von den Randbedingungen und Emissionen (U-Test nach Mann & Whitney)

Mess- stelle	Parameter	System VSP Vollspalten, Zwangslüftung						System GK Getrennte Klimabereiche, freie Lüftung						
		Vergleich Mastdurchgang Nr.	1; 2	1; 3	1; 4	2; 3	2; 4	3; 4	1; 2	1; 3	1; 4	2; 3	2; 4	3; 4
Unter den Spalten	Temperatur [°C]	vergleichbar mit Abluft						---	---	---	*	***	***	
	NH ₃ -Konzentration [ppm]	***	***	n.s.	*	***	***	n.s.	n.s.	***	*	***	***	
	CO ₂ -Konzentration [ppm]	**	***	***	***	**	***	n.s.	*	***	n.s.	***	***	
	CH ₄ -Konzentration [ppm]	***	n.s.	n.s.	***	***	n.s.	n.s.	***	***	***	***	***	
Abluft	Temperatur [°C]	***	***	***	*	***	***	***	***	**	n.s.	***	***	
	relative Luftfeuchte [%]	**	***	n.s.	***	*	***	---	---	---	n.s.	**	**	
	NH ₃ -Konzentration [ppm]	n.s.	***	n.s.	***	n.s.	***	**	*	n.s.	n.s.	*	n.s.	
	CO ₂ -Konzentration [ppm]	n.s.	***	n.s.	***	n.s.	***	n.s.	**	***	***	***	*	
	CH ₄ -Konzentration [ppm]	***	**	***	***	n.s.	***	***	***	**	***	**	***	
	Volumenstrom [m ³ h ⁻¹ Tier ⁻¹]	***	***	***	n.s.	n.s.	***	***	**	***	***	***	*	
	Volumenstrom [m ³ h ⁻¹ GV ⁻¹]	***	***	*	**	**	***	*	n.s.	*	n.s.	n.s.	n.s.	
	NH ₃ -Emission [g d ⁻¹ Tier ⁻¹]	***	n.s.	*	**	**	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	
	NH ₃ -Emissionsrate [g d ⁻¹ GV ⁻¹]	***	***	***	***	***	***	***	***	***	***	***	n.s.	**
	CO ₂ -Emission [kg d ⁻¹ Tier ⁻¹]	***	n.s.	**	***	***	***	*	*	***	***	***	***	
	CO ₂ -Emissionsrate [kg d ⁻¹ GV ⁻¹]	***	n.s.	***	***	**	*	***	*	***	***	n.s.	***	
	CH ₄ -Emission [g d ⁻¹ Tier ⁻¹]	**	***	***	***	***	***	*	***	***	*	***	***	
CH ₄ -Emissionsrate [g d ⁻¹ GV ⁻¹]	***	***	n.s.	***	**	***	***	***	***	***	***	n.s.	***	

n.s. nicht signifikant (P > 0,05)
 * signifikant (P ≤ 0,05)
 ** sehr signifikant (P ≤ 0,01)
 *** höchst signifikant (P ≤ 0,001)

Tab. A6: Vergleich von Randbedingungen und Staubkonzentrationen mehrerer 24 h-Messungen in den Haltungssystemen Vollspalten, Zwangslüftung (VSP) und Getrennte Klimabereiche, freie Lüftung (GK)

Datum, Masttag	Haltungssystem, (Stallbelegung in GV)	Partikelgröße < [μm] (PM *)	Tagesmittelwert **, (Minimum-Maximum) Staubkonzentration [mg m^{-3}]		Tagesmittelwerte			
					Innenraum		Volumenstrom	
					Temperatur [$^{\circ}\text{C}$]	relative Luftfeuchte [%]	[$\text{m}^3 \text{h}^{-1} \text{Tier}^{-1}$] bzw. [$\text{m}^3 \text{h}^{-1} \text{GV}^{-1}$]	
Mastdurchgang 1	18.10.99 Masttag 1	VSP (3,5)	10	0,22 (0,02-2,87)	19	42	38	586
			2,5	0,09 (0,02-0,73)				
		1,0	0,13 (0,03-1,86)	11	52	60	847	
	GK (3,4)	10	0,14 (0,02-1,45)					
	26.10.99 Masttag 9	VSP (4,3)	2,5	0,06 (0,02-0,48)	22	57	45	565
			1,0	0,07 (0,02-0,45)				
30.12.99 Masttag 74	GK (8,7)	10	0,40 (0,07-4,84)	16	70	76	890	
		2,5	0,10 (0,03-1,44)					
	VSP	---	---	---	---	---	---	
		GK (8,7)	10	0,24 (0,04-1,33)	5	78	101	557
Mastdurchgang 2	16.03.00 Masttag 17	VSP (4,5)	10	0,40 (0,09-2,30)	18	49	35	420
			2,5	0,12 (0,04-0,43)				
	06.04.00 Masttag 38	GK (5,8)	10	0,63 (0,12-3,81)	20	52	37	303
			2,5	0,18 (0,03-1,37)				
	20.04.00 Masttag 52	VSP (8,0)	10	0,15 (0,02-1,61)	9	65	89	737
			2,5	0,11 (0,01-1,18)				
	01.06.00 Masttag 94	GK (6,9)	10	0,33 (0,04-3,45)	22	44	75	506
			2,5	0,22 (0,04-2,35)				
		VSP (11,0)	10	0,20 (0,04-2,43)	16	57	104	723
			2,5	0,09 (0,02-0,97)				
		GK (10,2)	10	0,34 (0,03-2,46)	26	49	86	422
			1,0	0,13 (0,03-1,22)				
	VSP (11,0)	10	0,14 (0,02-2,03)	24	64	97	456	
		1,0	0,05 (0,01-0,89)					
Mastdurchgang 3	14.09.00 Masttag 21	VSP (4,5)	10	0,17 n.s. (0,05-2,69)	25	58	80	960
			1,0	0,08 n.s. (0,03-0,70)				
	03.11.00 Masttag 81	GK (4,4)	10	0,15 n.s. (0,06-1,32)	21	67	78	851
			1,0	0,06 n.s. (0,04-0,43)				
	23.11.00 Masttag 101	VSP (9,2)	10	0,52 (0,08-2,93)	21	52	61	358
			2,5	0,18 (0,02-2,52)				
	GK (8,7)	10	0,62 (0,08-7,83)	15	70	83	458	
		1,0	0,13 (0,01-1,80)					
	VSP (10,4)	10	0,21 (0,03-1,31)	15	61	90	424	
		1,0	0,07 (0,02-0,45)					
Mastdurchgang 4	25.01.01 Masttag 10	VSP (3,6)	10	0,44 (0,06-3,72)	21	50	35	525
			2,5	0,11 (0,01-1,21)				
	14.02.01 Masttag 30	GK (3,0)	10	0,12 (0,00-1,37)	11	69	75	1200
			2,5	0,03 (0,00-0,36)				
	09.03.01 Masttag 53	VSP (5,5)	10	0,57 (0,10-5,04)	23	42	38	373
			2,5	0,20 (0,06-1,11)				
	19.04.01 Masttag 94	GK (4,7)	10	0,24 (0,04-2,02)	11	60	82	837
			2,5	0,08 (0,04-0,58)				
	VSP (7,7)	10	0,46 (0,06-3,98)	23	45	57	400	
		10	0,16 (0,01-2,06)					
	GK (6,8)	10	0,16 (0,01-2,06)	16	62	96	678	
		10	0,16 (0,01-2,06)					
	VSP (11,2)	10	0,91 (0,14-8,65)	21	38	57	275	
		10	0,91 (0,14-8,65)					
	GK (9,7)	10	0,25 (0,04-4,10)	10	63	84	416	
		10	0,25 (0,04-4,10)					

* PM = Particulate Matter (Vgl. Kap. 2.3); ** Mittelwertunterschiede waren zwischen den Haltungssystemen bei $P < 0,05$ signifikant, soweit nicht anders gekennzeichnet

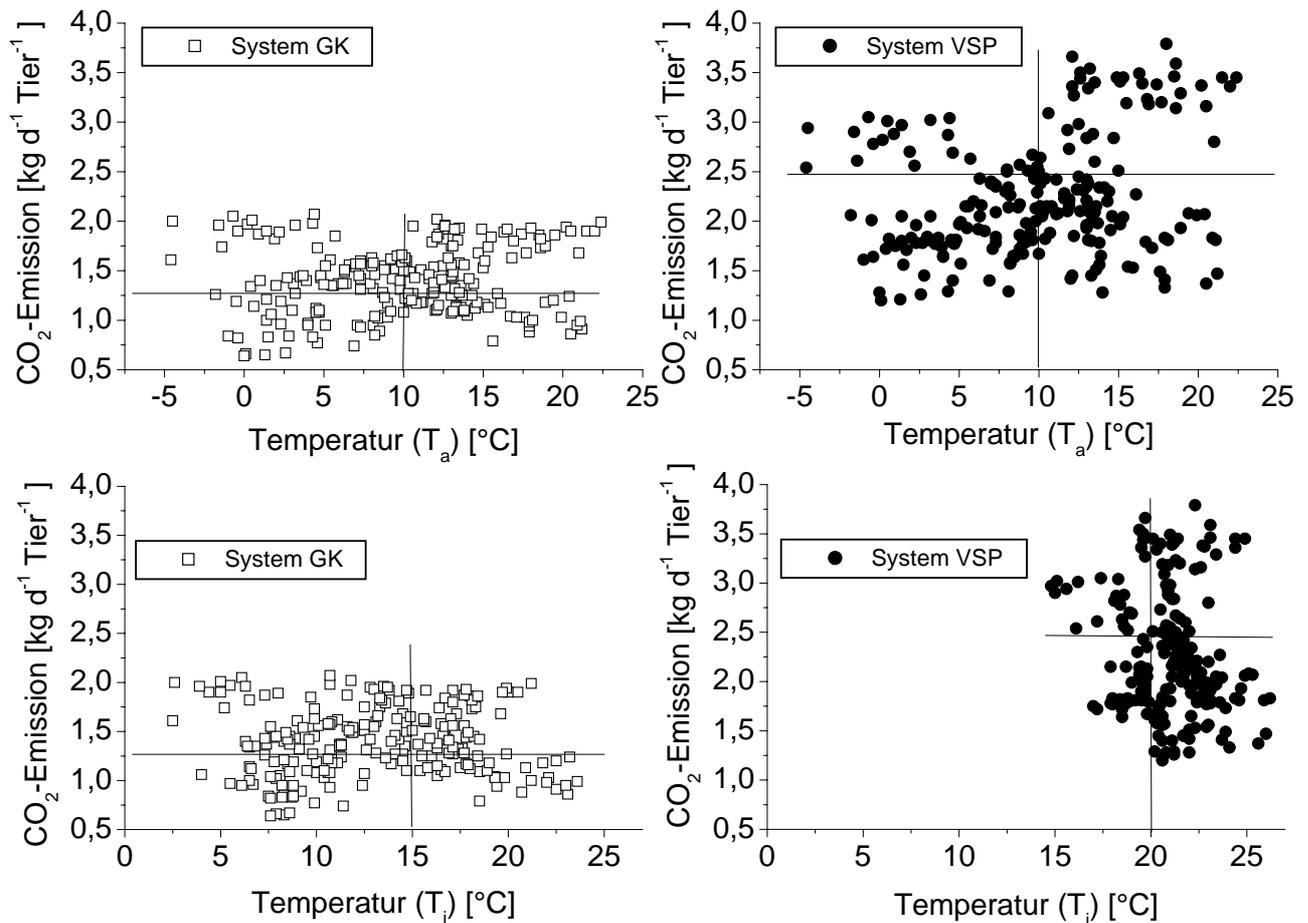


Abb. A1: Vergleich des Einflusses der Außentemperatur (T_a) (obere Grafik) und Innenraumtemperatur (T_i) (untere Grafik) auf die absoluten CO_2 -Emissionen pro Tier (Datenbasis: selektierte Tagesmittelwerte aus vier Mastdurchgängen) zwischen den Haltungssystemen VSP (Vollspalten, Zwangslüftung) und GK (Getrennte Klimabereiche, freie Lüftung)

Die eingezeichneten Hilfslinien teilen die Messpunkte an der Hälfte des jeweiligen Messbereiches (X- und Y-Achse).

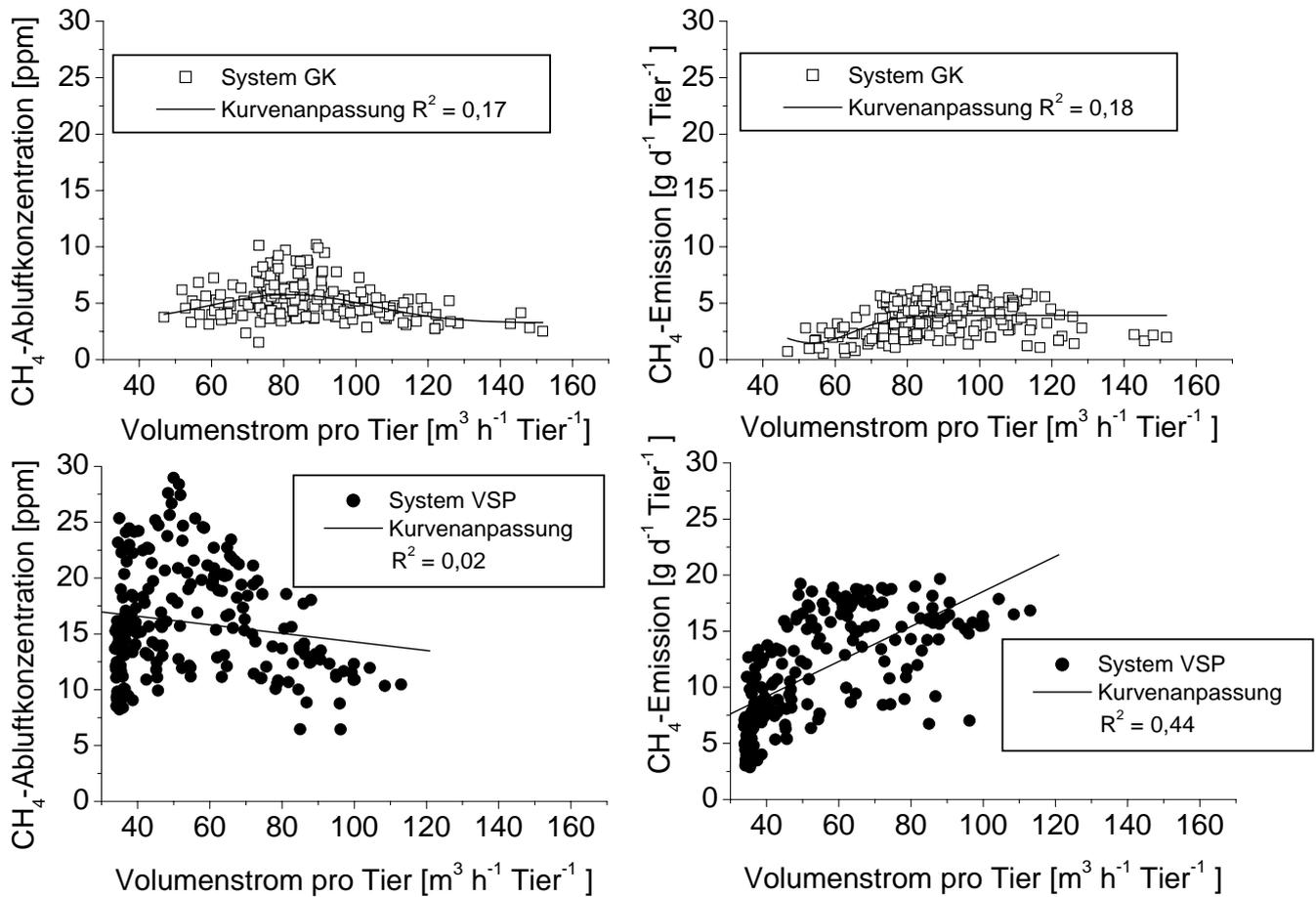


Abb. A2: Vergleich des Einflusses des Volumenstromes auf die CH₄-Abluftkonzentration und die absoluten CH₄-Emissionen pro Tier (Datenbasis: selektierte Tagesmittelwerte aus vier Mastdurchgängen) zwischen den Haltungssystemen VSP (Vollspalten, Zwangslüftung) und GK (Getrennte Klimabereiche, freie Lüftung)

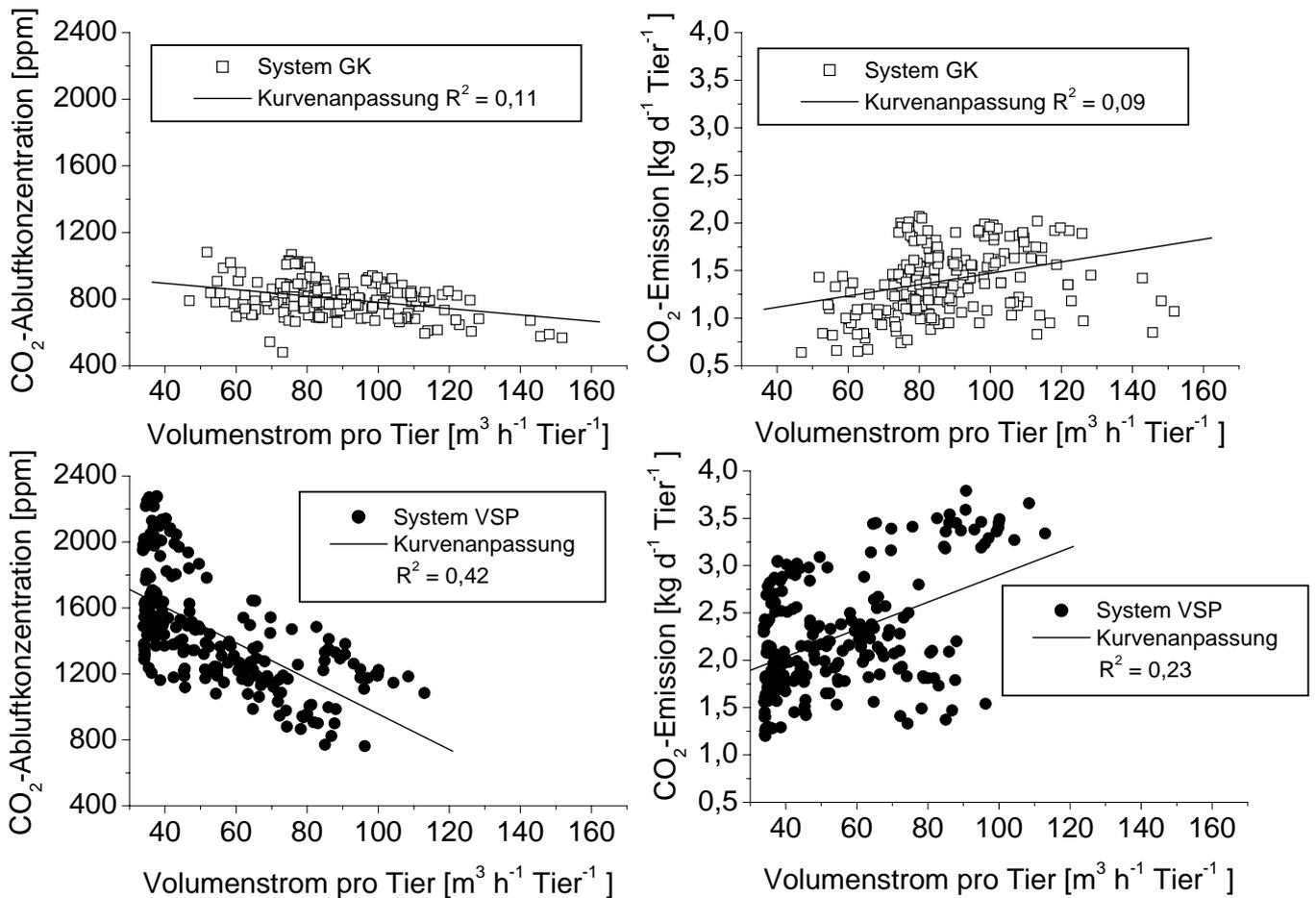


Abb. A3: Vergleich des Einflusses des Volumenstromes auf die CO₂-Abluftkonzentration und die absoluten CO₂-Emissionen pro Tier (Datenbasis: selektierte Tagesmittelwerte aus vier Mastdurchgängen) zwischen den Haltungssystemen VSP (Vollspalten, Zwangslüftung) und GK (Getrennte Klimabereiche, freie Lüftung)