

**Lehrstuhl für Landtechnik der Technischen Universität
München**

**Vergleich klima- und umweltrelevanter Emissionen aus
Haltungssystemen für Mastschweine**

Dipl.-Ing. agr. (Univ.) Barbara Rathmer

Vollständiger Abdruck der von der Fakultät Wissenschaftszentrum Weihenstephan für Ernährung, Landnutzung und Umwelt der Technischen Universität München zur Erlangung des akademischen Grades eines Doktors der Agrarwissenschaften (Dr. agr.) genehmigten Dissertation.

Vorsitzender: Univ.-Prof. Dr. H.-R. Fries

Prüfer der Dissertation:

1. Univ.-Prof. Dr. Dr. h.c. (AE Keszthely) J. Schön
2. Univ.-Prof. Dr. U. Schmidhalter

Die Dissertation wurde am 27.09.2001 bei der Technischen Universität München eingereicht und durch die Fakultät Wissenschaftszentrum Weihenstephan für Ernährung, Landnutzung und Umwelt am 05.11.2001 angenommen.

**Für
Volker**

Danksagung

An dieser Stelle danke ich allen, die zum Gelingen und zum Abschluss dieser Arbeit beigetragen haben.

Bei Professor Hans Schön bedanke ich mich für die Überlassung des Themas, die Betreuung und Unterstützung. Professor Schmidhalter danke ich für die Übernahme des Koreferates.

Ganz herzlich danken möchte ich den Kollegen und ehemaligen Kollegen der Abteilung „Umwelttechnik der Landnutzung“ an der Landtechnik Weihenstephan, namentlich Dipl.-Ing. agr. Walter Grotz, Dr. agr. Stefan Nesor, Dr. Ing. Georg Depta, Dipl.-Ing. agr. Silvia Schattner, Dipl.-Ing. Barbara Maier, Dr. rer. nat. Gisbert Riess, Dipl.-Ing. (FH) Sabine Becher und den studentischen Hilfskräften, hier stellvertretend Karin Rattinger, Michaela Ludl und Dipl.-Ing. agr. Uwe Steffin, für die Hilfsbereitschaft bei fachlichen Fragen und größeren oder kleineren technischen Problemen. Für die gute Zusammenarbeit im Rahmen des dieser Arbeit zu Grunde liegenden Projektes möchte ich mich bei Dipl.-Ing. agr. Norbert Hornauer, Martin Freiberger und Dr. agr. Bernhard Haidn (Abteilung Verfahrenstechnik der Nutztierhaltung, LTW) bedanken.

Ich danke Dr. agr. Andreas Gronauer für die Betreuung dieser Arbeit und die ständige Bereitschaft zur Diskussion. Durch seine kritischen Anregungen ergaben sich bis zuletzt immer neue Ansätze.

Für die guten Zusammenarbeit und Unterstützung danke ich an dieser Stelle der Abteilung Messtechnik, Dr. agr. Hans Stanzel und Herrn Dallinger, sowie der Werkstatt und Konstruktionsabteilung, Herrn Stadler und Dipl.-Ing. (FH) Rödel.

Der Familie Sedlmair danke ich für die gute Zusammenarbeit und das Vertrauen bei der Durchführung der Versuche und Messungen auf ihrem Betrieb.

Für die Finanzierung des Projektes möchte ich mich beim Bayerischen Staatsministerium für Landesentwicklung und Umweltfragen sowie bei der Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung bedanken.

Meinem Mann Volker und meiner ganzen Familie gebührt der größte Dank für die geduldige Unterstützung.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung.....	1
2	Stand des Wissens.....	3
2.1	Verschiedene Haltungssysteme in der Mastschweinehaltung.....	3
2.2	Messmethoden.....	7
2.2.1	Anforderungen an Messungen zur Emissionsratenbestimmung.....	7
2.2.1.1	Dauermessungen in der Mastschweinehaltung.....	8
2.2.1.2	Dauermessketten im Praxiseinsatz.....	9
2.2.1.3	Spezielle technische Anforderungen an Dauermesseinrichtungen in Ställen...	10
2.2.2	Messmethoden zur Volumenstrombestimmung.....	11
2.2.2.1	Bilanzmethoden.....	12
2.2.2.2	Tracergasmethode.....	17
2.2.2.3	Kammertechniken.....	20
2.2.2.4	Differenzdruckmethode.....	21
2.2.3	Messmethoden zur Multigasanalyse.....	22
2.2.3.1	NDIR (Nichtdispersive Infrarot-Spektroskopie).....	24
2.2.3.2	Photoakustische Infrarot-Spektroskopie PAS.....	25
2.2.3.3	Fouriertransformierte Infrarotspektroskopie (FTIR).....	26
2.2.3.4	Einsatz der Multigasmesstechnik in der Literatur.....	29
2.3	Bekannte Emissionsraten aus der Mastschweinehaltung.....	32
2.3.1	Ammoniak-Emissionsraten.....	32
2.3.2	Lachgas-Emissionsraten.....	34
2.3.3	Methan-Emissionsraten.....	36
2.4	Gasemissionen aus dem Stall.....	37
2.4.1	Ammoniak (NH ₃):.....	38
2.4.2	Methan (CH ₄):.....	41
2.4.3	Distickstoffoxid (N ₂ O):.....	43
2.4.4	Kohlendioxid (CO ₂):.....	44
2.5	Modell zur Emissionsratenermittlung.....	46
3	Zielsetzung.....	47
4	Material und methodisches Vorgehen.....	49
4.1	Versuchsställe.....	49
4.1.1	Adaption der Versuchsabteile im Außenklimastall.....	49
4.1.2	Adaption der Versuchsabteile im konventionellen Warmstall.....	51
4.2	Errichtung einer Dauermesskette.....	51
4.3	Messung von Einflussfaktoren und Randparametern.....	54
4.4	Untersuchungszeiträume.....	59
4.5	Statistische Auswertung.....	60
5	Entwicklung und Überprüfung einer Methode zur kontinuierlichen Messung von Emissionsraten aus Außenklimaställen für Mastschweine.....	62
5.1	Gaskonzentrationsmessung mit Photoakustischer Infrarot-Spektroskopie.....	62
5.1.1	Adaption der Messtechnik.....	64
5.1.2	Kalibration des Messgerätes.....	65
5.1.3	Qualitätssicherung der Gaskonzentrationsmesstechnik.....	67
5.1.3.1	Methodik der Linearitätsüberprüfung der optischen Filter.....	69
5.1.3.2	Methodik der Überprüfung im Labor.....	69
5.1.3.3	Methodik der Überprüfung im Feldversuch mit FTIR-Spektroskopie.....	70

5.1.4	Ergebnisse der Qualitätssicherung der Gaskonzentrationsmesstechnik	71
5.1.4.1	Linearität der optischen Filter	71
5.1.4.2	Ergebnisse der Laborüberprüfung	72
5.1.4.3	Ergebnisse der Praxisüberprüfung	74
5.2	Volumenstrommessung	75
5.2.1	Volumenstrombestimmung im Warmstall	75
5.2.2	Volumenstrombestimmung in den Außenklima-Versuchsabteilungen	78
5.2.2.1	Kapselung und Regelung; Prinzip einer großen dynamischen Kammer	78
5.2.2.2	Kalibration der Messventilatoren	80
5.2.3	Qualitätssicherung der Volumenstrommessung	82
5.2.4	Ergebnisse der Validierung der Methode der Kapselung der Außenklima- Versuchsabteile	83
5.2.4.1	Vergleich stallklimatischer Kenngrößen	83
5.2.4.2	Vergleich der Soll- und Isttemperaturen der Temperaturregelung	84
5.2.4.3	Punktuelle Vergleich der Strömungsgeschwindigkeiten und -richtungen	85
6	Emissionsraten der untersuchten Haltungssysteme	91
6.1	Emissionsraten aus den untersuchten Mastdurchgängen	91
6.1.1	Tiergewichte	91
6.1.2	Temperaturen	93
6.1.3	Gaskonzentrationen	95
6.1.3.1	Ammoniak	95
6.1.3.2	Methan	97
6.1.3.3	Lachgas	99
6.1.3.4	Kohlendioxid	101
6.1.3.5	Wasser	104
6.1.4	Volumenströme	106
6.1.5	Emissionsraten	110
6.1.5.1	Ammoniak	110
6.1.5.1.1	Gründe für die hohen NH ₃ -Emissionsraten aus dem Warmstall mit Teilspaltenboden	112
6.1.5.1.2	Vergleich der gemessenen NH ₃ -Emissionsraten aus dem Warmstall mit modellierten NH ₃ -Emissionsraten	114
6.1.5.1.3	Diurnale Effekte der NH ₃ -Emissionen	116
6.1.5.2	Methan	117
6.1.5.3	Lachgas	120
6.1.5.4	Kohlendioxid	122
6.1.5.4.1	Vergleich der CO ₂ -Emissionsraten mit CO ₂ -Produktionsmodellen aus der Literatur	124
6.1.5.5	Wasser	126
6.2	Quantifizierung der Einflussfaktoren auf die Emissionsraten	129
6.2.1	Ammoniak	132
6.2.1.1	Temperatur	132
6.2.1.2	Volumenstrom	134
6.2.1.3	Zeit nach dem Einstellen	135
6.2.1.4	Haltungssystem und Mastdurchgang	136
6.2.1.5	Allgemeines Lineares Modell für NH ₃	137
6.2.1.5.1	Vergleich der modellierten mit den gemessenen NH ₃ -Emissionsraten	139
6.2.1.5.2	Abschätzung mittlerer NH ₃ -Emissionsraten	139
6.2.1.5.3	Vergleich mit NH ₃ -Emissionsraten aus der Literatur	143
6.2.2	Methan	143

6.2.2.1	Allgemeines lineares Modell	144
6.2.2.1.1	Vergleich der modellierten mit den gemessenen CH ₄ -Emissionsraten	145
6.2.2.1.2	Abschätzung mittlerer CH ₄ -Emissionsraten	145
6.2.2.1.3	Vergleich mit CH ₄ -Emissionsraten aus der Literatur	147
6.2.3	Lachgas	148
6.2.4	Kohlendioxid	148
6.2.4.1	Allgemeines lineares Modell	148
6.2.4.1.1	Vergleich der modellierten mit den gemessenen CO ₂ -Emissionsraten	149
6.2.4.1.2	Abschätzung mittlerer CO ₂ -Emissionsraten	150
6.2.4.1.3	Vergleich mit CO ₂ -Emissionsraten aus der Literatur	155
6.3	Vergleich der mittleren modellierten und gemessenen Emissionsraten	155
7	Schlussfolgerungen	158
8	Zusammenfassung und Ausblick	163
9	Summary	170
10	Literatur	174
11	Anhang	185

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Mittlere Tagesverläufe der standardisierten Ammoniak-Emissionen und Häufigkeit des Harnens von 36 Schweinen (AARNINK ET AL., 1997)	9
Abbildung 2: Modell eines Spektrometers zur Gasanalyse (STAAB, 1994).....	24
Abbildung 3: Schematische Darstellung des Michelson-Interferometers (nach GRIFFITHS UND HASETH, 1986) .	26
Abbildung 4: Absorptionsspektrum (nach RUSSWURM UND CHILDERS, 1996)	28
Abbildung 5: Schematischer Aufbau des Spektroskops K300: Strahlengang und Gaszelle (nach KAYSER-THREDE, 1994)	29
Abbildung 6: NH ₃ -Emissionsraten aus zwangsentlüfteten Mastschweinehaltungssystemen (Warmställe): Teilspaltenboden, Schrägmist und eingestreute Systeme (Literaturübersicht)	33
Abbildung 7: NH ₃ -Emissionsraten aus freigelüfteten Mastschweinehaltungssystemen (Außenklimaställe).....	33
Abbildung 8: N ₂ O-Emissionsraten aus aus zwangsentlüfteten Mastschweinehaltungssystemen (Warmställe): Vollspaltenboden-, Tiefstreu- und Kompoststall	35
Abbildung 9: N ₂ O-Emissionsraten aus freigelüfteten Mastschweinehaltungssystemen (Außenklimaställe).....	35
Abbildung 10: CH ₄ -Emissionsraten aus zwangsentlüfteten Mastschweinehaltungssystemen (Warmställe): Vollspaltenboden-, Teilspaltenboden-, Tiefstreu-, Schrägmist- und Kompoststall	36
Abbildung 11: CH ₄ -Emissionsraten in aus freigelüfteten Mastschweinehaltungssystemen (Außenklimaställe) ..	37
Abbildung 12: Anaerober Abbau von Eiweiß zu Ammoniak (RIPPEL-BALDES, 1955).....	39
Abbildung 13: Mechanismus der NH ₃ -Freisetzung aus Flüssigmist (nach NI, 1999)	40
Abbildung 14: Mechanistisches Modell der NH ₃ -Freisetzung im Stall (NI, 1999)	41
Abbildung 15: Stufen des anaeroben Abbaus komplexer organischer Substanzen bei der Bildung von Methan (HEYER, 1990).....	42
Abbildung 16: Vereinfachtes Schema der N ₂ O-Bildung und -Freisetzung aus Festmist (nach VAN FAASSEN, 1992).....	44
Abbildung 17: Einflussmodell auf die Gasemissionen im Stall	46
Abbildung 18: Außenklima-Versuchsabteile, Grundriss.....	50
Abbildung 19: Außenklima-Versuchsabteile, Gebäudeschnitt.....	50
Abbildung 20: Schematischer Versuchsaufbau der Außenklima-Versuchsabteile (AKt und AKe) und des konventionellen Warmstalls (kW)	53
Abbildung 21: Kombiniertes Windgeber.....	58
Abbildung 22: Photoakustisches Messprinzip (nach BRÜEL & KJÆR, 1992).....	62
Abbildung 23: Linearitätstest des optischen Filters für NH ₃ von 1 - 100 ppm.....	71
Abbildung 24: Linearitätstest des optischen Filters für CH ₄ von 1 - 100 ppm.....	71
Abbildung 25: Linearitätstest des optischen Filters für CO ₂ von 280 - 4000 ppm	72
Abbildung 26: Linearitätstest des optischen Filters für N ₂ O von 0,53 – 5,2 ppm	72
Abbildung 27: Flügelradanemometer (schematische Darstellung).....	76
Abbildung 28: Schlaufenmessung an einem runden Kanalquerschnitt zur Bestimmung der mittleren Strömungsgeschwindigkeit	76
Abbildung 29: Kalibriergerade des Messventilators an der Messstelle 6 (kW).....	77
Abbildung 30: Regelungsschema zur Lüftung der gekapselten Außenklima-Versuchsabteile	79
Abbildung 31: Lage der Ventilatoren im Ablufttrichter und im Abluftkanal (Querschnitt und Frontansicht).....	80
Abbildung 32: Kalibriergerade des Messventilators an Messstelle 3 (AKt)	81
Abbildung 33: Kalibriergerade des Messventilators an Messstelle 4 (AKe).....	82
Abbildung 34: Verlauf der Soll- und Isttemperaturen in den gekapselten Außenklima-Versuchsabteilen und im nicht gekapselten Außenklimastall	85
Abbildung 35: Resultierende Strömungsgeschwindigkeit (in m/s) in den beiden Untersuchungsabteilen AKt und AK am 10.6.01 zwischen 8:29 Uhr und 13:36 Uhr, bei durchschnittlich 19,4 °C Außentemperatur.....	87
Abbildung 36: Geschwindigkeit der x-Komponente (in m/s) in den beiden Untersuchungsabteilen AKt und Außenklimastall am 10.6.01 zwischen 8:29 Uhr und 13:36 Uhr, bei durchschnittlich 19,4 °C Außentemperatur.....	87
Abbildung 37: Geschwindigkeit der y-Komponente (in m/s) in den beiden Untersuchungsabteilen AKt und Außenklimastall am 10.6.01 zwischen 8:29 Uhr und 13:36 Uhr, bei durchschnittlich 19,4 °C Außentemperatur.....	88
Abbildung 38: Geschwindigkeit der z-Komponente (in m/s) in den beiden Untersuchungsabteilen AKt und Außenklimastall am 10.6.01 zwischen 8:29 Uhr und 13:36 Uhr, bei durchschnittlich 19,4 °C Außentemperatur.....	88
Abbildung 39: Einfluss der Luftgeschwindigkeit auf den durchschnittlichen Stoffübergang von Ammoniak aus der flüssigen Phase von separiertem Flüssigmist (HARTUNG, 1995).....	89

Abbildung 40: Gewogene Gesamttergewichte mit Ausgleichsgerade im Außenklima-Versuchsabteil mit Einstreu während Mastdurchgang 5 bis zum ersten Ausstellen	92
Abbildung 41: Außen- und Ablufttemperaturen während des Mastdurchgangs 4 vom 1.2.99 - 10.6.99 in den drei untersuchten Haltungssystemen.....	93
Abbildung 42: Außen- und Ablufttemperaturen während des Mastdurchgangs 5 vom 16.6.99 - 30.10.99 in den drei untersuchten Haltungssystemen	93
Abbildung 43: Außen- und Ablufttemperaturen während des Mastdurchgangs 6 vom 11.11.99 - 20.3.00 in den drei untersuchten Haltungssystemen	93
Abbildung 44: NH ₃ -Konzentrationsdifferenzen zwischen Ab- und Zuluftkonzentration während des Mastdurchgangs 4 vom 1.2.99 - 10.6.99 in den drei untersuchten Haltungssystemen.....	95
Abbildung 45: NH ₃ -Konzentrationsdifferenzen zwischen Ab- und Zuluftkonzentration während des Mastdurchgangs 5 vom 16.6.99 - 30.10.99 in den drei untersuchten Haltungssystemen.....	95
Abbildung 46: NH ₃ -Konzentrationsdifferenzen zwischen Ab- und Zuluftkonzentration während des Mastdurchgangs 6 vom 11.11.99 - 20.3.00 in den drei untersuchten Haltungssystemen.....	96
Abbildung 47: CH ₄ -Konzentrationsdifferenzen zwischen Ab- und Zuluftkonzentration während des Mastdurchgangs 4 vom 1.2.99 - 10.6.99 in den drei untersuchten Haltungssystemen.....	97
Abbildung 48: CH ₄ -Konzentrationsdifferenzen zwischen Ab- und Zuluftkonzentration während des Mastdurchgangs 5 vom 16.6.99 - 30.10.99 in den drei untersuchten Haltungssystemen.....	98
Abbildung 49: CH ₄ -Konzentrationsdifferenzen zwischen Ab- und Zuluftkonzentration während des Mastdurchgangs 6 vom 11.11.99 - 20.3.00 in den drei untersuchten Haltungssystemen.....	98
Abbildung 50: N ₂ O-Konzentrationsdifferenzen zwischen Ab- und Zuluftkonzentration während des Mastdurchgangs 4 vom 1.2.99 - 10.6.99 in den drei untersuchten Haltungssystemen.....	100
Abbildung 51: N ₂ O-Konzentrationsdifferenzen zwischen Ab- und Zuluftkonzentration während des Mastdurchgangs 5 vom 16.6.99 - 30.10.99 in den drei untersuchten Haltungssystemen.....	100
Abbildung 52: N ₂ O-Konzentrationsdifferenzen zwischen Ab- und Zuluftkonzentration während des Mastdurchgangs 6 vom 11.11.99 - 20.3.00 in den drei untersuchten Haltungssystemen.....	100
Abbildung 53: CO ₂ -Konzentrationsdifferenzen zwischen Ab- und Zuluftkonzentration während des Mastdurchgangs 4 vom 1.2.99 - 10.6.99 in den drei untersuchten Haltungssystemen.....	102
Abbildung 54: CO ₂ -Konzentrationsdifferenzen zwischen Ab- und Zuluftkonzentration während des Mastdurchgangs 5 vom 16.6.99 - 30.10.99 in den drei untersuchten Haltungssystemen.....	102
Abbildung 55: CO ₂ -Konzentrationsdifferenzen zwischen Ab- und Zuluftkonzentration während des Mastdurchgangs 6 vom 11.11.99 - 20.3.00 in den drei untersuchten Haltungssystemen.....	102
Abbildung 56: H ₂ O-Konzentrationsdifferenzen zwischen Ab- und Zuluftkonzentration während des Mastdurchgangs 4 vom 1.2.99 - 10.6.99 in den drei untersuchten Haltungssystemen.....	104
Abbildung 57: H ₂ O-Konzentrationsdifferenzen zwischen Ab- und Zuluftkonzentration während des Mastdurchgangs 5 vom 16.6.99 - 30.10.99 in den drei untersuchten Haltungssystemen.....	104
Abbildung 58: H ₂ O-Konzentrationsdifferenzen zwischen Ab- und Zuluftkonzentration während des Mastdurchgangs 6 vom 11.11.99 - 20.3.00 in den drei untersuchten Haltungssystemen.....	105
Abbildung 59: Tagesmittelwerte des Abluftvolumenstroms während des Mastdurchgangs 4 vom 1.2.99 - 10.6.99 in den drei untersuchten Haltungssystemen	106
Abbildung 60: Tagesmittelwerte des Abluftvolumenstroms während des Mastdurchgangs 5 vom 16.6.99 - 30.10.99 in den drei untersuchten Haltungssystemen	107
Abbildung 61: Tagesmittelwerte des Abluftvolumenstroms während des Mastdurchgangs 6 vom 11.11.99 - 20.3.00 in den drei untersuchten Haltungssystemen	107
Abbildung 62: NH ₃ -Emissionsraten bezogen auf 500 kg Lebendmasse (LM) während des Mastdurchgangs 4 vom 1.2.99 - 10.6.99 in den drei untersuchten Haltungssystemen.....	110
Abbildung 63: NH ₃ -Emissionsraten bezogen auf 500 kg Lebendmasse (LM) während des Mastdurchgangs 5 vom 16.6.99 - 30.10.99 in den drei untersuchten Haltungssystemen	110
Abbildung 64: NH ₃ -Emissionsraten bezogen auf 500 kg Lebendmasse (LM) während des Mastdurchgangs 6 vom 11.11.99 - 20.3.00 in den drei untersuchten Haltungssystemen	111
Abbildung 65: Vergleich der gemessenen NH ₃ -Emissionen in g/h aus dem Warmstall mit Teilspaltenboden und den nach Ni (1998) berechneten NH ₃ -Emissionen.....	114
Abbildung 66: Vergleich der gemessenen, standardisierten NH ₃ -Emissionsrate in g/(h*500 kg LM) aus dem Warmstall mit Teilspaltenboden und den nach Ni (1998) berechneten NH ₃ -Emissionen.....	115
Abbildung 67: Verlauf der NH ₃ -Emissionsraten aus den drei untersuchten Haltungssystemen während einer Woche während Mastdurchgang 5 (Sommer) vom 20.-26.8.99	117
Abbildung 68: CH ₄ -Emissionsraten bezogen auf 500 kg Lebendmasse (LM) während des Mastdurchgangs 4 vom 1.2.99 - 10.6.99 in den drei untersuchten Haltungssystemen.....	117
Abbildung 69: CH ₄ -Emissionsraten bezogen auf 500 kg Lebendmasse (LM) während des Mastdurchgangs 5 vom 16.6.99 - 30.10.99 in den drei untersuchten Haltungssystemen.....	118

Abbildung 70: CH ₄ -Emissionsraten bezogen auf 500 kg Lebendmasse (LM) während des Mastdurchgangs 6 vom 11.11.99 - 20.3.00 in den drei untersuchten Haltungssystemen.....	118
Abbildung 71: N ₂ O-Emissionsraten bezogen auf 500 kg Lebendmasse (LM) während des Mastdurchgangs 4 vom 1.2.99 - 10.6.99 in den drei untersuchten Haltungssystemen.....	120
Abbildung 72: N ₂ O-Emissionsraten bezogen auf 500 kg Lebendmasse (LM) während des Mastdurchgangs 5 vom 16.6.99 - 30.10.99 in den drei untersuchten Haltungssystemen.....	120
Abbildung 73: N ₂ O-Emissionsraten bezogen auf 500 kg Lebendmasse (LM) während des Mastdurchgangs 6 vom 11.11.99 - 20.3.00 in den drei untersuchten Haltungssystemen.....	121
Abbildung 74: CO ₂ -Emissionsraten bezogen auf 500 kg Lebendmasse (LM) während des Mastdurchgangs 4 vom 1.2.99 - 10.6.99 in den drei untersuchten Haltungssystemen.....	122
Abbildung 75: CO ₂ -Emissionsraten bezogen auf 500 kg Lebendmasse (LM) während des Mastdurchgangs 5 vom 16.6.99 - 30.10.99 in den drei untersuchten Haltungssystemen.....	122
Abbildung 76: CO ₂ -Emissionsraten bezogen auf 500 kg Lebendmasse (LM) während des Mastdurchgangs 6 vom 11.11.99 - 20.3.00 in den drei untersuchten Haltungssystemen.....	123
Abbildung 77: CO ₂ -Emissionsrate aus dem Warmstall mit Teilspaltenboden während Mastdurchgang 5 (Sommer) und berechnete CO ₂ -Produktion verschiedener Modelle.....	125
Abbildung 78: CO ₂ -Emissionsrate aus den beiden Außenklima-Versuchsabteilen mit Teilspaltenboden und mit Einstreu während Mastdurchgang 5 (Sommer) und berechnete CO ₂ -Produktion verschiedener Modelle.....	125
Abbildung 79: H ₂ O-Emissionsraten bezogen auf 500 kg Lebendmasse (LM) während des Mastdurchgangs 4 vom 1.2.99 - 10.6.99 in den drei untersuchten Haltungssystemen.....	126
Abbildung 80: H ₂ O-Emissionsraten bezogen auf 500 kg Lebendmasse (LM) während des Mastdurchgangs 5 vom 16.6.99 - 30.10.99 in den drei untersuchten Haltungssystemen.....	126
Abbildung 81: H ₂ O-Emissionsraten bezogen auf 500 kg Lebendmasse (LM) während des Mastdurchgangs 6 vom 11.11.99 - 20.3.00 in den drei untersuchten Haltungssystemen.....	127
Abbildung 82: Einfluss der Ablufttemperatur auf die NH ₃ -Emissionsrate für den gesamten Untersuchungszeitraum.....	133
Abbildung 83: Einfluss des Abluftvolumenstroms auf die NH ₃ -Emissionsrate für den gesamten Untersuchungszeitraum.....	135
Abbildung 84: Einfluss der Zeit nach dem Einstellen auf die NH ₃ -Emissionsrate für den gesamten Untersuchungszeitraum.....	136
Abbildung 85: Gegenüberstellung der gemessenen und modellierten NH ₃ -Emissionsraten in den beiden Außenklimaställen während der drei Mastdurchgänge mit Trendlinie und Regressionsgerade ...	139
Abbildung 86: Modellierte NH ₃ -Emissionsrate aus Außenklimaställen mit Teilspaltenboden und mit Einstreu im Frühjahr (V _i =4000 m ³ /h), Sommer (V _i =7000 m ³ /h) bzw. Winter (V _i =3000 m ³ /h). Die Ablufttemperaturen (T _i) werden rechnerisch aus den Außentemperaturen abgeleitet.....	140
Abbildung 87: 10-jährige Tagesmittelwerte und dazugehörige Standardabweichung für die Außentemperatur an der Agrarmeteorologischen Wetterstation im Landkreis Dachau, Großberghofen.....	140
Abbildung 88: Modellierte NH ₃ -Emissionsrate aus Warmställen mit Teilspaltenboden (nach NI, 1998) im Frühjahr (V _i =3000 m ³ /h), Sommer (V _i =4000 m ³ /h) bzw. Winter (V _i =2000 m ³ /h) im Vergleich zu den Außenklimaställen. Die Ablufttemperaturen (T _i) werden rechnerisch aus den Außentemperaturen abgeleitet.....	141
Abbildung 89: Gegenüberstellung der gemessenen und modellierten CH ₄ -Emissionsraten in den beiden Außenklimaställen während der drei Mastdurchgänge.....	145
Abbildung 91: Gegenüberstellung der gemessenen und modellierten CO ₂ -Emissionsraten in den beiden Außenklimaställen während der drei Mastdurchgänge.....	150
Abbildung 92: Modellierte CO ₂ -Emissionsrate aus Außenklimaställen mit Teilspaltenboden und mit Einstreu im Frühjahr (V _i =4000 m ³ /h), Sommer (V _i =7000 m ³ /h) bzw. Winter (V _i =3000 m ³ /h). Die Ablufttemperaturen (T _i) werden rechnerisch aus den Außentemperaturen abgeleitet.....	151
Abbildung 93: Modellierte CO ₂ -Emissionsrate aus Warmställen mit Teilspaltenboden (nach NI, 1998) im Frühjahr (V _i =3000 m ³ /h), Sommer (V _i =4000 m ³ /h) bzw. Winter (V _i =2000 m ³ /h) im Vergleich zu den Außenklimaställen. Gülletemperaturen im Frühjahr 15 °C, im Sommer 18 °C und im Winter 15 °.....	152
Abbildung 94: CO ₂ -Emissionsraten nach Modell_AKt im Vergleich zur CO ₂ -Produktion „des ruhenden Schweins“ (TCER) nach NI, 1998.....	154

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Verschiedene Haltungssysteme der Schweinemast (Verfahrenskenndaten) (HAIDN UND BEHNINGER, 1996 und BOXBERGER, 1986)	5
Tabelle 2: Außenklimaställe für Mastschweine (HAIDN ET AL., 2000)	6
Tabelle 3: Anforderungen an die Messmethoden zur Emissionsratenbestimmung (nach AMON ET AL., 1997)	8
Tabelle 4: Verschiedene Messprinzipien der Multigas-Messung	23
Tabelle 5: Elektronenakzeptoren bei der anaeroben C _{org} -Mineralisation (HEYER, 1990)	41
Tabelle 6: Übersicht der Messparameter und Messgeräte	52
Tabelle 7: Futterrationen	55
Tabelle 8: Gülle- und Jaucheanfall in m ³ je Versuchsabteil	56
Tabelle 9: Gülleinhaltsstoffe im Versuchsabteil AKt	57
Tabelle 10: Jauche- und Festmistinhaltsstoffe aus AKe	58
Tabelle 11: Technische Daten des kombinierten Windgebers	59
Tabelle 12: Technische Daten des Thermo-Hygrogebers	59
Tabelle 13: Untersuchungszeiträume	60
Tabelle 14: Filterkenngrößen des B&K 1302 an der LTW	63
Tabelle 15: Fehler des Multigasmonitor 1302 laut Herstellerangaben (BRÜEL & KJÆR, 1996)	63
Tabelle 17: Messstellenumschaltungsmodus	64
Tabelle 19: Prüfgasgemische an der Gasmischstation zur Überprüfung der Messungenauigkeiten des Multigasmonitor 1302	70
Tabelle 20: Messungenauigkeiten des Multigasmonitors 1302 bei den unterschiedlichen Prüfgasgemischen	73
Tabelle 21: Zusammengefasste Messungenauigkeiten des Multigasmonitors 1302 bei hohen und niedrigen Prüfgasgemischen	73
Tabelle 22: Mittelwert der Messungenauigkeiten des Multigasmonitors 1302 bei allen Prüfgasgemischen	74
Tabelle 23: Stalltemperaturen in den Systemen von Nov. 1997 bis Juli 1999 (HAIDN ET AL. 2000)	83
Tabelle 24: Korrelation des Klimas in den Versuchsabteilen 1997 bis 1999 (HAIDN ET AL. 2000)	84
Tabelle 25: Ausgleichsgeraden der Tiergewichte je Versuchsabteil der drei Mastdurchgänge	92
Tabelle 26: Mittelwerte, Minimal- und Maximalwerte der Tagesmittelwerte der Außen- und Ablufttemperaturen während der drei untersuchten Mastdurchgänge	94
Tabelle 27: Mittelwerte, Minimal- und Maximalwerte der Tagesmittelwerte der NH ₃ -Konzentrationsdifferenzen während der drei untersuchten Mastdurchgänge	97
Tabelle 28: Mittelwerte, Minimal- und Maximalwerte der Tagesmittelwerte der CH ₄ -Konzentrationsdifferenzen während der drei untersuchten Mastdurchgänge	99
Tabelle 29: Mittelwerte, Minimal- und Maximalwerte der Tagesmittelwerte der CH ₄ -Konzentrationsdifferenzen während der drei untersuchten Mastdurchgänge	101
Tabelle 30: Mittelwerte, Minimal- und Maximalwerte der Tagesmittelwerte der CO ₂ -Konzentrationsdifferenzen während der drei untersuchten Mastdurchgänge	103
Tabelle 31: Mittelwerte, Minimal- und Maximalwerte der Tagesmittelwerte der H ₂ O-Konzentrationsdifferenzen während der drei untersuchten Mastdurchgänge	106
Tabelle 32: Mittelwerte, Minimal- und Maximalwerte der Tagesmittelwerte des Abluftvolumenstroms während der drei untersuchten Mastdurchgänge	109
Tabelle 33: Mittelwerte, Minimal- und Maximalwerte der Tagesmittelwerte der NH ₃ -Emissionsraten bezogen auf 500 kg LM während der drei untersuchten Mastdurchgänge	112
Tabelle 34: Einfluss der Fütterung auf die N-Ausscheidung von Mastschweinen (KECK 1997)	113
Tabelle 35: Mittelwerte, Minimal- und Maximalwerte der Tagesmittelwerte der nach Ni (1998) berechneten NH ₃ -Emissionsraten bezogen auf 500 kg LM während der drei untersuchten Mastdurchgänge im Warmstall mit Teilspaltenboden	116
Tabelle 36: Mittelwerte, Minimal- und Maximalwerte der Tagesmittelwerte der CH ₄ -Emissionsraten bezogen auf 500 kg LM während der drei untersuchten Mastdurchgänge	119
Tabelle 37: Mittelwerte, Minimal- und Maximalwerte der Tagesmittelwerte der N ₂ O-Emissionsraten bezogen auf 500 kg LM während der drei untersuchten Mastdurchgänge	121
Tabelle 38: Mittelwerte, Minimal- und Maximalwerte der Tagesmittelwerte der CO ₂ -Emissionsraten bezogen auf 500 kg LM während der drei untersuchten Mastdurchgänge	124
Tabelle 39: Mittelwerte, Minimal- und Maximalwerte der Tagesmittelwerte der H ₂ O-Emissionsraten bezogen auf 500 kg LM während der drei untersuchten Mastdurchgänge	128
Tabelle 40: Korrelationskoeffizienten der Einflussparameter und der Emissionsraten (in g/h) von NH ₃ , CH ₄ , N ₂ O, CO ₂ und H ₂ O während aller drei Mastdurchgänge in den beiden Außenklima-Versuchsabteilen (AKt und AKe)	130

Tabelle 39: Korrelationskoeffizienten der Einflussparameter und der Emissionsraten von NH ₃ , CH ₄ , N ₂ O, CO ₂ und H ₂ O während aller drei Mastdurchgänge im Warmstall mit Teilspaltenboden	131
Tabelle 40: Regressionsgeraden für die NH ₃ -Emissionsraten und die Ablufttemperatur.....	133
Tabelle 41: Regressionsgeraden für die NH ₃ -Emissionsraten und den Abluftvolumenstrom	134
Tabelle 42: Regressionsgeraden für die NH ₃ -Emissionsraten und die Zeit nach dem Einstellen.....	135
Tabelle 43: Unterschiede der NH ₃ -Emissionsraten zwischen den verschiedenen Haltungssystemen und Mastdurchgängen	137
Tabelle 44: Mastdurchgänge mit dazugehörigen Jahreszeiten und Temperaturen	138
Tabelle 45: Modellgrenzen der Kovarianzanalyse	138
Tabelle 46: Mittlere NH ₃ -Emissionsraten nach Modell_AKt und Modell_AKe und N _I (1998)	142
Tabelle 47: Mittlere NH ₃ -Emissionsraten nach Modell_AKt und Modell_AKe und N _I (1998) für höhere durchschnittliche Außentemperaturen	142
Tabelle 48: Mittlere NH ₃ -Emissionsraten nach Modell_AKt und Modell_AKe und N _I (1998) für höhere durchschnittliche Abluftvolumenströme	143
Tabelle 49: Mittlere CH ₄ -Emissionsraten nach Modell_AKt und Modell_AKe	146
Tabelle 50: Mittlere CH ₄ -Emissionsraten nach Modell_AKt und Modell_AKe für höhere durchschnittliche Außentemperaturen	147
Tabelle 51: Mittlere CH ₄ -Emissionsraten nach Modell_AKt und Modell_AKe für höhere durchschnittliche Abluftvolumenströme	147
Tabelle 52: Mittlere CO ₂ -Emissionsraten nach Modell_AKt und Modell_AKe und N _I (1998).....	153
Tabelle 53: Mittlere NH ₃ -Emissionsraten nach Modell_AKt und Modell_AKe und N _I (1998) für höhere durchschnittliche Außentemperaturen	153
Tabelle 54: Mittlere NH ₃ -Emissionsraten nach Modell_AKt und Modell_AKe und N _I (1998) für höhere durchschnittliche Abluftvolumenströme	154
Tabelle 55: Vergleich der Mittelwerte der modellierten und gemessenen Emissionsraten	155
Tabelle 58: Korrelationen der Emissionsraten aus den Außenklimaställen mit verschiedenen Parametern	185
Tabelle 57: Korrelationen der Emissionsraten aus dem Warmstall mit Teilspaltenboden mit verschiedenen Parametern	186
Tabelle 76: Regressionsgeraden zur Ableitung der Stalltemperaturen in der Abluft von den Außentemperaturen	196

Abkürzungsverzeichnis

a	Jahr
AK	Außenklimakistenstall
AKe	Außenklima-Versuchsabteil mit Einstreu
AKt	Außenklima-Versuchsabteil mit Teilspaltenboden
AKt0	Außenklima-Versuchsabteil mit Teilspaltenboden (Referenzabteil)
b	Breite
°C	Grad Celsius
c	Konzentration
C	Kohlenstoff
CH ₄	Methan
CO	Kohlenmonoxid
CO ₂	Kohlendioxid
C _{org}	Organischer Stickstoff
d	Tag
Erate	Emissionsrate
et al.	et alii (lat. und andere)
FS	Frischsubstanz
FTIR	Fourier-transformierte Infrarot Spektroskopie
g	Gramm
h	Stunde
H ₂ O	Wasser
ha	Hektar
Hz	Hertz
IR	Infrarot
K	Kelvin
kg	Kilogramm
KW, W	(Konventioneller) Warmstall
l	Liter
l	Länge
LM	Lebendmasse
LTW	Landtechnik Weihenstephan
μV	Mikrovolt
MJ	Megajoule
N	Stickstoff
N ₂ O	Lachgas, Distickstoffoxid
NDIR	Nicht-dispersive Infrarot Spektroskopie
N _{ges}	Gesamtstickstoff
NH ₃	Ammoniak
NH ₄ ⁺	Ammonium-Ion
o. g.	oben genannt
PAS	Photoakustische Infrarot Spektroskopie
pH	Negativer dekadischer Logarithmus der H ⁺ -Ionenkonzentration
ppm	parts per million
R ²	Bestimmtheitsmaß
RP	Rohprotein
s	Sekunde
TCER	Tranquil CO ₂ Exhalation Rate (nach NI, 1998)
TS	Trockensubstanz
UBA	Umweltbundesamt
\dot{V}	Volumenstrom
W	Watt

1 Einleitung

In Deutschland wurden 1999 10.215.000 Mastschweine in 104.810 Betrieben gehalten. Die Zahl der Betriebe ging damit im Vergleich zu 1997 um fast 30 % zurück, die der Mastschweine erhöhte sich um ca. 10 %. Dabei werden in Deutschland 18,2 % der Mastschweine in 1 % der Betriebe in Beständen größer 1000 Mastschweine gehalten (BMELF, 2000). Der Selbstversorgungsgrad für Schweinefleisch liegt für 2000 bei 83 % (BMVEL, 2001a).

Im europäischen Vergleich ist Deutschland mit einem Anteil von 23 % an der europäischen Schweinefleischproduktion mit Abstand der größte Schweineerzeuger. Gleichzeitig erreichen nicht einmal die besonders veredelungsintensiven Regionen Deutschlands (Weser-Ems und Westfalen-Lippe) die hohen durchschnittlichen Bestandesgrößen anderer europäischer Länder wie Irland (363), Belgien (361), Großbritannien (356), Niederlande (306) und Dänemark (205) (RATSCHOW, 2000).

Die Ziele der europäischen Schweineerzeuger sind bessere Wirtschaftlichkeit, *geringere Umweltbelastungen*, verbesserte Tiergerechtigkeit und dem Markt angepasste Qualität (RATSCHOW, 2000). Als Folge dieser Entwicklung, besonders der Erhöhung der Wirtschaftlichkeit, sind bezüglich des Stallbaus derzeit zwei Strategien zu beobachten (HAIDN ET AL., 2000). Die eine versucht durch ausgefeilte Technik (z. B. bestens klimatisierte Vollspaltenbodenställe) und minimalen Arbeitseinsatz eine hohe tierische Leistung zu erzielen, wobei sich hier aber immer deutlicher die Grenzen zeigen, den Investitionsbedarf bei diesem über Jahrzehnte fortentwickelten Haltungssystem zu senken.

Die andere Strategie zielt durch Vereinfachung von Gebäude und Technik (z. B. im Außenklimastall) darauf ab, Kosten einzusparen, die Tiere durch verschiedene Funktions- und Klimabereiche zu konditionieren und ihnen ein tiergerechtes Stallsystem anzubieten (HAIDN ET AL., 2000).

Außenklimaställe scheinen die oben genannten Ziele für die europäische Schweineproduktion weitgehend zu erfüllen. Über die Umweltwirkungen dieser Ställe, insbesondere über die gasförmigen Emissionen, ist jedoch bisher kaum etwas bekannt, da der haltungstechnische Unterschied zu den herkömmlichen Systemen, die „freie Lüftung“, methodische Probleme zur Erfassung der Emissionsraten aus diesen Ställen nach sich zieht.

So wurden über die Umweltwirkung von Außenklimaställen für Mastschweine in der Vergangenheit von einzelnen Autoren nur Vermutungen angestellt; bereits 1995 wird die freie

Lüftung bei Tierhaltungen als Möglichkeit zur Emissionsminderung betrachtet (MÜLLER ET AL., 1995).

Im Rahmen der IVVU-Richtlinie (Integrierte Verminderung und Vermeidung von Umweltwirkungen) der EU (Richtlinie 96/61/EC des Rates vom 24.9.96 über die IVVU) wird von nationalen Kommissionen ein Katalog u. a. über die „besten verfügbaren Techniken“ (BVT) in der Tierhaltung erarbeitet, in dem neben der Tiergerechtheit und Wirtschaftlichkeit auch die Umweltwirkungen der Haltungssysteme bewertet werden. Mit diesem Katalog soll anschließend die Optimierung der Tier- und Umweltgerechtheit der landwirtschaftlichen Tierhaltung erreicht werden.

Gasförmige Emissionen aus der landwirtschaftlichen Nutztierhaltung tragen zur Versauerung und Eutrophierung verschiedener aquatischer und terrestrischer Ökosysteme (NH_3) sowie zur Verstärkung des Treibhauseffektes (CH_4 und N_2O) und zu den sekundären Waldschäden (BMVEL, 2001b) bei. So wurden z. B. im Wald auf sog. Dauerbeobachtungsflächen Stickstoffeinträge zwischen 9 und 46 kg N/ha u. a mit im Mittel 25 kg/ha u. a verzeichnet, wohingegen ein für die Entwicklung der Wälder verträgliches Maß bei 5-15 kg N/ha u. a liegt (BMVEL, 2001b).

Die Landwirtschaft verursacht 93 % der anthropogenen NH_3 -Emissionen in Deutschland (Σ : 651.000 t), wovon der Anteil der landwirtschaftlichen Tierhaltung 88 % beträgt (UMWELTBUNDESAMT, 1998). Bei CH_4 beträgt der Anteil der Landwirtschaft immerhin 33 % (Σ : 4.724.000 t), bei N_2O , incl. der Abfallwirtschaft, 39 % (Σ : 228.000 t). Der Anteil der Rinderhaltung an den NH_3 -Emissionen liegt nach Schätzungen des BMU (1996) bei 68 %, der der Schweinehaltung bei 25 %, der der Geflügelhaltung bei 5 % und der Anteil der Pferde- und Schafhaltung jeweils bei 1 %.

Die Angaben über die Anteile der NH_3 -Emissionen aus Stall, Lagerung und Ausbringung schwanken bei den verschiedenen Autoren stark (HARTUNG, 1995), so können aus dem Stall bis zu 41 % der Emissionen stammen, bei der Ausbringung reichen die Angaben bis zu 70 %. Potenzial zur Verminderung z. B. der NH_3 -Emissionen liegt somit in allen Bereichen. Durchgesetzt hat sich bisher vor allem der Einsatz bodennah ausbringender Gülleverteiltechnik, aber auch bei den Emissionen aus dem Stall selbst sollen weitere Minderungsmöglichkeiten erforscht und genutzt werden.

Die hier vorgestellten Untersuchungen beziehen sich im Folgenden ausschließlich auf die Mastschweinehaltung und hierbei nur auf den Stallbereich.

2 Stand des Wissens

In diesem Abschnitt werden zunächst die in der Mastschweinehaltung üblichen Haltungssysteme vorgestellt. Anschließend werden im Kapitel „Messmethoden“ die Notwendigkeit zur Durchführung von Dauermessungen und die zur kontinuierlichen Gaskonzentrations- und Volumenstrombestimmung notwendigen Messtechniken beschrieben. Im darauf folgenden werden die bereits aus der Literatur bekannten Emissionsraten von NH_3 , CH_4 und N_2O aus der Mastschweinehaltung dargestellt. Nach der Beschreibung der Einflüsse auf die Entstehung von Gasemissionen aus dem Stall wird das den Untersuchungen zu Grunde gelegte Modell vorgestellt.

2.1 Verschiedene Haltungssysteme in der Mastschweinehaltung

Die Verfahren der Schweinemast können nach verschiedenen Kriterien eingeteilt werden:

- Lüftungssystem,
- Zuluft-/Abluftsystem und
- Einstreu (mit/ohne)

Zunächst erfolgt die Einteilung nach der Art der Stalllüftung. Unterschieden wird nach BOXBERGER (1998) in:

- Ställe mit Zwangslüftung, bei der der Luftwechsel durch den Einsatz von Ventilatoren erreicht wird, und
- Ställe mit natürlicher (freier) Lüftung, bei denen der Luftwechsel nicht durch Ventilatoren erzwungen wird.

Zur natürlichen Lüftung zählen:

- Trauf-First-Lüftung (hauptsächlich Rinderställe, aber in Einzelfällen auch bei Mastschweinen (z. B. LEONHARD UND HOY, 1999),
- Schachtlüftung (z. B. HARTUNG ET AL., 1999) und
- Querlüftung (Außenklimaställe für Mastschweine).

Bei der Trauf-First-Lüftung tritt die Zuluft über Zuluftöffnungen an der Traufe des Stallgebäudes ein und entweicht über Öffnungen am Dachfirst. Die Schachtlüftung beruht auf dem Prinzip des Luftauftriebs in einem wärmegeprägten Abluftschacht, dessen Querschnitt auf den erforderlichen Luftwechsel abgestimmt ist. Eine Querlüftung tritt bei Stall-

gebäuden auf, die quer zur Hauptwindrichtung gebaut sind und nicht breiter als 15 m sind (LÜPFERT, 1998 und VAN DEN WEGHE, 1998).

Die zwangsgelüfteten Ställe gliedern sich weiter nach Ausführung der Zu- und Abluftsysteme. Zu den Zuluftsystemen zählen:

- Strahllüftung,
- Rieselkanallüftung,
- Porendeckenlüftung und
- kombinierte Systeme (z.B. Futterganglüftung)

Strahl Lüftungssysteme haben in den letzten Jahren aufgrund von Zugluftproblemen im Stall an Bedeutung verloren und werden in Neuanlagen nur noch selten eingesetzt. Die Rieselkanallüftung hat zum Ziel, die Zuluft durch viele kleine Luftstrahlen, von denen keine Zugluftgefahr ausgeht, in den Stall zu bringen. Steigt der Anteil des perforierten Kanalbodens auf mehr als 50 % der gesamten Stalldecke an, so spricht man von einer Porendeckenlüftung.

Bei den Abluftsystemen unterscheidet man zwischen:

- Überdrucklüftung,
- Unterdrucklüftung und
- Gleichdrucklüftung,

je nachdem, ob die Luft in den Stall gedrückt wird, aus dem Stall gesaugt wird oder Ventilatoren auf der Zu- und Abluftseite installiert sind (Verbundlüftung). Bei der Unterdruckentlüftung unterscheidet man weiter in:

- Oberflurabsaugung und
- Unterflurabsaugung.

Die übliche Art ist die Oberflurabsaugung, bei der sich die Ventilatoren im Bereich der Stalldecke befinden und die Raumluft direkt in den Abluftkamin saugen. Bei der Unterflurabsaugung wird die Luft unter dem Spaltenboden abgesaugt. Damit wird das Ziel verfolgt, die Schadgase aus dem unter den Spalten gelagerten Flüssigmist nicht in den Tierbereich gelangen zu lassen, sondern direkt am Ort der Entstehung abzusaugen. Um hohe Schadgasemissionen zu vermeiden, muss die Luftgeschwindigkeit über dem Flüssigmist möglichst niedrig sein. BÜSCHER ET AL. (1996) schlagen dazu vor, einen Abstand zwischen Spaltenboden und Flüssigmist von mindestens 50 cm bzw. zwischen Absaugöffnung und Flüssigmist von mindestens 30 cm einzuhalten.

Ein weiteres Kriterium für die Einteilung der Mastschweinehaltungsverfahren ist die Einteilung in Systeme *mit Einstreu* und *ohne Einstreu*. Zu den Haltungsverfahren ohne Einstreu zählen der Vollspaltenbodenstall, der Teilspaltenbodenstall sowie der Kistenstall mit Teilspaltenboden. Bei den Haltungsverfahren mit Einstreu wird zwischen dem Tiefstreustall und Verfahren mit geringeren Einstreumengen, wie z.B. der Mistgangbucht, dem Kistenstall mit Einstreu und der Schrägbodenbucht unterschieden. In der folgenden Tabelle 1 sind die verschiedenen Haltungssysteme mit dazugehörigen Verfahrenskenndaten dargestellt (HAIDN UND BEHNINGER, 1996 und BOXBERGER, 1986). Eine ausführliche Darstellung eingestreuter Haltungssysteme findet sich bei HAIDN UND RITTEL (1995).

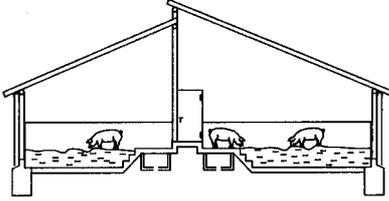
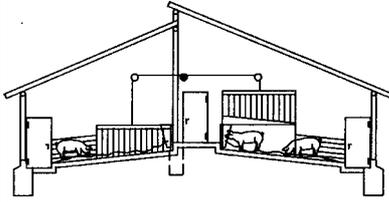
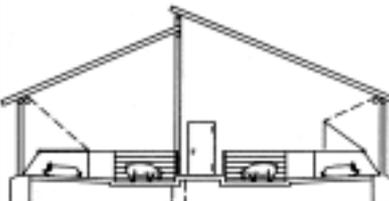
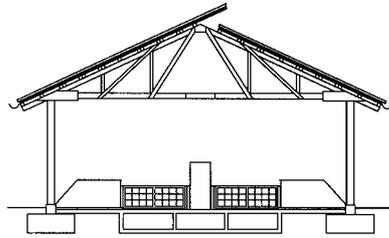
Tabelle 1: Verschiedene Haltungssysteme der Schweinemast (Verfahrenskenndaten) (HAIDN UND BEHNINGER, 1996 und BOXBERGER, 1986)

Art der Lüftung	Haltungssystem	Verfahrensmerkmal	Buchtenfläche je Tier (in m ²) (Endmast)	Einstreubedarf je Tier und Tag [kg]
Zwangslüftung	Vollspaltenbodenstall	Gesamte Buchtenfläche mit Spaltenboden ausgelegt.	≥ 0,66	-
	Teilspaltenbodenstall	Teilweise planbefestigte Fläche zum sicheren Stand beim Fressen	0,73	-
Zwangslüftung oder freie Lüftung	Mistgangbucht	Mistplatz als Gang ausgebildet	0,9	0,1-0,3
	Schrägbodenstall	Liegeflächenabdeckung im Winter erforderlich	1,0	0,15-0,3
	Tiefstreustall	hohe Mistmatratzentemperatur	1,2-1,4	0,5-1,0
Freie Lüftung	Kistenstall mit Teilspalten	Wärmegeädämmte Ruhekiten	1,2	-
	Kistenstall mit Einstreu	Wärmegeädämmte Ruhekiten	1,2	0,1-0,3

Neue frei belüftete Haltungsverfahren für Mastschweine

Nach Art der Entmistung lassen sich bei Außenklimaställen für Mastschweine der Tiefstreustall, der Schrägbodenstall, der Kistenstall mit eingestreutem Kotbereich und der Kistenstall mit Teilspaltenboden unterscheiden (Tabelle 2). Ein ausführlicher Überblick über herkömmliche und neuere Haltungssysteme in der Mastschweinehaltung findet sich bei HAUSER (2000).

Tabelle 2: Außenklimaställe für Mastschweine (HAIDN ET AL., 2000)

Stallsystem	Verfahrensbeschreibung	Verfahrenskenndaten	
<p style="text-align: center;">Tiefstreustall</p> 	<p>Funktionsbereichstrennung Liegen/Koten und Fressen Anwachsende Mistmatratze, auf die alle 10 bis 14 Tage ein Großballen Stroh gesetzt wird Entmistung am Ende der Mastperiode Fütterung über Breifutterautomaten am angehobenen Fressplatz Merkmal: hohe Mistmatratzentemperaturen</p>	<p>Hauptmastplätze / Bucht Buchtenfläche / Tier Liegefläche / Tier Einstreu / Tier u. Tag Mist / Tier u. Tag Jauche / Tier u. Tag</p>	<p>24 1,25 m² 0,8 m² 0,8-1,2 kg 3-4 kg 0,05 kg</p>
<p style="text-align: center;">Schrägbodenstall</p> 	<p>Funktionsbereichstrennung Liegen/Fressen und Koten Geneigte Buchtenfläche (6-8%) Einstreuen durch Selbstbedienen der Tiere an einer Strohraufe kontinuierlicher Stroh-Mist-Fluss stationäre Entmistung unter dem Spaltenboden Merkmal: Liegeflächenabdeckung im Winter erforderlich</p>	<p>Hauptmastplätze / Bucht Buchtenfläche / Tier Liegefläche / Tier Einstreu / Tier u. Tag Mist / Tier u. Tag Jauche / Tier u. Tag</p>	<p>14 1,1 m² 0,8 m² 0,1-0,3 kg 2-3 kg 0,8-1,0 kg</p>
<p style="text-align: center;">Kistenstall - eingestreut -</p> 	<p>Funktionsbereichstrennung Liegen, Fressen, Koten Einstreuen alle 2-3 Tage durch Ausrollen von Großballen am Kontrollgang Entmisten alle 2-3 Tage mit dem Schlepper nach Wegsperrern der Schweine durch Schwenken der Buchtentrenngitter Merkmal: Wärmegeämmte Ruhekisten</p>	<p>Hauptmastplätze / Bucht Buchtenfläche / Tier Liegefläche / Tier Einstreu / Tier u. Tag Mist / Tier u. Tag Jauche / Tier u. Tag</p>	<p>14 1,1 m² 0,4 m² 0,1-0,2 kg 2-3 kg 0,8-1,0 kg</p>
<p style="text-align: center;">Kistenstall - strohlos -</p> 	<p>Funktionsbereichstrennung Liegen, Fressen, Koten Flüssigmisterzeugung Spaltenboden über den Güllekanälen Merkmal: Wärmegeämmte Ruhekisten</p>	<p>Hauptmastplätze / Bucht Buchtenfläche / Tier Liegefläche / Tier Einstreu / Tier u. Tag Gülle / Tier u. Tag</p>	<p>14 1,0 m² 0,4 m² 0 kg 4-5 kg</p>

In den letzten zwei bis drei Jahren sind in Deutschland vermehrt Außenklimaställe für Mastschweine gebaut worden. Nach Erhebungen der Landtechnik Weihenstephan wurden

1999 allein in Bayern in über 50 Betrieben Mastschweine in unterschiedlichen Außenklimaställen gehalten. Weitere 20 bis 30 waren in Bau oder Planung (HAIDN UND HORNAUER, 1999). Diese Tendenz wird sich in den nächsten Jahren fortsetzen. Gründe dafür sind zum einen der geringere Investitionsbedarf, der sich durch die nicht wärme gedämmte Gebäudehülle ergibt, zum anderen kann der Stall mit einem höheren Eigenleistungsanteil des Landwirts erstellt werden. Ein weiterer Grund ist, dass die Energiekosten für die Zwangs-entlüftung wegfallen, da diese Außenklimaställe *natürlich* belüftet werden.

Anmerkung: Der Begriff *Außenklimastall* bezeichnet generell alle nicht wärme gedämmten Ställe mit freier Lüftung. Auf den in dieser Arbeit vorgestellten Versuchsbetrieb bezogen wird unter Außenklimastall immer der *Kistenstall* (Weihenstephaner System, vgl. Tabelle 2) verstanden. Im Gegensatz dazu wird der Begriff „*Nürtinger System*“ für Außenklimaställe mit Spaltenboden und planbefestigter Fläche verwendet, bei denen die Kisten (hier auch als „*Betten*“ bezeichnet) senkrecht zur Stallaußenwand angeordnet sind und nicht wie beim Kistenstall (s.o.) firstparallel. Auch unterscheiden sich der Kistenstall und das „*Nürtinger System*“ sowohl in der Größe als auch in der Ausführung der Zu- und Abluftflächen.

2.2 Messmethoden

In diesem Abschnitt werden zunächst die in der Literatur definierten allgemeinen Anforderungen an Messungen zur Bestimmung von Emissionsraten für NH₃, CH₄, N₂O und CO₂ aus der Tierhaltung dargestellt. Die sich für konkrete Messungen ergebenden speziellen Anforderungen werden anschließend aufgeführt und daraus die u.a. für diese Arbeit formulierten Anforderungen an Dauermessketten definiert. Ebenso werden die Messmethoden zur Volumenstrombestimmung und zur Multigasanalyse beschrieben.

2.2.1 Anforderungen an Messungen zur Emissionsratenbestimmung

Verschiedene Autoren haben in der Vergangenheit Anforderungen an Messmethoden zur Emissionsratenbestimmung klima- und umweltrelevanter Gase aus der Landwirtschaft gestellt. So formulierten JUNGBLUTH UND BÜSCHER (1996) als Minimalforderung:

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

Zusätzlich fordern sie, dass emissionsmindernde Maßnahmen in Parallelversuchen unter sonst gleichen Bedingungen stattfinden sollen.

In Tabelle 3 sind ausführlichere Anforderungen und deren jeweilige Begründung dargestellt (nach AMON ET AL., 1997).

Tabelle 3: Anforderungen an die Messmethoden zur Emissionsratenbestimmung (nach AMON ET AL., 1997)

Anforderungen	Begründung
Erfassung der gesamten Verfahrenskette	Verbesserung der Gesamtumweltverträglichkeit landwirtschaftlicher Verfahren
Gleichzeitige Erfassung von NH ₃ , CH ₄ und N ₂ O	
Emissionsmessungen in der Praxis	Realitätsnahe Emissionsraten
Gleichzeitige Erfassung von Gaskonzentration und Lufrate	Ermittlung der Emissionsrate (Menge an emittierenden Gasen)
Kontinuierliche und hochexakte Erfassung der Emission von NH ₃ , CH ₄ und N ₂ O	Tages- und Jahreszeitliche Schwankungen der Emissionsrate
Beprobung möglichst großer Flächen	Emittierende Substrate sind inhomogen zusammengesetzt
Erfassung emissionsbeeinflussender Randparameter	Quantifizierung der Einflussparameter als Grundlage zur Modellierung

GRONAUER ET AL. (1997) setzen den Schwerpunkt auf den Einsatz hochgenauer Messtechnik, die bezüglich ihrer Messgenauigkeit an die Ansprüche der Messaufgabe angepasst sein soll. Für die Messungenauigkeit bei der Emissionsratenbestimmung legen sie den Wert 5 % fest, wobei bei der Gaskonzentrationsbestimmung die Messungenauigkeit von max. 3 % vom Messwert eingehalten werden soll.

Laut BÜSCHER (1996) hat sich für die NH₃-Emissionsmessung als Standard die kontinuierliche NH₃-Messung in der Abluft mit einer Genauigkeit von +/- 3 ppm und der kontinuierlichen Messung des Abluftvolumenstroms, meist mit Messventilatoren, entwickelt.

An die Gaskonzentrationsmesstechnik stellen KRAHL ET AL. (1995) die Anforderung, dass die eingesetzte Messtechnik besonders Ammoniak, Methan und Lachgas gleichzeitig und kontinuierlich messen können muss.

2.2.1.1 Dauermessungen in der Mastschweinehaltung

In Tabelle 3 wurde die hohe tages- und jahreszeitliche Dynamik der Emissionsraten bereits erwähnt. Eine solche *tageszeitliche* Dynamik in der Mastschweinehaltung ist bei AARNINK ET AL. (1997) dargestellt (Abbildung 1), der diese auf die Harnvorgänge der Tiere zurückführt. PEDERSEN UND ROM (1998) machen die Dynamik von der Tieraktivität generell abhängig.

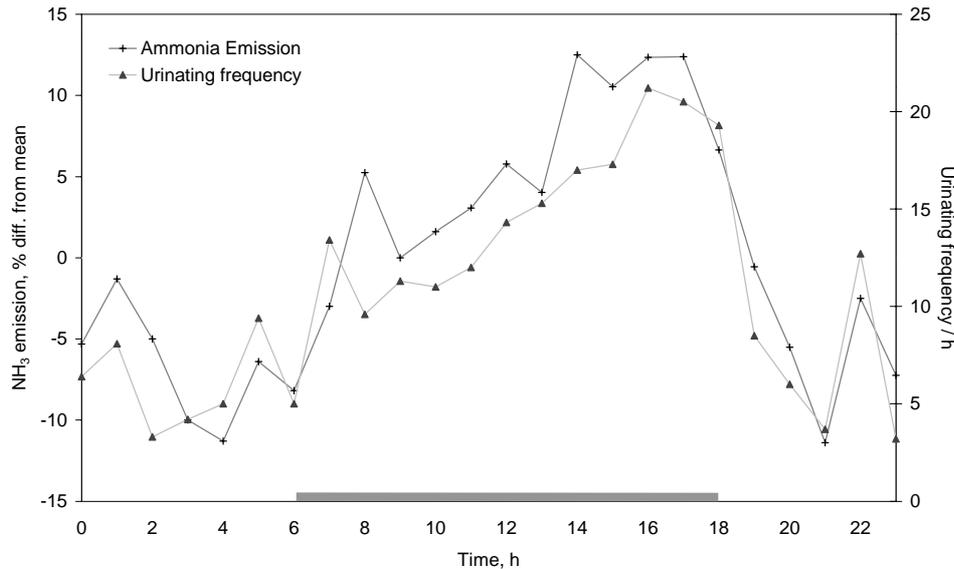


Abbildung 1: Mittlere Tagesverläufe der standardisierten Ammoniak-Emissionen und Häufigkeit des Harnens von 36 Schweinen (AARNINK ET AL., 1997)

Für die Mast Schweinehaltung wird die *jahreszeitliche* Dynamik, die durch die unterschiedlichen Temperaturniveaus und Lüftungsratenniveaus geprägt ist, um ein weiteres Phänomen ergänzt: AARNINK ET AL. (1995) stellen einen Anstieg der NH₃-Emissionsraten in (g/Tier und Tag) von Beginn bis zum Ende eines Mastdurchgangs fest. ROM UND DAHL (1998) beschreiben ebenfalls diesen Anstieg der NH₃-Emissionsraten je Tier und Tag von Beginn bis Ende des Mastdurchgangs. Die Höhe des Anstieges ist für die bei ROM UND DAHL (1998) untersuchten Haltungssysteme (Vollspaltenbodenstall und Teilspaltenbodenstall) unterschiedlich groß.

Aufgrund dieser hohen tages- und jahreszeitlichen Dynamik sind in der Mast Schweinehaltung Dauermessungen zur Emissionsratenbestimmung notwendig.

2.2.1.2 Dauermessketten im Praxiseinsatz

Eine Auswahl aktueller Dauermessungen zur Emissionsratenermittlung aus verschiedenen Schweine- und Geflügelställen ist ausführlich bei STEFFIN (1999) dargestellt. Diese Messungen werden hier im Einzelnen nicht dargestellt, da die wesentlichen Aussagen in Abschnitt 2.2.1 und 2.2.1.3 dargestellt sind.

Für *kurzzeitige* Messungen, die nur *wenige Tage* dauern und Messungen in vielen verschiedenen Ställen haben PHILLIPS ET AL. (1998) Methoden entwickelt, die sie in die Lage versetzen, schnelle, wenig aufwendige Messungen durchzuführen, um einen Überblick über Emissionsraten aus den verschiedensten Haltungssystemen aller Tierarten und Nut-

zungsrichtungen europaweit zu erhalten. Der hierfür entworfene Versuchsaufbau ist jedoch nicht auf eine wie in dieser Arbeit durchzuführende Dauermessung anzuwenden.

2.2.1.3 Spezielle technische Anforderungen an Dauermesseinrichtungen in Ställen

Verschiedene Autoren befassen sich konkret mit der Frage, wie eine „Dauer“-Messung über mindestens mehrere Tage messtechnisch ausgelegt sein muss, welche Messgeräte verwendet werden, und wie deren Charakteristika die Konfiguration der Messung beeinflussen. So untersuchte z.B. BRUNSCH (1998) methodische Probleme, die man bei der Emissionsmessung mit dem Photoakustischen Infrarot-Spektrometer „Multigasmonitor B&K 1302“ beachten muss. Es ergibt sich hier ein Einfluss der Höhe des ersten Messwertes auf die Zeit, bis der nächste Wert sicher gemessen ist. Besonders für die Messung von NH_3 und H_2O ist dieser Einfluss signifikant. Des Weiteren reagieren NH_3 - und H_2O -Meßwerte langsamer (entspricht höherer Einstellzeit), so dass ein systematischer Unterschied der Messwerte an einem Probenahmepunkt zwischen dem ersten und dem zweiten Wert festgestellt werden konnte. Laut BRUNSCH (1997) muss die Probenluftpumpe weiter in der Lage sein, das Schlauchvolumen während der Dauer einer Messung mindestens einmal auszutauschen und das Schlauchmaterial muss so ausgewählt werden, dass es nicht zu Adsorptionen von Messgasen an den Schlauchinnenwänden oder zur Freisetzung zusätzlicher Gase kommt.

Auch die CIGR (1994) legt fest, dass bei Ammoniakemissionsmessungen, die mit einem Messgerät und einem Multiplexer oder einer Messstellenumschaltung durchgeführt werden, das Material des Probenahmschlauchs so gewählt werden muss, dass keine Adsorption von NH_3 an den Wänden der Probenahmschläuche stattfindet. Hier wird dazu als Schlauchmaterial FEP (Tetrafluorethylen-Perfluorpropylen) empfohlen. Ebenso wird hier beschrieben, dass es zu keinem Zeitpunkt der Messung zu Kondensationen im Probenahmschlauch kommen darf, damit die gemessene NH_3 -Konzentration nicht verfälscht wird. Hierzu müssen die Probenahmschläuche beheizt werden.

ROM (1994b) untersuchte ebenfalls mehrere verschiedene Schlauchmaterialien und kam wie die CIGR (1994) zu dem Ergebnis, dass bei FEP-Schläuchen nicht mit Adsorptionen von NH_3 an den Schlauchinnenwänden zu rechnen ist.

KRAHL ET AL. (1996) untersuchten verschiedene Schlauch- und Filtermaterialien und stellten fest, dass für die Messung von NH_3 bezüglich ihrer Adsorptions- und Diffusionseigenschaften nur Glas und Teflon in Frage kommen, wobei Teflon zwar die etwas ungünstige-

ren Eigenschaften die Diffusion betreffend hat, in der Praxis aber wesentlich einfacher zu handhaben ist. Als Filtermaterial sollen teflonbeschichtete Glasfaserfilter eingesetzt werden, um keine Verfälschung der Messergebnisse herbeizuführen.

Konkrete Anforderungen an die Gaskonzentrationsmesstechnik für dauerhaft in Ställen messende Geräte wurden ebenfalls bereits formuliert (STEGBAUER, 1996). Die Adaption der in dieser Arbeit eingesetzten Dauermesskette zur Emissionsratenbestimmung aus den in der Literatur bekannten Dauermessungen an Ställen ist ausführlich bei STEFFIN (1999) beschrieben.

Fazit: Dauermessungen sind zur Emissionsratenbestimmung aus der Mastschweinehaltung notwendig, um das gesamte Emissionsgeschehen in seiner tageszeitlichen und jahreszeitlichen Dynamik abdecken zu können. In der Mastschweinehaltung beobachten verschiedene Autoren einen Anstieg der NH_3 -Emissionsraten je Tier und Tag von Beginn bis Ende eines Mastdurchganges. Bei Dauermessungen ist auf die optimale Gestaltung des Versuchsaufbaus bezüglich verwendeter Materialien, Messgeräte und Messeinrichtungen zu achten, die in ihrem Zusammenspiel aufeinander abgestimmt sein müssen, damit es nicht zu unerwarteten Fehlmessungen und nicht exakten Ergebnissen kommt.

2.2.2 Messmethoden zur Volumenstrombestimmung

Zur Emissionsratenbestimmung aus Ställen ist die kontinuierliche Bestimmung des Abluftvolumenstromes essenziell. Die Lüftungsraten aus Außenklimaställen können, da sie meist sehr große, nicht eindeutig definierte Zu- und Abluftöffnungen haben, bislang nur mit sehr aufwendigen Methoden ermittelt werden (HINZ UND LINKE, 1999).

Für Dauermessungen in zwangsentlüfteten Ställen mit einem oder mehreren Abluftkaminen (*geführte Abluft*) hat sich die Methode der Luftvolumenstrommessung mit Messventilatoren im Abluftkamin wegen ihrer hohen Genauigkeit und relativ einfachen Handhabung etabliert. Diese Methode wird in Abschnitt 5.2.1 genauer beschrieben. Ausführlich werden die Methoden zur Volumenstrombestimmung aus zwangsgelüfteten Ställen bei NESER (2001) dargestellt.

In Ställen mit freier Lüftung ist es wegen der großen Zu- und Abluftöffnungen und der geringeren Strömungsgeschwindigkeiten nicht möglich, direkt die Strömungsgeschwindigkeit der in den Stall eintretenden und den Stall verlassenden Luftmengen zu messen. Als indirekte Methode kann hier die CO_2 -Bilanz angewendet werden, falls die CO_2 -Produktion der Tiere und aus den Exkrementen bekannt ist. Weitere Alternativen werden zur Zeit erforscht, erprobt und angewandt. Hierzu gehören die *Wärmebilanz*, die *Wasserdampfbilanz*, der Einsatz von *Tracergasen* oder die Messung von *Druckgradienten* (CIGR, 1994). Diese

Methoden sind mit einem hohen Bilanzierungsaufwand verbunden (Wärmebilanz, CO₂-Bilanz, H₂O-Bilanz). Außerdem können nicht alle im Stall vorhandenen Quellen und Senken bekannt sein oder sie sind nicht quantifizierbar und somit mit hohen Fehlern behaftet (HINZ ET AL., 1995). Luftvolumenströme, die mit diesen Methoden errechnet werden, müssen daher kritisch betrachtet werden, ebenso wie die damit berechneten Emissionsraten aus der Tierhaltung. Im Folgenden werden diese Methoden beschrieben.

2.2.2.1 Bilanzmethoden

Wasserdampfbilanz

Bei der Wasserdampfbilanzmethode wird der von den Tieren im Stall abgegebene Wasserdampf bilanziert und mit der in der Stallatmosphäre vorhandenen Wasserdampfkonzentration in Relation gesetzt. Die vom Tier abgegebenen Wasserdampfmen gen sind jedoch stark von verschiedenen Einflussfaktoren wie z. B. Tierart, Tieraktivität, Tiermasse, Tierleistung und klimatische Verhältnisse im Stall abhängig. Zusätzliche Wasserdampfquellen im Stall sind bei der Bilanzierung ebenfalls zu berücksichtigen, wie z. B. die Verdunstung an feuchten Stalloberflächen (Kot, Harn, Tränke, etc.) oder eine eventuelle Wasserversprühung (Dusche o. ä.). Hieraus ist bereits ersichtlich, dass eine Bilanzierung der Wasserdampfquellen im Stall und die Erfassung der möglichen Quellen sowie deren Variabilität schwierig und ungenau ist. Des Weiteren kann das Messergebnis der Luftfeuchte im Stall an verschiedenen Stellen unterschiedlich sein, so dass die Bezugsfeuchte schwierig auszuwählen oder zu mitteln ist. In den folgenden Formeln ist die Wasserdampfbilanzierungsmethode sowie die Kohlendioxidbilanzmethode und die Tracergasmethode zur Volumenstrombestimmung allgemein dargestellt (HINZ ET AL., 1995).

$$\dot{m}_{e,i} - \dot{m}_{a,i} + \dot{m}_{q,i} = V \frac{dc_{a,i}}{dt} = 0 \quad (\text{Gleichung 1})$$

mit:

$$\dot{m}_{e,i} = c_{e,i} \dot{V}_a \quad \text{und} \quad \dot{m}_{a,i} = c_{a,i} \dot{V}_{a,i} \quad (\text{Gleichung 2})$$

$$\text{daraus folgt: } \dot{V}_a = \frac{-\dot{m}_{q,i}}{c_{e,i} - c_{a,i}} \quad (\text{Gleichung 3})$$

<i>e</i> :	eintretend	<i>m</i> :	Massenstrom einer Substanz
<i>a</i> :	austretend	<i>V</i> :	Volumen
<i>q</i> :	freigesetzte Substanz	<i>c</i> :	Konzentration
<i>i</i> :	Wasserdampf, CO ₂ , Tracer		

Kohlendioxid-Bilanz-Methode

Unter der Annahme, dass die Menge an CO₂, die im Stall produziert wird, und die, die durch die Lüftung nach draußen gelangt, gleich hoch sind, gilt:

$$P_{CO_2} = \dot{V} \cdot (c_i - c_a) \cdot 10^{-6} \quad (\text{Gleichung 4})$$

mit:

- P_{CO_2} : CO₂-Produktion (in m³/h)
- \dot{V} : Luftvolumenstrom (in m³/h)
- c_i : CO₂-Konzentration im Stall (in ppm)
- c_a : CO₂-Konzentration außerhalb des Stalls (in ppm)

Daraus folgt der Luftvolumenstrom \dot{V} mit

$$\dot{V} = \frac{P_{CO_2}}{(c_i - c_a) \cdot 10^{-6}} \quad (\text{Gleichung 5})$$

Ausführlich ist diese Methode bei OUWERKERK UND PEDERSEN (1994) dargestellt. Schwierigkeiten bereitet auch hier die Bilanzierung der CO₂-produzierenden Quellen, wie z. B. Tiere, Exkremete etc.. Auch HINZ ET AL. (1995) geben die Erfassung der Quelltherme von CO₂ als größte Schwierigkeit und somit als größte Fehlerquelle an.

SCHOLTENS ET AL. (1996) geben für diese Methode einen Fehler von 20 % an, allerdings können je nach Messbedingungen (Stallgröße, Lüftungssystem, Luftvolumenstrom, etc.) Fehler von bis zu 100 % auftreten.

Soll die Kohlendioxid-Konzentration von Masseneinheiten in Volumeneinheiten umgerechnet werden, muss eine Temperaturkorrektur vorgenommen werden. Zusätzlich zur CO₂-Produktion der Tiere muss die CO₂-Freisetzung aus der Gülle berücksichtigt werden. Die Gesamt-CO₂-Produktion von wachsenden Tieren bei bekannter Fett- und Eiweiß-Retention ist somit (OUWERKERK UND PEDERSEN, 1994):

$$P_{v,CO_2} = \frac{f_c \cdot n \cdot M_{CO_2} \cdot (T_i + 273)}{24 \cdot \rho_n \cdot 273} \cdot k_m \quad (\text{Gleichung 6})$$

mit:

- f_c : Korrekturfaktor für die tägliche CO₂-Produktion
- ρ_n : Dichte (in kg/m³), 1,98 für CO₂

- n : Anzahl der Tiere
 M_{CO_2} : CO₂-Produktion in kg/d
 T_i : Umgebungstemperatur (in °C)
 k_m : Korrekturfaktor für den CO₂-Anstieg durch die Freisetzung aus der Gülle (1,00- 1,04)

Der Korrekturfaktor f_c für die tägliche CO₂-Produktion beschreibt eine sinusartige Funktion, die in obige Gleichung eingesetzt werden kann (OUWERKERK UND PEDERSEN, 1994)

$$f_c = 1 - a \sin [\pi / 12 (t + 6 - t_{min})], \quad (\text{Gleichung 7})$$

wobei a die Amplitude der täglichen CO₂-Produktion ist, t die Tageszeit und t_{min} die Uhrzeit, bei der wahrscheinlich die geringste Aktivität auftritt.

Zur Berechnung der CO₂-Produktion bei unbekanntem Retentionen kann die folgende Formel unter Verwendung der Wärmeproduktion herangezogen werden (OUWERKERK UND PEDERSEN, 1994):

$$P_{v,CO_2} = \frac{0,0036 \cdot f_c \cdot n \cdot H \cdot 273}{\left(\frac{16,18}{RQ} + 5,02\right) \cdot (T_i + 273)} \cdot k_m \quad (\text{Gleichung 8})$$

- H : Wärmeproduktion in W/Tier
 RQ : Respiratorischer Koeffizient (Tabellenwerte, z. B. in OUWERKERK UND PEDERSEN, 1994)
 T_i : Umgebungstemperatur in °C

Wegen der großen tageszeitlichen Schwankungen der CO₂-Produktion schließen PEDERSEN UND ROM (1998), dass die Berechnung des Abluftvolumenstroms mit der Kohlendioxidbilanz nur auf der Basis von 24 h-Mittelwerten erfolgen kann. Verbesserungen können aber ihrer Meinung nach durch die Einführung von Korrekturfaktoren erzielt werden, wie sie z. B. OUWERKERK UND PEDERSEN (1994) vorstellen (siehe oben, f_c). Die Genauigkeit der CO₂-Bilanzmethode geben sie mit $\pm 15\%$ für den durchschnittlichen Tagesmittelwert an. Großer Wert muss hierbei auf die korrekte Angabe des Respirationskoeffizienten gelegt werden, außerdem sind stichprobenartige CO₂-Konzentrationsmessungen wegen der hohen täglichen Schwankungen nicht ausreichend.

PEDERSEN ET AL. (1998) vergleichen die CO₂-Bilanz-Methode mit der H₂O- bzw. Wärmebilanz und kommen für nicht wärmedämmte Ställe zu dem Schluss, dass hier wegen der schwer zu schätzenden Wärmedurchgangsverluste durch das Gebäude nur die CO₂-Bilanz-Methode angewendet werden kann.

WATHES ET AL. (1998) geben den Fehler ihrer Emissionsratenmessungen mit der CO₂-Bilanzmethode zur Volumenstrombestimmung mit 20 % an und erachten diesen Fehler als ausreichend, eine europaweite Emissionsbestandsaufnahme zu erstellen.

SEEDORF ET AL. (1998) setzen die CO₂-Bilanzmethode dann ein, wenn es darum geht, in vielen verschiedenen Ställen einen Überblick über die Abluftvolumenströme zu erhalten, weil sie die einzige schnell einsetzbare und kostengünstige Methode ist. Allerdings geben sie zu bedenken, dass „künstliche“ CO₂-Quellen (Gülle) die Genauigkeit nachteilig beeinflussen können und die CO₂-Produktion abhängig vom Tiergewicht, dem Gesundheitsstatus etc. ist. Die Genauigkeit geben sie mit ± 15 % und max. 20 % an.

Bei Vergleichsmessungen von HINZ UND LINKE (1999) wurden Abweichungen von 18,7 % zwischen berechneter und gemessener Lüftungsrate bei den 1 h-Mittelwerten ermittelt. Für die 12-h-Mittelwerte ergibt sich wegen der Anpassung der Mittelung an die Tieraktivität eine Abweichung von nur ca. 6,5 %, allerdings mit der Einschränkung der Autoren, dass dies nur für den untersuchten Stall (mit einem relativ gleichmäßigen Konzentrationsfeld für die Gase) gilt.

Bei einem Vergleich verschiedener Modelle (die alle nicht aus Praxismessungen entstanden sind) zur Quantifizierung der CO₂-Produktion bei Mastschweinen ergeben sich je nach angewandtem Modell große Unterschiede (NI, 1998) in der Höhe des produzierten CO₂. Bei einem Mastgewicht von 105 kg wichen die Modelle mit der geringsten und der größten CO₂-Produktion immerhin um den Faktor 3 voneinander ab. Das von NI (1998) aus Praxismessungen in Mastschweinställen entwickelte Modell TCER (Tranquil CO₂ Exhalation Rate) berechnet die von den Schweinen produzierte CO₂-Menge als

$$Q_{Cp,T} = a \cdot W_p^n \quad \text{(Gleichung 9)}$$

mit:

$Q_{Cp,T}$: Rate der CO₂-Produktion von Schweinen unter Ruhebedingungen (TCER) in g/h

a : Konstante = 15,373 ± 3,629

n : Konstante = 0,307 ± 0,060

W_p : Gewicht der Schweine in kg

Als weiteres Defizit der CO₂-Bilanz-Modelle stellt NI (1998) fest, dass die CO₂-Produktion aus der Gülle im Stall weit unterschätzt wird (vgl. k_m in Gleichung 6: $k_m = 1,00 - 1,04$ d. h. max. 4 % des CO₂ stammen aus der Gülle (OUWERKERK UND PEDERSEN, 1994) und Abschnitt 2.4.4). NI (1998) beobachtet, dass die Menge des aus der Gülle stammenden CO₂

durchschnittlich 48 % des von den Schweinen unter Ruhebedingungen (TCER: Tranquil CO₂ Exhalation Rate) produzierten CO₂ beträgt. Der maximal gemessene Anteil betrug 150 % der TCER. Als Gleichung ausgedrückt beträgt die CO₂-Freisetzung aus der Gülle (Ni, 1998) in Abhängigkeit der Flüssigmisttemperatur, der Lüftungsrate und der Gesamt tiermasse folgendes:

$$Q_{Cm} = e^{-0,767+15,618 \cdot 10^{-5} W_{pt} + 32,576 \cdot 10^{-3} T_m + 0,877 \ln(V)} \quad (\text{Gleichung 10})$$

Q_{cm} : CO₂-Freisetzungsrate

T_m : Flüssigmisttemperatur in °C (8,7 - 20 °C)

V : Lüftungsrate in m³/h (373 - 5254 m³/h)

W_{pt} : Gesamtgewicht der Schweine im Abteil in kg (0 - 5095 kg)

Wärmebilanzmethode

Bei der Wärmebilanzmethode kommt es wie bei den oben genannten Bilanzierungsmethoden darauf an, alle relevanten Quellen zu kennen und quantifizieren zu können. Die kontinuierliche Erfassung der folgenden Größen ist notwendig:

- Wärmeabgabe der Tiere,
- Wärmeeinstrahlung auf das Gebäude,
- Wärmedurchgang durch das Bauwerk,
- Wärmespeicherung in den Bauteilen (Fußboden, Tragwerke, Innenwände),
- Beleuchtungswärme,
- Wärmeabgabe insbesondere der Heizflächen (Heizkörper, Gasstrahler, Einstreu) und
- Wärmegehalt der Luft

Die Addition dieser Einflussgrößen ergibt die vom System abgegebene Wärmemenge pro Zeiteinheit. Diese ist in Bezug zur Außentemperatur und der Stalltemperatur zu setzen. Damit kann der notwendige Volumenstrom ermittelt werden, der die gebildete Wärmemenge abtransportiert, um die gemessene Stalltemperatur aufrecht halten zu können.

Kritisch ist auch hier wieder eine unvollständige Erfassung aller Wärmequellen zu sehen, wodurch die Bilanz unvollständig wird und sich der Volumenstrom falsch berechnet. Hier liegen die Fehler bei der Bestimmung der Volumenströme bei ca. 20 % im Winter, im Sommer können sie allerdings weit darüber liegen, wenn vor allem das thermodynamische Verhalten der Stallhülle nur unzureichend vom Bilanzierungsmodell erklärt wird PEDERSEN ET AL. (1998).

BRUNSCH ET AL. (1995) vergleichen die o. g. drei Bilanzierungsmethoden in zwei Ställen über einen Zeitraum von 10 Tagen. Hierbei ergeben sich je nach zu Grunde gelegter Bilanzierungsmethode zur selben Zeit und im selben Versuchsstall erhebliche Unterschiede im Volumenstrom. Durch die Wärmebilanzmethode erhält man einen ca. 20 – 30 % höheren Volumenstrom gegenüber der CO₂-Bilanzmethode, durch die Wasserdampfbilanzmethode ergeben sich 2 bis 3-mal höhere Volumenströme als bei der CO₂-Bilanz. Auch spätere Untersuchungen veranschaulichen die Diskrepanz zwischen NH₃- und CH₄-Emissionsraten, die auf der Basis der CO₂- und Wärmebilanz errechnet wurden. So nehmen die mit der CO₂-Bilanz errechneten Emissionsraten über den Versuchszeitraum weniger stark zu als die mit der Wärmebilanz errechneten Emissionsraten (BRUNSCH, 1998).

PEDERSEN UND ROM (1998) untersuchten die Tagesschwankungen der Wärmeproduktion der Tiere in Abhängigkeit der Tieraktivität. Sie kamen zu dem Ergebnis, dass es große tageszeitliche Schwankungen der Tieraktivität, Kohlendioxidproduktion und der Wärmeproduktion gibt, wobei die Amplituden gegen Ende der Mast geringer werden. Die Korrelation der Tieraktivität mit der Wärmeproduktion ergibt ein Bestimmtheitsmaß von $R^2 = 0,65$. Da die Tieraktivität jedoch stark vom Fütterungsregime abhängt, können diese Ergebnisse nur auf ad libitum Fütterung angewendet werden.

PEDERSEN ET AL. (1998) finden beim Vergleich von CO₂-, H₂O- und Wärmebilanzmethode heraus, dass die bei der Berechnung der Wärmeproduktion die Produktion der sensiblen Wärme für Schweine unter Sommerbedingungen unterschätzt wird. Setzt man jedoch den Wert hierfür bei Schweinen auf 61 % der Gesamtwärmeproduktion fest, so erhält man in einem Temperaturbereich zwischen 15 und 25 °C eine gute Übereinstimmung der Wärme und H₂O-Bilanz.

2.2.2.2 Tracergasmethode

Das Prinzip der Tracergasfreisetzung und -messung ist bereits im Abschnitt „Kohlendioxid- und Wasserdampfbilanz“ angesprochen worden. Der Vorteil dieser Methode gegenüber den klassischen Bilanzierungsmethoden ist, dass die Bezugsgröße nicht unbekannt ist und nicht erst aufwendig und meist unvollständig bilanziert werden muss, sondern in bekannter Menge freigesetzt wird (HINZ ET AL., 1995). Die Voraussetzung für die Anwendung der Tracergasmethode ist aber die vollständige Durchmischung des Tracers mit der Stallluft. Wird ein Tracergas im Stall in bestimmter Menge ausgebracht, unter der Annah-

me, dass die Luft, die in den Stall gelangt, auch wieder aus dem Stall ausströmt, ergibt sich folgender Zusammenhang (HINZ ET AL., 1995):

$$\dot{V}_a = \frac{\dot{V}_T \cdot c_T}{c_a - c_e} \quad \text{mit } \dot{V}_T \ll \dot{V}_e \quad \text{und} \quad \dot{V}_e \approx \dot{V}_a \quad (\text{Gleichung 11})$$

T : Tracer

a : austretende Luft

e : eintretende Luft

c : Konzentration

Für die Freisetzung des Tracergases und der anschließenden Berechnung des sich daraus ergebenden Luftvolumenstroms werden drei verschiedene Methoden angewandt:

1. Abklingmethode,
2. konstante Emission und
3. konstante Konzentration.

Zu 1.: Bei der Abklingmethode wird eine bekannte Menge eines Tracers auf einmal freigesetzt und dabei mit der Stallluft gleichmäßig vermischt. Anschließend wird mit einem geeigneten Analysator die Abnahme der Konzentration des Tracers über die Zeit gemessen. Bei geringen Luftwechsellern ergibt sich so bei bekanntem Stallvolumen die Luftwechselrate n (in $1/h$) als:

$$n = \frac{\ln(c_0) - \ln(c_1)}{t_G} \quad (\text{Gleichung 12})$$

c_0 : Anfangstracerkonzentration

c_1 : Tracerkonzentration nach der Zeit t_G

Allerdings wird mit dieser Methode nur die momentane Luftwechselrate bestimmt. Außerdem sind bei nicht vollständiger Durchmischung des Tracers mit der Stallluft hohe Fehler zu erwarten.

Zu 2.: Bei der Methode der konstanten Emission wird über einen bestimmten Zeitraum eine konstante Menge des Tracers im Stall freigesetzt, wobei auf vollständige Durchmischung mit der Stallluft zu achten ist. Diese Methode ist besonders für kontinuierliche und lange Messungen geeignet, es wird aber eine große Menge Tracergas benötigt, was die Kosten dieses Verfahrens erheblich erhöht. Die Luftwechselrate lässt sich anhand der Tra-

cer-Injektionsrate F (in m^3/h), des Stallvolumens V (in m^3) und der gemessenen Tracerkonzentration der Stallluft c (in m^3/m^3) ermitteln:

$$n = \frac{F}{V \cdot c} \quad (\text{Gleichung 13})$$

Die Voraussetzung für die Anwendung dieses Verfahrens ist konstanter Luftdurchsatz durch den Stall und eine konstante Tracergasinjektion. Kritisch ist hier wieder die Vermischung im Stall zu sehen, außerdem ist ein konstanter Luftdurchsatz durch den Stall nicht kontinuierlich gewährleistet (BREHME, 1997).

Zu 3.: Die Methode der konstanten Konzentration wird verwendet bei kontinuierlichen Messungen über kurze Zeiträume. Prinzip ist, die Tracergaskonzentration am Versuchsort die ganze Zeit über konstant zu halten. Die Luftwechselrate n (in $1/h$) ist in Abhängigkeit von der Zeit:

$$n(t) = \frac{F(t)}{V \cdot c} \quad (\text{Gleichung 14})$$

Die Regelung der konstanten Tracerkonzentration in der Stallluft ist schwierig und birgt wegen zeitlicher Verzögerungen große Fehlerpotentiale. Außerdem ist auch dieses Verfahren wegen der großen Mengen Tracergas kostenintensiv. Weiter ist auch hier die vollständige Durchmischung des Tracers mit der Stallluft problematisch.

Generell ist bei den Tracergasmessungen anzuführen, dass die Platzierung der Tracergasdosierung und der Tracer-Probenahmeorte an die im Stall herrschenden Luftströmungen adaptiert werden muss, um eine Durchmischung mit der Stallluft gewährleisten zu können. Eine Querlüftung bei Schweineställen benötigt andere Platzierungen als die Ermittlung des Luftvolumenstroms in Trauf-First gelüfteten Rinderställen (HOFFMANN UND SEIPELT, 1998).

Bereits LEONARD ET AL. (1984) führten Messungen mit Tracergas in Ställen durch. Sie berichten davon, dass die SF_6 -Tracergasmethode bei zwangsgelüfteten Ställen mit Überdrucklüftung zuverlässig funktioniert, jedoch muss größter Wert auf die vollständige Durchmischung des Tracers mit der Stallluft gelegt werden.

SCHOLTENS ET AL. (1996) verglichen den Einsatz der CO_2 -Bilanzmethode und Tracergasfreisetzung (CO) in einem zwangsentlüfteten Milchvieh-Stall mit der Methode „Messventilator im Abluftkamin“ und erhielten bei der CO_2 -Bilanz einen um 18 % geringeren

Abluftvolumenstrom als beim Einsatz des Messventilators, die CO-Tracergasfreisetzung zeigte keinen signifikanten Unterschied zur Messung mit dem Messventilator.

DEMMERS ET AL. (1998) erzielte mit der Tracergasmethode der „konstanten Emission“ mit CO als Tracer bei niedrigen Windgeschwindigkeiten die größte Genauigkeit. Bei hohen Windgeschwindigkeiten ist die Genauigkeit am geringsten. Von großer Bedeutung sind die Probenahmeorte; so ergaben Proben im inneren Ring des Gebäudes um 45 % höhere Schätzungen des Volumenstroms als Proben an den Stallinnenwänden. Zusätzlich wurden kontinuierlich mit verschiedenen Methoden die Stallöffnungen beobachtet, ob sie momentan als Zu- oder als Abluftöffnungen fungieren.

SEIPELT ET AL. (1998) setzen die Abklingmethode an verschiedenen frei gelüfteten Rinderställen ein, wobei sie ein spezielles Dosiersystem mit kritischen Kapillaren entwickelt haben, mit dem die gleichmäßige Verteilung des Tracers in der Stallluft erreicht werden soll. Als Tracer wird SF₆ verwendet.

MÜLLER UND MÖLLER (1998) verwenden als Tracergas Krypton 85, das mit Finger- oder Flächenzählrohr detektiert wird. Sie gehen hier davon aus, dass zur Bestimmung der Luftströme bei hohen Luftwechselraten 30 und mehr Messstellen im Stall mit einer hohen zeitlichen Auflösung nötig sind, wie sie von einem Multigas-Monitor in Kombination mit SF₆ als Tracergas nicht verlässlich erreicht werden können. Bei der Verwendung von Krypton 85 als Tracer gibt MÜLLER (1976) (in KRAUSE ET AL., 2000) für Luftwechsel < 20/h einen Fehler von 8 % an, für Luftwechsel von 100/h wird ein Fehler von 20 % genannt (KAUPA, 1990) (in KRAUSE ET AL., 2000).

Für die Tracergasmethode (mit SF₆, CO und CO₂ als Tracergase) fand NI (1998) bei verschiedenen Autoren unterschiedliche Angaben zur Genauigkeit dieser Methoden: so gibt OUWERKERK (1993) eine Genauigkeit von 10 % oder weniger an, FISK ET AL. (1991) zeigten, dass die Genauigkeit in einem belüfteten Gebäude nicht besser als 30 % sein kann. DEMMERS (1993) geht von einer relativen Genauigkeit von 50 % aus, wohingegen VAN'T KLOOSTER UND HEITLAGER (1992) zu recht guten Ergebnissen kommen.

2.2.2.3 Kammertechniken

Eine weitere Methode zur Volumenstrombestimmung und somit auch zur Emissionsratenbestimmung sind die sogenannten Kammermethoden, bei denen die emittierende Quelle mit Hilfe einer festen Hülle in unterschiedlichen Größen eingehaust wird. Man unterscheidet hier in *statische* und *dynamische* Kammern. Die statischen Kammern arbeiten mit der

Anreicherung des zu messenden Gases in der geschlossenen Einhausung. Dieses Vorgehen ist nur bei Gasen, die in sehr niedrigen Konzentrationsbereichen vorkommen (z. B. N_2O), sinnvoll.

Dynamische Kammern haben eine Zuluft- und eine Abluftöffnung; sie werden mit einem im „Abluftkamin“ eingebauten Ventilator zwangsentlüftet. An dieser Stelle wird mit Messventilatoren der Volumenstrom gemessen. Dynamische und statische Kammern werden bisher meist zur Messung von Emissionen nach der Ausbringung von Gülle (SCHIRMER U. KUTZBACH, 1997; REITZ U. KUTZBACH, 1997) eingesetzt.

Als Erster führte LOCKYER (1983) eine solche Kammermessung mit einem 1 m^2 großen Windtunnel aus Polycarbonat durch. Messungen mit dynamischen Kammern in Ställen sind nur von AMON ET AL. (1998) bekannt. AMON ET AL. (1998) verwenden eine 27 m^2 große Polycarbonat-Kammer (Höhe: 2m), bei der die Zuluftseite mit einem Windschutznetz verkleidet ist, in der Abluftseite ist ein von $1.000\text{-}11.000\text{ m}^3/\text{h}$ regelbarer Abluftventilator mit Messventilator eingebaut. Von Nachteil ist hier, dass durch die Installation der Kammer im Stall die Tieraktivität beeinträchtigt wird, und somit nicht das Haltungssystem als solches erfasst werden kann, sondern lediglich emittierende Oberflächen (AMON ET AL., 1997). Außerdem stellt eine Kammerhülle eine zusätzliche Oberfläche im System dar, die bei Ammoniak wegen dessen starker Polarität zu Adsorptionen an dieser Oberfläche führen und somit die Messung der Konzentration verfälschen kann. Vergleiche zweier dynamischer Kammern (Grundfläche $0,25\text{ m}^2$) mit der Tracergasmethode und der Messung über den Abluftventilator ergeben für die kurzen gleichzeitig durchgeführten Messungen in einem Mastschweinstall mit Tiefstreu eine gute Übereinstimmung der Ergebnisse. Allerdings wurden die Kammermethoden nur über jeweils 1-2 h und unter Ausschluss der in den Abteilen befindlichen Tiere durchgeführt (SVENSSON ET AL., 1997). Auch können mit diesem Versuch keine Aussagen über längere Zeiträume oder sogar über Mastdurchgänge getroffen werden.

2.2.2.4 Differenzdruckmethode

Eine weitere Möglichkeit zur Luftratenbestimmung durch freigelüftete Ställe ist, die vielen großen Zu- und Abluftöffnungen mit Differenzdrucksensoren auszustatten und über die entsprechend gemessenen Differenzdrücke zwischen Stallinneren und Umgebung die jeweils durch diese Fläche geströmte Luftmenge zu ermitteln (DEMERS, 1997). In verschiedenen Versuchen, bei denen die Differenzdruckmethode mit der Tracergasmethode

und der Messung mit Messventilatoren verglichen wurde, kam er jedoch zu dem Ergebnis, dass die gegenwärtige Methode nicht korrekt ist und zu hohen Abweichungen vom tatsächlichen Abluftvolumen führt.

Fazit: Für die Bestimmung des Abluftvolumenstroms aus zwangsentlüfteten Ställen gibt es verschiedene praxisübliche und genaue Verfahren (z. B. Messventilatoren). Im Gegensatz dazu können die Abluftvolumenströme aus frei oder natürlich gelüfteten Ställen, wie den sog. Außenklimaställen, bislang nur mittels aufwendiger Bilanzierungsverfahren bestimmt werden, die Messungenauigkeiten von bis zu 50 % aufweisen. Auch kontinuierliche Messungen des Abluftvolumenstroms sind damit nicht möglich.

2.2.3 Messmethoden zur Multigasanalyse

Im Folgenden werden die verschiedenen Messtechniken zur Multigasmessung dargestellt. Da das Hauptaugenmerk auf der gleichzeitigen Messung mehrerer Gase (NH_3 , CH_4 , N_2O , CO_2 , H_2O) liegt, werden die Messtechniken, die zur NH_3 -Messung geeignet sind, dargestellt und danach bewertet, ob sie weitere Gase (CH_4 , N_2O , CO_2 , H_2O) messen können.

Messtechnische Anforderungen an die Gaskonzentrationsmesstechnik zur Emissionsratenbestimmung in Ställen im Rahmen länger dauernder Messungen sind folgende (STEGBAUER, 1996):

- geringe Messungenauigkeit (VDI 2449, Bl. 2),
- geringe Nullpunktdrift (VDI 2449, Bl. 2),
- hohe Wiederholbarkeit (VDI 2449, Bl. 2),
- hohe Standzeiten,
- geringer Wartungsbedarf und
- robuste Geräteausführung.

Unter Berücksichtigung dieser Anforderungen und der Notwendigkeit, NH_3 und weitere Gase (CH_4 , N_2O , CO_2 , H_2O) messen zu müssen, sind in Tabelle 4 die möglichen Messtechniken und repräsentative Messgeräte dargestellt, die alle auf dem Prinzip der Absorptionsspektroskopie basieren. Der in den Niederlanden meist zur NH_3 -Messung verwendete NH_3 -Konverter und NO_x -Analyzer wird im Folgenden nicht dargestellt, da er nur zur Bestimmung von NH_3 eingesetzt werden kann.

Tabelle 4: Verschiedene Messprinzipien der Multigas-Messung

Messprinzip	Gerät	Messbare Gase
Nichtdispersive Infrarot-Photometrie (NDIR)	Binos (Fa. Rosemount)	NH ₃ , CO ₂ und CH ₄ , jeweils einzeln
Photoakustische Infrarot-Spektroskopie (PAS)	Multigasmonitor 1302 (Fa. Brüel & Kjær)	Je nach Anzahl der optischen Filter bis zu 5 verschiedene Gase und Wasserdampf
	MAC 2040 (Fa. Wenger)	NH ₃ mit Wasserkompensation
Fouriertransformierte Infrarotspektroskopie (FTIR)	K300 (Fa. Kayser & Threde) Nicolet	Je nach Auswertung im infraroten Bereich absorbierende Gase

Das Messprinzip der Absorptionsspektrometrie beruht auf der selektiven Absorption von Strahlung einer bestimmten Wellenlänge des elektromagnetischen Strahlungsspektrums durch bestimmte Gasmoleküle. Diese bestimmte Wellenlänge, bei der die Strahlungsabsorption durch das zu bestimmende Gas stattfindet, kann durch einen Monochromator unterschiedlicher Ausführungen erreicht werden. Durch die Absorption kommt es zu einem für das jeweilige Gas charakteristischen Spektrum (STAAB, 1991).

Die Intensität I_0 der einfallenden Strahlung in der Messzelle wird durch die Absorption des zu messenden Gases abgeschwächt und die Intensität I der aus der Messzelle austretenden Strahlung wird von Detektoren, die je nach verwendetem Messprinzip unterschiedlichster Ausprägung sind, registriert. Mit Hilfe des Lambert-Beer'schen Gesetzes

$$I(\nu) = I_0 \cdot e^{-\alpha(\nu)lc} \quad (\text{Gleichung 15})$$

kann aus dem Verhältnis von eintretender zu austretender Strahlung die Konzentration c des Gases berechnet werden, wobei l die Länge der Messzelle und a der spezifische Absorptionskoeffizient des zu messenden Gases ist (nach STAAB, 1991).

$$c = 1/\alpha(\nu)l \cdot \ln I_0/I(\nu) \quad (\text{Gleichung 16})$$

- I aus der Messzelle austretende Strahlungsintensität
- I_0 in die Messzelle eintretende Strahlungsintensität
- ν Wellenzahl [m^{-1}]
- l Länge der Messstrecke
- c Gaskonzentration [ppm]
- α Absorptionskoeffizient des Gases [$\text{ppm}^{-1}\text{m}^{-1}$]

In Abbildung 2 ist dieser Zusammenhang anhand eines Spektrometer-Modells zur Gasanalyse graphisch dargestellt.

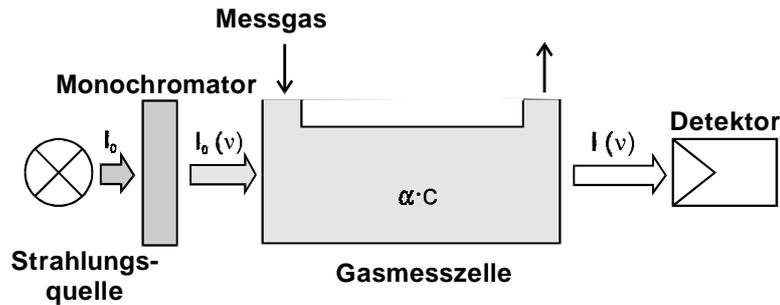


Abbildung 2: Modell eines Spektrometers zur Gasanalyse (STAAB, 1994)

Die verschiedenen Messverfahren der Absorptionsspektroskopie unterscheiden sich lediglich hinsichtlich ihrer Strahlungsquelle und der Art ihrer Detektion und Modulation. Entscheidend für eine gute Eignung des Gerätes ist, ob die zur Messung der Gaskonzentrationen ausgewählte Spektren möglichst geringe Querempfindlichkeiten zu anderen Gasen auftreten lassen und die Einstellzeit möglichst kurz ist (STAAB, 1991).

2.2.3.1 NDIR (Nichtdispersive Infrarot-Spektroskopie)

Das Verfahren beruht wie oben beschrieben auf der Absorption von Infrarotlicht durch das Messgas. Im Gegensatz zu dispersiven Spektroskopen, die durch die Dispersion von an einem Gitter oder einem Prisma gestreuten weißen Licht nur bestimmte Frequenzen des Lichts durch das Gas zum Empfänger senden, wird die Strahlung bei nichtdispersiven Verfahren zunächst ohne Frequenzselektion auf die Messeinrichtung gerichtet. Um Querempfindlichkeiten durch die Absorption des Lichtes bei benachbarten Frequenzen durch andere Gase zu vermeiden, ist generell eine gute Frequenzauflösung der Messeinrichtung (angegeben in Wellenzahlen⁻¹) nötig. Typische NDIR-Geräte arbeiten mit zwei Messstrecken; die eine geht durch das zu messende Gas, die andere durch ein Referenzgas, mit dessen Hilfe I_0 gebildet wird. Die Wellenlänge selektivität wird durch den selektiven Detektor, der je nach Messgerät verschiedene Detektionsprinzipien hat, erreicht. Bei einem typischen NDIR-Gerät, dem Binos®-IR (ROSEMOUNT, 1991) besteht der Detektor aus einer gasgefüllten Absorptionskammer und einer Ausgleichskammer. Der Detektor ist grundsätzlich mit dem Gas gefüllt, das gemessen werden soll; so wird die Wellenlänge selektivität erreicht. Während der Messung erhöht sich durch die Infrarot-Strahlung, die am Detektor ankommt der Druck in der Absorptionskammer und strömt in die Ausgleichskammer; gemessen wird die Strömungsgeschwindigkeit zwischen den beiden Kammern. Ein den Gaszellen (Referenzzelle und Messgaszelle) vorgeschaltetes Zerhackerrad bewirkt, dass die

Strömungsrichtung abwechself. Die Messgenauigkeit hängt von der Ausführung der Geräte ab.

2.2.3.2 Photoakustische Infrarot-Spektroskopie PAS

Die photoakustische Infrarot-Spektroskopie bezeichnet ein Verfahren, das den opto- bzw. photoakustischen Effekt, also die Wärme- bzw. Druckerhöhung eines Gases in einem abgeschlossenen Volumen durch Absorption von Strahlung, ausnutzt (STAAB, 1994). Die Wellenlängenselektivität wird meist über optische Filter als Dispersionselement erreicht (WENGER, 1995; BRÜEL & KJÆR, 1996), bekannt sind hier auch Michelson-Interferometer. Die optischen Interferenzfilter haben ein relativ begrenztes Auflösungsvermögen (STAAB, 1994). Nach KRAHL ET AL. (1995) messen sie die Absorptionen in einem 50-100-mal breiteren Wellenzahlband. Das Prinzip wird zur dispersiven Infrarot-Spektroskopie gezählt, da die Interferenzfilter auf dem Prinzip des Fabry-Perot-Etalons basieren, das zu den dispersiven Elementen zählt (STAAB, 1994). Der Aufbau eines solchen optischen Filters und das Prinzip des Fabry-Perot-Etalons ist bei CHRISTENSEN (1990) dargestellt.

Von einer IR-Strahlungsquelle gelangt infrarote Strahlung durch den für das zu messende Gas spezifischen optischen Filter und wird anschließend von einem Zerkhackerrad in gleichmäßige Strahlungsimpulse aufgeteilt, die in die Messkammer gelangen und dort durch die Strahlungsabsorption des zu messenden Gases in der Messzelle zu einer periodischen Druckerhöhung führen. Diese Druckimpulse werden von in der Messkammer integrierten Schalldruckwandlern detektiert und sind ein Maß für die Konzentration des zu messenden Gases (BRÜEL & KJÆR, 1992). Der Vorteil bei diesem Messprinzip ist, dass durch die Anordnung verschiedener optischer Filter im Gerät die Möglichkeit besteht, mehrere Gase quasi gleichzeitig mit nur einem Messgerät zu messen (BRÜEL & KJÆR, 1992). Der Nachteil dieses Messprinzips ist, dass die optischen Filter, mit denen die meisten Geräte arbeiten, nur eine Auflösung von 100 cm^{-1} haben, die zur Messung verwendeten Wellenzahlbereiche bei der Messung von Klima-Spurgasen (NH_3 , CH_4 , N_2O) jedoch geringere Strukturen in der Größenordnung von $0,2\text{ cm}^{-1}$ aufweisen. Bei der Verwendung von optischen Filtern ist somit mit Querempfindlichkeiten zu anderen Gasen, hauptsächlich CO_2 und H_2O , zu rechnen. Diese Querempfindlichkeiten müssen kompensiert werden, indem man die Konzentration des störenden Gases kennt oder in einem Messbereich arbeitet, in dem keine Querempfindlichkeiten auftreten (GRONAUER ET AL., 1995).

Das in dieser Arbeit eingesetzte Verfahren der PAS mit optischen Filtern wird ausführlich in Abschnitt 5.1 beschrieben.

2.2.3.3 Fouriertransformierte Infrarotspektroskopie (FTIR)

Die Fouriertransformierten-Infrarotspektroskopie (FTIR) basiert wie alle absorptionspektrometrischen Verfahren auf dem Lambert-Beerschen Gesetz. Die FTIR unterscheidet sich von anderen absorptionspektrometrischen Verfahren vor allem in seiner spektralen Auflösung, die deutlich höher als die typische Bandbreite einer Linie von $0,2 \text{ cm}^{-1}$ sein kann (max. Auflösung des in dieser Arbeit u. a. eingesetzten FTIR-Spektrometers K300: $0,06 \text{ cm}^{-1}$ bei 7,2 m Pfadlänge).

Das Gas absorbiert zwischen Infrarotstrahler und Detektor bei gasspezifischen Frequenzen bzw. Wellenzahlen des Lichtes Strahlung. Aus der Wellenzahl und der Stärke der Absorption kann auf das Gas und seine Konzentration geschlossen werden. Der Messpfad verläuft entweder entlang einer offenen Messtrasse von bis zu mehreren 100 Metern oder in einer Gaszelle. Bei der Gaszelle handelt es sich um einen mit Messgas befüllten und beheizten Glaszylinder, in dem an beiden Enden Spiegel angebracht sind. Die Infrarotstrahlung wird in die Zelle eingekoppelt und zwischen diesen Spiegeln hin und her geworfen, um einen längeren Messpfad zu erreichen, der individuell eingestellt werden kann. Bei dem in dieser Arbeit verwendeten FTIR-Gerät K300 der Firma Kayser Threde kann bei der „kleinen Gaszelle“ eine Pfadlänge von 0,8 m - 7,2 m eingestellt werden, bei der „großen Gaszelle“ von bis zu 31,5 m. Danach gelangt die Strahlung in den Detektor. Dem eigentlichen Detektor ist ein Michelson-Interferometer (Abbildung 3) vorgeschaltet (GRIFFITHS U. HASETH, 1986). Die Anordnung des Michelson-Interferometers im FTIR-Gerät ist in Abbildung 5 zu sehen.

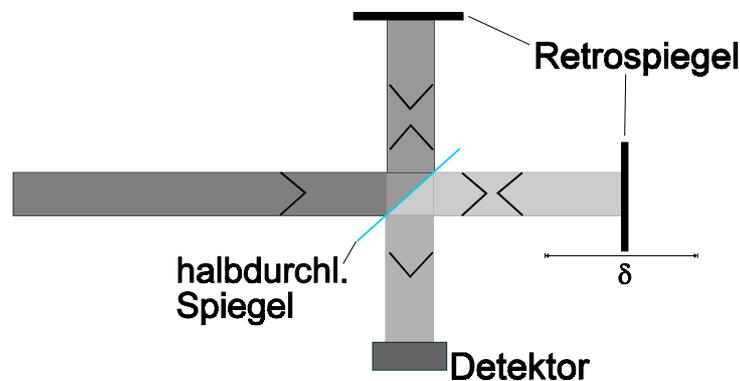


Abbildung 3: Schematische Darstellung des Michelson-Interferometers (nach GRIFFITHS UND HASETH, 1986)

Die Infrarotstrahlung gelangt durch das zu analysierende Gas und fällt durch ein Einkoppelfenster auf einen halbdurchlässigen Spiegel. Die eine Hälfte der Strahlung wird in den Retrospiegel 1 abgelenkt, die andere in den Retrospiegel 2 durchgelassen. Nach der Reflexion vereinigen sich die beiden Strahlen wieder und gelangen in den Detektor. Der Retrospiegel 2 ist beweglich und verändert so den Weg, den der entsprechende Strahl zurücklegen muss. Für eine bestimmte Wellenzahl führt das nach der Vereinigung der beiden Strahlen zu einem Interferenz-Bild: Je nach Weglänge kommt es zu einer positiven oder negativen Überlagerung der beiden Lichtstrahlen und damit zu einem hohen oder niedrigen Signal am Detektor (GRIFFITHS UND HASETH, 1986).

Dieser Vorgang entspricht für den gesamten Wellenzahlbereich im Spektrum einer Fouriertransformation: Das am Detektor aufgenommene Interferogramm ist das fouriertransformierte Absorptionsspektrum von Abbildung 4 (GRIFFITHS UND HASETH, 1986).

Mit der Lichtintensität am Detektor muss dazu auch die genaue Stellung des verschiebbaren Spiegels aufgezeichnet werden. Dieses Bild wird digitalisiert und von der angeschlossenen Datenverarbeitung zurücktransformiert. Dadurch steht dem Benutzer wieder das Spektrum wie in Abbildung 4 zur Verfügung (RUSSWURM UND CHILDERS, 1996).

Als Detektoren können mit flüssigem Stickstoff gekühlte Halbleiter-Bauelemente eingesetzt werden. Für Linien in höheren Wellenzahlbereichen sind Detektoren aus Indium-Antimon (InSb) geeignet, Quecksilber-Cadmium-Tellurium-Detektoren (MCT) können auch niedrigere Wellenzahlen, wie sie für Ammoniak gebraucht werden, erfassen (GRIFFITHS UND HASETH, 1986).

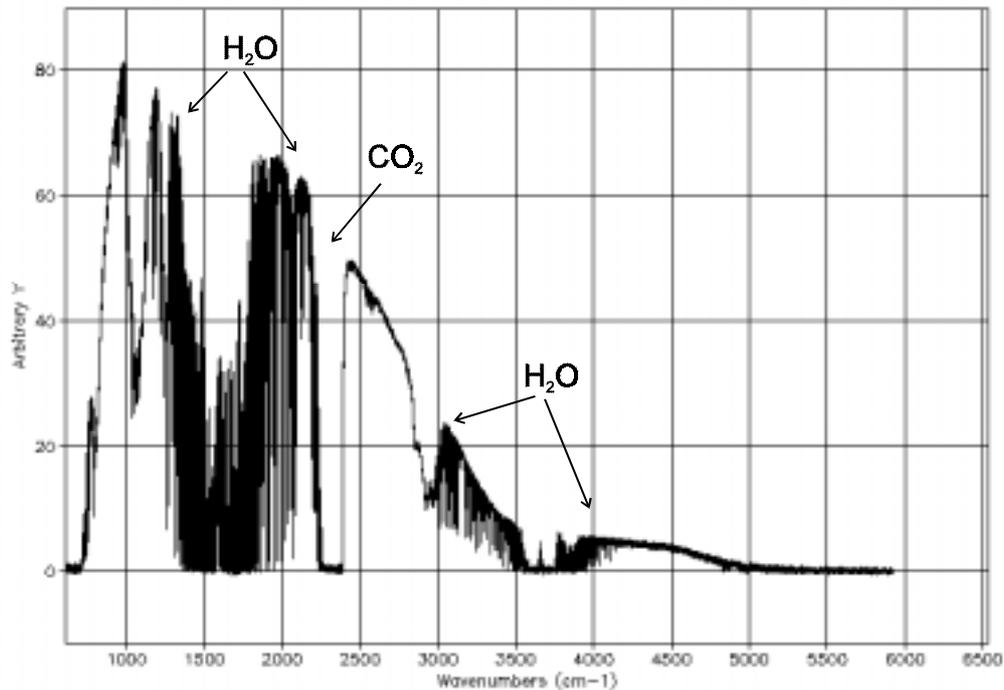


Abbildung 4: Absorptionsspektrum (nach RUSSWURM UND CHILDERS, 1996)

FTIR-Spektroskope haben gegenüber herkömmlichen IR-Spektroskopen folgende Vorteile (RUSSWURM U. CHILDERS, 1996):

1. Ein Spektrum des gesamten Wellenzahlbereiches wird auf einmal aufgenommen und kann dann auf alle Gase, die im Infraroten absorbieren, untersucht werden.
2. Es wird kein Wellenzahlbereich durch Filter oder dispersive Elemente ausgeblendet, wodurch keine Intensität verloren geht. Dies führt zu einem besseren Signal-zu-Rausch-Verhältnis (SNR).
3. Eine hohe spektrale Auflösung (beim K300 bis zu $0,06 \text{ cm}^{-1}$).

Das Spektrometer K300, das in dieser Arbeit an der Landtechnik Weihenstephan (LTW) verwendet wurde, arbeitet nicht mit einem linear verschobenen Spiegel, sondern mit einem Doppelpendel, da sich eine Pendelbewegung leichter hochgenau realisieren lässt. Außerdem hat diese Anordnung den Vorteil, bei einem Pendelhub eine gegenüber dem üblichen Michelson-Interferometer 4-fache optische Weglängenänderung zu verursachen: Wird der erste Strahlenweg verlängert, wird der zweite gleichzeitig verkürzt. Parallel zu dem Strahlengang wird ein Laserstrahl eingekoppelt (Abbildung 5), über dessen Referenzbild im Referenzdetektor die Weglänge gemessen wird (BITTNER ET AL., 1991).

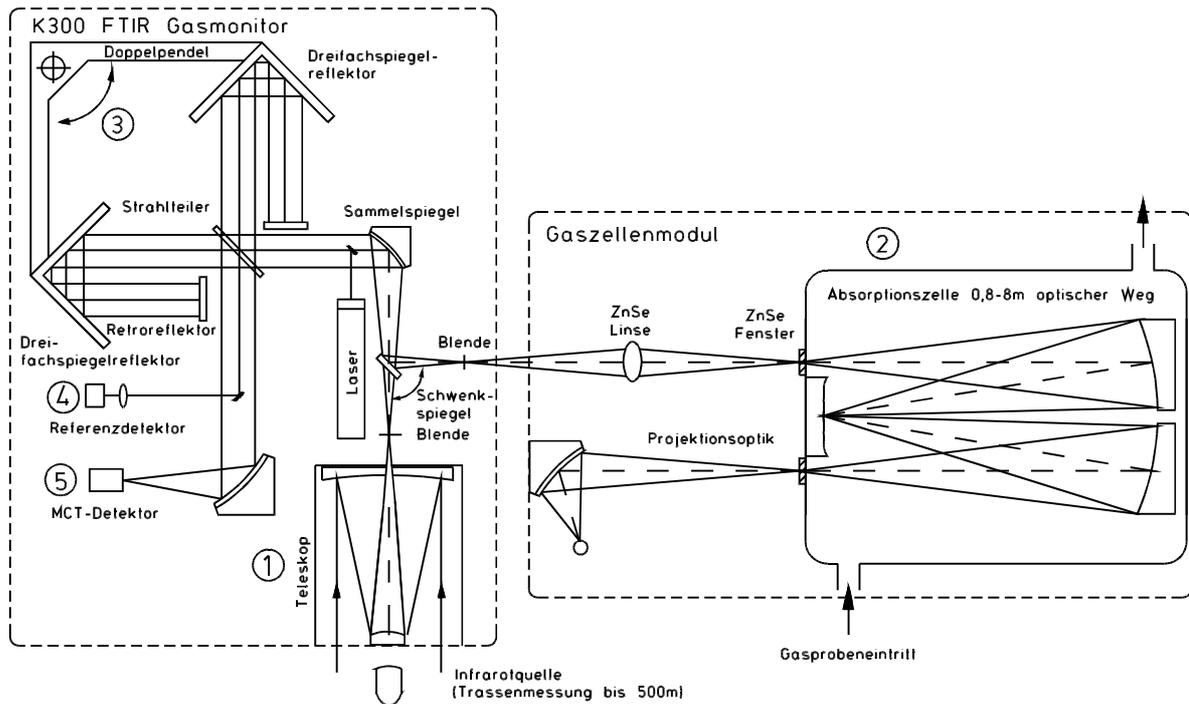


Abbildung 5: Schematischer Aufbau des Spektroskops K300: Strahlengang und Gaszelle (nach KAYSER-THREDE, 1994)

Auswertung, Software

Zur Konzentrationsbestimmung eines Gases müssen die Länge des optischen Pfades, der Absorptionskoeffizient und die Intensität vor und nach der Absorption durch das Gas bekannt sein (Siehe Abschnitt 2.2.3). Arbeiten zur Bestimmung der jeweiligen Absorptionskoeffizienten und zur Optimierung der Auswertesoftware finden sich bei DEPTA, 2000.

Das FTIR-Gerät K300 ist ein hochgenaues Messgerät mit einer hohen Auflösung von max. $0,06 \text{ cm}^{-1}$. Dadurch ist es unempfindlich gegen Querempfindlichkeiten zu CO_2 und H_2O . Weitere Vorteile sind:

1. Rüstzeit von $< 1 \text{ h}$
2. Online-Auswertung von gleichzeitig bis zu 9 Gasen

Daten zur Qualitätssicherung und Kalibration des FTIR-Spektrometers der LTW finden sich bei DEPTA ET AL. (1996), DEPTA ET AL. (1997) und DEPTA ET AL. (1999).

2.2.3.4 Einsatz der Multigasmesstechnik in der Literatur

Die oben beschriebenen verschiedenen Gaskonzentrationsmesstechniken sowie weitere, im Rahmen dieser Arbeit nicht in Frage kommende Techniken, wurden von verschiedenen Institutionen deutschland- und europaweit zur Bestimmung der Emissionsraten klima- und

umweltrelevanter Gase aus Schweine-, Rinder- und Geflügelställen eingesetzt und werden beispielhaft im Folgenden dargestellt.

HESSE (1993) hat bei einem Vergleich verschiedener Haltungssysteme für Mastschweine die NH_3 - und N_2O -Konzentrationen *diskontinuierlich* gemessen. Die NH_3 -Konzentrationsmessung erfolgte zweimal pro Woche über jeweils 24 h mit dem Indophenolverfahren und entsprechender Probenahme nach VDI 2461. Zur N_2O -Konzentrationsmessung wurden täglich Einzelproben aus dem Abluftkamin entnommen und gaschromatographisch analysiert.

HARTUNG (1995) hat über 23 Wochen die NH_3 -Konzentrationen aus zwei Jungsauen-Aufzuchtteilen mit dem NDIR-Gerät Binos® (Fa. Rosemount) gemessen. In weiteren Messkampagnen an Mastschweineeställen messen GALLMANN ET AL. (1999) außerdem noch CH_4 und CO_2 mit zwei zusätzlichen NDIR-Spektrometern.

Längere Messungen wurden bei verschiedenen Legehennenhaltungssystemen durchgeführt (NESER ET AL., 1997; NESER, 2000). Zur Messung der Gaskonzentrationen wurde hier das o.g. FTIR-Spektrometer K300 (Fa. Kayser-Threde) eingesetzt. Der Einsatz ist jedoch betreuungsintensiv und mit hohen Unterhaltungskosten (z. B. N_2 zur Kühlung des Detektors) verbunden.

BREHME (1997) hat während einmonatiger Messkampagnen in einem Mastschweineestall fünf verschiedene Gase und Wasserdampf mit dem B&K Multigasmonitor 1302 (Fa. InnoVa Airtech Instruments) gemessen, der nach dem Prinzip der Photoakustischen Infrarot-Spektroskopie arbeitet.

KAISER (1999) setzte für die Dauer mehrerer Mastdurchgänge ebenfalls einen Multigasmonitor 1302 zur Messung von fünf Gasen und Wasserdampf ein. In regelmäßigen Abständen wurden die gemessenen Konzentrationen mit geeigneten Referenzmesstechniken überprüft; die NH_3 -Messung mit der Methode der Nasschemie, die N_2O -Messung mit einem Prozesschromatographen RGC 202 (Fa. Siemens). Die aufgetretenen Abweichungen des B&K 1302 zu den Referenzmesstechniken wurden über Korrekturfunktionen in die gemessenen Gaskonzentrationen eingerechnet.

SEIPELT (1999) hat in freigelüfteten Rinderställen die Gaskonzentrationen von NH_3 , N_2O , CH_4 , CO_2 , H_2O und SF_6 (zur Volumenstrombestimmung mittels Tracergasmessung) ebenfalls mit dem Multigasmonitor B&K 1302 gemessen. Das Gerät wurde vor beiden Messpe-

rioden an der Gasmischstation des Landtechnischen Institutes der Universität Bonn kalibriert.

HAHNE ET AL. (1999) verwendeten zur Messung der Gaskonzentrationen von NH_3 , N_2O , CH_4 , CO_2 und H_2O zur Emissionsratenbestimmung aus Mastschweine-Vollspaltenställen mehrere Messgeräte. NH_3 wurde mit einem Optas/UV-Absorptions-Messgerät gemessen, N_2O und CH_4 mit einem FTIR-Spektrometer 9100, CO_2 mit einem IR-Absorptionsspektrometer Multor 610, bei einer Messungengenauigkeit von 1 % des jeweiligen Messbereichsendwertes.

GROOT KOERKAMP U. BLEIJENBERG (1995) messen die NH_3 -Konzentration in Legehennenställen mit dem NO_x -Konverter, der in der bei OUWERKERK (1993) beschriebenen Konfiguration in den Niederlanden vorzugsweise eingesetzt wird, ebenso wie in belgischen Messungen (NI, 1998).

In englischen Untersuchungen werden die NH_3 -Konzentrationen überwiegend mit NO_x -Konvertern (Chemolumineszenz) gemessen (SNEATH, 1996). N_2O , CH_4 und CO_2 werden hier mit separaten Infrarot-Spektrometern gemessen (siehe auch PHILLIPS ET AL, 1995). In anderen Untersuchungen werden die CH_4 -Konzentrationen mit einem FID (Flammenionisations-Detektor) und die N_2O -Konzentrationen mit einem ECD (Electron Capture Detector) gemessen (PHILLIPS ET AL, 1997a). Im Rahmen der Entwicklung einer robusten Methode zur Messung von Gaskonzentrationen (PHILLIPS ET AL, 1997b) werden zur NH_3 -Messung wiederum NO_x -Konverter eingesetzt, zur CO_2 -Konzentrationsmessung ein separates Infrarot-Spektrometer. Auch DEMMERS ET AL. (1996), DEMMERS (1997) und DEMMERS ET AL. (1998) setzten den NO_x -Konverter zur NH_3 -Messung ein.

In dänischen Untersuchungen (ROM UND DAHL, 1998) wird wie in den eigenen Untersuchungen das photoakustische Infrarot-Spektrometer Multigasmonitor 1302 eingesetzt. ROM UND DAHL (1998) vergleichen damit in zwangsgelüfteten Ställen ein Vollspaltenbodensystem mit einem Teilspaltenbodensystem.

Fazit: Zur Bestimmung der Gaskonzentrationen in der Abluft von Ställen stehen verschiedene Messtechniken zu Verfügung. Bewährt hat sich europaweit der Einsatz absorptionspektrometrischer Verfahren, hier besonders von photoakustischen Messverfahren. Höchste Messgenauigkeit wird mit der FTIR-Messtechnik erreicht, die allerdings wegen des intensiven Betreuungsaufwandes und der hohen Betriebskosten nur bedingt für Dauermessungen einsetzbar ist, vielmehr dient sie als Referenzmesstechnik zur Überprüfung der eingesetzten Messtechnik.

2.3 Bekannte Emissionsraten aus der Mastschweinehaltung

Im Zuge verschiedener verfahrenstechnischer Betrachtungen und Bewertungen der Mastschweinehaltung und der Ermittlung tierartsspezifischer Emissionsfaktoren wurden bereits verschiedene Emissionsraten für NH_3 , CH_4 , N_2O und CO_2 für verschiedene Haltungssysteme der Mastschweinehaltung ermittelt.

Diese in der Literatur dokumentierten Emissionsraten klima- und umweltrelevanter Gase (NH_3 , N_2O , CH_4) aus der Mastschweinehaltung unterscheiden sich teilweise stark und sind wegen der auf unterschiedliche Art und Weise erhobenen Daten nicht uneingeschränkt miteinander vergleichbar. Gründe dafür sind:

- verschiedene Haltungssysteme,
- unterschiedlich lange Untersuchungszeiträume (1 Tag bis mehrere Wochen),
- unterschiedliche Messtechnik zur Gaskonzentrations- und Volumenstrombestimmung und
- unterschiedliche Randparameter, z. B. Jahreszeit, Fütterung, Klima o. ä.

2.3.1 Ammoniak-Emissionsraten

In Abbildung 6 sind die in der Literatur gefundenen NH_3 -Emissionsraten der Mastschweinehaltung aus konventionellen Warmställen mit Teilspaltenboden dargestellt. Ebenso sind in dieser Abbildung die NH_3 -Emissionsraten aus Warmställen mit Einstreu und mit Schrägboden enthalten, da sie den in dieser Arbeit untersuchten Außenklimahaltungssystemen mit Einstreu am ehesten entsprechen. Deutlich erkennbar sind Differenzen zwischen und innerhalb der verschiedenen Haltungssysteme. Die Spanne der Höhe der Emissionsraten reicht von 0,45 bis 7,05 g/(h*500 kg LM) bei den Mastschweineeställen mit Teilspaltenboden, von 2,59 bis 4,17 g/(h*500 kg LM) bei den Schrägmistställen und von 1,43 bis 8,39 g/(h*500 kg LM) bei den eingestreuten Systemen. Die gezeigten NH_3 -Emissionsraten stammen aus unterschiedlich langen Untersuchungszeiträumen und aus verschiedenen Jahreszeiten. Ebenso wurden verschiedene Messtechniken zur Gaskonzentrations- und Volumenstrommessung eingesetzt. Die gemessenen NH_3 -Emissionsraten bei AARNINK ET AL. (1995), AARNINK ET AL. (1997), ROM (1994a), HESSE (1994) und CIELEJEWSKI UND RATSCHOW (1996) stammen aus Messungen über mindestens einen Mastdurchgang. In der Literatur finden sich hingegen wenige Emissionsraten aus Außenklimaställen. Die vorhandenen Emissionsraten hierzu sind in Abbildung 7 dargestellt.

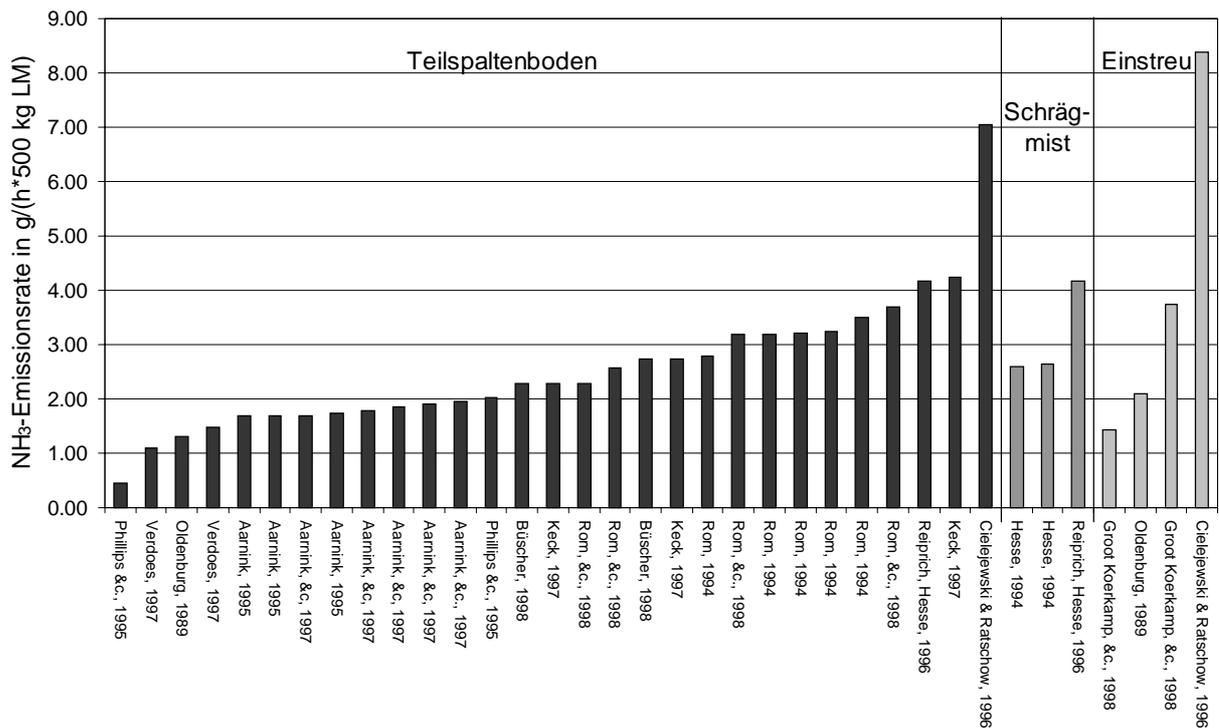


Abbildung 6: NH₃-Emissionsraten aus zwangsentlüfteten Mastschweinehaltungssystemen (Warmställe): Teilspaltenboden, Schrägmist und eingestreute Systeme (Literaturübersicht)

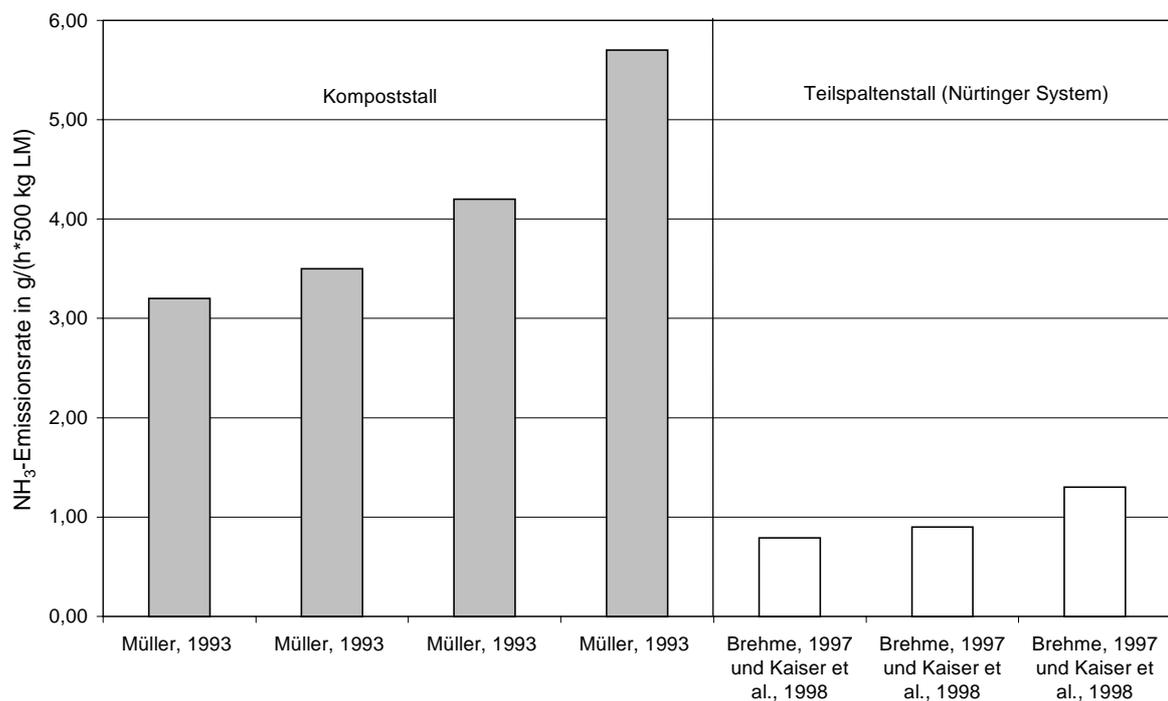


Abbildung 7: NH₃-Emissionsraten aus freigelüfteten Mastschweinehaltungssystemen (Außenklimaställe)

Die Werte in Abbildung 7 sind Ergebnisse von 1-Tages- bzw. 24-Stunden-Messungen. MÜLLER (1993) führte Untersuchungen in freigelüfteten Kompostställen durch. Die Gaskonzentrationen hat er mit dem B&K Multigasmonitor 1302 gemessen. Zur

konzentrationen hat er mit dem B&K Multigasmonitor 1302 gemessen. Zur Bestimmung der Volumenströme aus dem Stall setzte er die Tracergasmessung mit Krypton 85 ein. Der 1., 2. und 4. Wert wurden im Winter gemessen, der 3. Wert im Sommer. Die Tiergewichte betragen 70-90 kg. BREHME (1997) und KAISER ET AL. (1998a), die beide dieselben Messungen in einem Teilspaltenbodenstall mit dem „Nürtinger System“ (vgl. Abschnitt 2.1) beschreiben, haben die Gaskonzentrationen ebenfalls mit dem B&K Multigasmonitor 1302 gemessen, die Volumenströme mit dem Tracergas SF₆. Die Messungen fanden hier im Herbst statt, die Tiergewichte betragen 50–60 kg.

Abbildung 7 legt den Schluss nahe, dass aus den freigelüfteten Kompostställen ca. 3 bis 6-mal mehr NH₃ freigesetzt wird als aus den Nürtinger Systemställen mit Teilspaltenboden. Die Emissionsraten sind aber wegen der kurzen, stichprobenartigen Messdauer nur als Anhaltswerte für die untersuchten Haltungssysteme zu sehen.

2.3.2 Lachgas-Emissionsraten

In der Literatur sind zu Lachgasemissionsraten aus der Mastschweinhaltung nur wenige Daten zu finden (Abbildung 8). Hauptsächlich wurden die N₂O-Emissionsraten aus Tiefstreuställen und Kompostställen im Vergleich zu Vollspaltenbodenställen als Referenzverfahren untersucht. Zu Teilspaltenbodenställen konnten keine Angaben gefunden werden. Deutlich zu erkennen ist, dass im Vollspaltenbodenstall (HAHNE ET AL., 1999; KAISER, 1999; VAN DEN WEGHE ET AL., 1998) kaum N₂O-Emissionen entstehen. Die im Tiefstreustall ermittelten N₂O-Emissionsraten schwanken zwischen 0,05 und 3,17 g/(h*500 kg LM) und sind somit wesentlich höher als die aus den Vollspaltenställen. Die N₂O-Emissionsraten aus den Kompostställen (KAISER, 1999) schwanken zwischen 0,05 bis 2,89 g/(h*500 kg LM) und liegen damit im Bereich der Tiefstreuställe. Eine direkte Vergleichbarkeit ist aber wegen unterschiedlicher Randparameter und verschiedener Gaskonzentrations- und Volumenstrombestimmung nicht gegeben. Die in Abbildung 8 dargestellten N₂O-Emissionsraten stammen alle aus Messungen über mindestens einen Mastdurchgang.

Analog zu den in Abbildung 7 dargestellten Messungen wurden von MÜLLER (1993), BREHME (1997) und KAISER ET AL. (1998a) gleichzeitig die N₂O-Emissionsraten aus den frei gelüfteten Außenklimaställen gemessen. Die Werte sind in Abbildung 9 dargestellt.

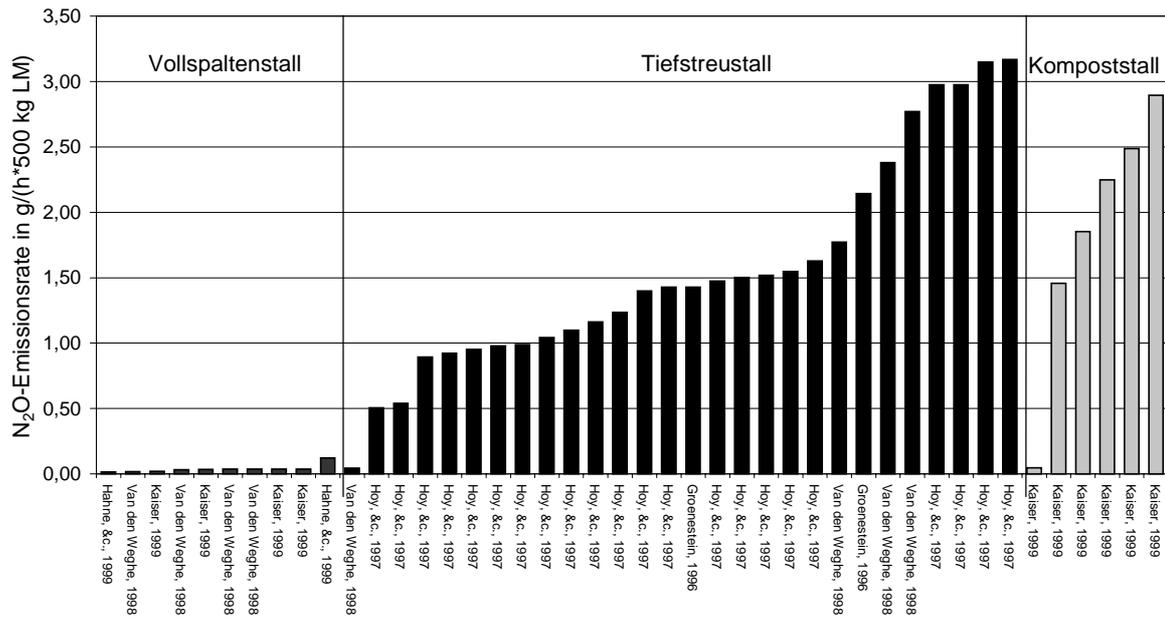


Abbildung 8: N₂O-Emissionsraten aus zwangsentlüfteten Mastschweinehaltungssystemen (Warmställe): Vollspaltenboden-, Tiefstreu- und Kompoststall

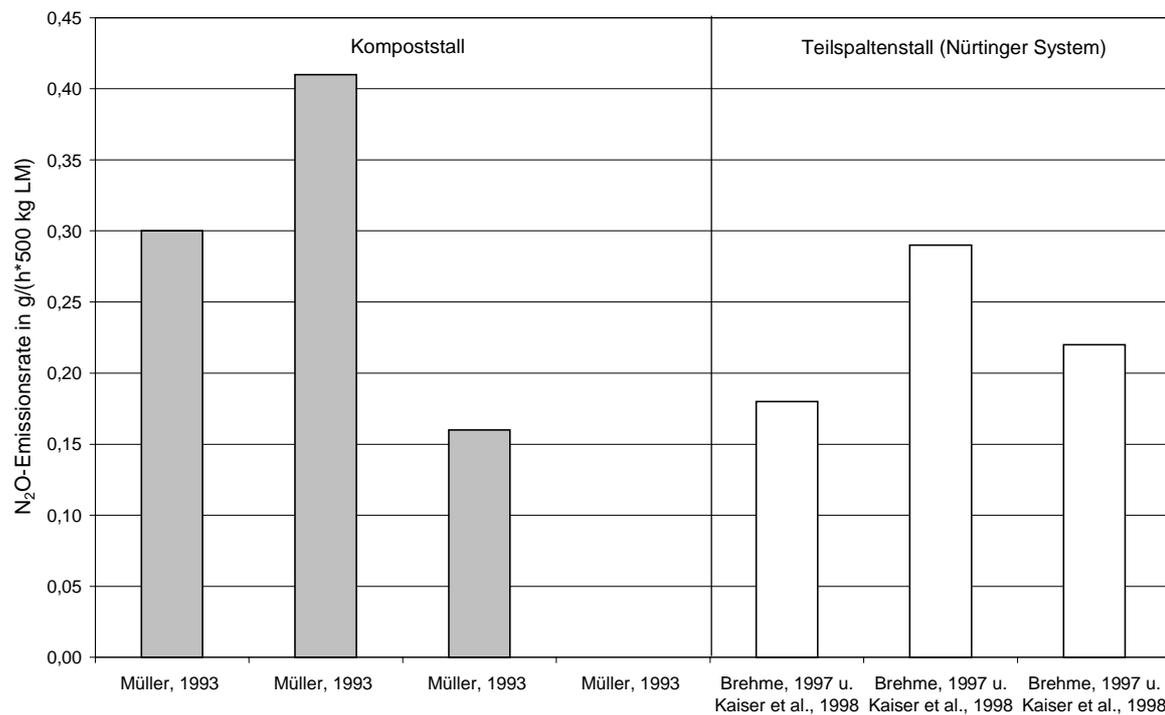


Abbildung 9: N₂O-Emissionsraten aus freigelüfteten Mastschweinehaltungssystemen (Außenklimaställe)

Zu erkennen ist, dass die N₂O-Emissionsraten aus dem Nürtinger System tendenziell niedriger sind als aus dem Kompoststall. Da aber auch diese Angaben nur auf 1-Tages bzw. 24-

Stunden Messungen beruhen, können sie nur als Anhaltswerte dienen und sind jedoch keinesfalls für die jeweiligen Systeme repräsentativ.

2.3.3 Methan-Emissionsraten

Für Methan gibt es in der Literatur kaum Daten zu tierspezifischen Emissionsraten. In Abbildung 10 sind die CH₄-Emissionsraten für verschiedene Mast Schweinehaltungssysteme dargestellt.

Wie aus Abbildung 10 ersichtlich ist, unterscheiden sich die CH₄-Emissionsraten sowohl zwischen den verschiedenen Haltungssystemen als auch innerhalb gleicher Systeme. Die Gründe dafür liegen wieder an den o.g. unterschiedlichen Randparametern und verschiedenen Gaskonzentrations- und Volumenstrommessmethoden. Auffällig ist die große Spannweite der CH₄-Emissionsraten bei den Vollspaltenställen von 1,38 bis 11,01 g/(h*500 kg LM), niedrigere Emissionsraten werden in den übrigen Haltungssystemen gemessen. Alle Werte außer PHILLIPS ET AL. (1995) stammen aus Messungen über mindestens einen Mastdurchgang. Der 5. bis 7. Wert der Emissionsraten aus Schrägmistställen von AHLGRIMM UND BREFORD (1998) beinhaltet auch die Messung der Emissionen aus dem Festmistlager.

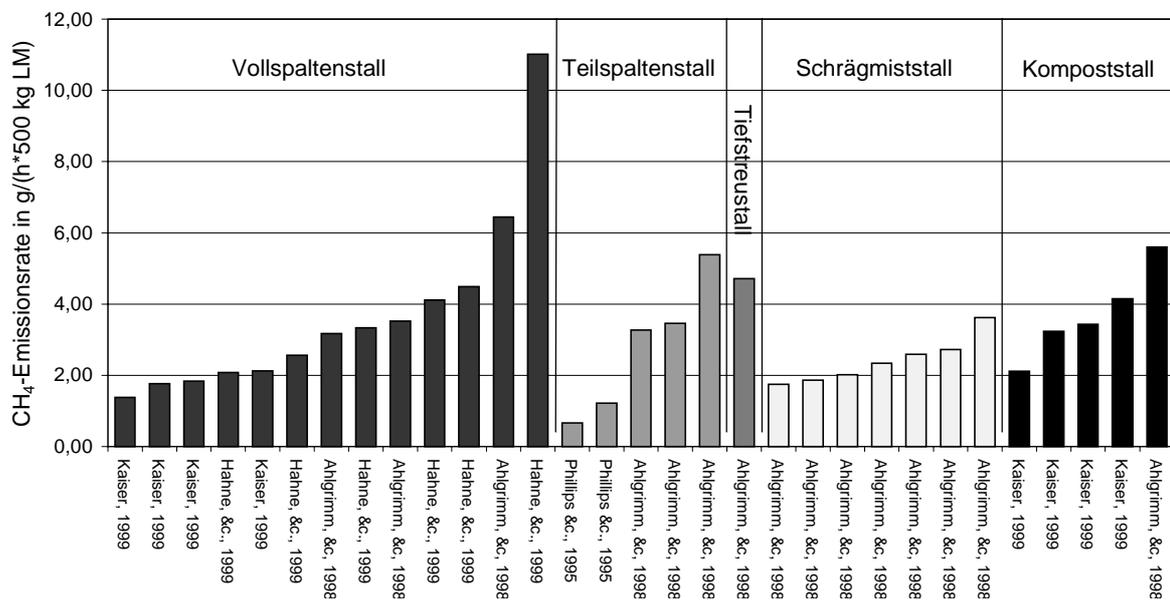


Abbildung 10: CH₄-Emissionsraten aus zwangsentlüfteten Mast Schweinehaltungssystemen (Warmställe): Vollspaltenboden-, Teilspaltenboden-, Tiefstreu-, Schrägmist- und Kompoststall

Analog zu den von MÜLLER (1993), BREHME (1997) und KAISER ET AL. (1998a) gemessenen NH₃- und N₂O-Emissionsraten wurden gleichzeitig die CH₄-Emissionsraten ermittelt. Die Werte werden in der folgenden Abbildung 11 dargestellt.

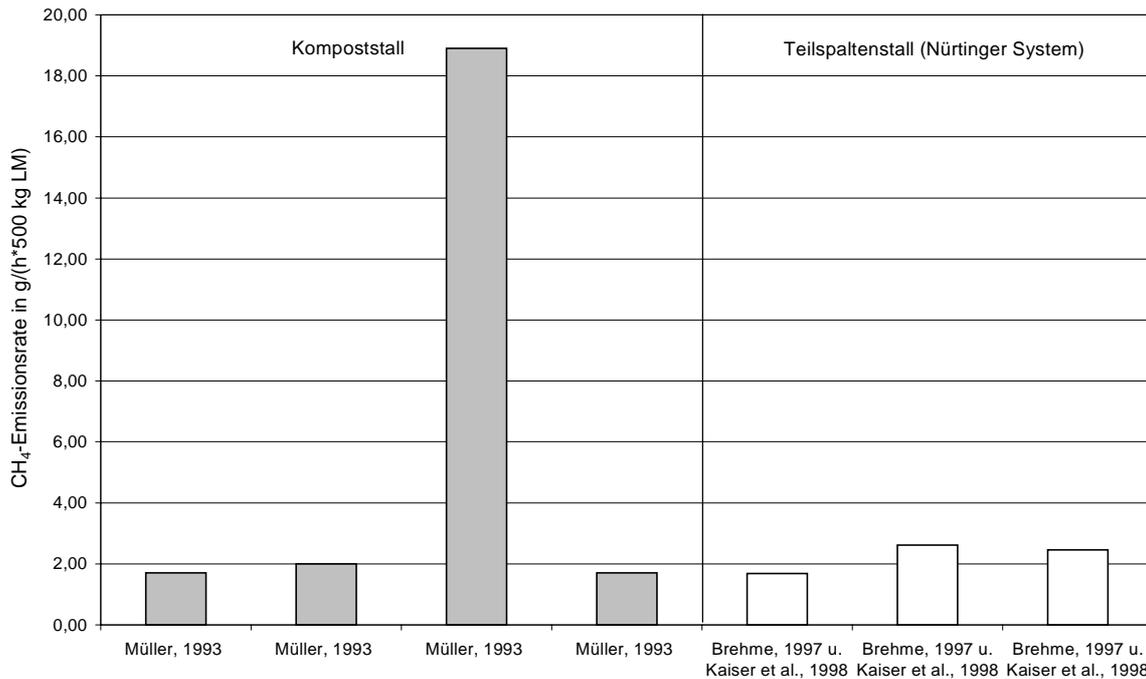


Abbildung 11: CH₄-Emissionsraten in aus freigelüfteten Mastschweinehaltungssystemen (Außenklimaställe)

Zu erkennen ist, dass die CH₄-Emissionsraten mit meist kleiner 2,0 g/(h*500 kg LM) vergleichsweise niedrig sind, bei einer Messung im Kompoststall jedoch sehr hohe Emissionsraten gemessen wurden. Auch diese Werte können nur als Anhaltspunkte für die untersuchten Systeme herangezogen werden; der Unsicherheitsfaktor aufgrund der kurzen Messzeitdauer ist erheblich.

Fazit: Zu Emissionsraten aus der Mastschweinehaltung gibt es bereits einige auf Dauermessungen über mind. einen Mastdurchgang beruhende Ergebnisse für zwangsentlüftete Ställe. In den frei gelüfteten sog. Außenklimaställen für Mastschweine konnten bisher nur kurzzeitige Messungen über mehrere Stunden bis 2-Tage durchgeführt werden. Hierbei wurde die Tracergasmethode zur Abluftvolumenstromermittlung angewandt. Die Ergebnisse dieser Kurzzeitmessungen sind wegen der großen tages- und jahreszeitlichen Variabilität der Emissionsraten aus der Mastschweinehaltung jedoch nicht repräsentativ, so dass für die Außenklimaställe Dauermessungen zur Einordnung der gasförmigen Emissionen zu fordern sind.

2.4 Gasemissionen aus dem Stall

Wie aus dem vorherigen Abschnitt zu vermuten ist, unterliegt die Entstehung und Freisetzung von Gasemissionen aus dem Stall verschiedenen Einflüssen. Die Kenntnis dieser Bildungs- und Umsetzungsvorgänge sowie deren Beeinflussung ermöglicht ein sinnvolles Eingreifen in Produktionsabläufe, um Schadgasemissionen zu mindern: So hemmen bestimmte Umgebungsbedingungen die Entstehung des einen Gases, führen jedoch zu einer

erhöhten Bildung des anderen Gases. Ein Beispiel hierfür ist die $\text{NH}_3\text{-N}_2\text{O}$ -Wechselbeziehung in Kompostställen (KAISER, 1999). Im folgenden stehen Ammoniak (NH_3), Methan (CH_4), Lachgas (N_2O) und Kohlendioxid (CO_2) im Vordergrund. Die Darstellung der Bildungsmechanismen dieser Gase aus den Exkrementen ist jedoch ohne Kenntnis der auf diese Bildung Einfluss nehmenden Umgebungsparameter unvollständig. Daher werden zusätzlich zu den Bildungsmechanismen die die Entstehung und Freisetzung der verschiedenen Gase beeinflussenden Faktoren dargestellt.

2.4.1 Ammoniak (NH_3):

Ammoniak entsteht auf aerobem und anaerobem Weg. Es wird aus den Exkrementen bzw. den vom tierischen Organismus nicht genutzten Nahrungsbestandteilen gebildet. Die Stickstoffkomponenten Harnsäure, Harnstoff, Ammonium bzw. Ammoniak und unverdautes Protein stellen die Quellen der Ammoniakbildung dar. Da der N-Gehalt im Futter die Hauptquelle für die Entstehung von Ammoniak und anderen flüchtigen N-Verbindungen darstellt, kann über eine Anpassung der Futterrationen (bei angemessenen Gehalten essenzieller Aminosäuren) eine Reduzierung der Produktion dieser Stoffe erreicht werden. Verschiedene Autoren weisen diesen Zusammenhang zwischen den RP-Gehalten in den Futterrationen und der NH_3 -Emissionsrate (PFEIFFER, 1993; ROTH UND KIRCHGESSNER, 1996; BECK ET AL., 1998) nach und kommen zu dem Schluss, dass die NH_3 -Emission umso geringer ist, je niedriger die RP-Gehalte in der Futtration und somit je niedriger die $\text{NH}_4\text{-N}$ -Gehalte in der Gülle sind. Der Anteil ausgeschiedener N-Verbindungen am Futter-N nimmt mit zunehmendem Alter der Mastschweine zu.

AARNINK (1992) in CIGR (1994) stellt einen mathematischen Zusammenhang zwischen der Gesamt- NH_4 -Produktion (in $\text{kg}/(\text{d} \cdot \text{Schwein})$) und der Futteraufnahme (F_i), verdaulicher (dcp) und gesamt (cp) Rohproteingehalt im Futter und Eiweißretention der Schweine (G_p) und dem Anteil organischer Substanz, der bereits in flüchtige Fettsäuren und Biogas (A_{COD}) umgewandelt wurde, her:

$$Q_{\text{NH}_4^+} = 0,194 (dcp * F_i - G_p + 0,01 * A_{\text{COD}} * (cp - dcp) * F_i) \quad (\text{Gleichung 17})$$

Die Größenordnung für $Q_{\text{NH}_4^+}$ liegt zwischen 1 – 10 $\text{g}/(\text{d} \cdot \text{Schwein})$ (AARNINK, 1992 in CIGR, 1994).

Aerober Abbau

Der Abbau des in der Schweinegülle enthaltenen Harnstoffs zu Ammoniak und Kohlendioxid verläuft meist unter aeroben Bedingungen, wobei Wasser direkter Reaktionspartner ist. Wasser stellt außerdem einen für das Wachstum der Mikroorganismen wichtigen Milieufaktor dar und beeinflusst somit den Harnstoffabbau, da das Enzym Urease mikrobiellen Ursprungs ist. Der Abbau findet nach der folgenden Gleichung unter Vorhandensein des Enzyms Urease statt (MONTENY UND ERISMAN, 1998).



Die Harnstoff-Hydrolyserate und somit die NH_3 -Produktionsrate ist abhängig von der Harnstoffkonzentration im Urin und der Urease-Aktivität, die wiederum temperaturabhängig ist (MONTENY UND ERISMAN, 1998).

Anaerober Abbau

Ammoniak wird auch beim mikrobiellen Abbau von Eiweiß sowohl im Verdauungstrakt der Tiere, als auch durch in der Umgebung vorhandene Mikroorganismen gebildet. In Abbildung 12 ist dieser anaerobe Abbau von Eiweiß zu Ammoniak dargestellt (RIPPEL-BALDES, 1955).

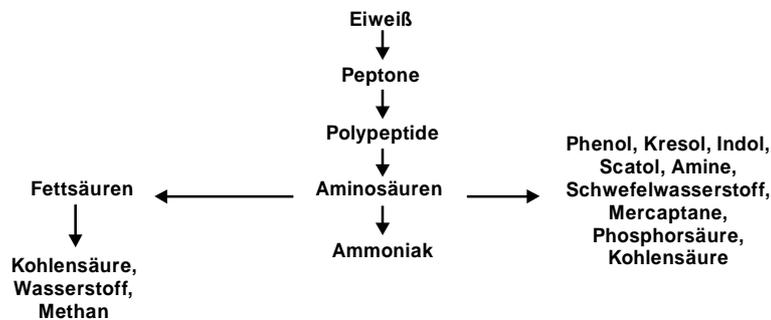


Abbildung 12: Anaerober Abbau von Eiweiß zu Ammoniak (RIPPEL-BALDES, 1955)

Freisetzung von NH_3 aus den Exkrementen

Neben den o.g. mikrobiellen und enzymatischen Einflüssen auf die NH_3 -Freisetzung hängt die NH_3 -Ausgasung aus der Lösung von Temperatur und pH-Wert der Lösung ab. Mit steigendem pH-Wert sowie steigender Temperatur erhöht sich die NH_3 -Freisetzung. Diese Zusammenhänge werden von verschiedenen Autoren beschrieben und sind ausführlich bei GRONAUER (1993) dargestellt.

In einer Literaturübersicht untersucht Ni (1999) dreißig Modelle, die die NH_3 -Bildung und -Verflüchtigung aus Flüssigmist betrachten. Zusammengefasst lassen sich diese Modelle graphisch wie folgt darstellen (Ni, 1999):

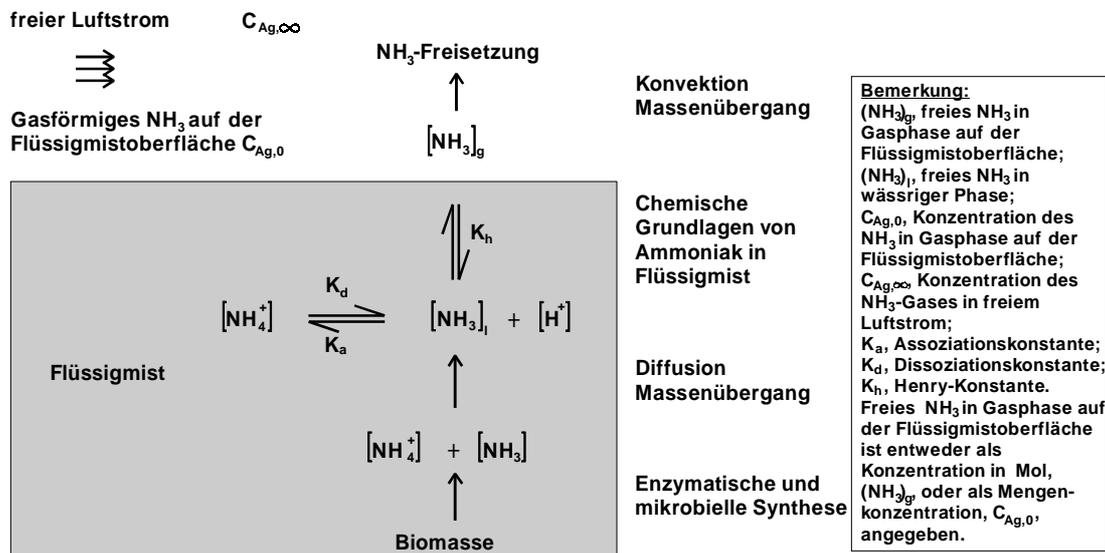


Abbildung 13: Mechanismus der NH_3 -Freisetzung aus Flüssigmist (nach Ni, 1999)

Über enzymatische und mikrobielle Prozesse der im Flüssigmist enthaltenen organischen Substanz entsteht NH_3 und NH_4^+ . Dieses Verhältnis wird durch die Dissoziationskonstante (K_d) und die Assoziationskonstante (K_a) bestimmt. Die Henry-Konstante (K_h) beschreibt das Verhältnis von freiem NH_3 in der flüssigen Phase und der gasförmigen Phase der Flüssigmistoberfläche.

Der konvektive Massenübergangskoeffizient ist für den Übergang des NH_3 aus der Flüssigmistoberfläche in den freien Luftstrom bestimmend. Die Umsetzungen im Flüssigmist sind hauptsächlich temperaturabhängig, der Übergang in die Gasphase wird von Temperatur und Überströmungsgeschwindigkeit bestimmt.

Fasst man diese Zusammenhänge mathematisiert zusammen, so ergibt sich folgende Gleichung (Ni, 1999) mit den jeweiligen Einflussfaktoren:

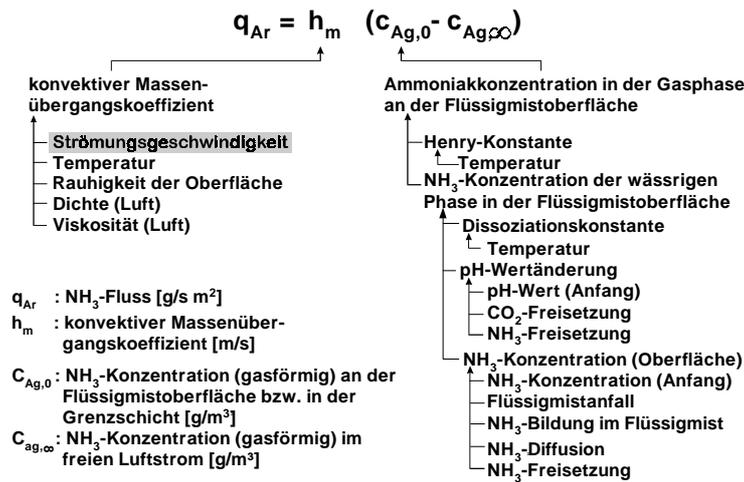


Abbildung 14: Mechanistisches Modell der NH₃-Freisetzung im Stall (Ni, 1999)

2.4.2 Methan (CH₄):

Die Methanbildung vollzieht sich überall dort, wo organische Substanz unter *anaeroben* Bedingungen von einer spezialisierten Gruppe streng anaerober Mikroorganismen, den methanogenen Bakterien, abgebaut wird (HEYER, 1990), was in Ställen bei geringer Lüftungsrate der Fall ist (CIGR, 1994). Weiter sind anaerobe Bedingungen in der landwirtschaftlichen Tierhaltung im Magen-Darm-Trakt von (pflanzenfressenden) Tieren, insbesondere von Wiederkäuern sowie bei der Lagerung der tierischen Exkremente gegeben. Die anaerobe Mineralisation des organisch gebundenen Kohlenstoffes ist dadurch gekennzeichnet, dass Sauerstoff (O₂) als Elektronenakzeptor fehlt. Statt dessen werden die in Tabelle 5 dargestellten Elemente als alternative Elektronenakzeptoren verwendet (HEYER, 1990).

Tabelle 5: Elektronenakzeptoren bei der anaeroben C_{org}-Mineralisation (HEYER, 1990)

Elektronenakzeptor			Reaktionstyp
Mn ⁴⁺	→	Mn ²⁺	Manganreduktion
NO ₃ ⁻ /NO ₂ ⁻	→	N ₂ /NH ₄ ⁺	Denitrifikation/Nitratammonifikation
Fe ³⁺	→	Fe ²⁺	Eisenreduktion
SO ₄ ²⁻ /S ₂ O ₃ ²⁻	→	H ₂ S	dissimilatorische Sulfatreduktion
S	→	H ₂ S	dissimilatorische Schwefelreduktion
HCO ₃ ⁻	→	CH ₄	Methanogenese

Als Substrate zur Methanbildung werden von den methanogenen Bakterien Acetat, Formiat, Methanol, CO, Mono-, Di- und Trimethylamin, 2-Propanol und Ethanol verwendet (HEYER, 1994). Die Stufen des anaeroben Abbaus komplexer organischer Substanzen zeigt Abbildung 15.

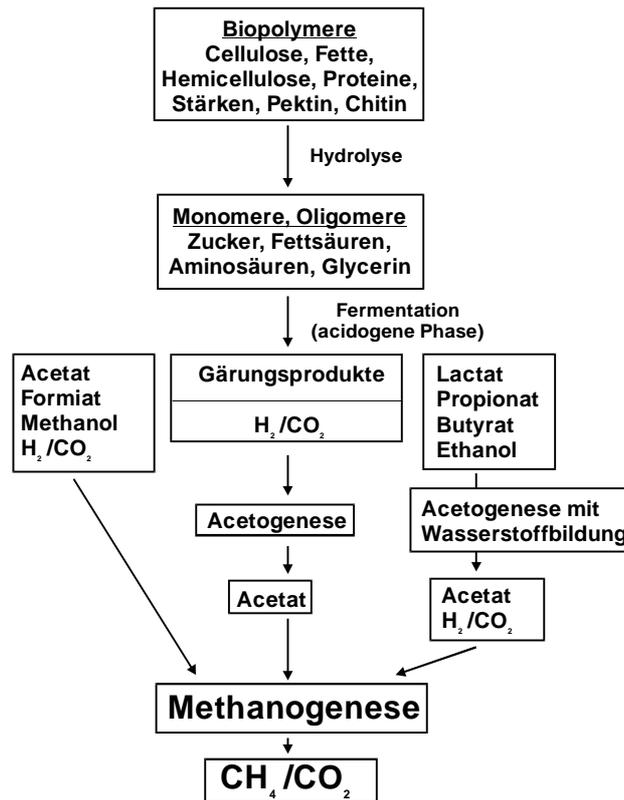


Abbildung 15: Stufen des anaeroben Abbaus komplexer organischer Substanzen bei der Bildung von Methan (HEYER, 1990)

CRUTZEN ET AL. (1986) (in CIGR, 1994) schätzen die CH_4 -Produktion bei Schweinen im Magen-Darm-Trakt bei energiereichen Futterrationen auf ca. 0,6 % der Bruttoenergieaufnahme (GE) (Energiegehalt von CH_4 : 55,65 MJ/kg), VERSTEGEN (1971) (in CIGR, 1994) gibt für Tiergewichte von 20 kg LM eine Rate von 0,5 % und für Tiergewichte von 80-100 kg LM eine CH_4 -Produktionsrate von 1 % an. Nach VAN ES UND BOECKHOLT (1986) (in CIGR, 1994) ergibt sich die Bruttoenergieaufnahme (GE) als:

$$GE = (24,2 * cp + 36,6 * cl + 20,9 * cf + 17 * nfe) * I_f \quad (\text{in MJ}), \quad (\text{Gleichung 19})$$

Wobei cf der Anteil der Rohfaser (in kg/kg), cl der Rohfettgehalt (in kg/kg), cp der Rohproteingehalt (in kg/kg) und I_f die Futteraufnahme (in kg) ist. Konkrete Zahlenwerte für die CH_4 -Emission von Schweinen geben BOUWMAN ET AL. (1991) in HEYER (1994) mit 1,5 kg CH_4 /Tier und Jahr an.

Die weit größere Menge an Methan in der Schweinehaltung entsteht bei der Lagerung der Exkrememente. Der Massenanteil von CH_4 am hierbei entstehenden Biogas beträgt 40 % (AARNINK ET AL, 1992 in CIGR, 1994). Die Biogasproduktionsmenge berechnet sich nach

AARNINK ET AL. (1992) und ist abhängig von der Aufnahme organischer Substanz und der Verdaulichkeit.

2.4.3 Distickstoffoxid (N₂O):

N₂O entsteht neben den Stickstoffoxiden und molekularem Stickstoff bei der mikrobiellen Umsetzung (Nitrifikation und Denitrifikation) von anorganischen Stickstoffverbindungen in Böden und Gewässern (ENQUETE-KOMMISSION, 1994). Des Weiteren finden diese Umsetzungsvorgänge auch bei der Lagerung von tierischen Exkrementen statt.

1. Nitrifikation



In landwirtschaftlich genutzten Böden ist die Verfügbarkeit von NH₄⁺ der entscheidende Faktor, der die Nitrifikation regelt. Nach BEESE (1994) erhöht eine Zufuhr von Harnstoff, Ammoniak oder Ammoniumsulfat in aller Regel die N₂O-Bildung in Böden deutlich.

2. Denitrifikation:

Die mikrobielle Reduktion von Nitrat oder Nitrit zu NO, N₂O oder N₂ unter anaeroben, bzw. mikroaeroben Bedingungen wird Denitrifikation genannt. Die Reaktion erfolgt in folgendem Ablauf:



In Böden wird durch folgende Parameter das N₂O/N₂-Verhältnis bei der Denitrifikation erhöht (nach FIRESTONE UND DAVIDSON, 1989):

(NO ₃ ⁻) oder (NO ₂ ⁻)	↑	O ₂ -Partialdruck	↑
C-Verfügbarkeit	↓	pH	↓
Temperatur	↓	N ₂ O-Reduktase-Aktivität	↓

Für Tiefstreusysteme beschreibt VAN FAASSEN (1992) die N₂O-Bildung und den N-Kreislauf folgendermaßen (Abbildung 16).

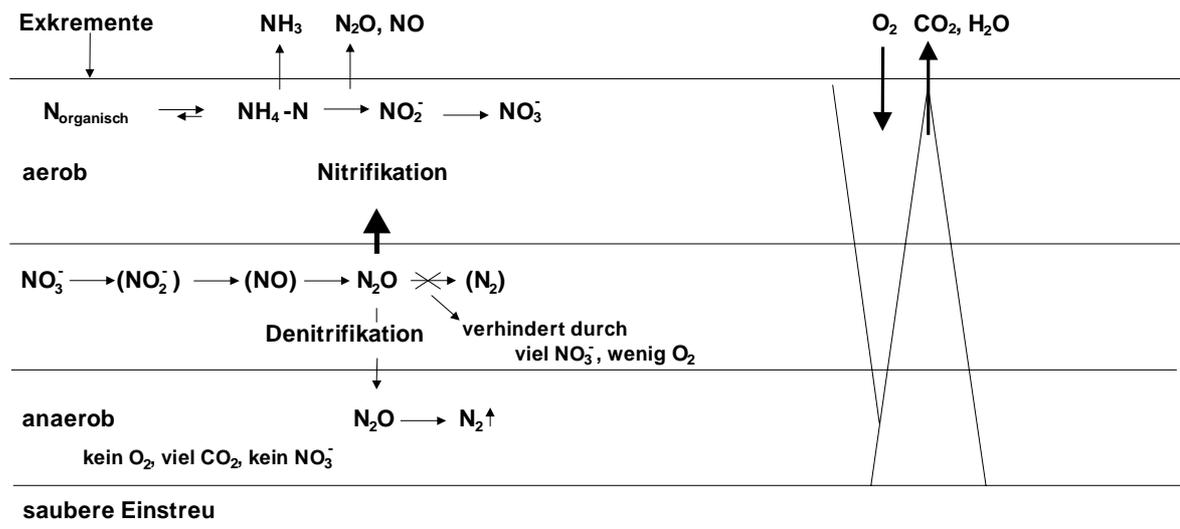


Abbildung 16: Vereinfachtes Schema der N_2O -Bildung und -Freisetzung aus Festmist (nach VAN FAASSEN, 1992)

In der obersten Schicht des Tiefstreubettes (Gemisch aus Stroh mit Kot und Harn) findet bei Vorhandensein von viel O_2 bei gleichzeitig wenig CO_2 die Nitrifikation der organischen N-Verbindungen und des $\text{NH}_4\text{-N}$ aus den Exkrementen statt, wobei bereits hier NH_3 , N_2O sowie NO entweichen. In einer tieferen Schicht, in der kaum noch O_2 vorhanden ist, dafür viel CO_2 findet die unvollständige Denitrifikation zu N_2O statt – die N_2 -Bildung wird in dieser Schicht durch das hier viel vorhandene NO_3^- behindert. Nur N_2O , das aus dieser Schicht in tiefere Schichten gelangt, wird dort unter Abwesenheit von O_2 und NO_3^- und unter Vorhandensein von viel CO_2 (also unter völlig anaeroben Bedingungen) zu N_2 umgewandelt und entweicht in die Atmosphäre (nach VAN FAASSEN, 1992).

2.4.4 Kohlendioxid (CO_2):

CO_2 entsteht im Stall durch drei verschiedene Prozesse:

- Respiration der Tiere,
- schneller Abbau der Harnsäure und
- anaerober Abbau der Trockensubstanz in der Gülle.

Hierbei beträgt nach OUWERKERK UND PEDERSEN (1994) der Anteil der Respiration 96 %. Nach CIGR (1994) wird von verschiedenen Autoren (DIN 18910, SCHNEIDER, 1988; HILLIGER, 1982; CIGR, 1984; PEDERSEN, 1992; THORBEK ET AL, 1984) unterschiedlich hohe produzierte Mengen an CO_2 in Abhängigkeit von der von den Tieren produzierten Wärme angegeben. Die Angaben schwanken von $0,13 - 0,216 \text{ l h}^{-1}\text{W}^{-1}$.

Für die CO₂-Produktion (M_{CO₂}) aus Harnstoff (siehe Gleichung 2) geben OUWERKERK UND AARNINK (1992) (in CIGR, 1994) folgende Formel an:

$$M_{\text{CO}_2, \text{Harn}} \text{ (in kg)} = 0,251 * (\text{verdauliches RP (in kg/kg)} * \text{Futteraufnahme (in kg)} - \text{Proteinretention (in kg)})$$

(Gleichung 23)

Die CO₂-Produktion (in kg) beim anaeroben Abbau der Trockensubstanz in der Gülle errechnet sich nach:

$$M_{\text{CO}_2, \text{Gülle}} = 0,62 * \text{GP}_B$$

(Gleichung 24)

wobei GP_B die Biogasproduktion in kg ist.

GUSTAFSSON UND MARTENSSON (1988) (in CIGR, 1994) geben für die CO₂-Produktion bei Schweinen aus Tier, Harn und Gülle (in g/h u. Tier) die nachstehende Formel an:

$$M_{\text{CO}_2} = 19,5 + 1,756 * m$$

(Gleichung 25)

wobei hier *m* die Masse der Schweine in kg ist. Des weiteren unterliegt die CO₂-Produktion tageszeitlich bedingten Schwankungen, die hauptsächlich von der Tieraktivität abhängen; hierzu finden sich Beiträge bei VAN DER HEL ET AL., 1987; VERSTEGEN ET AL., 1986; SCHRENK U. MARX, 1982; VAN OUWERKERK, 1987; VAN OUWERKERK U. PEDERSEN, 1994 (alle in: CIGR, 1994). Im Gegensatz dazu stellte NI (1998) in eigenen Untersuchungen fest, dass die Menge des aus der Gülle stammenden CO₂ durchschnittlich 48 % des von den Schweinen unter Ruhebedingungen (TCER: Tranquil CO₂ Exhalation Rate) produzierten CO₂ beträgt. Ein von ihm gemessener maximaler Anteil betrug sogar 150 % der TCER.

Fazit: Gasemissionen entstehen sowohl bei aeroben als auch bei anaeroben mikrobiellen Umsetzungsvorgängen aus den tierischen Exkrementen. Für die Gase NH₃, CH₄, N₂O und CO₂ werden mehrere Einflüsse auf die Höhe der Emission deutlich, die jedoch für jedes Gas unterschiedlich stark beeinflussend sind. Die wichtigsten Einflussfaktoren im Kot-Harn-Gemisch sind NH₄-N-Gehalt, C-Gehalt, pH-Wert, Temperatur, O₂- und CO₂-Gehalt. Weitere Einflussfaktoren sind die Größe der verschmutzten Buchtenoberfläche, die Luftströmungsgeschwindigkeit über der emissionsaktiven Oberfläche und über der Gülleoberfläche im Güllekanal. Über das CO₂-Bildungspotential gibt es widersprüchliche Angaben.

2.5 Modell zur Emissionsratenermittlung

Zusammenfassend sind die oben dargestellten Zusammenhänge und Einflussfaktoren auf die Bildung und Freisetzung von NH_3 , CH_4 , N_2O und CO_2 in der folgenden Abbildung dargestellt.

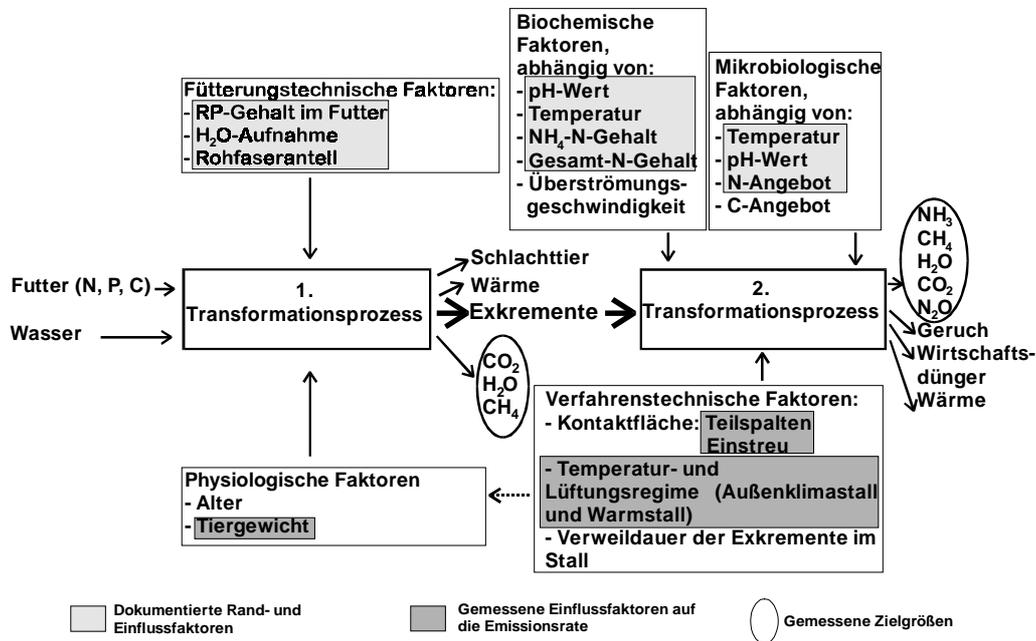


Abbildung 17: Einflussmodell auf die Gasemissionen im Stall

Auf den ersten Transformationsprozess, der im und durch das Schwein stattfindet, wird Futter und Wasser umgewandelt zu Schlachtvieh, Atmungsprodukten (CO_2 , H_2O , CH_4), Wärme und Exkrementen. Auf diesen Prozess haben zum einen fütterungstechnische Faktoren (wie Rohproteingehalt, Wasseraufnahme und Rohfaseranteil) zum anderen physiologische Faktoren (wie Alter des Tieres, Rasse, Leistungsniveau) einen Einfluss. In Abhängigkeit dieser Einflüsse entstehen unterschiedliche Tierleistungen und Schlachtkörperzusammensetzungen, sowie unterschiedliche Mengen und Zusammensetzungen der Atmungsprodukte und Exkrememente.

In einem zweiten Transformationsprozess werden die Exkrememente in Abhängigkeit des Einflusses von biochemischen, mikrobiologischen und verfahrenstechnischen Faktoren in Wirtschaftsdünger, Wärme, Wasser, Geruch und Schadgasemissionen (NH_3 , CH_4 , N_2O und CO_2) umgewandelt.

Im Rahmen der in dieser Arbeit durchgeführten Untersuchungen werden die *verfahrenstechnischen Faktoren* variiert, was im Detail Auswirkungen auf die übrigen Faktoren hat.

3 Zielsetzung

Aus den im Stand des Wissens dargestellten Sachverhalten und Zusammenhängen ergeben sich für die Bestimmung von Emissionsraten von NH_3 , CH_4 , N_2O und CO_2 aus der Mast-schweinehaltung die folgenden Defizite:

- Dauermessungen sind notwendig, um sowohl tages- als auch jahreszeitliche Schwankungen der Emissionsraten zu erfassen; meist jedoch werden nur kurzzeitige Messungen durchgeführt.
- Es gibt keine praxistaugliche Methode, mit der kontinuierlich die Volumenströme aus frei gelüfteten Außenklimaställen gemessen werden können – bisherige Methoden (Tra-cergasmethode) sind nur für kurzzeitige Messungen geeignet, der Aufwand bei Bilanzierungsmethoden (z. B. CO_2 -Bilanz) ist zu groß und die Methoden im Gesamten zu ungenau.
- Zur Gaskonzentrationsmessung wird die photoakustische Infrarot Spektroskopie häufig eingesetzt, die Sicherstellung optimierter Messungengenauigkeiten muss hierbei jedoch gewährleistet werden.
- Die bisher für Außenklimaställe für Mastschweine angegebenen Emissionsraten verschiedener klima- und umweltrelevanter Gase beruhen (wie o. g.) auf Kurzzeitmessungen und sind daher wegen der hohen tages- und jahreszeitlichen Dynamik der Emissionsraten nicht repräsentativ und können lediglich als Anhaltswerte herangezogen werden.
- Einflussfaktoren auf die Entstehung und Freisetzung von Gasen im Stall sind bekannt, die Quantifizierung der Einflüsse durch das Verfahren „Außenklimastall“ mit den dazugehörigen verfahrenstechnischen Charakteristika (wie Temperatur- und Lüftungseinflüsse) konnte bisher noch nicht erfolgen.

Zusammenfassend ist festzustellen, dass bisher keine Emissionsraten klima- und umweltrelevanter Gase aus kontinuierlichen Messungen aus Außenklimaställen für Mastschweine vorliegen und somit auch nicht das Emissionspotential dieser neuen Haltungssysteme im Vergleich zur konventionellen Mastschweinehaltung eingeschätzt werden konnte. Für die eigenen Untersuchungen ergibt sich daraus das folgende Ziel.

Das **Ziel** der vorliegenden Arbeit ist der experimentelle Vergleich hinsichtlich der Emissionsraten klima- und umweltrelevanter Gase (NH_3 , CH_4 , N_2O , CO_2) von

- einem Warmstall mit Teilspaltenboden und Zwangsentlüftung,
- einem Außenklima-Kistenstall mit Teilspaltenboden und
- einem Außenklima-Kistenstall mit Einstreu

unter gleichen Umweltbedingungen und bei gleichem Betriebsleitereinfluss in einer Dauermessung unter Praxisbedingungen.

Zur Erreichung dieses Ziels ist die Definition folgender zusätzlicher Teilziele notwendig:

- Methodische Entwicklung zur Errichtung einer Dauermesskette zur Multigasmessung unter Berücksichtigung der im Stand des Wissens dargelegten Anforderungen
- Methodenentwicklung und –überprüfung zur Qualitätssicherung der Gaskonzentrationsmesstechnik bei der photoakustischen Infrarot-Spektroskopie und zur Volumenstrombestimmung aus den Außenklima-Versuchsabteilen
- Messung der Emissionsraten aus den untersuchten Haltungssystemen in den Versuchsabteilen
- Quantifizierung von Einflussfaktoren wie Temperatur, Haltungssystem, Einstreu, Güllefüllstände, Volumenstrom etc. auf die Höhe der Emissionsraten in den untersuchten Haltungssystemen.

4 Material und methodisches Vorgehen

4.1 Versuchsställe

Auf dem Versuchsbetrieb, auf dem die für diese Arbeit notwendigen Experimente durchgeführt wurden, sind 1000 Mastschweineplätze in zwei Ställen vorhanden: ein konventioneller Warmstall mit Zwangsentlüftung und Teilspaltenboden und ein im Oktober 1997 fertiggestellter Außenklimastall auf Flüssigmistbasis mit Ruhekisten und Teilspaltenboden. Für die Durchführung der Versuche waren verschiedene Ein- und Umbauten notwendig, damit drei getrennten Hauptversuchseinheiten, ein konventioneller Warmstall mit Spaltenboden (kW) (52 Tiere), ein Außenklima-Kistenstall mit Ruhekisten und Teilspaltenboden (AKt) und ein Außenklima-Kistenstall mit Ruhekisten und eingestreutem Kotplatz (AKe) (je 64 Tiere) direkt miteinander verglichen werden konnten.

Um die Emissionsraten aus den verschiedenen Versuchsabteilen qualitativ und quantitativ erfassen zu können, müssen diese luftdicht voneinander und vom übrigen Stall abgetrennt werden (siehe hierzu Abschnitt 5.2)

4.1.1 Adaption der Versuchsabteile im Außenklimastall

Die beiden Hauptversuchsabteile im Außenklimastall (AKt und AKe) (Abbildung 18 und Abbildung 19) befinden sich am nördlichen Ende des Stalls. Das Abteil AKt ist baugleich mit dem restlichen Außenklimastall (Akt0). Im Abteil AKe werden die Betonspalten mit zementgebundenen Holzfaserverplatten abgedeckt, die zur schnelleren Jaucheableitung alle 15 cm eine Bohrung (\varnothing 10 mm) aufweisen. Für Revisionsarbeiten zwischen den Mastdurchgängen können jeweils die Endplatten an der Nordseite der Versuchsabteile entfernt werden. Im AKe werden täglich 100 g Stroh je Tier von Hand eingestreut und alle zwei bis drei Tage entmistet. Die Einstreu bindet die Flüssigkeit und dient zusätzlich als Beschäftigungsmaterial.

Im Außenklimastall erfolgt die Abtrennung der Versuchsabteile über eine Holzlattenkonstruktion zwischen den Versuchsabteilen, auf die reißfeste, stabile PVC-beschichtete Gewebefolie aufgebracht ist. Damit die Gaskonzentrationsmessungen nicht durch eventuell auftretende Adsorptionsvorgänge an der PVC-Folie beeinflusst werden (MINISTERIE VAN VOLKSHUISVESTING, R.O.EN M., 1993), werden bei der ersten Stallbelegung (Mastdurch-

gang 1) lediglich Vorversuche mit den verschiedenen Messtechnikkomponenten durchgeführt.

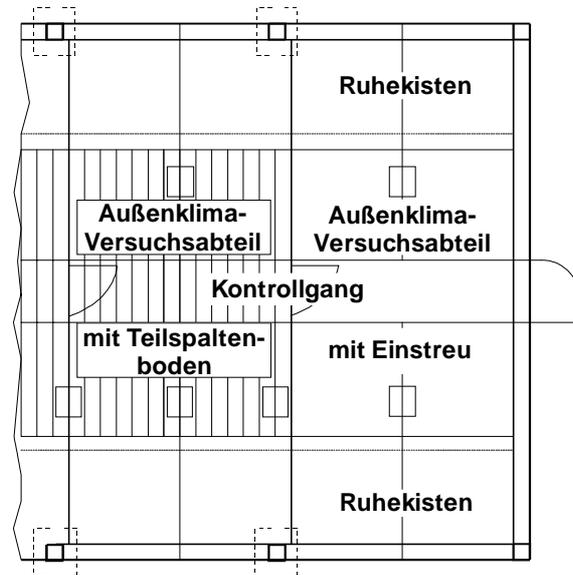


Abbildung 18: Außenklima-Versuchsabteile, Grundriss

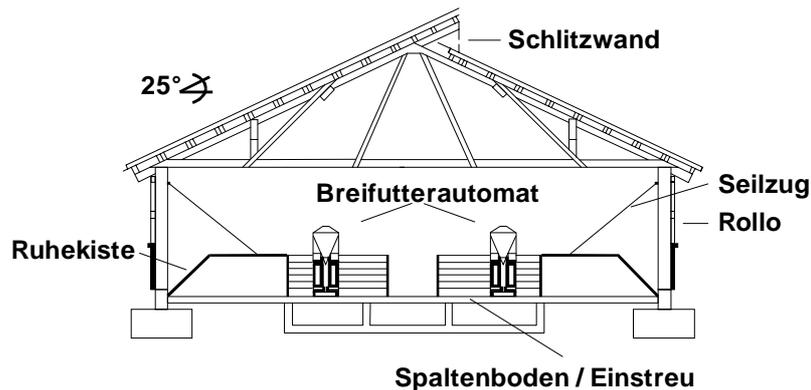


Abbildung 19: Außenklima-Versuchsabteile, Gebäudeschnitt

Unter den Buchten verlaufen in Stalllängsrichtung drei Güllekanäle, in Stallquerrichtung sind diese in ebenfalls drei Wannen unterteilt. Eine Abtrennung der Versuchsabteile auch im Bereich der Güllekanäle erfolgt zur:

- Trennung der Luft der Versuchsabteile voneinander,
- quantitativen Erfassung der anfallenden Gülle- bzw. Jauchemengen und zur
- qualitativen Analyse der Gülle bzw. Jauche.

Die Abtrennung zwischen dem Festmist- und dem Flüssigmistversuchsabteil erfolgt als Mauer aus Betonsteinen mit Bewehrung. Die Abtrennung zwischen dem Versuchsabteil Teilspaltenboden und dem unbeeinflussten übrigen Teilspaltenbodenstall erfolgt so, dass die im Versuchsabteil anfallende Gülle einerseits gesammelt wird und luftdicht vom ande-

ren Abteil abgetrennt ist, andererseits muss sie zum Entmisten über einen Stöpsel im unbeeinflussten Flüssigmistabteil in die Güllegrube abgelassen werden können. Zu diesem Zweck sind in den betreffenden drei Güllekanälen verzinkte Blechschieber in einem Hartholzrahmen eingebaut worden, die auch bei belegten Buchten über die Kotschlitz an den Buchtenwänden gezogen werden können.

4.1.2 Adaption der Versuchsabteile im konventionellen Warmstall

Zur Optimierung der Verhältnisse im Versuchsabteil im Warmstall mit Teilspaltenboden und um die Vergleichbarkeit zum Außenklimastall herzustellen, wurden hier dieselben Breifutterautomaten und derselbe Spaltenboden installiert.

Im konventionellen Warmstall ist ein den Versuchsabteilen im Außenklimastall adäquates Abteil mit vier Buchten à 13 Tieren abgekapselt worden. Die Außenwände des Versuchsabteils bestehen aus den Stallaußenwänden und ebenfalls einer Holzlattenkonstruktion mit PVC-beschichteter Gewebefolie. Die Stalldecke im Versuchsabteil ist mit Styropor-Platten isoliert worden, die mit einer PVC-beschichteten Gewebefolie luftdicht abgedeckt worden sind. Um dieses Versuchsabteil vollständig vom Zu- und Abluftsystem des übrigen Stalls zu trennen, ist ein separater Zuluftporenkanal und ein Abluftschachtventilator installiert worden. Die Lüftungsregelung erfolgt temperaturgeregelt über einen handelsüblichen Lüftungscomputer FSU der Fa. Fancom. Die Abtrennung des Güllekanalbereichs im Versuchsstall vom übrigen Güllekanal erfolgt über ein von oben in den Spalten eingehängtes verzinktes Blech, das seitlich mit den Kanalwänden abschließt und in die Gülle eintaucht und somit eine sichere Trennung des Güllekanal-Luftraumes gewährleistet.

4.2 Errichtung einer Dauermesskette

Zur Bestimmung der Emissionsraten aus den drei beschriebenen Versuchsabteilen ist die Errichtung einer stationären Dauermesseinrichtung notwendig. Hierzu zählt die stationäre Installation der Gasanalyseleitungen und –geräte, der Volumenstromerfassung mit dazugehörigen Messleitungen, einer Messstellenumschaltung und diverser zusätzlicher Sensor- und Datenleitungen zur Erfassung von Temperaturen etc.. Eine automatische Beprobung aller Messstellen sowie die automatische Datenaufzeichnung muss gewährleistet sein, ebenso der Neustart der Messungen nach Stromausfall o. ä.. Tabelle 6 gibt eine Übersicht über die ermittelten Messparameter, deren dazugehörenden Messgeräte und die jeweilige Datenerfassung.

Tabelle 6: Übersicht der Messparameter und Messgeräte

Messgröße	Messgerät	Messbereich/ Genauigkeit	Messhäufigkeit je Messstelle	Abtaste/ Datenaufzeichnung
Hauptmessgrößen				
c_{NH_3}	PAS, Multigasmonitor 1302 (Fa. Innova)	Herstellerranga- ben siehe Tabelle 15	3 Messwerte à 3 min alle 63 min	3 min, über RS232 auf PC
c_{CH_4}				
c_{N_2O}				
c_{CO_2}				
c_{H_2O}				
$\dot{V}_{Warmstall}$	Messventilator	Spannungssignal über Hallplatine	350-5.000 m ³ /h 5 %	Mittelwert alle 3 min
$\dot{V}_{Außenklimastall}$		induktiver Nähe- rungsschalter zur Frequenzmessung			300-11.000 m^{3}/h 5 %	1 s, über 6B12- Modul auf PC
Einflussmessgrößen				
$T_{Zuluft/Abluft}$ $T_{Soll/Ist}$	Pt100 (Widerstand)	-30 - +120 °C Genauigkeits- klasse A: 0,3 K (bei 0 – 100 °C)	Mittelwert alle 3 min	1 s, über 6B13 Module auf PC 1 s, über 6B12- Module auf PC
Wetterstation - Windrichtung - Windgeschwindigkeit - T - rF - Globalstrahlung	Fa. Thies Kombinierter Windgeber Thermo-Hygrometer Pyranometer	Siehe 4.3	Mittelwert alle 10 min	1 min, Datalogger
Flüssigmist Füllstand pH-Wert N_{ges} NH_4-N TS-Gehalt $C_{org.}$	Füllstandsmessung Laboranalyse, Lehrstuhl für Pflanzenernährung	0–1,00 m, ±0,01 m -	diskont. mehr- mals je Mastdurchgang nach jedem Mastdurchgang	manuell, PC
Leistungsdaten Tägl. Zunahmen Futtermittelnutzung	Wiegungen Futtermittelnutzung	0-2000 kg, ±1 %	Einstellen, wö- chentlich (1.-3. Woche), 14- täglich 4. Wo. – 90. Tag), Aus- stallen.	Datalogger, PC
Materialien				
Gasschläuche	Material: FEP; \varnothing_{innen} : 4 mm, $\varnothing_{außen}$: 6 mm; Länge: 6 x 70 m			
Gasfilter	PTFE-Filter, 5µm			
Gasleitungsheizung	Warmwasserheizung in PVC-Schläuchen			
Gasförderung	2 Membranpumpen (Teflonmembran), Fa. Hyco			

In Abbildung 20 ist der allgemeine Versuchsaufbau in den drei Versuchsabteilungen dargestellt.

Probenahme des Multigasmonitors zeitlich so synchronisiert, dass die Mittelwerte der Temperaturen und Frequenzen der Messventilatoren zeitlich zu dieser Konzentrationsmessung passen. Die Ansteuerung der verschiedenen Messstellen erfolgt über die doppeltwirkenden Magnetventile, die ebenfalls von der Steuerungssoftware geschaltet werden. Die Gaskonzentrationen werden wie die übrigen Messdaten in einer separaten Datei gespeichert und zur weiteren Auswertung mit den Messdaten zusammen in einer Datei verarbeitet. Die ausführliche Darstellung der eingesetzten Hard- und Software findet sich bei STEFFIN (1999).

4.3 Messung von Einflussfaktoren und Randparametern

Neben den Gaskonzentrationen und den Volumenströmen bzw. Frequenzen der Messventilatoren werden weitere Parameter ermittelt (Tabelle 6). Dies sind zum einen Außenklimaparameter, die von einer Wetterstation aufgenommen werden, zum anderen werden die Temperaturen an den Messstellen, sowie die oben beschriebenen SOLL- und IST-Werte der Temperaturregelung kontinuierlich aufgezeichnet. Diskontinuierlich werden weitere das Emissionsverhalten beeinflussende Parameter erhoben, wie z. B. pH-Wert der Gülle, NH₄-N-Gehalt der Gülle, Füllhöhe der Gülle im Kanal, etc.. Außerdem werden die Futterrationen dokumentiert.

Futterrationen

Gefüttert wird in Abhängigkeit von Alter und Geschlecht in drei Phasen (Tabelle 7). In den ersten beiden Phasen der Mast werden männliche und weibliche Tiere mit den selben Rationen gefüttert. Neben einer leichten Energiereduzierung werden in der Mastmitte verstärkt günstigere Getreidekomponenten eingesetzt. In der letzten Mastphase steigt der Rohfaseranteil nochmals an.

Entsprechend dem Tierumtrieb und den unterschiedlichen Futterrationen wird die Mast im Folgenden in Vor-, Haupt- und Endmast unterschieden. Erstere beginnt mit der Einstellung und endet mit der Umstallung und dem Futterwechsel von Phase I auf Phase II. Letztere zeichnet sich durch die Futterumstellung und ein durchschnittliches Tiergewicht von 75 bis 80 kg LG aus. Die schwersten Tiere werden bereits ausgestallt.

Tabelle 7: Futterrationen

	Phase I		Phase II		Phase III		Phase III	
Geschlecht					Kastraten		Weibliche	
Lebendgewicht	30 bis 40		40 bis 75		75 bis 105		80 bis 115	
Mastwoche	1 bis 3		3 bis 9 bzw. 10		9 bis 17		10 bis 20	
Futtermittel Frischmasse								
Gerste (in %)	18		30		57		45	
Triticale (in %)	45		44		25		33	
Maiskörner (in %)	15		7		-		5	
Sojaöl (in %)	1		1		-		1	
Sojaschrot (in %)	18		15		15		14	
Mineralfutter (in %)	3		3		3		3	
Werte der Rationen	Ziel	Ist	Ziel	Ist	Ziel	Ist	Ziel	Ist
Trockenmasse (in g)	870	870	870	870	870	870	870	870
Frischmasse (in g)	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
Umsetzbare Energie (in MJ)	13,00	13,10	12,60	12,90	13,00	12,52	13,00	12,77
Rohprotein (in g)	194,4	175,2	182,0	169,6	175,0	173,0	136,2	166,3
Lysin (in g)	9,71	9,90	9,08	9,40	8,72	9,36	6,77	9,03
Methionin, Cystin (in g)	5,82	5,94	5,45	5,68	5,24	5,44	4,07	5,40
Threonin (in g)	5,82	6,19	5,45	5,84	5,24	5,84	4,07	5,64
Tryptophan (in g)	1,94	2,05	1,82	1,99	1,75	2,04	1,37	1,94
Rohfaser (in g)	30,0	34,3	30,0	36,7	30,0	43,7	30,0	40,0
Kalzium (in g)	9,56	7,31	8,75	7,28	8,13	6,51	6,65	6,87
Phosphor (in g)	6,59	5,66	6,00	5,64	5,51	5,35	4,40	5,43
Natrium (in g)	1,09	1,93	1,00	1,94	0,93	1,76	0,74	1,85
Polyenfettsäuren (in g)	12,00	15,59	12,00	12,85	12,00	7,93	12,00	12,12

Tiergewichte

Um die ermittelten Emissionsraten auf die Tiermasse beziehen zu können und somit eine Standardisierung auf 500 kg LM (Lebendmasse) zu bekommen, werden alle in den Versuchsabteilungen befindlichen Tiere für jedes Untersuchungsabteil einzeln bei der Einstallung, nach den ersten drei Wochen und anschließend alle 2 Wochen bis zum 90. Tag sowie abschließend bei der Ausstallung *einzeln* gewogen. Aus diesen Daten errechnet sich so das aktuelle Tiergewicht für jeden Tag der Messung.

Gülemengenerfassung

Der Güllestand in den Kanälen wird in regelmäßigen Abständen (alle 4-6 Wochen) mit einem Meterstab gemessen. Bei bekannten Kantenlängen (hier: $l = 5,12$ m; $b = 1,84$ m) des Kanals wird so das angefallene Güllevolumen berechnet.

Güllemanagement und Gülleanfall

Die während der Mastdurchgänge 3 bis 6 in den Versuchsabteilen AKt und AKe angefallenen Güllemengen wurden wie oben beschrieben erfasst. Hieraus ergeben sich für die jeweils gesamten Mastdurchgänge die in Tabelle 8 dargestellten Güllemengen.

Tabelle 8: Gülle- und Jaucheanfall in m³ je Versuchsabteil

Mast- durch- gang	Gülle- und Jaucheanfall je Abteil und Durchgang (in m ³)		Gülle- und Jaucheanfall je Tier und Tag in (in l)	
	AKt	AKe	AKt	AKe
3	26,61	11,21	3,62	1,52
4	32,78	-	4,45	-
5	20,16	10,83	2,74	1,47
6	35,14	-	4,77	-
Ø	28,67	11,02	3,90	1,50

Im Durchschnitt über die 4 gemessenen Mastdurchgänge errechnet sich somit für das Versuchsabteil AKt eine mittlere Güllemenge von 28,67 m³ und eine mittlere Jauchemenge von 11,02 m³ bei 115 Stalltagen (in AKt und AKe nur Kastraten) und 64 eingestellten Tieren (bei 1-2% Verluste). Aus den in Tabelle 8 genannten Mengen errechnen sich für das Versuchsabteil AKt durchschnittlich 3,90 l Gülle/Tier und Tag. Auf einen Monat bezogen ergeben sich somit 0,08 bis 0,14 m³/Mastschwein. Das KTBL (2000) nennt für diesen Zeitraum (bei einer Stallbelegung von 140 Tagen) einen Wert von 0,11 m³ Gülle je Mastschwein und Monat (bei Breifütterung ohne separate Tränke). FRÜCHTENICHT ET AL. (1993) geben für 10 Mastschweineplätze 19 m³ Gülle pro Jahr an, bezogen auf ein Mastschwein pro Monat bedeutet das 0,16 m³ Gülle.

Für das Versuchsabteil AKe errechnen sich durchschnittlich 1,50 l Jauche pro Tier und Tag, 0,045 m³/Tier und Monat. FRÜCHTENICHT ET AL. (1993) geben für Jauche 6 m³/Mastschweineplatz und Jahr an, woraus sich 0,05 m³ Jauche pro Mastschwein und Monat ableiten lassen. Der Jaucheanfall ist abhängig von der eingestreuten Strohmenge je Tier und Tag, die auf dem Versuchsbetrieb üblicherweise 0,1 kg/Tier und Tag beträgt. Entmistet wurde alle 2 bis 3 Tage.

Eine Übereinstimmung der in den Versuchsabteilen AKt und AKe gemessenen Gülle- und Jauchemengen mit den Faustzahlen aus der Literatur ist erkennbar. Auffällig sind die großen Schwankungen der Güllemengen von Mastdurchgang zu Mastdurchgang, die von der Methodik der Datenerfassung nicht erklärbar sind. Eine Messungenauigkeit von 0,01 m beim Ablesen des Füllstandes ergibt einen Fehler von 0,094 m³ oder 94 l. Eine mögliche

Ursache für die geringeren Güllemengen während des Mastdurchgang 5 ist die auf die hohen Temperaturen zurückzuführende stärkere Verdunstung.

Gülleinhaltsstoffe

Zur Dokumentation der in der Gülle der beiden Außenklima-Versuchsabteilungen enthaltenen Inhaltsstoffe wurden gegen Ende der Mastdurchgänge 4, 5 und 6 Gülleproben aus den Kanälen des AKt entnommen. Ebenso wurden zum gleichen Zeitpunkt Jauche- und Festmistproben aus dem AKe entnommen und am Lehrstuhl für Pflanzenernährung der TU-München Weihenstephan auf die Komponenten Trockenmassegehalt (TS in % der Frischmasse (FS)), Gesamtstickstoffgehalt (N_{ges} in % der FS), Ammoniumstickstoffgehalt (NH_4-N in % FS), pH-Wert und organischer Kohlenstoffgehalt (C_{org} in % der FS) untersucht. Die Analysen wurden jeweils von Mischproben aller unter den jeweiligen Versuchsabteilungen liegenden Kanäle durchgeführt. In Tabelle 9 sind die Analysenergebnisse von AKt dargestellt. Zur Einordnung der Ergebnisse sind zusätzlich aus der Literatur bekannte Faustzahlen angegeben.

Tabelle 9: Gülleinhaltsstoffe im Versuchsabteil AKt

AKt	TS in % FS	N_{ges} in % FS	NH_4-N in % FS	pH-Wert	C_{org} in % FS
Mastdurchgang 4	11,99	0,99	0,64	7,1	5,46
Mastdurchgang 5	14,08	0,95	0,64	7,3	5,57
Mastdurchgang 6	9,27	0,96	0,73	7,8	-
LUFA, 1992	9,00	0,77	0,54	k.A.	k.A.

Die in Tabelle 9 dargestellten Daten zeigen, dass die Gülle im Versuchsabteil AKt TS-Gehalte aufweist, die höher sind, als die der LUFA (1992). Ebenfalls sind die N_{ges} - und NH_4-N -Gehalte erhöht. Zwischen den Mastdurchgängen sind die jeweiligen Werte relativ konstant, lediglich während Mast 6 konnte im AKt ein erhöhter NH_4-N -Gehalt bei gleichzeitig geringerem TS-Gehalt und höherem pH-Werte gemessen werden.

In Tabelle 10 sind die Analysenergebnisse der Jauche- und Festmistproben aus AKe aufgeführt und den Werten der LUFA (1992) gegenübergestellt.

Erkennbar aus der Tabelle sind die gegenüber der Gülle erhöhten pH-Werte der Jauche und des Festmistes. Die TS-Gehalte des Festmistes schwanken stärker über die verschiedenen Mastdurchgänge, da der Festmist ein sehr inhomogenes Gemisch aus der Stroheinstreu und dem Kot ist. In Mastdurchgang 4 fallen die hohen N_{ges} und NH_4-N -Gehalte in der Jauche auf.

Tabelle 10: Jauche- und Festmistinhaltsstoffe aus AKe

AKe	TS in % FS	N _{ges} in % FS	NH ₄ -N in % FS	pH-Wert	C _{org} in % FS
Jauche					
Mastdurchgang 4	2,05	0,75	0,73	8,9	0,55
Mastdurchgang 5	1,96	0,42	0,38	8,4	0,46
Mastdurchgang 6	1,56	0,58	0,51	8,5	-
Ø	1,84	0,58	0,54	8,6	0,51
LUFA, 1992	2,00	0,50	0,45	k.A.	k.A.
Festmist					
Mast 4	19,64	1,19	0,57	8,1	8,14
Mast 5	28,86	1,25	0,49	7,7	11,26
Mast 6	33,02	1,41	0,25	7,5	-
Ø	27,17	1,28	0,44	23,3	9,70
LUFA, 1992	k.A.	0,70	k.A.	k.A.	k.A.

Wetterstation

Zur kontinuierlichen Erfassung der Außenklimaparameter auf dem Versuchsbetrieb ist eine Wetterstation (Fa. Thies) mit Windgeschwindigkeitsgeber, Windrichtungsgeber, Thermometer, Hygrometer und Pyranometer installiert. Die kontinuierliche Erfassung dieser Parameter ist für die Interpretation der gemessenen Konzentrationen und Volumenströme und somit der ermittelten Emissionsraten erforderlich. Die Position der Wetterstation ist: 48° 19,81 N und 11° 30,15 E. Die Position wird im gesamten Untersuchungszeitraum nicht verändert. Die Entfernung vom Stall beträgt in östlicher Richtung ca. 100 m.

Kombinierter Windgeber (Windgeschwindigkeits- und Windrichtungsgeber)

Der kombinierte Windgeber dient zur Erfassung der horizontalen Komponente der Windrichtung und Windgeschwindigkeit. In Abbildung 21 ist der kombinierte Windgeber schematisch dargestellt. Die technischen Daten und Messbereiche sind in Tabelle 11 dargestellt.

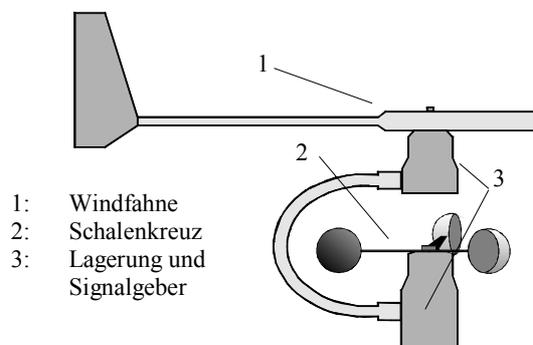


Abbildung 21: Kombiniertes Windgeber

Tabelle 11: Technische Daten des kombinierten Windgebers

Windgeschwindigkeit:	
Messbereich	0,3.....50 m/s
Anlaufgeschwindigkeit	0,3 m/s
Genauigkeit	0,5 m/s
Auflösung	0,05 m Windweg
Windrichtung:	
Messbereich	0.....360°
Genauigkeit	2,5°
Auflösung	2,5°
Ansprechempfindlichkeit	0,5 m/s bei 30° Fahnenauslenkung

Hygro-Thermogeber

Die Temperaturmessung im Thermo-Hygrometer erfolgt mit einem Pt 100-Widerstandsthermometer. Die Feuchtemessung wird mit einem Haar-Messelement durchgeführt. Das Messelement besteht aus mehreren Fasern, die ihre Länge bei Feuchtigkeitsschwankungen verändern und diese Längenänderung auf die Drehachse eines Potentiometers übertragen, an der Schleifer und Skalenzeiger befestigt sind. In Tabelle 12 sind die technischen Daten aufgeführt.

Tabelle 12: Technische Daten des Thermo-Hygrogebers

	Feuchte	Temperatur
Messbereich	10-100% rel. Feuchte	0-70 °C
Messelement	Messelement S (Haar)	Pt 100 Widerstandsthermometer DIN 43 760
Genauigkeit	± 3% rel. Feuchte	± 0,3 °C

4.4 Untersuchungszeiträume

Die Hauptmessungen zur Emissionsratenbestimmung finden während dreier aufeinanderfolgender Mastdurchgänge (Mastdurchgang 4 –6) von Februar 1999 bis März 2000 statt. In den vorhergehenden drei Mastdurchgängen seit Errichtung des Außenklimastalles waren zunächst die drei getrennten Versuchsabteile zu erstellen. Anschließend war die aufwendige Messtechnik sowie dazugehörige Materialien wie Gas-, Heiz- und Sensorleitungen zu installieren und die Messtechnik zu adaptieren und zu optimieren. Aufgrund der vorher in diesem Maßstab noch nie durchgeführten Messungen, waren umfangreichere versuchstechnische Fragen zu klären, als es im Vorhinein abzusehen war.

Die drei Hauptuntersuchungszeiträume sowie die vorhergehenden Mastdurchgänge sind in Tabelle 13 dargestellt:

Tabelle 13: Untersuchungszeiträume

Mastdurchgang	Jahreszeit	von ...	... bis
1	Winter	26.11.97 ...	... 5.4.98
2	Sommer	25.4.98 ...	... 6.9.98
3	Herbst/Winter	25.9.98 ...	... 11.1.99
4	Frühjahr	30.1.99 ...	... 10.6.99
5	Sommer	16.6.99 ...	... 28.10.99
6	Winter	11.11.99 ...	... 20.3.00

4.5 Statistische Auswertung

Schadgaskonzentrationen in der Zu- und Abluft von Ställen, die Lüftungsrate und somit auch die Emissionsraten aus Ställen sind autokorreliert, d. h. ein Messwert wird von der Höhe eines *zeitlich* früheren Messwertes beeinflusst. In ein Modell zum Vergleich von Messdaten (z. B. Emissionsraten) ist also dieser zeitliche Effekt einzubeziehen. Die Methoden der klassischen Zeitreihenanalyse sind in der Lage, komplexe, zeitabhängige Kurvenverläufe in einem Modell auszudrücken (z. B. Aktienkurse etc.). Auch für Emissionsraten haben verschiedene Autoren solche Modelle entwickelt, wenn es darum geht, die tages- und jahreszeitliche Dynamik von Emissionsraten zu beschreiben (ROM UND DAHL, 1998).

Gemäß dem Ziel dieser Arbeit sollen die Emissionsraten aus den drei verschiedenen Haltungssystemen während der drei untersuchten Mastdurchgänge miteinander verglichen werden und Unterschiede statistisch abgesichert werden. Hierzu werden zunächst mit Hilfe der Korrelationen zwischen den verschiedenen Emissionsraten und den Einflussparametern anhand der Höhe und Signifikanz der Korrelationen die Einflussparameter ausgewählt. Am Beispiel der NH_3 -Emissionsrate soll dann die einfaktorielle Regressionsanalyse mit den einzelnen Einflussfaktoren getrennt nach Mastdurchgang und Jahreszeit durchgeführt werden. Zum Vergleich der Emissionsraten bedient man sich eines varianzanalytischen Modells, einem mehrfaktoriellen allgemeinen linearen Modell (GLM). Die Voraussetzung für eine Varianzanalyse sind Varianzhomogenität (gleiche Varianzen in den einzelnen Gruppen) und Normalverteilung (PRECHT UND KRAFT, 1993). Aus Untersuchungen (PRECHT UND KRAFT, 1993) geht aber hervor, dass die Verletzung der Normalverteilungsannahme einen vergleichsweise geringen Einfluss auf die Inferenzentscheidung hat. Bei heterogenen Varianzen (wie sie im vorliegenden Fall vorhanden sind) wird pragmatisch vorgeschlagen, den F-Test der Varianzanalyse mit einem niedrigeren Signifikanzniveau (z. B. 1 %) durchzuführen, wobei man ziemlich sicher sein kann, unter einem tatsächlichen Signifikanzniveau von 5 % zu bleiben (PRECHT UND KRAFT, 1993).

Der varianzanalytische Ansatz für den Vergleich der Emissionsraten aus den untersuchten Haltungssystemen während der untersuchten Mastdurchgänge ist:

$$Y = \mu + \alpha + \beta + \gamma + \delta + \varepsilon + e,$$

wobei μ das Gesamtmittel, α den fixen Effekt des Haltungssystems und β den fixen Effekt des Mastdurchgangs beschreibt. γ steht für die quantifizierbare Kovariable „Zeit nach dem Einstellen in d“, δ für die Kovariable „Temperatur in der Abluft in ° C“ und ε für die Kovariable „Abluftvolumenstrom in m³/h“. e beschreibt den Versuchsfehler. Aus sachlogischen Überlegungen werden auch die *Wechselwirkungen* zwischen dem Haltungssystem und den Mastdurchgängen und Kovariablen untereinander in das Modell integriert, so dass sich folgendes Modell ergibt:

$$Y = \mu + \alpha + \beta + \gamma + \delta + \varepsilon + \alpha\beta + \gamma\delta + \gamma\varepsilon + \delta\varepsilon + \gamma\delta\varepsilon + e)$$

Die Mittelwerte der Emissionsraten werden auf dem Signifikanzniveau von 1 % getestet. Die Auswertung wurde mit den Statistikprogrammen SPSS © (Version 10.0) für Windows und SAS (Version 8) für Windows durchgeführt.

Zur Auswahl der Kovariablen wurden zunächst alle kontinuierlich gemessenen Parameter einer Korrelationsanalyse unterzogen und anschließend aufgrund der Korrelationskoeffizienten und sachlogischer Überlegungen ausgewählt.

Mit dem allgemeinen linearen Modell werden danach die Parameter der einzelnen Kovariablen geschätzt und für die verschiedenen Gase die Modelle in Abhängigkeit von Haltungssystem und Mastdurchgang geschätzt.

5 Entwicklung und Überprüfung einer Methode zur kontinuierlichen Messung von Emissionsraten aus Außenklimaställen für Mastschweine

Die Emissionsrate ist das Produkt aus der Gaskonzentrationsdifferenz zwischen Ab- und Zuluftkonzentration und dem dazugehörigen Abluftvolumenstrom. In diesem Abschnitt werden nun die in dieser Arbeit eingesetzten Methoden zur Gaskonzentrations- und Volumenstrombestimmung und deren Überprüfungen dargestellt.

5.1 Gaskonzentrationsmessung mit Photoakustischer Infrarot-Spektroskopie

Die Gaskonzentrationsmessung erfolgt mit dem photoakustischen Infrarot-Spektrometer „Multigasmonitor B&K 1302“ (BRÜEL & KJÆR, 1996). Bei der photoakustischen Infrarot-Spektroskopie wird die physikalische Eigenschaft vieler Gase ausgenutzt, elektromagnetische Wellen (hier: Infrarot-Strahlung) einer oder mehrerer für jedes Gas unterschiedlichen Wellenlänge(n) zu absorbieren. Ein Messmikrofon nutzt als Messwertaufnehmer diesen Effekt aus. Das Messprinzip wird anhand der Abbildung 22 beschrieben:

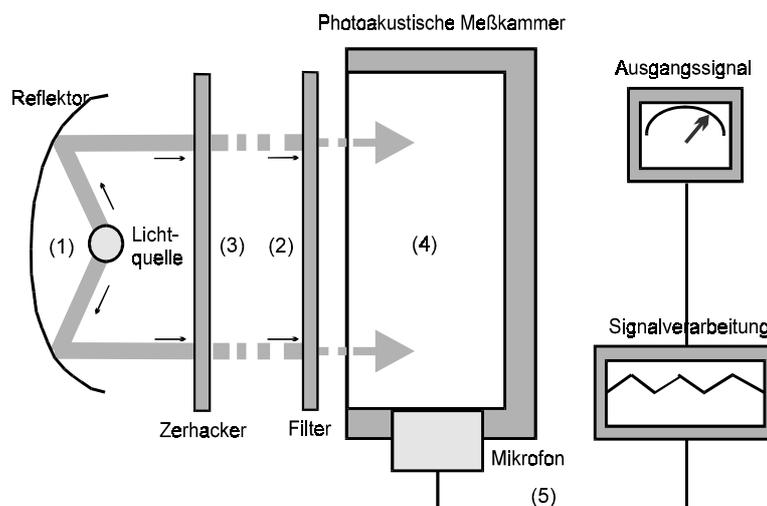


Abbildung 22: Photoakustisches Messprinzip (nach BRÜEL & KJÆR, 1992)

Von einer Infrarot (IR)-Strahlungsquelle (1) wird IR-Strahlung in einem weiten Wellenlängenbereich abgegeben, die dann von einem Spiegel reflektiert wird und durch einen/mehrere optische(n) Filter (2) geleitet wird. Die optischen Filter lassen nur die Strahlung mit den für die zu bestimmenden Gase notwendigen Wellenlängen in die Messkammer. Bei diesen Wellenlängen absorbieren die Gase die Strahlung, wodurch sie Energie aufnehmen. Den optischen Filtern ist ein Chopper (3) vorgeschaltet, der die IR-Strahlung periodisch mit der Frequenz des Choppers in die mit dem Messgas gefüllte Messkammer

eintreten lässt. In der Messkammer (4) erhöht sich durch die Strahlungsabsorption der entsprechenden Gase die Gastemperatur, solange der Chopper die Strahlung nicht unterbricht; wird der Strahl unterbrochen, so kühlt das Gas sofort wieder ab, wodurch in der geschlossenen Messkammer permanent Druckunterschiede entstehen. Die Intensität dieser Druckimpulse ist proportional zu den in der Messkammer vorhandenen Gaskonzentrationen. Die Druckimpulse werden von dem in die Messkammerwand integrierten Messmikrofon (5) in elektrische Signale umgesetzt (WENGER, 1995 und BRÜEL & KJÆR, 1996).

Die im Multigasmonitor B&K 1302 der LTW eingebauten optischen Filter (mit Filternummern nach BRÜEL & KJÆR, 1992) sind in Tabelle 14 dargestellt. Ebenso enthält diese Tabelle Angaben über die atmosphärischen Hintergrundkonzentrationen nach SEINFELD UND PANDIS (1998) und die bei den Kalibrationen an der Gasmischstation eingestellten Gaskonzentrationen.

Tabelle 14: Filterkenngrößen des B&K 1302 an der LTW

Gas	Filter-Nr.	Untere Nachweisgrenze in ppm	Atmosphärische Hintergrundkonz. in ppm	Kalibrierter Messbereichswert in ppm	Querempfindlichkeiten zu	Filterzentrum in cm^{-1} (\pm Bandenbreiten in %)
NH ₃	0973	0,20	$10^{-4} - 10^{-3}$	80	k.A.	1101 (± 6)
CH ₄	0969	0,4	1,72	100	H ₂ O	1254 ($\pm 5,5$)
N ₂ O	0985	0,03	0,311	5	CO ₂	2215 (± 2)
CO ₂	0983	3,4	355	3000	k.A.	2270 ($\pm 1,3$)
CO	0984	0,2	0,12	-	k.A.	2150 (± 3)
H ₂ O	SB0527	k.A.	variabel	20000	k.A.	1985 (± 2)

Die vom Hersteller angegebenen Messungenauigkeiten sind in der folgenden Tabelle dargestellt.

Tabelle 15: Fehler des Multigasmonitor 1302 laut Herstellerangaben (BRÜEL & KJÆR, 1996)

Messtechnischer Parameter	Einflussparameter	Fehler des Multigasmonitor 1302
Nullpunktdrift		Detektionsgrenze je 3 Monate
	Temperatureinfluss	10 % der Detektionsgrenze je K
	Druckeinfluss	0,5 % der Detektionsgrenze je mbar
Reproduzierbarkeit		1 % des Messwertes
Bereichsdrift		2,5 % des Messwertes je 3 Monate
	Temperatureinfluss	0,3 % des Messwertes je K
	Druckeinfluss	-0,01 % des Messwertes je mbar

Aufgrund der allgemein gehaltenen Angaben zu den Messparametern wurden von STEGBAUER (1996) und STEGBAUER ET AL. (1998) umfangreiche Versuche zur Bestimmung der Messungenauigkeit für NH₃ durchgeführt. Es ergibt sich hierbei eine Messungenauigkeit von 0,095 ppm für NH₃. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen waren ein wich-

tiger Grund für die Auswahl des Multigasmonitors 1302 zur Messung der Gaskonzentrationen während der für diese Arbeit durchgeführten Messungen.

5.1.1 Adaption der Messtechnik

Emissionsraten verschiedener Gase aus Ställen errechnen sich aus dem Produkt von Abluftvolumenstrom und im Stall entstandener Schadgaskonzentration. Die im Stall entstandene Schadgaskonzentration ist die Differenz zwischen der Schadgaskonzentration der in den Stall eintretenden Luft und der Schadgaskonzentration der aus dem Stall austretenden Luft. Bei den hier vorhandenen drei Versuchsabteilen (kW, AKt und AKe) müssen so jeweils die Gaskonzentrationen am Lufteintritt und am Luftaustritt aus dem Stall gemessen werden. Pro Messstelle werden nacheinander drei Messungen à 3 min durchgeführt.

Mit Hilfe einer Messstellenumschaltung (MSU) werden die jeweils zusammengehörigen Messstellen (Lufteintritt/Luftaustritt) eines Versuchsabteils nacheinander beprobt. In Tabelle 16 ist das Beprobungsschema der Messstellen dargestellt.

Tabelle 16: Messstellenumschaltungsmodus

Schaltvorgang	Messstelle	Ventilstellung	Art der Messstelle
1	1	1	Lufteintritt
2	1	1	Lufteintritt
3	3	4	Luftaustritt
4	2	2	Lufteintritt
5	4	8	Luftaustritt
6	5	16	Lufteintritt
7	6	32	Luftaustritt
...

Die Spülzeiten der gesamten Gasleitungen vom jeweiligen Probenahmeort (Messstelle) sollen so kurz wie möglich gehalten werden, um möglichst viele Messstellen pro Zeiteinheit beproben zu können. Dies wird über zwei, in die Messstellenumschaltung integrierte Gaspumpen und doppelwirkende Magnetventile erreicht. Eine Gaspumpe (Vorhaltepumpe) saugt kontinuierlich von allen Messstellen (außer der aktuell beprobten Messstelle) die Probenluft an, die die Messstellenumschaltung passiert und unbeprobte zum „Auspuff“ gelangt. Die zweite Pumpe (Messgaspumpe) saugt nur von der aktuell zu beprobenden Messstelle die Probenluft an, und muss dabei nicht erst die gesamte Leitung spülen, sondern greift auf die ständig durch die Vorhaltepumpe an der Messstellenumschaltung anstehende Probenluft zurück. Auf die Weise kann mit drastisch reduzierten Spülzeiten gearbeitet werden.

Zur Förderung der Gasproben von der Probenahmestelle zum Messgerät werden Gaspumpen (Fa. Hyco) mit einer Förderleistung von max. 11,5 l/min bei max. 3 bar verwendet. Die Pumpen sind dauerlauffähig und wartungsarm.

Die Gasschläuche bestehen aus FEP (Tetrafluorethylen-Perfluorpropylen). Der Innendurchmesser der Schläuche beträgt 4 mm, der Außendurchmesser 6 mm. An den am Probenahmeort gelegenen Enden des Gasschlauches sind PTFE-Filter (5 µm, Fa. Rezist) angebracht, die verhindern, dass Staub oder andere Schmutzpartikel in das gasführende System gelangen. Um Kondensation von in der Probenluft enthaltenem Wasser in den Gasschläuchen zu vermeiden, werden diese mit einer neben den Gasschläuchen in einer Armaflex®-Isolierung geführten Warmwasserheizung aus PVC-Schläuchen beheizt. Die Beheizung des Wassers auf 35 °C am Vorlauf erfolgt über eine Thermostat geregelte Heizung.

5.1.2 Kalibration des Messgerätes

Die Kalibration der einzelnen Gase erfolgt an der Gasmischstation GEMS2000 der Bayerischen Landesanstalt für Landtechnik bei gleichzeitiger Beaufschlagung mit H₂O, da der Multigasmonitor 1302 nicht mit trockenen Gasen kalibriert werden kann (BRÜEL & KJÆR, 1996). Die hierbei eingestellte H₂O-Konzentration beträgt 10.000 ppm. Angaben zum Einsatzgebiet, zur Qualität und zur Genauigkeit der an der LTW befindlichen Gaserzeugungs- und -mischstation GEMS2000 finden sich bei GROTZ (1998).

Aufgrund möglicher Querempfindlichkeiten des photoakustischen Infrarot-Spektrometers, die wegen der Vielzahl der im Stall vorhandenen Gase auftreten können, ist eine regelmäßige Kalibration und Überprüfung des Gerätes erforderlich. Vorher durchgeführte Arbeiten hierzu finden sich bei STEGBAUER (1996) und STEGBAUER ET AL. (1998).

Unter Kalibration versteht man die Beaufschlagung von Messgeräten mit verschiedenen bekannten Konzentrationen, um das erhaltene Signal mit der bekannten Konzentration in Relation zu setzen. Die Kalibration des Multigasmonitor B&K 1302 erfolgt in drei aufeinanderfolgenden Schritten:

- Nullpunktkalibration mit N₂ 5.0
- Feuchtekalibration mit 20.000 ppm H₂O
- Bereichskalibrationen der optischen Filter mit dem Messbereichsendwert

1. Nullpunktkalibrierung (Eigenrauschen)

Unter Nullpunktkalibration versteht man die Festlegung des Einflusses eines Nullgases, also eines Gases, das nicht im Infraroten absorbiert, auf das Messsignal. Der Effekt eines solchen (akustischen) Messsignals, der auch als Eigenrauschen bezeichnet wird, hängt von der nicht perfekten Reflexion des infraroten Lichtes an den Wänden der Messzelle ab. Die Größe dieses Eigenrauschens ist, neben den Eigenschaften der inneren Oberflächen der Messzelle, auch von der Energie des Lichtstrahls und damit von den eingesetzten optischen Filtern abhängig. Das Eigenrauschen wird im Auswertalgorithmus immer vom Messsignal abgezogen (BRÜEL & KJÆR, 1996).

2. Feuchtekalibrierung

Üblicherweise befindet sich Wasser in der Umgebungsluft. Wasser absorbiert infrarotes Licht in vielen Wellenlängenbereichen unterschiedlich stark und kann daher Querempfindlichkeiten hervorrufen. Deshalb wird für Wasser ein Filter verwendet, der Licht einer Wellenlänge durchlässt, bei der wenige andere Gase absorbieren. Um den Einfluss von Wasser auf die Messwerte der einzelnen Gase festzustellen, wird Wasser einer konstanten Konzentration in einem Nullgasstrom der Messzelle zugeführt und der Einfluss auf das Messsignal an den einzelnen optischen Filtern gemessen. Da das Verhältnis zwischen dem Signal des Wasserfilters und dem wasserbedingten Signal an den anderen Filtern immer konstant ist, wird aus diesem Signal ein Feuchtigkeitsverstärkungsfaktor (Humidity Gain Factor) für jeden Filter errechnet (BRÜEL & KJÆR, 1996).

3. Bereichskalibrierung

Die Messungen mit einem Multigasanalysator erfolgen in einem für jedes Einzelgas eingeschränkten Konzentrationsbereich. In diesen Bereichen genügt eine Einpunkt-Kalibrierung, d.h. die Konzentration eines Gases wird durch eine lineare Funktion bestimmt, die vom Signal bei der Beaufschlagung mit „Nullgas“ (N₂ 5.0) ausgehend, durch einen Punkt definiert ist, der einer bekannten Konzentration eines Gases entspricht. Nach Herstellerangaben soll dieser Punkt mindestens der 25-fachen Nachweisgrenze des Gases entsprechen.

Werden mit dem Multigasanalysator Messungen in Konzentrationsbereichen, die größer sind als das 10.000-fache der unteren Nachweisgrenze des optischen Filters, durchgeführt, ist eine Zweipunktkalibration nötig, da die Messsignale der Filter in breiten Messbereichen nicht linear sind (BRÜEL & KJÆR, 1996).

Parallel zur Bereichskalibration der einzelnen optischen Filter wird die Querempfindlichkeitskalibration der Filter durchgeführt, d. h. es werden die Signale, die bei der Beaufschlagung mit einem Gas A des optischen Filters A am Filter B, C, D und E gemessen werden, in die Konzentrationsberechnung der einzelnen Gase einbezogen, um Querempfindlichkeiten, die sich durch die breiten Wellenzahlbereiche, für die die einzelnen optischen Filter durchlässig sind, ergeben. Es wird also der Einfluss eines Gases auf das Messsignal eines anderen Gases bestimmt und kompensiert.

Die für die Einsatz des Multigasmonitors 1302 in der hier beschriebenen Dauermessung kalibrierten Messbereichsendwerte sind so gewählt, dass sie den erwarteten oberen Konzentrationsbereich während der Messung abdecken.

5.1.3 Qualitätssicherung der Gaskonzentrationsmesstechnik

Im Gegensatz zur FTIR-Spektroskopie messen photoakustische Infrarot-Spektrometer die Absorption eines um 50-100-mal breiteren Wellenzahlbandes und versuchen, dabei eventuell auftretende Absorptionen mehrerer Gase rechnerisch durch die Kompensation bei der Kalibration zu eliminieren (KRAHL ET AL., 1995). Eine regelmäßige gewissenhafte Kalibration ist deshalb bei diesen Geräten zu fordern und wird auch vom Hersteller empfohlen (BRÜEL & KJÆR, 1996).

Ausführliche Vergleiche zwischen einem FTIR-Spektrometer und dem photoakustischen Multigasmonitor B&K 1302 an Stallluft sind u.a. bei KRAHL ET AL. (1996) dokumentiert. Bei diesem Vergleich wurden jedoch im Multigasmonitor B&K 1302 teilweise andere optische Filter eingebaut, als sie im in dieser Arbeit verwendeten Gerät vorhanden sind, so dass die hier erhaltenen Ergebnisse der Überprüfungen nicht 1:1 übertragbar sind. KRAHL ET AL. (1996) stellten als eine Schwierigkeit des direkten Vergleichs dieser beiden Messgeräte die unterschiedliche Messart der beiden Geräte heraus; so wird das FTIR-Spektrometer kontinuierlich von der zu messenden Probenluft durchspült und der Messwert entspricht einem Mittelwert über die gesamte Zeit, wohingegen beim Multigasmonitor B&K 1302 nur einmal in einer voreingestellten Zeit (z. B. 3 min) eine kleine Gasprobe ($V_{\text{Messzelle}} = 3 \text{ cm}^3$) gezogen wird, die dann mit allen optischen Filtern nacheinander analysiert wird. Zusammenfassend gelangen KRAHL ET AL. (1996) zu dem Ergebnis, dass die Messwerte des B&K 1302 hinreichend genau mit denen des FTIR-Spektrometers übereinstimmen. Bei Lachgas stimmen die Werte sehr gut überein, bei Methan treten hingegen Abweichungen bis 2 ppm auf, bei CO_2 liegt das B&K konstant um ca. 100 ppm höher. Bei

Ammoniak traten im Multiplexer und im Gerät größere Adsorptionen auf, die zu einer Verzögerung bei der Erreichung der Messwerte führten. Nach 6 Messwerten jedoch war die Abweichung jeweils nur noch max. 1 ppm.

OSADA ET AL. (1998) vergleichen den Multigasmonitor 1302 mit einem Gaschromatographen (GC). Hierbei wurden keine Angaben über die im Multigasmonitor 1302 eingesetzten Filter gemacht. Der Vergleich findet anhand realer, in Poly-Vinyl-Fluorid-Beuten gesammelter Stallluftproben und zusätzlichen Prüfgasen statt. Für N₂O beschreibt er eine Ausgleichsgerade, die aus der Messung fünf verschiedener N₂O-Konzentrationsstufen (0,3 bis ca. 1,35 mg/m³) entstanden ist; die mit dem Multigasmonitor gemessenen Konzentrationen für CH₄ und N₂O werden mit den errechneten Korrekturgeraden verrechnet und die dann erhaltenen Werte werden für die Emissionsratenberechnung weiterverwendet. Tendenziell sind die mit dem Multigasmonitor 1302 gemessenen N₂O- und CH₄-Konzentrationen zu hoch. Bestätigt sehen OSADA ET AL. (1998) sich durch die von ihnen angeführten Ergebnisse von KRAHL ET AL. (1995)

Ausgehend von an der Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft (FAL) durchgeführten Vergleichen eines FTIR-Spektrometers mit dem Multigasmonitor 1302 und eigenen Messsystemvergleichen (STEGBAUER ET AL., 1998) verglich auch KAISER (1999) während seiner Dauermessungen in einem Kompoststall und einem Vollspaltenbodenstall den eingesetzten Multigasmonitor 1302 mit zwei Referenzverfahren. Die NH₃-Konzentrationen wurden mit der Methode der Nasschemie überprüft, die N₂O-Konzentrationen mit einem Prozesschromatographen. Die übrigen Gase (CO₂, CH₄, H₂O) wurden nicht mit einer Referenztechnik überprüft, da keine geeigneten Messtechniken zur Verfügung standen. KAISER (1999) erhält als Ergebnis eine Abweichung der NH₃-Konzentration von der Nasschemie von durchschnittlich 18 %, bei der N₂O-Konzentration von ca. 3 %. Um diese Abweichungen auszugleichen, führt er für die verschiedenen untersuchten Mastdurchgänge unterschiedliche lineare Korrekturfaktoren ein, mit denen die NH₃- und N₂O-Konzentrationen „korrigiert“ werden.

SEIPELT (1999) verwendet bei seinen Untersuchungen in freigelüfteten Rinderställen ebenfalls einen Multigasmonitor 1302. Vor beiden von ihm durchgeführten Messungen erfolgte eine Kalibration an der Gasmischstation des Instituts für Landtechnik der Universität Bonn und die Bestimmung der Abweichungen vom Sollwert. Für NH₃ wurden Abweichungen von 4-10 % vom Sollwert ermittelt. Im Gegensatz zu KAISER (1999) führt SEIPELT (1999)

keine nachträgliche Korrekturfunktion ein, da er die Messwertedrift als dynamischen Vorgang während einer Messperiode ansieht.

Eine Überprüfung des Multigasmonitors zur Quantifizierung der Messungenauigkeit ist folglich vor der Durchführung von Messungen zur Emissionsratenanalyse notwendig und im Rahmen dieser Arbeit durchgeführt worden.

5.1.3.1 Methodik der Linearitätsüberprüfung der optischen Filter

Die Überprüfung der Linearität der im (in dieser Arbeit eingesetzten) Multigasmessgerät B&K 1302 eingebauten optischen Filter beschränkt sich auf den in Ställen üblicherweise zu erwartenden Konzentrationsbereich (vgl. Tabelle 17). Es werden die an den Messmikrofonen erhaltenen Spannungssignale (in V) gegen die beaufschlagte Gaskonzentration des zu überprüfenden optischen Filters aufgetragen, die Regressionsgleichungen bestimmt und statistisch abgesichert.

5.1.3.2 Methodik der Überprüfung im Labor

Die Kalibrationen und Überprüfungen des Multigasmonitors 1302 finden an der Gasmischstation der Bayerischen Landesanstalt für Landtechnik statt. Die Gasmischstation GEMS 2000 besteht seit Herbst 1997 und wurde zunächst aufwendigen Prüfroutinen der einzelnen Gas-Dosier-Einrichtungen und der Wassererzeugungseinheit unterzogen, die bei GROTZ (1998) dokumentiert sind. Vor jedem Mastdurchgang fand eine Kalibration des Multigasmonitor 1302 statt, vor und nach jedem Mastdurchgang wurde die Messungenauigkeit des Messgerätes überprüft. Die Kalibration erfolgte zunächst als reine Nullpunktkalibration mit N₂ 5.0, anschließend wurde die Feuchte kalibriert und danach die einzelnen Gase NH₃, CH₄, N₂O und CO₂ in Einpunktkalibrationen.

Überprüft wurde die Messungenauigkeit zunächst mit zwei Prüfgasgemischen, einem Gemisch aus niedrigen Konzentrationen aller Gase, wie sie z. B. in den Außenklimaställen angetroffen werden, und einem Gemisch aus hohen Konzentrationen, wie sie in der Abluft aus dem konventionellen Warmstall gemessen werden können. Bei den weiteren Überprüfungen vor und nach späteren Mastdurchgängen erfolgte die Überprüfung anhand einer Prüfroutine, die aus 4 zusätzlichen Prüfgasgemischen (NH₃, CH₄, N₂O, CO₂ und H₂O) in unterschiedlich hohen Konzentrationen bestehen. In Tabelle 17 sind die Prüfgasgemische und deren Konzentrationen dargestellt.

Tabelle 17: Prüfgasgemische an der Gasmischstation zur Überprüfung der Messungenauigkeiten des Multigasmonitor 1302

	Prüfgemisch <i>N</i>	Prüfgemisch <i>NI</i>	Prüfgemisch <i>N2</i>	Prüfgemisch <i>H</i>	Prüfgemisch <i>H1</i>	Prüfgemisch <i>H2</i>
NH ₃ (in ppm)	5	3	3	70	50	50
N ₂ O (in ppm)	0,5	0,5	0,5	1,5	0,8	0,8
CO ₂ (in ppm)	590	300	2000	2500	2000	2500
CH ₄ (in ppm)	7	5	5	80	70	70
H ₂ O (in ppm)	6000	12000	20000	15000	15000	20000

Die Erweiterung der ursprünglichen zwei Prüfroutinen (*N* und *H*) erfolgte unter dem Verdacht, dass unterschiedlich hohe CO₂- und H₂O-Konzentrationen unterschiedlich hohe Effekte auf die Querempfindlichkeit des N₂O- und des CH₄-Filters haben. Eine Quantifizierung oder Einschätzung der Messungenauigkeiten auch in diesen Situationen soll mit diesen Überprüfungsrountinen möglich sein.

5.1.3.3 Methodik der Überprüfung im Feldversuch mit FTIR-Spektroskopie

Während der gesamten Versuchsdurchführung fanden zwei Vergleichsmessungen des Multigasmonitors 1302 mit dem FTIR-Spektrometer K300 in den Versuchsabteilen statt. Beim ersten Vergleich (Dezember 98) wurde die „kleine“ Gaszelle mit einer Pfadlänge von 7,2 m eingesetzt, beim zweiten Vergleich (September/Oktober 1999) konnte bereits die große Gaszelle mit der Pfadlänge von 31,5 m eingesetzt werden.

Versuchsaufbau:

Über einen Bypass saugt sich der Multigasmonitor B&K 1302 die zu analysierenden Gasproben aus dem beheizten Messgasschlauch. Der Schlauch wird um ca. 15 m verlängert, separat beheizt und an das in einer externen Messkabine installierte FTIR-Spektrometer angeschlossen. Die Probenluft durchströmt kontinuierlich die Gaszelle. Am Gaszellenauslass wird die geförderte Probenluftmenge mit einem Durchflussmesser kontrolliert, um immer mindestens einen Durchfluss von 300 l/h zu gewährleisten. Bei einem Proben-schlauch von 6 mm Innendurchmesser und 15 m Länge ergibt sich ein Gasvolumen von ca. 0,4 l im Schlauch, das bei einem Durchfluss von 5 l/min in ca. 10 s vom B&K 1302 zum FTIR-Spektrometer gelangt. Die Konzentrationsmessung des FTIR-Spektrometers K300 in Gaszellenkonfiguration erfolgt im Durchfluss, d. h. während der 5 min, in denen die Gaszelle mit der zu analysierenden Luft durchströmt wird, erfolgen 100 „scans“, deren Mittelwert die Konzentration ergibt. Im Gegensatz dazu zieht sich der Multigasmonitor B&K 1302 einmal in diesen 5 Minuten eine Gasprobe in die Gaszelle (Volumen von 3 cm³), in der nacheinander die Gase NH₃, N₂O, CH₄, CO₂ und H₂O gemessen werden.

5.1.4 Ergebnisse der Qualitätssicherung der Gaskonzentrationsmesstechnik

Die hier vorgestellten Ergebnisse beziehen sich zunächst auf die Überprüfung der Linearität der optischen Filter des Multigasmonitors B&K 1302. Anschließend werden die Ergebnisse der Labor- und Praxisüberprüfung der Gasmesstechnik dargestellt.

5.1.4.1 Linearität der optischen Filter

Folgende Abbildung 23 zeigt die gute Linearität des NH₃-Filters (Filternr. UA 0973) mit einem Bestimmtheitsmaß von $R^2 = 0,9998$. Aus der Abbildung wird deutlich, dass hier bis zu einem Messbereich bis 100 ppm NH₃ eine Einpunktkalibration durchgeführt werden darf.

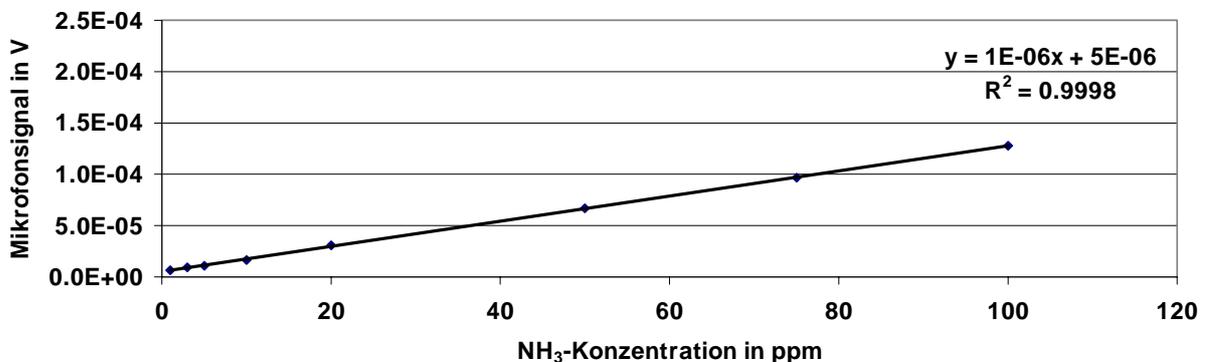


Abbildung 23: Linearitätstest des optischen Filters für NH₃ von 1 - 100 ppm

Das gleiche gute Bild zeigt sich in Abbildung 24 für den optischen Filter für CH₄ (Filternr. UA 0969). Das Bestimmtheitsmaß beträgt $R^2 = 0,9992$. Auch hier darf folglich eine Einpunktkalibration durchgeführt werden.

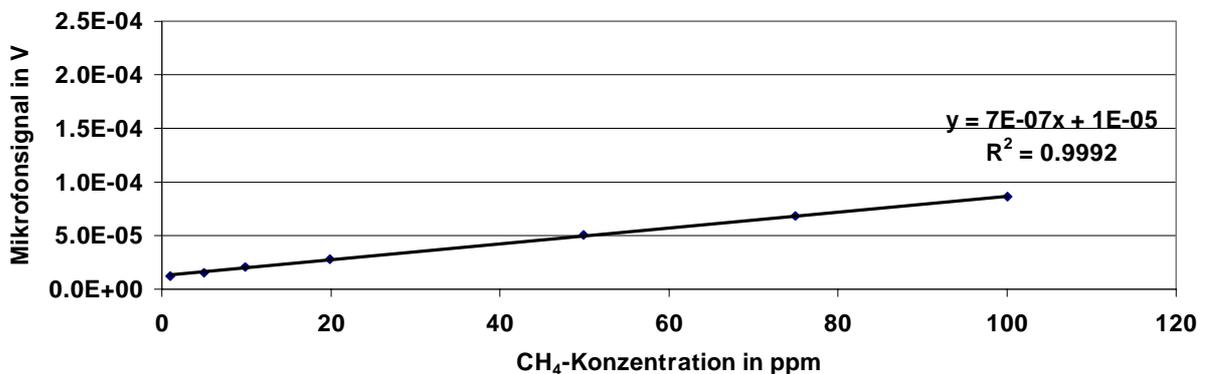


Abbildung 24: Linearitätstest des optischen Filters für CH₄ von 1 - 100 ppm

In Abbildung 25 ist die Linearität des optischen Filters für CO₂ (Filternr. UA 0983) dargestellt. Auch hier ist deutlich die Linearität dieses Filters zu erkennen, mit dem Bestimmtheitsmaß von $R^2 = 0,9911$.

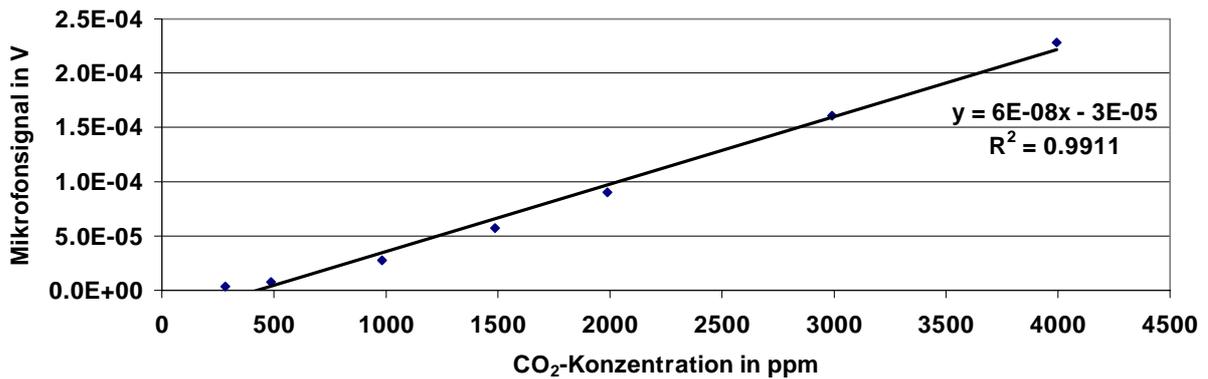


Abbildung 25: Linearitätstest des optischen Filters für CO₂ von 280 - 4000 ppm

Für den optischen N₂O-Filter wurde in Abbildung 26 die Linearität des Mikrofonsignals in Abhängigkeit der beaufschlagten N₂O-Konzentration ebenfalls bestätigt. Im Gegensatz zu den drei obigen optischen Filtern ist die y-Achsenkalierung wegen der besseren Darstellbarkeit hier um den Faktor 10 verkleinert worden. Das Bestimmtheitsmaß beträgt $R^2 = 0,9599$. Bei allen 4 untersuchten optischen Filtern (NH₃, CH₄, CO₂, N₂O) unterscheiden sich die Bestimmtheitsmaße signifikant von 0, ebenso die y-Achsen-Abschnitte und die Steigungen der Regressionsgeraden zum Signifikanzniveau von 99 %.

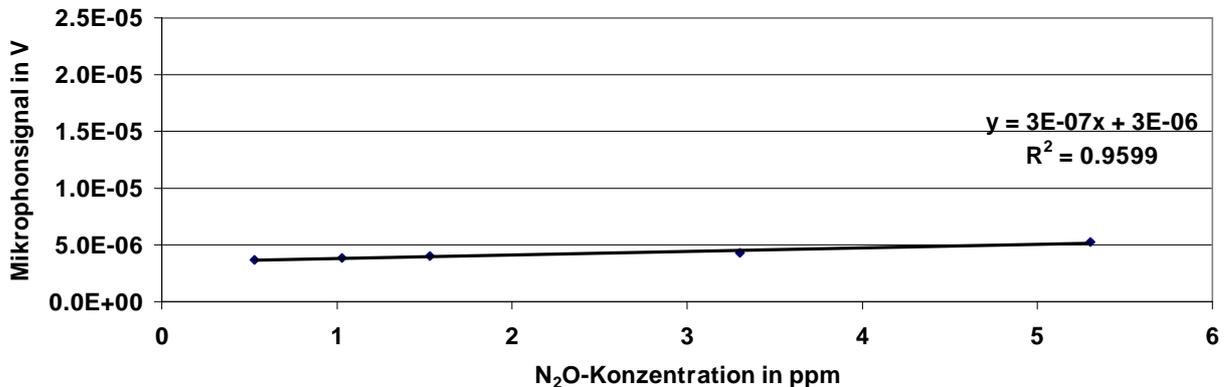


Abbildung 26: Linearitätstest des optischen Filters für N₂O von 0,53 – 5,2 ppm

Die Überprüfung der Linearität der einzelnen optischen Filter für NH₃, N₂O, CH₄ und CO₂ zeigt, dass eine Einpunkt-Kalibration mit diesen Messbereichsendwerten wegen der guten Linearität der Filter ausreichend ist.

5.1.4.2 Ergebnisse der Laborüberprüfung

Die Auswertungen der Messungenauigkeiten des Multigasmonitors 1302 in den in Abschnitt 5.1.3.2 beschriebenen Laborüberprüfungen erfolgt nach VDI 2449. In der folgenden Tabelle (Tabelle 18) sind die mittleren Messungenauigkeiten bei den verschiedenen Prüf-

gasgemischen sowie die relativen Messungenauigkeiten (Anteil der absoluten Messungenauigkeit am jeweiligen Sollwert) dargestellt.

Tabelle 18: Messungenauigkeiten des Multigasmonitors 1302 bei den unterschiedlichen Prüfgasgemischen

	Prüfgemisch N		Prüfgemisch N1		Prüfgemisch N2		Prüfgemisch H		Prüfgemisch H1		Prüfgemisch H2	
	ppm	%	ppm	%	ppm	%	ppm	%	ppm	%	ppm	%
NH ₃	0,80	21,3	0,87	45,6	1,84	98,4	3,79	5,9	1,41	2,9	1,41	2,9
N ₂ O	0,05	9,6	0,03	6,6	0,12	17,1	0,24	12,4	0,15	13,5	0,22	19,0
CO ₂	23,53	3,9	27,86	8,7	83,92	4,0	60,56	2,4	78,58	3,8	87,27	3,4
CH ₄	1,11	16,4	3,12	36,0	5,13	48,7	2,81	3,5	3,70	5,0	5,30	7,0
H ₂ O	231,16	3,3	237,66	1,9	613,08	3,0	485,95	3,1	367,65	2,4	434,71	2,1

Zu erkennen ist, dass die Messungenauigkeiten je nach zu Grunde gelegtem Prüfgasgemisch unterschiedlich hohe Messungenauigkeiten ergeben. Besonders auffällig sind hohe relative Messungenauigkeiten für NH₃, N₂O und CH₄ bei den Prüfgemischen N1 und N2. Bei den Prüfgasgemischen H, H1 und H2 liegen nur die relativen Abweichungen bei N₂O über 10 %, bei CH₄ und NH₃ nur bei H2 bzw. bei H über 5 %.

Zusammengefasst ergeben sich für die Prüfgasgemische mit niedrigen bzw. hohen Sollkonzentrationen für NH₃, CH₄, und N₂O die in Tabelle 19 dargestellten Messungenauigkeiten.

Tabelle 19: Zusammengefasste Messungenauigkeiten des Multigasmonitors 1302 bei hohen und niedrigen Prüfgasgemischen

Messungenauigkeit	Prüfgemisch N(alle)		Prüfgemisch H(alle)	
	ppm	%	ppm	%
NH ₃	1,17	55,1	2,20	3,9
N ₂ O	0,07	11,1	0,20	15,0
CO ₂	45,10	5,5	75,47	3,2
CH ₄	3,12	33,7	3,94	5,2
H ₂ O	360,63	2,7	429,44	2,5

Besonders für CO₂ und H₂O sind die Messungenauigkeiten mit meist < 5 % sehr gut, für die Prüfgasgemische mit hohen Konzentrationen sind die Messungenauigkeiten für CH₄ und NH₃ ebenso zufriedenstellend. Bei N₂O liegen die Abweichungen sowohl beim niedrigen als auch beim hohen Prüfgasgemisch mit 11,1 bzw. 15,0 % in einem akzeptablen Bereich. Aus dem Rahmen fallen die relativen Messungenauigkeiten für CH₄ und NH₃ im niedrigen Konzentrationsbereich mit 33,7 bzw. 55,1 %. Betrachtet man hier jedoch die absolute Messungenauigkeit, so zeigt dies mit 1,17 ppm für NH₃ und 3,12 ppm für CH₄ jedoch erwartete Größenordnungen, die so auch bei KRAHL ET AL. (1996) beobachtet wurden. Um nun mit einheitlichen Messungenauigkeiten des Multigasmonitor 1302 arbeiten

zu können, werden diese in der folgenden Tabelle (Tabelle 20) über die gesamten Überprüfungen gemittelt:

Tabelle 20: Mittelwert der Messungenauigkeiten des Multigasmonitors 1302 bei allen Prüfgasgemischen

Messungenauigkeit	Mittelwert der Messungenauigkeit bei allen Prüfgemischen
NH ₃	1,69
N ₂ O	0,13
CO ₂	60,29
CH ₄	3,53
H ₂ O	395,04

Die Angabe der relativen Messungenauigkeiten in % ist hierfür nicht sinnvoll, da es dabei auf die Bezugsgröße ankommt. Da die Ermittlung der Messungenauigkeiten für die einzelnen Gase anhand verschieden zusammengesetzter Prüfgasgemische stattgefunden hat, geben die Werte in obiger Tabelle 20 eine Messungenauigkeit an, die den während Praxismessungen in Ställen herrschenden Bedingungen bezüglich des auftretenden Konzentrationspektrum sehr nahe kommen, und somit auf Prismessungen übertragen werden können.

Die Ermittlung von Messungenauigkeiten für Einzelgase käme voraussichtlich zu „besseren“ Ergebnissen (STEGBAUER, 1996), würde aber die realen Messungenauigkeiten falsch einschätzen, da Einflüsse von Querempfindlichkeiten und unterschiedlichen Konzentrationsniveaus vorhanden sind.

Fazit: Für die Gaskonzentrationsbestimmung zur Emissionsratenermittlung in Dauermessungen ist zur Vermeidung von Querempfindlichkeiten eine sorgfältige Kalibration aller zu messender Gase zu fordern. Die Überprüfung der Genauigkeit muss als Mehrkomponentenüberprüfung im Gasgemisch erfolgen, unter Angabe der Messungenauigkeit in absoluten Werten.

5.1.4.3 Ergebnisse der Praxisüberprüfung

Bei der Gegenüberstellung der mit dem Multigasmonitor B&K 1302 gemessenen NH₃-Konzentrationen mit den vom FTIR-Spektrometer K300 gemessenen ergibt sich der Zusammenhang: $y = 0,9398x - 0,1169$ ($x = c_{B\&K\ 1302}$; $y = c_{K300}$) mit einem Bestimmtheitsmaß von $R^2=0,99$. Der Grund dafür, dass die Steigung der Geraden nicht noch näher bei 1 liegt, ist, dass für das FTIR-Spektrometer Nichtlinearitäten im Bereich einer Konzentration > 30 ppm aufgetreten sind, die noch nicht vollständig eliminiert sind und somit noch nicht

abschließend ausgewertet werden konnten. Dieses Ergebnis für NH_3 ist sehr zufriedenstellend.

Für CO_2 ergibt sich ein ähnlich guter Zusammenhang zwischen den Konzentrationen des B&K 1302 (x-Achse) und denen des K300 (y-Achse) von: $y = 0,9878x + 39,113$ bei einem Bestimmtheitsmaß $R^2 = 0,99$.

Der analoge Zusammenhang bei H_2O ergibt: $y = 0,9135x - 1016,3$ bei einem Bestimmtheitsmaß von $R^2 = 0,95$. Für die Messung der H_2O -Konzentrationen ist dieser Zusammenhang noch akzeptabel, außerdem kann sich auch hier noch etwas an der Auswertung ändern, wenn die entsprechenden Arbeiten an der Auswertesoftware abgeschlossen sind (DEPTA UND GRONAUER, 1999).

Auch für CH_4 gibt es ein Problem des FTIR-Spektrometers mit Nicht-Linearitäten im höheren Konzentrationsbereich, so dass eine abschließende Auswertung der Messung im Versuchsstall noch stattfinden muss.

Fazit: Mit dem photoakustischen Infrarotspektrometer ist es möglich, mit ausreichend großer Genauigkeit Gaskonzentrationen in der Ab- und Zuluft der Versuchsabteile zu bestimmen. Notwendig ist jedoch eine regelmäßige umfangreiche Kalibration und Überprüfung des Messgerätes.

5.2 Volumenstrommessung

Zur kontinuierlichen Emissionsratenbestimmung müssen in allen Versuchsabteilen kontinuierlich die Abluftvolumenströme gemessen werden.

5.2.1 Volumenstrombestimmung im Warmstall

Das Versuchsabteil im konventionellen Stall wird über einen Abluftventilator zwangsentlüftet. Dieser fördert temperaturgesteuert 0 bis 5000 m^3/h Abluft aus dem Versuchsabteil. Die Drehfrequenz des dem Ventilator nachgeschalteten Messventilators wird als analoges Spannungssignal von 0 bis 4 V an den Lüftungscomputer übermittelt und wird an der Hall-Platine des Messventilators abgegriffen. Nach Einsetzen der gemessenen Spannung in eine Kalibrierfunktion ergibt sich die Strömungsgeschwindigkeit (in m/s), woraus sich bei bekanntem Messventilatordurchmesser von 0,465 m die Lüftungsrate (in m^3/h) errechnet.

Zur Luftströmungsmessung und somit zur Kalibration der Messventilatoren wird ein Flügelradanemometer verwendet. Flügelradanemometer haben Flügelblätter in einem festen oder auch einstellbaren Winkel zur Strömungsrichtung. Infolge der Reibung des Flügelra-

des gibt es eine Anlaufgeschwindigkeit, unterhalb derer die Messung versagt. Die Drehzahlabtastung erfolgt mechanisch, photoelektrisch oder magnetisch induktiv (FIEDLER, 1992). Abbildung 27 zeigt schematisch ein solches Flügelradanemometer.

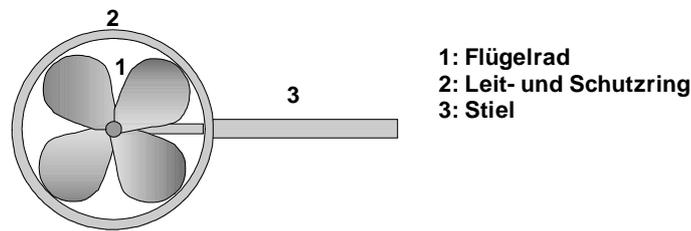


Abbildung 27: Flügelradanemometer (schematische Darstellung)

Der Anemometerkopf des hier zur Kalibration verwendeten Flügelradanemometers AV-2 (Fa. Airflow Lufttechnik GmbH) hat einen Durchmesser von 35 mm und ist für Messungen im Bereich von 0,25-20 m/s geeignet. Das zum Flügelradanemometer dazugehörige Bedienelement bildet den Langzeitmittelwert über die Geschwindigkeit während der Messung; der erste Mittelwert wird nach 2 s angezeigt, die Anzeige des korrigierten Mittelwertes erfolgt nach jeweils 0,8 s. In diesem integrierenden Messmodus wird für jede Schlaufenmessung eine Durchschnittsgeschwindigkeit (in m/s) angezeigt (AIRFLOW LUFTTECHNIK GMBH, 1995). In Abbildung 28 ist das Prinzip der Schlaufenmessung (SPRENGER, 1979 und VDI 2640, 1991) schematisch dargestellt.

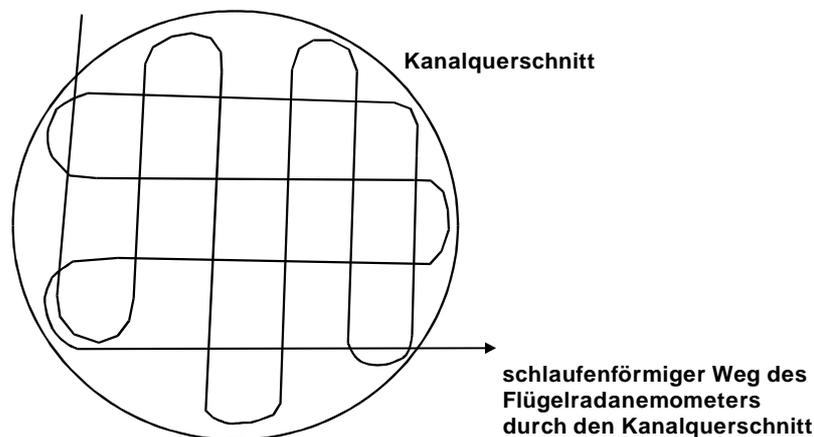


Abbildung 28: Schlaufenmessung an einem runden Kanalquerschnitt zur Bestimmung der mittleren Strömungsgeschwindigkeit

Zu beachten ist bei der Schlaufenmethode, dass die Messfläche langsam in Schlaufenform (siehe Abbildung 28) in zwei zueinander senkrechten Richtungen abefahren wird und dabei, je nach Kanalquerschnitt, bestimmte Abstände von der Kanalwand eingehalten wer-

den. Hier sollen zur Kalibration bei Kanaldurchmessern von 0,5 m ca. 4 cm eingehalten werden.

Kalibration

In Abbildung 29 ist die Kalibrationsgerade des Messventilators im kW dargestellt. Das von der Datenerfassungssoftware aufgezeichnete Signal ist hier eine Spannung in V und nicht wie oben eine Frequenz, da die dem Messventilator angegliederte Hallplatine die Umdrehungsfrequenz des Messventilators in eine Spannung wandelt. Die gezeigte Kalibriergerade setzt sich aus drei Kalibrationsdurchgängen nach dem 6.7.99 zusammen, da in dieser Nacht ein schweres Gewitter die zum Messventilator gehörige Hall-Platine zerstört hat und nach der Reparatur auch die Potentiometerstellung manuell nachjustiert werden musste. Für die Zeit davor gilt eine andere Kalibriergerade.

Aus der in Abbildung 29 dargestellten Kalibriergerade ergibt sich die Kalibriergerade für den Volumenstrom $y = 1087,9 x - 88,558$. Das Bestimmtheitsmaß $B = 0,98$ ist auf einem Signifikanzniveau von 99 % von 0 verschieden, ebenso die Steigung der Geraden β_0 . Als 95%-Vertrauensintervall für β_0 ergibt sich $V.I.\{-212,17 \leq \beta_0 \leq 35,06\}_{95\%}$ und für β_1 $V.I.\{1035,52 \leq \beta_0 \leq 1139,10\}_{95\%}$. Die Kalibriergerade für den kW vor dem 6.7.99 lautet: $y = 1439,9 x - 213,91$

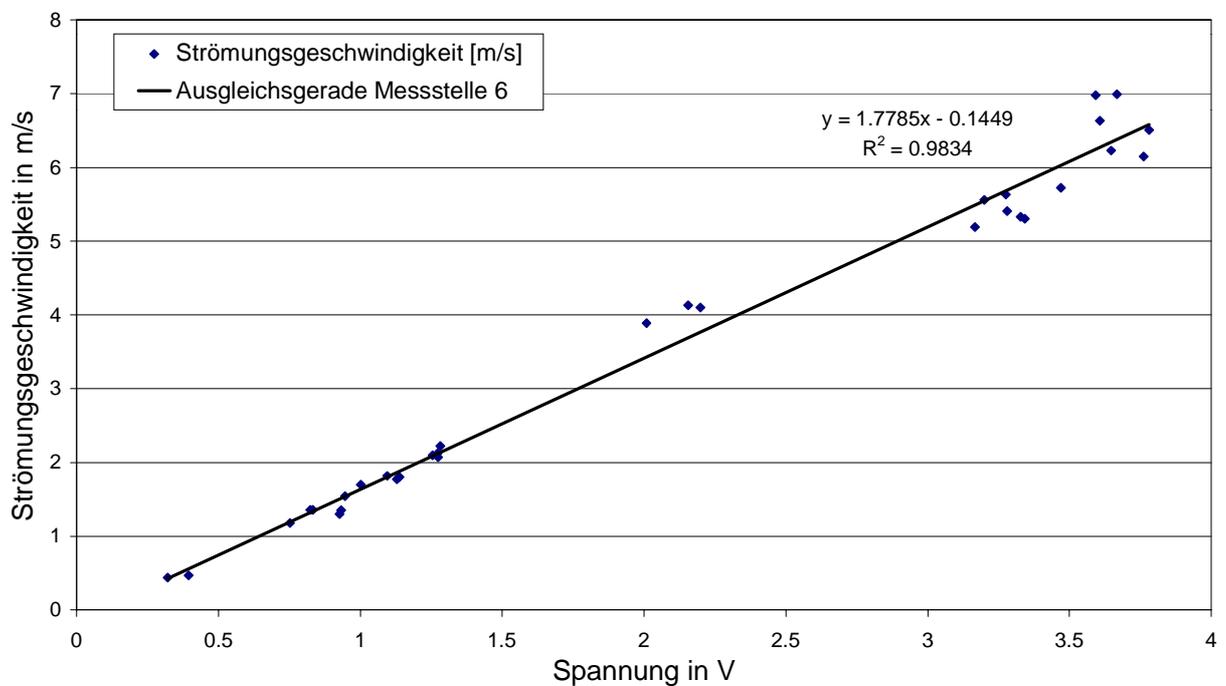


Abbildung 29: Kalibriergerade des Messventilators an der Messstelle 6 (kW)

5.2.2 Volumenstrombestimmung in den Außenklima-Versuchsabteilen

Wie in Abschnitt 2.2.2 bereits dargestellt, erfordert es einen hohen Aufwand, die Abluftvolumenströme aus freigelüfteten Ställen über Tracergasmessungen oder andere Bilanzierungsmethoden zu ermitteln. Auch die in Abschnitt 2.2.2 vorgestellten Kammermethoden sind bei einer *kontinuierlichen* Messung im *Praxismaßstab* nicht anwendbar. Bei den Methoden Tracergasmessung und Bilanzierung ist außerdem eine kontinuierliche Messung der Abluftvolumenströme zur Ermittlung gesicherter Emissionsraten über größere Abschnitte der Mastperiode nicht möglich.

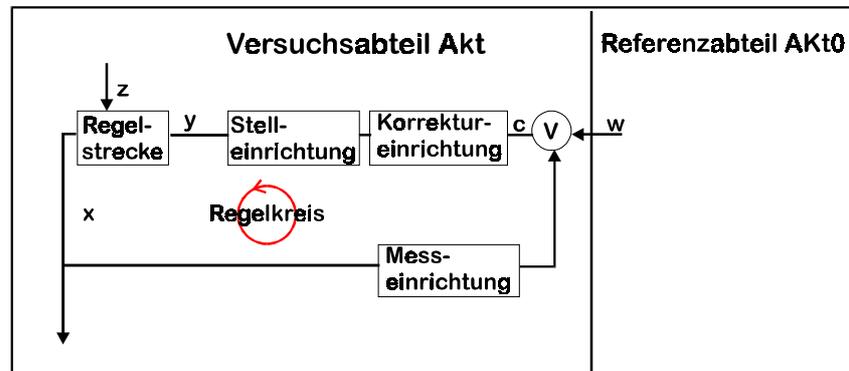
5.2.2.1 Kapselung und Regelung; Prinzip einer großen dynamischen Kammer

Im Rahmen dieser Arbeit wird nun eine Erweiterung der *dynamischen Kammermethode* angewandt, die es ermöglicht, mit der in zwangsentlüfteten Ställen bewährten Methode der Abluftvolumenstromermittlung über Messventilatoren im Abluftkamin zu messen. Hierzu werden die beiden Versuchsabteile im Außenklimastall voneinander, zum übrigen Stall und nach außen gekapselt, so dass jedes Versuchsabteil für sich eine große dynamische Kammer darstellt, mit dem Vorteil, dass die Tieraktivität nicht beeinträchtigt wird und keine zusätzlichen Oberflächen, die zu unkontrollierbaren Ad- und Desorptionen führen, installiert werden.

Generell werden Außenklimaställe für Mastschweine quer zur Hauptwindrichtung (hier: West) erstellt, so dass der Stall durch die hauptsächlich herrschende Windrichtung quer durchströmt wird. Diesem Phänomen angepasst, wird auf der Westseite der beiden untersuchten Stallabteile je ein Vorbau an die Spaceboard-Außenwände angesetzt, durch die die Luft in den Stall eintritt. Auf der gegenüberliegenden Ostseite der Versuchsabteile sind analog dazu dieselben Vorbauten angebracht, in die mittig ein Abluftventilator eingebaut ist. Die Ansteuerung dieses Abluftventilators erfolgt über eine Temperaturregelung (Abbildung 30).

Hierzu misst ein Temperaturfühler kontinuierlich die Temperatur im nicht gekapselten Außenklimastall (AKt0) und gibt diese Temperatur als SOLL-Temperatur zur Temperaturregelung weiter. Gleichzeitig wird im gekapselten Außenklima-Versuchsabteil mit Teilspaltenboden (AKt) die IST-Temperatur gemessen, die von der Temperaturregelung ständig mit der SOLL-Temperatur verglichen wird. Je nach Abweichung der beiden SOLL- und IST-Werte sendet die Temperaturregelung ein Steuersignal an die beiden Frequenzumrichter, die die Abluftventilatoren der beiden Versuchsabteile regeln. Hintergrund dieses

Verfahrens ist, dass bei gleichen Umgebungsparametern (Temperatur, Windgeschwindigkeit und -richtung, Feuchte, Strahlung) und gleichem Tierbesatz im Stall die Temperatur ein Maß dafür ist, wie viel Luft durch die Versuchsabteile strömt.



w: Führungsgröße (Temperatur T im Referenzabteil AKt0)
 x: Regelgröße (Temperatur T im Versuchsabteil Akt)
 y: Stellgröße (Ventilator-drehzahl)
 z: Störgröße
 c: $c=w-x$
 V: Vergleichseinrichtung

Abbildung 30: Regelungsschema zur Lüftung der gekapselten Außenklima-Versuchsabteile

Die Abluftventilatoren (Fa. Ziehl-Abegg) fördern bis ca. 11.000 m³/h. Die Abluft mündet in ein Rohr, in dessen Mitte ein auf einer Welle sehr leicht gelagerter Messventilator sitzt (Abbildung 31). Der Abluftstrom versetzt den Messventilator in eine dem Abluftvolumenstrom proportionale Drehfrequenz. Die Drehfrequenz wird über die induktiven Näherungssensoren erfasst. Durch Einsetzen der gemessenen Drehfrequenz in die mindestens einmal pro Mastdurchgang ermittelte Kalibrierfunktion ergibt sich die Strömungsgeschwindigkeit (in m/s). Bei gegebenem Rohrquerschnitt errechnet sich damit die Lüftungsrate bzw. der Abluftvolumenstrom in (in m³/h). Die Lage der Abluft- und Messventilatoren im Anbau und im Abluftkanal verdeutlicht Abbildung 31.

Die Drehfrequenz der Messventilatoren wird mit Hilfe von induktiven Näherungssensoren ermittelt (Fa. Turck, Modell Ni3-G08-AN6X). Diese sind senkrecht zu einer auf der Messventilatorwelle sitzenden Lochscheibe angebracht und reagieren auf die Unterbrechungen der Lochscheibe mit einem kurzzeitigem Abfall der angelegten Spannung. Die Anzahl der Spannungsabfälle pro Zeiteinheit ist ein Maß für die Drehfrequenz der Messventilatoren.

Die Datenerfassung erfolgt wie in Tabelle 6 dargestellt über die 5B45 und 6B12-Module, die die gemessenen Frequenzen in digitale Signale für den PC wandeln.

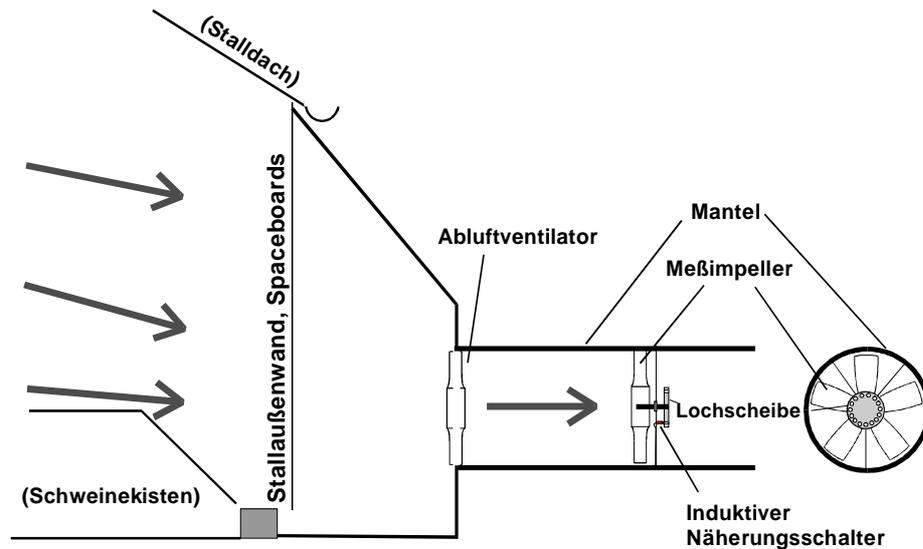


Abbildung 31: Lage der Ventilatoren im Ablufttrichter und im Abluftkanal (Querschnitt und Frontansicht)

5.2.2.2 Kalibration der Messventilatoren

Die Kalibration der Messventilatoren erfolgt wegen der speziellen Einbausituation (Kapselung, große, geschlitzte Ansaugfläche) vor Ort. Die Kalibrierung wird mit dem oben beschriebenen Flügelradanemometer in einer Schlaufenmessung durchgeführt.

Pro eingestellter Ventilatorzahl (über die Steuerung am Frequenzumrichter 5, 10, 15, ...50 Hz) werden drei Wiederholungen (Schlaufenmessungen) durchgeführt. Die mit dem Flügelradanemometer gemessenen Strömungsgeschwindigkeiten werden mit den an der Messstellenumschaltung über die Frequenz- und Analogmodule angezeigten Frequenzen in Relation gesetzt. Aus diesen Daten ergibt sich die für jeden Messventilator spezifische Kalibriergerade. Damit die ermittelte Kalibriergerade unabhängig von der jeweiligen klimatischen Situation (Windrichtung und Windgeschwindigkeit) ist, wird mindestens einmal pro Mastdurchgang kalibriert. Die bei jeder Kalibrationsroutine erhaltenen Daten werden zu einer einzigen Kalibriergerade je Messventilator verrechnet, um einen Mittelwert zu erhalten. In den folgenden Abbildungen (Abbildung 32 und Abbildung 33) sind die ermittelten Kalibrationsgeraden dargestellt.

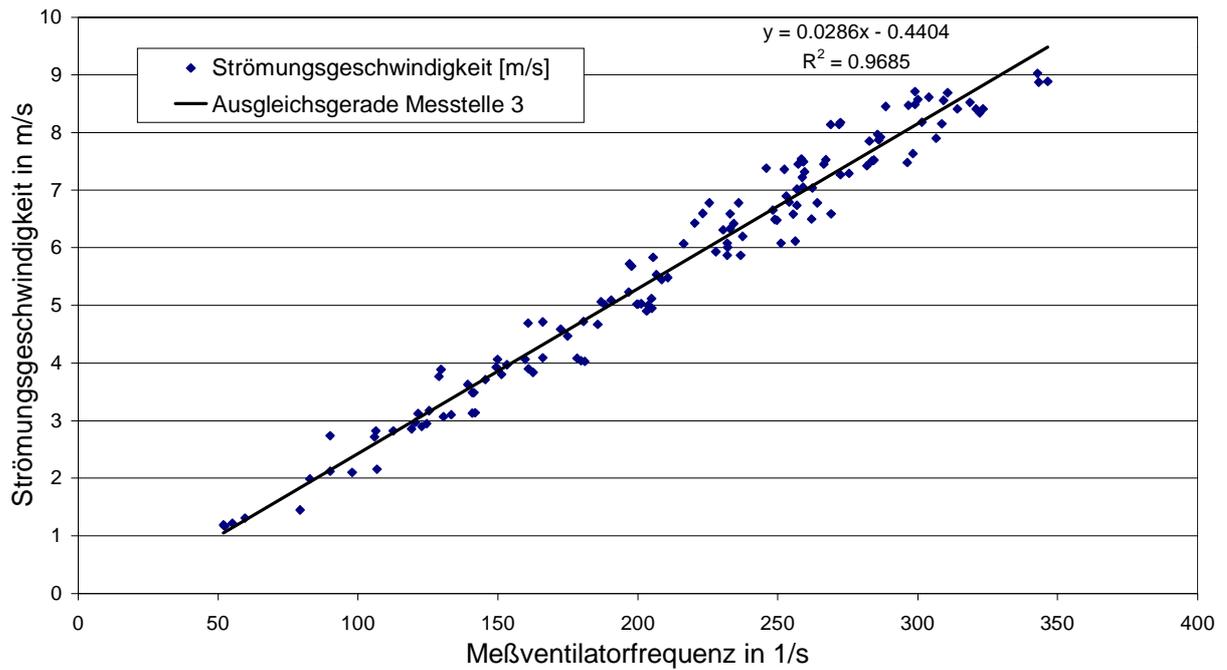


Abbildung 32: Kalibriergerade des Messventilators an Messstelle 3 (AKt)

Das Bestimmtheitsmaß $B = 0,97$ ist auf einem Signifikanzniveau von 99 % von 0 verschieden, ebenso der Schnittpunkt der Ausgleichsgeraden mit der y-Achse (β_0) und die Steigung der Geraden (β_1). Aus der dargestellten Kalibrationsgerade ergibt sich analog die Kalibrationsgerade für den Abluftvolumenstrom ($d_{\text{Messventilator AKt}} = 0,57 \text{ m}$) mit $y = 26,30 x - 404,61$ bei gleichem Bestimmtheitsmaß und Signifikanzen. Für β_0 ergibt sich das 95%-Vertrauensintervall $V.I.\{-588,56 \leq \beta_0 \leq -220,66\}_{95\%}$ und für β_1 $V.I.\{25,49 \leq \beta_1 \leq 27,11\}_{95\%}$.

In Abbildung 33 (Versuchsabteil AKe) ist das Bestimmtheitsmaß $B = 0,99$ der Ausgleichsgeraden für die Strömungsgeschwindigkeit ebenfalls auf einem Signifikanzniveau von 99 % von 0 verschieden, ebenso der Schnittpunkt mit der y-Achse (β_0) und die Steigung der Geraden (β_1). Für den Abluftvolumenstrom ($d_{\text{Messventilator AKt}} = 0,57 \text{ m}$) ergibt sich die Ausgleichsgerade $y = 25,24 x - 343,22$ mit dem 95 %-Vertrauensintervall für β_0 $V.I.\{-446,20 \leq \beta_0 \leq -240,25\}_{95\%}$ und für β_1 $V.I.\{24,79 \leq \beta_1 \leq 25,70\}_{95\%}$.

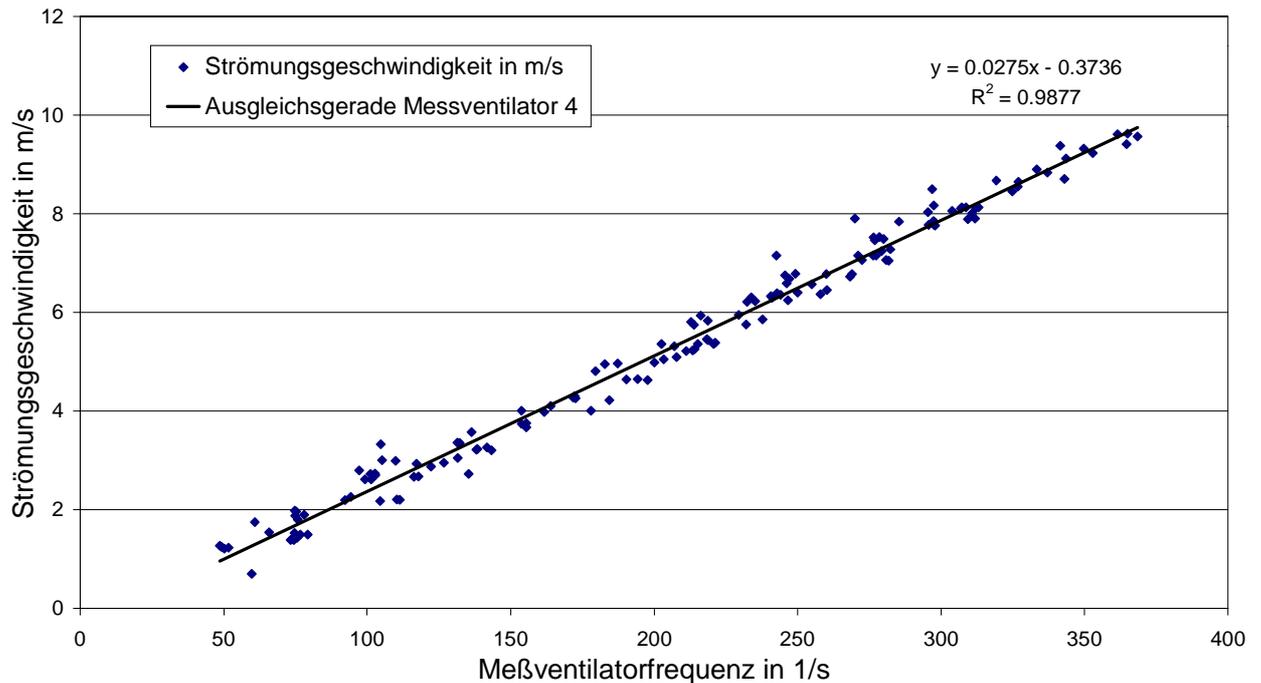


Abbildung 33: Kalibriergerade des Messventilators an Messstelle 4 (AKe)

Die in Abbildung 32 und Abbildung 33 dargestellten Kalibrationsgeraden stellen die Kalibrationsgeraden während des gesamten Untersuchungszeitraumes dar. Eine Anpassung der Datenaufzeichnungssoftware und der Auswertung der Daten um die sich gering verändernden Kalibrationen erfolgte nach jeder Kalibration.

5.2.3 Qualitätssicherung der Volumenstrommessung

Die Qualitätssicherung der Volumenstrombestimmung wird zunächst über die regelmäßige gewissenhafte Kalibration der Messventilatoren erreicht (s. o). Weiter wird die Methode der Volumenstrombestimmung über die Kapselung mittels der großen dynamischen Kammer mit den parallel zu den eigenen Versuchen von Haidn et al. (2000) durchgeführten Messungen der Temperaturen in drei verschiedenen Höhen (0,5 m, 2 m, 6 m) im Außenklima-Versuchsabteil mit Teilspaltenboden (AKt) und im übrigen Außenklimastall (AKt0) validiert. Ein weiteres Kriterium ist der Vergleich der Soll- und Isttemperaturen der Temperaturregelung zur Zwangsentlüftung der Außenklima-Versuchsabteile (Rathmer et al., 2000). Schließlich wurden von Hornauer und Haidn (2001) omnidirektionale Strömungsmessungen mit einem Ultraschallanemometer im Außenklima-Versuchsabteil mit Teilspaltenboden (AKt) und dem nicht gekapselten, übrigen Außenklimastall (AK) durchgeführt.

5.2.4 Ergebnisse der Validierung der Methode der Kapselung der Außenklima-Versuchsabteile

Mit der Methode der dynamischen Kammer, also der luftdichten Kapselung und Zwangsentlüftung der Versuchsabteile im Außenklimastall (AKt und AKe), soll erreicht werden, dass die Versuchsabteile ähnlich dem nicht gekapselten Außenklimastall (AKt0) durchlüftet werden, ohne dass es zu einer, das komplexe Geschehen in einem solchen System nachhaltig verändernden, Beeinträchtigung kommt. Aus diesem Grund werden im Folgenden zunächst die unabhängig von den eigenen Versuchen aufgezeichneten stallklimatischen Kenngrößen der Versuchsabteile mit dem übrigen Außenklimastall verglichen. Anschließend erfolgt der Vergleich der Soll- und Isttemperaturen der Temperaturregelung der Zwangsentlüftung der Versuchsabteile im Außenklimastall. Und schließlich werden die exemplarisch an einem Tag im Versuchsabteil AKt und im übrigen Außenklimastall mit einem Ultraschallanemometer durchgeführten Strömungsmessungen einander gegenübergestellt.

5.2.4.1 Vergleich stallklimatischer Kenngrößen

Herangezogen werden dabei die von Haidn et al. (2000) aufgezeichneten Temperaturen in 0,5 m, 2 m und 6 m, sowie die relative Luftfeuchte in 2 m. In Tabelle 21 sind zunächst die Mittelwerte, Min- und Maxwerte der Temperaturen dreier Höhen in den verschiedenen Abteilen dargestellt.

Tabelle 21: Stalltemperaturen in den Systemen von Nov. 1997 bis Juli 1999 (Haidn et al. 2000)

	au- ßen	AKt0			AKt			AKe			kW		
		6 m	2 m	0,5m	6 m	2 m	0,5m	6 m	2 m	0,5m	3 m	2 m	0,5m
Mittelwert (in °C)	8,9	13,5	13,1	12,3	12,2	14,3	13,4	12,0	12,6	11,6	19,9	19,0	19,1
Minimum (in °C)	-17,0	-4,1	-3,6	-4,1	-13,8	-5,6	-5,6	-6,2	-6,0	-5,6	9,3	8,2	8,5
Maximum (in °C)	35,3	38,9	35,1	34,5	44,4	36,2	34,6	44,7	36,2	34,5	31,2	30,9	29,8
Standardabw. inK	8,2	6,8	6,4	6,4	8,8	6,6	6,6	8,6	7,5	7,3	5,2	5,4	5,1
54 000 Datensätze													

Zu erkennen ist, dass die Mittelwerte in den beiden Versuchsabteilen im Außenklimastall geringfügig nach oben (AKt) und nach unten (AKe) abweichen. Ein Grund für die geringeren Durchschnittstemperaturen im Außenklima-Versuchsabteil mit Einstreu (AKe) ist dessen Lage am Nordende des Stalles. Aus dem Rahmen fallen die Maximalwerte der Außenklima-Versuchsabteile in 6 m Höhe, hier werden viel höhere Temperaturen erreicht, da aus versuchsbedingten Gründen die Firstöffnung luftdicht geschlossen werden musste. Die

Minimalwerte in AKt und AKe liegen unter denen des übrigen Außenklimastalles (AKt0), da aus messtechnischen Gründen in den gekapselten Versuchsabteilen immer eine Mindestluftströmung notwendig war, die im Winter, bei niedrigen Außentemperaturen zu einer im Vergleich zu AKt0 höheren Durchlüftung mit folglich geringeren Temperaturen geführt hat.

Tabelle 22 zeigt die Korrelationen der Temperaturen und der relativen Luftfeuchte in den verschiedenen Höhen im Außenklimastall. Deutlich zu erkennen ist, dass die jeweils entsprechenden Temperaturen und Feuchten hoch korreliert sind ($r = 0,95$ bis $0,99$); hier fällt lediglich der Korrelationskoeffizient ($r = 0,77$) zwischen der rel. Feuchte in AKt0 und AKe aus der Reihe – der Grund dafür ist wohl eher bei haltungsspezifischen Faktoren, wie der Einstreu in diesem Abteil, zu finden, als in versuchstechnisch bedingten Faktoren.

Tabelle 22: Korrelation des Klimas in den Versuchsabteilen 1997 bis 1999 (HAIDN ET AL. 2000)

	Außen Außen		AKt0	AKt0	AKt0	AKt0	AKt	AKt	AKt	AKt	AKe	AKe	AKe	AKe
	T [°C]	rF [%]	6m	2m	1/2m	2m	6m	2m	1/2m	2m	6m	2m	1/2m	2m
	T [°C]	rF [%]	T [°C]	T [°C]	T [°C]	rF [%]	T [°C]	T [°C]	T [°C]	rF [%]	T [°C]	T [°C]	T [°C]	rF [%]
AKt0 6m T	0,941	-0,556	1,000											
AKt0 2m T	0,940	-0,541	0,993	1,000										
AKt0 1/2m	0,957	-0,549	0,987	0,994	1,000									
AKt0 2m rF	-0,475	0,914	-0,548	-0,534	-0,532	1,000								
AKt 6m T	0,937	-0,563	0,949	0,943	0,949	-0,513	1,000							
AKt 2m T	0,950	-0,509	0,981	0,986	0,986	-0,552	0,981	1,000						
AKt 1/2m T	0,960	-0,491	0,972	0,980	0,987	-0,533	0,965	0,991	1,000					
AKt 2m rF	-0,464	0,925	-0,514	-0,500	-0,504	0,973	-0,553	-0,539	-0,527	1,000				
AKe 6m T	0,916	-0,554	0,951	0,939	0,938	-0,537	0,972	0,972	0,960	-0,550	1,000			
AKe 2m T	0,952	-0,520	0,977	0,978	0,979	-0,558	0,962	0,986	0,984	-0,541	0,984	1,000		
AKe 1/2m	0,968	-0,495	0,963	0,968	0,977	-0,534	0,946	0,976	0,987	-0,518	0,968	0,990	1,000	
AKe 2m rF	-0,210	0,744	-0,243	-0,226	-0,229	0,770	-0,281	-0,272	-0,263	0,806	-0,247	-0,230	-0,217	1,000

5.2.4.2 Vergleich der Soll- und Isttemperaturen der Temperaturregelung

In Abbildung 34 sind die Verläufe der Tagesmittelwerte der Soll- und Isttemperaturen im gekapselten Außenklima-Versuchsabteil und im nicht gekapselten Außenklima-Stall dargestellt.

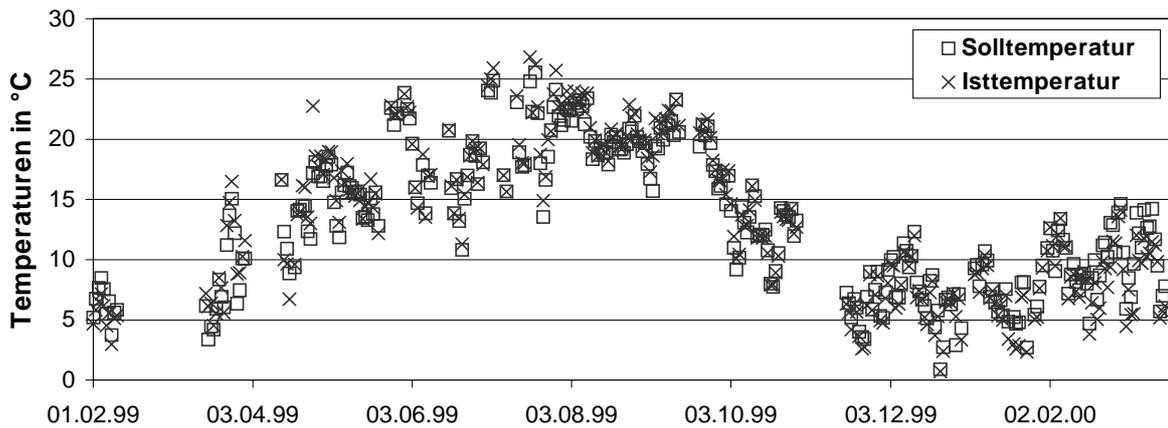


Abbildung 34: Verlauf der Soll- und Isttemperaturen in den gekapselten Außenklima-Versuchsabteilen und im nicht gekapselten Außenklimastall

Deutlich zu erkennen ist, dass die Verläufe der Tagesmittelwerte der beiden Temperaturen gut übereinstimmen, dass jedoch bei den höheren Temperaturen die Solltemperaturen meist von der Isttemperatur überschritten werden, da hier die Ventilatoren der dynamischen Kammer an ihre obere Leistungsgrenze stoßen. Ebenso wird die Solltemperatur in den beiden Außenklima-Versuchsabteilen bei niedrigen Außentemperaturen im Winter bei niedrigen Volumenströmen unterschritten, da in den gekapselten Versuchsabteilen eine Mindestluftströmung eingestellt wurde, die eine Durchströmung der dynamischen Kammern gewährleistet und somit eine Emissionsratenbestimmung ermöglicht.

Die Korrelation der Tagesmittelwerte der Solltemperaturen mit den Isttemperaturen ergibt einen Korrelationskoeffizienten von $r = 0,99$, der signifikant ($p = 0,01$) von 0 verschieden ist. Die durchschnittliche Abweichung der Soll- und Isttemperaturen beträgt 0,4 K, die Differenz der gemittelten Tagesmittelwerte der Soll- und Isttemperaturen beträgt nur 0,01 K.

5.2.4.3 Punktueller Vergleich der Strömungsgeschwindigkeiten und –richtungen

Die im Folgenden dargestellten Ergebnisse wurden im Rahmen eines Versuches der Abteilung Verfahrenstechnik der Tierhaltung an der LTW erhoben (HORNAUER UND HAIDN, 2001).

Im Außenklima-Versuchsabteil mit Teilspaltenboden (AKt) und im mittleren Abschnitt des übrigen, nicht gekapselten Außenklimastalles (AK) wurden mit einem Ultraschallanemometer (Fa. Metek) omnidirektionale (d.h. in x-, y- und z-Richtung ausgerichtete) Strö-

mungsmessungen an jeweils sieben verschiedenen Stellen im jeweiligen Untersuchungsabteil nacheinander durchgeführt. Messpunkte (in Klammern) sind:

- an der Innenseite der westlichen Spaceboardwand (1),
- in der westlichen Ruhekiste (2),
- im Kotbereich der westlichen Bucht (3),
- im Kontrollgang (4),
- im Kotbereich der östlichen Bucht (5),
- in der östlichen Kiste (6) und
- an der Innenseite der östlichen Spaceboardwand (7),

also an insgesamt 7 Stellen eines Untersuchungsabteils. Durchgeführt wurden die Messungen bei geöffneten, geschlossenen und um 30 cm angehobenen Kistendeckeln. Die Abtastrate des Ultraschallanemometers (USA1-Sonde) beträgt 1 Hz, die Mittelungszeit beträgt 60 s. Pro Messstelle werden 10 Messwerte aufgenommen. Die Messhöhe beträgt an den Messpunkten (1) und (7) 20 cm, an den Messpunkten (2) bis (6) 90 cm über dem Boden.

Die Messungen fanden unter gleichen außerklimatischen Bedingungen bezüglich der Windrichtung, Windgeschwindigkeit und Außentemperatur statt. Der Mittelwert der Windrichtung beträgt 86° mit einer Standardabweichung von 14° . Somit weht während des gesamten Untersuchungszeitraumes Ostwind mit einer mittleren Windgeschwindigkeit von 2,42 m/s (Standardabweichung 0,5 m/s). Die durchschnittliche Außentemperatur beträgt $19,4^\circ\text{C}$ bei einer Standardabweichung von $1,4^\circ\text{C}$. Die Außerklimabedingungen während der Strömungsmessung mit der USA1-Sonde sind also relativ einheitlich, von einer unterschiedlichen Beeinflussung auf die Strömungsmessung ist damit nicht auszugehen.

Die Ergebnisse dieser Versuche sind in den folgenden 4 Abbildungen für die resultierende Strömungsgeschwindigkeit sowie für die x-, y- und z-Komponenten dargestellt. Die Werte auf der y-Achse beschreiben die Strömungsgeschwindigkeiten, wobei für die negativen (-) und positiven (+) Werte die entsprechenden Richtungen beachtet werden müssen.

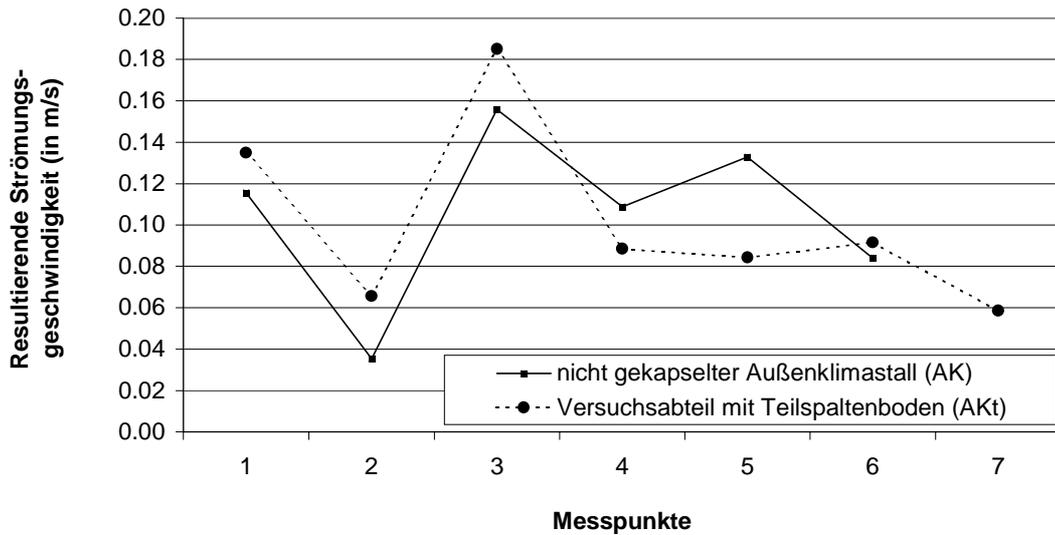


Abbildung 35: Resultierende Strömungsgeschwindigkeit (in m/s) in den beiden Untersuchungsabteilen AKt und AK am 10.6.01 zwischen 8:29 Uhr und 13:36 Uhr, bei durchschnittlich 19,4 °C Außentemperatur

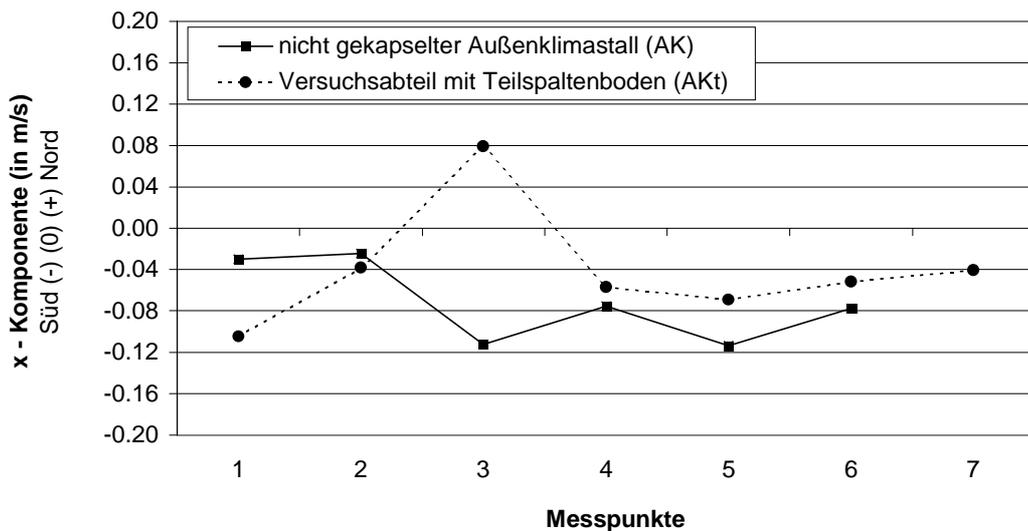


Abbildung 36: Geschwindigkeit der x-Komponente (in m/s) in den beiden Untersuchungsabteilen AKt und Außenklimastall am 10.6.01 zwischen 8:29 Uhr und 13:36 Uhr, bei durchschnittlich 19,4 °C Außentemperatur

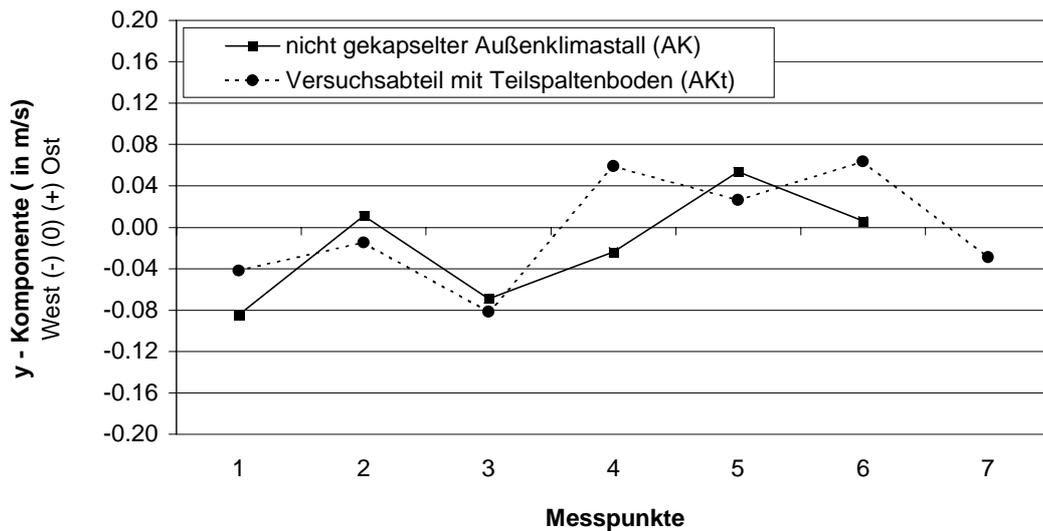


Abbildung 37: Geschwindigkeit der y-Komponente (in m/s) in den beiden Untersuchungsabteilen AKt und Außenklimastall am 10.6.01 zwischen 8:29 Uhr und 13:36 Uhr, bei durchschnittlich 19,4 °C Außentemperatur

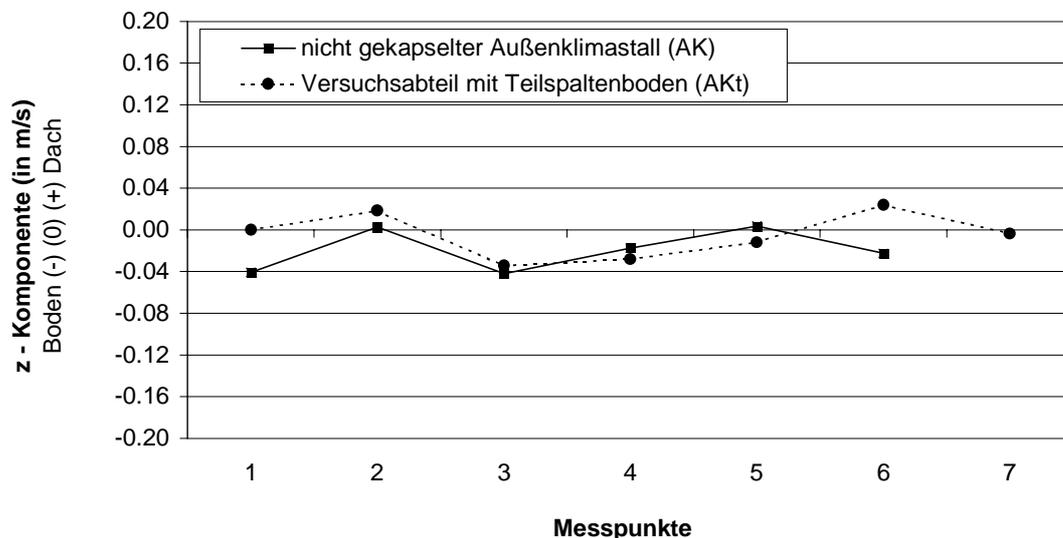


Abbildung 38: Geschwindigkeit der z-Komponente (in m/s) in den beiden Untersuchungsabteilen AKt und Außenklimastall am 10.6.01 zwischen 8:29 Uhr und 13:36 Uhr, bei durchschnittlich 19,4 °C Außentemperatur

Zu erkennen ist aus Abbildung 35 bis Abbildung 38, dass die gemessenen Strömungsgeschwindigkeiten gut übereinstimmen, lediglich ein „Ausreißer“ an Messpunkt 3 bei der Geschwindigkeit in x-Richtung, bei der der Messwert im Versuchsabteil AKt genau entgegengesetzt gerichtet ist, ist zu verzeichnen.

Die Abweichungen der beiden untersuchten Abteile voneinander sind nicht gerichtet, d. h. dass in beiden Abteilen einmal höhere, einmal niedrigere Strömungsgeschwindigkeiten gemessen werden. Außerdem sind die Differenzen der Minimal- und Maximalwerte an *einem* Messpunkt um Beträge von bis zu 0,31 m/s groß. Diese hohe Variabilität der Werte

an einem Messpunkt (in *einem* Versuchsabteil) spiegelt sich auch in der hohen Standardabweichung der Mittelwerte je Messpunkt wieder (vgl. HORNAUER UND HAIDN, 2001), die Werte bis zu 0,12 m/s erreicht. Der Vergleich der Strömungsgeschwindigkeiten an einem Messpunkt in beiden Versuchsabteilen kommt zu max. absoluten Abweichungen analoger Messwerte von 0,26 m/s und liegt somit in der selben Größenordnung wie oben.

Die bei den oben durchgeführten Messungen ermittelte Strömungsgeschwindigkeiten liegen in einem Bereich, den auch HARTUNG (1995) bei seinen Untersuchungen zur NH₃-Freisetzung bei unterschiedlich hohen Überströmungsgeschwindigkeiten (0,04 – 0,22 m/s) abgedeckt hat. In diesem Geschwindigkeitsbereich hat HARTUNG (1995) einen linearen positiven Zusammenhang der NH₃-Freisetzung aus der flüssigen Phase von separiertem Flüssigmist (Regressionsgerade: $y=0,115+0,452*x$; $R^2=0,65$; $n=6$) in Abhängigkeit der Überströmungsgeschwindigkeit ermittelt (Abbildung 39).

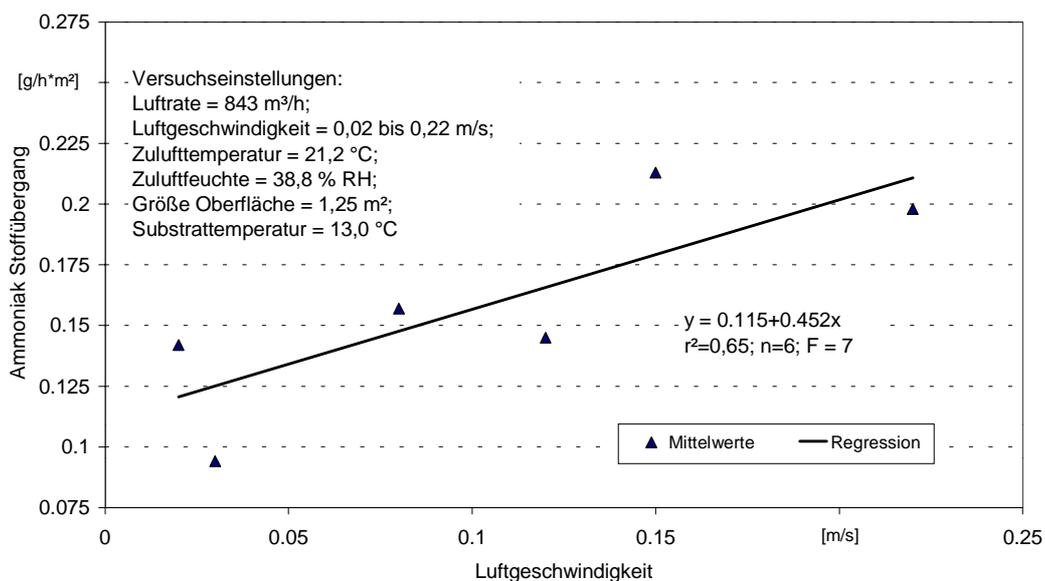


Abbildung 39: Einfluss der Luftgeschwindigkeit auf den durchschnittlichen Stoffübergang von Ammoniak aus der flüssigen Phase von separiertem Flüssigmist (HARTUNG, 1995)

Somit ergibt eine Erhöhung der Überströmungsgeschwindigkeit um 0,05 m/s auf 0,1 m/s eine Erhöhung der NH₃-Freisetzung von 0,02 g/h*m². Zum Vergleich ergibt nach HARTUNG (1995) die Erhöhung der Kontaktfläche von 0,5 m² auf 1 m² eine Erhöhung der NH₃-Freisetzung aus der flüssigen Phase von separiertem Flüssigmist von ca. 0,1 g/h.

Die oben dargestellten Mittelwerte der Strömungsmessungen (HORNAUER UND HAIDN, 2001) liegen in einem Bereich von maximal 0,08 m/s absoluter Abweichung. Wegen der Wechselseitigkeit der Abweichungen (Über- und Unterschreitung der Strömungsge-

schwindigkeit im nicht gekapselten Außenklimastall) wird dies jedoch relativiert, ebenso durch die hohe Variabilität der gemessenen Strömungsgeschwindigkeiten an einer Messstelle (vgl. Standardabweichung bei HORNAUER UND HAIDN, 2001).

Bezüglich des Einflusses auf die Ammoniak-Freisetzung wird der Effekt der Strömungsgeschwindigkeit in der Praxis durch andere Einflussparameter, die mehr Gewicht haben (z. B: Kontaktoberfläche, siehe HARTUNG, 1995), überkompensiert.

Ein weiterer, bei dieser Diskussion nicht zu vernachlässigender Aspekt ist, dass die Strömungsgeschwindigkeit abnimmt, je näher man der Bodenoberfläche kommt, und sich dort die Strömungsgeschwindigkeiten stärker angleichen; in 90 cm über dem Boden sind größere Unterschiede messbar, als dies über der emissionsaktiven Oberfläche der Fall ist.

Aus Gründen der Durchführbarkeit der Strömungsmessungen mit dem Ultraschallanemometer konnten die Messungen nur *ohne Tierbelegung* in den Buchten durchgeführt werden, was in der Realität wegen der Tieraktivität und der daraus resultierenden Luftbewegung wiederum einen vereinheitlichenden Einfluss auf die Strömungsverhältnisse haben wird.

Fazit: Die Volumenstrombestimmung im Warmstall wird mit in den Abluftkamin eingebauten Messventilatoren nach dem derzeitigen Stand des Wissens exakt bestimmt. Diese Methode kann ebenso nach der Kapselung und Zwangsentlüftung der Außenklima-Versuchsabteile angewandt werden. Hier konnten beim Vergleich der stallklimatischen Kenngrößen (Temperatur, relative Luftfeuchte und Strömungsgeschwindigkeit) keine Abweichungen zwischen dem gekapselten Versuchsabteil AKt und dem übrigen Außenklimastall festgestellt werden. Mit diesem methodischen Equipment können Emissionsraten klima- und umweltrelevanter Gase in einer Dauermessung über drei Mastdurchgänge aus zwei Außenklima-Versuchsabteilen und einem Warmstall-Versuchsabteil gemessen und miteinander verglichen werden.

6 Emissionsraten der untersuchten Haltungssysteme

In diesem Kapitel erfolgt die Darstellung der Ergebnisse der Emissionsratenmessung und der Quantifizierung der Einflussfaktoren auf die Emissionen.

6.1 Emissionsraten aus den untersuchten Mastdurchgängen

Die Emissionsrate ergibt sich als Produkt von Gaskonzentrationsdifferenz zwischen Ab- und Zuluft und dem Abluftvolumenstrom. Um die Vergleichbarkeit der Emissionsraten untereinander und zu den in der Literatur vorhandenen Werten zu erreichen, werden die Emissionsraten in g/h auf die Lebendmasse (LM) von 500 kg standardisiert. Die Stall- und Außentemperaturen werden zur Quantifizierung der Einflüsse auf die Emissionsraten gemessen.

In den folgenden Abschnitten werden die Gesamttiergewichte je Versuchsabteil, die Tagesmittelwerte der Temperaturen an der Wetterstation und in der Abluft der drei Versuchsabteile (Außenklima-Versuchsabteil mit Teilspaltenboden und mit Einstreu und Warmstall mit Teilspaltenboden), die Konzentrationsdifferenzen zwischen der Ab- und Zuluft der Versuchsabteile und die Abluftvolumenströme aus den Versuchsabteilen graphisch dargestellt, um die darauf folgenden Emissionsraten der verschiedenen Gase und deren Diskussion auch hinsichtlich der emissionsbeeinflussenden Parameter beurteilen zu können.

6.1.1 Tiergewichte

Zur Standardisierung der Emissionsraten auf die Lebendmasse (LM) (üblicherweise 500 kg LM) ist es erforderlich, die Tiergewichte über den gesamten Mastdurchgang zu erfassen. Die Mastschweine in den Versuchsabteilen werden beim Einstellen gewogen. Anschließend erfolgt die Wiegen die ersten 4 Mastwochen wöchentlich, danach alle zwei Wochen. Um die gewogenen Tiergewichte auf täglich bzw. stündlich aktuelle Tiergewichte zu schätzen, wird durch die bis zum Tag des ersten Ausstallens (ca. 90.Tag) erfassten Tiergewichte eine Ausgleichsgerade gelegt. Eine solche Ausgleichsgerade ist am Beispiel des Außenklima-Versuchsabteils mit Einstreu (AKe) während des Mastdurchgang 5 (Sommer) dargestellt (Abbildung 40). Die übrigen Ausgleichsgeraden sind für die jeweiligen Versuchsabteile und Mastdurchgänge in Tabelle 23 dargestellt.

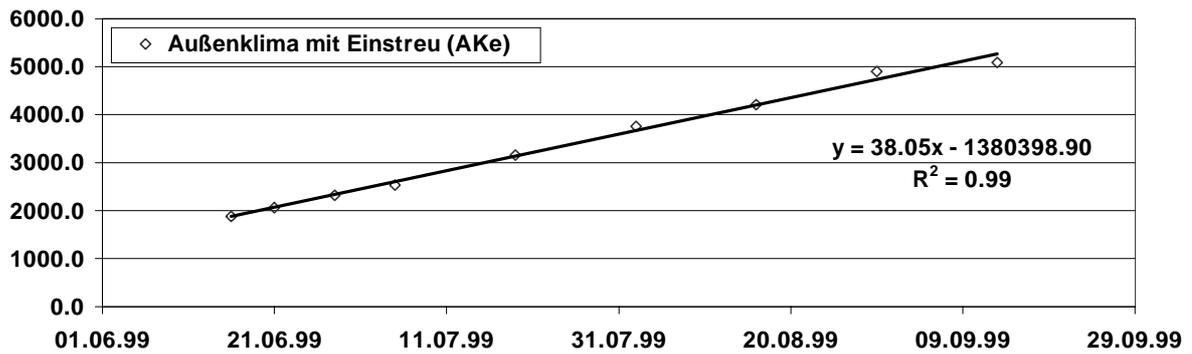


Abbildung 40: Gewogene Gesamttiergewichte mit Ausgleichsgerade im Außenklima-Versuchsabteil mit Einstreu während Mastdurchgang 5 bis zum ersten Ausstallen

Tabelle 23: Ausgleichsgeraden der Tiergewichte je Versuchsabteil der drei Mastdurchgänge

Mastdurchgang	Versuchsabteil	Ausgleichsgerade bis zum ersten Ausstallen	R ²	Ausgleichsgerade vom ersten Ausstallen bis Mastende
4	AK mit TSP	$y = 43.70x - 1579402.83$	0.99	$y = 26.015x - 938157$
	AK mit Einstreu	$y = 46.81x - 1692040.20$	0.99	$y = 20.721x - 745837$
	Warmstall mit TSP	$y = 31.60x - 1141944.55$	0.99	$y = 22.48x - 811071$
		(30.1.99 = 36190)		
5	AK mit TSP	$y = 36.79x - 1334575.66$	0.99	$y = 38.02x - 1379290.65$
	AK mit Einstreu	$y = 38.05x - 1380398.90$	0.99	$y = 40.80x - 1480994.89$
	Warmstall mit TSP	$y = 35.97x - 1305155.13$	0.99	$y = 16.93x - 612058.00$
		(16.6.99 = 36327)		
6	AK mit TSP	$y = 43.74x - 1593791.14$	0.99	$y = 43.74x - 1593791.14$
	AK mit Einstreu	$y = 43.86x - 1597947.30$	0.99	$y = 43.86x - 1597947.30$
	Warmstall mit TSP	$y = 34.03x - 1239889.25$	0.99	$y = 34.03x - 1239889.25$
		(16.11.99 = 36475)		

Mit den Gleichungen aus Tabelle 23 ist es möglich, für jeden Zeitpunkt der Mastdurchgänge für die jeweiligen Versuchsabteile die aktuellen Tiergewichte zu berechnen.

Ab dem ersten Ausstallen werden nur die jeweils ausgestallten Tiere gewogen und es wird das Gesamttiergewicht je Versuchsabteil der ausgestallten Tiere gebildet. Dieses Gesamttiergewicht am Mastende wird mit dem Gesamttiergewicht am Tag des ersten Ausstallens zu einer für diesen Zeitraum gültigen Ausgleichsgerade verbunden, von der jeweils die Gewichte der ausgestallten Tiere zu den jeweiligen Zeitpunkten subtrahiert werden. Auch diese zweite Ausgleichsgerade ist in Tabelle 23 dargestellt. In die Formeln $y = mx + b$ wird als x -Wert das jeweilige Datum eingesetzt - in MS-Excel wird dieses Datum als Zahl verrechnet, wobei die Zahl „1“ dem 1.1.1900 entspricht. Die dem Datum entsprechenden Zahlenwerte für die jeweiligen Mastdurchgänge sind ebenfalls in der Tabelle enthalten.

6.1.2 Temperaturen

In den folgenden Abbildungen (Abbildung 41, Abbildung 42, Abbildung 43) sind die Verläufe der Tagesmittelwerte Außentemperaturen an der Wetterstation und der Temperaturen in der Abluft der drei Versuchsabteile während der drei Mastdurchgänge (4, 5 und 6) dargestellt.

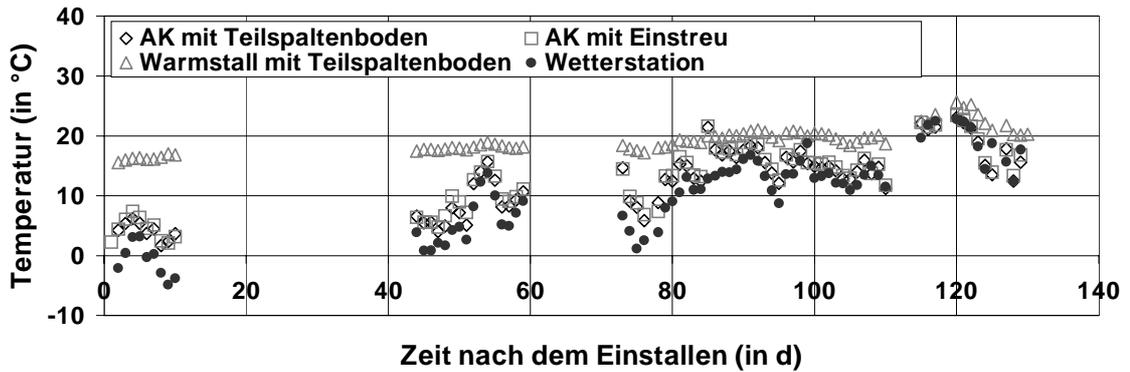


Abbildung 41: Außen- und Ablufttemperaturen während des Mastdurchgangs 4 vom 1.2.99 - 10.6.99 in den drei untersuchten Haltungssystemen

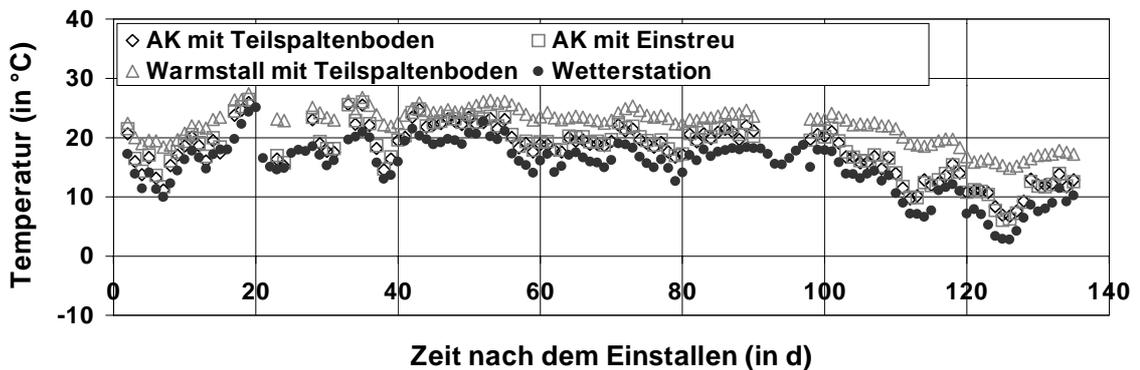


Abbildung 42: Außen- und Ablufttemperaturen während des Mastdurchgangs 5 vom 16.6.99 - 30.10.99 in den drei untersuchten Haltungssystemen

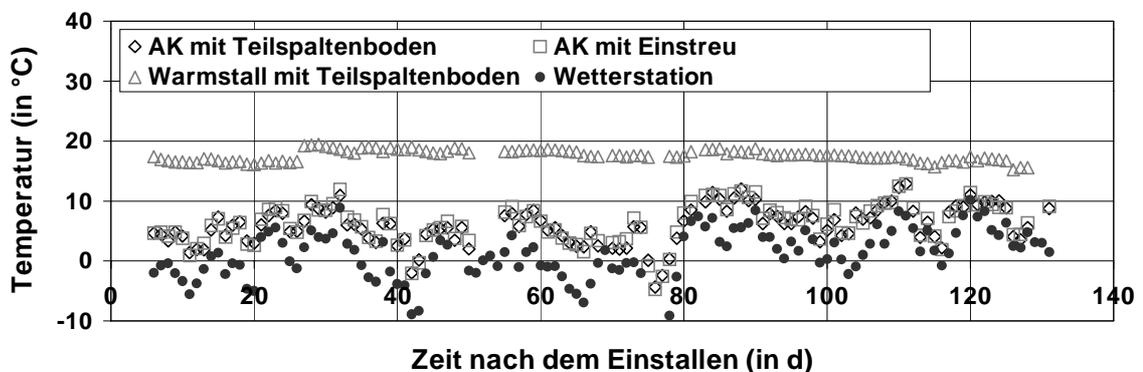


Abbildung 43: Außen- und Ablufttemperaturen während des Mastdurchgangs 6 vom 11.11.99 - 20.3.00 in den drei untersuchten Haltungssystemen

Zu erkennen ist aus Abbildung 41 bis Abbildung 43, dass die Tagesdurchschnittstemperatur in der Abluft im Warmstall mit Teilspaltenboden während aller Mastdurchgänge über der Außenklima-Versuchsabteile liegt. Dieser Unterschied ist während des Mastdurchgangs 6 (Winter) besonders groß, die mittlere Tagesdurchschnittstemperatur beträgt hier im Warmstall mit Teilspaltenboden 17,6 °C, in den Außenklima-Versuchsabteilen mit Teilspalten bzw. mit Einstreu 6,7 bzw. 6,1 °C.

Während des Frühjahrs ist der Unterschied bereits etwas geringer, hier betragen die Temperaturen im Warmstall mit Teilspaltenboden 19,3 °C, in den Außenklima-Versuchsabteilen 12,6 bzw. 13,0 °C. Während des Sommers liegen die Temperaturen im Warmstall mit 21,9 °C nur knapp über denen der Außenklima-Versuchsabteile mit 17,7 bzw. 18,0 °C.

Die durchschnittlichen Außentemperaturen, die an der Wetterstation auf dem Versuchsbetrieb gemessen wurden, liegen immer unter den Temperaturen aus den Außenklima-Versuchsabteilen, ähneln diesen jedoch stark in ihrem Verlauf, was sich auch im hohen Korrelationskoeffizienten $r = 0,97$ zwischen Außentemperatur und den Temperaturen in den Versuchabteilen AKt und AKe ausdrückt. Die minimalen Tagesmittelwerte der Ablufttemperaturen wurden während Mastdurchgang 6 (Winter) im Außenklima-Versuchsabteil mit Einstreu mit -4,7 °C gemessen, die maximalen während Mastdurchgang 5 (Sommer) im Warmstall mit Teilspaltenboden (Tabelle 24).

Tabelle 24: Mittelwerte, Minimal- und Maximalwerte der Tagesmittelwerte der Außen- und Ablufttemperaturen während der drei untersuchten Mastdurchgänge

Mast-durch-gang		Außen-temperatur	AK mit Teilspal-tenboden	AK mit Einstreu	Warmstall mit Teilspaltenboden
			Ablufttemperatur		
4	Mittelwert (in °C)	10.1	12.6	13.0	19.3
	Min (in °C)	-4.9	1.7	2.1	15.5
	Max (in °C)	22.8	23.1	23.4	25.7
	n	74.0	74.0	75.0	75.0
5	Mittelwert (in °C)	15.2	17.7	18.0	21.9
	Min (in °C)	2.8	6.7	6.1	14.8
	Max (in °C)	25.1	25.9	26.4	27.4
	n	118.0	119.0	119.0	119.0
6	Mittelwert (in °C)	1.0	6.0	6.3	17.6
	Min (in °C)	-16.6	-4.4	-4.7	15.2
	Max (in °C)	10.3	12.9	12.9	19.4
	n	124.0	118.0	118.0	115.0

6.1.3 Gaskonzentrationen

Die in der Zu- und Abluft der drei Versuchsabteile gemessenen Konzentrationen von NH_3 , CH_4 , N_2O , CO_2 , und H_2O werden als Tagesmittelwerte der Differenz zwischen Ab- und Zuluftkonzentration als zeitlicher Verlauf während der Mastdurchgänge dargestellt.

6.1.3.1 Ammoniak

In den folgenden Abbildungen (Abbildung 44, Abbildung 45, Abbildung 46) sind die Verläufe der Tagesmittelwerte der NH_3 -Konzentrationsdifferenzen zwischen Ab- und Zuluftkonzentration während der drei Mastdurchgänge (4, 5 und 6) dargestellt.

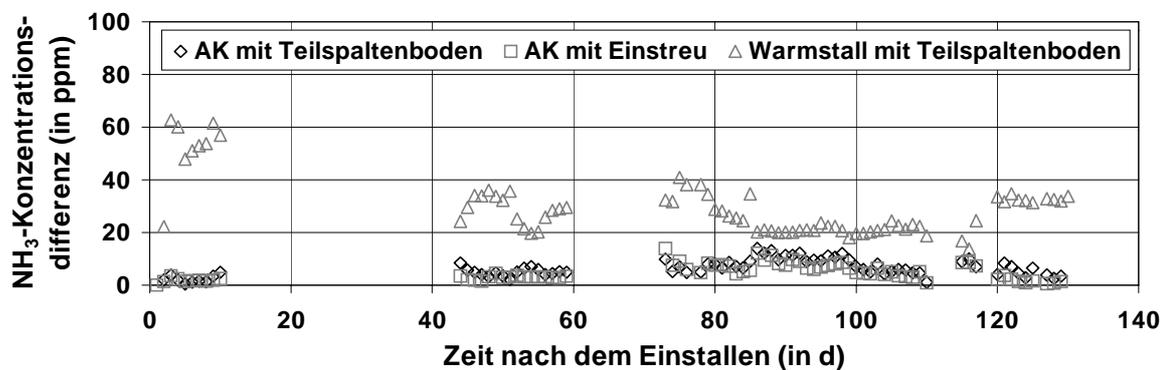


Abbildung 44: NH_3 -Konzentrationsdifferenzen zwischen Ab- und Zuluftkonzentration während des Mastdurchgangs 4 vom 1.2.99 - 10.6.99 in den drei untersuchten Haltungssystemen

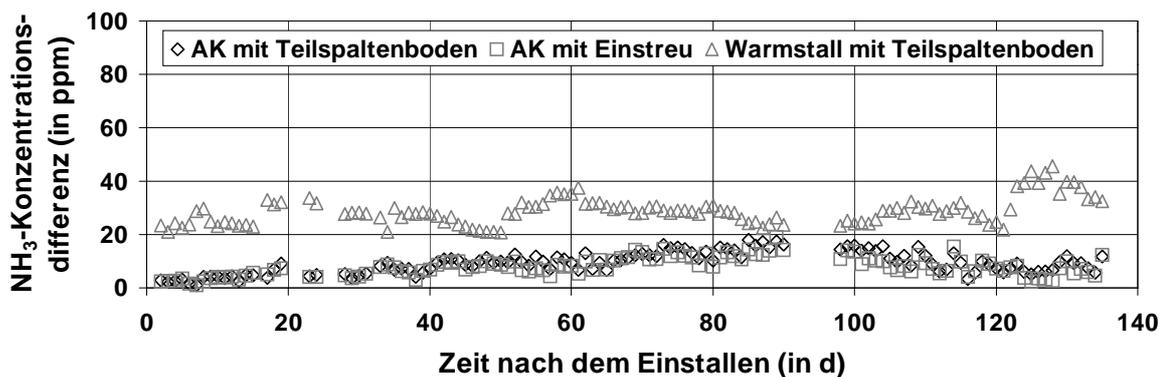


Abbildung 45: NH_3 -Konzentrationsdifferenzen zwischen Ab- und Zuluftkonzentration während des Mastdurchgangs 5 vom 16.6.99 - 30.10.99 in den drei untersuchten Haltungssystemen

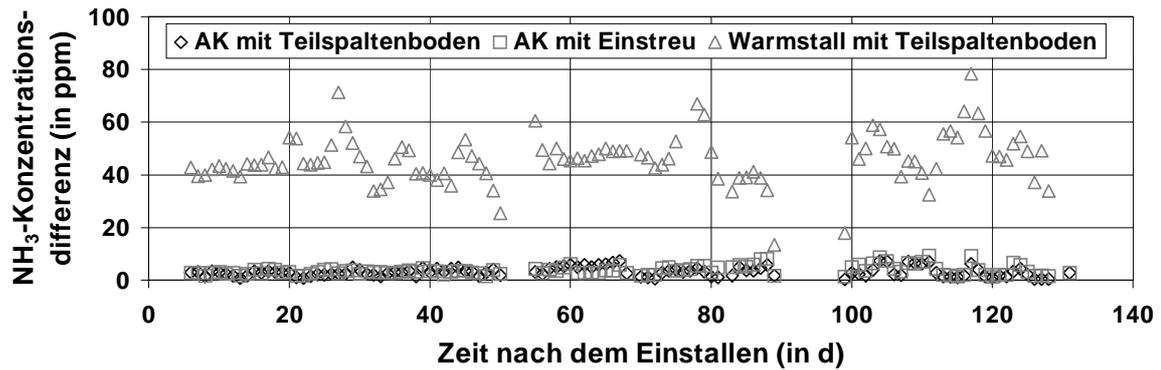


Abbildung 46: NH₃-Konzentrationsdifferenzen zwischen Ab- und Zuluftkonzentration während des Mastdurchgangs 6 vom 11.11.99 - 20.3.00 in den drei untersuchten Haltungssystemen

Aus den Abbildungen ist zu erkennen, dass sich die NH₃-Konzentrationsniveaus in der Abluft während der drei Mastdurchgänge unterscheiden. Die NH₃-Konzentrationsdifferenzen während des Mastdurchgangs 6 (Winter) sind in den beiden Außenklima-Versuchsabteilen (AK mit Teilspaltenboden und AK mit Einstreu) mit im Mittel 3,2 und 3,7 ppm (Tabelle 25) am niedrigsten, während des Mastdurchgangs 4 (Frühjahr) mit 6,3 ppm bzw. 4,8 ppm immer noch niedriger als während des Mastdurchgangs 5 (Sommer) mit Mittelwerten von 9,2 bzw. 8,0 ppm.

Im Warmstall mit Teilspaltenboden liegt das mittlere NH₃-Konzentrationsniveau in der Abluft immer über dem der Außenklima-Versuchsabteile. Im Gegensatz zu den Außenklima-Versuchsabteilen sind in diesem Stall die Konzentrationen während des Mastdurchgangs 4 und 5 (29,6 bzw. 28,8 ppm) ungefähr gleich hoch und nur fast halb so hoch wie während des Mastdurchgangs 6 (Winter) mit durchschnittlich 46,0 ppm. Auffällig ist, dass die Spannweite der Min-Max-Werte während des Mastdurchgangs 4 größer ist als während des Mastdurchgangs 5 (Sommer). Abbildung 44 bis Abbildung 46 zeigen, dass die NH₃-Konzentrationsdifferenzen in den Außenklima-Versuchsabteilen während der einzelnen Mastdurchgänge tendenziell zunehmen. Dieser Effekt ist im Warmstall mit Teilspaltenboden nicht festzustellen.

Die Mittelwerte, die Minimal- und Maximalwerte der NH₃-Konzentrationsdifferenzen sowie die Anzahl der Tagesmittelwerte der jeweiligen Mastdurchgänge sind zusammenfassend in Tabelle 25 dargestellt.

Tabelle 25: Mittelwerte, Minimal- und Maximalwerte der Tagesmittelwerte der NH₃-Konzentrationsdifferenzen während der drei untersuchten Mastdurchgänge

Mast-durch-gang		AK mit Teilspalten-	AK mit Einstreu	Warmstall mit Teil-
		boden		spaltenboden
		NH ₃ -Konzentrationsdifferenzen		
4	Mittelwert (in ppm)	6.3	4.8	29.6
	Min (in ppm)	0.5	0.0	13.8
	Max (in ppm)	13.9	13.9	62.7
	n	74.0	75.0	75.0
5	Mittelwert (in ppm)	9.2	8.0	28.8
	Min (in ppm)	1.0	1.0	20.7
	Max (in ppm)	18.0	19.0	45.6
	n	119.0	119.0	119.0
6	Mittelwert (in ppm)	3.2	3.7	46.0
	Min (in ppm)	0.3	1.2	13.4
	Max (in ppm)	7.3	9.3	78.3
	n	109.0	109.0	106.0

Für das geringere NH₃-Konzentrationsniveau in den Außenklima-Versuchsabteilen gibt es verschiedene Gründe: zum einem sorgt der in diesen beiden Versuchsabteilen höhere Abluftvolumenstrom für eine größere Verdünnung der Konzentration, zum anderen sorgt das in diesen Versuchsabteilen geringere Temperaturniveau für eine geringere Entstehung und Freisetzung von NH₃ aus den Exkrementen. Im Warmstall mit Teilspaltenboden sind die NH₃-Konzentrationen im Frühjahr und Sommer wegen der größeren Verdünnung durch die höheren Abluftvolumenströme niedriger als im Winter (Mastdurchgang 6).

6.1.3.2 Methan

In den folgenden Abbildungen (Abbildung 47, Abbildung 48, Abbildung 49) sind die Verläufe der Tagesmittelwerte der CH₄-Konzentrationsdifferenzen zwischen Ab- und Zuluftkonzentration während der drei Mastdurchgänge (4, 5 und 6) dargestellt.

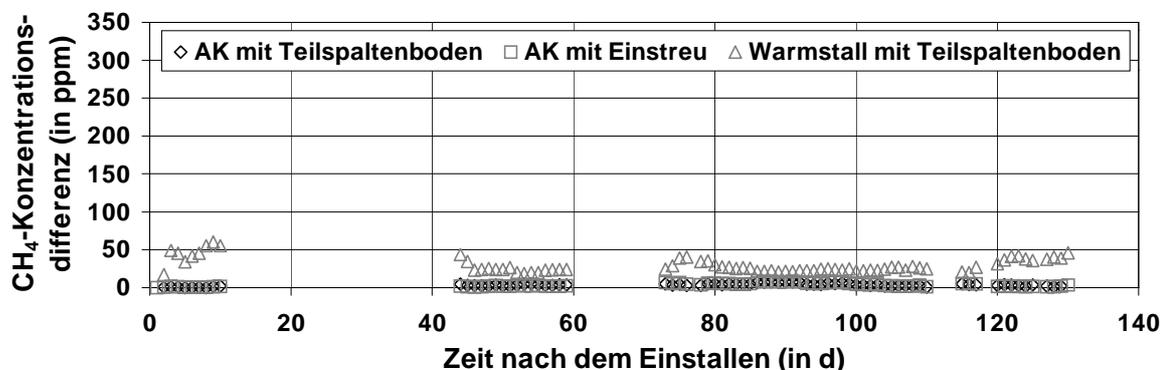


Abbildung 47: CH₄-Konzentrationsdifferenzen zwischen Ab- und Zuluftkonzentration während des Mastdurchgangs 4 vom 1.2.99 - 10.6.99 in den drei untersuchten Haltungssystemen

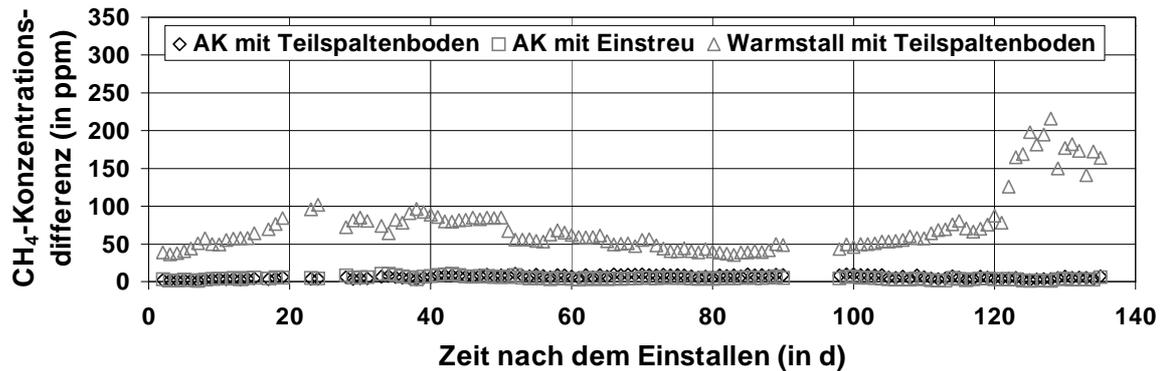


Abbildung 48: CH₄-Konzentrationsdifferenzen zwischen Ab- und Zuluftkonzentration während des Mastdurchgangs 5 vom 16.6.99 - 30.10.99 in den drei untersuchten Haltungssystemen

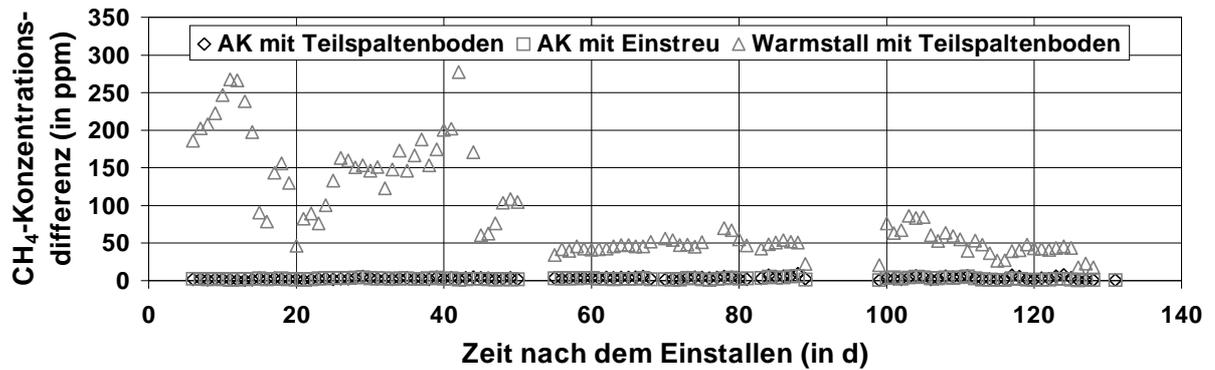


Abbildung 49: CH₄-Konzentrationsdifferenzen zwischen Ab- und Zuluftkonzentration während des Mastdurchgangs 6 vom 11.11.99 - 20.3.00 in den drei untersuchten Haltungssystemen

Die CH₄-Konzentrationsniveaus aus dem Warmstall mit Teilspaltenboden unterscheiden sich während der drei Mastdurchgänge (Abbildung 47 bis Abbildung 49) deutlich. Während des Mastdurchgangs 4 (Frühjahr) sind die CH₄-Konzentrationsdifferenzen mit 29,4 ppm im Mittel am geringsten, im Sommer (Mastdurchgang 5) ist das Niveau mit 74,1 ppm höher und im Winter (Mastdurchgang 6) werden sehr hohe CH₄-Konzentrationen und daraus resultierend mit 94,1 ppm sehr hohe CH₄-Konzentrationsdifferenzen in der Abluft erreicht. In den Außenklima-Versuchsabteilungen sind die CH₄-Konzentrationsdifferenzen nur im Sommer mit 6,1 ppm im Außenklima-Versuchsabteilung mit Teilspalten und mit 4,7 ppm im Außenklima-Versuchsabteilung mit Einstreu etwas höher als während des Frühjahrs- und des Winter-Mastdurchgangs. Tendenziell sind die CH₄-Konzentrationsdifferenzen im Außenklima-Versuchsabteilung mit Einstreu immer etwas niedriger als im Außenkli-

ma-Versuchsabteil mit Einstreu. Die CH₄-Konzentrationsdifferenzen nehmen im Verlauf der einzelnen Mastdurchgänge in den Außenklima-Versuchsabteilen zu.

Die Mittelwerte, die Minimal- und Maximalwerte der CH₄-Konzentrationsdifferenzen sowie die Anzahl der Tagesmittelwerte der jeweiligen Mastdurchgänge sind zusammenfassend in Tabelle 26 dargestellt.

Tabelle 26: Mittelwerte, Minimal- und Maximalwerte der Tagesmittelwerte der CH₄-Konzentrationsdifferenzen während der drei untersuchten Mastdurchgänge

Mast-durch-gang		AK mit Teilspalten-	AK mit Einstreu	Warmstall mit Teil-
		boden		spaltenboden
		CH ₄ -Konzentrationsdifferenzen		
4	Mittelwert (in ppm)	3,6	3,6	29,4
	Min (in ppm)	0,1	0,1	17,2
	Max (in ppm)	7,7	9,0	60,2
	n	74,0	75,0	75,0
5	Mittelwert (in ppm)	6,1	4,7	74,1
	Min (in ppm)	1,0	1,0	35,3
	Max (in ppm)	10,6	10,5	216,0
	n	119,0	119,0	119,0
6	Mittelwert (in ppm)	3,4	2,9	94,1
	Min (in ppm)	0,5	0,8	18,0
	Max (in ppm)	9,0	6,6	308,4
	n	109,0	109,0	106,0

6.1.3.3 Lachgas

In den folgenden Abbildungen (Abbildung 50, Abbildung 51, Abbildung 52) sind die Verläufe der Tagesmittelwerte der N₂O-Konzentrationsdifferenzen zwischen Ab- und Zuluftkonzentration während der drei Mastdurchgänge (4, 5 und 6) dargestellt.

Wie aus diesen Abbildungen und aus Tabelle 27 ersichtlich ist, treten in den Außenklima-Versuchsabteilen außer während des Mastdurchgangs 5 (Sommer) im Außenklima-Versuchsabteil mit Einstreu negative N₂O-Konzentrationsdifferenzen auf. Der Grund dafür ist wie in Abschnitt 5.1.4.2 darstellt, dass die Messungenauigkeit des Multigasmonitor B&K 1302 für N₂O 0,13 ppm beträgt und somit die hier sehr geringen N₂O-Konzentrationen sowohl in der Zu- als auch in der Abluft nicht sicher gemessen werden können und daher auch negative Konzentrationsdifferenzen errechnet werden. Im Warmstall mit Teilspaltenboden werden außer während des Mastdurchgangs 4 immer positive N₂O-Konzentrationsdifferenzen gemessen, im Sommer 0,128 ppm und im Winter 0,300 ppm. Die mittleren N₂O-Konzentrationsdifferenzen der übrigen Haltungssysteme

und Mastdurchgänge sind sehr gering und wegen der negativen minimalen Konzentrationsdifferenzen nicht gesichert.

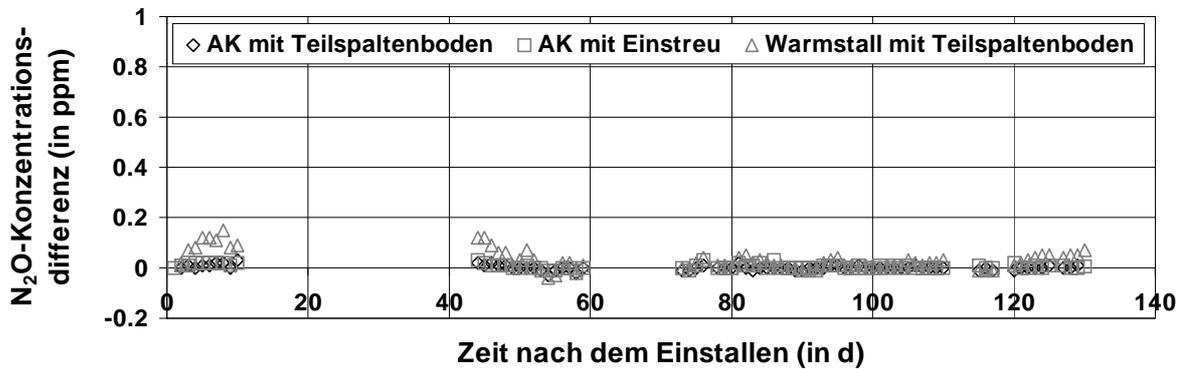


Abbildung 50: N₂O-Konzentrationsdifferenzen zwischen Ab- und Zuluftkonzentration während des Mastdurchgangs 4 vom 1.2.99 - 10.6.99 in den drei untersuchten Haltungssystemen

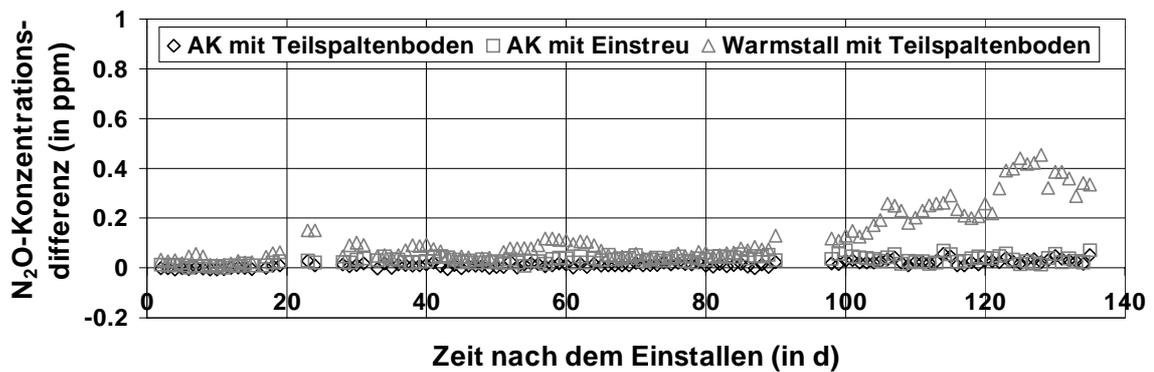


Abbildung 51: N₂O-Konzentrationsdifferenzen zwischen Ab- und Zuluftkonzentration während des Mastdurchgangs 5 vom 16.6.99 - 30.10.99 in den drei untersuchten Haltungssystemen

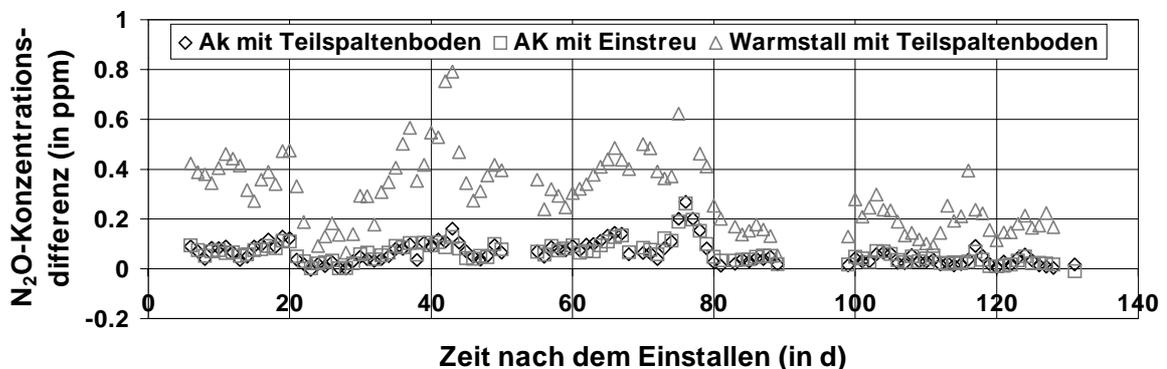


Abbildung 52: N₂O-Konzentrationsdifferenzen zwischen Ab- und Zuluftkonzentration während des Mastdurchgangs 6 vom 11.11.99 - 20.3.00 in den drei untersuchten Haltungssystemen

Während des Mastdurchgangs 6 (Winter) sind die N₂O-Konzentrationsdifferenzen im Warmstall am höchsten, in den Außenklima-Versuchsabteilen fast immer positiv.

Die Mittelwerte, die Minimal- und Maximalwerte der N₂O-Konzentrationsdifferenzen sowie die Anzahl der Tagesmittelwerte der jeweiligen Mastdurchgänge sind zusammenfassend in Tabelle 27 dargestellt.

Tabelle 27: Mittelwerte, Minimal- und Maximalwerte der Tagesmittelwerte der CH₄-Konzentrationsdifferenzen während der drei untersuchten Mastdurchgänge

Mast-durchgang		AK mit Teilspalten-	AK mit Einstreu	Warmstall mit Teil-
		boden		spaltenboden
N ₂ O-Konzentrationsdifferenzen				
4	Mittelwert (in ppm)	0.001	0.006	0.030
	Min (in ppm)	-0.030	-0.010	-0.040
	Max (in ppm)	0.030	0.030	0.150
	n	74	75	75
5	Mittelwert (in ppm)	0.015	0.032	0.128
	Min (in ppm)	-0.007	0.002	0.012
	Max (in ppm)	0.056	0.072	0.453
	n	119	119	119
6	Mittelwert (in ppm)	0.062	0.063	0.300
	Min (in ppm)	-0.005	-0.009	0.021
	Max (in ppm)	0.268	0.262	0.792
	n	109	109	106

Zur weiteren Berechnung der Emissionsraten von N₂O ist es nur sinnvoll, die Zeiträume heranzuziehen, in den ausschließlich positive N₂O-Konzentrationsdifferenzen zwischen Ab- und Zuluft errechnet wurden. Diese Zeiträume und Versuchsabteile sind in Tabelle 27 grau hinterlegt.

6.1.3.4 Kohlendioxid

In den folgenden Abbildungen (Abbildung 53, Abbildung 54, Abbildung 55) sind die Verläufe der Tagesmittelwerte der CO₂-Konzentrationsdifferenzen zwischen Ab- und Zuluftkonzentration während der drei Mastdurchgänge (4, 5 und 6) dargestellt.

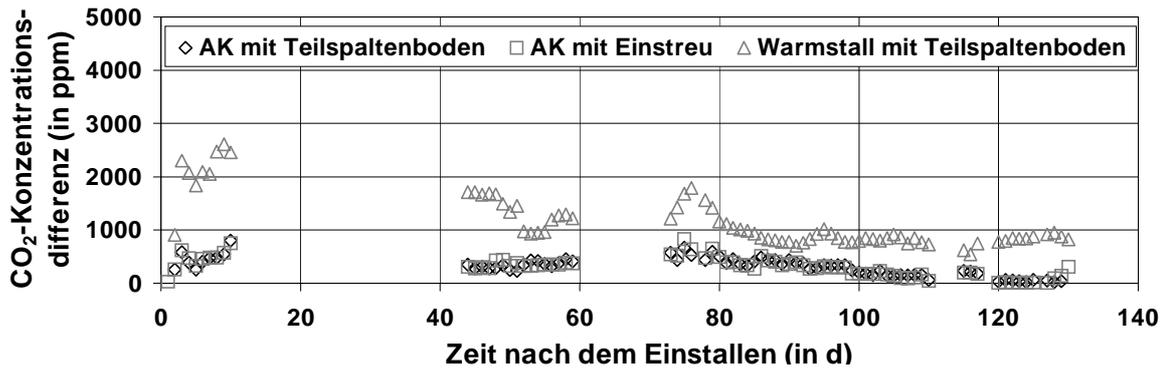


Abbildung 53: CO₂-Konzentrationsdifferenzen zwischen Ab- und Zuluftkonzentration während des Mastdurchgangs 4 vom 1.2.99 - 10.6.99 in den drei untersuchten Haltungssystemen

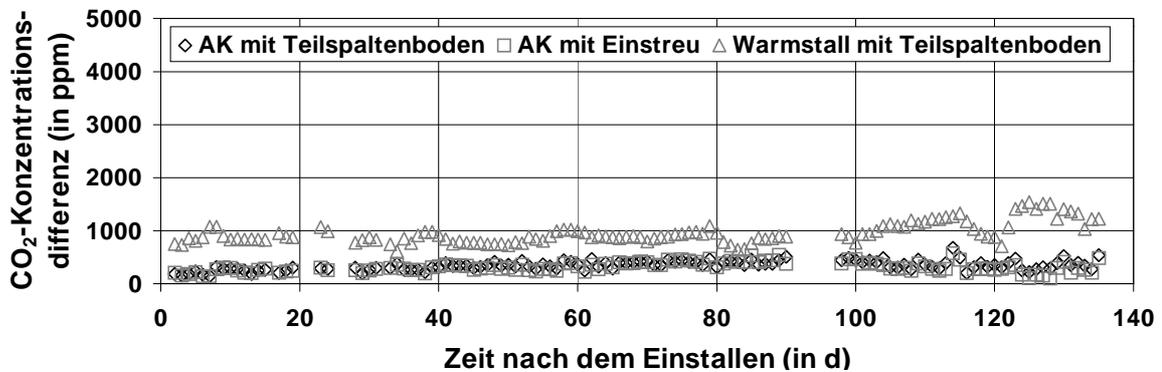


Abbildung 54: CO₂-Konzentrationsdifferenzen zwischen Ab- und Zuluftkonzentration während des Mastdurchgangs 5 vom 16.6.99 - 30.10.99 in den drei untersuchten Haltungssystemen

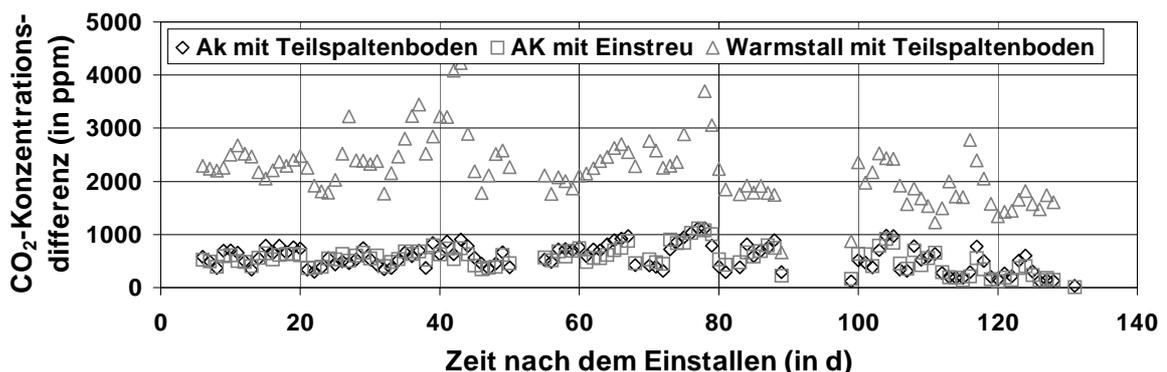


Abbildung 55: CO₂-Konzentrationsdifferenzen zwischen Ab- und Zuluftkonzentration während des Mastdurchgangs 6 vom 11.11.99 - 20.3.00 in den drei untersuchten Haltungssystemen

In Abbildung 53 bis Abbildung 55 fällt auf, dass die CO₂-Konzentrationsdifferenzen aus den beiden Außenklima-Versuchsabteilungen während der drei Mastdurchgänge durchgängig niedriger als die aus dem Warmstall mit Teilspaltenboden liegen. In den Außenklima-

Versuchsabteilen mit Teilspaltenboden und mit Einstreu sind die mittleren CO₂-Konzentrationsdifferenzen während des Mastdurchgangs 4 (Frühjahr) mit 313 ppm bzw. 309 ppm fast genauso hoch wie während des 5. Mastdurchgangs (Sommer) mit 345 ppm bzw. 315 ppm CO₂-Konzentrationsdifferenz. Während des Winter-Mastdurchgangs (Mastdurchgang 6) sind die CO₂-Konzentrationsdifferenzen aus den Außenklima-Versuchsabteilen mit Teilspaltenboden und mit Einstreu mit 555 ppm bzw. 535 ppm höher als während der beiden vorherigen Mastdurchgänge.

Die CO₂-Konzentrationsdifferenzen im Warmstall mit Teilspaltenboden sind während des Mastdurchgangs 5 (Sommer) mit 957 ppm etwas niedriger als während des Mastdurchgangs 4 (Frühjahr) mit 1156 ppm und damit drei- bis viermal höher als die CO₂-Konzentrationsdifferenzen in den Außenklima-Versuchsabteilen. Während des Mastdurchgangs 6 (Winter) liegen die CO₂-Konzentrationsdifferenzen mit 2223 ppm am höchsten und um den Faktor 4 höher als die der beiden Außenklima-Versuchsabteile. Ein Grund für die im Winter in allen drei Versuchsabteilen höheren CO₂-Konzentrationsdifferenzen ist die zu dieser Zeit durch die niedrigeren Außentemperaturen bedingte niedrigere Lüftungsrate, aus der die geringere Verdünnung resultiert.

Die Mittelwerte, die Minimal- und Maximalwerte der CO₂-Konzentrationsdifferenzen sowie die Anzahl der Tagesmittelwerte der jeweiligen Mastdurchgänge sind zusammenfassend in Tabelle 28 dargestellt.

Tabelle 28: Mittelwerte, Minimal- und Maximalwerte der Tagesmittelwerte der CO₂-Konzentrationsdifferenzen während der drei untersuchten Mastdurchgänge

Mast-durch-gang		AK mit Teilspalten-	AK mit Einstreu	Warmstall mit Teil-
		boden		spaltenboden
		CO ₂ -Konzentrationsdifferenzen		
4	Mittelwert (in ppm)	313	309	1156
	Min (in ppm)	23	9	541
	Max (in ppm)	799	834	2610
	n	74	75	75
5	Mittelwert (in ppm)	345	315	957
	Min (in ppm)	150	103	607
	Max (in ppm)	680	575	1539
	n	119	119	119
6	Mittelwert (in ppm)	555	535	2223
	Min (in ppm)	31	10	664
	Max (in ppm)	1119	1112	4228
	n	109	109	106

6.1.3.5 Wasser

In den folgenden Abbildungen (Abbildung 56, Abbildung 57, Abbildung 58) sind die Verläufe der Tagesmittelwerte der H_2O -Konzentrationsdifferenzen zwischen Ab- und Zuluftkonzentration während der drei Mastdurchgänge (4, 5 und 6) dargestellt.

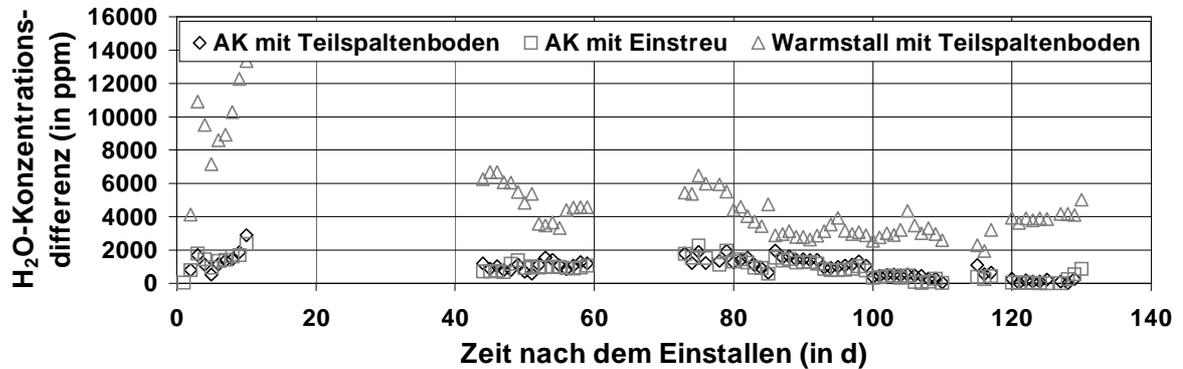


Abbildung 56: H_2O -Konzentrationsdifferenzen zwischen Ab- und Zuluftkonzentration während des Mastdurchgangs 4 vom 1.2.99 - 10.6.99 in den drei untersuchten Haltungssystemen

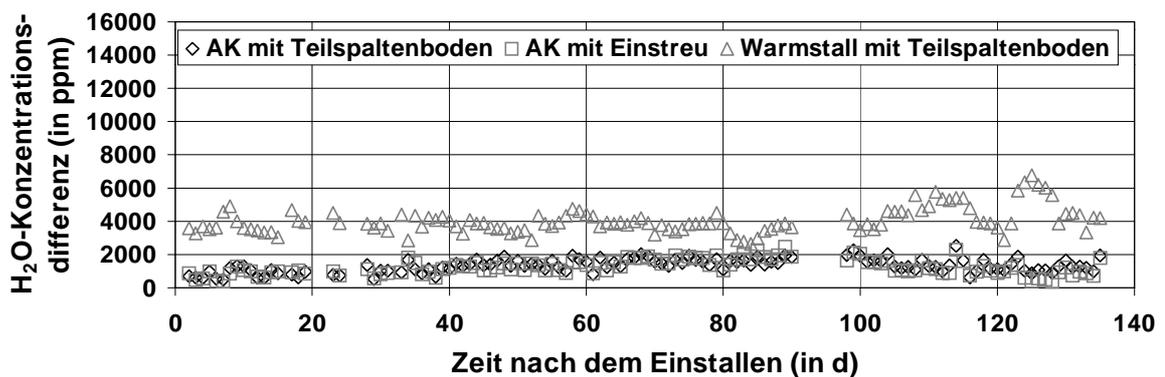


Abbildung 57: H_2O -Konzentrationsdifferenzen zwischen Ab- und Zuluftkonzentration während des Mastdurchgangs 5 vom 16.6.99 - 30.10.99 in den drei untersuchten Haltungssystemen

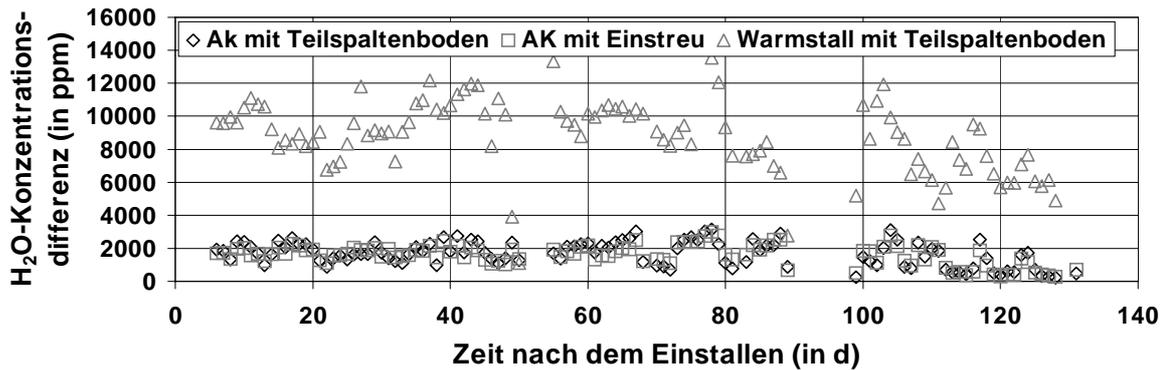


Abbildung 58: H₂O-Konzentrationsdifferenzen zwischen Ab- und Zuluftkonzentration während des Mastdurchgangs 6 vom 11.11.99 - 20.3.00 in den drei untersuchten Haltungssystemen

In Abbildung 56 bis Abbildung 58 fällt wie schon bei den CO₂-Konzentrationsdifferenzen auf, dass die H₂O-Konzentrationsdifferenzen aus den beiden Außenklima-Versuchsabteilen während der drei Mastdurchgänge durchgängig niedriger als die aus dem Warmstall mit Teilspaltenboden liegen. Die mittleren H₂O-Konzentrationsdifferenzen sind in den Außenklima-Versuchsabteilen mit Teilspaltenboden und mit Einstreu während des Mastdurchgangs 4 (Frühjahr) mit 970 ppm bzw. 862 ppm etwas niedriger als während des 5. Mastdurchgangs (Sommer) mit 1331 ppm bzw. 1249 ppm H₂O-Konzentrationsdifferenz. Während des Winter-Mastdurchgangs (Mastdurchgang 6) sind die H₂O-Konzentrationsdifferenzen aus den Außenklima-Versuchsabteilen mit Teilspaltenboden und mit Einstreu mit 1668 ppm bzw. 1601 ppm deutlich höher als während der beiden vorherigen Mastdurchgänge.

Die H₂O-Konzentrationsdifferenzen im Warmstall mit Teilspaltenboden sind während des Mastdurchgangs 4 (Frühjahr) mit 1156 ppm ca. um den Faktor 4 niedriger als während des Mastdurchgangs 5 (Sommer) mit 4047 ppm und damit auch 4-mal höher als die H₂O-Konzentrationsdifferenzen in den Außenklima-Versuchsabteilen während Mastdurchgang 5. Während des Mastdurchgangs 6 (Winter) liegen die H₂O-Konzentrationsdifferenzen mit 8777 ppm am höchsten und um den Faktor 5,5 höher als die der beiden Außenklima-Versuchsabteile.

Die Mittelwerte, die Minimal- und Maximalwerte der H₂O-Konzentrationsdifferenzen sowie die Anzahl der Tagesmittelwerte der jeweiligen Mastdurchgänge sind zusammenfassend in Tabelle 29 dargestellt.

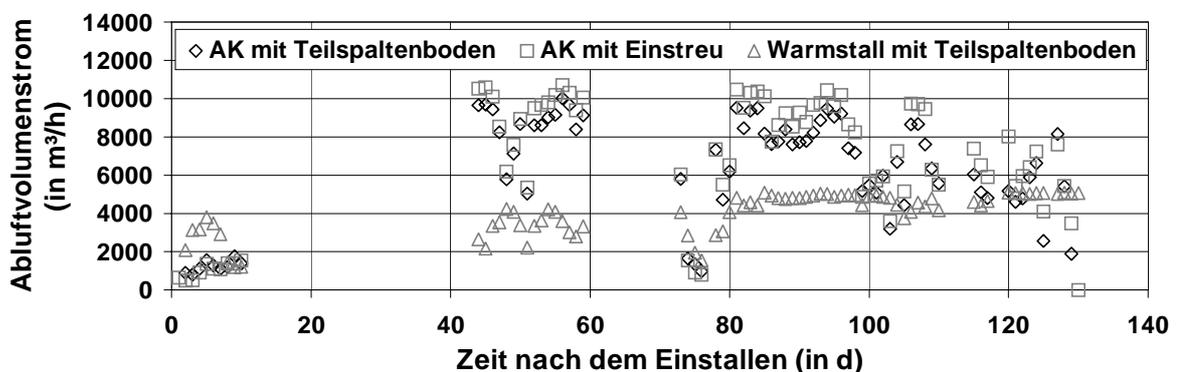
Tabelle 29: Mittelwerte, Minimal- und Maximalwerte der Tagesmittelwerte der H₂O-Konzentrationsdifferenzen während der drei untersuchten Mastdurchgänge

Mast-durch-gang		AK mit Teilspalten-boden	AK mit Einstreu	Warmstall mit Teilspaltenboden
		H ₂ O-Konzentrationsdifferenzen		
4	Mittelwert	970	862	1156
	Min	7	5	541
	Max	2881	2348	2610
	n	74	75	75
5	Mittelwert	1331	1249	4047
	Min	509	341	2650
	Max	2518	2474	6769
	n	119	119	119
6	Mittelwert	1668	1601	8777
	Min	236	280	1103
	Max	3150	2995	13558
	n	109	109	106

Fazit: Die Konzentrationsdifferenzen zwischen Ab- und Zuluft sind in den beiden Außenklima-Versuchsabteilen für alle Gase (NH₃, CH₄, CO₂, N₂O und H₂O) niedriger als im Versuchsabteil im Warmstall. Gründe dafür sind zum einen die wegen des höheren Abluftvolumenstroms höheren Verdünnungen, zum anderen die wegen der meist geringeren Tagesdurchschnittstemperaturen geringeren Gasfreisetzungsraten. Für NH₃ ist der Unterschied besonders schwerwiegend, da hier im Warmstall häufig Konzentrationen in der Abluft gemessen werden, die über den in der Schweinehaltungs-VO festgelegten Höchstwerten von 20 ppm liegen. Auch bei CO₂ werden die dort geforderten Höchstwerte von 3000 ppm besonders während der Wintermessung überschritten.

6.1.4 Volumenströme

In Abbildung 59 bis Abbildung 61 sind die Tagesmittelwerte der Abluftvolumenströme aus den drei Versuchsabteilen während der drei Mastdurchgänge (4, 5, und 6) dargestellt.

**Abbildung 59:** Tagesmittelwerte des Abluftvolumenstroms während des Mastdurchgangs 4 vom 1.2.99 - 10.6.99 in den drei untersuchten Haltungssystemen

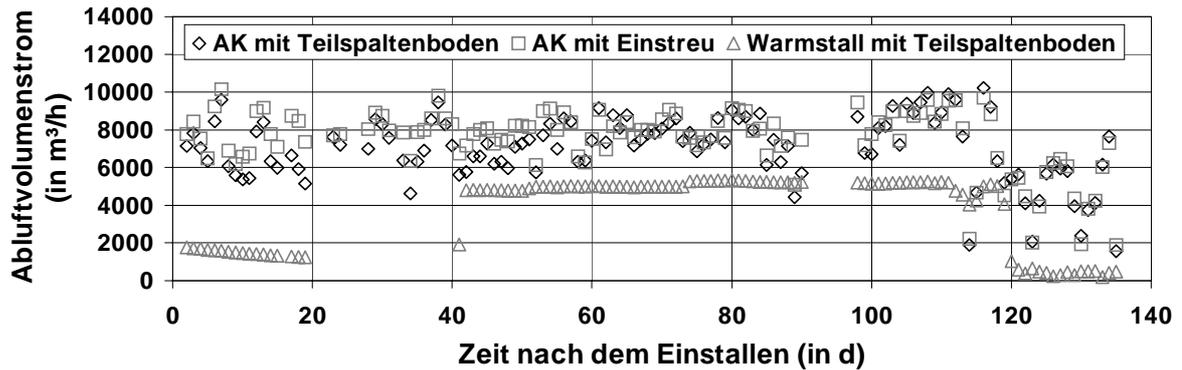


Abbildung 60: Tagesmittelwerte des Abluftvolumenstroms während des Mastdurchgangs 5 vom 16.6.99 - 30.10.99 in den drei untersuchten Haltungssystemen

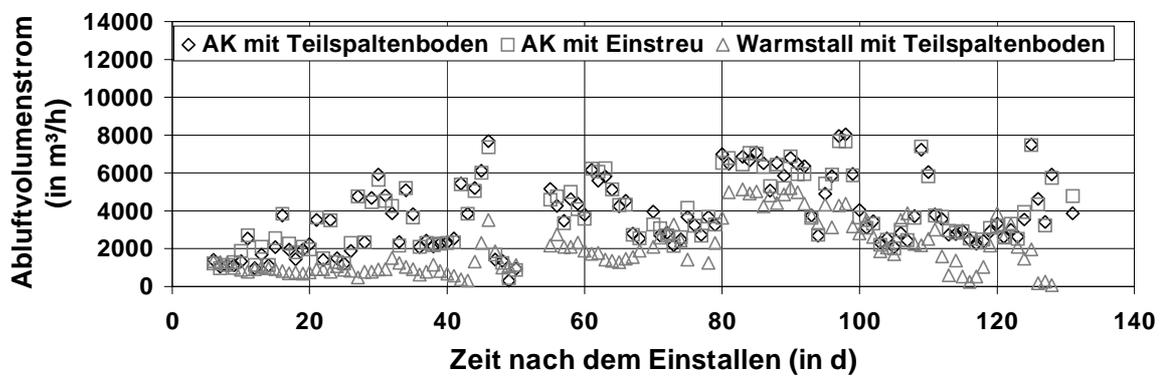


Abbildung 61: Tagesmittelwerte des Abluftvolumenstroms während des Mastdurchgangs 6 vom 11.11.99 - 20.3.00 in den drei untersuchten Haltungssystemen

Aus den Abbildung 59 bis Abbildung 61 ist erkennbar, dass sich das Abluftvolumenstromniveau aus den drei verschiedenen Versuchsabteilungen während aller drei Mastdurchgänge voneinander unterscheidet. Die Tagesmittelwerte des Abluftvolumenstroms sind sowohl im Warmstall mit Teilspaltenboden als auch in den beiden Außenklima-Versuchsabteilungen während des Mastdurchgangs 6 (Winter) am niedrigsten, mit durchschnittlich 1983 m³/h im Warmstall und 3714 m³/h bzw. 3723 m³/h im Außenklima-Versuchsabteil mit Teilspalten bzw. mit Einstreu. Auffällig sind auch die niedrigen Abluftvolumenströme aus allen drei Versuchsabteilungen zu Beginn des Mastdurchgangs, wenn die eingestellten Tiere noch klein sind. Dieses Phänomen ist im Warmstall mit Teilspaltenboden während aller drei Mastdurchgänge zu erkennen, in den beiden Außenklima-Versuchsabteilungen nur noch während des Mastdurchgangs 4 (Frühjahr).

Beim Mastdurchgang 4 fällt in allen Versuchsabteilungen die große Variabilität der Tagesmittelwerte der Abluftvolumenströme auf, die mit den zu dieser Übergangsjahreszeit stark wechselnden außerklimatischen Parametern zusammenhängt (Temperatur, Windge-

schwindigkeit). Die Schwankungsbreite zwischen Minimal- und Maximalabluftvolumenstrom ist hier bei den bei den Außenklima-Versuchsabteilungen am größten, der Mittelwert beträgt für die Außenklima-Versuchsabteile mit Teilspaltenboden bzw. mit Einstreu 6226 m³/h bzw. 6781 m³/h. Der Mittelwerte während dieses Mastdurchgangs für den Warmstall mit Teilspaltenboden beträgt 4027 m³/h.

Während des Mastdurchgangs 5 (Sommer) werden in den beiden Außenklima-Versuchsabteilungen die höchsten mittleren Abluftvolumenströme erreicht, durchschnittlich 7034 m³/h im Versuchsabteil mit Teilspaltenboden und 7481 m³/h in dem mit Einstreu. Während dieses Mastdurchgangs sind die Abluftvolumenströme aus dem Warmstall mit durchschnittlich 3266 m³/h niedriger als während des Mastdurchgangs 4. Der Grund dafür ist darin zu sehen, dass zu Beginn von Mastdurchgang 5 wegen der geringen Tiermasse im Stall der Abluftvolumenstrom sehr niedrig war und dann für den Zeitraum, in dem wegen der höheren Außentemperaturen und der größeren Tiermasse der Abluftvolumenstrom gestiegen ist, wegen eines Gewitterschadens keine Abluftvolumenströme aufgezeichnet werden konnten und die Mittelung somit verzerrt ist.

Zusammenfassend sind die gemittelten Tagesmittelwerte für die drei Mastdurchgänge in den drei Versuchsabteilungen einschließlich der Minimal- und Maximalwerte in Tabelle 30 dargestellt. Die Werte sind außerdem in m³/(h*Tierplatz) sowie in m³/(h*500 kg LM) angegeben, um die Vergleichbarkeit zu Werten aus der Literatur zu erhöhen. Die Bezugsgröße für die Tierplatzberechnung ist im AK mit Teilspaltenboden und im AK mit Einstreu jeweils 64 Tiere, im Warmstall mit Teilspaltenboden 52 Tiere. Für die Berechnung bezogen auf 500 kg LM wird mit durchschnittlichen Tiergewichten von 72 kg LM gerechnet.

Tabelle 30: Mittelwerte, Minimal- und Maximalwerte der Tagesmittelwerte des Abluftvolumenstroms während der drei untersuchten Mastdurchgänge

Mast-durch-gang		AK mit Teilspaltenbo-den	AK mit Einstreu	Warmstall mit Teil-spaltenboden
		Abluftvolumenstrom in m³/h , (m ³ /Tierplatz), (m ³ /500 kgLM)		
4	Mittelwert	6226 (97) (675)	6781 (106) (736)	4027 (77) (537)
	Min	798 (13) (87)	508 (8) (55)	1197 (23) (160)
	Max	10026 (156) (1088)	10719 (167) (1163)	5090 (97) (680)
	n	74	75	75
5	Mittelwert	7034 (110) (763)	7481 (117) (812)	3730 (72) (498)
	Min	1575 (25) (171)	1892 (30) (205)	186 (4) (25)
	Max	10222 (160) (1109)	10153 (159) (1102)	5347 (103) (713)
	n	119	119	105
6	Mittelwert	3714 (58) (403)	3723 (58) (404)	1983 (38) (265)
	Min	312 (5) (34)	444 (7) (48)	62 (1) (8)
	Max	8031 (125) (871)	7691 (120) (835)	5208 (100) (695)
	n	118	118	115

Die Abluftvolumenströme in Tabelle 30 bewegen sich in auch in der Literatur für Außenklimaställe angegebenen Bereichen. Die dort angegebenen Volumenströme wurden mit verschiedenen Tracergastechniken (Abklingmethode und konstante Tracergasinjektion) und verschiedenen Tracergasen in Messungen über maximal 48 h am Stück gemessen. So messen HÖRNIG ET AL. (1993) im Winter 35,7 – 52,7 m³/(h*Tier), in einer Sommersituation 141,6 m³/(h*Tier), was mit den eigenen Messungen gut übereinstimmt.

NIEBAUM ET AL. (2001) misst in zwei Mastschweineeställen mit Nürtinger-System für eine Sommersituation 625 bzw. 502 m³/(h*500 kg LM), für eine Wintersituation 345 bzw. 407 m³/(h*500 kg LM), was den hier dargestellten Volumenströmen aus den Außenklima-Versuchsabteilungen ebenfalls gut entspricht.

KAISER ET AL. (1998a) messen 7,74-51,1 m³/(h*Tierplatz) (in einem Zeitraum von 9.9.-11.9.1997). In einem Zeitraum von November/Dezember 1996 messen sie bei geschlossenen Rollos durchschnittlich 69 m³/(h*Tierplatz), bei halb geöffneten Rollos durchschnittlich 80 m³/(h*Tierplatz) und bei geöffneten Rollos durchschnittlich 131 m³/(h*Tierplatz). Auch diese Messungen liegen im Bereich der eigenen Ergebnisse.

Fazit: Die durchschnittlichen Tagesmittelwerte der Abluftvolumenströme aus den beiden Außenklima-Versuchsabteilungen sind in allen drei Mastdurchgängen höher als die aus dem Warmstall. Im Gegensatz zum Warmstall sind die Abluftvolumenströme im Außenklimastall nicht abhängig von Tierbesatz und Tiergewicht (Temperaturabhängige Regelung - je weniger und je leichter die Tiere, desto weniger Luftdurchsatz durch den Stall, um die Wärme im Winter im Stall zu halten), sondern vielmehr nur von außenklimatischen Parametern. Der Landwirt hat über die Regelung der Öffnungen der Folienrollos an den Spaceboard-Seitenwänden die Möglichkeit, die Durchströmung des Stalles zu beeinflussen; so wird mit

diesem Mittel der Volumenstrom durch die Außenklimaabteile im Winter vermindert, wie die durchschnittlichen Abluftvolumenströme hier belegen.

6.1.5 Emissionsraten

In den folgenden Abschnitten werden die Tagesmittelwerte der Emissionsraten aus den drei untersuchten Haltungssystemen im Außenklimastall und im Warmstall dargestellt.

6.1.5.1 Ammoniak

In den folgenden Abbildungen (Abbildung 62, Abbildung 63, Abbildung 64) sind die Verläufe der Tagesmittelwerte der NH_3 -Emissionsraten bezogen auf 500 kg LM aus den drei Versuchsabteilen während der drei Mastdurchgänge (4, 5 und 6) dargestellt.

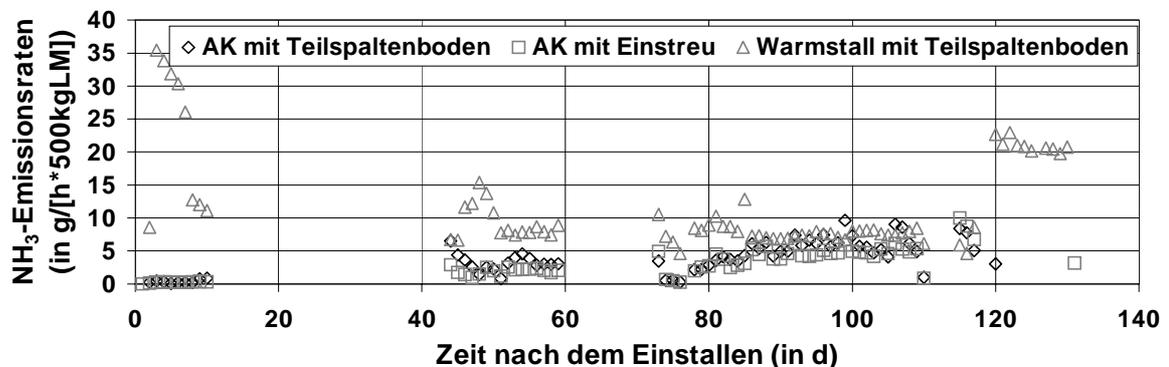


Abbildung 62: NH_3 -Emissionsraten bezogen auf 500 kg Lebendmasse (LM) während des Mastdurchgangs 4 vom 1.2.99 - 10.6.99 in den drei untersuchten Haltungssystemen

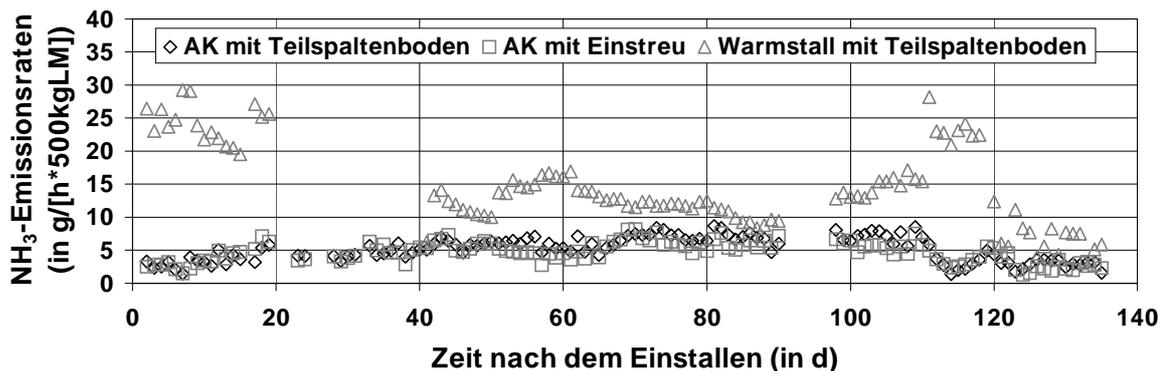


Abbildung 63: NH_3 -Emissionsraten bezogen auf 500 kg Lebendmasse (LM) während des Mastdurchgangs 5 vom 16.6.99 - 30.10.99 in den drei untersuchten Haltungssystemen

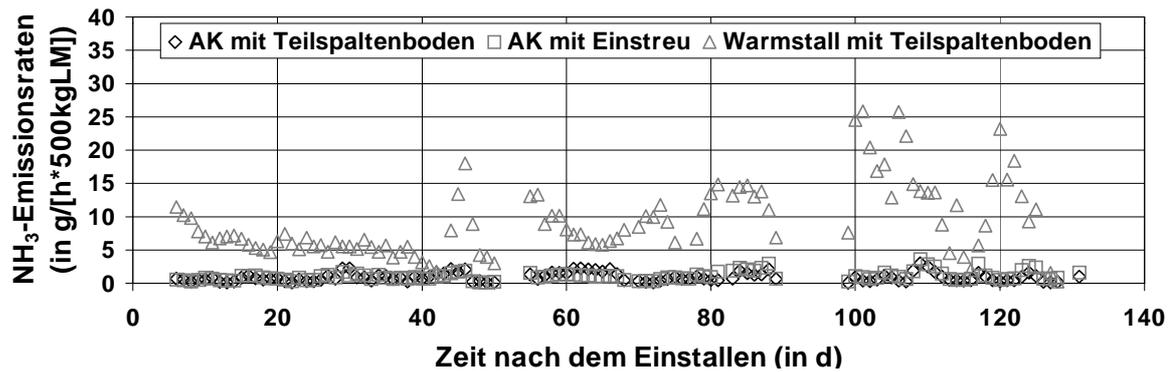


Abbildung 64: NH₃-Emissionsraten bezogen auf 500 kg Lebendmasse (LM) während des Mastdurchgangs 6 vom 11.11.99 - 20.3.00 in den drei untersuchten Haltungssystemen

Die NH₃-Emissionsraten unterscheiden sich in allen drei Mastdurchgängen in den beiden Außenklima-Versuchsabteilungen kaum voneinander, wohingegen der Unterschied zu den Emissionsraten aus dem Warmstall deutlich zu erkennen ist. Die Emissionsratenniveaus unterscheiden sich bei allen drei Versuchsabteilungen während der drei Mastdurchgänge.

Während Mastdurchgang 5 (Sommer) sind die NH₃-Emissionsraten in allen drei Versuchsabteilungen am höchsten, wobei sie mit 14,8 g/(h*500 kg LM) im Warmstall um den Faktor 3 höher als in den Außenklima-Versuchsabteilungen mit Teilspalten bzw. Einstreu mit 5,1 bzw. 4,7 g/(h*500 kg LM) liegen (Tabelle 31). Während des Mastdurchgangs 4 (Frühjahr) sind die Emissionsraten in den Außenklima-Versuchsabteilungen mit Teilspaltenboden und mit Einstreu mit 3,9 g/(h*500 kg LM) bzw. 3,2 g/(h*500 kg LM) niedriger als während der Sommermessung und wiederum ca. um den Faktor 3 niedriger als die NH₃-Emissionsraten aus dem Warmstall mit 11,6 g/(h*500 kg LM) (Tabelle 31).

Während der Wintermessung (Mastdurchgang 6) werden in den Außenklima-Versuchsabteilungen mit 0,9 g/(h*500 kg LM) im Außenklima-Versuchsabteil mit Teilspaltenboden und mit 1,1 g/(h*500 kg LM) im Versuchsabteil mit Einstreu äußerst niedrige NH₃-Emissionsraten gemessen. Der Grund dafür sind die während dieses Mastdurchgangs besonders niedrigen NH₃-Konzentrationsdifferenzen (Tabelle 25) und die geringen durchschnittlichen Abluftvolumenströme (Tabelle 30). Im Warmstall liegen während dieser Zeit die Emissionsraten mit 9,1 g/(h*500 kg LM) geringfügig unter denen während Mastdurchgang 4, was auf die zwar geringeren Abluftvolumenströme aber höheren Konzentrationsdifferenzen (Tabelle 25) zurückzuführen ist.

Die Mittelwerte, die Minimal- und Maximalwerte der NH₃-Emissionsraten sowie die Anzahl der Tagesmittelwerte der jeweiligen Mastdurchgänge sind zusammenfassend in Tabelle 31 dargestellt.

Tabelle 31: Mittelwerte, Minimal- und Maximalwerte der Tagesmittelwerte der NH₃-Emissionsraten bezogen auf 500 kg LM während der drei untersuchten Mastdurchgänge

Mast-durch-gang		AK mit Teil-spaltenboden	AK mit Einstreu	Warmstall mit Teil-spaltenboden
		NH ₃ -Emissionsraten		
4	Mittelwert (in g/(h*500 kg LM))	3,9	3,2	11,6
	Min (in g/(h*500 kg LM))	0,1	0,1	4,6
	Max (in g/(h*500 kg LM))	9,6	10,0	35,4
	n	66	65	75
5	Mittelwert (in g/(h*500 kg LM))	5,1	4,7	14,8
	Min (in g/(h*500 kg LM))	1,4	1,2	2,6
	Max (in g/(h*500 kg LM))	8,7	8,2	36,9
	n	119	119	105
6	Mittelwert (in g/(h*500 kg LM))	0,9	1,1	9,1
	Min (in g/(h*500 kg LM))	0,0	0,1	0,2
	Max (in g/(h*500 kg LM))	3,0	3,6	25,9
	n	109	109	106

Neueste Ergebnisse von NIEBAUM ET AL. (2001) aus Messungen an Außenklimaställen für Mastschweine nach dem Nürtinger-System ergeben NH₃-Emissionsraten von 0,98 und 1,79 g/(h*500 kg LM) im Sommer bzw. 1,16 und 2,39 g/(h*500 kg LM) im Winter. Diese Emissionsraten wurden im Sommer an 6 bzw. 11 Tage gemessen, im Winter an 9 bzw. 12 Tagen. Im Vergleich zu den eigenen Messungen sind die bei NIEBAUM ET AL. (2001) gemessenen Emissionsraten im Sommer deutlich niedriger, im Winter jedoch höher. Allerdings ist der Vergleich einer über einen Mastdurchgang durchgängigen Messung mit einer Kurzzeitmessung nicht zulässig. BREHME (1997) gibt für Mastschweineställe nach dem Nürtinger-System NH₃-Emissionsraten zwischen 0,8 und 1,3 g/(h*500 kg LM) an. Alle Ergebnisse deuten auf eine wesentlich geringere NH₃-Emissionsrate aus Außenklimaställen im Vergleich zu Warmställen mit Teil- oder Vollspaltenboden hin.

Die Ergebnisse aus Tabelle 31 und Abbildung 62 bis Abbildung 64 zeigen die um ein Vielfaches höheren NH₃-Emissionsraten aus dem Warmstall mit Teilspaltenboden im Vergleich zu denen aus den Außenklima-Versuchsabteilen. Die Gründe hierfür werden im Folgenden dargestellt. Die hier ermittelten NH₃-Emissionsraten für den Warmstall mit Teilspaltenboden werden anschließend mit einem NH₃-Emissionsratenmodell (Ni, 1998) verglichen.

6.1.5.1.1 Gründe für die hohen NH₃-Emissionsraten aus dem Warmstall mit Teilspaltenboden

Ein Grund für die auch im Vergleich zur Literatur (vgl. Abbildung 6) hohen NH₃-Emissionsraten aus dem Warmstall mit Teilspaltenboden ist sicherlich die nicht optimale

Luftführung im gesamten Warmstall sowie im Versuchsabteil, die dazu führt, dass die planbefestigte Liegefläche als Kotbereich benutzt wird und meist verkotet ist, und somit ein erhöhtes NH₃-Freisetzungspotenzial bietet.

Ein weiterer Grund für die im Vergleich zur Literatur höheren NH₃-Emissionsraten ist in der Futtermittellage des Untersuchungsbetriebes zu sehen. Bezogen auf die Trockenmasse der Futtermittellagen sind die Rohprotein (RP)-Gehalte mit 20,1 % (i. TS) während der Vormast, 19,4 % (i. TS) in der Hauptmast und 19,8 % (i. TS) in der Endmast relativ hoch. Diese Futtermittellagen können so nicht als Beispiel einer nährstoffangepassten Rationsgestaltung gelten. Mit dem Ziel einer verringerten N-Ausscheidung der Schweine zur Verringerung der N-Gehalte in der Gülle und damit zur Verminderung des NH₃-Emissionspotentials aus der Gülle sind heute Rationen wie bei BECK ET AL. (1998) von 18,6 % RP (i. TS) in der Vormast bis 15,3 % RP (i. TS) in der Endmast keine Seltenheit. KAISER ET AL. (1998a) vergleichen u.a. die NH₃-Emissionsraten aus zwei Mastschweineställen mit unterschiedlichen Futtermittellagen mit jeweils 19,6 % RP (i. TS) in der Vormast bis zu 17,6 bzw. 15,5 % RP (i. TS) in der Endmast. Bei KAISER ET AL. (1998b) werden die NH₃-Emissionsraten einer bereits nährstoffangepassten Futtermittellage für Mastschweine mit einer nährstoffangepassten mit stärkerer Eiweißabsenkung verglichen. In allen Fällen konnte eine NH₃-Emissionsminderung durch die eiweißreduzierte Fütterung erzielt werden, bei KAISER ET AL. (1998a) sogar um 46 % bei gleichen täglichen Zunahmen.

Bei der Fütterung mit einem 4-Phasenfutter von 18/16/14/12 % RP reduziert sich bei gleichen Leistungen die N-Ausscheidung nach ROTH UND KIRCHGESSNER (1996) auf 88 % gegenüber einem Universalfutter von 16 % RP mit mindestens 140 g/kg Futter. KECK (1997) stellt in Tabelle 32 Möglichkeiten der N-Ausscheidungsminderung über angepasste Fütterung dar.

Tabelle 32: Einfluss der Fütterung auf die N-Ausscheidung von Mastschweinen (KECK 1997)

Autor	Fütterungsmaßnahme	Reduktion der N-Ausscheidung
POTTHAST, 1991	2-Phasenfütterung statt Universalmast	-18 %
SPIEKERS U. PFEFFER, 1990	3-Phasenfütterung statt 2-Phasenfütterung	-5 %
SPIEKERS U. PFEFFER, 1990	3-Phasenfütterung und Aminosäurezulage statt 2-Phasen	-36 %
SUSENBETH, 1991	Reduktion des RP-Gehaltes und Lysinzulage	-20 %

Die hohen RP-Gehalte in den Futtermittellagen in den Versuchsabteilen können also der Grund für die hohen N_{ges} und NH₄-N-Gehalte (Tabelle 9) in den Gülleproben der Ver-

suchsabteile zum jeweiligen Mastende sein, die folglich für die höheren NH_3 -Emissionsraten verantwortlich sind.

6.1.5.1.2 Vergleich der gemessenen NH_3 -Emissionsraten aus dem Warmstall mit modellierten NH_3 -Emissionsraten

Ni (1998) stellt für die Freisetzung von NH_3 folgende Gesetzmäßigkeit auf, die er durch eigene Messungen über mehrere Mastdurchgänge in einem zwangsentlüfteten Warmstall mit Teilspaltenboden ermittelt hat.

$$Q_{Ae} = 43,53 - 0,015W_{pt} - 2,8 * 10^{-3}\dot{V} - 2,59T_{in} + 1,7 * 10^{-6}W_{pt}\dot{V} + 9,82 * 10^{-4}W_{pt}T_{in} + 2,32 * 10^{-4}T_{in}\dot{V}$$

(Gleichung 26)

mit:

- Q_{Ae} : Ammoniakemissionsrate in g/h
 T_{in} : Stallinnentemperatur (von 2,5 bis 22,7 °C) in °C
 \dot{V} : Lüftungsrate (von 217 bis 5312 m³/h) in m³/h
 W_{pt} : Gesamtgewicht der eingestellten Schweine (von 0 bis 5095 kg) in kg

Ni (1998) stellt in dieser Regressionsgleichung die NH_3 -Emissionsrate in Abhängigkeit vom Gesamtgewicht der eingestellten Mastschweine, von der Lüftungsrate sowie von der Stallinnentemperatur dar. Mit dieser Gleichung werden im Folgenden die modellierten NH_3 -Emissionsraten aus dem Warmstall mit Teilspaltenboden berechnet und den tatsächlich auf dem Versuchsbetrieb im Warmstall mit Teilspaltenboden gemessenen Werten gegenübergestellt.

Abbildung 65 zeigt den Vergleich der im Versuchsabteil Warmstall mit Teilspaltenboden gemessenen NH_3 -Emissionen mit den nach Ni (1998) (s. o.) berechneten NH_3 -Emissionen.

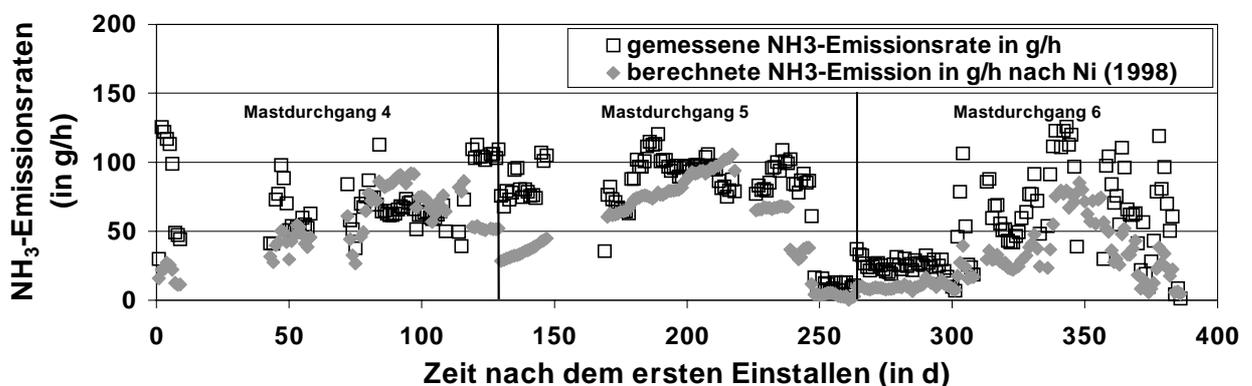


Abbildung 65: Vergleich der gemessenen NH_3 -Emissionen in g/h aus dem Warmstall mit Teilspaltenboden und den nach Ni (1998) berechneten NH_3 -Emissionen

Zu erkennen ist hieraus, dass der generelle Verlauf der beiden (gemessenen und berechneten) NH_3 -Emissionsraten mit Ausnahmen gut übereinstimmt. Daraus abgeleitet ergibt sich, dass den gemessenen Werten grundsätzlich die gleichen Abhängigkeiten zu Grunde gelegt werden können, es aber im Versuchsabteil „Warmstall mit Teilspaltenboden“ von Zeit zu Zeit zu Effekten kommt, die mit diesem Modell nicht mehr erklärt werden.

Das höhere NH_3 -Emissionsniveau im Warmstall mit Teilspaltenboden im Vergleich zum Modell ist auf den höheren RP-Gehalt in der Ration gegenüber den RP-Gehalten von 17 % während der Versuche, die dem Modell von Ni (1998) zu Grunde liegen. Hinzu kommt die Verschmutzung der planbefestigten Fläche im Versuchsabteil.

Abbildung 66 zeigt analog zu Abbildung 65 den Vergleich der auf 500 kg LM standardisierten NH_3 -Emissionsraten aus dem Warmstall mit Teilspaltenboden. Auch hier ist häufig ein ähnlicher Verlauf beider Emissionen zu erkennen.

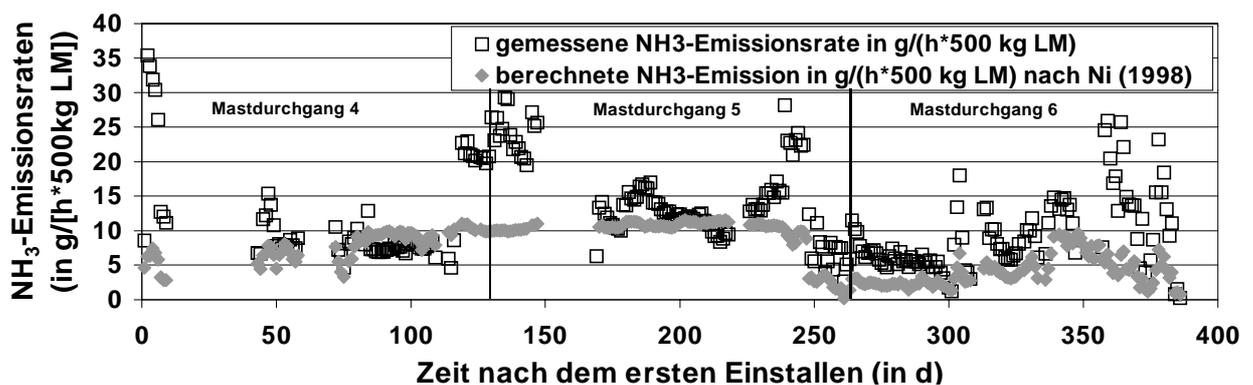


Abbildung 66: Vergleich der gemessenen, standardisierten NH_3 -Emissionsrate in $\text{g}/(\text{h} \cdot 500 \text{ kg LM})$ aus dem Warmstall mit Teilspaltenboden und den nach Ni (1998) berechneten NH_3 -Emissionen

Besonders zu Beginn der Mastdurchgänge, wenn die Schweine noch sehr klein sind und die Buchtenfläche nicht ausnutzen, und gegen Ende der Mastdurchgänge, wenn ein Teil der Schweine bereits ausgestallt wird, sind die größten Abweichungen vom Modell zu erkennen. Ein Grund dafür kann sein, dass während dieser Zeiten die planbefestigte Fläche wegen des Überangebotes an Platz stärker verschmutzt wird und damit die NH_3 -Emissionen erhöht werden. Ein weiterer Grund kann sein, dass ebenfalls während dieser Zeiten die Spaltenfläche durch die liegenden Tiere weniger abgedeckt wird als wenn die Buchten mit schweren Tieren voll belegt sind. Außerdem unterscheidet sich die dem Modell von Ni (1998) zu Grunde gelegte kontinuierliche Mast von dem in den eigenen Untersuchungen herrschenden Rein-Raus-Verfahren.

In Tabelle 33 werden nun die Mittelwerte, Min- und Maxwerte der nach NI (1998) berechneten NH₃-Emissionsraten dargestellt und mit den gemessenen NH₃-Emissionsraten (Tabelle 31) verglichen.

Tabelle 33: Mittelwerte, Minimal- und Maximalwerte der Tagesmittelwerte der nach NI (1998) berechneten NH₃-Emissionsraten bezogen auf 500 kg LM während der drei untersuchten Mastdurchgänge im Warmstall mit Teilspaltenboden

Mast-durch-gang		Warmstall mit Teilspaltenboden	
		Gemessene NH ₃ -Emissionsrate	Berechnete NH ₃ -Emissionsrate (Abw. von gemessener in %)
4	Mittelwert (in g/(h*500 kg LM))	11,6	7,9 (-33 %)
	Min (in g/(h*500 kg LM))	4,6	2,8
	Max (in g/(h*500 kg LM))	35,4	11,0
	n	75	75
5	Mittelwert (in g/(h*500 kg LM))	14,8	9,3 (-37 %)
	Min (in g/(h*500 kg LM))	2,6	0,2
	Max (in g/(h*500 kg LM))	36,9	11,6
	n	105	105
6	Mittelwert (in g/(h*500 kg LM))	9,1	4,1 (-55 %)
	Min (in g/(h*500 kg LM))	0,2	0,8
	Max (in g/(h*500 kg LM))	25,9	9,8
	n	106	106

Die berechnete mittlere NH₃-Emissionsrate während Mastdurchgang 4 (Frühjahr) liegt mit 7,9 g/(h*500 kg LM) um 33 %, während Mastdurchgang 5 (Sommer) mit 9,3 g/(h*500 kg LM) um 37 % und während Mastdurchgang 6 mit 4,1 g/(h*500 kg LM) um 55 % unter der gemessenen mittleren NH₃-Emissionsrate.

Diese berechneten NH₃-Emissionsraten liegen im Vergleich zu bekannten NH₃-Emissionsraten aus der Literatur (Abbildung 6) immer noch im oberen Bereich, bzw. gehen auch darüber hinaus.

6.1.5.1.3 Diurnale Effekte der NH₃-Emissionen

Zusätzlich zu den Anstiegen der Emissionsraten während der Mastdurchgänge unterliegen die Emissionsraten starken tageszeitlichen Schwankungen. So sind in den Tagesgängen der NH₃-Emissionsraten in den drei unterschiedlichen Haltungssystemen jeweils ein bis zwei Emissionsmaxima zu erkennen. Diese Schwankungen sind nach PEDERSEN UND ROM (1998) abhängig von der Tieraktivität, und nach AARNINK ET AL. (1997) abhängig von den Harnvorgängen der Tiere. Da die Darstellung der tageszeitlichen Dynamik in den untersuchten Haltungssystemen bei den unterschiedlichen Gasen nicht Ziel der Arbeit ist und es einige Untersuchungen gibt, die sich speziell dieser Fragestellung widmen (PEDERSEN UND ROM, 1998; AARNINK ET AL., 1997) wird hier nur festgestellt, dass diese beschriebene Dy-

namik in unterschiedlichen Ausprägungen in den untersuchten Haltungssystemen und während aller Mastdurchgänge (4 - 6) zu beobachten war. Exemplarisch ist hierzu der Verlauf der NH_3 -Emissionsraten über eine Woche in 1-h-Mittelwerten in Abbildung 67 dargestellt.

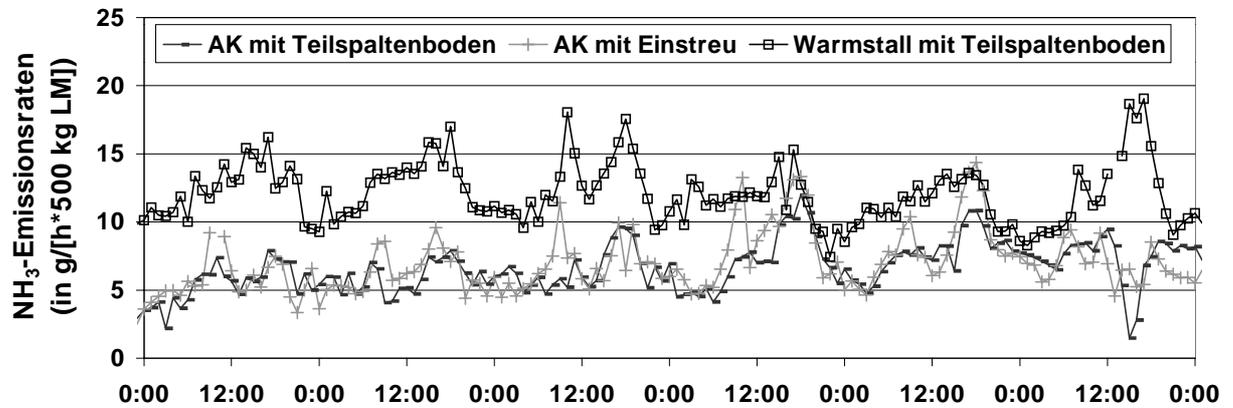


Abbildung 67: Verlauf der NH_3 -Emissionsraten aus den drei untersuchten Haltungssystemen während einer Woche während Mastdurchgang 5 (Sommer) vom 20.-26.8.99

Deutlich sind aus der Abbildung jeweils die zwei Emissionsmaxima am Vormittag und am Nachmittag zu erkennen. Während der Nacht sind die NH_3 -Emissionsraten am geringsten.

6.1.5.2 Methan

In den folgenden Abbildungen (Abbildung 68, Abbildung 69, Abbildung 70) sind die Verläufe der Tagesmittelwerte der CH_4 -Emissionsraten bezogen auf 500 kg LM aus den drei Versuchsabteilungen während der drei Mastdurchgänge (4, 5 und 6) dargestellt.

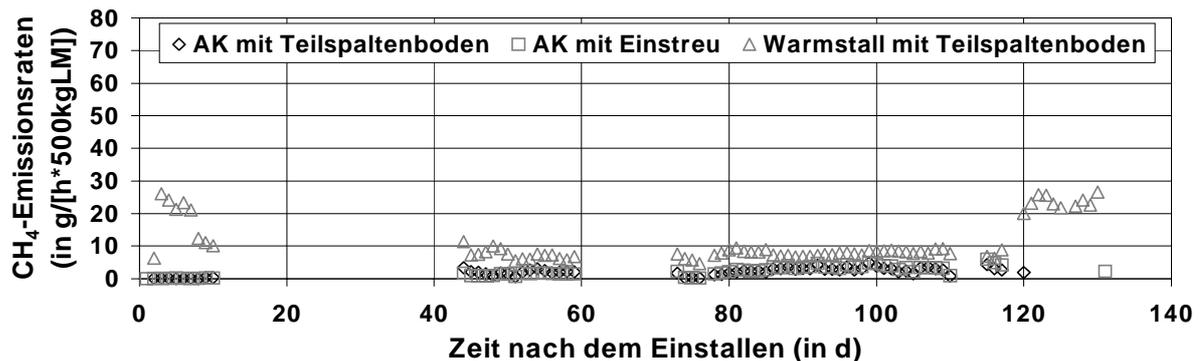


Abbildung 68: CH_4 -Emissionsraten bezogen auf 500 kg Lebendmasse (LM) während des Mastdurchgangs 4 vom 1.2.99 - 10.6.99 in den drei untersuchten Haltungssystemen

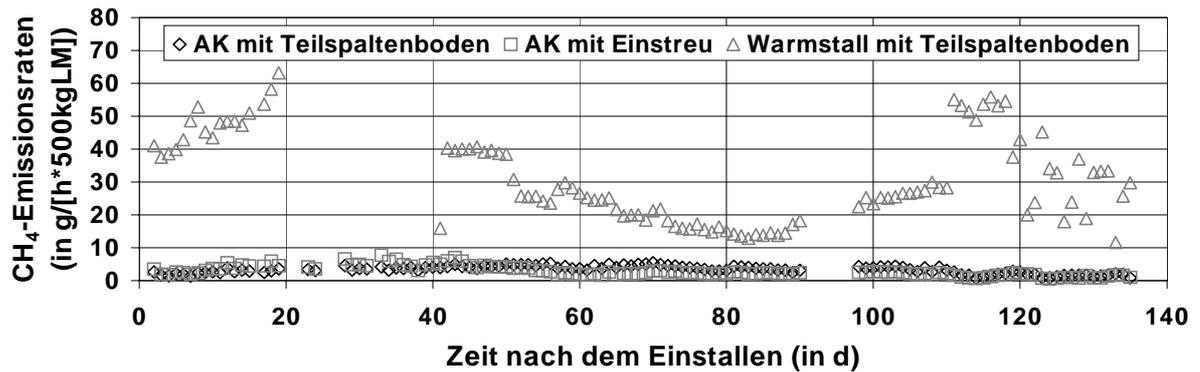


Abbildung 69: CH₄-Emissionsraten bezogen auf 500 kg Lebendmasse (LM) während des Mastdurchgangs 5 vom 16.6.99 - 30.10.99 in den drei untersuchten Haltungssystemen

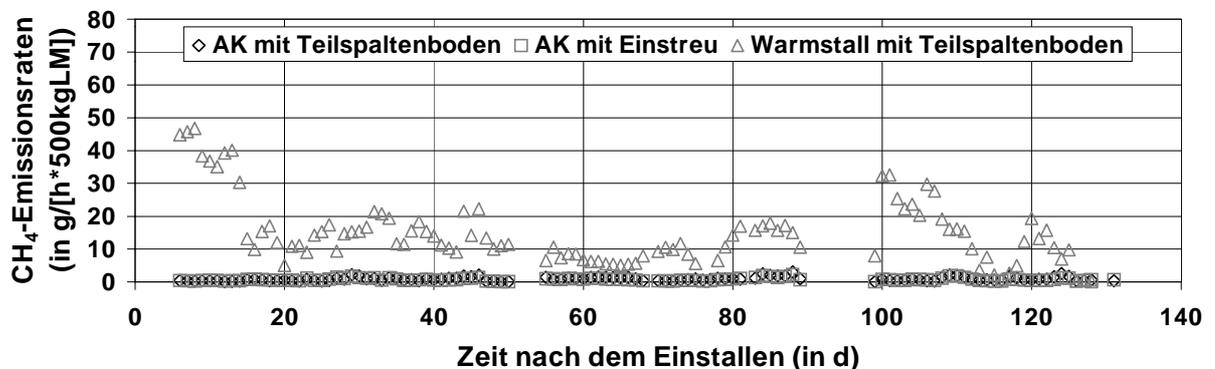


Abbildung 70: CH₄-Emissionsraten bezogen auf 500 kg Lebendmasse (LM) während des Mastdurchgangs 6 vom 11.11.99 - 20.3.00 in den drei untersuchten Haltungssystemen

Für die oben dargestellten CH₄-Emissionsraten ergibt sich ein ähnliches Bild wie bei den NH₃-Emissionsraten. Auch hier unterscheiden sich die Emissionsraten in den beiden Außenklima-Versuchsabteilungen während aller drei Mastdurchgänge kaum voneinander, wohingegen der Unterschied zu den Emissionsraten aus dem Warmstall deutlich zu erkennen ist.

Während Mastdurchgang 5 (Sommer) sind (wie bei NH₃) die CH₄-Emissionsraten in allen drei Versuchsabteilungen am höchsten, wobei sie mit 31,9 g/(h*500 kg LM) im Warmstall um den Faktor 10 höher als in den Außenklima-Versuchsabteilungen mit Teilspalten bzw. Einstreu mit 3,3 bzw. 2,9 g/(h*500 kg LM) liegen (Tabelle 34). In diesem Mastdurchgang werden im Warmstall besonders hohe Maximalwerte gemessen. Während des Mastdurchgangs 4 (Frühjahr) sind die Emissionsraten in den Außenklima-Versuchsabteilungen mit Teilspaltenboden und mit Einstreu mit 2,1 g/(h*500 kg LM) bzw. 2,3 g/(h*500 kg LM) niedriger als während der Sommermessung und ca. um den Faktor 5 niedriger als die NH₃-Emissionsraten aus dem Warmstall mit 10,9 g/(h*500 kg LM) (Tabelle 34).

Während der Wintermessung (Mastdurchgang 6) werden in den Außenklima-Versuchsabteilen mit 0,9 g/(h*500 kg LM) im Außenklima-Versuchsabteil mit Teilspaltenboden und mit 0,8 g/(h*500 kg LM) im Versuchsabteil mit Einstreu die niedrigsten CH₄-Emissionsraten gemessen. Der Grund dafür sind auch hier die während dieses Mastdurchgangs besonders niedrigen CH₄-Konzentrationsdifferenzen (Tabelle 25) und die geringen durchschnittlichen Abluftvolumenströme (Tabelle 30). Im Warmstall liegen während dieser Zeit die Emissionsraten mit 14,9 g/(h*500 kg LM) etwas höher als während des Mastdurchgangs 4, jedoch nur halb so hoch wie während Mastdurchgang 5 (Sommer).

Die Mittelwerte, Minimal- und Maximalwerte der CH₄-Emissionsraten sowie die Anzahl der Tagesmittelwerte der jeweiligen Mastdurchgänge sind zusammenfassend in Tabelle 34 dargestellt.

Tabelle 34: Mittelwerte, Minimal- und Maximalwerte der Tagesmittelwerte der CH₄-Emissionsraten bezogen auf 500 kg LM während der drei untersuchten Mastdurchgänge

Mast-durch-gang		AK mit Teilspal-tenboden	AK mit Einstreu	Warmstall mit Teilspaltenboden
		CH ₄ -Emissionsraten		
4	Mittelwert (in g/(h*500 kg LM))	2,1	2,3	10,9
	Min (in g/(h*500 kg LM))	0,0	0,0	4,6
	Max (in g/(h*500 kg LM))	4,8	6,0	26,6
	n	66	65	75
5	Mittelwert (in g/(h*500 kg LM))	3,3	2,9	31,9
	Min (in g/(h*500 kg LM))	0,7	0,6	11,7
	Max (in g/(h*500 kg LM))	5,5	7,8	63,2
	n	119	119	105
6	Mittelwert (in g/(h*500 kg LM))	0,9	0,8	14,9
	Min (in g/(h*500 kg LM))	0,1	0,1	0,1
	Max (in g/(h*500 kg LM))	3,0	2,2	46,8
	n	109	109	106

Die CH₄-Emissionsraten in Warmstall mit Teilspaltenboden liegen während des Mastdurchgangs 4 (Frühjahr) mit 10,9 g/(h*500 kg LM) in dem auch von HAHNE ET AL. (1999) in einem Vollspaltenbodenstall gemessenen Bereich, während der Mastdurchgänge 5 (Sommer) und 6 (Winter) liegen sie jedoch deutlich über den Werten aus der Literatur (Abbildung 10).

CH₄-Emissionsraten aus Außenklimaställen nach dem Nürtinger System haben auch BREHME (1997) mit 1,75-2,63 g/(h*500g LM) und NIEBAUM ET AL. (2001) mit 1,80 und 2,63 g/(h*500g LM) im Winter bzw. 3,02 und 3,5 g/(h*500g LM) im Sommer gemessen. Mit diesen Emissionsraten stimmen die eigenen Ergebnisse sehr gut überein.

6.1.5.3 Lachgas

In den folgenden Abbildungen (Abbildung 71, Abbildung 72, Abbildung 73) sind die Verläufe der Tagesmittelwerte der N₂O-Emissionsraten bezogen auf 500 kg LM aus den drei Versuchsabteilungen während der drei Mastdurchgänge (4, 5 und 6) dargestellt. Wegen der bereits bei der Darstellung der N₂O-Konzentrationsdifferenzen erläuterten Problematik werden nur die N₂O-Emissionsraten der Versuchsabteilung und Mastdurchgänge diskutiert, bei denen die N₂O-Konzentrationsdifferenzen nie negativ waren.

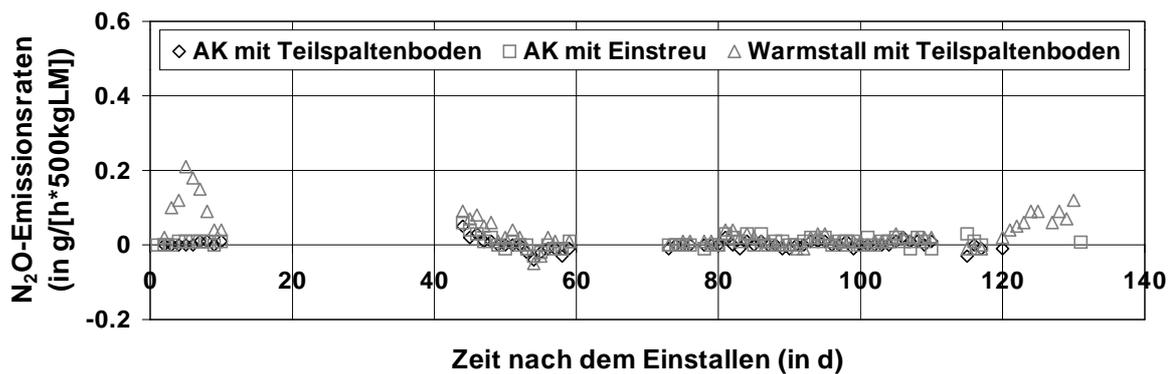


Abbildung 71: N₂O-Emissionsraten bezogen auf 500 kg Lebendmasse (LM) während des Mastdurchgangs 4 vom 1.2.99 - 10.6.99 in den drei untersuchten Haltungssystemen

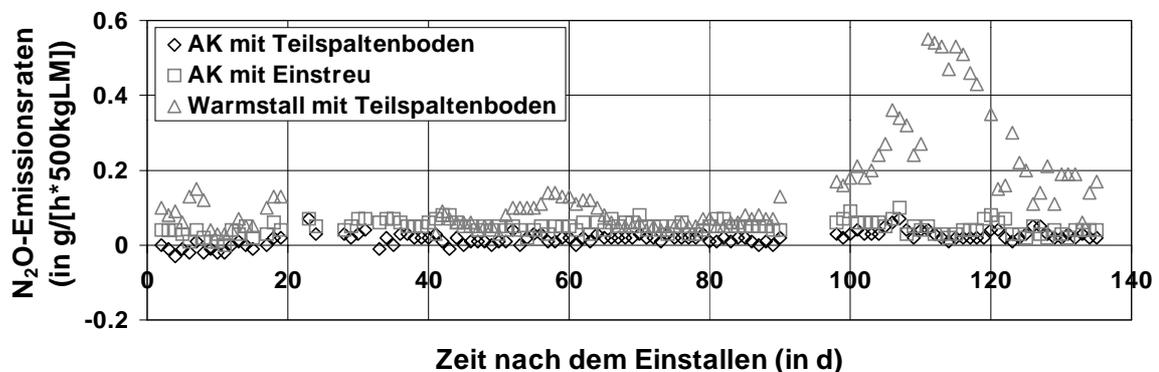


Abbildung 72: N₂O-Emissionsraten bezogen auf 500 kg Lebendmasse (LM) während des Mastdurchgangs 5 vom 16.6.99 - 30.10.99 in den drei untersuchten Haltungssystemen

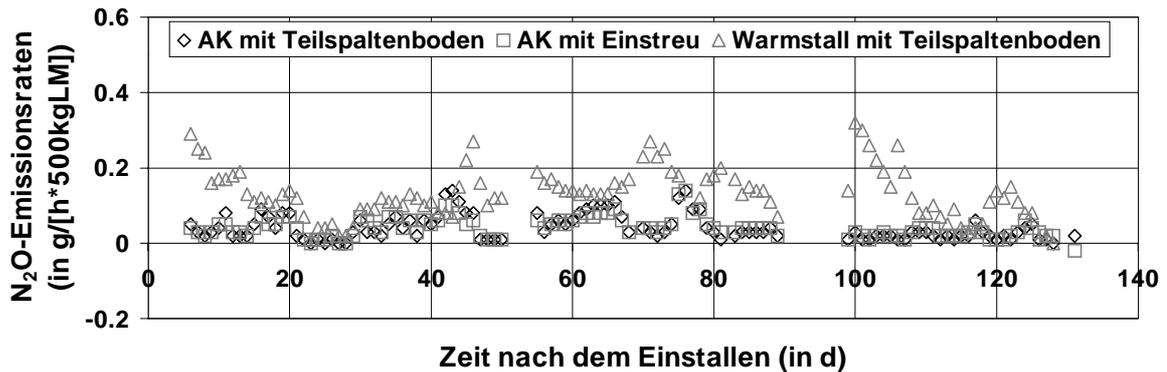


Abbildung 73: N₂O-Emissionsraten bezogen auf 500 kg Lebendmasse (LM) während des Mastdurchgangs 6 vom 11.11.99 - 20.3.00 in den drei untersuchten Haltungssystemen

In den Außenklima-Versuchsabteilungen können wegen der ansonsten negativen N₂O-Konzentrationsdifferenzen nur für den Mastdurchgang 5 (Sommer) für das Außenklima-Versuchsabteil mit Einstreu N₂O-Emissionsraten von 0,05 g/(h*500 kg LM) angegeben werden. Im Warmstall werden für Mastdurchgang 5 (Sommer) und 6 (Winter) Emissionsraten von 0,15 bzw. 0,13 g/(h*500 kg LM) errechnet. Die mittleren N₂O-Emissionsraten während der übrigen Zeiträume können nicht herangezogen werden.

Zusammenfassend sind in Tabelle 35 die Mittelwerte, Minimal- und Maximalwerte der N₂O-Emissionsraten aus den drei untersuchten Versuchsabteilungen während der drei Mastdurchgänge dargestellt.

Tabelle 35: Mittelwerte, Minimal- und Maximalwerte der Tagesmittelwerte der N₂O-Emissionsraten bezogen auf 500 kg LM während der drei untersuchten Mastdurchgänge

Mast-durch-gang		AK mit Teilspal-tenboden	AK mit Einstreu	Warmstall mit Teilspaltenboden
		N ₂ O-Emissionsraten		
4	Mittelwert (in g/(h*500 kg LM))	0,00	0,01	0,03
	Min (in g/(h*500 kg LM))	-0,04	-0,03	-0,05
	Max (in g/(h*500 kg LM))	0,05	0,06	0,21
	n	66	65	75
5	Mittelwert (in g/(h*500 kg LM))	0.02	0.05	0.15
	Min (in g/(h*500 kg LM))	-0.03	0.00	0.03
	Max (in g/(h*500 kg LM))	0.07	0.10	1.02
	n	119	119	105
6	Mittelwert (in g/(h*500 kg LM))	0.04	0.04	0.13
	Min (in g/(h*500 kg LM))	0.00	-0.02	0.00
	Max (in g/(h*500 kg LM))	0.14	0.14	0.32
	n	109	109	106

Bei den N₂O-Emissionsraten aus den Außenklima-Versuchsabteilungen ist davon auszugehen, dass sie maximal so hoch liegen wie die für den Warmstall mit Teilspaltenboden gemessenen Emissionsraten. Generell ist bei einstreulosen Systemen und Haltungssystemen mit

geringen Einstreumengen wie in diesem Versuch mit einem geringen N_2O -Bildungspotential zu rechnen. Dies belegen auch die aus der Literatur für Vollspaltenbodenställe angegebenen Emissionsraten in Abbildung 8. Für Mastschweinställe nach dem Nürtinger-System werden N_2O -Emissionsraten von 0,181 - 0,293 g/(h*500 kg LM) (BREHME, 1997) und von 0,115 und 0,157 g/(h*500 kg LM) (NIEBAUM ET AL., 2001) im Winter angegeben. Diese liegen höher als die eigenen Ergebnisse, aber noch im Bereich des für Warmställe mit Vollspaltenboden angegebenen Bereichs (vgl. Abbildung 8).

6.1.5.4 Kohlendioxid

In den folgenden Abbildungen (Abbildung 74, Abbildung 75, Abbildung 76) sind die Verläufe der Tagesmittelwerte der CO_2 -Emissionsraten bezogen auf 500 kg LM aus den drei Versuchsabteilungen während der drei Mastdurchgänge (4, 5 und 6) dargestellt.

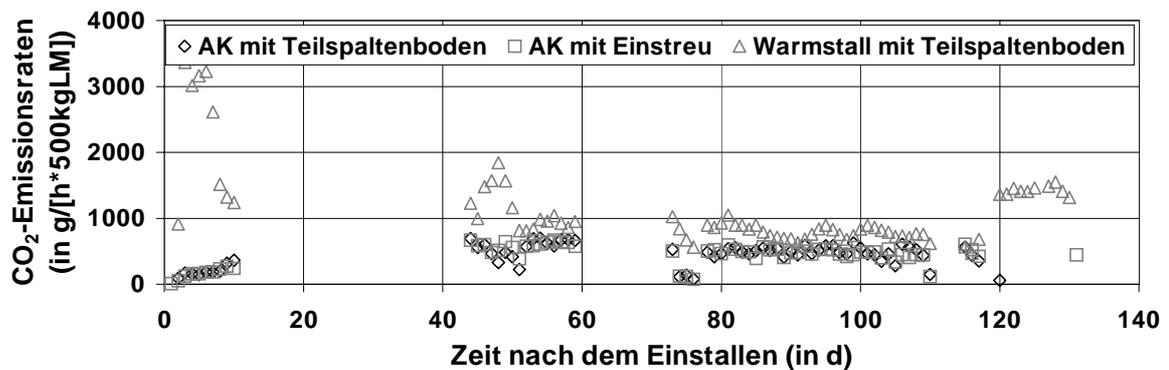


Abbildung 74: CO_2 -Emissionsraten bezogen auf 500 kg Lebendmasse (LM) während des Mastdurchgangs 4 vom 1.2.99 - 10.6.99 in den drei untersuchten Haltungssystemen

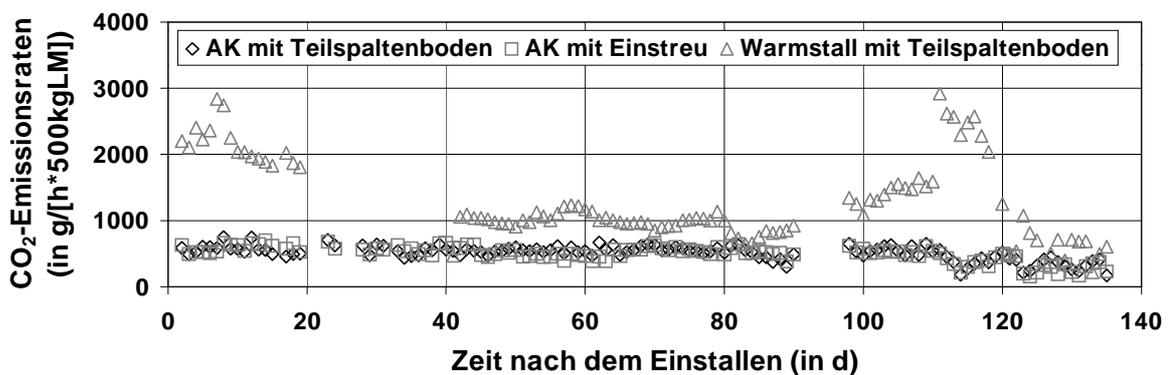


Abbildung 75: CO_2 -Emissionsraten bezogen auf 500 kg Lebendmasse (LM) während des Mastdurchgangs 5 vom 16.6.99 - 30.10.99 in den drei untersuchten Haltungssystemen

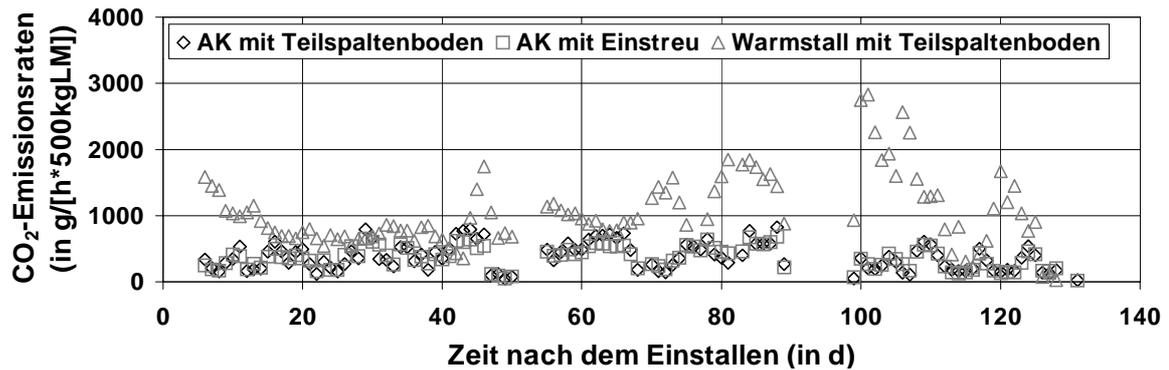


Abbildung 76: CO₂-Emissionsraten bezogen auf 500 kg Lebendmasse (LM) während des Mastdurchgangs 6 vom 11.11.99 - 20.3.00 in den drei untersuchten Haltungssystemen

Auch bei den CO₂-Emissionsraten ist bei den beiden Außenklima-Versuchsabteilungen zu erkennen, dass deren Emissionsraten ungefähr gleich hoch sind und während aller Mastdurchgänge deutlich unter denen des Warmstalls liegen. Wie bereits bei den NH₃- und CH₄-Emissionsraten sind die CO₂-Emissionsraten während des Mastdurchgangs 5 mit 1313 g/(h*500 kg LM) im Warmstall und 510 bzw. 498 g/(h*500 kg LM) im Außenklima-Versuchsabteil mit Teilspaltenboden bzw. mit Einstreu am höchsten (Tabelle 36). Während des Mastdurchgangs 6 (Winter) liegen die CO₂-Emissionsraten in den drei Versuchsabteilungen am niedrigsten: 1053 g/(h*500 kg LM) im Warmstall, 378 g/(h*500 kg LM) im Außenklima-Versuchsabteil mit Teilspaltenboden und 363 g/(h*500 kg LM) im Außenklima-Versuchsabteil mit Einstreu. Der Mastdurchgang 4 nimmt eine Mittelstellung ein.

Im Gegensatz zu den Verläufen der Tagesmittelwerte der NH₃- und CH₄-Emissionsraten kann bei den CO₂-Emissionsraten kaum ein Anstieg der Emissionsrate von Beginn des Mastdurchgangs bis zum ersten Ausställen (ca. 90.Tag) in den beiden Außenklima-Versuchsabteilungen erkannt werden.

Zusammenfassend sind die Mittelwerte, Minimal- und Maximalwerte der CO₂-Emissionsraten aus den drei untersuchten Versuchsabteilungen während der drei Mastdurchgänge in Tabelle 36 dargestellt.

Tabelle 36: Mittelwerte, Minimal- und Maximalwerte der Tagesmittelwerte der CO₂-Emissionsraten bezogen auf 500 kg LM während der drei untersuchten Mastdurchgänge

Mast-durch-gang		AK mit Teilspal-tenboden	AK mit Einstreu	Warmstall mit Teilspaltenboden
		CO ₂ -Emissionsraten		
4	Mittelwert (in g/(h*500 kg LM))	438	444	1114
	Min (in g/(h*500 kg LM))	56	52	470
	Max (in g/(h*500 kg LM))	699	671	3366
	n	66	65	75
5	Mittelwert (in g/(h*500 kg LM))	510	498	1313
	Min (in g/(h*500 kg LM))	167	157	221
	Max (in g/(h*500 kg LM))	750	700	4571
	n	119	119	105
6	Mittelwert (in g/(h*500 kg LM))	378	363	1053
	Min (in g/(h*500 kg LM))	26	16	27
	Max (in g/(h*500 kg LM))	826	683	2828
	n	109	109	106

Gemessene CO₂-Emissionsraten aus Mastschweineställen sind in der Literatur kaum dokumentiert. Für Außenklimaställe für Mastschweine nach dem Nürtinger-System gibt NIE-BAUM ET AL. (2001) CO₂-Emissionsraten von 0,590 und 0,735 kg/(h*500 kg LM) im Winter bzw. von 0,710 und 0,680 kg/(h*500 kg LM) im Sommer an. Diese liegen höher als die eigenen Ergebnisse aus den Außenklima-Versuchsabteilungen, jedoch noch deutlich unter denen des Warmstalls.

6.1.5.4.1 Vergleich der CO₂-Emissionsraten mit CO₂-Produktionsmodellen aus der Literatur

Aus der Betrachtung der CO₂-Emissionsraten der drei Versuchsabteile wird deutlich, dass sich die CO₂-Emissionsraten trotz gleichen Tierbesatzes, gleicher Gewichtsklassen und gleicher Fütterung von Haltungssystem zu Haltungssystem unterscheiden – die Unterschiede zwischen den beiden Außenklima-Versuchsabteilungen sind nur gering, der zum Warmstall mit Teilspaltenboden jedoch deutlich. Die Folgerung daraus ist, dass die Anwendung der CO₂-Bilanz zur Volumenstrombestimmung nicht unproblematisch ist, da je nach Haltungssystem unterschiedlich große Mengen an CO₂ auch aus den Exkrementen gebildet werden können. Zur Veranschaulichung dieses Ergebnisses werden in Abbildung 77 und Abbildung 78 die gemessenen CO₂-Emissionen der nach verschiedenen Modellen berechneten CO₂-Produktion der Mastschweine gegenübergestellt.

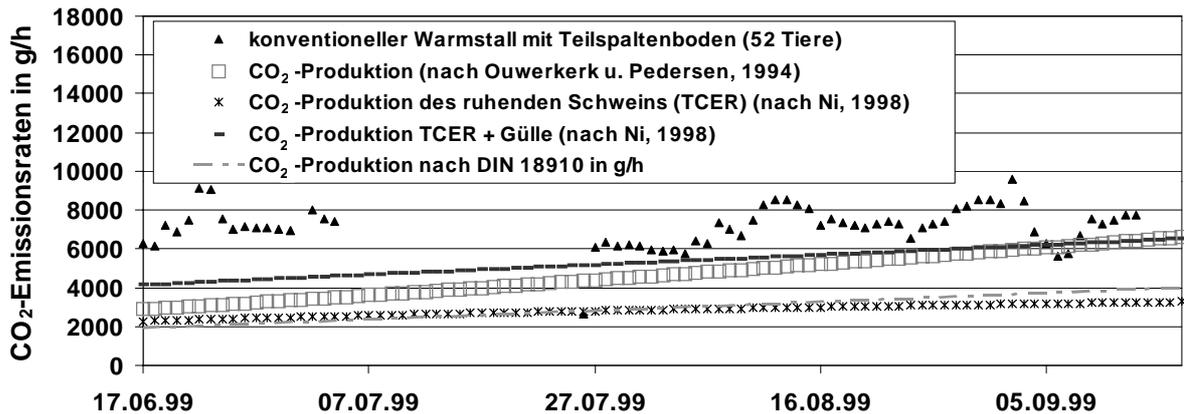


Abbildung 77: CO₂-Emissionsrate aus dem Warmstall mit Teilspaltenboden während Mastdurchgang 5 (Sommer) und berechnete CO₂-Produktion verschiedener Modelle

In Abbildung 77 ist zu erkennen, dass die im Warmstall mit Teilspaltenboden gemessene CO₂-Emission von 52 Mastschweinen in g/h deutlich höher liegt als die nach DIN 18910, OUWERKERK U. PEDERSEN (1994) und nach NI (1998) berechnete CO₂-Produktion der Tiere. Hierbei ist NI (1998) der einzige Autor, der in eine CO₂-Produktion der Tiere und eine CO₂-Produktion aus der im Stall gelagerten Gülle unterscheidet.

In Abbildung 78 werden die in den beiden Außenklima-Versuchsabteilungen gemessenen CO₂-Emissionen von 64 Mastschweinen während des Mastdurchgangs 5 (Sommer) mit den o. g. Modellen zur CO₂-Produktion verglichen.

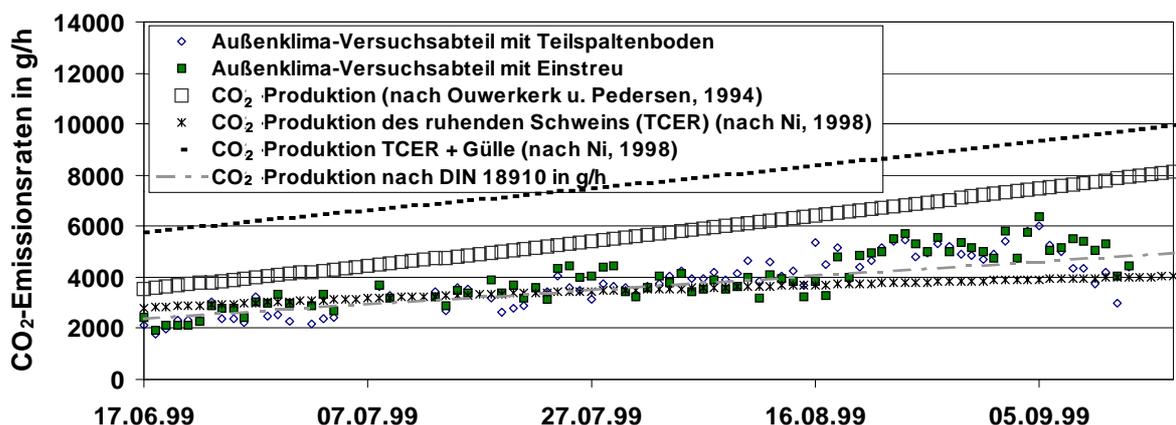


Abbildung 78: CO₂-Emissionsrate aus den beiden Außenklima-Versuchsabteilungen mit Teilspaltenboden und mit Einstreu während Mastdurchgang 5 (Sommer) und berechnete CO₂-Produktion verschiedener Modelle

Die gemessenen CO₂-Emissionen in g/h liegen unter denen des Modells von OUWERKERK UND PEDERSEN (1994) und unter denen von NI (1998). Sie stimmen jedoch gut mit der in der DIN 18910 und der von NI (1998) für das ruhende Tier (TCER) angegebenen CO₂-

Produktion überein. Generell belegen die beiden Abbildungen die in Abschnitt 2.4.4 dargelegten Erkenntnisse von Ni (1998), dass ein erheblicher Anteil der CO₂-Produktion im Stall aus den Exkrementen gebildet wird. Die Höhe der CO₂-Produktion aus den Exkrementen ist, wie hier dargestellt, für die verschiedenen Haltungssysteme unterschiedlich groß und unterliegt verschiedenen Einflussfaktoren. Von einer Anwendung der CO₂-Bilanzmethode zur Berechnung des Abluftvolumenstroms aus dem Stall ist somit abzusehen.

6.1.5.5 Wasser

In den folgenden Abbildungen (Abbildung 79, Abbildung 80, Abbildung 81) sind die Verläufe der Tagesmittelwerte der H₂O-Emissionsraten bezogen auf 500 kg LM aus den drei Versuchsabteilungen während der drei Mastdurchgänge (4, 5 und 6) dargestellt.

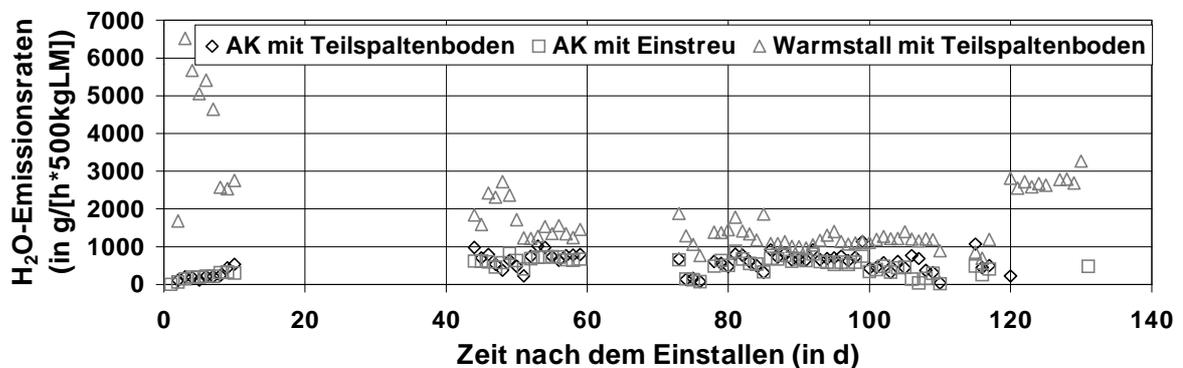


Abbildung 79: H₂O-Emissionsraten bezogen auf 500 kg Lebendmasse (LM) während des Mastdurchgangs 4 vom 1.2.99 - 10.6.99 in den drei untersuchten Haltungssystemen

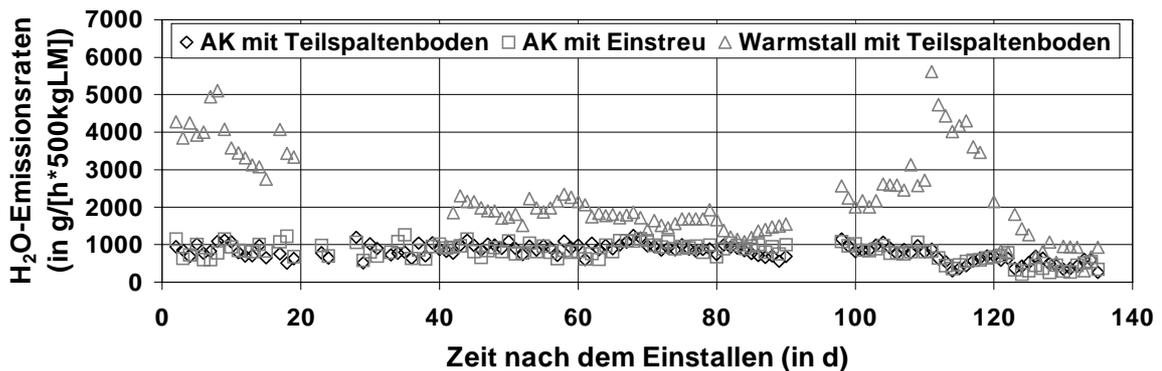


Abbildung 80: H₂O-Emissionsraten bezogen auf 500 kg Lebendmasse (LM) während des Mastdurchgangs 5 vom 16.6.99 - 30.10.99 in den drei untersuchten Haltungssystemen

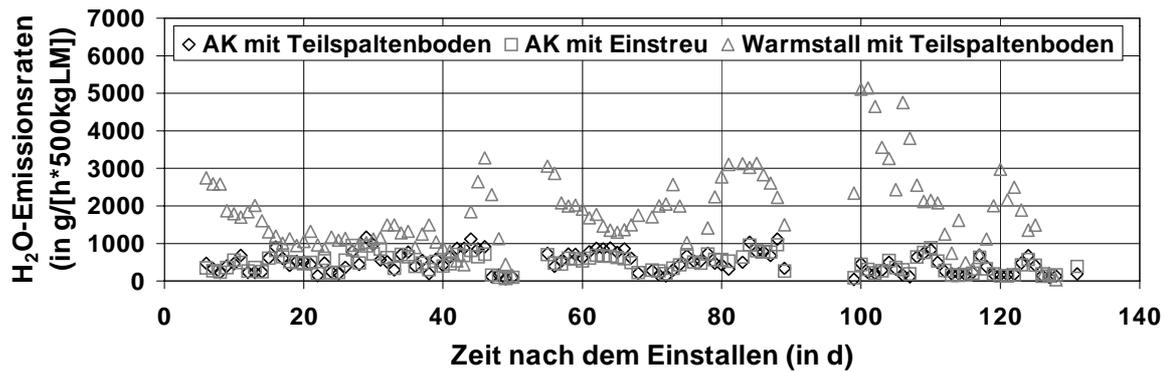


Abbildung 81: H₂O-Emissionsraten bezogen auf 500 kg Lebendmasse (LM) während des Mastdurchgangs 6 vom 11.11.99 - 20.3.00 in den drei untersuchten Haltungssystemen

Auch bei H₂O sind die Emissionsraten der beiden Außenklima-Versuchsabteilungen ungefähr gleich hoch und liegen während aller Mastdurchgänge deutlich unter denen des Warmstalls. Die H₂O-Emissionsraten während des Mastdurchgangs 5 sind mit 2298 g/(h*500 kg LM) im Warmstall und 802 bzw. 803 g/(h*500 kg LM) im Außenklima-Versuchsabteil mit Teilspaltenboden bzw. mit Einstreu am höchsten (Tabelle 37). Während des Mastdurchgangs 6 (Winter) liegen die H₂O-Emissionsraten in den beiden Außenklima-Versuchsabteilungen mit 480 g/(h*500 kg LM) im Außenklima-Versuchsabteil mit Teilspaltenboden und 466 g/(h*500 kg LM) im Außenklima-Versuchsabteil mit Einstreu am niedrigsten. Die H₂O-Emissionsraten im Warmstall sind während Mastdurchgang 4 mit 1864 g/(h*500 kg LM) annähernd genauso hoch wie während Mastdurchgang 6 mit 1813 g/(h*500 kg LM).

Bei den Verläufen der Tagesmittelwerte der H₂O-Emissionsraten aus den beiden Außenklima-Versuchsabteilungen kann im Verlauf der Mastdurchgänge ein leichter Anstieg der durchschnittlichen Emissionsrate von Mastbeginn bis zum ersten Ausställen beobachtet werden.

Zusammenfassend sind die Mittelwerte, Minimal- und Maximalwerte der H₂O-Emissionsraten aus den drei untersuchten Versuchsabteilungen während der drei Mastdurchgänge in Tabelle 37 dargestellt.

Tabelle 37: Mittelwerte, Minimal- und Maximalwerte der Tagesmittelwerte der H₂O-Emissionsraten bezogen auf 500 kg LM während der drei untersuchten Mastdurchgänge

Mast-durch-gang		AK mit Teilspal- tenboden	AK mit Einstreu	Warmstall mit Teilspaltenboden
		H ₂ O-Emissionsraten		
4	Mittelwert (in g/(h*500 kg LM))	561	481	1864
	Min (in g/(h*500 kg LM))	37	24	692
	Max (in g/(h*500 kg LM))	1138	883	6517
	n	66	65	75
5	Mittelwert (in g/(h*500 kg LM))	802	803	2298,2
	Min (in g/(h*500 kg LM))	258	204	304
	Max (in g/(h*500 kg LM))	1236	1258	8163
	n	119	119	105
6	Mittelwert (in g/(h*500 kg LM))	480	466	1813
	Min (in g/(h*500 kg LM))	47	68	34
	Max (in g/(h*500 kg LM))	1167	967	5145
	n	109	109	106

*Fazit: Die Emissionsraten aus dem Warmstall mit Teilspaltenboden liegen für alle untersuchten Gase (NH₃, CH₄, N₂O, CO₂, H₂O) deutlich über denen der beiden Außenklima-Versuchsabteile mit Teilspaltenboden bzw. mit Einstreu. Am auffälligsten ist dieser Unterschied bei den CH₄-Emissionsraten, bei denen der Mittelwert der Emissionsraten aus dem Warmstall während des Mastdurchgangs 5 (Sommer) mit 31,9 g/(h*500 kg LM) um den Faktor 10 höher ist als der der beiden Außenklima-Versuchsabteile.*

*Für NH₃ beträgt der Unterschied während Mastdurchgang 4 (Frühjahr) und 5 (Sommer) ca. Faktor 3; im Winter (Mastdurchgang 6) beträgt der Unterschied wegen der hier in den beiden Außenklima-Versuchsabteilen (mit Teilspaltenboden bzw. mit Einstreu) mit 0,9 bzw. 1,1 g/(h*500 kg LM) geringen Emissionsrate ungefähr Faktor 10. Im Vergleich zu NH₃-Emissionsraten aus der Literatur liegen die im Warmstall mit Teilspaltenboden gemessenen NH₃-Emissionsraten deutlich darüber. Gründe hierfür sind in der nicht optimalen Luftführung und Verkotung der planbefestigten Fläche, sowie in der nicht RP-optimierten Futtermitteln zu sehen. Der Vergleich der gemessenen NH₃-Emissionsraten mit den nach einem Modell von Ni (1998) berechneten ergibt eine Verringerung der berechneten NH₃-Emissionsraten um 33 – 55 %. Das bedeutet, dass die gemessenen NH₃-Emissionsraten aus den Außenklima-Versuchsabteilen auch im Vergleich zu den nach dem Modell von Ni(1998) für einen Warmstall mit Teilspaltenboden berechneten NH₃-Emissionsraten niedriger sind.*

Auch die CO₂-Emissionsraten aus den drei Versuchsabteilen unterscheiden sich, obwohl Tiermaterial, Alter und Fütterung gleich sind. Der Vergleich der gemessenen CO₂-Emissionsraten in den drei untersuchten Haltungssystemen während eines Mastdurchgangs mit verschiedenen CO₂-Produktionsmodellen belegt dies. Folglich kann die CO₂-Bilanzmethode zur Volumenstrombestimmung, die von unter diesen Bedingungen gleicher CO₂-Produktion ausgeht, nicht angewandt werden, wenn verschiedene Haltungssysteme miteinander verglichen werden. Auch die absolute Höhe der CO₂-Produktion wird mit dieser Methode falsch eingeschätzt.

6.2 Quantifizierung der Einflussfaktoren auf die Emissionsraten

Die Quantifizierung der Einflussparameter auf die Höhe der Entstehung und Freisetzung von Schadgasen leitet sich aus dem in Abschnitt 2.5 dargestellten Modell ab, in dem die verschiedenen Einflusskomplexe auf die Gasemissionen im Stall im Allgemeinen dargestellt sind. Ni (1998) berechnet sein Modell (siehe Abschnitt 6.1.5.1.2) mit *Temperatur*, *Gesamttiergewicht* und *Abluftvolumenstrom* als Haupteinflussparameter auf die Höhe der NH₃-Emissionsrate.

Die verschiedenen Faktoren haben unterschiedlich großen Einfluss auf die Emissionsraten der verschiedenen Gase. So werden im Folgenden die Korrelationskoeffizienten der Einflussfaktoren auf die einzelnen Gase während der drei Mastdurchgänge 4-6 für die beiden Außenklima-Versuchsabteile (AKt und AKe) zusammen und den Warmstall mit Teilspaltenboden dargestellt, um die für die eigenen Untersuchungen relevanten Einflussparameter zu bestimmen und anschließend in dem Modell einzusetzen.

In der folgenden Tabelle (Tabelle 38) sind die Korrelationskoeffizienten der unterschiedlichen Einflussparameter auf die Emissionsraten in g/h für NH₃, CH₄, N₂O, CO₂ und H₂O in den beiden Außenklima-Versuchsabteilen dargestellt. Die Korrelation findet mit den Tagesmittelwerten der Emissionsraten in g/h bis zum ersten Ausstallen aus dem jeweiligen Versuchsabteil statt, da bis hier wegen der Konstanz der Tierzahl mit eindeutigeren Ergebnissen zu rechnen ist.

Deutlich zu erkennen ist, dass sowohl die Dauer des Mastdurchgangs, ausgedrückt in der Variablen „Zeit nach dem Einstallen (t)“, „Gesamttiergewicht“ und „Einzeltiergewicht“ als auch die verschiedenen Temperaturen („Temperatur in der Abluft (T)“, „Temperatur in der Zuluft“, „Stalltemperatur in 6 m Höhe“, „Stalltemperatur in 2 m Höhe“, „Stalltemperatur in 0,5 m Höhe“) an den unterschiedlichen Orten sowie der „Abluftvolumenstrom (V)“ gut mit den Emissionsraten korrelieren, jedoch für die verschiedenen Gase unterschiedlich hoch sind. Signifikante Korrelationskoeffizienten werden auch mit den Außenklima-Parametern („Windgeschwindigkeit“, „Außentemperatur“, „Relative Feuchte (außen)“ und „Globalstrahlung“) erreicht, die sich jedoch auch in den signifikanten Korrelationskoeffizienten zu den Stall-Parametern Temperatur und Abluftvolumenstrom (**fett** in Tabelle 38) wiederfinden und wegen des sich daraus ergebenden hohen Kollinearitätsfaktors keine zusätzliche Erklärung des Modells liefern. Diese Außenklimaparameter werden deshalb im

Modell nicht eingesetzt. Die ausführliche Korrelationsmatrix zu Tabelle 38 findet sich im Anhang, Tabelle 56.

Tabelle 38: Korrelationskoeffizienten der Einflussparameter und der Emissionsraten (in g/h) von NH₃, CH₄, N₂O, CO₂ und H₂O während aller drei Mastdurchgänge in den beiden Außenklima-Versuchsabteilen (AKt und AKe)

	NH ₃ -Emissionsrate in g/h	CH ₄ -Emissionsrate in g/h	N ₂ O-Emissionsrate in g/h	CO ₂ -Emissionsrate in g/h	H ₂ O-Emissionsrate in g/h	Zeit nach dem Einstallen in d (t)	Gesamttiergewicht in kg	Einzeltiergewicht in kg	Temperatur in der Abluft in C (T)	Temperatur in der Zuluft in °C	Abluftvolumenstrom in m ³ /h (V)	Stalltemperatur in 6 m Höhe in °C	Stalltemperatur in 2 m Höhe in °C	Stalltemperatur in 0,5 m Höhe in °C	Relative Feuchte (innen) in %	Windgeschwindigkeit in m/s	Außentemperatur in °C	Relative Feuchte (außen) in %	Globalstrahlung in W/m ²
Zeit nach dem Einstallen in d (t)	.532**	.415**	.334**	.700**	.659**	1.000													
Gesamttiergewicht in kg	.390**	.282**	.292**	.683**	.574**	.968**	1.000												
Einzeltiergewicht in kg	.418**	.306**	.275**	.686**	.584**	.973**	.999**	1.000											
Temperatur in der Abluft in C (T)	.757**	.816**	-.234**	.251**	.502**	.123*	-.017	.003	1.000										
Temperatur in der Zuluft in °C	.728**	.793**	-.303**	.203**	.454**	.084	-.054	-.033	.989**	1.000									
Abluftvolumenstrom in m ³ /h (V)	.674**	.727**	-.037	.665**	.696**	.330**	.277**	.289**	.656**	.674**	1.000								
Stalltemperatur in 6 m Höhe in °C	.345**	.513**	.105	.113	.240*	-.103	-.193	-.198*	.900**	.884**	.360**	1.000							
Stalltemperatur in 2 m Höhe in °C	.050	.256	-.031	-.330*	-.174	-.282*	-.440**	-.441**	.891**	.861**	-.305*	.952**	1.000						
Stalltemperatur in 0,5 m Höhe in °C	.042	.248	-.010	-.333*	-.194	-.279*	-.436**	-.437**	.881**	.854**	-.285*	.937**	.993**	1.000					
Relative Feuchte (innen) in %	-.082	.024	-.201	-.269*	-.146	-.283**	-.374**	-.373**	.363**	.406**	-.003	.339**	.472**	.463**	1.000				
Windgeschwindigkeit in m/s	-.283**	-.283**	-.270**	-.259**	-.328**	.060	.099*	.094	-.255**	-.165**	-.144*	-.632**	-.622**	-.608**	-.387**	1.000			
Relative Feuchte (außen) in %	.723**	.786**	-.329**	.190**	.439**	.042	-.042	-.021	.983**	.992**	.677**	.897**	.911**	.906**	.384**	-.166**	1.000		
Relative Feuchte (außen) in %	-.462**	-.524**	.263**	-.222**	-.394**	-.103*	-.066	-.076	-.611**	-.607**	-.462**	-.485**	-.478**	-.447**	.124	-.002	-.586**	1.000	
Globalstrahlung in W/m ²	.551**	.606**	-.219**	.247**	.388**	.000	-.015	-.002	.716**	.690**	.560**	.693**	.575**	.546**	.028	-.329**	.691**	-.760**	1.000

** Die Korrelation ist auf dem Niveau von 0,01 (2-seitig) signifikant.

* Die Korrelation ist auf dem Niveau von 0,05 (2-seitig) signifikant.

In Tabelle 39 sind die Korrelationskoeffizienten der unterschiedlichen Einflussparameter auf die Emissionsraten in g/h für NH₃, CH₄, N₂O, CO₂ und H₂O im Warmstall mit Teilspaltenboden dargestellt.

Zu erkennen sind auch hier wieder die oben bereits beschriebenen Zusammenhänge. Ein Unterschied zu den Korrelationskoeffizienten bei den Außenklima-Versuchsabteilungen ergibt sich für die der Außenklima-Parameter; beim Warmstall mit Teilspaltenboden ist keine Korrelation zwischen der Windgeschwindigkeit und dem Abluftvolumenstrom zu erkennen (Tabelle 39, grau hinterlegt), die Korrelationen mit den übrigen Außenklima-Parametern und den Stall-Parametern ist ähnlich hoch. Die ausführliche Korrelationsmatrix findet sich im Anhang, Tabelle 57.

Tabelle 39: Korrelationskoeffizienten der Einflussparameter und der Emissionsraten von NH₃, CH₄, N₂O, CO₂ und H₂O während aller drei Mastdurchgänge im Warmstall mit Teilspaltenboden

	NH ₃ -Emissionsrate in g/h	CH ₄ -Emissionsrate in g/h	N ₂ O-Emissionsrate in g/h	CO ₂ -Emissionsrate in g/h	H ₂ O-Emissionsrate in g/h	Zeit nach dem Einstellen in d (t)	Gesamtteriergewicht in kg	Einzelteriergewicht in kg	Temperatur in der Abluft in C (T)	Temperatur in der Zuluft in °C	Abluftvolumen- strom in m ³ /h (V)	Windgeschwin- digkeit in m/s	Außentemperatur in °C	Relative Feuchte (außen) in %	Globalstrahlung in W/m ²
Zeit nach dem Einstellen in d (t)	.352**	-.098	.148*	.383**	.290**	1.000									
Gesamtteriergewicht in kg	.374**	-.104	.123	.396**	.302**	.997**	1.000								
Einzelteriergewicht in kg	.378**	-.095	.106	.387**	.294**	.996**	.999**	1.000							
Temperatur in der Abluft in C (T)	.497**	.743**	-.121	.092	.155*	.126	.130	.146*	1.000						
Temperatur in der Zuluft in °C	.562**	.699**	-.328**	.156*	.209**	.127	.135*	.155*	.917**	1.000					
Abluftvolumen- strom in m ³ /h (V)	.723**	.375**	-.040	.538**	.516**	.693**	.719**	.731**	.555**	.641**	1.000				
Windgeschwin- digkeit in m/s	.098	-.179*	.167*	.263**	.241**	.095	.088	.080	-.363**	-.273**	.063	1.000			
Außentemperatur in °C	.564**	.667**	-.345**	.175*	.215**	.071	.153*	.173*	.881**	.987**	.655**	-.163*	1.000		
Relative Feuchte (außen) in %	-.278**	-.399**	.359**	-.094	-.116	-.131*	-.148*	-.157*	-.466**	-.603**	-.425**	-.001	-.599**	1.000	
Globalstrahlung in W/m ²	.316**	.373**	-.474**	.069	.073	.069	.107	.123	.570**	.707**	.404**	-.309**	.686**	-.772**	1.000

** Die Korrelation ist auf dem Niveau von 0,01 (2-seitig) signifikant.

* Die Korrelation ist auf dem Niveau von 0,05 (2-seitig) signifikant.

Die Betrachtung der Einflussfaktoren ist relevant für die anschließende Regressionsanalyse der Haupteinflussfaktoren sowie die Gesamtbetrachtung in einem allgemeinen linearen Modell. Hier wird der Schwerpunkt auf die Analyse der Emissionsraten in **g/(h*500 kg LM)** gelegt, da diese standardisierte Größe die beste Vergleichbarkeit der Versuchsabteile bietet.

Als Einflussfaktoren werden in den folgenden Abschnitten die Parameter

- Zeit nach dem Einstellen in d (t_i , mit $i=AKt$ oder AKe oder kW),
- Ablufttemperatur in ° C (T_i , mit $i=AKt$ oder AKe oder kW) und
- Abluftvolumenstrom in m^3/h (V_i , mit $i=AKt$ oder AKe oder kW)

ausgewählt. Die Regressionsanalyse erfolgt mit dem Statistik-Programm SPSS 10.0 zur Einschätzung der Einflussparameter am Beispiel der NH_3 -Emissionsrate zunächst einfaktoriell für die ausgewählten Parameter, jeweils für alle Mastdurchgänge und Versuchsabteile.

6.2.1 Ammoniak

Auf die Ammoniakemissionsrate werden nachfolgend die Regressionsgeraden für Einflüsse der Ablufttemperatur, des Abluftvolumenstroms und der Zeit nach dem Einstellen ermittelt. Es ist anzumerken, dass der real in den einzelnen Versuchsabteilen gemessene Abluftvolumenstrom in die Modellberechnungen einfließt. Für die Außenklima-Versuchsabteile bedeutet das, dass der Volumenstrom bei 64 Mastschweinen in einem „Abteil“ mit 5,2 m Länge und 11,0 m Breite sowie 3,5 m Traufhöhe ermittelt wurde. Da die abhängige Größe der Regression (hier: NH_3 -Emissionsrate) auf die Lebendmasse von 500 kg standardisiert ist, muss für größere Ställe keine Hochrechnung des Volumenstroms erfolgen, sondern lediglich der für den Stall geschätzte Volumenstrom auf diese 64 Tiere (entsprechend 4 Buchten à 16 Tieren) bezogen werden.

6.2.1.1 Temperatur

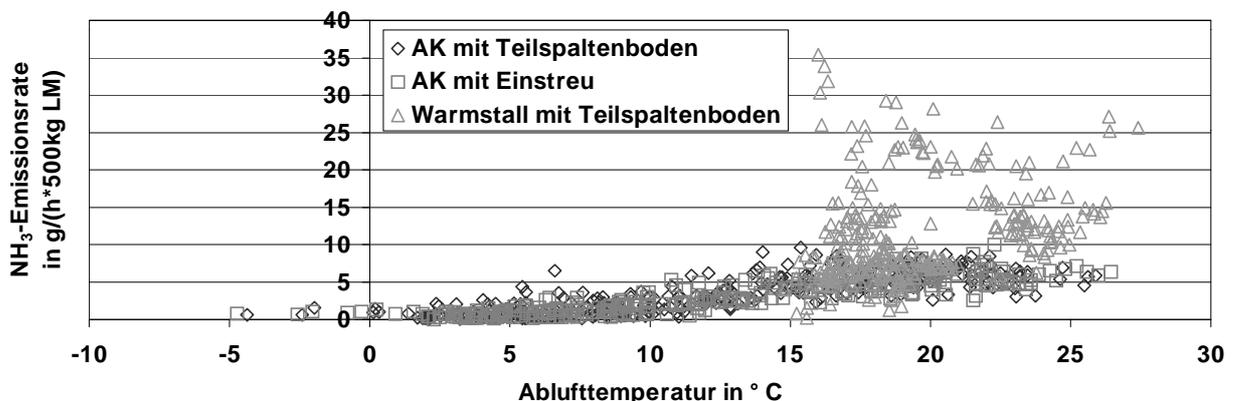
In Tabelle 40 sind die einfaktoriellen Regressionen der NH_3 -Emissionsraten mit den Ablufttemperaturen dargestellt. Die Gleichungen gelten für jeweils ein Versuchsabteil und die angegebenen Mastdurchgänge.

Tabelle 40: Regressionsgeraden für die NH₃-Emissionsraten und die Ablufttemperatur

Versuchsabteil	Mastdurchgang	Regressionsgleichung	Bestimmtheitsmaß (R ²)
AKt	4	$E_{NH_3(T_i)} = 0,152 + 0,253^{**} T_i$	0,391 ^{**}
AKt	5	$E_{NH_3(T_i)} = 0,788 + 0,235^{**} T_i$	0,183 ^{**}
AKt	6	$E_{NH_3(T_i)} = 0,741^{**} + 0,0374 T_i$	0,035
AKe	4	$E_{NH_3(T_i)} = -0,524 + 0,247^{**} T_i$	0,658 ^{**}
AKe	5	$E_{NH_3(T_i)} = -0,733 + 0,284^{**} T_i$	0,325 ^{**}
AKe	6	$E_{NH_3(T_i)} = 0,588^{**} + 0,07085^{**} T_i$	0,194 ^{**}
KW	4	$E_{NH_3(T_i)} = 65,553^{**} - 2,966^{**} T_i$	0,341 ^{**}
KW	5	$E_{NH_3(T_i)} = 47,845^{**} - 1,382^{**} T_i$	0,216 ^{**}
KW	6	$E_{NH_3(T_i)} = 8,774 - 0,0601 T_i$	0,000
AKt	4-6	$E_{NH_3(T_i)} = -0,241 + 0,278^{**} T_i$	0,729 ^{**}
AKe	4-6	$E_{NH_3(T_i)} = -0,400 + 0,260^{**} T_i$	0,895 ^{**}
KW	4-6	$E_{NH_3(T_i)} = 0,371 + 0,544^{**} T_i$	0,059 ^{**}
AKt, AKe, KW	4-6	$E_{NH_3(T_i)} = -1,364 + 0,480 T_i$	0,392

^{**} signifikant (p<0,01) von 0 verschieden
 $E_{NH_3(T_i)}$: NH₃-Emissionsrate in Abhängigkeit der Außentemperatur (T_i)

Aus Tabelle 40 ist zu erkennen, dass für die beiden Außenklima-Versuchsabteile für die jeweils 3 Mastdurchgänge gute Zusammenhänge zwischen der Ablufttemperatur und der NH₃-Emissionsrate gefunden werden, die durch die signifikanten Bestimmtheitsmaße (R²=0,729 für AKt bzw. R²=0,895 für AKe) bestätigt werden. Für das Versuchsabteil im konventionellen Warmstall ist das Bestimmtheitsmaß sehr gering, was bedeutet, dass hier andere Einflussfaktoren größeren Einfluss auf die Höhe der NH₃-Emissionsrate nehmen. Betrachtet man Abbildung 82, so zeigt sich hier deutlich der positive Zusammenhang zwischen Ablufttemperatur und NH₃-Emissionsrate in einem Temperaturbereich von -5 °C und 27 °C für alle drei untersuchten Haltungssysteme. Auffällig sind jedoch die bereits oben erwähnten Ausreißer im konventionellen Warmstall, die auf weitere Einflussfaktoren zurückzuführen sind.

**Abbildung 82:** Einfluss der Ablufttemperatur auf die NH₃-Emissionsrate für den gesamten Untersuchungszeitraum

6.2.1.2 Volumenstrom

In Tabelle 41 sind die einfaktoriellen Regressionen der NH₃-Emissionsraten mit den Abluftvolumenströmen dargestellt. Die Gleichungen gelten für die jeweils angegebenen Versuchsabteile und Mastdurchgänge.

Tabelle 41: Regressionsgeraden für die NH₃-Emissionsraten und den Abluftvolumenstrom

Versuchsabteil	Mastdurchgang	Regressionsgleichung	Bestimmtheitsmaß (R ²)
AKt	4	$E_{NH_3(Vi)} = -0,143 + 0,0004106^{**} V_i$	0,894 ^{**}
AKt	5	$E_{NH_3(Vi)} = 4,128 + 0,0001798 V_i$	0,016
AKt	6	$E_{NH_3(Vi)} = 0,0918 + 0,0002404^{**} V_i$	0,500 ^{**}
AKe	4	$E_{NH_3(Vi)} = 0,219 + 0,0002350^{**} V_i$	0,571 ^{**}
AKe	5	$E_{NH_3(Vi)} = 5,531 + 0,0000656 V_i$	0,002
AKe	6	$E_{NH_3(Vi)} = 0,130 + 0,0002403^{**} V_i$	0,645 ^{**}
KW	4	$E_{NH_3(Vi)} = 14,051 - 0,000841 V_i$	0,017
KW	5	$E_{NH_3(Vi)} = 27,899^{**} + 0,00306^{**} V_i$	0,718 ^{**}
KW	6	$E_{NH_3(Vi)} = 3,894^{**} + 0,002203^{**} V_i$	0,663 ^{**}
AKt	4-6	$E_{NH_3(Vi)} = -0,627 + 0,0006663^{**} V_i$	0,529 ^{**}
AKe	4-6	$E_{NH_3(Vi)} = -0,285 + 0,0005238^{**} V_i$	0,484 ^{**}
KW	4-6	$E_{NH_3(Vi)} = 9,398^{**} + 0,0005917 V_i$	0,021
AKt, AKe, KW	4-6	$E_{NH_3(Vi)} = 6,342^{**} - 0,000146 V_i$	0,003
^{**} signifikant (p<0,01) von 0 verschieden $E_{NH_3(Vi)}$: NH ₃ -Emissionsrate in Abhängigkeit der Außentemperatur (V_i)			

Die größten Einflüsse auf die NH₃-Emissionsrate hat der Abluftvolumenstrom in den Außenklima-Versuchsabteilen während des Mastdurchgangs 4 (Frühjahr) und 6 (Winter). Im Sommer wird dieser Einfluss durch weitere Parameter überlagert. Auch der Einfluss auf die beiden Außenklima-Versuchsabteile während aller Mastdurchgänge zusammen ist mit deutlichen Bestimmtheitsmaßen (R²=0,529 für AKt bzw R²=0,484 für AKe) gekennzeichnet; das bedeutet, dass ca. 50 % der Varianz der NH₃-Emissionsrate durch die Varianz des Abluftvolumenstroms erklärt werden können.

Für den Warmstall mit Teilsparthenboden sind hohe signifikante Bestimmtheitsmaße während des Mastdurchgangs 5 (Sommer) und 6 (Winter) zu beobachten. Die Gesamtbetrachtung aller Mastdurchgänge und Versuchsabteile kommt zu keinem eindeutigen, volumenstromabhängigen Regressionsmodell, was auch graphisch in der folgenden Abbildung 83 dargestellt ist.

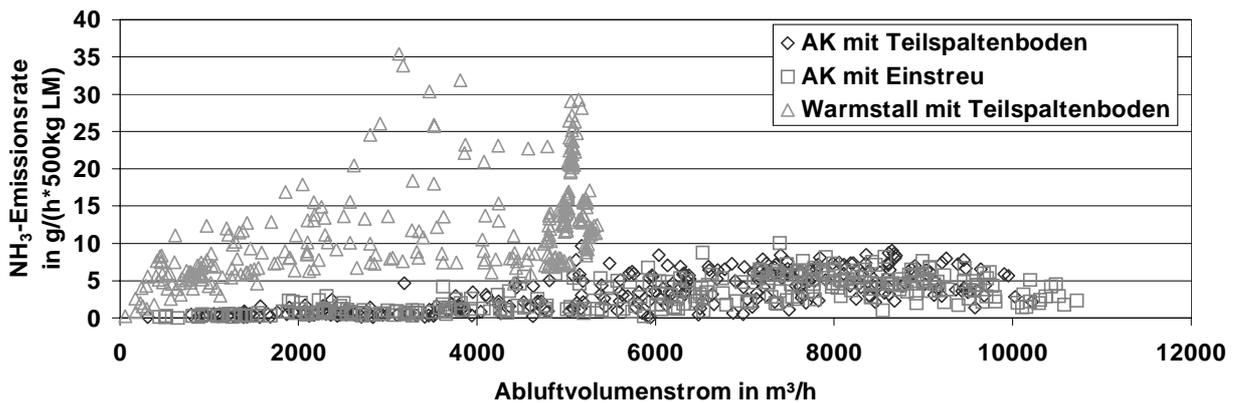


Abbildung 83: Einfluss des Abluftvolumenstroms auf die NH₃-Emissionsrate für den gesamten Untersuchungszeitraum

Die unterschiedlichen Emissionsratenniveaus sowie die differierenden Abhängigkeiten vom Abluftvolumenstrom bei den Außenklima-Versuchsabteilen und dem Warmstall mit Teilspaltenboden werden hier sichtbar.

6.2.1.3 Zeit nach dem Einstallen

In Tabelle 42 sind die einfaktoriellen Regressionen der NH₃-Emissionsraten mit der Zeit nach dem Einstallen (in Tagen) dargestellt. Die Gleichungen gelten für die jeweils angegebenen Versuchsabteile und Mastdurchgänge.

Tabelle 42: Regressionsgeraden für die NH₃-Emissionsraten und die Zeit nach dem Einstallen

Versuchsabteil	Mastdurchgang	Regressionsgleichung	Bestimmtheitsmaß (R ²)
AKt	4	$E_{NH3(t_i)} = 0,754 + 0,03149^{**} t_i$	0,283 ^{**}
AKt	5	$E_{NH3(t_i)} = 2,974^{**} + 0,05164^{**} t_i$	0,675 ^{**}
AKt	6	$E_{NH3(t_i)} = 0,607^{**} + 0,00706 t_i$	0,077
AKe	4	$E_{NH3(t_i)} = 0,171 + 0,03165^{**} t_i$	0,508 ^{**}
AKe	5	$E_{NH3(t_i)} = 3,417^{**} + 0,0347^{**} t_i$	0,349 ^{**}
AKe	6	$E_{NH3(t_i)} = 0,538^{**} + 0,009441^{**} t_i$	0,187 ^{**}
KW	4	$E_{NH3(t_i)} = 20,930^{**} - 0,165^{**} t_i$	0,476 ^{**}
KW	5	$E_{NH3(t_i)} = 24,712^{**} - 0,183^{**} t_i$	0,746 ^{**}
KW	6	$E_{NH3(t_i)} = 4,756^{**} + 0,06444^{**} t_i$	0,211 ^{**}
AKt	4-6	$E_{NH3(t_i)} = 1,527^{**} + 0,03197^{**} t_i$	0,112 ^{**}
AKe	4-6	$E_{NH3(t_i)} = 1,555^{**} + 0,02563^{**} t_i$	0,085 ^{**}
KW	4-6	$E_{NH3(t_i)} = 15,472^{**} - 0,0832^{**} t_i$	0,126 ^{**}
AKt, AKe, KW	4-6	$E_{NH3(t_i)} = 5,694^{**} - 0,00104 t_i$	0,000

^{**} signifikant (p<0,01) von 0 verschieden
 $E_{NH3(t_i)}$: NH₃-Emissionsrate in Abhängigkeit der Außentemperatur (t_i)

Signifikante Einflüsse der Zeit nach dem Einstallen auf die NH₃-Emissionsrate sind für alle untersuchten Haltungssysteme während der drei Mastdurchgänge außer für das Versuchsabteil AKt während des Mastdurchgang 6 (Winter) zu erkennen. Für die Außenklima-

Versuchsabteile bestätigt sich die auch schon bei ROM UND DAHL (1998) beobachtete positive Abhängigkeit von der Zeit nach dem Einstallen. Für den Warmstall mit Teilspaltenboden wird hier ein negativer Zusammenhang ermittelt, der auf die zu Beginn jedes der drei Mastdurchgänge wider Erwarten besonders hohen NH_3 -Emissionsraten zurückzuführen ist. Die Gründe hierfür konnten nicht ermittelt werden, sind aber wahrscheinlich im nicht optimalen Zustand dieses Versuchsabteils zu finden. Erwartet werden die in 6.1.5.1.2 beschriebenen NH_3 -Emissionsraten, die ebenfalls auf einen positiven Zusammenhang hindeuten. In Abbildung 84 werden die oben beschriebenen Zusammenhänge nochmals graphisch dargestellt.

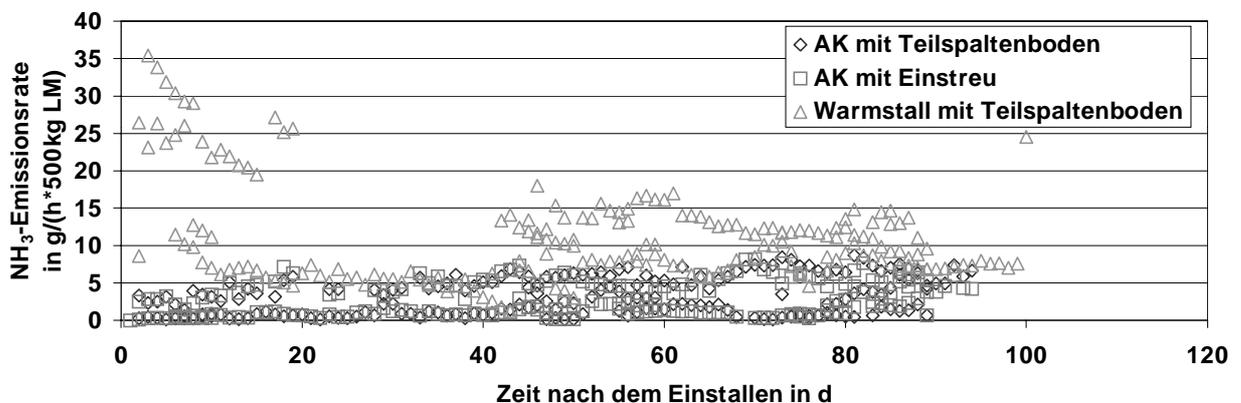


Abbildung 84: Einfluss der Zeit nach dem Einstallen auf die NH_3 -Emissionsrate für den gesamten Untersuchungszeitraum

Gezeigt werden die für die beiden Außenklima-Versuchsabteile ähnlich verlaufenden NH_3 -Emissionsraten in Abhängigkeit von der Zeit nach dem Einstallen, die jedoch je nach Mastdurchgang auf unterschiedlichen Niveaus liegen. Auch die NH_3 -Emissionsraten aus dem Warmstall mit Teilspaltenboden verlaufen analog auf unterschiedlichen Niveaus.

6.2.1.4 Haltungssystem und Mastdurchgang

Der Einfluss der fixen Faktoren Haltungssystem und Mastdurchgang wird über ein allgemeines lineares Modell ermittelt. Wie bereits in Abschnitt „Statistische Auswertung“ beschrieben, kann hierzu eine einfaktorielle Varianzanalyse auf dem Signifikanzniveau von 1 % durchgeführt werden, um trotz der unterschiedlichen Varianzen ein reales Signifikanzniveau von 5 % einzuhalten. In Tabelle 43 sind die Unterschiede zwischen den Mastdurchgängen und den Haltungssystemen dargestellt. Signifikante Unterschiede sind mit ** gekennzeichnet.

Tabelle 43: Unterschiede der NH₃-Emissionsraten zwischen den verschiedenen Haltungssystemen und Mastdurchgängen

Versuchsabteil	Versuchsabteil	Mittlere Differenz	Signifikanz	Mastdurchgang	Mastdurchgang	Mittlere Differenz	Signifikanz
AKt	AKe	.333	.353	4 (Frühjahr)	5 (Sommer)	-3.651**	.000
	KW	-8.473**	.000		6 (Winter)	1.762**	.000
AKe	AKt	-.333	.353	5 (Sommer)	4 (Frühjahr)	3.651**	.000
	KW	-8.805**	.000		6 (Winter)	5.413**	.000
KW	AKt	8.473**	.000	6 (Winter)	4 (Frühjahr)	-1.762**	.000
	AKe	8.805**	.000		5 (Sommer)	-5.413**	.000

** Die mittlere Differenz ist auf dem Niveau 1 % signifikant

Die Mittelwerte der NH₃-Emissionsraten aus den beiden Außenklima-Versuchsabteilungen mit Teilspaltenboden bzw. mit Einstreu unterscheiden sich auf dem 1 %-Signifikanzniveau nicht voneinander. Jedoch unterscheiden sich beide signifikant vom Versuchsabteil im Warmstall mit Teilspaltenboden. Ebenso unterscheiden sich die Mittelwerte der NH₃-Emissionsraten während aller drei Mastdurchgänge signifikant voneinander.

6.2.1.5 Allgemeines Lineares Modell für NH₃

In dem allgemeinen linearen Modell für NH₃ werden die oben dargestellten Einflüsse auf die Emissionsrate für die verschiedenen Haltungssysteme und Mastdurchgänge ermittelt. Der Vorteil der gemeinsamen Betrachtung aller Daten im Gegensatz zur getrennten Betrachtung bei den obigen Regressionsgleichungen ist, dass alle Einzelwerte in die Berechnung eingehen und so die statistischen Interferenzen genauer erkannt werden können (PRECHT UND KRAFT, 1993). Auch hier wird zum Signifikanzniveau von 1 % getestet, um dann sicher zum Signifikanzniveau von 5 % absichern zu können.

Wegen des untypischen Verlaufs der NH₃-Emissionsraten im Warmstall mit Teilspaltenboden, der auch in Abbildung 65 und Abbildung 66 deutlich wird, wird das allgemeine lineare Modell ausschließlich für die Außenklima-Versuchsabteile berechnet.

Als fixe Effekte gehen die Haltungssysteme (AKt, AKe) und die Mastdurchgänge (4, 5, 6) ein. Die Kovariablen sind Ablufttemperatur (T_i), Abluftvolumenstrom (V_i) und die Zeit nach dem Einstellen (t_i).

$$Y_{NH_3} = \mu + \text{Haltungssysteme } (\alpha) + \text{Mastdurchgang } (\beta) + (\gamma) t_i + (\delta)T_i + (\varepsilon)V_i + \text{Haltungssysteme} * \text{Mastdurchgang } (\alpha\beta) + (\gamma\delta) t_i * T_i + (\gamma\varepsilon)t_i * V_i + (\delta\varepsilon)T_i * V_i + (\gamma\delta\varepsilon) t_i * T_i * V_i$$

Die Mastdurchgänge stehen stellvertretend für die Jahreszeiten Frühjahr, Sommer und Winter. In Tabelle 44 sind die Mastdurchgänge und die dazugehörigen Jahreszeiten mit ihren Außentemperaturen dargestellt.

Tabelle 44: Mastdurchgänge mit dazugehörigen Jahreszeiten und Temperaturen

Mastdurchgang	Jahreszeit	Messzeitraum	Mittlere Außentemperatur in °C	Außentemperaturspanne in °C
4	Frühjahr	1.2.99-31.5.99	10,1	-4,9 – 22,8
5	Sommer	17.6.99-29.10.99	15,2	2,8 – 25,1
6	Winter	11.11.99-20.3.00	1,0	-16,6 – 10,3

Weitere Modellgrenzen für die nachfolgend dargestellten Modelle sind in Tabelle 45 dargestellt.

Tabelle 45: Modellgrenzen der Kovarianzanalyse

Kovariable	Bedeutung	Modellgrenzen	64 Mastschweine je Versuchsabteil AKt und AKe
t_i	Zeit nach dem Einstellen in d	1. – 90. Masttag	
T_i	Temperatur in der Abluft in °C	für AKt: -4,4 – 25,9 °C für AKe: -4,7 – 26,4 °C (ausführlich in Tabelle 24)	
V_i	Abluftvolumenstrom in m ³ /h	für AKt: 312 – 10222 m ³ /h für AKe: 444 – 10719 m ³ /h (ausführlich in Tabelle 30)	

Aus der Kovarianzanalyse ergibt sich für die Außenklima-Versuchsabteil mit Teilspaltenboden und mit Einstreu für die drei Mastdurchgänge das folgende Modell mit dem Bestimmtheitsmaß $R^2 = 0,880$. Die Effekte des Haltungssystems sind zur besseren Übersichtlichkeit unterstrichen, die Effekte des Mastdurchgangs sind **fett** gedruckt und die Wechselwirkungen Mastdurchgang*Haltungssystem sind **fett und unterstrichen**.

Mastdurchgang	Außenklima-Versuchsabteil mit Teilspaltenboden (AKt) - Modell_AKt
4	$Y_{NH_3} = -0,141\underline{-0,01112}\underline{-0,274} + 0,005711*t + 0,08421*T + 0,0001546*V + \underline{0,755} - 0,0005008*t*T - 0,000001444*t*V - 0,000007036*T*V + 0,0000003315*t*T*V$
5	$Y_{NH_3} = -0,141\underline{-0,01112} + \underline{1,555} + 0,005711*t + 0,08421*T + 0,0001546*V + \underline{0,627} - 0,0005008*t*T - 0,000001444*t*V - 0,000007036*T*V + 0,0000003315*t*T*V$
6	$Y_{NH_3} = -0,141\underline{-0,01112} + \underline{0} + 0,005711*t + 0,08421*T + 0,0001546*V + \underline{0} - 0,0005008*t*T - 0,000001444*t*V - 0,000007036*T*V + 0,0000003315*t*T*V$
Mastdurchgang	Außenklima-Versuchsabteil mit Einstreu (AKe) – Modell_AKe
4	$Y_{NH_3} = -0,141 + \underline{0} - \underline{0,274} + 0,005711*t + 0,08421*T + 0,0001546*V + \underline{0} - 0,0005008*t*T - 0,000001444*t*V - 0,000007036*T*V + 0,0000003315*t*T*V$
5	$Y_{NH_3} = -0,141 + \underline{0} + \underline{1,555} + 0,005711*t + 0,08421*T + 0,0001546*V + \underline{0} - 0,0005008*t*T - 0,000001444*t*V - 0,000007036*T*V + 0,0000003315*t*T*V$
6	$Y_{NH_3} = -0,141 + \underline{0} + \underline{0} + 0,005711*t + 0,08421*T + 0,0001546*V + \underline{0} - 0,0005008*t*T - 0,000001444*t*V - 0,000007036*T*V + 0,0000003315*t*T*V$

Die ausführliche Tabelle der Parameterschätzer findet sich im Anhang, Tabelle 58. Der paarweise Vergleich der Mittelwerte der NH₃-Emissionsraten beider Außenklima-Versuchsabteile ergibt, dass sich die Mittelwerte des AKt und AKe signifikant unterschei-

den (vgl. Anhang, Tabelle 59). Ebenso unterscheiden sich die Mittelwerte der Mastdurchgänge 4 und 5, sowie 5 und 6 signifikant voneinander, die Mittelwerte der Mastdurchgänge 4 und 5 hingegen nicht (vgl. Anhang, Tabelle 61).

6.2.1.5.1 Vergleich der modellierten mit den gemessenen NH_3 -Emissionsraten

In Abbildung 85 ist der Vergleich der nach den dargestellten Modellen für die NH_3 -Emissionrate aus den beiden Außenklima-Versuchsabteilungen dargestellt. Es zeigt sich die gute Übereinstimmung der gemessenen und modellierten Werte.

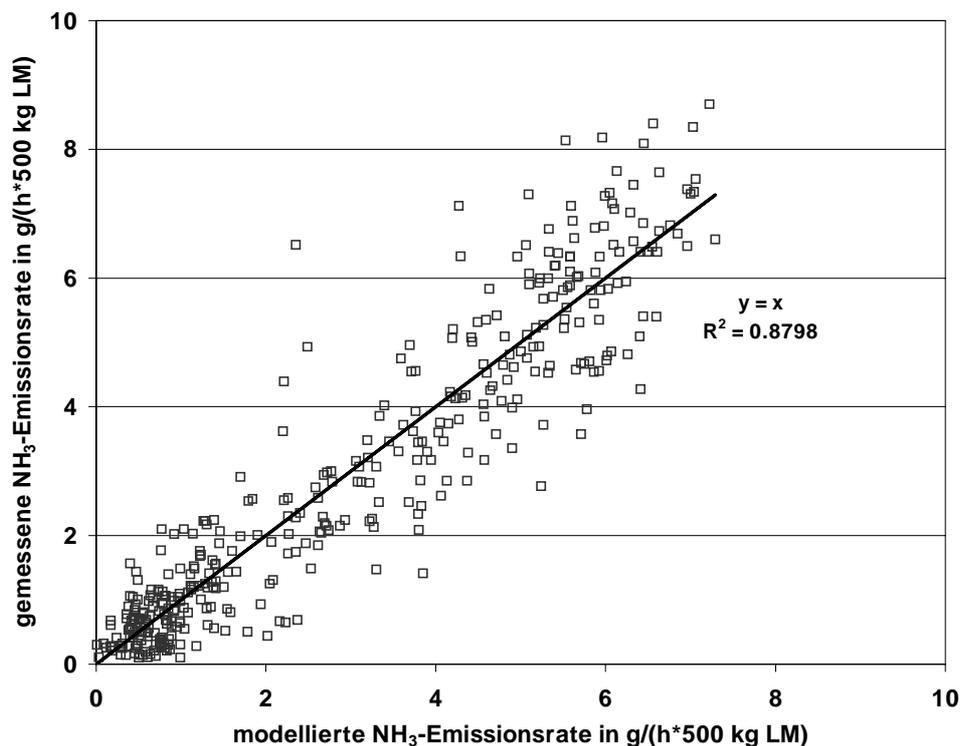


Abbildung 85: Gegenüberstellung der gemessenen und modellierten NH_3 -Emissionsraten in den beiden Außenklimaställen während der drei Mastdurchgänge mit Trendlinie und Regressionsgerade

Mit Hilfe der oben beschriebenen Modelle kann die Abschätzung der NH_3 -Emissionsraten für verschiedene Haltungssysteme (Außenklimastall mit Teilspaltenboden und mit Einstreu) für verschiedene jahreszeitliche Konstellationen (Frühjahr, Sommer, Winter) erfolgen.

6.2.1.5.2 Abschätzung mittlerer NH_3 -Emissionsraten

Mit dem Modell_AKt und dem Modell_AKe werden unter der Annahme von durchschnittlichen Abluftvolumenströmen von $4000 \text{ m}^3/\text{h}$ (Frühjahr), $7000 \text{ m}^3/\text{h}$ (Sommer) bzw. $3000 \text{ m}^3/\text{h}$ (Winter) und den durchschnittlichen Stalltemperaturen (in der Abluft) die in

Abbildung 86 dargestellten NH_3 -Emissionsraten für einen Mastdurchgang bis zum 90. Masttag (entspricht dem ersten Ausstallen) berechnet.

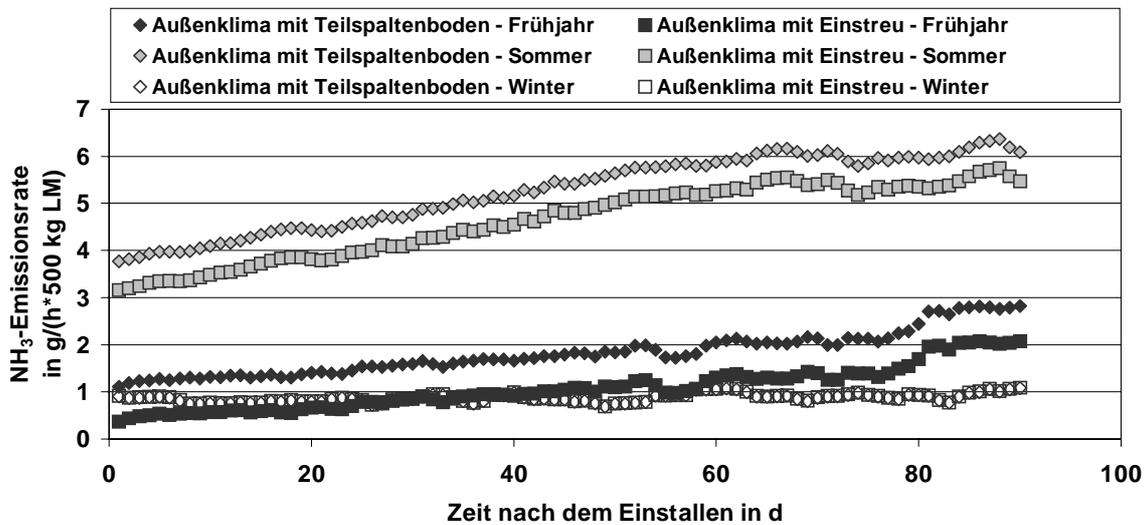


Abbildung 86: Modellierte NH_3 -Emissionsrate aus Außenklimaställen mit Teilspaltenboden und mit Einstreu im Frühjahr ($V_i=4000 \text{ m}^3/\text{h}$), Sommer ($V_i=7000 \text{ m}^3/\text{h}$) bzw. Winter ($V_i=3000 \text{ m}^3/\text{h}$). Die Ablufttemperaturen (T_i) werden rechnerisch aus den Außentemperaturen abgeleitet

Zur Herleitung der Stalltemperaturen (in der Abluft) werden die durchschnittlichen Tagesmittelwerte der Temperatur an der agrarmeteorologischen Wetterstation des Landkreis Dachau in Großberghofen herangezogen. Diese sind mit der dazugehörigen Standardabweichung in Abbildung 87 dargestellt. Die mittleren Stalltemperaturen in der Abluft (T_i) errechnen sich aus diesen durchschnittlichen Außentemperaturen über lineare Regressionen, die aus den eigenen Messungen abgeleitet werden konnten (Anhang, Tabelle 76).

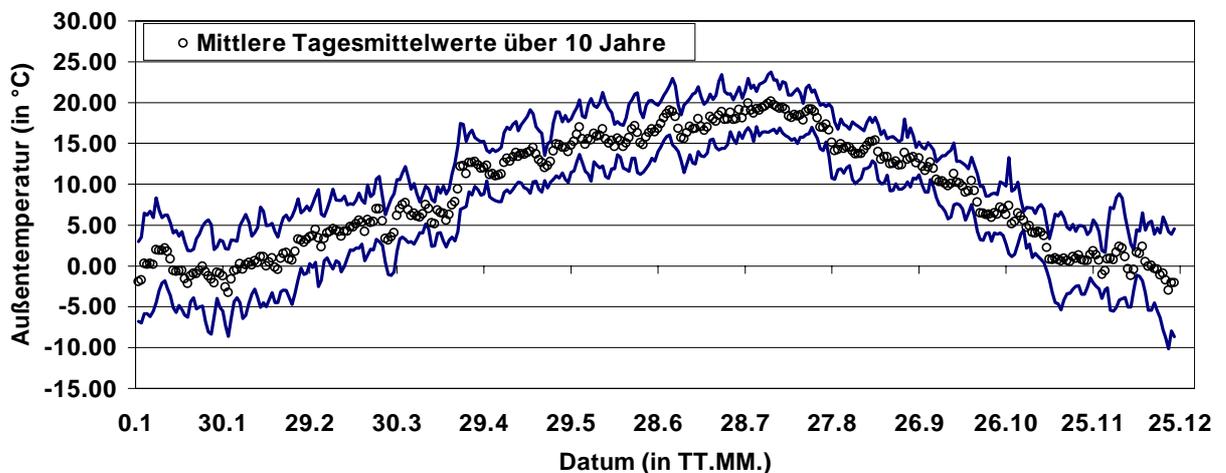


Abbildung 87: 10-jährige Tagesmittelwerte und dazugehörige Standardabweichung für die Außentemperatur an der Agrarmeteorologischen Wetterstation im Landkreis Dachau, Großberghofen

Die modellierten Mittelwerte der NH_3 -Emissionsraten für Außenklimaställe (Abbildung 86) werden den mit dem Modell von Ni (1998) für einen Warmstall mit Teilspaltenboden berechneten NH_3 -Emissionsraten gegenübergestellt (Abbildung 88). Die Modellannahmen für den Warmstall sind für die durchschnittlichen Ablufttemperaturen (T_i) wieder von den durchschnittlichen Außentemperaturen über Regressionen abgeleitet; für die durchschnittlichen Abluftvolumenströmen (V_i) werden im Frühjahr $3000 \text{ m}^3/\text{h}$, im Sommer $4000 \text{ m}^3/\text{h}$ und im Winter $2000 \text{ m}^3/\text{h}$ angenommen.

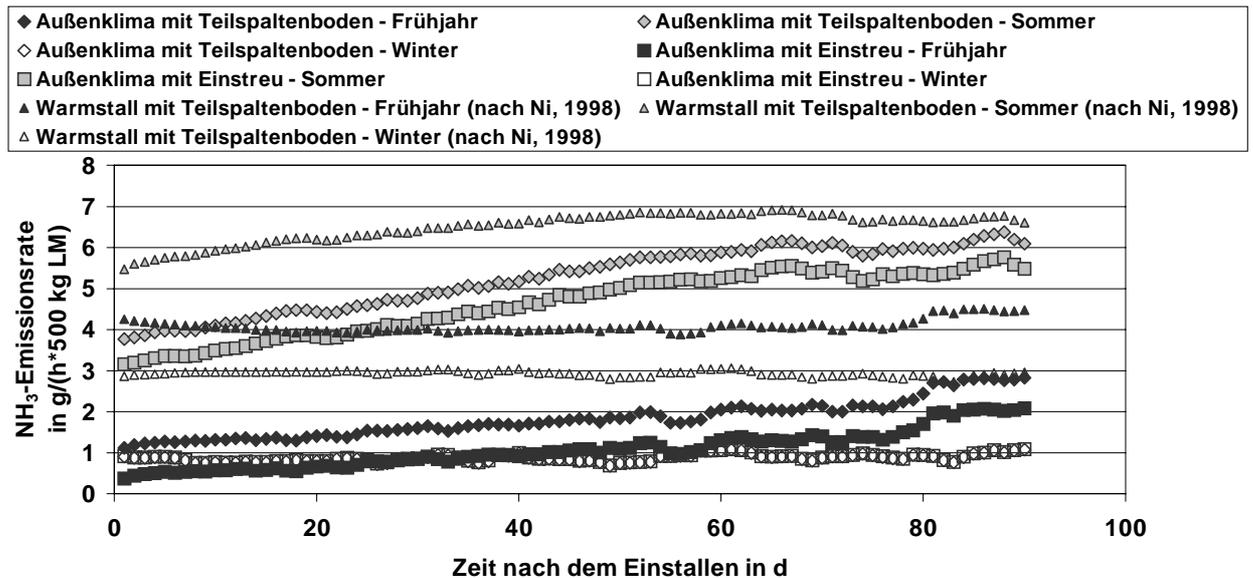


Abbildung 88: Modellierte NH_3 -Emissionsrate aus Warmställen mit Teilspaltenboden (nach Ni, 1998) im Frühjahr ($V_i=3000 \text{ m}^3/\text{h}$), Sommer ($V_i=4000 \text{ m}^3/\text{h}$) bzw. Winter ($V_i=2000 \text{ m}^3/\text{h}$) im Vergleich zu den Außenklimaställen. Die Ablufttemperaturen (T_i) werden rechnerisch aus den Außentemperaturen abgeleitet

Abbildung 88 zeigt, dass die modellierten NH_3 -Emissionsraten aus dem Warmstall (nach Ni, 1998) auf einem höheren Niveau liegen als die der Außenklimaställe. Außerdem zeigt sich hier im Frühjahr und Winter kein Anstieg der NH_3 -Emissionsrate im Verlauf des Mastdurchgangs. Im Sommer ist wie bei den Außenklimaställen ein positiver Zusammenhang mit der Zeit nach dem Einstellen zu erkennen. Der Grund für die unterschiedlichen Verläufe der beiden Modelle kann in der, dem Modell unterstellten unterschiedlichen Messkonfiguration liegen: Ni (1998) führte seine dem Modell zu Grunde liegenden Messungen in einem Stall mit *kontinuierlicher* Belegung durch – daher ist es folglich logisch, dass der Effekt zunehmender Verschmutzung, steigender Güllefüllstände, schlechter werdender Eiweißretention und somit stärkerer N-Ausscheidung im Verlauf des Mastdurchgangs bei den dem eigenen Modell zu Grunde liegenden Messungen, einen starken Ein-

fluss hat (t_i), jedoch bei Ni (1998) nicht so deutlich ausgeprägt ist und somit diese Tendenzen auftreten.

In Tabelle 46 sind die modellierten mittleren NH_3 -Emissionsraten des Außenklimastalls mit Teilspaltenboden und mit Einstreu sowie des Warmstalls mit Teilspaltenboden dargestellt.

Tabelle 46: Mittlere NH_3 -Emissionsraten nach Modell_AKt und Modell_AKe und Ni (1998)

	Außenklimastall mit Teilspaltenboden	Außenklimastall mit Einstreu	Warmstall mit Teilspaltenboden
Modellierte mittlere NH_3 -Emissionsrate in g/(h*500 kg LM)			
Frühjahr	1,8	1,1	4,1
Sommer	5,3	4,6	6,5
Winter	0,9	0,9	2,9
Modellanahme:	Frühjahr ($V_{AK}=4000 \text{ m}^3/\text{h}$), Sommer ($V_{AK}=7000 \text{ m}^3/\text{h}$) bzw. Winter ($V_{AK}=3000 \text{ m}^3/\text{h}$), $T_{AK} = f(\text{Außentemperatur Großberghofen})$		Frühjahr ($V_W=3000 \text{ m}^3/\text{h}$), Sommer ($V_W=4000 \text{ m}^3/\text{h}$) bzw. Winter ($V_W=2000 \text{ m}^3/\text{h}$), $T_W = f(\text{Außentemperatur Großberghofen})$

Zu erkennen ist, dass die mittleren NH_3 -Emissionsraten aus beiden Außenklimaställen unter denen des Warmstalls mit Teilspaltenboden liegen. Besonders deutlich ist dieser Unterschied im Frühjahr und Winter, im Sommer nähern sich die Emissionsraten einander an.

Nimmt man als Grundlage der Modellrechnungen die durchschnittlichen Tagesmitteltemperaturen (10-jähriges Mittel) einer in einer wärmeren Region Bayerns gelegenen agrarmeteorologischen Station (z. B. Veitshöchheim, Unterfranken) an, so erhöhen sich die mittleren NH_3 -Emissionsraten nur geringfügig um max. 0,1 g/(h*500 kg LM) (Tabelle 47).

Tabelle 47: Mittlere NH_3 -Emissionsraten nach Modell_AKt und Modell_AKe und Ni (1998) für höhere durchschnittliche Außentemperaturen

	Außenklimastall mit Teilspaltenboden	Außenklimastall mit Einstreu	Warmstall mit Teilspaltenboden
Modellierte mittlere NH_3 -Emissionsrate in g/(h*500 kg LM)			
Frühjahr	1,9	1,1	4,1
Sommer	5,3	4,7	6,5
Winter	0,9	0,9	3,0
Modellanahme:	Frühjahr ($V_{AK}=4000 \text{ m}^3/\text{h}$), Sommer ($V_{AK}=7000 \text{ m}^3/\text{h}$) bzw. Winter ($V_{AK}=3000 \text{ m}^3/\text{h}$), $T_{AK} = f(\text{Außentemperatur Veitshöchheim})$		Frühjahr ($V_W=3000 \text{ m}^3/\text{h}$), Sommer ($V_W=4000 \text{ m}^3/\text{h}$) bzw. Winter ($V_W=2000 \text{ m}^3/\text{h}$), $T_W = f(\text{Außentemperatur Veitshöchheim})$

Zur Berechnung der mittleren NH_3 -Emissionsrate kann für die Außenklimaställe ein höherer Abluftvolumenstrom angenommen werden. In Tabelle 48 sind die mittleren NH_3 -Emissionsraten für Abluftvolumenströme im Frühjahr von $5000 \text{ m}^3/\text{h}$ (entspricht durchschnittlich $78 \text{ m}^3/(\text{h} \cdot \text{Tier})$ bzw. $550 \text{ m}^3/(\text{h} \cdot 500 \text{ kg LM})$), im Sommer von $9000 \text{ m}^3/\text{h}$ (entspricht durchschnittlich $141 \text{ m}^3/(\text{h} \cdot \text{Tier})$ bzw. $990 \text{ m}^3/(\text{h} \cdot 500 \text{ kg LM})$) und im Winter von

4000 m³/h (entspricht durchschnittlich 63 m³/(h*Tier) bzw. 440 m³/(h*500 kg LM)) dargestellt. Die Abluftvolumenströme aus dem Warmstall mit Teilspaltenboden werden nicht erhöht.

Tabelle 48: Mittlere NH₃-Emissionsraten nach Modell_AKt und Modell_AKe und Ni (1998) für höhere durchschnittliche Abluftvolumenströme

	Außenklimastall mit Teilspaltenboden	Außenklimastall mit Einstreu	Warmstall mit Teilspaltenboden
Modellierte mittlere NH ₃ -Emissionsrate in g/(h*500 kg LM)			
Frühjahr	2,3	1,6	4,1
Sommer	5,7	5,1	6,5
Winter	1,0	1,0	3,0
Modellanahme:	Frühjahr (V _{AK} =7000 m ³ /h), Sommer (V _{AK} =9000 m ³ /h) bzw. Winter (V _{AK} =4000 m ³ /h), T _{AK} = f(Außentemperatur Großberghofen)		Frühjahr (V _W =3000 m ³ /h), Sommer (V _W =4000 m ³ /h) bzw. Winter (V _W =2000 m ³ /h), T _W = f(Außentemperatur Großberghofen)

Es ist zu erkennen, dass die mittleren NH₃-Emissionsraten erhöht werden, jedoch noch niedriger als die NH₃-Emissionsraten aus dem Warmstall mit Teilspaltenboden sind, obwohl die zur Berechnung herangezogenen Abluftvolumenströme (bezogen auf die Bezugsgröße Tier, bzw. 500 kg LM) weit über den in der Literatur angegebenen Abluftvolumenströmen (vgl. 6.1.4) liegen.

6.2.1.5.3 Vergleich mit NH₃-Emissionsraten aus der Literatur

Setzt man die von NIEBAUM ET AL. (2001) an Außenklimaställen für Mastschweine (Nürtinger-System) mit der Tracergasmethode gemessenen Abluftvolumenströme von 635 bzw. 502 m³/(h*500 kg LM) im Sommer und 345 bzw. 407 m³/(h*500 kg LM) im Winter in das Modell ein, so erhält man im Sommer mit Modell_AKt mittlere NH₃-Emissionsraten von 4,9 bzw. 4,6 g/(h*500 kg LM), im Winter von 0,9 bzw. 1,0 g/(h*500 kg LM). Diese liegen im Sommer über den von NIEBAUM ET AL. (2001) gemessenen NH₃-Emissionsraten von 0,98 bzw. 1,79 g/(h*500 kg LM) und unter den im Winter gemessenen von 1,16 bzw. 2,39 g/(h*500 kg LM). Die Vergleichbarkeit ist aber zum einen wegen der unterschiedlichen Haltungssysteme (Nürtinger-System bzw. Kistenstall mit Spaceboards) zum anderen wegen des bei NIEBAUM ET AL. (2001) kurzen Messzeitraums eingeschränkt.

6.2.2 Methan

Für die CH₄-Emissionsraten werden keine separaten einfaktoriellen Betrachtungen dargestellt, da ihre Aussagekraft deutlich geringer als die eines allgemeinen linearen Modells ist.

6.2.2.1 Allgemeines lineares Modell

In dem allgemeinen linearen Modell für CH₄ werden die Einflüsse von Haltungssystem, Mastdurchgang, Ablufttemperatur (T_i), Abluftvolumenstrom (V_i) und Zeit nach dem Einstellen (t_i) auf die CH₄-Emissionsrate ermittelt.

Wegen des untypischen Verlaufs der CH₄-Emissionsraten im Warmstall mit Teilspaltenboden wird das allgemeine lineare Modell ausschließlich für die Außenklima-Versuchsabteile gerechnet.

Als fixe Effekte gehen die Haltungssysteme (AKt, AKe, KW) und die Mastdurchgänge (4, 5, 6) ein. Die Kovariablen sind Ablufttemperatur (T_i), Abluftvolumenstrom (V_i) und die Zeit nach dem Einstellen (t_i). Als Modellgrenzen gelten die selben wie für die oben dargestellten NH₃-Emissionsraten (Tabelle 44 und Tabelle 45).

$$Y_{CH_4} = \mu + \text{Haltungssysteme } (\alpha) + \text{Mastdurchgang } (\beta) + (\gamma) t_i + (\delta) T_i + (\varepsilon) V_i + \text{Haltungssysteme} * \text{Mastdurchgang } (\alpha\beta) + (\gamma\delta) t_i * T_i + (\gamma\varepsilon) t_i * V_i + (\delta\varepsilon) T_i * V_i + (\gamma\delta\varepsilon) t_i * T_i * V_i$$

Aus der Kovarianzanalyse ergibt sich für die Außenklima-Versuchsabteile mit Teilspaltenboden und mit Einstreu für die drei Mastdurchgänge das folgende Modell für CH₄ mit dem Bestimmtheitsmaß $R^2 = 0,824$. Die Effekte des Haltungssystems sind zur besseren Übersichtlichkeit unterstrichen, die Effekte des Mastdurchgangs sind **fett** gedruckt und die Wechselwirkungen Mastdurchgang*Haltungssystem sind **fett und unterstrichen**.

Mast-durchgang	Außenklima-Versuchsabteil mit Teilspaltenboden (AKt) - Modell_AKt
4	$Y_{CH_4} = 0,797\text{-}\underline{0,126}\text{-}\underline{\mathbf{0,504}} - 0,0123 * t - 0,0732 * T - 0,000223 * V + \underline{\mathbf{0,211}} + 0,002172 * t * T + 0,000004790 * t * V + 0,00004424 * T * V - 0,000000551 * t * T * V$
5	$Y_{CH_4} = 0,797\text{-}\underline{0,126}\text{-}\underline{\mathbf{0,198}} - 0,0123 * t - 0,0732 * T - 0,000223 * V + \underline{\mathbf{0,519}} + 0,002172 * t * T + 0,000004790 * t * V + 0,00004424 * T * V - 0,000000551 * t * T * V$
6	$Y_{CH_4} = 0,797\text{-}\underline{0,126}\text{-}\underline{\mathbf{0}} - 0,0123 * t - 0,0732 * T - 0,000223 * V + \underline{\mathbf{0}} + 0,002172 * t * T + 0,000004790 * t * V + 0,00004424 * T * V - 0,000000551 * t * T * V$
Mast-durchgang	Außenklima-Versuchsabteil mit Einstreu (AKe) – Modell_AKe
4	$Y_{CH_4} = 0,797\text{-}\underline{0}\text{-}\underline{\mathbf{0,504}} - 0,0123 * t - 0,0732 * T - 0,000223 * V + \underline{\mathbf{0}} + 0,002172 * t * T + 0,000004790 * t * V + 0,00004424 * T * V - 0,000000551 * t * T * V$
5	$Y_{CH_4} = 0,797\text{-}\underline{0}\text{-}\underline{\mathbf{0,198}} - 0,0123 * t - 0,0732 * T - 0,000223 * V + \underline{\mathbf{0}} + 0,002172 * t * T + 0,000004790 * t * V + 0,00004424 * T * V - 0,000000551 * t * T * V$
6	$Y_{CH_4} = 0,797\text{-}\underline{0}\text{-}\underline{\mathbf{0}} - 0,0123 * t - 0,0732 * T - 0,000223 * V + \underline{\mathbf{0}} + 0,002172 * t * T + 0,000004790 * t * V + 0,00004424 * T * V - 0,000000551 * t * T * V$

Die ausführliche Tabelle der Parameterschätzer findet sich im Anhang, Tabelle 63. Der paarweise Vergleich der Mittelwerte der CH₄-Emissionsraten beider Außenklima-

Versuchsabteile ergibt, dass sich die Mittelwerte der CH₄-Emissionsraten (wie auch der NH₃-Emissionsraten oben) des AKt und AKe signifikant unterscheiden (vgl. Anhang, Tabelle 64). Bei den Mastdurchgängen unterscheiden sich nur Mastdurchgang 4 und 6 signifikant voneinander (vgl. Anhang, Tabelle 65).

6.2.2.1.1 Vergleich der modellierten mit den gemessenen CH₄-Emissionsraten

Der Vergleich der gemessenen CH₄-Emissionsraten mit den modellierten CH₄-Emissionsraten ergibt für die beiden Außenklima-Versuchsabteile folgende Darstellung (Abbildung 89).

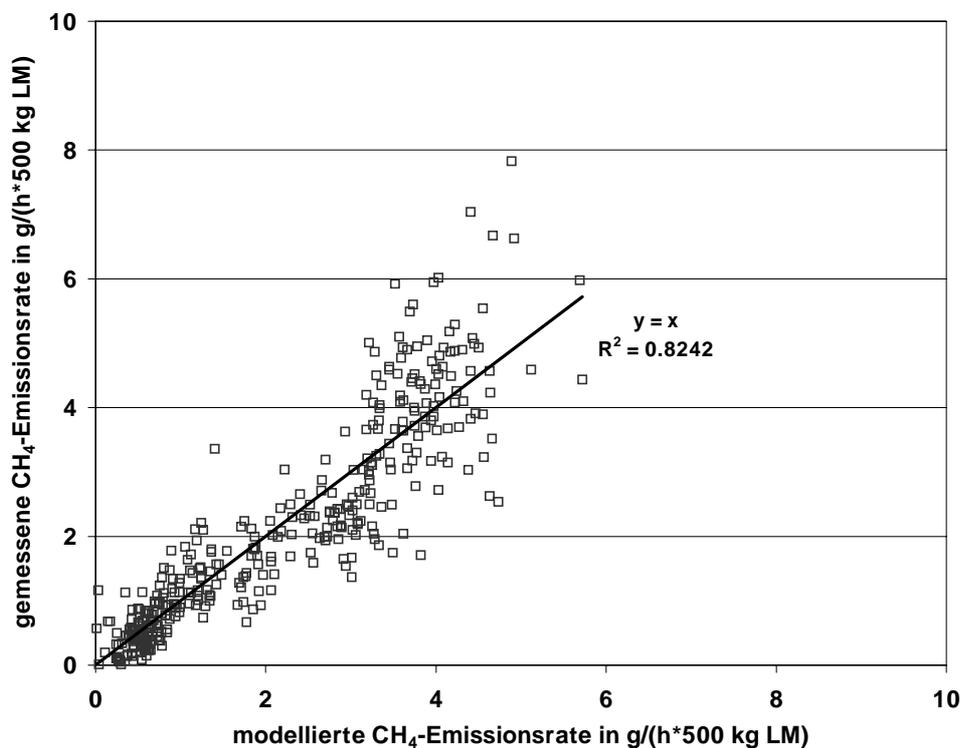


Abbildung 89: Gegenüberstellung der gemessenen und modellierten CH₄-Emissionsraten in den beiden Außenklimaställen während der drei Mastdurchgänge

Zu erkennen ist die gute Übereinstimmung der gemessenen und der modellierten CH₄-Emissionsraten für diese beiden Außenklima-Haltungssysteme. Es wird deutlich, dass mit den beiden Modellen für die zwei Haltungssysteme eine mittlere CH₄-Emissionsrate gut abgeschätzt werden kann.

6.2.2.1.2 Abschätzung mittlerer CH₄-Emissionsraten

In Abbildung 90 sind die für einen Außenklimastall mit Teilspaltenboden und mit Einstreu nach obigen Modellen berechneten CH₄-Emissionsraten für drei Jahreszeiten berechnet worden. Die im Modell einzusetzenden Stalltemperaturen (in der Abluft) werden wie bei

obigem Beispiel für die NH₃-Emissionsraten über Regressionsgleichungen von den Außentemperaturen der agrarmeteorologischen Wetterstation des Landkreises Dachau (Großberghofen), in dem der Versuchsbetrieb angesiedelt ist, abgeleitet (vgl. Anhang, Tabelle 76). Als durchschnittliche Abluftvolumenströme werden im Frühjahr V_i=4000 m³/h, im Sommer V_i=7000 m³/h und im Winter V_i=3000 m³/h eingesetzt.

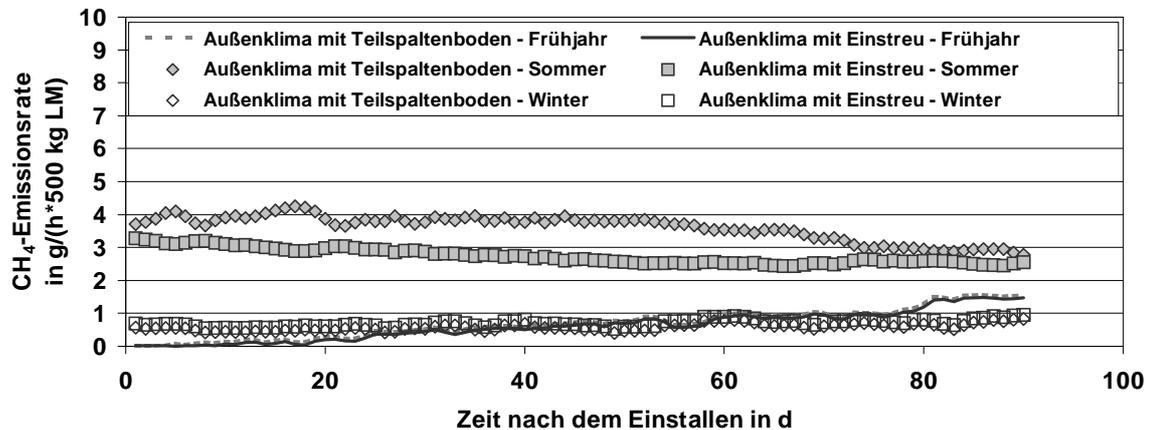


Abbildung 90: Modellierter CH₄-Emissionsrate aus Außenklimaställen im Frühjahr (V_i=4000 m³/h), Sommer (V_i=7000 m³/h) bzw. Winter (V_i=3000 m³/h); die Temperaturen werden von den durchschnittlichen Außentemperaturen der agrarmeteorologischen Station Großberghofen abgeleitet.

Es ist zu erkennen, dass die CH₄-Emissionsrate im Sommer aufgrund des Temperatureffektes im Modell am höchsten ist. Dies lässt sich durch die Tatsache bestätigen, dass die mikrobielle Aktivität der methanogenen Organismen bei diesen Temperaturen erhöht ist. Als mittlere CH₄-Emissionsraten ergeben sich somit für das Beispiel die in Tabelle 49 dargestellten Werte.

Tabelle 49: Mittlere CH₄-Emissionsraten nach Modell_AKt und Modell_AKe

	Außenklimastall mit Teilspaltenboden	Außenklimastall mit Einstreu
	Modellierte mittlere CH ₄ -Emissionsrate in g/(h*500 kg LM)	
Frühjahr	0,7	0,6
Sommer	3,6	2,7
Winter	0,6	0,7
Modellanahme: Frühjahr (V _{AK} =4000 m ³ /h), Sommer (V _{AKi} =7000 m ³ /h) bzw. Winter (V _{AKi} =3000 m ³ /h), T _{AK} = f(Außentemperatur Großberghofen)		

Zu erkennen ist, dass die mittleren CH₄-Emissionsraten aus beiden Außenklimaställen im Frühjahr und im Winter ungefähr gleich sind, sich jedoch im Sommer um fast 1,0 g/(h*500 kg LM) unterscheiden.

Zieht man als Grundlage der Modellrechnungen die durchschnittlichen Tagesmitteltemperaturen (10-jähriges Mittel) einer um ca. 1 K wärmeren agrarmeteorologischen Station

(z. B. Veitshöchheim, Unterfranken) heran, so erhöhen sich die mittleren CH₄-Emissionsraten nur geringfügig um max. 0,1 g/(h*500 kg LM) (Tabelle 50).

Tabelle 50: Mittlere CH₄-Emissionsraten nach Modell_AKt und Modell_AKe für höhere durchschnittliche Außentemperaturen

	Außenklimastall mit Teilspaltenboden	Außenklimastall mit Einstreu
	Modellierte mittlere CH ₄ -Emissionsrate in g/(h*500 kg LM)	
Frühjahr	0,8	0,7
Sommer	3,7	2,7
Winter	0,6	0,8

Modellannahme: Frühjahr (V_{AKi}=4000 m³/h), Sommer (V_{AKi}=7000 m³/h) bzw. Winter (V_{AK}=3000 m³/h), T_i = f(Außentemperatur Veitshöchheim)

Zur Berechnung der mittleren CH₄-Emissionsrate kann für die Außenklimaställe ein höherer Abluftvolumenstrom angenommen werden. In Tabelle 51 sind die mittleren CH₄-Emissionsraten für Abluftvolumenströme im Frühjahr von 5000 m³/h (entspricht durchschnittlich 78 m³/(h*Tier) bzw. 550 m³/(h*500 kg LM)), im Sommer von 9000 m³/h (entspricht durchschnittlich 141 m³/(h*Tier) bzw. 990 m³/(h*500 kg LM)) und im Winter von 4000 m³/h (entspricht durchschnittlich 63 m³/(h*Tier) bzw. 440 m³/(h*500 kg LM)) dargestellt.

Tabelle 51: Mittlere CH₄-Emissionsraten nach Modell_AKt und Modell_AKe für höhere durchschnittliche Abluftvolumenströme

	Außenklimastall mit Teilspaltenboden	Außenklimastall mit Einstreu
	Modellierte mittlere CH ₄ -Emissionsrate in g/(h*500 kg LM)	
Frühjahr	1,1	1,0
Sommer	4,4	3,4
Winter	0,7	0,8

Modellannahme: (V_i=7000 m³/h), Sommer (V_i=9000 m³/h) bzw. Winter (V_i=4000 m³/h), T_i = f(Außentemperatur Großberghofen)

Es ist zu erkennen, dass die mittleren CH₄-Emissionsraten vor allem während des Sommers erhöht sind. Die hier eingesetzten durchschnittlichen Abluftvolumenströme liegen weit über den in der Literatur angegebenen Abluftvolumenströmen (vgl. 6.1.4).

6.2.2.1.3 Vergleich mit CH₄-Emissionsraten aus der Literatur

Setzt man auch hier wieder, wie bereits beim Beispiel der NH₃-Emissionsraten, die von NIEBAUM ET AL. (2001) an Außenklimaställen für Mastschweine (Nürtinger-System) mit der Tracergasmethode gemessenen Abluftvolumenströme von 635 bzw. 502 m³/(h*500 kg LM) im Sommer und 345 bzw. 407 m³/(h*500 kg LM) im Winter in das Modell ein, so erhält man im Sommer mit Modell_AKt mittlere CH₄-Emissionsraten von 3,1 bzw. 2,7 g/(h*500 kg LM), im Winter von 0,6 bzw. 0,7 g/(h*500 kg LM). Diese liegen im Sommer auf dem selben Niveau wie die von NIEBAUM ET AL. (2001) gemessenen CH₄-

Emissionsraten von 3,02 bzw. 3,50 g/(h*500 kg LM) aber unter den im Winter gemessenen von 1,80 bzw. 2,63 g/(h*500 kg LM). Die Vergleichbarkeit ist aber wiederum (wie bereits bei den NH₃-Emissionsraten) zum einen wegen der unterschiedlichen Haltungssysteme (Nürtinger-System bzw. Kistenstall mit Spaceboards) zum anderen wegen des bei NIEBAUM ET AL. (2001) kurzen Messzeitraums eingeschränkt.

6.2.3 Lachgas

Für Lachgas kann wegen der geringen Datengrundlage gesicherter N₂O-Emissionsraten (vgl. 6.1.3.3) keine sinnvolle Modellierung durchgeführt werden.

6.2.4 Kohlendioxid

Bei den CO₂-Emissionsraten aus den beiden Außenklima-Versuchsabteilungen wird wie bei den CH₄-Emissionsraten auf die einfaktorielle Modellierung zugunsten des allgemeinen linearen Modells verzichtet.

6.2.4.1 Allgemeines lineares Modell

In dem allgemeinen linearen Modell für CO₂ werden wiederum die Einflüsse von Haltungssystem, Mastdurchgang, Ablufttemperatur (T_i), Abluftvolumenstrom (V_i) und Zeit nach dem Einstellen (t_i) auf die CO₂-Emissionsrate ermittelt.

Als fixe Effekte gehen die Haltungssysteme (AKt, AKe) und die Mastdurchgänge (4, 5, 6) ein. Die Kovariablen sind Ablufttemperatur (T_i), Abluftvolumenstrom (V_i) und die Zeit nach dem Einstellen (t_i). Als Modellgrenzen gelten die bereits bei den NH₃-Emissionsraten angegebenen Werte (siehe Tabelle 44 und Tabelle 45)

$$Y_{CO_2} = \mu + \text{Haltungssysteme } (\alpha) + \text{Mastdurchgang } (\beta) + (\gamma) t_i + (\delta) T_i + (\epsilon) V_i + \text{Haltungssysteme} * \text{Mastdurchgang } (\alpha\beta) + (\gamma\delta) t_i * T_i + (\gamma\epsilon) t_i * V_i + (\delta\epsilon) T_i * V_i + (\gamma\delta\epsilon) t_i * T_i * V_i$$

Aus der Kovarianzanalyse ergibt sich für die Außenklima-Versuchsabteilung mit Teilspaltenboden und mit Einstreu für die drei Mastdurchgänge das folgende Modell für CO₂ mit dem Bestimmtheitsmaß $R^2 = 0,642$. Die Effekte des Haltungssystems sind zur besseren Übersichtlichkeit unterstrichen, die Effekte des Mastdurchgangs sind **fett** gedruckt und die Wechselwirkungen Mastdurchgang*Haltungssystem sind **fett und unterstrichen**.

Mast-durchgang	Außenklima-Versuchsabteil mit Teilspaltenboden (AKt) - Modell_AKt
4	$Y_{CO_2} = 150,761 + 20,516 - 115,009 + 0,295 * t + 11,464 * T + 0,06676 * V - 10,323 - 0,129 * t * T + 0,00002503 * t * V - 0,00182 * T * V + 0,000006897 * t * T * V$
5	$Y_{CO_2} = 150,761 + 20,516 - 25,346 + 0,295 * t + 11,464 * T + 0,06676 * V + 2,899 - 0,129 * t * T + 0,00002503 * t * V - 0,00182 * T * V + 0,000006897 * t * T * V$
6	$Y_{CO_2} = 150,761 + 20,516 + 0 + 0,295 * t + 11,464 * T + 0,06676 * V + 0 - 0,129 * t * T + 0,00002503 * t * V - 0,00182 * T * V + 0,000006897 * t * T * V$

Mast-durchgang	Außenklima-Versuchsabteil mit Einstreu (AKe) – Modell_AKe
4	$Y_{CO_2} = 150,761 + 0 - 115,009 + 0,295 * t + 11,464 * T + 0,06676 * V + 0 - 0,129 * t * T + 0,00002503 * t * V - 0,00182 * T * V + 0,000006897 * t * T * V$
5	$Y_{CO_2} = 150,761 + 0 - 25,346 + 0,295 * t + 11,464 * T + 0,06676 * V + 0 - 0,129 * t * T + 0,00002503 * t * V - 0,00182 * T * V + 0,000006897 * t * T * V$
6	$Y_{CO_2} = 150,761 + 0 + 0 + 0,295 * t + 11,464 * T + 0,06676 * V + 0 - 0,129 * t * T + 0,00002503 * t * V - 0,00182 * T * V + 0,000006897 * t * T * V$

Die ausführliche Tabelle der Parameterschätzer findet sich im Anhang, Tabelle 71. Der paarweise Vergleich der Mittelwerte der CO₂-Emissionsraten beider Außenklima-Versuchsabteile ergibt, dass sich die Mittelwerte der CO₂-Emissionsraten des AKt und AKe nicht signifikant voneinander unterscheiden (vgl. Anhang, Tabelle 72). Bei den Mastdurchgängen unterscheiden sich nur Mastdurchgang 4 und 6 sowie 4 und 5 signifikant voneinander (vgl. Anhang, Tabelle 73).

6.2.4.1.1 Vergleich der modellierten mit den gemessenen CO₂-Emissionsraten

Der Vergleich der nach dem obigen Modell_AKt und Modell_AKe berechneten CO₂-Emissionsraten aus den Außenklimaställen ergibt folgende Darstellung (Abbildung 91).

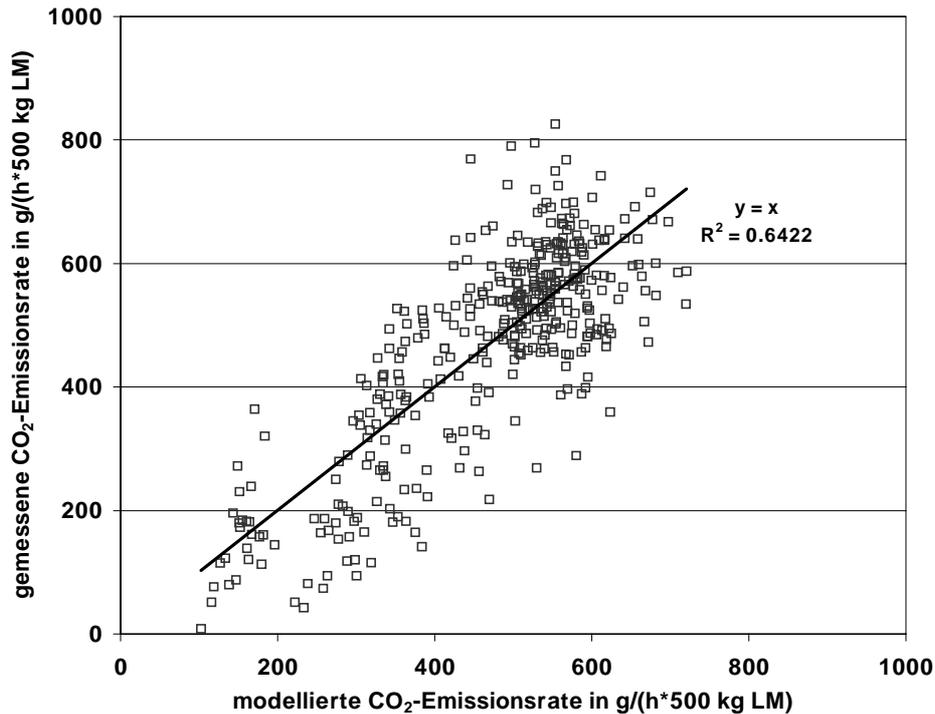


Abbildung 91: Gegenüberstellung der gemessenen und modellierten CO₂-Emissionsraten in den beiden Außenklimaställen während der drei Mastdurchgänge

Die in den Außenklimaställen gemessenen CO₂-Emissionsraten stimmen gut mit den gemessenen überein; eine Abschätzung der CO₂-Emissionsraten aus Außenklimaställen ist damit möglich.

6.2.4.1.2 Abschätzung mittlerer CO₂-Emissionsraten

Mit dem Modell_AKt und dem Modell_AKe werden unter der Annahme von durchschnittlichen Abluftvolumenströmen von 4000 m³/h (Frühjahr), 7000 m³/h (Sommer) bzw. 3000 m³/h (Winter) und den durchschnittlichen Stalltemperaturen (in der Abluft) die in Abbildung 92 dargestellten CO₂-Emissionsraten für einen Mastdurchgang bis zum 90. Masttag (entspricht dem ersten Ausställen) berechnet.

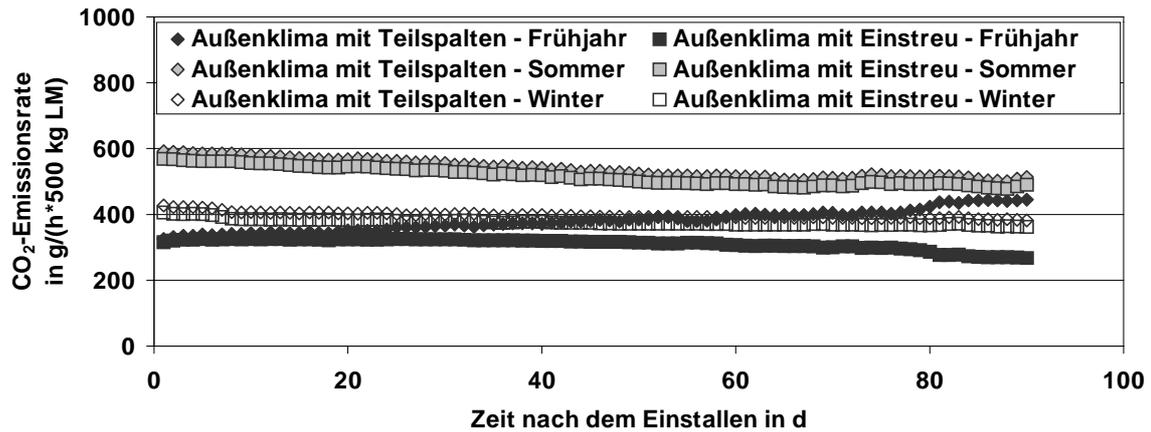


Abbildung 92: Modellierter CO₂-Emissionsrate aus Außenklimaställen mit Teilspaltenböden und mit Einstreu im Frühjahr ($V_i=4000 \text{ m}^3/\text{h}$), Sommer ($V_i=7000 \text{ m}^3/\text{h}$) bzw. Winter ($V_i=3000 \text{ m}^3/\text{h}$). Die Ablufttemperaturen (T_i) werden rechnerisch aus den Außentemperaturen abgeleitet

Zur Herleitung der Stalltemperaturen (in der Abluft) werden (wie bereits für die NH₃- und CH₄-Emissionsraten) die durchschnittlichen Tagesmittelwerte der Temperatur an der agrarmeteorologischen Wetterstation des Landkreis Dachau in Großberghofen herangezogen (Abbildung 87). Die mittleren Stalltemperaturen in der Abluft (T_i) errechnen sich daraus über die o. g. linearen Regressionen (Anhang, Tabelle 76).

Die modellierten Mittelwerte der CO₂-Emissionsraten für Außenklimaställe (Abbildung 93) werden den mit dem Modell von Ni (1998) für einen Warmstall mit Teilspaltenboden berechneten CO₂-Emissionsraten gegenübergestellt (Abbildung 88).

Nach Ni (1998) berechnet sich die Gesamt-CO₂-Produktion bei Mastschweinen in einem Warmstall mit Teilspaltenboden aus der TCER und der CO₂-Produktion aus der Gülle. Die TCER berechnet sich als (Ni, 1998):

$$Q_{Cp,T} = a * W_p^n, \quad (\text{Gleichung 27})$$

mit:

$Q_{Cp,T}$: Rate of tranquil CO₂ exhalation rate (TCER) in g/h

a : Konstante $15,373 \pm 3,692$

n : Konstante $0,307 \pm 0,060$

Die CO₂-Produktion aus der Gülle berechnet sich als (Ni, 1998):

$$Q_{Cm} = e^{-0,767+0,00015618*W_{pt}+0,032576*T_m+0,877*\ln(V)} \quad (\text{Gleichung 28})$$

mit:

Q_{Cm} : CO₂-Freisetzungsrates aus der Gülle in g/h

T_m : Gülletemperatur (8,7 bis 20,7 °C), in °C

V : Abluftvolumenstrom (373 bis 5245 m³/h), in m³/h

W_{pt} : Gesamtgewicht der Mastschweine (0 bis 5095 kg), in kg

Als Gülletemperatur (T_m) für den Warmstall mit Teilspaltenboden nach Ni (1998) wird eine durchschnittliche Gülletemperatur von 15 °C im Frühjahr, 18 °C im Sommer und 15 °C im Winter angenommen. Für die durchschnittlichen Abluftvolumenströme (V_i) werden wie für die NH_3 -Emissionsraten im Frühjahr 3000 m³/h, im Sommer 4000 m³/h und im Winter 2000 m³/h angenommen.

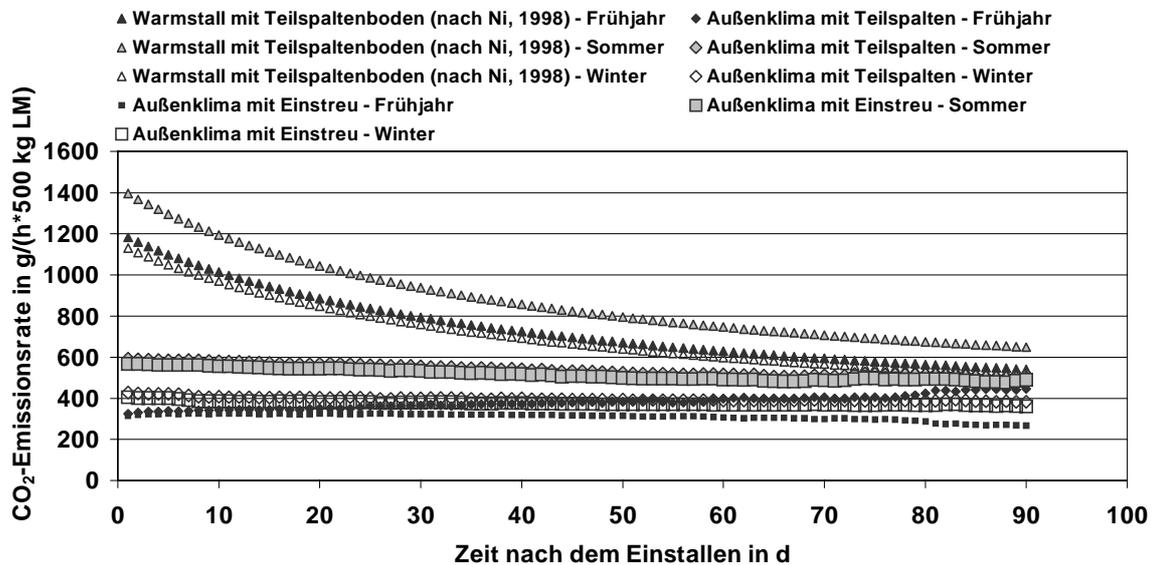


Abbildung 93: Modellierter CO_2 -Emissionsrate aus Warmställen mit Teilspaltenboden (nach Ni, 1998) im Frühjahr ($V_i=3000 \text{ m}^3/\text{h}$), Sommer ($V_i=4000 \text{ m}^3/\text{h}$) bzw. Winter ($V_i=2000 \text{ m}^3/\text{h}$) im Vergleich zu den Außenklimaställen. Gülletemperaturen im Frühjahr 15 °C, im Sommer 18 °C und im Winter 15 °C

Abbildung 93 zeigt, dass die modellierten CO_2 -Emissionsraten aus dem Warmstall (nach Ni, 1998) auf einem höheren Niveau liegen als die der Außenklimaställe. Der Verlauf der CO_2 -Emissionsraten aus dem Warmstall mit Teilspaltenboden nimmt über die Dauer des Mastdurchganges ab, die der Außenklimaställe bleiben auf einem Niveau. Ein Grund für diese verschiedenen Verläufe kann in der den Modellen zu Grunde liegenden Versuchsanstellung liegen; bei Ni (1998) wurden die Versuche in der kontinuierlichen Mast durchgeführt, in den eigenen Versuchen im Rein-Raus-Verfahren.

In Tabelle 52 sind die modellierten mittleren CO_2 -Emissionsraten des Außenklimastalls mit Teilspaltenboden und mit Einstreu sowie des Warmstalls mit Teilspaltenboden (nach Ni, 1998) dargestellt.

Tabelle 52: Mittlere CO₂-Emissionsraten nach Modell_AKt und Modell_AKe und Ni (1998)

	Außenklimastall mit Teilspaltenboden	Außenklimastall mit Einstreu	Warmstall mit Teilspaltenboden (Ni, 1998)
Modellierte mittlere CO ₂ -Emissionsrate in g/(h*500 kg LM)			
Frühjahr	381	310	710
Sommer	539	516	809
Winter	397	376	640
Modellanahme:	Frühjahr (V _{AK} =4000 m ³ /h), Sommer (V _{AK} =7000 m ³ /h) bzw. Winter (V _{AK} =3000 m ³ /h), T _{AK} = f(Außentemperatur <u>Großberghofen</u>),		Frühjahr (V _w =3000 m ³ /h), Sommer (V _w =4000 m ³ /h) bzw. Winter (V _w =2000 m ³ /h) T _m Frühjahr=15 °C, Sommer=18 °C und Winter = 15 °C

Zu erkennen ist, dass die mittleren CO₂-Emissionsraten aus beiden Außenklimaställen unter denen des Warmstalls mit Teilspaltenboden liegen.

Nimmt man, wie bereits am Beispiel der NH₃- und CH₄-Emissionsraten gezeigt, als Grundlage der Modellrechnungen die durchschnittlichen Tagesmitteltemperaturen (10-jähriges Mittel) der um ca. 1 K wärmeren agrarmeteorologischen Station Veitshöchheim (Unterfranken) an, so verändern sich die mittleren CO₂-Emissionsraten kaum (Tabelle 53).

Tabelle 53: Mittlere NH₃-Emissionsraten nach Modell_AKt und Modell_AKe und Ni (1998) für höhere durchschnittliche Außentemperaturen

	Außenklimastall mit Teilspaltenboden	Außenklimastall mit Einstreu	Warmstall mit Teilspaltenboden (Ni, 1998)
Modellierte mittlere CO ₂ -Emissionsrate in g/(h*500 kg LM)			
Frühjahr	327	316	710
Sommer	548	525	809
Winter	394	373	640
Modellanahme:	Frühjahr (V _{AK} =4000 m ³ /h), Sommer (V _{AK} =7000 m ³ /h) bzw. Winter (V _{AK} =3000 m ³ /h), T _{AK} = f(Außentemperatur <u>Veitshöchheim</u>),		Frühjahr (V _w =3000 m ³ /h), Sommer (V _w =4000 m ³ /h) bzw. Winter (V _w =2000 m ³ /h) T _m Frühjahr=15 °C, Sommer=18 °C und Winter = 15 °C

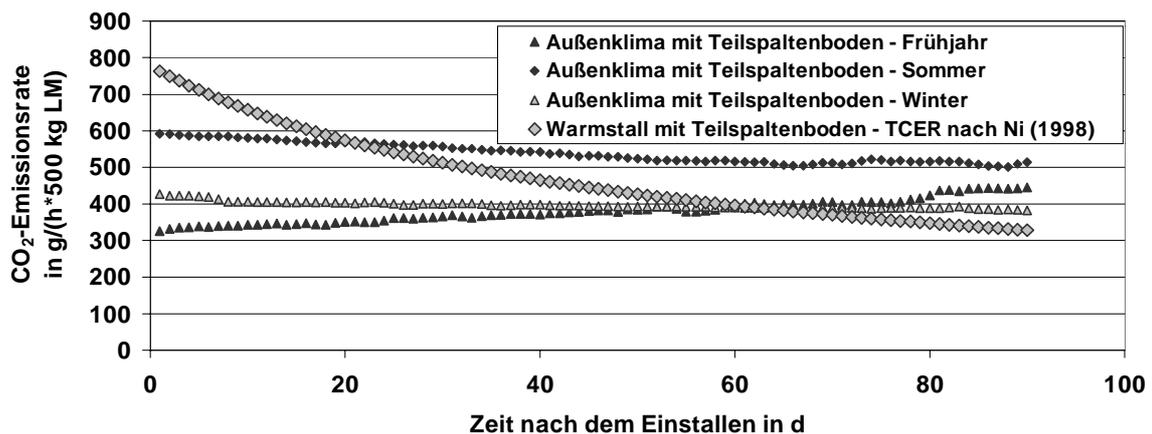
Zur Berechnung der mittleren CO₂-Emissionsrate kann für die Außenklimaställe ein höherer Abluftvolumenstrom angenommen werden. In Tabelle 54 sind (wie bereits am Beispiel der NH₃- und CH₄-Emissionsraten gezeigt) die mittleren CO₂-Emissionsraten für Abluftvolumenströme im Frühjahr von 5000 m³/h (entspricht durchschnittlich 78 m³/(h*Tier) bzw. 550 m³/(h*500 kg LM)), im Sommer von 9000 m³/h (entspricht durchschnittlich 141 m³/(h*Tier) bzw. 990 m³/(h*500 kg LM)) und im Winter von 4000 m³/h (entspricht durchschnittlich 63 m³/(h*Tier) bzw. 440 m³/(h*500 kg LM)) dargestellt. Die Abluftvolumenströme aus dem Warmstall mit Teilspaltenboden werden nicht erhöht.

Tabelle 54: Mittlere NH₃-Emissionsraten nach Modell_AKt und Modell_AKe und Ni (1998) für höhere durchschnittliche Abluftvolumenströme

	Außenklimastall mit Teilspaltenboden	Außenklimastall mit Einstreu	Warmstall mit Teilspaltenboden (Ni, 1998)
	Modellierte mittlere CO ₂ -Emissionsrate in g/(h*500 kg LM)		
Frühjahr	546	475	710
Sommer	615	591	809
Winter	456	376	640
Modellanahme:	Frühjahr (V _{AK} =7000 m ³ /h), Sommer (V _{AK} =9000 m ³ /h) bzw. Winter (V _{AK} =4000 m ³ /h), T _{AK} = f(Außentemperatur Großberghofen),		Frühjahr (V _w =3000 m ³ /h), Sommer (V _w =4000 m ³ /h) bzw. Winter (V _w =2000 m ³ /h) T _m Frühjahr=15 °C, Sommer=18 °C und Winter = 15 °C

Es ist zu erkennen, dass die mittleren CO₂-Emissionsraten bei höheren Abluftvolumenströmen ansteigen, jedoch trotzdem unter denen aus dem Warmstall mit Teilspaltenboden (nach Ni, 1998) liegen.

In Abbildung 94 ist der Vergleich der TCER (nach Ni, 1998) mit den CO₂-Emissionsratean aus dem Außenklima-Versuchsabteil mit Teilspaltenboden dargestellt.

**Abbildung 94:** CO₂-Emissionsraten nach Modell_AKt im Vergleich zur CO₂-Produktion „des ruhenden Schweins“ (TCER) nach Ni, 1998

Zu erkennen ist, dass die TCER mit im Mittel 474 g/(h*500 kg LM) ungefähr auf dem Niveau der für das Frühjahr und den Winter modellierten CO₂-Emissionsrate aus dem Außenklimastall mit Teilspaltenboden liegt, was bedeuten würde, dass während dieser Zeiten im Außenklimastall kaum CO₂ aus den im Stall gelagerten Exkrementen stammen würde. Der Vergleich der TCER mit den für den Sommer modellierten CO₂-Emissionsraten ergibt, dass diese über der TCER liegen, was hier bedeuten würde, dass während dieser Zeit auch CO₂ aus der Gülle freigesetzt wird.

6.2.4.1.3 Vergleich mit CO₂-Emissionsraten aus der Literatur

Setzt man die von NIEBAUM ET AL. (2001) an Außenklimaställen für Mastschweine (Nürtinger-System) mit der Tracergasmethode gemessenen Abluftvolumenströme von 635 bzw. 502 m³/(h*500 kg LM) im Sommer und 345 bzw. 407 m³/(h*500 kg LM) im Winter in das Modell ein, so erhält man im Sommer mit Modell_AKt mittlere CO₂-Emissionsraten von 489 bzw. 447 g/(h*500 kg LM), im Winter von 404 bzw. 438 g/(h*500 kg LM). Diese liegen im Sommer unter den von NIEBAUM ET AL. (2001) gemessenen CO₂-Emissionsraten von 710 bzw. 680 g/(h*500 kg LM) und unter den im Winter gemessenen von 590 bzw. 735 g/(h*500 kg LM). Die Vergleichbarkeit ist aber zum einen wegen der unterschiedlichen Haltungssysteme (Nürtinger-System bzw. Kistenstall mit Spaceboards) zum anderen wegen des bei NIEBAUM ET AL. (2001) kurzen Messzeitraums eingeschränkt.

6.3 Vergleich der mittleren modellierten und gemessenen Emissionsraten

In Tabelle 55 werden die Mittelwerte der in den Außenklimaställe gemessenen Emissionsraten für NH₃, CH₄ und CO₂ den mit obigen Modellen berechneten gegenübergestellt.

Tabelle 55: Vergleich der Mittelwerte der modellierten und gemessenen Emissionsraten

Gas	Jahreszeit /Mastdurchgang	Modellierte Mittelwerte in g/(h*500 kg LM)		Gemessene Mittelwerte in g/(h*500 kg LM)	
		AKt	AKe	AKt	AKe
NH ₃	Frühjahr / 4	1,8	1,1	3,9	3,2
	Sommer / 5	5,3	4,6	5,1	4,7
	Winter / 6	0,8	0,9	0,9	1,1
CH ₄	Frühjahr / 4	0,7	0,6	2,1	2,3
	Sommer / 5	3,6	2,7	3,3	2,9
	Winter / 6	0,6	0,7	0,9	0,8
CO ₂	Frühjahr / 4	381	310	438	444
	Sommer / 5	539	516	510	498
	Winter / 6	397	376	378	363

Zu erkennen ist, dass die modellierten Emissionsraten von NH₃, CH₄ und CO₂ für die Mastdurchgänge 5 (Sommer) und 6 (Winter) sehr gut mit den gemessenen Emissionsraten übereinstimmen. Für Mastdurchgang 4 (Frühjahr) werden wesentlich niedrigere NH₃- CH₄- und CO₂-Emissionsraten modelliert, als tatsächlich gemessen wurden. Der Grund dafür ist, dass bei der Messung während Mastdurchgang 4 zu Beginn des Messzeitraumes eine Zeitspanne von ca. sechs Wochen aus technischen Gründen nicht gemessen werden konnte, so dass die Mittelung der gemessenen Werte wegen der im Verlauf des Mastdurchgangs zunehmenden Emissionsraten ein verfälschtes Bild gezeigt hat.

Dieses Beispiel zeigt, dass gerade in der Mastschweinehaltung, mit einer hohen Variabilität der Emissionsraten im Verlauf eines Mastdurchgangs, eine Dauermessung unerlässlich ist, weil sonst keine durchschnittliche Emissionsrate ermittelt werden kann.

Der Vergleich der modellierten NH_3 -Emissionsraten (Tabelle 55) zeigt, dass die Mittelwerte des Mastdurchgang 4 und 6 (Frühjahr und Winter) im Vergleich zu den in Messungen über mindestens einen Mastdurchgang in Warmställen mit Teilspaltenboden bzw. in Schrägmist-Systemen gemessenen Emissionsraten (vgl. Abbildung 6, AARNINK ET AL., 1995; AARNINK ET AL., 1997; ROM, 1994a; HESSE, 1994 und CIELEJEWSKI UND RATSCHOW, 1996) im unteren Bereich der dokumentierten NH_3 -Emissionsraten liegen. Die für Mastdurchgang 5 (Sommer) modellierten NH_3 -Emissionsraten für das Außenklima-Versuchsabteil mit Teilspaltenboden (5,3 g/(h*500 kg LM)) und das Außenklima-Versuchsabteil mit Einstreu (4,6 g/(h*500 kg LM)) liegen hingegen im oberen Bereich. Da diese Vergleichbarkeit jedoch wegen der unterschiedlichen Rahmenbedingungen, unter denen die Messungen stattgefunden haben, sehr eingeschränkt ist, ist der Vergleich der modellierten NH_3 -Emissionsraten mit den nach dem Modell von Ni (1998) modellierten NH_3 -Emissionsraten aussagekräftiger – hier wurden wie beschrieben während aller drei Mastdurchgänge für die Außenklima-Versuchsabteile niedrigere NH_3 -Emissionsraten als für den Warmstall mit Teilspaltenboden berechnet.

Auch die mittleren modellierten CH_4 -Emissionsraten der beiden Außenklima-Versuchsabteile (Tabelle 55) liegen für die beiden Mastdurchgänge 4 (Frühjahr) und 6 (Winter) unter den in der Literatur dokumentierten Emissionsraten (vgl. Abbildung 10). Für Mastdurchgang 5 (Sommer) liegen sie mit 3,6 g/(h*500 kg LM) im AKt bzw. mit 2,7 g/(h*500 kg LM) im AKe im mittleren bis oberen Bereich, der auch von AHLGRIMM UND BREFORD (1998) gemessen wurde. Auch hier ist jedoch die Vergleichbarkeit wegen der unterschiedlichen Rahmenbedingung sehr eingeschränkt. Die Literaturwerte können jedoch, da kein wie für die NH_3 -Emissionsraten von Ni (1998) vorhandenes Modell bekannt ist, als weiterer Hinweis genommen werden, dass die CH_4 -Emissionsraten aus Außenklimaställen nicht über denen aus Warmställen liegen.

Fazit: Wie in den obigen Abschnitten beschrieben, können Emissionsraten für Außenklimaställe mit Teilspaltenboden und mit Einstreu für verschiedene Jahreszeiten (Frühjahr, Sommer, Winter) getrennt abgeschätzt werden. Den berechneten Modellen liegt zu Grunde, dass die Emissionsraten jeweils abhängig sind von der Temperatur (gemessen in der Abluft, T_i), dem Abluftvolumenstrom (V_i) und der Zeit nach dem Einstellen (t_i). Als fixe Effekte werden die verschiedenen Haltungssysteme und Jahreszeiten betrachtet.

Für die NH_3 -Emissionsrate kann ein Vergleich der eigenen Modelle für die beiden Außenklima-Haltungssysteme mit einem Modell von Ni (1998) für einen optimalen Warmstall mit Teilspaltenboden durchgeführt werden. Der Vergleich ergibt für den Warmstall mit Teilspaltenboden deutlich höhere NH_3 -Emissionsraten, auch wenn die zur Berechnung der NH_3 -Emissionen aus den Außenklimaställen notwendigen Abluftvolumenströme deutlich (auch über ein in der Literatur dokumentiertes Maß) erhöht werden.

Auch der Vergleich der für Außenklimaställe modellierten CO_2 -Emissionsraten kann mit einem Modell von Ni (1998) für Warmställe mit Teilspaltenboden durchgeführt werden. Diesem Modell liegt zu Grunde, dass es eine vom Tier stammende CO_2 -Produktion (TCER, tranquil CO_2 exhalation rate) und eine aus den im Stall gelagerten Exkrementen gibt. Hierbei ergibt der Vergleich von Außenklimaställen und einem Warmstall mit Teilspaltenboden wie für NH_3 höhere Emissionsraten aus dem Warmstall. Der Vergleich der für Frühjahr, Sommer und Winter modellierten CO_2 -Emissionsraten für den Außenklimastall mit Teilspaltenboden mit der TCER ergibt für das Frühjahr und den Winter CO_2 -Emissionsraten, die der TCER in etwa entsprechen, für den Sommer liegen sie über der TCER. Das bedeutet, dass im Sommer auch eine CO_2 -Freisetzung aus der Gülle stattfindet. Für die Emissionsraten von CH_4 liegen hierfür keine genauen Modelle vor, so dass hier kein Vergleich der modellierten Emissionsraten für Außenklimaställe und Warmställe durchgeführt werden kann.

Der Vergleich der gemittelten Emissionsraten mit den tatsächlich gemessenen Emissionsraten für NH_3 , CH_4 und CO_2 in den Außenklimaställen zeigt, dass im Sommer und Winter die Werte gut miteinander übereinstimmen. Im Frühjahr jedoch liegen die modellierten Emissionsraten wegen messtechnischer Ausfälle zu Beginn des Messzeitraumes deutlich unter den gemessenen. Für diesen Zeitraum sind die modellierten Daten den gemessenen Werten vorzuziehen.

7 Schlussfolgerungen

Nach der Darstellung der Problematik, der Methoden und der Ergebnisse der in dieser Arbeit vorgestellten Emissionsratenbestimmung an Außenklimaställen für Mastschweine können für die verschiedenen Bereiche die folgenden Schlüsse gezogen werden, die im Anschluss erläutert werden:

- Landwirtschaftliche Tierhaltung, auch die Mastschweinehaltung, steht in der öffentlichen Kritik bezüglich Umweltverträglichkeit und Tiergerechtigkeit.
- Zur Emissionsratenbestimmung aus der Mastschweinehaltung sind Dauermessungen notwendig, die mit geeigneten Messtechniken durchgeführt werden müssen.
- Die Messungen müssen an praxisüblichen Haltungssystemen wegen der Repräsentativität der Ergebnisse durchgeführt werden.
- Die in den Außenklima-Versuchsabteilen mit Teilspaltenboden bzw. mit Einstreu gemessenen NH_3 , CH_4 - und CO_2 -Emissionsraten liegen deutlich unter denen des Warmstalls mit Teilspaltenboden
- Auch die mit einem allgemeinen linearen Modell für die Außenklima-Versuchsabteile berechneten NH_3 - und CH_4 -Emissionsraten liegen noch deutlich unter denen nach einem Modell von Ni (1998) für einen Warmstall mit Teilspaltenboden berechneten Emissionsraten.
- Wegen der hier für die verschiedenen Versuchsabteile trotz gleichen Tiermaterials und gleicher Umgebungsbedingungen (Fütterung, etc.) unterschiedlich hoch gemessenen CO_2 -Emissionsraten, ist von einer für verschiedene Haltungssysteme unterschiedlichen CO_2 -Produktion im Stall auszugehen, die nach Ni (1998) zu weitaus größeren Anteilen aus den Exkrementen stammt. Die zur Volumenstrombestimmung häufig eingesetzte CO_2 -Bilanz ist somit abzulehnen.
- Die modellierten Emissionen aus dem Außenklima-Versuchsabteil mit Einstreu scheinen wegen der kürzeren Verweildauer der Exkremente im Versuchsabteil geringer als die aus dem Außenklima-Versuchsabteil mit Teilspaltenboden zu sein.
- Die Modellierung der Emissionsraten relativiert die für den Frühjahrmastdurchgang (4) relativ hohen gemessenen Emissionsraten durch Interpolation der fehlenden Messtage zu Beginn dieses Mastdurchgangs.
- Die Haupteinflussfaktoren auf die Höhe der Emissionsraten sind das Haltungssystem, der Mastdurchgang (entspricht Jahreszeit) sowie die Stalltemperatur, der Abluftvolumenstrom und die Zeit nach dem Einstellen.
- Im Vergleich zu den in der Literatur dokumentierten NH_3 - und CH_4 -Emissionsraten liegen die hier für die Außenklimaställe gemessenen während des Frühjahrs- und Wintermastdurchgang (4 und 6) unter bzw. im unteren Bereich der vergleichbaren Emissionsraten aus Warmställen, während des Sommers (Mastdurchgang 6) im mittleren bis oberen Bereich. Grund hierfür kann die hier nicht nährstoffangepasste Futterration sein.

Zur umfassenden Bewertung der in der Mastschweinehaltung relativ neu eingeführten Außenklimaställe ist neben einer Analyse von Investitionskosten, Mast- und Schlachtleistun-

gen sowie dem Gesundheitsstatus und der Tiergerechtheit vor allem die Umweltwirkung dieser Haltungssysteme von großer Bedeutung. Diese Sachverhalte wurden in dem vom BMELF über die Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung (BLE) geförderten Projekt „Bau und Nutzung eines Schweinestalles auf Flüssigmistbasis als Außenklimastall mit Teilspaltenboden und Ruhekisten (514-33.21/96UM005)“, an das die vorliegende Arbeit angegliedert ist, untersucht. Da die landwirtschaftliche Tierhaltung in diesen Zeiten besonders im Visier der Öffentlichkeit steht (Massentierhaltung, Tiertransporte, Umweltzerstörung, Tierseuchen), sind diese *Umweltwirkungen*, und hier besonders die klima- und umweltschädlichen gasförmigen Emissionen, zu untersuchen gewesen.

In der Mastschweinehaltung ist wegen der hohen diurnalen und saisonalen Variabilität der Emissionsraten von NH_3 , CH_4 , N_2O und CO_2 eine *Dauermessung* der Emissionsraten über einen Zeitraum von einem Jahr notwendig. Das hierfür in dieser Arbeit eingesetzte Instrumentarium der „*Dauermesskette*“, das im Rahmen des vom BStMLU geförderten Projektes „Überprüfung und Einrichtung von Messverfahren zur Dauermessung von Emissionsströmen, insbesondere von Ammoniak, Lachgas und Methan, aus geschlossenen Ställen (7/74-8721.27-1997/18)“ entwickelt wurde, war hierzu sehr gut geeignet, da mit der sog. Messstellenumschaltung (MSU) alle an den verschiedenen Messstellen gemessenen Daten erfasst, gemittelt und gespeichert werden konnten. Außerdem erfolgte die Ansteuerung der beprobten Messstellen und des Gasmessgerätes über die MSU. Durch den Einsatz zweier Gaspumpen, von denen die eine kontinuierlich die Probenluft aller Messstellen bis zur MSU vorhält und die andere die dort aktuell anstehende Probenluft zum Gasmessgerät pumpt, wird die Spülzeit der bis zu 80 m langen Gasleitungen auf ein Minimum reduziert, da effektiv nur eine Leitungslänge von 2 m gespült werden muss. Über die kontinuierliche Beheizung der Gasleitung mit einem Thermostaten wird sichergestellt, dass in den Gasleitungen keine Kondensation stattfindet.

Das ebenfalls im Rahmen des o. g. Projektes ausgewählte *photoakustische Gasmessgerät*, der Multigasmonitor 1302 (Fa. Innova Airtech Instruments, ehemals Brüel & Kjær) ist für Dauermessungen in Ställen geeignet. Vorausgesetzt werden muss aber die regelmäßige sorgfältige Kalibration und Überprüfung (Mehrkomponenten).

Mit der Methode der „*großen dynamischen Kammer*“, d. h. mit der Kapselung und Zwangsentlüftung der Versuchsabteile im Außenklimastall wurde eine Lösung gefunden, mit der kontinuierlich die Abluftvolumenströme aus den beiden Versuchsabteilen im Außenklimastall gemessen werden können. Die Überprüfung dieser Methode, kommt zu dem

Ergebnis, dass keine die sehr komplexen Verhältnisse in diesem Stall beeinträchtigenden Bedingungen festgestellt werden können, weder was die Temperaturbedingungen, noch was das Strömungsgeschehen betrifft.

Das im Außenklimastall eingerichtete Versuchsabteil „Außenklima-Versuchsabteil mit Teilspaltenboden – AKt“ entspricht dem Haltungssystem des Außenklimastalls mit Teilspaltenboden und Ruheboxen. Das Versuchsabteil „Außenklima-Versuchsabteil mit Einstreu“ ist dahingehend abgewandelt, dass die Spaltenbodenfläche mit Faserzementplatten, in die Löcher zur Harnableitung eingefügt sind, zugedeckt ist und mit geringen Stroh-mengen von 100-200 g Stroh/(Tier und Tag) eingestreut wird. Die Entmistung erfolgt diskontinuierlich alle 2-4 Tage von Hand. Das im Warmstall mit Teilspaltenboden als Referenzabteil eingebaute Versuchsabteil „Warmstall mit Teilspaltenboden“ ist mit einer vom übrigen Warmstall getrennten Zu- und Abluftführung ausgestattet. Wegen der aber auch nachträglich nicht zu optimierenden Luftführung und Klimatisierung dieses Versuchsabteiles, ist dieses Versuchsabteil als nicht optimal anzusehen. Die hier gemessenen Emissionsraten müssen unter diesem Aspekt bewertet werden und dürfen nicht unkritisch mit denen aus den Außenklima-Versuchsabteilen verglichen werden. Allerdings sind aber derartige Teilspaltenbodenställe in der Praxis durchaus verbreitet. Zwischen den Tierleistungsdaten der drei untersuchten Versuchsabteile konnten keine signifikanten Unterschiede festgestellt werden, tendenziell lagen die täglichen Zunahmen im Versuchsabteil mit Einstreu etwas höher (HAIDN ET AL., 2000).

Die in den beiden Außenklimaställen gemessenen Emissionsraten für NH_3 liegen deutlich unter denen aus dem Warmstall mit Teilspaltenboden. Da sie auch noch deutlich unter den nach einem Modell von Ni (1998) berechneten NH_3 -Emissionsraten liegen, das in einem optimalen Warmstall mit Teilspaltenboden ermittelt wurde, kann mit Sicherheit gefolgert werden, dass das NH_3 -Emissionspotential aus Außenklimaställen niedriger ist als aus Warmställen.

Für CH_4 ergibt der Vergleich der drei Versuchsabteile während aller drei untersuchten Mastdurchgänge ebenfalls deutlich geringere CH_4 -Emissionsraten für die beiden Außenklima-Versuchsabteile. Im Vergleich mit CH_4 -Emissionsraten für Warmställe mit Teilspaltenboden liegen die beiden Außenklimaställe mit Teilspaltenboden und mit Einstreu während des Mastdurchgangs 4 und 6 (Frühjahr und Winter) darunter, im Sommer (Mastdurchgang 5) im mittleren Bereich. Folglich kann auch auf ein Minderungspotential der CH_4 -Emissionen durch Außenklimaställe geschlossen werden.

Die in den drei Versuchsabteilen gemessenen N_2O -Emissionsraten liegen alle auf dem für Teil- und Vollspaltenbodenställe üblichen niedrigen Niveau. Ob in den Außenklimaställen noch weitere Minderungsmöglichkeiten gegeben sind, war mit der eingesetzten Gasmess-technik nicht sicher zu überprüfen.

Die in den beiden Außenklimaställen gemessenen CO_2 -Emissionsraten liegen wie die NH_3 - und CH_4 -Emissionsraten unter denen des Warmstalls mit Teilspaltenboden. Auch hier ergibt der Vergleich mit einem von Ni (1998) ermittelten Modell zur CO_2 -Produktion aus einem Warmstall mit Teilspaltenboden eine deutliche Reduzierung der CO_2 -Emissionsraten in den Außenklima-Versuchsabteilen. Der Schluss, der daraus gezogen werden muss, ist, dass ein unterschiedlich hoher Anteil der CO_2 -Produktion im Stall aus den Exkrementen stammen muss, da sonst bei gleichem Tiermaterial und gleichen Umgebungsbedingungen gleich hohe CO_2 -Emissionsraten gemessen werden müssen. Dieses Ergebnis von Ni (1998) kann durch diese Arbeit bestätigt werden. Eine Anwendung der *CO₂-Bilanzmethode zur Volumenstrombestimmung* aus verschiedenen Ställen ist somit nicht möglich, da von unterschiedlichen CO_2 -Produktionsraten, je nach Haltungssystem und Umgebungsbedingungen ausgegangen werden muss.

Aus den für die Außenklima-Versuchsabteile berechneten Modellen für die NH_3 -, CH_4 - und CO_2 -Emissionsrate kann zum einen gefolgert werden, dass sich die beiden Versuchsabteile signifikant unterscheiden. Dies kann insofern nicht verwundern, als dass das emittierende Kot-Harn-Einstreugemisch im Versuchsabteil mit Einstreu immer wieder aus dem Versuchsabteil entfernt wird und auf dem Misthaufen gelagert wird, wodurch die Emission lediglich vom Stall zum Lager verlagert wird. Diese Lagerverluste konnten im Rahmen dieser Arbeit nicht gemessen werden, hätte man dies gemacht, so wären auch die Emissionen aus dem Güllelager zu messen gewesen.

Die zweite Schlussfolgerung aus den beiden *Modellen* für die Außenklima-Versuchsabteile betrifft die Emissionsraten während des Mastdurchgangs 4 (Frühjahr); hier konnte aus messtechnischen Gründen zu Beginn des Mastdurchgangs ca. sechs Wochen lang nicht gemessen werden, so dass die gemittelten gemessenen Emissionsraten für NH_3 , CH_4 und CO_2 wegen der im Verlauf des Mastdurchgangs zunehmenden Emissionsrate überschätzt werden. Die modellierten mittleren NH_3 -, CH_4 - und CO_2 -Emissionsraten sind deutlich niedriger als die gemessenen und entsprechen eher den tatsächlichen Emissionsraten aus Außenklimaställen. Dies zeigt, dass gerade in der Mastschweinehaltung wegen der im Verlauf eines Mastdurchgangs steigenden Emissionsraten (vor allem bei Ställen, die im Rein-

Raus-Verfahren gefahren werden) eine *Dauermessung* von größter Bedeutung ist, da sonst die Repräsentativität der ermittelten Emissionsrate sehr eingeschränkt ist.

Als *Haupteinflussfaktoren* auf die Emissionsrate wurde das Haltungssystem und die Jahreszeit (entspricht der Variable Mastdurchgang) ermittelt; hinzu kommen die Einflüsse der Stalltemperatur (hier gemessen in der Abluft), des Abluftvolumenstroms und die Zeit nach dem Einstallen, die zum einen ein Maß für das Alter der Tiere ist, aber auch die im Laufe eines Mastdurchgangs zunehmende Verschmutzung der Buchten und Tiere, sowie die steigende Güllemenge im Kanal repräsentiert. Mit diesen Faktoren wurden für die Außenklimaställe die allgemeinen linearen Modelle gerechnet.

Vor allem am Beispiel der NH_3 -Emissionsraten zeigt sich beim Vergleich der in dieser Arbeit gemessenen Emissionsraten mit den aus der Literatur bekannten Emissionsraten, dass das wohl größte und am einfachsten zu erfüllende Minderungspotential durch die nährstoffangepasste (vor allem Rohprotein angepasste) Fütterung zu erzielen ist. Dies belegen zahlreiche Untersuchungen und ist auch an den in dieser Arbeit hohen $\text{NH}_4\text{-N}$ -Gehalten in den Exkrementen und an den daraus resultierenden hohen NH_3 -Emissionsraten bei Rohprotein-Übersorgung zu sehen. Dass die Emissionsraten aus den Außenklima-Versuchsabteilen besonders während des Frühjahrs- und Wintermastdurchgang trotzdem unter bzw. im unteren Bereich der Literaturwerte liegen, deutet wiederum auf das Emissionsminderungspotential durch diese Haltungssysteme hin. Die für den Sommermastdurchgang gemessenen Emissionsraten für NH_3 und CH_4 in den Außenklima-Versuchsabteilen liegen eher im mittleren bis oberen Bereich der in der Literatur angegebenen Werte.

8 Zusammenfassung und Ausblick

Die landwirtschaftliche Tierhaltung ist in zunehmendem Maße dazu aufgefordert, neben einer wirtschaftlichen Produktion von Fleisch auch Aspekte der Tiergerechtigkeit und des Umwelt- und Klimaschutzes zu berücksichtigen. Für die Mastschweinställe bieten die neuen Außenklimaställe hinsichtlich der Wirtschaftlichkeit und der Tiergerechtigkeit hierfür eine gute Alternative, die jedoch noch auf ihre gasförmigen Emissionen zu untersuchen ist.

Ziel der Arbeit ist es gewesen, die Emissionsraten von NH_3 , CH_4 , N_2O und CO_2 aus zwei Außenklima-Versuchsabteilungen mit Teilspaltenboden bzw. mit Einstreu experimentell in einer Dauermessung zu ermitteln und mit den zeitgleich auf dem selben Betrieb gemessenen Emissionsraten aus einem Warmstall mit Teilspaltenboden zu vergleichen. Außerdem sollten die Haupteinflussfaktoren auf die Höhe der Emissionsraten ermittelt und quantifiziert werden.

Emissionsraten aus Außenklimaställen für Mastschweine wurden bisher nur in kurzzeitigen Messungen über maximal zwei Tage am Stück gemessen. Die Schwierigkeit besteht darin, die zur Berechnung der Emissionsraten notwendigen Abluftvolumenströme zu messen, was in diesen Fällen meist mit Hilfe der Tracergasmethode erfolgt ist. Der Nachteil dabei ist, dass die Tracergasfreisetzung und -detektion an die herrschenden Anströmungsverhältnisse angepasst erfolgen muss, die sich bei Außenklimaställen jedoch schnell und häufig ändern. In dieser Arbeit wurde der Abluftvolumenstrom mit Hilfe der Methode der „großen dynamischen Kammer“ gemessen. Hierbei wurden die beiden Versuchsabteile mit Teilspaltenboden und mit Einstreu im Außenklimastall gekapselt und jeweils mit in den Stallaußenwänden vorgelagerten Vorbauten integrierte Abluftventilatoren zwangsentlüftet. Die Zwangsentlüftung wird über eine Temperaturregelung geregelt, die kontinuierlich die Solltemperatur im nicht gekapselten Außenklimastall misst und mit der Isttemperatur im Außenklima-Versuchsabteil mit Teilspaltenboden vergleicht. Der Abluftvolumenstrom kann über den Abluftventilatoren nachgelagerte Messventilatoren kontinuierlich über mehrere Mastdurchgänge gemessen werden. Die Messventilatoren werden regelmäßig mit einem Flügelradanemometer kalibriert. Die Überprüfung der Einsetzbarkeit der dynamischen Kammer zur Volumenstrombestimmung aus den Außenklima-Versuchsabteilungen erfolgt über den Vergleich der in den gekapselten Außenklima-Versuchsabteilungen und im nicht gekapselten Außenklimastall gemessenen relativen Luftfeuchte und der Temperaturen in 0,5 m, 2 m und 6 m Höhe sowie über den Vergleich der Soll- und Isttemperaturen der

Temperaturregelung. Eine weitere Überprüfung findet durch den Vergleich der mit einem Ultraschallanemometer gemessenen Strömungsgeschwindigkeiten an sieben analogen Stellen im nicht gekapselten Außenklimastall und im Außenklima-Versuchsabteil mit Teilspaltenboden statt. Alle Überprüfungen kommen zu dem Ergebnis, dass die Kapselung der Versuchsabteile im Außenklimastall keine wesentliche Veränderung der emissionsrelevanten Bedingungen bewirkt.

Die kontinuierliche Gaskonzentrationsmessung erfolgt mit einem photoakustischen Infrarotspektrometer, dem Multigasmonitor 1302 (Fa. Innova Airtech Instruments, vormals Brüel & Kjær), das in der Lage ist, über verschiedene, auf einem Filterkarussell angeordnete optische Filter NH_3 , CH_4 , N_2O , CO_2 und H_2O quasi gleichzeitig zu messen. Das Messgerät wird regelmäßig vor und nach jedem Mastdurchgang an der Gasmischstation „GEMS 2000“ der Landtechnik Weihenstephan (LTW) kalibriert und überprüft. Auch der in situ Vergleich des Multigasmonitors mit dem hochgenauen FTIR-Spektrometer der LTW ergibt eine ausreichende Genauigkeit der Gaskonzentrationsmesstechnik.

Mit der Messstellenumschaltung (MSU), die speziell für diese Dauermessung konzipiert wurde, waren die technischen Möglichkeiten gegeben, eine solche Messung mit einem handhabbaren personellen Aufwand durchzuführen. Die automatische Ansteuerung aller zu beprobenden Messstellen und des Gasmessgerätes war gewährleistet, ebenso die Online-Datenabfrage und -erfassung.

Die in den Außenklima-Versuchsabteilen gemessenen Abluftvolumenströme liegen während aller Mastdurchgänge auf dem selben Niveau wie die von NIEBAUM ET AL. (2001), BREHME (1997) und HÖRNIG ET AL. (1993) mit der Tracergasmethode ermittelten Abluftvolumenströme. Für den Frühjahrsmastdurchgang werden im Mittel 97 bzw. $106 \text{ m}^3/(\text{h} \cdot \text{Tierplatz})$ gemessen, für den Sommermastdurchgang 110 bzw. $117 \text{ m}^3/(\text{h} \cdot \text{Tierplatz})$ und im Winter durchschnittlich $58 \text{ m}^3/(\text{h} \cdot \text{Tierplatz})$.

Die während der drei Mastdurchgänge gemessenen NH_3 -Emissionsraten betragen für Mastdurchgang 4 (Frühjahr) $3,9 \text{ g}/(\text{h} \cdot 500 \text{ kg LM})$ für den Außenklimastall mit Teilspaltenboden (AKt), bzw. $3,2 \text{ g}/(\text{h} \cdot 500 \text{ kg LM})$ im Außenklima-Versuchsabteil mit Einstreu (AKe). Im Warmstall mit Teilspaltenboden werden hier $11,6 \text{ g}/(\text{h} \cdot 500 \text{ kg LM})$ gemessen. Im Sommer (Mastdurchgang 5) werden NH_3 -Emissionsraten im AKt von $5,1 \text{ g}/(\text{h} \cdot 500 \text{ kg LM})$ und im AKe von $4,7 \text{ g}/(\text{h} \cdot 500 \text{ kg LM})$ gemessen, gegenüber $14,8 \text{ g}/(\text{h} \cdot 500 \text{ kg LM})$ im Warmstall mit Teilspaltenboden. Im Winter (Mastdurchgang 6)

werden im AKt 0,9 g/(h*500 kg LM) und im AKe 1,1 g/(h*500 kg LM) gegenüber 9,1 g/(h*500 kg LM) im Warmstall mit Teilspaltenboden gemessen.

Den gemessenen stehen die modellierten NH₃-Emissionsraten gegenüber, die wegen der Interpolierung der zu Beginn des Mastdurchgang 4 (Frühjahr) ca. sechswöchigen Messunterbrechung für diesen Mastdurchgang nur 1,8 g/(h*500 kg LM) (AKt) bzw. 1,1 g/(h*500 kg LM) (AKe) berechnen. Nach dem Modell von Ni (1998) für einen Warmstall mit Teilspaltenboden ergibt sich hier eine NH₃-Emissionsrate von 4,1 g/(h*500 kg LM). Im Sommer unterscheiden sich die modellierten NH₃-Emissionsraten mit 5,3 g/(h*500 kg LM) für den Außenklimastall mit Teilspaltenboden und mit 4,6 g/(h*500 kg LM) für den Außenklimastall mit Einstreu nur gering von den gemessenen Emissionsraten, ebenso im Winter mit 0,8 g/(h*500 kg LM) (AKt) bzw. 0,9 g/(h*500 kg LM) (AKe). Für den Warmstall mit Teilspaltenboden werden für den Sommer mit dem Modell von Ni (1998) 6,5 g/(h*500 kg LM) und für den Winter 3,0 g/(h*500 kg LM) berechnet. Eine deutliche Minderung der NH₃-Emissionsraten der Außenklimaställe im Vergleich zu einem Warmstall mit Teilspaltenboden ist offensichtlich.

Analog zu den NH₃-Emissionsraten werden die CH₄-Emissionsraten während der drei Mastdurchgänge in den drei Versuchsabteilen gemessen. Für das Außenklima-Versuchsabteil mit Teilspaltenboden (AKt) ergibt sich während Mastdurchgang 4 (Frühjahr) eine durchschnittliche CH₄-Emissionsrate von 2,1 g/(h*500 kg LM), im Außenklima-Versuchsabteil mit Einstreu (AKe) von 2,3 g/(h*500 kg LM). Im Warmstall mit Teilspaltenboden werden zeitgleich 10,9 g/(h*500 kg LM) gemessen. Im Sommer (Mastdurchgang 5) liegen die CH₄-Emissionsraten im AKt bei 3,3 g/(h*500 kg LM), im AKe bei 2,9 g/(h*500 kg LM) und im Vergleich dazu im Warmstall mit Teilspaltenboden bei 31,9 g/(h*500 kg LM). Im Winter (Mastdurchgang 6) werden im Außenklimastall mit Teilspaltenboden bzw. mit Einstreu sehr niedrige CH₄-Emissionsraten von 0,9 bzw. 0,8 g/(h*500 kg LM) gemessen, im Warmstall mit Teilspaltenboden hingegen 14,9 g/(h*500 kg LM). Für Methan können den gemessenen Emissionsraten nur bei den Außenklima-Versuchsabteilen modellierte CH₄-Emissionsraten gegenübergestellt werden. Hier ergibt sich analog zu den modellierten NH₃-Emissionsraten eine für den Mastdurchgang 4 (Frühjahr) mit 0,7 bzw. 0,6 g/(h*500 kg LM) deutlich niedrigere modellierte CH₄-Emissionsrate. Diese ist wegen der Interpolation der zu Mastbeginn fehlenden Zeiträume mit geringerer Emission dem Mittelwert der gemessenen Emissionsrate vorzuziehen, und

macht die Notwendigkeit deutlich, Emissionsraten aus der Mastschweinehaltung (im Rein-Raus-Verfahren) kontinuierlich im Rahmen einer *Dauermessung* zu ermitteln. Im Sommer (Mastdurchgang 5) liegen die modellierten CH₄-Emissionsraten mit 3,6 bzw. 2,7 g/(h*500 kg LM) im AKt und AKe ungefähr ebenso hoch wie die gemessenen. Für den Winter (Mastdurchgang 6) gilt das selbe mit 0,6 bzw. 0,7 g/(h*500 kg LM) für den Außenklimastall mit Teilspaltenboden bzw. mit Einstreu. Auch bei Methan ist durch die Außenklimaställe mit einer deutlichen Reduzierung der Emissionen zu rechnen.

Gesicherte N₂O-Emissionsraten können nur für den Mastdurchgang 5 und 6 (Sommer und Winter) angegeben werden. Für den Außenklimastall mit Einstreu ergeben sich während Mastdurchgang 5 N₂O-Emissionsraten von 0,05 g/(h*500 kg LM). Diese liegen unter denen des Warmstalls mit Teilspaltenboden mit 0,15 g/(h*500 kg LM). Im Winter werden im Warmstall mit Teilspaltenboden N₂O-Emissionsraten von 0,13 g/(h*500 kg LM) gemessen. Wegen dieser geringen Datengrundlage können hierfür keine Modellierungen für die N₂O-Emissionsrate durchgeführt werden.

Die CO₂-Emissionsraten betragen für den Mastdurchgang 4 (Frühjahr) im Außenklima-Versuchsabteil mit Teilspaltenboden bzw. mit Einstreu 438 bzw. 444 g/(h*500 kg LM), im Warmstall mit Teilspaltenboden werden hier 1114 g/(h*500 kg LM) gemessen. Im Sommer (Mastdurchgang 5) werden für das Außenklima-Versuchsabteil mit Teilspaltenboden 510 g/(h*500 kg LM) und für das mit Einstreu 498 g/(h*500 kg LM) gemessen, im Warmstall im gleichen Zeitraum 1313 g/(h*500 kg LM). Im Winter (Mastdurchgang 6) werden 378 g/(h*500 kg LM) im AKt und 363 g/(h*500 kg LM) im AKe gemessen im Vergleich zu 1053 g/(h*500 kg LM) im Warmstall mit Teilspaltenboden.

Im Vergleich zu den gemessenen CO₂-Emissionsraten liegen die modellierten für Mastdurchgang 4 analog zu den NH₃- und CH₄-Emissionsraten mit 381 bzw. 310 g/(h*500 kg LM) im AKt bzw. im AKe niedriger. Die für den Sommer und den Winter modellierten CO₂-Emissionsraten sind mit 539 g/(h*500 kg LM) (Sommer, AKt) und 516 g/(h*500 kg LM) (Sommer, AKe) sowie 397 bzw. 376 g/(h*500 kg LM) im Winter für das Außenklima-Versuchsabteil mit Teilspaltenboden bzw. mit Einstreu ungefähr gleich hoch wie die gemessenen CO₂-Emissionsraten. Für den Warmstall mit Teilspaltenboden ergeben sich nach dem Modell von Ni (1998) berechnete mittlere CO₂-Emissionsraten von 710 g/(h*500 kg LM) im Frühjahr, 809 g/(h*500 kg LM) im Sommer und 640 g/(h*500 kg LM) im Winter. Auch hierbei ist zu erkennen, dass die CO₂-Emissionsraten aus den Außenklimaställen deutlich unter denen eines Warmstalls mit Teil-

spaltenboden liegen. Die hier für die CO₂-Emissionsraten gewonnenen Ergebnisse bestätigen die Aussage von Ni (1998), dass ein weitaus größerer Anteil der CO₂-Produktion im Stall aus den Exkrementen und nicht vom Tier allein stammt. Folglich können Volumestromabschätzungen mittels der CO₂-Bilanzmethode nicht generell an verschiedenen Haltungssystemen eingesetzt werden, da von haltungssystem- und umgebungsspezifischen Einflüssen auf die CO₂-Produktion ausgegangen werden muss.

Neueste Ergebnisse aus der Literatur (NIEBAUM ET AL., 2001) bestätigen (aus Kurzzeitmessungen während zweier Jahreszeiten, Sommer und Winter) das geringere Emissionspotenzial von Außenklimaställen für Mastschweine im Vergleich zu herkömmlichen Warmställen mit Teilspaltenboden.

Ausblick

Was die tierhalterische Seite der Schweinehaltung betrifft, so steht diese aktuell in der Diskussion um eine Änderung der Richtlinie 91/630/EWG über Mindestanforderungen für den Schutz von Schweinen, die vom Rat und der Kommission der Europäischen Union vorgeschlagen wurden. Die Mastschweinehaltung würde hierbei erheblich vom vorgesehenen Verbot von Vollspaltenböden getroffen werden, die durch Teilspaltenböden mit mindestens einem Drittel planbefestigter Fläche ersetzt werden müssten. Hier sind folglich funktionierende Systeme gefordert, die diese Lücke schließen können. Außenklimakistenställe mit Teilspaltenboden oder mit Einstreu sind hier eine potenzielle Alternative, die Möglichkeit der weiteren Verbreitung dieser Haltungssysteme wäre gegeben.

Im Rahmen der IVVU-Richtlinie 96/61/EC wird zur Zeit von nationalen Kommissionen ein Katalog über die „best verfügbaren Techniken“ (BVT) in der Tierhaltung erarbeitet, in denen neben der Wirtschaftlichkeit und Tiergerechtigkeit auch die Umweltwirkungen der verschiedenen Haltungssysteme in der Tierhaltung, darunter der Mastschweinehaltung, untersucht und dokumentiert wird. In dieser vorläufigen Bewertung schneiden die Außenklimakistenställe mit Teilspaltenboden bezüglich der Emissionen (Luft) besser ab als das Referenzsystem Vollspaltenboden mit Kleingruppe und wird daher in die Kategorie I, BVT-Verfahren eingegliedert. Die Diskussion um die BVT ist aber noch nicht abgeschlossen, der Verbreitung von Außenklimakistenställen steht allerdings von dieser Seite her nichts im Wege.

Ein wichtiger Punkt, der in dieser Arbeit nicht untersucht wurde, ist das Ausbreitungsverhalten der gasförmigen Emissionen aus den Außenklimaställen. Hier werden sich je nach Gebäudeanströmung und Ausführung der Seitenwände und Firstöffnungen erhebliche Unterschiede ergeben. Simulationen hierzu werden vom Institut für Biosystemtechnik an der Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft (FAL) durchgeführt.

Im Rahmen des von der Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung (BLE) geförderten Projektes „Bau und Nutzung eines Schweinestalles auf Flüssigmistbasis als Außenklimastall mit Teilspaltenboden und Ruheboxen (514-33.21/96UM005)“ wurden auch die Geruchsemissionen aus den in dieser Arbeit untersuchten Haltungssystemen während dreier Mastdurchgänge (bzw. Jahreszeiten) untersucht. Die Geruchsemissionen aus den Außenklima-Versuchsabteilen sind ähnlich den hier untersuchten Gasemissionen niedriger als aus dem Warmstall (HAIDN ET AL., 2000; RATHMER ET AL., 2001a). Hierbei besteht nun weiterer Forschungsbedarf bezüglich der Geruchsimmissionen, mit denen im Umfeld dieser Ställe zu rechnen ist.

Interessant ist diese Fragestellung im Zusammenhang mit der derzeitigen und zukünftigen Genehmigungspraxis von Außenklimaställen für Mastschweine. Aus den ersten Ergebnissen dieser Arbeit wurde für Bayern vom Bayerischen Landesamt für Umweltschutz (LfU), der Bayerischen Landesanstalt für Landtechnik und der Bayerischen Landesanstalt für Tierzucht (BLT) eine Orientierungshilfe entwickelt, die den Genehmigungsbehörden eine einheitliche Hilfestellung zur Genehmigung von Außenklimaställen für Mastschweine geben soll. In Zuge der Einführung der Richtlinie VDI 3474 „Emissionsminderung Tierhaltung Geruchsstoffe“, die für die Schweinehaltung die Richtlinie VDI 3471 „Emissionsminderung Tierhaltung - Schweine“ ersetzt, sollen die Außenklimaställe dann bundesweit einheitlich bewertet werden. Ebenso ist die Kenntnis des Ausbreitungsverhaltens von Geruch und gasförmigen Emissionen aus Außenklimaställen für die Novellierung der TA-Luft und die Novellierung des UVPG notwendig. Die in dieser Arbeit erarbeiteten *emissionsseitigen* Parameter können darin einfließen.

Im Hinblick auf die oben erwähnten Neuerungen ist die Untersuchung weiterer Außenklimaställe im Rahmen von Dauermessungen notwendig, um die Bandbreite der Haltungssystemvariationen (Einstreu, Schrägmist, Tiefstreu, Nürtinger-System) abzudecken. Bei der Untersuchung unterschiedlicher Rohproteingehalte in der Fütterung in diesen Außenklimaställen muss ermittelt werden, ob die in Warmställen durch eine Verminderung der RP-

Gehalte in der Fütterung zu erzielenden NH₃-Emissionsminderungen auf die Außenklimaställe in gleichem Maßstab übertragbar sind.

Dauermessungen sind in der Mastschweinehaltung kurzzeitigen Messungen vorzuziehen, da die Abhängigkeit der Emissionen von physiologischen und haltungstechnischen Einflüssen (Güllefüllstände, Verschmutzung der Buchten, etc.) abhängt.

Die in dieser Arbeit zur Volumenstrombestimmung aus den Außenklima-Versuchsabteilungen angewendete Methode der „großen dynamischen Kammer“ ist sehr aufwendig zu betreiben und kann nicht ohne weiteres auf andere Ställe angewendet werden - sollen die *Emissionen* aus Außenklimaställen weiter untersucht werden, so ist eine Methode zur *kontinuierlichen* Volumenstrombestimmung essenziell.

9 Summary

Economical production, animal welfare and environmental protection will be necessary for future livestock farming. According to this, new outdoor climate houses for fattening pigs seem to be a good solution, although their gaseous emissions have to be investigated.

The purpose of this project was to quantify emission rates of NH₃, CH₄, N₂O and CO₂ from two different outdoor climate experimental compartments with partly slatted floor and straw in a long term measurement and to compare them with the emission rates of a heat insulated house for fattening pigs on the same farm during the same time. Further more, the main influences on the emission rates have to be examined and quantified.

Until now, emission rates from outdoor climate houses for fattening pigs were the results of short term measurements of less than two days. The difficulties arose from measuring the air flow, which is necessary for calculating the emission rates. Therefore the tracer gas method was usually used. The disadvantage of this method is that the tracer gas emission and detection has to be adapted to outdoor climate conditions which frequently change. In this project the air flow was detected by the method of the „large dynamic chamber“. In order to do this, the two experimental compartments in the outdoor climate house were airtightly chambered and separately ventilated by fans which are integrated in an additional construction before the spaceboard sidewalls. The ventilation is controlled by a temperature control which continuously detects the actual temperature in the not chambered outdoor climate house and compares it to the temperature in the outdoor climate experimental compartment with partly slatted floor. The air flow is continuously detected by measuring fans during several fattening periods. The measuring fans were routinely calibrated.

To prove the suitability of the application of the dynamic chamber, the temperatures in several heights and the humidity in the outdoor climate experimental compartments and in the not chambered outdoor climate house were compared. An additional proving was done by comparing the air velocity both at seven points in the unchambered outdoor climate house and in the outdoor climate experimental compartment with partly slatted floor. The result of these testings showed that the method of the dynamic chamber does not influence the circumstances of emission.

The continuous measurement of the gas concentrations is done by a photoacoustic infrared spectrometer (Innova Airtech Instruments), which could detect NH₃, CH₄, N₂O, CO₂ and

H₂O. The measuring device was calibrated and evaluated before and after each fattening period at the gas mixing station „GEMS 2000“ of the Bavarian research centre for agricultural engineering.

The multiplexer, which was developed for this long term measurement, could minimize manpower by using automatic control and by the recording of all detected parameters and data of all measuring points.

The measured air flow in the outdoor climate compartments was as high as those measured by NIEBAUM ET AL. (2001), BREHME (1997) and HÖRNIG (1993) with the tracer gas method. During spring (fattening period 4) 97 and 106 m³/(h*animal place), during summer 110 and 117 m³/(h*animal pace) and in winter an average of 58 m³/(h*animal place) were measured.

The NH₃ emission rates during the three fattening periods were measured. During spring (fattening period 4), 3,9 g/(h*500 kg LW) in the outdoor climate compartment with partly slatted floor (AKt) in comparison to 3,2 g/(h*500 kg LW) in the outdoor climate compartment with straw (AKe) were measured. During this time, in the heat insulated house with partly slatted floor (KW) 11,6 g/(h*500 kg LW) were measured. In summer (fattening period 5), 5,1 g/(h*500 kg LW) in AKt and 4,7 g/(h*500 kg LW) in AKe were measured in comparison to 14,8 g/(h*500 kg LW) in the heat insulated house with partly slatted floor. In winter, 0,9 g/(h*500 kg LW) in AKt and 1,1 g/(h*500 kg LW) in AKe were measured as compared to 9,1 g/(h*500 kg LW) in the heat insulated house with partly slatted floor.

In addition to the measured NH₃ emission rates, modelled NH₃ emission rates were calculated. During fattening period 4 (spring), these were only 1,8 g/(h*500 kg LW) in AKt and 1,1 g/(h*500 kg LW) in AKe. These results are lower because of a technical interruption of about six weeks at the beginning of fattening period 4. With a NH₃ emission rate model of Ni (1989) for a heat insulated house with partly slatted floor, a NH₃ emission rate of 4,4 g/(h*500 kg LW) was calculated during this time. In summer, the modelled NH₃ emission rates with 5,3 g/(h*500 kg LW) for AKt and with 4,6 g/(h*500 kg LW) for AKe differed not much from the measured emission rates. The same occurred in winter with 0,8 g/(h*500 kg LW) for AKt and 0,9 g/(h*500 kg LW) for AKe. In the heat insulated house with partly slatted floor 6,5 g/(h*500 kg LW) were calculated by the model of Ni (1998) in summer and 3,0 g/(h*500 kg LW) in winter. It is obvious, that a significant reduction of NH₃ emission rates is achieved by outdoor climate houses in comparison to a heat insulated house.

In the same way, the CH₄ emission rates during the three fattening periods in the three experimental compartments were measured. In the outdoor climate experimental compartment with partly slatted floor (AKt) during fattening period 4 (spring), an average CH₄ emission rate of 2,1 g/(h*500 kg LW) was measured, in the outdoor climate experimental compartment with straw (AKe) 2,3 g/(h*500 kg LW) was measured. In the heat insulated compartment with partly slatted floor (KW) 10,9 g/(h*500 kg LW) was measured during the same time. In summer (fattening period 5), the CH₄ emission rates in AKt were 3,3 g/(h*500 kg LW), in AKe 2,9 g/(h*500 kg LW) and in comparison in KW 31,9 g/(h*500 kg LW). In winter (fattening period 6) in AKt and AKe very low CH₄ emission rates of 0,9 and 0,8 g/(h*500 kg LW) were measured, but in KW 14,9 g/(h*500 kg LW). The modelled CH₄ emission rates could only be calculated for the two outdoor climate experimental compartments. The modelled CH₄ emission rates are as the NH₃ emission rates described before during fattening period 4 with 0,7 and 0,6 g/(h*500 kg LW) much lower than the calculated ones. The modelled emission rate should have a preference, because of the interpolation of the missing values (six weeks at the beginning of fattening period 4). This fact emphasizes the necessity of long term measurements for emission rates of fattening pig houses. In summer (fattening periods 5), the modelled CH₄ emission rates are with 3,6 and 2,7 g/(h*500 kg LW) in AKt and AKe almost as high as the measured ones. In winter (fattening period 6), the modelled CH₄ emission rates with 0,6 and 0,7 g/(h*500 kg LW) for AKt and AKe were also nearly the same as the measured emission rates. A significant reduction of the CH₄ emission rates can be achieved by outdoor climate houses.

N₂O emission rates could only be determined during fattening period 5 and 6 (summer and winter). In Ake, during fattening period 5, N₂O emission rates of 0,05 g/(h*500 kg LW) were measured. They were below those of KW with 0,15 g/(h*500 kg LW). In winter, in KW, N₂O emission rates of 0,13 g/(h*500 kg LW) were measured. Due to the amount of available data no models could be calculated.

During fattening period 4 (spring), the CO₂ emission rates in AKt and AKe were 438 and 444 g/(h*500 kg LW) and in KW 1114 g/(h*500 kg LW). In summer (fattening period 5), 510 g/(h*500 kg LW) in AKt and 498 g/(h*500 kg LW) in AKe were measured. During the same time, 1313 g/(h*500 kg LW) were measured in KW. In winter (fattening period 6), 378 g/(h*500 kg LW) in AKt and 363 g/(h*500 kg LW) were measured in AKe in comparison to 1053 g/(h*500 kg LW) in KW.

The comparison of the measured CO₂ emission rates with the modelled rates achieved (as described before the NH₃ and CH₄ emission rates) during fattening period 4, lower modelled CO₂ emission rates with 381 and 310 g/(h*500 kg LW) in AKt and AKe than calculated emission rates. The modelled CO₂ emission rates in summer and in winter with 539 g/(h*500 kg LW) (summer, AKT) and 516 g/(h*500 kg LW) (summer, AKe) as well as with 397 and 376 g/(h*500 kg LW) in AKt and AKe are as high as the measured ones. In the heat insulated compartment with partly slatted floor, CO₂ emission rates of 710 g/(h*500 kg LW) in spring, 809 g/(h*500 kg LW) in summer and 614 g/(h*500 kg LW) in winter were calculated with a CO₂ model of Ni (1998).

It is obvious that the CO₂ emission rates of the outdoor climate houses are lower than those of the heat insulated house with partly slatted floor. The results of these CO₂ emission rates confirm the results of Ni (1998), which show that a much bigger part of CO₂ production in an animal house is derived from the faeces and not from the animal alone. Therefore air flow estimation by the CO₂ balance method cannot generally be used at different housing systems because the influences of the housing system and the environment on CO₂ production play an important role.

Most recent publications (NIEBAUM ET AL., 2001) confirm (from short term measurements during two seasons, summer and winter) the results of this project, showing the lower emission potential of outdoor climate houses for fattening pigs in comparison to heat insulated houses with partly slatted floor.

10 Literatur

- Aarnink, A.J.A., Ouwerkerk, E.N.J. van und Verstegen, M.W.A. (1992): A mathematical model for estimating the amount and composition of slurry from fattening pigs. In: *Livestock Production Science* (31) S. 133-147.
- Aarnink, A.J.A., Wagemans, M.J.M. und Keen, A. (1993): Factors affecting ammonia emission from housing for weaned piglets. In: *Nitrogen flow in pig production and environmental consequences*. Ausgb. EAAP Publication No. 69 (Hrsg.: Verstegen, M.W.A., den Hartog, L.A., van Kempen, G.J.M. und Metz, J.H.M.) Pudoc Scientific Publishers, Wageningen, S. 286-294.
- Aarnink, A.J.A., Keen, A., Metz, J.H.M., Speelman, L., Verstegen, M.W.A. (1995): Ammonia Emission Patterns during the Growing Periods of Pigs Housed on Partially Slatted Floors. In: *Journal of Agricultural Engineering Research* (62) H. 2, S. 105-116.
- Aarnink, A.J.A., Swierstra, D., van den Berg, A.J. und Speelman, L. (1997): Effect of Type of Slatted Floor and Degree of Fouling of Solid Floor on Ammonia Emission Rates from Fattening Piggeries. In: *Ammonia emission from houses for growing pigs as affected by pen design, indoor climate and behaviour*. Institute of Agricultural and Environmental Engineering, department of Livestock Engineering, Wageningen, S. 61-78.
- Aarnink, A.J.A., van den Berg, A.J., Keen, A., Hoeksma, P. und Verstegen, M.W.A. (1997): Effect of Slatted Floor Area on Ammonia Emission and on the Excretory and Lying Behaviour of Growing Pigs. In: *Ammonia emission from houses for growing pigs as affected by pen design, indoor climate and behaviour*. Institute of Agricultural and Environmental Engineering, department of Livestock Engineering, Wageningen, S. 39-60.
- Ahlgrimm, H.J. und Breford, J. (1998): Methanemissionen aus der Schweinemast. In: *Landbauforschung Völkenrode* H. 1, S. 26-34.
- Airflow Lufttechnik GmbH (1995): *Airflow – Flügelradanemometer AV-2, Gebrauchsanleitung*, Rheinbach.
- Amon, B., Amon, T. und Boxberger, J. (1998): Emission of NH₃, N₂O and CH₄ from milking cows housed in a farmyard manure tying stall. Tagung Lökeberg '98; Workshop: "Approaches to Greenhouse Gas Inventories of Biogenic Sources in Agriculture" (Organisation: EU Concerted Action "Biogenic Emissions of Greenhouse Gases by Arable and Animal Agriculture"). Tagung vom 9.-10.7.98 in Lökeberg, Schweden.
- Amon, B., Amon, T., Boxberger, J., Pöllinger, A. und Zaussinger, A. (1996): Entwicklung einer Meßeinrichtung zur Erfassung umweltrelevanter Gasemissionen - Development of a method to determine emission rates from agriculture. In: *Die Bodenkultur* (47) S. 247-253.
- Amon, B., Boxberger, J., Amon, T., Gronauer, A., Depta, G., Nesor, S. und Schäfer, K. (1997): Emissions from agrarian sources: FTIR measurement techniques with white-cell, large chamber or open-path. In: *International Symposium Ammonia and odour control from animal production facilities*, Vinkeloord, 6-10 October 1997. Bd. 1. NVTL, Rosmalen, S. 161-168.
- Beck, J., Epinatjeff, P. und Jungbluth, T. (1998): Auswirkungen einweißreduzierter Multiphasenfütterung und eines Erdwärmetauschers auf Ammoniakemissionen, Nährstoffbilanz und Wirtschaftlichkeit in einem einstreulosen Kammstall. In: *Fritzsche, S. (Hrsg.): Umweltverträgliche Mastschweineeställe*. KTBL Arbeitspapier 259, Darmstadt. S. 42-65.

- Beese, F. (1994): Gasförmige Stickstoffverbindungen. In: Enquete-Kommission "Schutz der Erdatmosphäre" des Deutschen Bundestages (Hrsg.). Band 1 Landwirtschaft, Studienprogramm Teilband 1. Economica Verlag GmbH, Bonn, S. 4-88.
- Bittner, H., Erhard, M., Neureither, I., Mosebach, H. und Rippel, H. (1991): The K-300 fourier transform spectrometer. Environmental applications of the double pendulum interferometer. In: SPIE-The international society of optical engineering 1575, S. 186-188.
- Boxberger, J. (1986): Bauwesen, Tierische Produktion. In: Wenner, H.-L. (Hrsg.): Landtechnik, Bauwesen - Verfahrenstechnik, Arbeit, Gebäude. München, 1986.
- Boxberger, J. (1998): Bauwesen, Tierhaltung. In: Schön, H. (Hrsg.): Landtechnik, Bauwesen – Verfahrenstechniken, Arbeit, Gebäude, Umwelt. München, 1998.
- Brehme, G. (1997): Modellierung des Ausbreitungsverhaltens und Quantifizierung der gasförmigen Emissionen in einem einstreulosen Mastschweineestall mit freier Lüftung. Dipl.Ing.agr. Thesis, Georg-August-Universität Göttingen.
- Brüel & Kjær (1992): Photoakustische Gaserfassung, Ballerup, Dänemark
- Brüel & Kjær (1996): Technische Dokumentation. Multigasmonitor Typ 1302. Vol. 1 Betrieb, Ballerup, Dänemark
- Brunsch, R., Gurk, S. und Kaufmann, O. (1995): Ermittlung von Emissionen aus Tierställen auf der Grundlage verschiedener Kalkulationsmodelle. In: Bau und Technik in der landwirtschaftlichen Nutztierhaltung. (Hrsg.: Hörnig, G.) Institut für Agrartechnik Bornim, Humboldt-Universität zu Berlin, Potsdam-Bornim, S. 165-172.
- Brunsch, R. (1997): Methodical Aspects Relating the Results of Multigas monitoring and Multipoint sampling. In: Ammonia and Odour Control from Animal Production Facilities. Ausgb. Proceedings of the International Symposium Bd. 1. (Hrsg.: Voermans, J.A.M. und Monteny, G.J.) NVTL, Rosmalen, S. 185-191.
- Brunsch, R. (1998): Heat-, Carbon Dioxide- and Water Production in a Broiler House and their Associations to the Emission of Ammonia and Methane. In: AgEng Oslo 98 - International Conference on Agricultural Engineering. (Hrsg.: EurAgEng) NLH, Oslo, 98-B-047.
- Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten (BMELF) (2000): Agrarbericht der Bundesregierung 2000, Bonn.
- Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (Hrsg.) (1996): Bericht der Bundesregierung an den Deutschen Bundestag - Sechster Immissionschutzbericht der Bundesregierung. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, Bonn.
- Bundesministerium für Verbraucherschutz, Ernährung und Landwirtschaft (BMVEL) (2001a): Agrarbericht der Bundesregierung 2001, Bonn.
- Bundesministerium für Verbraucherschutz, Ernährung und Landwirtschaft (BMVEL) (2001b): Bericht über den Zustand des Waldes – Ergebnisse des forstlichen Umweltmonitorings. Bonn.
- Büscher, W. (1996): Ammoniakfreisetzung aus zwangsbelüfteten Stallanlagen mit Flüssigentmischung - Ansätze zu deren Reduzierung. Habilitation, Institut für Agrartechnik der Universität Hohenheim.
- Büscher, W., Leuschner, P. und Niethammer, F. (1996): Lüftung von Schweineställen. Bd. 1067. Auswertungs- und Informationsdienst für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten (aid) e. V., Bonn.
- Christensen, 1990: Optical Filters and their use with the Type 1302 and 1306 Photoacoustic Gas Monitors. In: Technical Review Nr. 2 Gasmonitoring Brüel & Kjær.

- Cielejewski, H. und Ratschow, J.-P. (1996): Auswirkungen verschiedener Haltungsverfahren auf die Emissionen und tierische Leistung. In: Landtechnik und landwirtschaftliches Bauwesen. Bd. 233. KTBL-Arbeitspapier (Hrsg.: KTBL, Darmstadt), Darmstadt.
- CIGR-Working group (Hrsg.) (1984): Report of Working Group on Climatization of Animal Houses. Bd. 1. Scottish Farm Buildings Investigation Unit, Craibstone, Bucksburn, Aberdeen.
- CIGR-Working Group (Hrsg.) (1994): Aerial Environment in Animal Housing - Concentrations in and Emissions from Farm House Buildings. Bd. 3. Working Group No 13 "Climatization and Environmental Control in Animal Housing" - International Commission of Agricultural Engineering Commission Internationale du Génie Rural.
- Demmers, T., Burgess, L., Phillips, V., Clark, J. und Wathes, C. (1996): Measurement methods for ammonia emissions from naturally ventilated livestock buildings. In: International Conference on air pollution from Agricultural operations , S. 201-206.
- Demmers, T.G.M. (1997): Ventilation of Livestock Buildings and Ammonia Emissions. Doctor of Philosophy Thesis, University of Nottingham, Faculty of Agricultural and Food Sciences.
- Demmers, T.-G.-M., Burgess, L.-R., Short, J.-L., Phillips, V.-R., Clark, J.-A. und Wathes, C.-M. (1998): First Experiences with Methods to Measure Ammonia Emissions from Naturally Ventilated Cattle Buildings in the UK. In: Atmospheric Environment (32), S. 285-293.
- Depta, G., Nesor, S., Becher, S., Stanzel, H. und Gronauer, A. (1996): Multigasanalyse der Emissionsraten landwirtschaftlicher Quellen, Darstellung der Meßverfahren FTIR und Laser-Anemoetrie. In: Landtechnik (51), H.4, S. 206-207.
- Depta, G., Becher, S., Gronauer, A. und Mosebach, H. (1997): Calibration and Quality-Assurance of a High-Resolution FTIR-Spectrometer for Pollutant and Greenhouse Atmospheric Trace Gases. In: Spectroscopic Atmospheric Monitoring Techniques. Ausgb. Proceedings of SPIE Bd. 3106. (Hrsg.: Schäfer, K.) SPIE, Bellingham, S. 65-72.
- Depta, G. und Gronauer, A. (1999): FTIR-Spektroskopie zur Emissionsbestimmung bei landwirtschaftlichen Quellen - Vergleich von Gaszellen- und Offenpfadmessungen. In: Agrartechnische Forschung (5), S. 97-106.
- Depta, G. (2000): Optimierung und Validierung der FTIR-Spektroskopie für die Erfassung von Spurengasemissionsraten aus landwirtschaftlichen Quellen. Dissertation. Fakultät Wissenschaftszentrum Weihenstephan für Ernährung, Landnutzung und Umwelt. Freising-Weihenstephan.
- DIN (Deutsches Institut für Normung e.V.) (1992): DIN 18910 - Wärmeschutz geschlossener Ställe, Wärmedämmung und Lüftung, Planungs- und Berechnungsgrundlagen. Mai 1992, Normenausschuss Bauwesen (NABau) im Deutschen Institut für Normung e.V.
- Enquete-Kommission "Schutz der Erdatmosphäre" des Deutschen Bundestages (1994): Schutz der Grünen Erde - Klimaschutz durch umweltgerechte Landwirtschaft und Erhalt der Wälder. Economica Verlag GmbH, Bonn.
- Faassen, H.G. van (1992): Microbial process of the nitrogen cycle in deep-litter systems for pig housing. In: Proceedings Workshop deep litter systems for pig farming - 21. & 22. September 1992. (Hrsg.: Voermans, J.A.M.) Research Institute for Pig Husbandry, Rosmalen, S. 157-165.
- Fiedler, O. (1992): Strömungs- und Durchflußmeßtechnik. Oldenbourg Verlag, München.

- Firestone, M.K. und Davidson, E.A. (1989): Microbial basis of NO and N₂O Production and consumption in soil. In: Exchange of trace gases between terrestrial ecosystems and the atmosphere (Hrsg.: Andrae, M.O. und Schimel, D.S.), Chichester, Wiley, S. 7-21.
- Früchtenicht, K.; Heyn, J.; Kuhlmann, H.; Laurenz, L. und Müller, S. (1993): Pflanzenernährung und Düngung. In: Faustzahlen für Landwirtschaft und Gartenbau. 12. Auflage.. Verlagsunion Agrar, Münster-Hiltrup.
- Gallmann, E., Hartung, E. und Jungbluth, T. (1999): Langzeituntersuchungen zur Bestimmung der Emissionen klima- und umweltrelevanter Gase sowie Geruch aus der Schweinemast. In: Tagung: Bau, Technik und Umwelt 1999 in der landwirtschaftlichen Nutztierhaltung. Landtechnik Weihenstephan, Freising, S. 81-86.
- Griffiths, P.R. und de Haseth, J.A. (Hrsg.) (1986): Fourier Transform Infrared Spectroscopy. Bd. 83. (Reihe Hrsg.: Elving, P.J., Winefordner, J.D. und Kolthoff, I.M. Chemical Analysis.) John Wiley & Sons, New York.
- Groenestein, C.M. und Van Faassen, H.G. (1996): Volatilization of Ammonia, Nitrous Oxide and Nitric Oxide in Deep-litter Systems for Fattening Pigs. In: Journal of Agricultural Engineering Research (65) H. 4, S. 269-274.
- Gronauer, A. (1993): Einflußfaktoren auf die Ammoniakfreisetzung aus Flüssigmist als Grundlage verfahrenstechnischer Verbesserungen. Dissertation. Reihe "Gelbes Heft" Nr. 47 des Bayerischen Staatsministeriums für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten, München.
- Gronauer, A., Naser, S. und Depta, G. (1995): Ökosystem- und klimarelevante Gasemissionen aus der Schweinehaltung. In: Schweinehaltung - neue Techniken und Stallsysteme für Zucht und Mast; Tagungsband zur landtechnisch-baulichen Jahrestagung am 07.11.95 in Triesdorf. Ausgb. 1 Bd. 5. (Hrsg.: Wendl, G.) Landtechnik Weihenstephan, Freising, S. 135-146.
- Gronauer, A., Stanzel, H., Naser, S., Depta, G., Schäfer, K., Haus, R., Heinz, S., Krahl, J., Luther, W., Munack, A., Hopf, H., Boxberger, J., Amon, T., Kießling, B., Salow, C. und Sciborski, J. (1995): Anforderungen und Lösungsansätze zur Bestimmung von Emissionsraten ökosystem- und klimarelevanter Gase aus der Landbewirtschaftung. In: Bau und Technik in der landwirtschaftlichen Nutztierhaltung. (Hrsg.: Hörnig, G.) Institut für Agrartechnik Bornim, Humboldt-Universität zu Berlin, Potsdam-Bornim, S. 147-156.
- Gronauer, A., Depta, G., Naser, S., Schön, H., Schäfer, K. und Steinicke, I. (1997): Emissionsrateanalyse variabler Emissionsquelltypen in der Landwirtschaft mittels open-path- und extrahiver FTIR-Spektroskopie. In: Bau, Technik und Umwelt in der landwirtschaftlichen Nutztierhaltung, Beiträge zur 3. Internationalen Tagung 11-12 März 1997, Kiel. Institut für Landwirtschaftliche Verfahrenstechnik der Christian-Albrechts-Universität zu Kiel, S. 361-368.
- Groot Koerkamp, P.W.G. und Bleijenberg, R. (1995): De ammoniakemissie uit drie typen volierestallen voor leghennen. Rapport 94-93. IMAG-DLO, Wageningen.
- Groot Koerkamp, P.W.G., Metz, M., Uenk, G., Phillips, V., Holden, M., Sneath, R., Short, J.L., White, R.P., Hartung, J., Seedorf, J., Schröder, M., Linkert, K.H., Pedersen, S., Takai, H., Johnsen, J.O. und Wathes, C.M. (1998): Concentrations and Emissions of Ammonia in Livestock Buildings in Northern Europe. In: Journal of Agricultural Engineering Research (70) H. 1, S. 79-95.
- Grotz, W. (1998): Aufbau und Überprüfung einer Multigas-Kalibrationseinheit. Diplomarbeit am Institut für Landtechnik der TU München-Weihenstephan, Freising.
- Hahne, J., Hesse, D. und Vorlop, K.D. (1999): Spurengasemissionen aus der Mastschweinehaltung. In: Landtechnik (54) H. 3, S. 180-181.

- Haidn, B. und Rittel, L. (1995): Schweinemast in eingestreuten Ställen. In: Schweinehaltung - neue Techniken und Stallsysteme für Zucht und Mast; Tagungsband zur landtechnisch-baulichen Jahrestagung am 07.11.95 in Triesdorf. Ausg. 1 Bd. 5. (Hrsg.: Wendl, G.) Landtechnik Weihenstephan, Freising, S. 147-158.
- Haidn, B. und Behninger, S. (1996): Außenklimaställe: Tiergerechte Mastschweinehaltung auf Stroh. Unser Land H. 7, S. 20-22.
- Haidn, B. und Hornauer, N. (1999): Haltung von Mastschweinen in Außenklimaställen - Formen - Kennwerte - Bewertung. In: Mastschweinehaltung, Tagungsband zur Landtechnisch-Baulichen Jahrestagung am 23.11.1999 in Mirskofen (Hrsg.: Wendl, G.), Landtechnik-Schrift Nr. 10, Freising, S. 83-100.
- Haidn, B.; Hornauer, N.; Rathmer, B. und Gronauer, A. (2000): Endbericht zum Forschungs- und Entwicklungsvorhaben "Bau und Nutzung eines Schweinestalles auf Flüssigmistbasis als Außenklimastall mit Teilspaltenboden und Ruhekisten". Landtechnik-Forschungsbericht Nr. 5 der Landtechnik Weihenstephan, Freising, Juni 2000.
- Hartung, E. (1995): Entwicklung einer Messmethode und Grundlagenuntersuchung zur Ammoniakfreisetzung aus Flüssigmist. Forschungsbericht Agrartechnik des Arbeitskreises Forschung und Lehre der Max-Eyth-Gesellschaft Agrartechnik im VDI (VDI-MEG) Bd. 275.
- Hartung, E.; Hauser, A.; Gallmann, E. und Stubbe, A. (1999): Die tier- und umweltgerechte Mastschweinehaltung ist das Ziel – Konzeption eines Versuchsstalls. Landtechnik (54) H. 4, S. 236-237.
- Hartung, E. und Monteny, G.J. (2000): Emission von Methan (CH₄ und Lachgas (N₂O) aus der Tierhaltung. In: Agrartechnische Forschung H. 1, S. 62-69.
- Hauser, A. (2000): Konzeption und Planung eines Versuchsstalls für Mastschweine. In: Landtechnik (55) H. 5, S. 379-380.
- Hesse, D. (1993): Vergleich von drei Haltungsverfahren für Mastschweine auf Stroheinstreu. In: Haltung von Mastschweinen im Kompoststall. KTBL Arbeitspapier Bd. 183. (Hrsg.: Döhler, H.) KTBL-Schriften-Vertrieb im Landwirtschaftsverlag, Münster-Hiltrup, S. 89-105.
- Hesse, D. (1994): Comparison of different old and new fattening pig husbandries with focus on environment and animal welfare. Proceedings of XII World Congress on Agricultural Engineering; 29.08-1.09.1994; Mailand (Hrsg: CIGR), Merelbeke, Belgien.
- Heyer, J (1990): in: Enquete-Kommission "Schutz der Erdatmosphäre" des Deutschen Bundestages (Hrsg.) (1994): Schutz der grünen Erde; Klimaschutz durch umweltgerechte Landwirtschaft und Erhalt der Wälder. Bericht der Enquete-Kommission "Schutz der Erdatmosphäre" des 12. Deutschen Bundestages. Bonn, Economica-Verlag, 1994.
- Heyer, J. (1994): Methan. In: Enquete-Kommission "Schutz der Erdatmosphäre" des Deutschen Bundestages (Hrsg.). Band 1 Landwirtschaft Studienprogramm Teilband 1. Economica Verlag GmbH, Bonn, S. 1-91.
- Hinz, T., Krause, K.H. und Müller, H.J. (1995): Luftwechselraten in Louisianaställen. In: Landtechnik (51) H 4, S. 232-233.
- Hinz, T. und Linke, S. (1999): Luftfremde Stoffe in und aus der Schweinemast und einem Hähnchenmaststall. In: Landbauforschung Völkenrode, H. 2, S. 90-101.
- Hörnig, G., Müller, H.-J. und Türk, M. (1993): Emissionsarme, artgerechte Haltung von Mastschweinen in größeren Beständen. In: Bau und Technik in der landwirtschaftlichen Nutztierhaltung - Beiträge zur 1. Internationalen Tagung vom 16. und 17. März in Gießen. Justus-Liebig-Universität Gießen; Institut für Landtechnik, Gießen, S. 153-161.

- Hoffmann, A. und Seipelt, F. (1998): Tracergastechnik - Methodik zur Bestimmung von Luftwechselraten in frei gelüfteten Milchvieh- und Mastschweinställen. In: Landtechnik (53) H. 1, S. 30-31.
- Hornauer, N. und Haidn, B. (2001): Punktuelle Messungen der Strömungsgeschwindigkeiten und -richtungen an verschiedenen Messpunkten in einem Außenklimakistestall für Mastschweine. Interner, unveröffentlichter Institutsbericht, Bayerische Landesanstalt für Landtechnik, Freising.
- Hoy, S., Müller, K. und Willig, R. (1997): Untersuchungen zu Konzentration und Emission von Ammoniak und Lachgas bei verschiedenen Tiefstreuhaltungssystemen für Mastschweine und bei Vollspaltenbodenhaltung. In: Berliner und Münchener Tierärztliche Wochenschrift 110, S. 90-95.
- Jungbluth, T. und Büscher, W. (1996): Reduzierung der Ammoniakemissionen aus Stallanlagen – Bewertung von Maßnahmen. In: KTBL-Arbeitspapier 233, Darmstadt, 1996.
- Kaiser, S.; Brehme, G.; Hoffmann, A. und Van den Weghe, H. (1998a): Emissionsverhalten eines frei gelüfteten Mastschweinstalles mit Ruhebetten ohne nährstoffbedarfsangepasste Fütterung, Betrieb Kriesmann. In: Umweltverträgliche Mastschweinställe. KTBL Arbeitspapier 259, Darmstadt, S. 91 - 117.
- Kaiser, S., Schlüter, M., Siemers, V. und Van den Weghe, H. (1998b): Auswirkungen eiweißreduzierter Multiphasenfütterung auf Ammoniakemissionen, Nährstoffbilanz und Wirtschaftlichkeit in einem einstreulosen Mastschweinstall. In: Fritzsche, S (Hrsg.): Umweltverträgliche Mastschweinställe. KTBL Arbeitspapier 259, Darmstadt. S. 66-88.
- Kaiser, S. (1999): Analyse und Bewertung eines Zweiraumkompoststalls für Mastschweine unter besonderer Berücksichtigung der gasförmigen Stoffströme. Dr. agr. Dissertation, Fakultät für Agrarwissenschaften der Georg-August-Universität Göttingen. Forschungsbericht Agrartechnik des Arbeitskreises Forschung und Lehre der Max-Eyth-Gesellschaft Agrartechnik im VDI (VDI-MEG) 334.
- Kaupa, A. (1990): Untersuchungen zur Durchströmung von Stallgebäuden infolge des Außenwinds. Diplomarbeit, IHS Berlin-Wartenberg.
- Kayser-Threde (1994): Bedienungshandbuch (Draft) für FTIR-Spektrometer K300. München.
- Keck, M. (1997): Beeinflussung von Raumluftqualität und Ammoniakemissionen aus der Schweinehaltung durch verfahrenstechnische Maßnahmen. Dissertation - Forschungsbericht Agrartechnik des Arbeitskreises Forschung und Lehre der Max-Eyth-Gesellschaft Agrartechnik im VDI (VDI-MEG) 299.
- Krahl, J., Munack, A., Luther, W., Hopf, H. und Schröder, O. (1995): FT-Infrarotspektroskopie zur Bestimmung der Spurengasemissionen aus der Tierhaltung. In: VDI Berichte 1211 - Max-Eyth-Gesellschaft Agrartechnik im VDI. Landtechnik 1995. Bd. 1211. (Hrsg.: Verein Deutscher Ingenieure (VDI)) VDI Verlag GmbH, Düsseldorf, S. 215-218.
- Krahl, J., Schröder, O. und Luther, W. (1996): Kontinuierliche Bestimmung der Emissionen umweltrelevanter Spurengase aus der Tierhaltung mittels FT-Infrarotmeßtechnik (Abschlußbericht, unveröffentlicht). Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft Braunschweig-Völkenrode, Institut für Biosystemtechnik, Braunschweig.
- Krause, K.H., Müller, H.J. und Grimm, E. (2000): Forschungsbericht Geruchsemissionen und -immissionen aus der Rinderhaltung - Beurteilungsgrundlagen und Ableitung von Emissionsminderungsmaßnahmen. Bundesministerium für Ernährung Landwirtschaft und Forsten.

- KTBL (Hrsg.) (2000/2001): Taschenbuch Landwirtschaft. Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft, Darmstadt.
- Leonard, J.-J., Feddes, J.-J.-R. und McQuitty, J.-B. (1984): Measurement of Ventilation Rates Using a Tracer Gas. In: Canadian Agricultural Engineering (26) H. 1, 49-51.
- Leonhard, P. und Hoy, S. (1999): Wirtschaftlichkeit ist gegeben – Schweinemast im Außenklimastall mit Einstreu. PB/LB (19), S. 16-19.
- Lockyer, D.R. (1983): A system for the measurement in the field of losses of ammonia through volatilisation. In: J.Sci.Food Agric. (35), S. 837-848.
- Lüpfert, T. (1998): Bauliches Konzept. In: KTBL Sonderveröffentlichung 026 - Außenklimaställe für Mastschweine - Positionspapier. Hrsg.: Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V. (KTBL), Darmstadt.
- LUFÄ Oldenburg (1992): in: Faustzahlen für Landwirtschaft und Gartenbau. 12. Auflage, Verlagsunion Agrar, Münster-Hiltrup.
- Ministerie van Volkshuisvesting, R.O.en M. (1993): Groen Label, emissie-arme stallen, beoordelings-richtlijn., Gravenhage.
- Monteny, G.J. und Erisman, J.W. (1998): Ammonia emission from dairy cow buildings: a review of measurement techniques, influencing factors and possibilities for reduction. In: Netherlands Journal of Agricultural Science (46), S. 225-247.
- Müller, H.-J. (1976): Stoff- und Wärmetransport bei der Raumströmung in Tierproduktionsanlagen. Dissertation, TU Dresden.
- Müller, H.-J. (1993): Messung von Geruchsstoff- und Schadgasemissionen aus Tierhaltungen. In: Technik und Verfahren in der Tierhaltung. Bd. 3. (Hrsg.: Institut für Agrartechnik Bornim e. V. (ATB)) ATB, Potsdam-Bornim, S. 123-148.
- Müller, H.-J., Müller, S. und Stollberg, U. (1995): Lüftungstechnische Maßnahmen zur Emissionsminderung in der Tierhaltung. In: Bau und Technik in der landwirtschaftlichen Nutztierhaltung. (Hrsg.: Hörnig, G.) Institut für Agrartechnik Bornim, Humboldt-Universität zu Berlin, Potsdam-Bornim, S. 157-164.
- Müller, H. und Möller, B. (1998): The determination of emission streams at different animal houses. In: AgEng Oslo 98 - International Conference on Agricultural Engineering. (Hrsg.: EurAgEng) NLH, Oslo, 98-E-059.
- Neser, S., Depta, G., Gronauer, A. und Schön, H. (1997): Endbericht des Forschungsvorhabens: "Validierung verfahrenstechnischer Innovationen zur Emissionsminderung ökosystem- und klimarelevanter Gase aus der Landwirtschaft (Tierproduktion)" des Bayerischen Staatsministeriums für Landesentwicklung und Umweltfragen. Freising-Weihenstephan (unveröffentlicht).
- Neser, S. (2001) : Gasförmige Emissionen aus Haltungssystemen für Legehennen. Dissertation an der Fakultät Wissenschaftszentrum Weihenstephan für Ernährung, Landnutzung und Umwelt der Technischen Universität München, Institut für Landtechnik, Freising.
- Ni, J. (1998): Emission of Carbon Dioxide and Ammonia from Mechanically Ventilated Pig House. Ph.D. (Doctor of Applied Biology) Dissertation, Katholieke Universiteit Leuven, Faculteit Landbouwkundige en Toegepaste Biologische Wetenschappen.
- Ni, J. (1999): Mechanistic Models of Ammonia Release from Liquid Manure: a Review. In: Journal of Agricultural Engineering Research (72) H. 1, S. 1-17.
- Niebaum, A. und Van den Weghe, H. (2001): Quantifizierung gasförmiger Emissionen aus quergelüfteten Außenklimaställen für Mastschweine mit Hilfe der Tracergas-Technik – Ergebnisse. In: Tagungsband zur 5. Internationalen Tagung Bau, Technik und Umwelt in

- der landwirtschaftlichen Nutztierhaltung 2001, Hrsg.: Institut für Agrartechnik der Universität Hohenheim, S. 122 – 127.
- Oldenburg, J. (1989): Geruchs- und Ammoniak-Emissionen aus der Tierhaltung. In: *Landtechnik* (44), S. 324-326.
- Osada, T., Rom, H.B. und Dahl, P. (1998): Continuous measurement of nitrous oxide and methane emission in pig units by infrared photoacoustic detection. In: *Transactions of the ASAE* 41/4, S. 1109-1114.
- Ouwerkerk, E.N.J. van (1993): Meetmethoden NH₃-emissie uit stallen. Bd. 16. Ministerie van Landbouw, Natuurbeheer en Visserij, Dienst Landbouwkundig Onderzoek (DLO), Wageningen.
- Ouwerkerk, E.N.J. und Pedersen, S. (1994): Application of the carbon dioxide mass balance method to evaluate ventilation rates in livestock buildings. In: *Proceedings XII World Congress on Agricultural Engineering*, Milano, August 29 - September 1, 1994. CIGR - General secretariat, Merelbeke, Belgium, S. 516-529.
- Pedersen, S. und Rom, H.B. (1998): Diurnal Variation in Heat Production from Pigs in Relation to Animal Activity. In: *AgEng Oslo 98 - International Conference on Agricultural Engineering*. (Hrsg.: EurAgEng) NLH, Oslo, 98-B-025.
- Pedersen, S., Takai, H., Johnsen, J.O., Metz, J.H.M., Groot Koerkamp, P.W.G., Uenk, G.H., Phillips, V.R., Holden, M.R., Sneath, R.W., Short, J.L., White, R.P., Hartung, J., Seedorf, J., Schröder, M., Linkert, K.H. und Wathes, C.M. (1998): A Comparison of Three Balance Methods for Calculating Ventilation Rates in Livestock Buildings. In: *Journal of Agricultural Engineering Research* (70) H. 1, S. 25-37.
- Pfeiffer, A. (1993): Proteinreduzierte Fütterungskonzepte zur Reduktion der Ammoniakemissionen in der Schweinemast. In: *Züchtungskunde* (65) H. 6, S. 431-443.
- Phillips, V.-R., Holden, M.-R., White, R.-P., Sneath, R.-W., Demmers, T.-G.-M. und Wathes, C.-M. (1995): Measuring and reducing gaseous and particulate air pollution from UK Livestock buildings. In: *7th International Symposium on Agricultural and Food Processing Wastes (ISAFPW95)*; Chicago, 18-20 June 1995, S. 1-10.
- Phillips, V.-R., Sneath, R.-W., Williams, A.-G., Welch, S.-K., Burgess, L.-R., Demmers, T.-G.-M. und Short, J.-L. (1997a): Measuring emission rates of ammonia, methane, and nitrous oxide from full-sized slurry and manure stores. In: *Ammonia and odour emissions from animal production facilities*. Bd. 1. (Hrsg.: VoermansJAM und Monteny, G.J.) NVTL, Rosmalen, The Netherlands. S. 1-11.
- Phillips, V.R., Holden, M.R., Sneath, R.W., Short, J.L., White, R.P., Hartung, J. und Seedorf, J. (1997b): The Development of Robust Methods for Measuring Concentrations and Emission Rates of Gaseous and Particulate Air Pollutants in Livestock Buildings. In: *Journal of Agricultural Engineering Research* (70) H. 1, S. 11-24.
- Phillips, V.R., Holden, M.R., Sneath, R.W., Short, J.L., White, R.P., Hartung, J., Seedorf, J., Schröder, M., Linkert, K.H., Pedersen, S., Takai, H., Johnsen, J.O., Groot Koerkamp, P.W.G., Uenk, G.H., Scholtens, R., Metz, J.H.M. und Wathes, C.M. (1998): The Development of Robust Methods for Measuring Concentrations and Emission Rates of Gaseous and Particulate Air Pollutants in Livestock Buildings. In: *Journal of Agricultural Engineering Research* (70) H. 1, S. 11-24.
- Precht, M.; Kraft, R. (1993): *Bio-Statistik 2*, 5. Auflage, München.
- Rathmer, B., Gronauer, A. und Schön, H. (2000): Long-Term Comparison of the Emission Rates of Ammonia, Methane and Nitrous Oxide from three different Housing Systems for Fattening Pigs. In: *AgEng Warwick 2000 - 2.-7. Juli 2000*. Proceedings CD-ROM.

- (Hrsg.: Institution of Agricultural Engineers, Silsoe Research Institut und RASE) University of Warwick, UK, 00-AP-021.
- Rathmer, B., Gronauer, A. und Schön, H. (2001): Vergleich der Emissionsraten klima- und umweltrelevanter Gase aus der Mastschweinehaltung in einer Dauermessung. In: Tagungsband zur 5. Internationalen Tagung Bau, Technik und Umwelt in der landwirtschaftlichen Nutztierhaltung 2001, Hrsg.: Institut für Agrartechnik der Universität Hohenheim, S. 134 – 139.
- Rathmer, B., Maier, B., Rieß, G., Zeisig, H.-D., Gronauer, A. (2001): Messung von Geruchsemissionen – Einsatz von Olfaktometrie und Chemo-Sensoren zum Vergleich von Haltungssystemen in der Schweinemast. In: Landtechnik (56) H. 1, S. 2-3.
- Ratschow, J.-P. (2000): Künftige Haltungsverfahren der deutschen Schweineproduktion. Hrsg.: Rationalisierungs-Kuratorium für Landwirtschaft (RKL), Sonderdruck aus der Kartei für Rationalisierung 4.2.2, Rendsburg-Osterrönfeld.
- Reiprich, K. und Hesse, D. (1996): Luftqualität in Schweineställen - Auswirkungen tiergerechter Bau- und Haltungstechnik. In: Landtechnik (51) H. 4, S. 220-221.
- Reitz, P. und Kutzbach, H.-D. (1997): Accuracy of a Windtunnel System for Measuring Ammonia Emissions after Slurry Application. In: Ammonia and Odour Control from Animal Production Facilities. Proceedings of the International Symposium Bd. 2. (Hrsg.: Voermans, J.-A.-M. und Monteny, G.-J.) EurAgEng, Vinkeloord, S. 595-602.
- Rippel-Baldes, A. (1955): Grundriß der Mikrobiologie, Springer-Verlag, Berlin. 1955. Zitiert in: Luther, W.: Untersuchung umweltrelevanter Spurengase aus der landwirtschaftlichen Tierhaltung durch FTIR-Spektroskopie. Diplomarbeit am Institut für Biosystemtechnik der Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft. Braunschweig, 1994.
- Rom, H.B. (1993): Ammonia emission from livestock buildings in Denmark. Fourth international livestock environment symposium; July 6- 9, 1993; University of Warwick, Conference Park, Coventry, England.
- Rom, H.B. (1994a): Nitrogen Flow and Ammonia Emission in Fattening Pig Units. (Ministry of Agriculture and Fisheries, National Institute of Animal Science, Department of Agricultural Engineering, Research Centre Bygholm.) Seminar Gasanalytik in der Nutztierhaltung und Landwirtschaft, 22.-23. November 1994, Berlin.
- Rom, H.B. (1994b): Evaluation of photoacoustic ammonia detection in livestock buildings. In: International Conference on Agricultural Engineering. AgEng Milano '94. Mailand, S. 1-8.
- Rom, H.B. und Dahl, P.J. (1998): A model for prediction of ammonia emission from fattening pigs with respect to seasonal and diurnal fluctuations. In: AgEng Oslo 98 - International Conference on Agricultural Engineering. (Hrsg.: EurAgEng) NLH, Oslo, 98-E-007.
- Rosemount (1991): Meßmethoden der Gasanalytoren. Firmenkatalog ROSEMOUNT.
- Roth, F.-X, Kirchgessner, M. (1996): Emissionsminderung durch angepasste Fütterung von Schwein und Geflügel. In: Möglichkeiten zur Emissionsminderung im Bereich Intensivtierhaltung. Bayerisches Landesamt für Umweltschutz, Wackersdorf. S. 29-47.
- Russwurm, G.M. und Childers, J.W. (1996): FTIR Open Path - Monitoring Guidance Document. Second edition (Atmospheric Research and Exposure Assessment Laboratory, Research Triangle Parc, NC, USA).
- Schirmer, P. und Kutzbach, H.-D. (1997): Messung von Ammoniakemissionen mit einem Windtunnel nach der Ausbringung von Flüssigmist auf Grünland. In: Verhandlungen der

- deutschen physikalischen Gesellschaft. Frühjahrstagung Münster 1997. AP1 Landwirtschaft und Klima. Physik-Verlag, Münster, S. 1035.
- Scholten, R. und van't Ooster, A. (1994): Performance and accuracy of methods for measuring natural ventilation rates and ammonia emission. In: International Conference on Agricultural Engineering. Ausgb. AgEng Milano '94. Mailand, S. 240.
- Scholten, R., Van der Heiden-de Vos, J. und Huis In't Veld, J. (1996): Validation of gas balance methods for determining ventilation rates of dairy cattle houses (In Dutch). Report 96-11, Institute of Agricultural and Environmental Engineering Wageningen.
- Seedorf, J., Hartung, J., Schröder, M., Linkert, K.H., Pedersen, S., Takai, H., Johnsen, J.O., Metz, J.H.M., Groot Koerkamp, P.W.G., Uenk, G.H., Phillips, V.R., Holden, M.R., Sneath, R.W., Short, J.L., White, R.P. und Wathes, C.M. (1998): A Survey of Ventilation Rates in Livestock Buildings in Northern Europe. In: Journal of Agricultural Engineering Research (70) H. 1, S. 39-47.
- Seinfeld, J.H. und Pandis, S.N. (1998): Atmospheric Chemistry and Physics - From Air Pollution to Climate Change. John Wiley & Sons, Inc., Canada.
- Seipelt, F., Ross, A., Steffens, G. und Van den Weghe, H. (1998): Monitoring of Ventilation Rates and Gaseous Emissions in Naturally Ventilated Dairy Houses. In: Fourth International Dairy Housing Conference. Conference Proceedings (Hrsg.: Chastain, J.P.) ASAE, Michigan, S. 370-377.
- Seipelt, F. (1999): Quantifizierung und Bewertung gasförmiger Emissionen aus frei gelüfteten Milchviehställen mit Trauf-First-Lüftung. Dr. agr. Dissertation, Forschungs- und Studienzentrum für Veredelungswirtschaft Weser/Ems der Fakultät für Agrarwissenschaften der Georg-August-Universität Göttingen.
- Sneath, R.W. (1996): Measuring losses of methane and nitrous oxide from Livestock buildings. In: Methan and Nitrous Oxide Emissions-Agricultures contribution, Symposium organised by the SCI Agriculture and Environment Group, 16 January 1996. SCI, London.
- Sprenger, E. (1979): Recknagel-Sprenger – Taschenbuch für die Heizung und Klimatechnik. E. Sprenger (Hrsg.), 60. Auflage, Oldenbourg-Verlag, München, S. 253.
- Staab, J. (1991): Industrielle Gasanalyse. In: Technisches Messen (58) S. 29-35 und S. 75-81 und S. 123-127 und S. 259-267 und S. 301 u. 309 und S. 453-457.
- Staab, J. (1994): Industrielle Gasanalyse. Oldenbourg-Verlag München, München.
- Steffin, U. (1999): Entwicklung einer Dauermeßkette zur Messung von Emissionsraten in Stallungen. Dipl. Ing. agr. Diplomarbeit, Institut für Landtechnik der Fakultät für Landwirtschaft und Gartenbau and der Technischen Universität München.
- Stegbauer, B. (1996): Eignungstest verschiedener Ammoniakmeßgeräte auf ihre Einsatztauglichkeit für Langzeitmessungen in Ställen. Dipl. Ing. agr. Diplomarbeit, Institut für Landtechnik der Fakultät für Landwirtschaft und Gartenbau an der Technischen Universität München.
- Stegbauer, B., Nesor, S., Grotz, W., Gronauer, A., Schön, H. (1998): Qualitativer Vergleich von NH₃-Betriebsmeßtechniken - Dauermessungen im Stallbereich. In: Landtechnik (53) H. 2, S. 70-71.
- Svensson, L., Jeppsson, K.H. und Gustafsson, G. (1997): Evaluation of Different Methods of Measuring NH₃ Emissions in Naturally Ventilated Animal Houses with Deep Litter. In: Ammonia and Odour Control from Animal Production Facilities. Proceedings of the International Symposium Bd. 1. (Hrsg.: Voermans, J.A.M. und Monteny, G.J.) NVTL, Rosmalen, S. 209-217.

- Thies (1997): Bedienungsanleitung Wetterstation - Kombierter Windgeber - Hygro-Thermogeber - Pyranometer -. Göttingen.
- Umweltbundesamt (1998): Umweltdaten Deutschland 1998. Umweltbundesamt, Berlin.
- Van den Weghe, H. (1998): Lüftung, Emissionsverhalten. In: Außenklimaställe für Schweine. KTBL (Hrsg.) Positionspapier, Sonderveröffentlichung 026, Darmstadt.
- Van den Weghe, H., Kaiser, S., Arkenau, E.F., Wickler, C. und Hartwig, A. (1998): Assessment of a New Deep Litter System and a Slatted Floor Housing System for Fattening Pigs on Indoor Air Quality Animal Behaviour and Systematic Injuries. In: Proceedings of the 49th Annual Meeting of the European Association for Animal Production, Warschau, 24.-27. August 1998. MP 3.5, S. 1-8.
- VDI 2449, Blatt 2 (1987): Richtlinie der VDI-Kommission Reinhaltung der Luft, A.G.zur K.vollständiger M.im A.M.S. Grundlagen zur Kennzeichnung vollständiger Meßverfahren - Begriffsbestimmungen. In: VDI-Handbuch Reinhaltung der Luft. VDI 2449, Blatt 2, S. 2-6.
- VDI/VDE 2640 (1993): VDI/VDE-Richtlinie 2640, Netzmessungen in Strömungsquerschnitten - allgemeine Richtlinien und mathematische Grundlagen - In: Verein Deutscher Ingenieure VDI/VDE-Handbuch Meßtechnik I, VDI-Handbuch Energietechnik 2640, Blatt 1, Abhang zu Abschnitt 3 u. 4.
- VDI/VDE 2640, Blatt 1 (1991): Netzmessungen in Strömungsquerschnitten. Berlin: Beuth-Verlag GmbH.
- Verdoes, N. und Ogink, N.W.M. (1997): Odour Emissions from Pig Houses with Low Ammonia Emission. In: Proceedings of the International Symposium: Ammonia and Odour Control from Animal Production Facilities, Vinkeloord, Niederlande, 6.-10. Oktober 1997. Bd. 1. (Hrsg.: Voermans, J.A.M. und Monteny, G.J.) NVTL, Rosmalen, S. 317-325.
- Wathes, C.M., Phillips, V.R., Holden, M.R., Sneath, R.W., Short, J.L., White, R.P., Hartung, J., Seedorf, J., Schröder, M., Linkert, K.H., Pedersen, S., Takai, H., Johnsen, J.O., Groot Koerkamp, P.W.G., Uenk, G.H., Metz, J.H.M., Hinz, T., Caspary, V. und Linke, S. (1998): Emissions of Aerial Pollutants in Livestock Buildings in Northern Europe: Overview of a Multinational Project. In: Journal of Agricultural Engineering Research (70) H. 1, S. 3-9.
- Wenger, 1995: Bedienungsanleitung Messcomputer M.A.C 2040. Oktober, 1995. Wenger Systeme+Service GmbH, Dießen.

Tabelle 58: Parameterschätzer für die NH₃-Emissionsrate der beiden Außenklima-Versuchsabteile

Parameterschätzer

Abhängige Variable: NH3_E500

Parameter	B	Standardfehler	T	Signifikanz	99% Konfidenzintervall		Eta-Quadrat	Nichtzentralitäts-Parameter	Beobachtete Schärfe ^a
					Untergrenze	Obergrenze			
Konstanter Term	-.141	.350	-.402	.688	-1.048	.766	.000	.402	.016
[VENTIL=4]	-1.11E-02	.132	-.084	.933	-.352	.330	.000	.084	.010
[VENTIL=8]	0 ^b	.	.	.	.	.	.	.	.
[MAST=4]	-.274	.181	-1.516	.130	-.743	.194	.006	1.516	.143
[MAST=5]	1.555	.283	5.501	.000	.823	2.287	.074	5.501	.998
[MAST=6]	0 ^b	.	.	.	.	.	.	.	.
TAGE	5.711E-03	.007	.784	.434	-1.316E-02	2.458E-02	.002	.784	.037
TEMP_AB	8.421E-02	.051	1.650	.100	-4.792E-02	.216	.007	1.650	.175
VOL_AB	1.546E-04	.000	1.719	.086	-7.825E-05	3.875E-04	.008	1.719	.194
[VENTIL=4] * [MAST=4]	.755	.234	3.234	.001	.151	1.360	.027	3.234	.740
[VENTIL=4] * [MAST=5]	.627	.191	3.279	.001	.132	1.122	.028	3.279	.754
[VENTIL=4] * [MAST=6]	0 ^b	.	.	.	.	.	.	.	.
[VENTIL=8] * [MAST=4]	0 ^b	.	.	.	.	.	.	.	.
[VENTIL=8] * [MAST=5]	0 ^b	.	.	.	.	.	.	.	.
[VENTIL=8] * [MAST=6]	0 ^b	.	.	.	.	.	.	.	.
TAGE * TEMP_AB	-5.01E-04	.001	-.556	.578	-2.832E-03	1.830E-03	.001	.556	.022
TAGE * VOL_AB	-1.44E-06	.000	-.766	.444	-6.323E-06	3.435E-06	.002	.766	.035
TEMP_AB * VOL_AB	-7.04E-06	.000	-.848	.397	-2.851E-05	1.444E-05	.002	.848	.042
TAGE * TEMP_AB * VOL_AB	3.315E-07	.000	2.185	.030	-6.136E-08	7.244E-07	.013	2.185	.344

a. Unter Verwendung von Alpha = .01 berechnet

b. Dieser Parameter wird auf Null gesetzt, weil er redundant ist.

Tabelle 59: Paarweise Vergleiche der Mittelwerte der NH₃-Emissionsrate in den beiden Außenklima-Versuchsabteilen

Paarweise Vergleiche

Abhängige Variable: NH3_E500

(I) VENTIL	(J) VENTIL	Mittlere Differenz (I-J)	Standardfehler	Signifikanz ^a	99% Konfidenzintervall für die Differenz ^a	
					Untergrenze	Obergrenze
4	8	.450*	.091	.000	.215	.685
8	4	-.450*	.091	.000	-.685	-.215

Basiert auf den geschätzten Randmitteln

*. Die mittlere Differenz ist auf dem Niveau .01 signifikant

a. Anpassung für Mehrfachvergleiche: Geringste signifikante Differenz (entspricht keinen Anpassungen).

Tabelle 60: Paarweise Vergleiche der NH₃-Emissionsraten der beiden Außenklima-Versuchsabteile während der drei Mastdurchgänge**Paarweise Vergleiche**

Abhängige Variable: NH3_E500

(I) MAST	(J) MAST	Mittlere Differenz (I-J)	Standardfehler	Signifikanz ^a	99% Konfidenzintervall für die Differenz ^a	
					Untergrenze	Obergrenze
4	5	-1.765*	.234	.000	-2.371	-1.159
	6	.103	.137	.451	-.252	.458
5	4	1.765*	.234	.000	1.159	2.371
	6	1.869*	.256	.000	1.207	2.531
6	4	-.103	.137	.451	-.458	.252
	5	-1.869*	.256	.000	-2.531	-1.207

Basiert auf den geschätzten Randmitteln

*. Die mittlere Differenz ist auf dem Niveau .01 signifikant

a. Anpassung für Mehrfachvergleiche: Geringste signifikante Differenz (entspricht keinen Anpassungen).

Tabelle 61: Parameterschätzer für die NH₃-Emissionsrate aus dem Warmstall mit Teilspaltenboden**Parameterschätzer**

Abhängige Variable: NH3_E500

Parameter	B	Standardfehler	T	Signifikanz	99% Konfidenzintervall		Eta-Quadrat	Nichtzentralitäts-Parameter	Beobachtete Schärfe ^a
					Untergrenze	Obergrenze			
Konstanter Term	-66.797	9.195	-7.265	.000	-90.733	-42.862	.225	7.265	1.000
[VENTIL=32]	0 ^b	.	.	.	.	.	.	.	.
[MAST=4]	-2.096	.685	-3.059	.003	-3.880	-.313	.049	3.059	.676
[MAST=5]	5.465	1.359	4.020	.000	1.926	9.003	.082	4.020	.920
[MAST=6]	0 ^b	.	.	.	.	.	.	.	.
TAGE	1.765	.361	4.890	.000	.826	2.705	.116	4.890	.988
TEMP_AB	3.997	.515	7.755	.000	2.655	5.338	.248	7.755	1.000
VOL_AB	3.384E-02	.003	12.988	.000	2.706E-02	4.062E-02	.481	12.988	1.000
[VENTIL=32] * [MAST=4]	0 ^b	.	.	.	.	.	.	.	.
[VENTIL=32] * [MAST=5]	0 ^b	.	.	.	.	.	.	.	.
[VENTIL=32] * [MAST=6]	0 ^b	.	.	.	.	.	.	.	.
TAGE * TEMP_AB	-.103	.020	-5.112	.000	-.156	-5.077E-02	.126	5.112	.994
TAGE * VOL_AB	-4.98E-04	.000	-6.413	.000	-7.002E-04	-2.959E-04	.184	6.413	1.000
TEMP_AB * VOL_AB	-1.50E-03	.000	-11.777	.000	-1.834E-03	-1.170E-03	.432	11.777	1.000
TAGE * TEMP_AB * VOL_AB	2.536E-05	.000	6.032	.000	1.441E-05	3.630E-05	.167	6.032	1.000

a. Unter Verwendung von Alpha = .01 berechnet

b. Dieser Parameter wird auf Null gesetzt, weil er redundant ist.

Tabelle 62: Paarweise Vergleiche der NH₃-Emissionsraten des Warmstalls mit Teilspaltenboden während der drei Mastdurchgänge**Paarweise Vergleiche**Abhängige Variable: NH₃_E500

(I) MAST	(J) MAST	Mittlere Differenz (I-J)	Standardfehler	Signifikanz ^a	99% Konfidenzintervall für die Differenz ^a	
					Untergrenze	Obergrenze
4	5	-7.561*	1.264	.000	-10.851	-4.271
	6	-2.096*	.685	.003	-3.880	-.313
5	4	7.561*	1.264	.000	4.271	10.851
	6	5.465*	1.359	.000	1.926	9.003
6	4	2.096*	.685	.003	.313	3.880
	5	-5.465*	1.359	.000	-9.003	-1.926

Basiert auf den geschätzten Randmitteln

* Die mittlere Differenz ist auf dem Niveau .01 signifikant

a. Anpassung für Mehrfachvergleiche: Geringste signifikante Differenz (entspricht keinen Anpassungen).

Tabelle 63: Parameterschätzer für die CH₄-Emissionsrate der beiden Außenklima-Versuchsabteile**Parameterschätzer**Abhängige Variable: CH₄_E500

Parameter	B	Standardfehler	T	Signifikanz	99% Konfidenzintervall		Eta-Quadrat	Nichtzentralitäts-Parameter	Beobachtete Schärfe ^a
					Untergrenze	Obergrenze			
Konstanter Term	.797	.295	2.705	.007	3.411E-02	1.559	.019	2.705	.547
[MAST=4]	-.504	.152	-3.313	.001	-.898	-.110	.028	3.313	.765
[MAST=5]	-.198	.238	-.832	.406	-.813	.417	.002	.832	.041
[MAST=6]	0 ^b	.	.	.	.	.	.	.	.
[VENTIL=4]	.126	.111	1.139	.256	-.161	.413	.003	1.139	.075
[VENTIL=8]	0 ^b	.	.	.	.	.	.	.	.
TAGE	-1.23E-02	.006	-2.013	.045	-2.819E-02	3.529E-03	.011	2.013	.284
TEMP_AB	-7.32E-02	.043	-1.707	.089	-.184	3.782E-02	.008	1.707	.191
VOL_AB	-2.23E-04	.000	-2.943	.003	-4.182E-04	-2.677E-05	.023	2.943	.638
[MAST=4] * [VENTIL=4]	.211	.196	1.073	.284	-.298	.719	.003	1.073	.066
[MAST=4] * [VENTIL=8]	0 ^b	.	.	.	.	.	.	.	.
[MAST=5] * [VENTIL=4]	.519	.161	3.228	.001	.103	.935	.027	3.228	.738
[MAST=5] * [VENTIL=8]	0 ^b	.	.	.	.	.	.	.	.
[MAST=6] * [VENTIL=4]	0 ^b	.	.	.	.	.	.	.	.
[MAST=6] * [VENTIL=8]	0 ^b	.	.	.	.	.	.	.	.
TAGE * TEMP_AB	2.172E-03	.001	2.870	.004	2.128E-04	4.131E-03	.021	2.870	.611
TAGE * VOL_AB	4.790E-06	.000	3.024	.003	6.895E-07	8.891E-06	.024	3.024	.668
TEMP_AB * VOL_AB	4.424E-05	.000	6.344	.000	2.618E-05	6.229E-05	.097	6.344	1.000
TAGE * TEMP_AB * VOL_AB	-5.51E-07	.000	-4.319	.000	-8.811E-07	-2.207E-07	.047	4.319	.958

a. Unter Verwendung von Alpha = .01 berechnet

b. Dieser Parameter wird auf Null gesetzt, weil er redundant ist.

Tabelle 64: Paarweise Vergleiche der Mittelwerte der CH₄-Emissionsrate in den beiden Außenklima-Versuchsabteilungen**Paarweise Vergleiche**Abhängige Variable: CH₄_E500

(I) VENTIL	(J) VENTIL	Mittlere Differenz (I-J)	Standardfehler	Signifikanz ^a	99% Konfidenzintervall für die Differenz ^a	
					Untergrenze	Obergrenze
4	8	.369*	.076	.000	.172	.567
8	4	-.369*	.076	.000	-.567	-.172

Basiert auf den geschätzten Randmitteln

* Die mittlere Differenz ist auf dem Niveau .01 signifikant

a. Anpassung für Mehrfachvergleiche: Geringste signifikante Differenz (entspricht keinen Anpassungen).

Tabelle 65: Paarweise Vergleiche der CH₄-Emissionsraten der beiden Außenklima-Versuchsabteilung während der drei Mastdurchgänge**Paarweise Vergleiche**Abhängige Variable: CH₄_E500

(I) MAST	(J) MAST	Mittlere Differenz (I-J)	Standardfehler	Signifikanz ^a	99% Konfidenzintervall für die Differenz ^a	
					Untergrenze	Obergrenze
4	5	-.460	.197	.020	-.969	4.936E-02
	6	-.399*	.115	.001	-.697	-.100
5	4	.460	.197	.020	-4.936E-02	.969
	6	6.153E-02	.215	.775	-.495	.618
6	4	.399*	.115	.001	.100	.697
	5	-6.153E-02	.215	.775	-.618	.495

Basiert auf den geschätzten Randmitteln

* Die mittlere Differenz ist auf dem Niveau .01 signifikant

a. Anpassung für Mehrfachvergleiche: Geringste signifikante Differenz (entspricht keinen Anpassungen).

Tabelle 66: Parameterschätzer für die CH₄-Emissionsrate aus dem Warmstall mit Teilspaltenboden

Parameterschätzer

Abhängige Variable: CH4_E500

Parameter	B	Standardfehler	T	Signifikanz	99% Konfidenzintervall		Eta-Quadrat	Nichtzentralitäts-Parameter	Beobachtete Schärfe ^a
					Untergrenze	Obergrenze			
Konstanter Term	-40.832	19.169	-2.130	.035	-90.730	9.067	.024	2.130	.321
[MAST=4]	-6.811	1.428	-4.768	.000	-10.530	-3.093	.111	4.768	.984
[MAST=5]	6.063	2.834	2.139	.034	-1.315	13.440	.025	2.139	.324
[MAST=6]	0 ^b	.	.	.	.	.	.	.	.
[VENTIL=32]	0 ^b	.	.	.	.	.	.	.	.
TAGE	.986	.753	1.311	.192	-.973	2.945	.009	1.311	.101
TEMP_AB	4.156	1.074	3.868	.000	1.359	6.952	.076	3.868	.896
VOL_AB	1.604E-03	.005	.295	.768	-1.254E-02	1.574E-02	.000	.295	.013
[MAST=4] * [VENTIL=32]	0 ^b	.	.	.	.	.	.	.	.
[MAST=5] * [VENTIL=32]	0 ^b	.	.	.	.	.	.	.	.
[MAST=6] * [VENTIL=32]	0 ^b	.	.	.	.	.	.	.	.
TAGE * TEMP_AB	-8.61E-02	.042	-2.040	.043	-.196	2.376E-02	.022	2.040	.290
TAGE * VOL_AB	2.349E-05	.000	.145	.885	-3.980E-04	4.450E-04	.000	.145	.011
TEMP_AB * VOL_AB	-9.48E-05	.000	-.357	.722	-7.869E-04	5.973E-04	.001	.357	.015
TAGE * TEMP_AB * VOL_AB	3.116E-06	.000	.356	.723	-1.970E-05	2.593E-05	.001	.356	.015

a. Unter Verwendung von Alpha = .01 berechnet

b. Dieser Parameter wird auf Null gesetzt, weil er redundant ist.

Tabelle 67: Paarweise Vergleiche der CH₄-Emissionsraten des Warmstalls mit Teilspaltenboden während der drei Mastdurchgänge

Paarweise Vergleiche

Abhängige Variable: CH4_E500

(I) MAST	(J) MAST	Mittlere Differenz (I-J)	Standardfehler	Signifikanz ^a	99% Konfidenzintervall für die Differenz ^a	
					Untergrenze	Obergrenze
4	5	-12.874*	2.635	.000	-19.734	-6.015
	6	-6.811*	1.428	.000	-10.530	-3.093
5	4	12.874*	2.635	.000	6.015	19.734
	6	6.063	2.834	.034	-1.315	13.440
6	4	6.811*	1.428	.000	3.093	10.530
	5	-6.063	2.834	.034	-13.440	1.315

Basiert auf den geschätzten Randmitteln

* Die mittlere Differenz ist auf dem Niveau .01 signifikant

a. Anpassung für Mehrfachvergleiche: Geringste signifikante Differenz (entspricht keinen Anpassungen).

Tabelle 68: Parameterschätzer für die N₂O-Emissionsrate aus dem Warmstall mit Teilspaltenboden und dem Außenklimastall mit Einstreu während zweier ausgewählter Mastdurchgänge

Parameterschätzer

Abhängige Variable: N2O_E500

Parameter	B	Standardfehler	T	Signifikanz	99% Konfidenzintervall		Eta-Quadrat	Nichtzentralitäts-Parameter	Beobachtete Schärfe ^a
					Untergrenze	Obergrenze			
Konstanter Term	4.037E-02	.070	.576	.565	-.142	.222	.002	.576	.023
[MAST=5]	-5.65E-02	.016	-3.523	.001	-9.813E-02	-1.480E-02	.055	3.523	.821
[MAST=6]	0 ^b	.	.	.	.	.	.	.	.
[VENTIL=8]	-8.00E-02	.016	-4.998	.000	-.122	-3.842E-02	.105	4.998	.991
[VENTIL=32]	0 ^b	.	.	.	.	.	.	.	.
TAGE	5.558E-03	.002	2.540	.012	-1.303E-04	1.125E-02	.030	2.540	.478
TEMP_AB	4.305E-03	.004	1.115	.266	-5.734E-03	1.434E-02	.006	1.115	.071
VOL_AB	1.099E-05	.000	.899	.370	-2.080E-05	4.277E-05	.004	.899	.046
[MAST=5] * [VENTIL=8]	0 ^b	.	.	.	.	.	.	.	.
[MAST=5] * [VENTIL=32]	0 ^b	.	.	.	.	.	.	.	.
[MAST=6] * [VENTIL=32]	0 ^b	.	.	.	.	.	.	.	.
TAGE * TEMP_AB	-2.99E-04	.000	-2.578	.011	-6.005E-04	2.428E-06	.030	2.578	.493
TAGE * VOL_AB	-5.73E-07	.000	-1.529	.128	-1.547E-06	4.010E-07	.011	1.529	.145
TEMP_AB * VOL_AB	-1.94E-07	.000	-.312	.756	-1.810E-06	1.423E-06	.000	.312	.014
TAGE * TEMP_AB * VOL_AB	3.164E-08	.000	1.598	.111	-1.982E-08	8.309E-08	.012	1.598	.161

a. Unter Verwendung von Alpha = .01 berechnet

b. Dieser Parameter wird auf Null gesetzt, weil er redundant ist.

Tabelle 69: Paarweise Vergleiche der N₂O-Emissionsraten des Außenklima-Versuchsabteils mit Einstreu und des Warmstalls mit Teilspaltenboden

Paarweise Vergleiche

Abhängige Variable: N2O_E500

(I) VENTIL	(J) VENTIL	Mittlere Differenz (I-J)	Standardfehler	Signifikanz ^a	99% Konfidenzintervall für die Differenz ^a	
					Untergrenze	Obergrenze
8	32	-.108 ^{*,k}	.016	.000	-.151	-6.545E-02
32	8	.108 ^{*,k}	.016	.000	6.545E-02	.151

Basiert auf den geschätzten Randmitteln

*. Die mittlere Differenz ist auf dem Niveau .01 signifikant

a. Anpassung für Mehrfachvergleiche: Geringste signifikante Differenz (entspricht keinen Anpassungen).

b. Ein Schätzer des Randmittels der geänderten Grundgesamtheit (I).

c. Ein Schätzer des Randmittels der geänderten Grundgesamtheit (J).

Tabelle 70: Paarweise Vergleiche der N₂O-Emissionsraten des Außenklima-Versuchsabteils mit Einstreu und des Warmstalls mit Teilspaltenboden während der Mastdurchgänge 5 und 6**Paarweise Vergleiche**

Abhängige Variable: N2O_E500

(I) MAST	(J) MAST	Mittlere Differenz (I-J)	Standardfehler	Signifikanz ^a	99% Konfidenzintervall für die Differenz ^a	
					Untergrenze	Obergrenze
5	6	-9.649E-02 ^{*c}	.016	.000	-.139	-5.364E-02
6	5	9.649E-02 ^{*c}	.016	.000	5.364E-02	.139

Basiert auf den geschätzten Randmitteln

* Die mittlere Differenz ist auf dem Niveau .01 signifikant

- a. Anpassung für Mehrfachvergleiche: Geringste signifikante Differenz (entspricht keinen Anpassungen).
- b. Ein Schätzer des Randmittels der geänderten Grundgesamtheit (J).
- c. Ein Schätzer des Randmittels der geänderten Grundgesamtheit (I).

Tabelle 71: Parameterschätzer für die CO₂-Emissionsrate der beiden Außenklima-Versuchsabteile**Parameterschätzer**

Abhängige Variable: CO2_E500

Parameter	B	Standardfehler	T	Signifikanz	99% Konfidenzintervall		Eta-Quadrat	Nichtzentralitäts-Parameter	Beobachtete Schärfe ^a
					Untergrenze	Obergrenze			
Konstanter Term	150.761	43.085	3.499	.001	39.216	262.305	.032	3.499	.818
[MAST=4]	-115.009	22.247	-5.170	.000	-172.606	-57.413	.066	5.170	.995
[MAST=5]	-25.346	34.758	-.729	.466	-115.334	64.641	.001	.729	.033
[MAST=6]	0 ^b	.	.	.	.	.	.	.	.
[VENTIL=4]	20.516	16.192	1.267	.206	-21.404	62.436	.004	1.267	.094
[VENTIL=8]	0 ^b	.	.	.	.	.	.	.	.
TAGE	.295	.896	.329	.742	-2.025	2.614	.000	.329	.014
TEMP_AB	11.464	6.274	1.827	.068	-4.779	27.707	.009	1.827	.225
VOL_AB	6.676E-02	.011	6.038	.000	3.813E-02	9.539E-02	.088	6.038	1.000
[MAST=4] * [VENTIL=4]	-10.323	28.715	-.359	.719	-84.664	64.019	.000	.359	.015
[MAST=4] * [VENTIL=8]	0 ^b	.	.	.	.	.	.	.	.
[MAST=5] * [VENTIL=4]	2.899	23.501	.123	.902	-57.944	63.742	.000	.123	.011
[MAST=5] * [VENTIL=8]	0 ^b	.	.	.	.	.	.	.	.
[MAST=6] * [VENTIL=4]	0 ^b	.	.	.	.	.	.	.	.
[MAST=6] * [VENTIL=8]	0 ^b	.	.	.	.	.	.	.	.
TAGE * TEMP_AB	-.129	.111	-1.164	.245	-.415	.158	.004	1.164	.078
TAGE * VOL_AB	2.503E-05	.000	.108	.914	-5.748E-04	6.248E-04	.000	.108	.010
TEMP_AB * VOL_AB	-1.82E-03	.001	-1.786	.075	-4.462E-03	8.187E-04	.008	1.786	.213
TAGE * TEMP_AB * VOL_AB	6.897E-06	.000	.370	.712	-4.140E-05	5.519E-05	.000	.370	.015

a. Unter Verwendung von Alpha = .01 berechnet

b. Dieser Parameter wird auf Null gesetzt, weil er redundant ist.

Tabelle 72: Paarweise Vergleiche der Mittelwerte der CO₂-Emissionsrate in den beiden Außenklima-Versuchsabteilen**Paarweise Vergleiche**

Abhängige Variable: CO2_E500

(I) VENTIL	(J) VENTIL	Mittlere Differenz (I-J)	Standardfehler	Signifikanz ^a	99% Konfidenzintervall für die Differenz ^a	
					Untergrenze	Obergrenze
4	8	18.041	11.155	.107	-10.837	46.920
8	4	-18.041	11.155	.107	-46.920	10.837

Basiert auf den geschätzten Randmitteln

a. Anpassung für Mehrfachvergleiche: Geringste signifikante Differenz (entspricht keinen Anpassungen).

Tabelle 73: Paarweise Vergleiche der CO₂-Emissionsraten der beiden Außenklima-Versuchsabteile während der drei Mastdurchgänge**Paarweise Vergleiche**

Abhängige Variable: CO2_E500

(I) MAST	(J) MAST	Mittlere Differenz (I-J)	Standardfehler	Signifikanz ^a	99% Konfidenzintervall für die Differenz ^a	
					Untergrenze	Obergrenze
4	5	-96.274*	28.778	.001	-170.780	-21.767
	6	-120.171*	16.857	.000	-163.813	-76.528
5	4	96.274*	28.778	.001	21.767	170.780
	6	-23.897	31.444	.448	-105.305	57.511
6	4	120.171*	16.857	.000	76.528	163.813
	5	23.897	31.444	.448	-57.511	105.305

Basiert auf den geschätzten Randmitteln

*. Die mittlere Differenz ist auf dem Niveau .01 signifikant

a. Anpassung für Mehrfachvergleiche: Geringste signifikante Differenz (entspricht keinen Anpassungen).

Tabelle 74: Parameterschätzer für die CO₂-Emissionsrate aus dem Warmstall mit Teilspaltenboden

Parameterschätzer

Abhängige Variable: CO₂_E500

Parameter	B	Standardfehler	T	Signifikanz	99% Konfidenzintervall		Eta-Quadrat	Nichtzentralitäts-Parameter	Beobachtete Schärfe ^a
					Untergrenze	Obergrenze			
Konstanter Term	-5130.075	817.629	-6.274	.000	-7258.457	-3001.694	.178	6.274	1.000
[MAST=4]	-326.152	60.929	-5.353	.000	-484.757	-167.546	.136	5.353	.997
[MAST=5]	323.447	120.883	2.676	.008	8.774	638.120	.038	2.676	.530
[MAST=6]	0 ^b	.	.	.	.	.	.	.	.
[VENTIL=32]	0 ^b	.	.	.	.	.	.	.	.
TAGE	162.486	32.101	5.062	.000	78.924	246.047	.123	5.062	.993
TEMP_AB	323.976	45.829	7.069	.000	204.678	443.275	.215	7.069	1.000
VOL_AB	3.137	.232	13.538	.000	2.534	3.740	.502	13.538	1.000
[MAST=4] * [VENTIL=32]	0 ^b	.	.	.	.	.	.	.	.
[MAST=5] * [VENTIL=32]	0 ^b	.	.	.	.	.	.	.	.
[MAST=6] * [VENTIL=32]	0 ^b	.	.	.	.	.	.	.	.
TAGE * TEMP_AB	-9.521	1.800	-5.290	.000	-14.206	-4.835	.133	5.290	.996
TAGE * VOL_AB	-4.50E-02	.007	-6.522	.000	-6.302E-02	-2.707E-02	.189	6.522	1.000
TEMP_AB * VOL_AB	-.138	.011	-12.183	.000	-.168	-.109	.449	12.183	1.000
TAGE * TEMP_AB * VOL_AB	2.291E-03	.000	6.129	.000	1.318E-03	3.264E-03	.171	6.129	1.000

a. Unter Verwendung von Alpha = .01 berechnet

b. Dieser Parameter wird auf Null gesetzt, weil er redundant ist.

Tabelle 75: Paarweise Vergleiche der CO₂-Emissionsraten des Warmstalls mit Teilspaltenboden während der drei Mastdurchgänge

Paarweise Vergleiche

Abhängige Variable: CO₂_E500

(I) MAST	(J) MAST	Mittlere Differenz (I-J)	Standardfehler	Signifikanz ^a	99% Konfidenzintervall für die Differenz ^a	
					Untergrenze	Obergrenze
4	5	-649.599*	112.395	.000	-942.176	-357.021
	6	-326.152*	60.929	.000	-484.757	-167.546
5	4	649.599*	112.395	.000	357.021	942.176
	6	323.447*	120.883	.008	8.774	638.120
6	4	326.152*	60.929	.000	167.546	484.757
	5	-323.447*	120.883	.008	-638.120	-8.774

Basiert auf den geschätzten Randmitteln

*. Die mittlere Differenz ist auf dem Niveau .01 signifikant

a. Anpassung für Mehrfachvergleiche: Geringste signifikante Differenz (entspricht keinen Anpassungen).

Tabelle 76: Regressionsgeraden zur Ableitung der Stalltemperaturen in der Abluft von den Außentemperaturen

Stall	Mastdurchgang	Regressionsgerade
Außenklimaställe	4	$T_i = 5,695 - 0,391 + 0,742 \cdot \text{Außentemperatur}$
Außenklimaställe	5	$T_i = 5,695 + 1,584 + 0,742 \cdot \text{Außentemperatur}$
Außenklimaställe	6	$T_i = 5,695 + 0,742 \cdot \text{Außentemperatur}$
Warmstall	4	$T_i = 17,742 - 0,854 + 0,212 \cdot \text{Außentemperatur}$
Warmstall	5	$T_i = 17,742 + 2,183 + 0,212 \cdot \text{Außentemperatur}$
Warmstall	6	$T_i = 17,742 + 0,212 \cdot \text{Außentemperatur}$