

# Umweltgerechte Mastschweinehaltung III

## Tageszeitliche Effekte

Eva Gallmann, Eberhard Hartung und Thomas Jungbluth  
Universität Hohenheim, Institut für Agrartechnik, Stuttgart

*Im Rahmen von kontinuierlichen Emissionsmessungen im Hohenheimer Versuchsstall für Mastschweine wurde ein konventioneller Vollspaltenstall mit Zwangslüftung (VSP) mit einem frei belüfteten Haltungssystem mit getrennten Klimabereichen (GK) über vier Mastdurchgänge von Oktober 1999 bis April 2001 verglichen. Die Beschreibung und Analyse von tageszeitlichen Effekten und des Emissionsverlaufs ist Schwerpunkt des dritten Beitrages der Artikelreihe zur Umweltgerechten Mastschweinehaltung.*

*Anhand der Verläufe von drei beispielhaft ausgewählten Messzeiträumen des zweiten Mastdurchganges sowie multiplen Regressionsanalysen wurde untersucht, durch welche Variablen die verschiedenen Tagesverläufe der  $\text{NH}_3$ - und  $\text{CO}_2$ -Emission hauptsächlich bestimmt wurden und inwieweit Ansatzpunkte zur Beeinflussung des Tagesverlaufs im Rahmen von Emissionsminderungsstrategien bestehen. Im Haltungssystem VSP zeigten sich in Übereinstimmung mit der Literatur vorwiegend positive Zusammenhänge zwischen Temperatur, Volumenstrom und Emission. Im Haltungssystem GK hingegen wurde eine Abnahme der Emission bei steigenden Volumenströmen, die in der Regel besonders bei geringeren Temperaturen auftraten, beobachtet. Die durch die Fütterungszeiten stark beeinflusste Tieraktivität spiegelte sich in deutlichen Spitzen der  $\text{CO}_2$ -Konzentration und -emission sowie auch der  $\text{NH}_3$ -Emission wieder.*

*Der Anteil der erklärbaren Varianz des Tagesverlaufs der Emissionsraten für die ausgewählten Messzeiträume durch Variablen, die praktikabel in einer Stallklimaauzeichnung und -steuerung genutzt und gegebenenfalls im Rahmen von Emissionsminderungsmaßnahmen beeinflussbar wären, lag im Haltungssystem VSP für  $\text{NH}_3$  zwischen 12 % und 75 % und  $\text{CO}_2$  bei 39 % bis 47 %. Im Haltungssystem GK ist der Anteil der erklärbaren Varianz geringer mit 52 % bis 64 % ( $\text{NH}_3$ ) bzw. 18 % bis 28 % ( $\text{CO}_2$ ).*

### Schlüsselwörter

Mastschweinehaltung, Umweltgerechtigkeit, Emissionen, klima- und umweltrelevante Gase

### Einleitung und Problemstellung

Im Rahmen der umweltpolitischen Diskussion wird dem Sektor Landwirtschaft und der Tierhaltung sowohl hinsichtlich des Beitrages zu den Emissionen klima- und umweltrelevanter Gase als auch des Minderungspotentials eine bedeutende Rolle zugewiesen. Beispielsweise wird der Anteil allein der Tierhaltung an den deutschen Ammoniak ( $\text{NH}_3$ )-Emissionen mit ca. 84 % beziffert, der Beitrag der Landwirtschaft zu den Methan ( $\text{CH}_4$ )-Emissionen beträgt etwa 44 % [1].

Gasförmige Stickstoff (N) und Kohlenstoff (C)-haltige Emissionen aus der Tierhaltung entstehen sowohl beim Abbau der anfallenden organischen Substanz (vorwiegend der Exkrememente) als auch durch die Stoffwechselaktivität der Tiere selbst. Die Umweltbelastungen durch die Freisetzung von N-Verbindungen sind vielfältig und wirken sich direkt oder indirekt auf zahlreiche Prozesse und Regelfunktionen im Stoffhaushalt von Böden, Pflanzen und Gewässern aus [2]. Die über die natürliche Emission hinausgehende zusätzliche Freisetzung von Kohlendioxid ( $\text{CO}_2$ ), Methan ( $\text{CH}_4$ ) und Lachgas ( $\text{N}_2\text{O}$ )

führt zu einer Akkumulation der Gase in der Atmosphäre und trägt zum unerwünschten zusätzlichen (anthropogenen) Treibhauseffekt bei. Als ökologische Folgen werden eine allmähliche Erwärmung der Erdatmosphäre mit einer möglichen Verschiebung von Klimazonen und Häufung von Klima-anomalien befürchtet [3].

Der zwingenden nationalen und internationalen Notwendigkeit, die Emissionen klima- und umweltrelevanter Gase zu mindern und in entsprechenden Maßnahmen umzusetzen, wird beispielsweise im Rahmen der IVU<sup>1</sup>-Richtlinie, dem Artikelgesetz vom 3. August 2001 oder dem Göteborger Multischadstoffprotokoll Rechnung getragen.

Für die Entwicklung und Ableitung von effektiven Verminderungsstrategien ist die Kenntnis der Einflussfaktoren auf die Freisetzung, Höhe und Dynamik der quellspezifischen Emissionen klima- und umweltrelevanter Gase notwendig. Gerade in der Tierhaltung ist jedoch zum einen die Datenverfügbarkeit für neuere und vor allem frei belüftete Haltungssysteme im Vergleich zu sogenannten konventionellen Systemen und zum anderen für klimarelevante Gase wie Methan und Lachgas noch gering [4]. Schließlich stellt sich die Frage, inwieweit eine Beeinflussung der Dynamik der stallspezifischen Gasemissionen zum Beispiel im Tagesverlauf möglich ist und für Minderungsmaßnahmen nutzbar gemacht werden kann.

### Zielsetzung

Als Hauptziel der Untersuchungen zur umweltgerechten Mastschweinehaltung wurde ein Systemvergleich von zwei unterschiedlichen Haltungssystemen für Mastschweine hinsichtlich der Emissionen von Ammoniak ( $\text{NH}_3$ ), Kohlendioxid ( $\text{CO}_2$ ) und Methan ( $\text{CH}_4$ ) formuliert. Die zu vergleichenden Haltungssysteme waren ein konventioneller Vollspaltenstall als Referenzsystem gegenüber einer Umbaulösung mit freier Lüftung, planbefes-

<sup>1</sup> IVU: Integrierte Vermeidung und Verminderung der Umweltverschmutzung (Integrated Pollution Prevention and Control-IPCC)

tigten Flächenanteilen und getrennten Klimabereichen.

Das Hauptziel sollte über folgende Teilziele erreicht werden:

- Erfassung von zuverlässigen Daten mit einer hohen zeitlichen Auflösung aus zwei Haltungssystemen im zeitgleichen Parallelbetrieb,
- Vergleich der Emissionsraten zur Bewertung der Umweltwirkung der Haltungssysteme,
- Vergleich von Tageseffekten und der Sensitivität für verschiedene Einflussfaktoren auf die Emission,
- Vergleich der Innenraumluftqualität und Stallklimaparameter zur Bewertung der jeweiligen Haltungsumwelt der Tiere.

Im ersten Teil der Artikelreihe zur umweltgerechten Mastschweinehaltung [5] wurden gemäß dem ersten Teilziel die Ergebnisse zur Sensitivität und Zuverlässigkeit des Messsystems sowie die Methodik dargestellt. Im Mittelpunkt des zweiten Teils [6] standen die Ergebnisse zum Emissionsratenvergleich auf Basis der Tagesmittelwerte. Die Beschreibung und Diskussion von ausgewählten beispielhaften tageszeitlichen Effekten ist Schwerpunkt des dritten Teils der Artikelreihe.

## Haltungssysteme und Messgrößen

Der Systemvergleich der Haltungssysteme „getrennte Klimabereiche, freie Lüftung“ (GK) und „Vollspaltenstall, Zwangslüftung“ (VSP) wurde im Hohenheimer Versuchsstall für Mastschweine in zwei räumlich getrennten Abteilen durchgeführt. Die Untersuchungen er-

streckten sich über vier aufeinanderfolgende Mastdurchgänge von 16 Wochen zu verschiedenen Jahreszeiten von Oktober 1999 bis April 2001.

**Bild 1** zeigt anhand des Grundrisses die Aufteilung des Systems VSP in 6 Buchten mit je 9 Tieren und des Systems GK in zwei Buchten mit je 24 Tieren und die Unterteilung in einen Aktivitätsbereich mit perforiertem Boden und einen planbefestigten abgedeckten Liegebereich je Bucht. Das Haltungssystem VSP verfügte über eine Unterflurabsaugung mit Zuluftführung über Porenkanäle. Das freie Lüftungssystem im Haltungssystem GK war als Schwerkraft-Schachtlüftung ausgelegt. Im östlichen Kamin befand sich zusätzlich ein solarbetriebener und temperatureregelter Ventilator zur Stützventilation, wenn der Winddruck und die Temperaturdifferenz als natürliche Kräfte für den Luftaustausch nicht ausreichten. Die Zuluft gelangte über die westliche Stallseite in den Stall, der Öffnungsquerschnitt der Zuluftöffnung konnte durch ein temperaturgeregeltes Wickelrollo variiert werden. Das System GK wurde als Umbaulösung für einen vorhandenen Vollspaltenstall entwickelt und selber als Umbaumaßnahme im Versuchsstall im Sommer 1999 realisiert [7]. Die Fütterung erfolgte in beiden Haltungssystemen mittels einer Sensorflüssigfütterung mit 16 Fütterungszeiten von 6:00 bis 22:00 Uhr. Zur Entmistung wurde ebenfalls in beiden Systemen der Flüssigmist in jeweils zwei Behältern beidseitig des Futterganges über den gesamten Mastdurchgang gesammelt und erst nach dem Ausstallen abgelassen. Die Stallbelegung erfolgte in beiden Abteilen jeweils zeitgleich im Rein-Raus-

Betrieb mit durchschnittlichen Ein- und Ausstallgewichten von 25 kg bzw. 110 kg pro Tier (dies entsprach einer Stallbelegung von etwa 3 bis 10 Großvieheinheiten und einer Mastdauer von etwa 110 Tagen). Weitere Informationen und detaillierte Angaben zum Versuchsstall für Mastschweine sowie die Ausgestaltung der Haltungssysteme sind in [5, 7] enthalten.

Für die Datenerfassung der für die Emissionsberechnung relevanten Messgrößen Gaskonzentrationen und Volumenströme sowie verschiedener Einflussfaktoren wurde jeweils die höchst mögliche zeitliche Auflösung angestrebt. Die Volumstrommessung erfolgte mittels kalibrierter Messventilatoren in allen Abluftschächten. Zur Konzentrationsbestimmung von  $\text{NH}_3$ ,  $\text{CO}_2$  und  $\text{CH}_4$  diente jeweils ein spezifisches Gasanalysegerät nach dem Prinzip der Nicht-Dispersiven Infrarotspektroskopie. In Abhängigkeit von der Abfolge der verschiedenen Messstellen und zu berücksichtigender Einpegel- und Beprobungszeiten pro Messstelle bei der Gaskonzentrationsbestimmung wurde ein Vergleich der Emissionen und deren Einflussfaktoren dreimal pro Stunde realisiert. Die Versuchskonzeption, die Messmethoden, der Messablauf, die Messgerätecharakteristika sowie die Vorgehensweise bei der Datenaufbereitung und -selektion sind eingehend in [5, 6] dargestellt.

## Ergebnisdarstellung und -auswahl

Die Analyse von Tagesverläufen erfolgt exemplarisch für drei repräsentativ ausgewählte Messzeiträume von 4 bis 5 Ta-

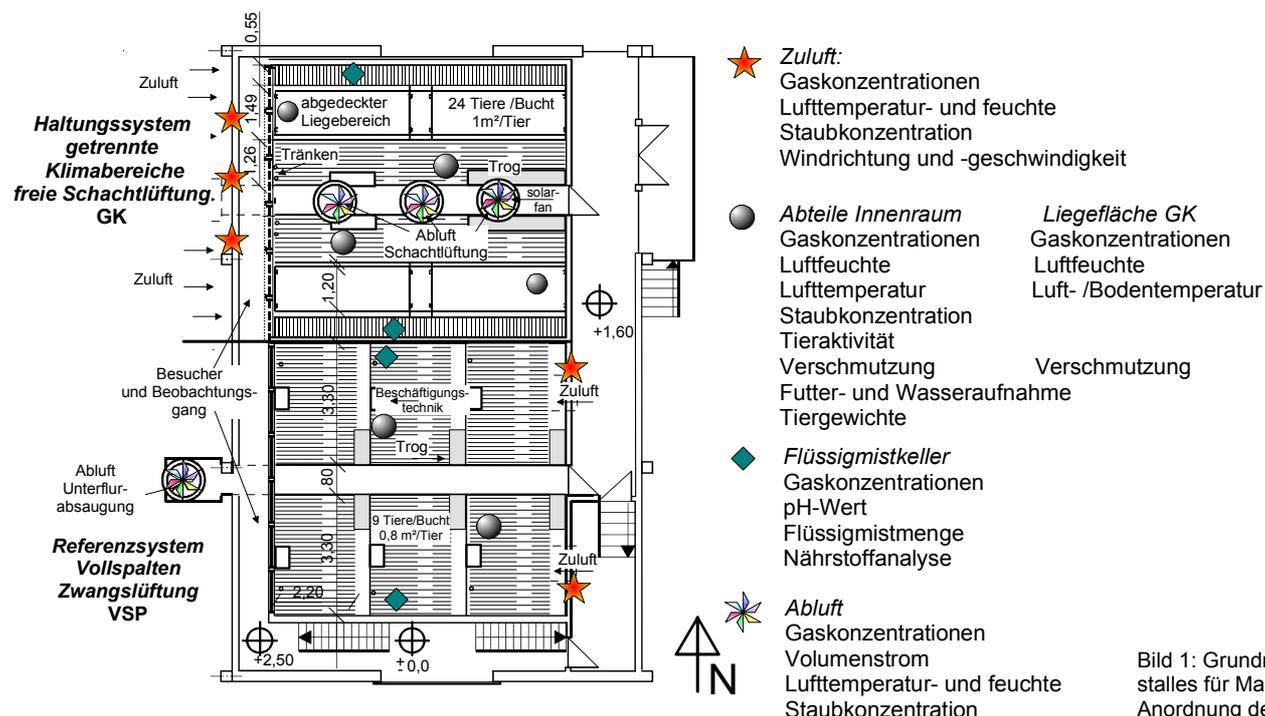


Bild 1: Grundriss des Versuchsstalles für Mastschweine mit Anordnung der Messstellen

gen des zweiten Mastdurchganges (März bis Juni 2000), anhand derer typische Zusammenhänge zwischen beispielsweise Temperatur, Volumenstrom, Gaskonzentration und Emission für unterschiedliche Situationen aufgezeigt werden können. Für eine bessere Vergleichbarkeit der Ergebnisse wurden die Volumenströme und Emissionen jeweils auf eine Grob-  
vieheinheit (GV) bezogen.

Die Berechnung von mittleren Tagesverläufen über größere Zeiträume ergab kein befriedigendes Ergebnis, da bei Einzelsituationen sichtbare Effekte durch diese Darstellungsweise zu stark gedämpft wurden und somit den Aussagegehalt minderte. Im folgenden wird nur auf die Dynamik der Konzentrationen und Emissionen von NH<sub>3</sub> und CO<sub>2</sub> eingegangen, da für die CH<sub>4</sub>-Emissionen bei unterschiedlichsten Konstellationen kein klarer Tagesgang nachgewiesen werden konnte. Die grafische Darstellung und visuelle Überprüfung von zahlreichen Tagesverläufen der Emission und verschiedenen Randbedingungen sowie Auswertung der Literatur führte zu einer Auswahl wahrscheinlicher Einflussfaktoren auf den NH<sub>3</sub>- und CO<sub>2</sub>-Emissionsverlauf. Um die Komplexität der Zusammenhänge und die Stärke des Einflusses auf die Emission zu untersuchen, wurden wiederum getrennt für jedes Haltungssystem Variablen festgelegt, die für eine multiple lineare Regressionsanalyse (für jeden Messzeitraum getrennt) herangezogen wurden.

Zusätzlich wurde bei der Auswahl und Begrenzung der zu prüfenden Variablen aus praktischen Erwägungen für abzulei-

tende Emissionsminderungsstrategien berücksichtigt, ob die Variable kontinuierlich messbar ist und gegebenenfalls in einer Stallklimaauzeichnung und -steuerung mit vertretbarem Aufwand einsetzbar wäre. Diese wurden in einer zweiten Analyse von reduzierten Regressionsmodellen getestet. **Tabelle 1** fasst die Auswahl der Variablen für jedes Haltungssystem zusammen.

Die multiple lineare Regressionsanalyse wurde nach der „Schrittweisen-Methode“ mit der Statistik-Software SPSS 11.0 für Windows<sup>TM</sup> durchgeführt. Es werden nacheinander die erklärenden Variablen mit dem höchsten partiellen Korrelationskoeffizienten mit der abhängigen Variablen (hier: Gasemission) in die Gleichung aufgenommen soweit der zugehörige Regressionskoeffizient signifikant (Signifikanzniveau 0,1) ist. Die erklärenden Variablen können dabei selbst untereinander korreliert sein, was bei der Schätzung der Koeffizienten berücksichtigt wird, um Scheinkorrelationen auszuschließen. Das Bestimmtheitsmaß  $r^2$  gibt dabei den Anteil der Varianz wieder, der durch die Regressionsgleichung erklärt wird. Generell muss einschränkend erwähnt werden, dass die Voraussetzung Linearität und Normalverteilung der Versuchsdaten nicht immer gewährleistet war. Eine Verbesserung der Normalverteilung der Daten wurde jedoch auch nach einer Datentransformation nicht erreicht. Ein hohes Bestimmtheitsmaß sowie eine Normalverteilung der standardisierten Residuen erlauben die Annahme, dass der gegebene Zusammenhang als

linear angesehen werden kann [8]. Eine Verletzung der Normalverteilungsvoraussetzung wird in diesem Zusammenhang als nicht sehr gravierend angesehen [9, 10]. Mit Hilfe der Regressionsmodelle war es möglich, die wesentlichen erklärenden Variablen für den Tagesverlauf der Emission in den verschiedenen Haltungssystemen und Messzeiträumen herauszukristallisieren.

## Ergebnisse

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

### Vollspaltenboden, Zwangslüftung

Die Randbedingungen und mittleren Gaskonzentrationen und Emissionen während der drei exemplarisch ausgewählten Messzeiträume des zweiten Mastdurchganges sind in **Tabelle 2** zusammengefasst. In **Bild 2** (siehe S. 74) sind die Verläufe der Innenraum- und Außentemperatur, des Volumenstromes, der Abluftkonzentration sowie der Emissionsrate der Gase NH<sub>3</sub> und CO<sub>2</sub> in den ausgewählten

Tabelle 1: Auswahl der Variablen für eine multiple Regressionsanalyse zur Untersuchung von Bestimmungsfaktoren auf den tageszeitlichen Verlauf der Emissionsraten

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

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

\*\* Einfluss eines nächtlichen Luftaustausches durch den Spaltenboden (abnehmende Gaskonzentrationen) auf die Emission? [11]

\*\*\* Korrelation zwischen NH<sub>3</sub> und CO<sub>2</sub>-Emission [15, 14, 9]

X: Allgemeines Regressionsmodell

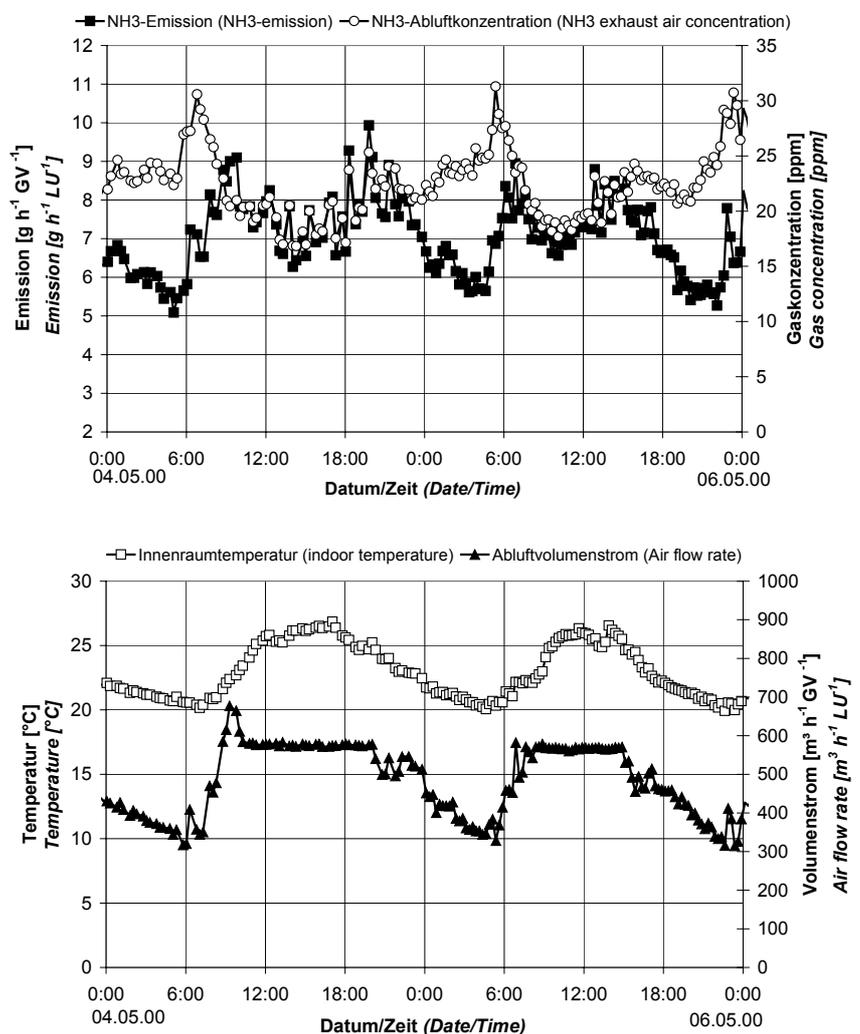
R: Reduziertes Regressionsmodell

Tabelle 2: Zusammenfassung der Randbedingungen und mittleren Gaskonzentrationen und Emissionsraten von NH<sub>3</sub> und CO<sub>2</sub> für drei Messzeiträume eines Mastdurchganges im Haltungssystem VSP „Vollspalten, Zwangslüftung“ (Mittelwert und Standardabweichung)

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

Messzeiträumen übereinander dargestellt. Anhand des Temperatur- und Volumenstromverlaufes ist sehr gut die Abhängigkeit des Volumenstromes von der Innenraumtemperaturabhängigen Stallklimaregelung der Zwangslüftung zu erkennen. Im Messzeitraum 1 ist der Volumenstrom weitgehend konstant und entspricht der Minimalluftrate. In den Messzeiträumen 2 und 3 zeigt sich eine deutliche Tag-Nacht-Rhythmik auch in Abhängigkeit von der Außentemperatur. Die NH<sub>3</sub>-Abluftkonzentration verläuft gegenläufig zu schwankenden Volumenströmen, was auf einen Verdünnungseffekt der Gaskonzentration durch höhere Volumenströme hinweist. Die NH<sub>3</sub>-Emission (Produkt aus Volumenstrom und Gaskonzentration) verläuft weitgehend parallel zum Volumenstrom und ist somit erhöht, wenn der Volumenstrom erhöht ist. In Bild 3 sind diese Zusammenhänge bei einer zeitlichen Auflösung von 2 Tagen des Messzeitraumes 3 genauer dargestellt. Es zeigt sich vor allem am Beispiel des zweiten Tages, dass mit dem steilen Anstieg des Volumenstromes ab 6:00 Uhr zunächst ebenso ein deutlicher Anstieg der NH<sub>3</sub>-Emission sowie ein Abfall der nachts erhöhten NH<sub>3</sub>-Konzentration verbunden ist. Nachdem jedoch die maximale Luftrate erreicht ist, wird zunächst eine Abnahme von NH<sub>3</sub>-Emission und -Konzentration verzeichnet. Wenn im Verlauf des Tages die Innenraumtemperatur trotz maximaler Luftrate weiter ansteigt und verzögert im Lauf des Tages ebenfalls ihr Maximum erreicht hat, steigen jedoch Gaskonzentration und Emission wieder an.

Nach den Ergebnissen der Regressionsanalyse lassen sich im Messzeitraum 1 bei vergleichsweise konstanten Volumenströmen allein 97 % der Varianz der NH<sub>3</sub>-Emission durch die Abluftkonzentration ( $r^2=0,61$ ) und den Volumenstrom ( $r^2=0,36$ ) erklären. Dabei ist die Abluft-

Bild 3: Verlauf von Innenraumtemperatur, Volumenstrom, NH<sub>3</sub>-Abluftkonzentration und -Emissionsraten an zwei Tagen im Mai (66.-68. Masttag) im Haltungssystem VSP „Vollspalten, Zwangslüftung“

konzentration stark positiv und der Volumenstrom jedoch leicht negativ mit der NH<sub>3</sub>-Emission korreliert. In den Messzeiträumen 2 und 3 bei schwankenden Volumenströmen kehrt sich die Bedeutung und Wirkungsrichtung der Faktoren um. Im Messzeitraum 3 werden 95 % der Varianz der NH<sub>3</sub>-Emission durch den Volumen-

strom ( $r^2=0,55$ ; positiv korreliert) und die Abluftkonzentration ( $r^2=0,4$ ; negativ korreliert) erklärt.

Der Verlauf der größtenteils tierspezifischen CO<sub>2</sub>-Konzentration und Emission (Bild 2) zeigt eine deutliche Tag/Nacht Dynamik sowie starke Fluktuationen tagsüber. Vor allem im Messzeitraum 1,

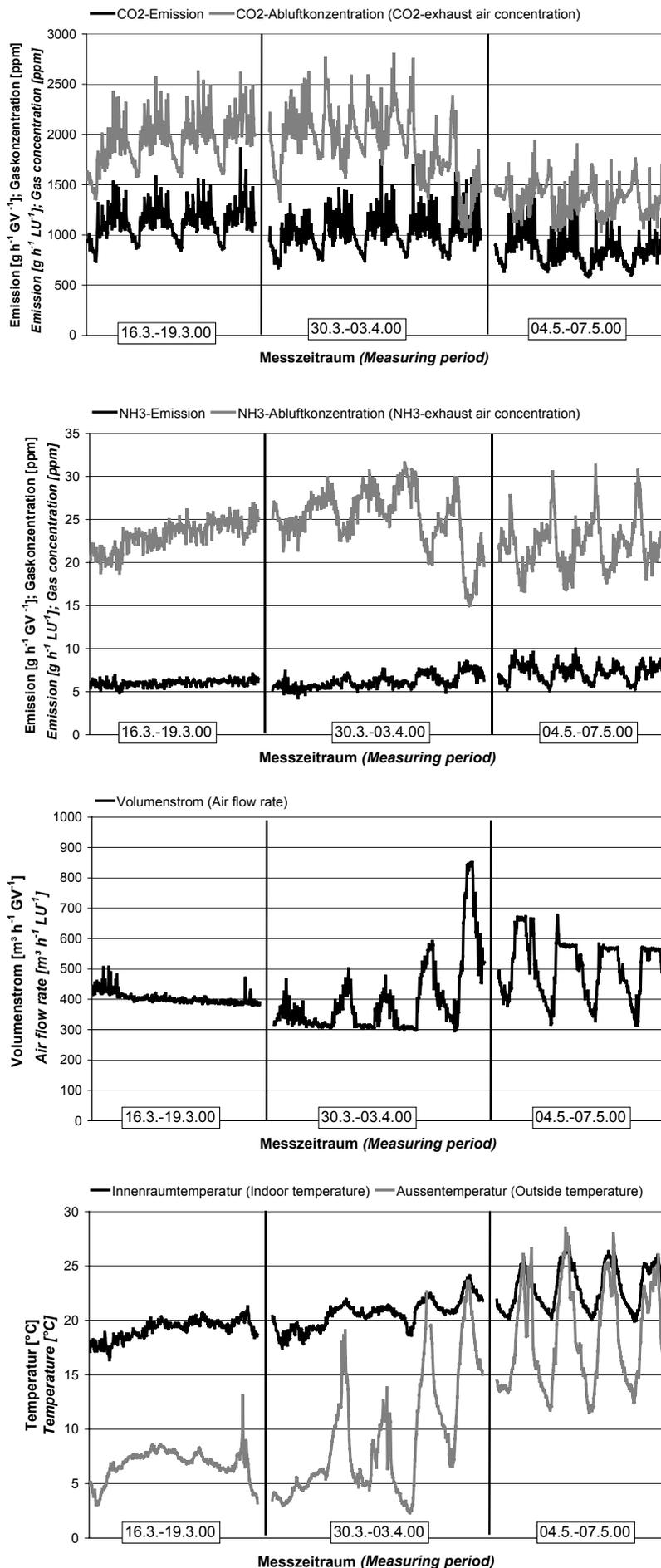


Bild 2: Verläufe der Innenraum- und Außentemperatur, des Volumenstromes, der Abluftkonzentration sowie Emissionsraten der Gase NH<sub>3</sub> und CO<sub>2</sub> in den ausgewählten Messzeiträumen eines Mastdurchganges des Haltungssystems VSP „Vollspalten, Zwangslüftung“

bei konstanten Volumenströmen und im Vergleich zur NH<sub>3</sub>-Emission, wird eine weitgehende Unabhängigkeit vom Volumenstrom deutlich. In **Bild 4** ist der Verlauf der Innenraumtemperatur, CO<sub>2</sub>-Konzentration, und -Emissionsrate für drei Tage des Messzeitraumes 1 abgebildet. Die starken Fluktuationen in der CO<sub>2</sub>-Konzentration und -Emission am Tag werden hauptsächlich auf die häufigen Fütterungszeiten im 1,5 Stunden Abstand in der Zeit von 6:00 bis 22:00 Uhr zurückgeführt. Mit Beginn der Futterzuteilung ist eine starke Aktivität und Aufregung der Tiere zu verzeichnen, die mit einer kurzzeitig erhöhten Wärmeabgabe (vgl. Temperaturverlauf) und CO<sub>2</sub>-Produktion einhergeht. Anhand der in Bild 3 gezeigten Tagesverläufe der NH<sub>3</sub>-Emission können ebenfalls kurzzeitige Emissionsspitzen während der Fütterungszeiten nachvollzogen werden. Im Messzeitraum 1 ergab die Regressionsanalyse für die CO<sub>2</sub>-Emission entsprechend eine erklärte Varianz von 91% allein durch die CO<sub>2</sub>-Abluftkonzentration. Diese wiederum lässt sich zu 50 % durch die Innenraumtemperatur und die Variable Tag/Nacht erklären. Im Messzeitraum 2 wirken positiv der Volumenstrom ( $r^2=0,5$ ), Tag/Nacht ( $r^2=0,2$ ) und die Abluftkonzentration ( $r^2=0,1$ ). Im Regressionsmodell für die CO<sub>2</sub>-Emission des Messzeitraumes 3 hingegen, wurde den erklärenden Variablen NH<sub>3</sub>-Emission ( $r^2=0,4$ ; positiv korreliert), NH<sub>3</sub>-Abluftkonzentration ( $r^2=0,3$ ; negativ korreliert) und der CO<sub>2</sub>-Abluftkonzentration ( $r^2=0,18$ ; positiv korreliert) die größte Bedeutung für die erklärte Varianz von 88 % beigemessen. Hierbei ist zu berücksichtigen, dass die NH<sub>3</sub>-Emission und Konzentration wiederum stark vom Volumenstrom bestimmt sind.

### Getrennte Klimabereiche, freie Lüftung

**Tabelle 3** gibt einen Überblick über die Randbedingungen und mittleren Gaskonzentrationen und Emissionen während der drei exemplarisch ausgewählten Messzeiträume des zweiten Mastdurchganges. In **Bild 5** sind die Verläufe der Innenraum-, und Außentemperatur, der Volumenströme, der Abluftkonzentration sowie Emission der Gase NH<sub>3</sub> und CO<sub>2</sub> in den ausgewählten Messzeiträumen übereinander dargestellt.

Bei Betrachtung der Randbedingungen (Tabelle 3) und Verläufe (Bild 5) werden zunächst grundsätzliche Unterschiede zum Haltungssystem VSP (Tabelle 2; Bild 2) deutlich. Zusammenfassend wurden durchweg geringere Temperaturen (entsprechend den Außentemperaturen),

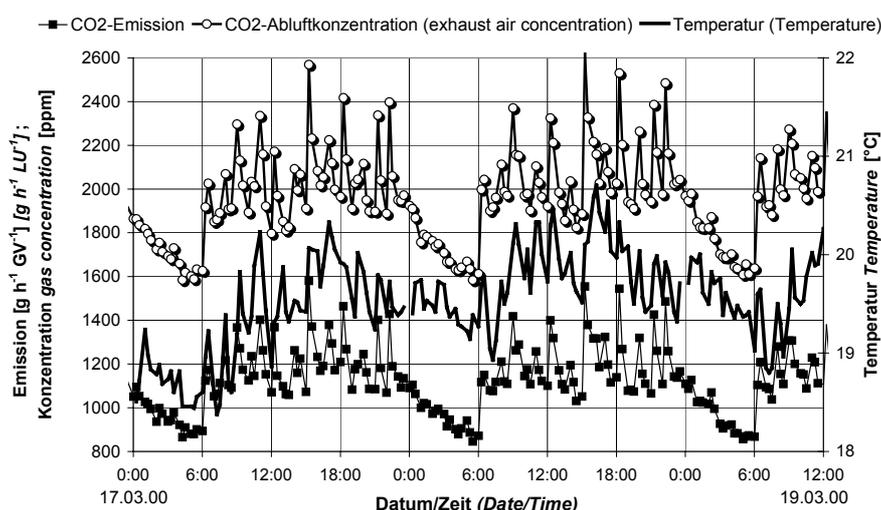


Bild 4: Verlauf von Innenraumtemperatur, CO<sub>2</sub>-Abluftkonzentration und -Emissionsraten an drei Tagen im März (Masttag 18-20) im Haltungssystem VSP „Vollspalten, Zwangslüftung“

höhere Volumenströme (vor allem an kühlen Tagen), geringere Gaskonzentrationen und Emissionen im frei belüfteten Haltungssystem GK beobachtet. Weitere Ergebnisse zum System- und Emissionsratenvergleich sind ausführlich in [6] beschrieben.

Im Messzeitraum 1 und 2 ist der Volumenstrom weniger vom Temperaturverlauf als von den Windverhältnissen beeinflusst. Im Messzeitraum 3 wird deutlich, dass an windstillen Tagen mit geringer Temperaturdifferenz der natürliche Luftaustausch stark eingeschränkt ist und eine angemessene Luftrate ohne den Einsatz des temperaturgeregelten Solarventilators nicht erreicht worden wäre. Faktisch weisen deshalb im Messzeitraum 3 die Volumenstromverläufe eine große Ähnlichkeit mit einer Zwangslüftung auf. Der Unterschied besteht jedoch weiterhin in den geringeren Innenraumtemperaturen und den ausgeprägten Tag/Nacht-Temperaturamplituden.

Hinsichtlich der Zusammenhänge zwi-

schen Volumenstrom und NH<sub>3</sub>-Emission zeigen sich im System GK gegensätzliche Effekte zum System VSP. Eine Zunahme des Volumenstromes bewirkt sowohl eine Abnahme der NH<sub>3</sub>-Abluftkonzentration als auch der NH<sub>3</sub>-Emission. Dieser Effekt zeigt sich auch noch im Messzeitraum 3 (Bild 6), obwohl hier Ähnlichkeiten der Volumenströme zu einer Zwangslüftung bestehen.

Die Regressionsanalyse für die NH<sub>3</sub>-Emission des Systems GK ergab für die Messzeiträume 1 und 2 sehr ähnliche Ergebnisse mit einer erklärten Varianz von 90 % durch die Variablen NH<sub>3</sub>-Abluftkonzentration ( $r^2=0,4$ ; positiv korreliert), Volumenstrom ( $r^2=0,2$ ; negativ korreliert), CO<sub>2</sub>-Emission ( $r^2=0,15$ ; positiv korreliert) und CO<sub>2</sub>-Abluftkonzentration ( $r^2=0,15$ ; positiv korreliert). Im Messzeitraum 3 fanden nur die Variablen Temperaturdifferenz ( $r^2=0,3$ ; positiv korreliert) und CO<sub>2</sub>-Emission ( $r^2=0,4$ ; positiv korreliert) Aufnahme ins Regressionsmodell mit einem erklärbaren Varianzanteil

von 70 %. Weiterhin bestand aber eine negative Korrelation zwischen Volumenstrom und Emission.

Ein Effekt eines nächtlichen Luftaustausches durch den Spaltenboden auf den Emissionsverlauf [11], der nachweislich anhand deutlicher Gaskonzentrationsänderungen unter den Spalten zu erkennen ist, konnte nicht nachgewiesen werden.

Für die Tagesverläufe der CO<sub>2</sub>-Konzentration und -Emission gilt ebenso wie im System VSP, dass diese durch die Aktivitätsspitzen während der Fütterung stark bestimmt werden. Im Regressionsmodell des Messzeitraumes 1 erklärt sich die Varianz der CO<sub>2</sub>-Emission zu 85 % aus den jeweils positiv korrelierten Variablen CO<sub>2</sub>-Abluftkonzentration ( $r^2=0,4$ ), NH<sub>3</sub>-Abluftkonzentration ( $r^2=0,23$ ), NH<sub>3</sub>-Emission ( $r^2=0,2$ ) und Außentemperatur ( $r^2=0,12$ ). Im Regressionsmodell für den Messzeitraum 2 wird zusätzlich die Variable Tag/Nacht berücksichtigt und die Variable NH<sub>3</sub>-Emission stärker gewichtet. Für den Messzeitraum 3 schließlich können nur 50 % der Varianz der CO<sub>2</sub>-Emission durch die Variablen NH<sub>3</sub>-Emission ( $r^2=0,35$ ; positiv korreliert) und Temperaturdifferenz ( $r^2=0,15$ ) erklärt werden. Weitere 20 % der Varianz werden durch die CO<sub>2</sub>- und NH<sub>3</sub>-Gaskonzentrationen, Tag/Nacht, Volumenstrom und Temperatur erklärt.

### Reduziertes Regressionsmodell

Anhand der ausgewählten Messzeiträume sollte ergänzend in Hinblick auf mögliche Emissionsminderungsstrategien geprüft werden, zu welchem Anteil die Emissionen allein mit Variablen, die in einer Stallklimasteuerung aufgezeichnet und verwendet werden könnten, zu erklären sind und somit Ansatzpunkte für eine Beeinflussung des Tagesverlaufs der Emission bieten. Hierzu wurden die Variablen Tag/Nacht, Innen- und Außentem-

Tabelle 3: Zusammenfassung der Randbedingungen und mittleren Gaskonzentrationen und Emissionsraten von NH<sub>3</sub> und CO<sub>2</sub> für drei Messzeiträume eines Mastdurchganges im Haltungssystem GK „Getrennte Klimabereiche, freie Lüftung“ (Mittelwert und Standardabweichung)

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

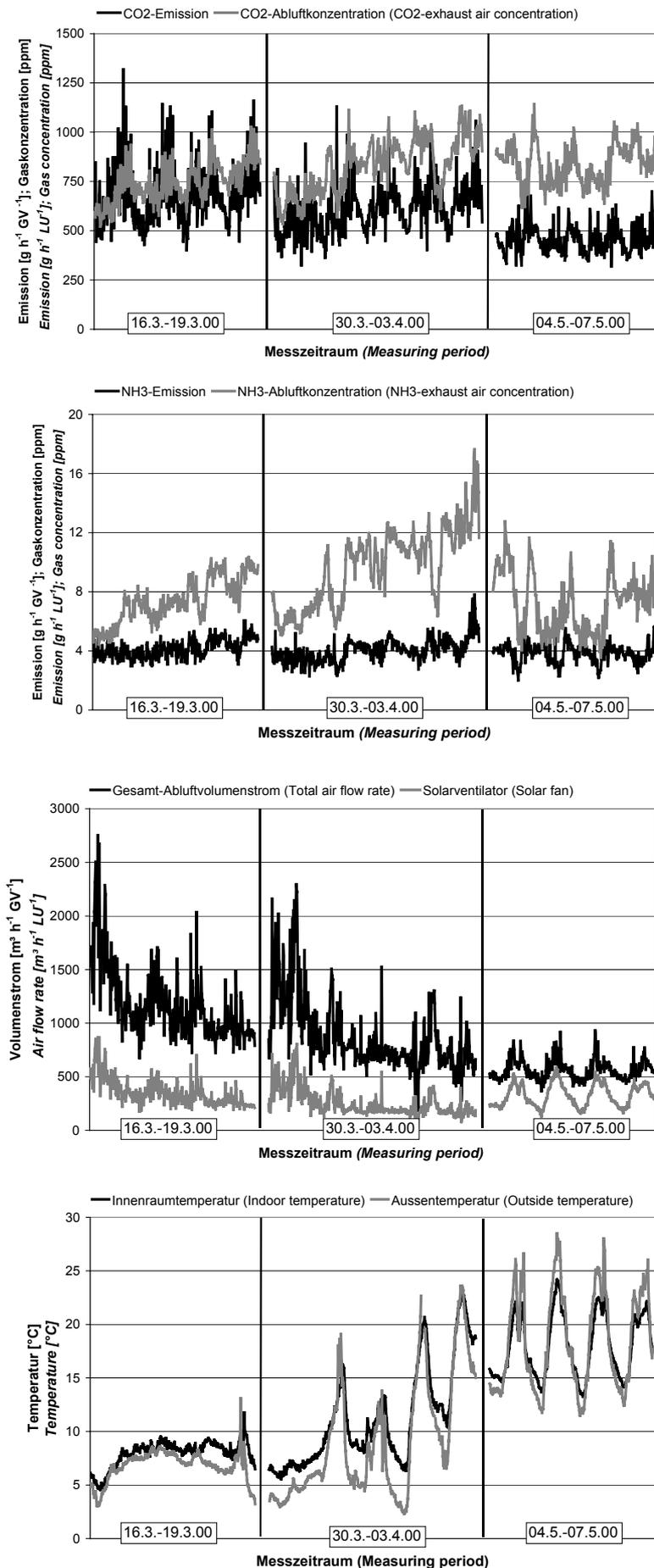


Bild 5: Verläufe der Innenraum- und Außentemperatur, der Volumenströme (Gesamtvolumenstrom und Anteil des Solarventilators), der Abluftkonzentration sowie Emissionsraten der Gase NH<sub>3</sub> und CO<sub>2</sub> in den ausgewählten Messzeiträumen eines Mastdurchganges des Haltungssystems GK „Getrennte Klimabereiche, freie Lüftung“

peratur, Temperaturdifferenz, Volumenstrom und CO<sub>2</sub>-Innenraumkonzentration (Tabelle 1) im reduzierten Regressionsmodell geprüft. Die Ergebnisse sind je nach Messzeitraum und Haltungssystem sowie zu prüfender Gasemission sehr unterschiedlich und sind in **Tabelle 4** zusammengefasst.

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

## Diskussion

In den Modellen wurden als indirekte Indikatoren für die Tieraktivität bisher nur die Variablen Tag/Nacht und CO<sub>2</sub>-Innenraumkonzentration verwendet. Es wäre zu prüfen, ob die Aussagekraft durch Hinzunahme eines zeitlich hoch aufgelösten Aktivitätssignals zu verbessern ist. Für die Ableitung von Emissionsminderungsstrategien ist zu berücksichtigen, dass die Wechselwirkungen zwischen den Einflussfaktoren wie Volumenstrom, Temperatur, Temperaturdifferenz und der Tierbelegung und Tieraktivität sowie deren Auswirkung auf die Emission bei verschiedenen Konstellationen sehr unterschiedlich sein kann.

Die Beeinflussungsmöglichkeiten für das Haltungssystem GK sind auf Grund der freien Lüftung und Strukturierung des Raumes generell schwieriger. Eine Verbesserung der Modelle ist vermutlich über weitere Parameter, die vor allem stärker die den Volumenstrom bestimmenden Faktoren wie Windanströmung und Temperaturdifferenz und deren Wechselwirkung berücksichtigen, zu erreichen.

Bei sehr hohen Volumenströmen und geringen Temperaturen unterschied sich im System GK die Abluftkonzentration oftmals nur geringfügig von der Hintergrundkonzentration. Es wird vermutet, dass das NH<sub>3</sub>-Nachlieferungspotential des Stallsystems GK aufgrund kühlerer Temperaturen geringer und langsamer ist, sowie auf Grund der Strukturierung des Haltungssystems und der Anordnung der Abluftschächte trotz hoher Volumenströme keine gleichmäßige Überströmung

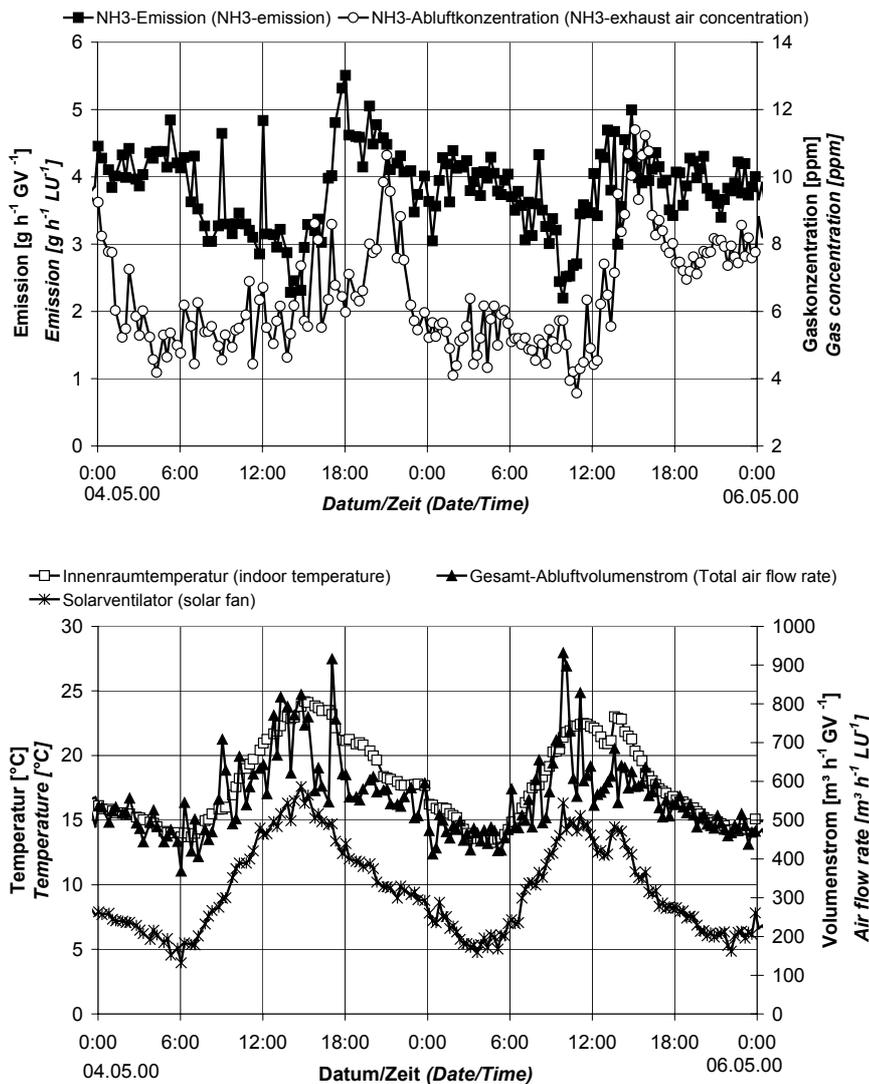


Bild 6: Verlauf von Innenraumtemperatur, Volumenstrom, NH<sub>3</sub>-Abluftkonzentration und -Emissionsraten an zwei Tagen im Mai (66.-68. Masttag) im Haltungssystem GK „Getrennte Klimabereiche, freie Lüftung“

Tabelle 4: Anteil der erklärten Varianz der Emissionsrate durch die Varianz der erklärenden Variablen Tag/Nacht, Innen- und Außentemperatur, Temperaturdifferenz, Volumenstrom und CO<sub>2</sub>-Innenraumkonzentration im reduzierten Regressionsmodell

Haltungssystem	Vollspalten Zwangslüftung (VSP)			Getrennte Klimabereiche freie Lüftung (GK)		
	1	2	3	1	2	3
Messzeitraum						
NH <sub>3</sub> -Emissionsrate [g h <sup>-1</sup> GV <sup>-1</sup> ]	12 %	75 %	68 %	52 %	59 %	64 %
CO <sub>2</sub> -Emissionsrate [g h <sup>-1</sup> GV <sup>-1</sup> ]	46 %	47 %	39 %	21 %	28 %	18 %

von emittierenden Oberflächen erfolgte. Weiterhin ist zu berücksichtigen, dass sich bei kühlen Temperaturen (d. h. dann bei hohen Volumenströmen und geringen Emissionen) die Tiere vorwiegend in den abgedeckten Liegebereichen aufhielten, jedoch der Beitrag der Gaskonzentrationen in den abgedeckten Liegebereichen zur Emission unklar ist.

In der Literatur finden sich für Schweineställe mit freier Lüftung und getrennten Klimabereichen nur wenige Angaben zum Tagesverlauf der Emission. Niebaum [9] beobachtete auch eine Abnahme der Gas-

konzentrationen bei hohen Volumenströmen, macht aber keine Angaben zum Verlauf der entsprechenden Emission. Rathmer [10] beschreibt ebenfalls für die untersuchten Außenklimastall-Versuchsabteile geringere NH<sub>3</sub>-Abluftkonzentrationen durch den Verdünnungseffekt des Volumenstromes und vermutete geringere Bildung und Freisetzung aufgrund geringerer Temperaturen. Die NH<sub>3</sub>-Emission der Außenklima-Versuchsabteile war auf Basis von Tagesmittelwerten über den gesamten Untersuchungszeitraum sowohl positiv mit der Temperatur als auch ab-

weichend von den eigenen Ergebnissen positiv mit dem Volumenstrom korreliert. Tagesverläufe werden jedoch nicht dargestellt.

Für zwangsbelüftete Warmställe werden in der Regel positive Zusammenhänge zwischen Volumenstrom, Temperatur und Emission sowie abnehmende Gaskonzentrationen bei Volumenstromerhöhung genannt [12, 13, 14, 10]. Keck [13] beobachtete jedoch Unterschiede im gemittelten Tagesgang in Abhängigkeit von der Zulufttemperatur. Bei Zulufttemperaturen über 20 °C erreichte die NH<sub>3</sub>-Emission ihr Maximum bereits einige Zeit vor dem Maximum des Volumenstromes. Bei Zulufttemperaturen unter 20 °C wurde ein weitgehend paralleler sinusförmiger Verlauf von Volumenstrom und Emission beschrieben. Aarnink [12] beschreibt eine deutliche Abhängigkeit des Tagesverlaufes von der Tieraktivität mit Unterschieden zwischen Tag und Nacht sowie nachvollziehbaren Emissionspeaks während erhöhter Aktivitätsphasen der Tiere in Zuge derer die Wärmeproduktion der Tiere erhöht und somit Innenraumtemperatur und Volumenstrom anstiegen.

## Fazit

Die Auswertung von beispielhaften Tagesverläufen der NH<sub>3</sub>- und CO<sub>2</sub>-Emission und verschiedener Einflussfaktoren hat für das Haltungssystem VSP mit Zwangslüftung im wesentlichen gezeigt, dass:

- die NH<sub>3</sub>-Emissionen bei fluktuierenden Volumenströmen vorwiegend durch die Faktoren Volumenstrom (positiv korreliert) und Abluftkonzentration (negativ korreliert) erklärt werden.
- die Tag/Nacht-Dynamik der NH<sub>3</sub>-Emission hauptsächlich durch die Dynamik des Temperaturverlaufes und folglich des Volumenstromes bestimmt ist sowie kurzzeitige Spitzen auf die fütterungsbedingte Tieraktivität zurückgeführt werden können.
- die Tag/Nacht-Dynamik der CO<sub>2</sub>-Emission hingegen hauptsächlich durch die fütterungsbedingte Tieraktivität, in dessen Folge die CO<sub>2</sub>-Abluftkonzentration und Temperatur (beide positiv korreliert) ansteigen, zu erklären ist und sekundär auf durch im Tagesgang parallel verlaufende Volumenströme und dadurch bedingte Änderungen der Gaskonzentration und NH<sub>3</sub>-Emission zurückgeführt werden können.

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

- Die Höhe und Fluktuation der Volumenströme sind wesentlich größer; die Temperaturen, Gaskonzentrationen und -emissionen sind in der Regel deutlich geringer als im System VSP.
- Im Gegensatz zum System VSP ist der Volumenstrom negativ mit der  $\text{NH}_3$ -Emission korreliert, d.h. das steigende Volumenströme eine Abnahme der Emission bedingen.
- Der Volumenstrom der freien Lüftung ist im Gegensatz zu einer temperaturgeregelten Zwangslüftung zum einen stark von den Windverhältnissen beeinflusst sowie weiterhin positiv mit der Temperaturdifferenz und negativ mit der Innenraumtemperatur korreliert.

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

## Literatur

- [1] UBA (Umweltbundesamt) (2001): Daten zur Umwelt – Der Zustand der Umwelt in Deutschland 2000. Erich Schmidt Verlag, Berlin, ISBN 3-503-05973-3, URL: <http://www.umweltbundesamt.org> (März 2002)
- [2] Schütze, G., H.-D. Gregor und T. Spranger (2001): Ökologische Wirkungen von Ammoniak. KTBL-UBA Symposium - Emissionen der Tierhaltung und Beste Verfügbare Techniken zur Emissionsminderung, Bildungszentrum Banz, 03./05.12.2001, Vorabversion der Beiträge; KTBL-Schrift 406 (2002), in Druck
- [3] Benndorf, R. (2001): Klimarelevante Wirkungen von Lachgas und Methan. KTBL-UBA Symposium -Emissionen der Tierhaltung und Beste Verfügbare Techniken zur Emissionsminderung, Bildungszentrum Banz, 03./05.12.2001, Vorabversion der Beiträge; KTBL-Schrift 406 (2002), in Druck
- [4] Hartung, E. und G.-J. Monteny (2000): Emission von Methan ( $\text{CH}_4$ ) und Lachgas ( $\text{N}_2\text{O}$ ) aus der Tierhaltung. Agrartechnische Forschung 6, H. 4, S. 62-69

- [5] Gallmann, E., E. Hartung und T. Jungbluth (2000): Umweltgerechte Mast-schweinehaltung I - Sensitivität der Emissionsmessungen (Environmentally Compatible Fattening Pig Husbandry I – Sensitivity of Emission Measurements). Agrartechnische Forschung (6), H. 6, S. 102-109
- [6] Gallmann, E., E. Hartung und T. Jungbluth (2002): Umweltgerechte Mast-schweinehaltung II - Emissionsratenvergleich (Environmentally Compatible Fattening Pig Husbandry II – Comparison of Emission Rates). Agrartechnische Forschung (8), H. 2, S. 16-24 (p E16-E24)
- [7] Gallmann, E., W. Bea und E. Hartung (2000): Umbaulösung für Vollspaltenstall. Landtechnik 55, H. 3, S. 252-253
- [8] Bühl, A. und P. Zöfel (1998): SPSS Version 8, Einführung in die moderne Datenanalyse unter Windows. 5. Überarbeitete Auflage. Verlag Addison-Wesley-Longman, Bonn, ISBN 3-8273-1432-1
- [9] Niebaum, A. (2001): Quantifizierung gasförmiger Emissionen aus quer gelüfteten Außenklimaställen für Mastschweine mit Hilfe der Tracergas-Technik. Dissertation Georg-August-Universität Göttingen, Forschungsbericht Agrartechnik, VDI-MEG Schrift 370
- [10] Rathmer, B. (2002): Vergleich klima- und umweltrelevanter Emissionen aus Haltungssystemen für Mastschweine. Dissertation Technische Universität München, Forschungsbericht Agrartechnik, VDI-MEG Schrift 386
- [11] Brose, G. (2000): Emission von klimarelevanten Gasen, Ammoniak und Geruch aus einem Milchviehstall mit Schwerkraftlüftung. Dissertation Universität Hohenheim, Forschungsbericht Agrartechnik VDI-MEG Schrift 362
- [12] Aarnink, A.J.A (1997): Ammonia emission from houses for growing pigs as affected by pen design, indoor climate and behaviour. Dissertation Landbouwniversiteit Wageningen, ISSN 90-5485-662-9
- [13] Keck, M. (1997): Beeinflussung von Raumluftqualität und Ammoniakemissionen aus der Schweinehaltung durch verfahrenstechnische Maßnahmen. Dissertation Universität Hohenheim, Forschungsbericht Agrartechnik, VDI-MEG Schrift 299
- [14] Kaiser, S. (1999): Analyse und Bewertung eines Zweiraumkompoststalls für Mastschweine unter besonderer Berücksichtigung der gasförmigen Stoffströme. Dissertation Georg-August-Universität Göttingen, Forschungsbericht Agrartechnik, VDI-MEG Schrift 334
- [15] Ni, J. (1998): Emission of Carbon Dioxide and Ammonia from a Mechanically Ventilated Pig House. Doctoraatsproefschrift Nr. 338, Faculteit Landbouwkundige en Toegpaste Biologische Wetenschappen, Leuven

## Autoren

Dipl.-Ing.sc.agr. Eva Gallmann  
 Institut für Agrartechnik  
 Universität Hohenheim  
 Garbenstrasse 9  
 70599 Stuttgart  
 Tel.: +49/(0)711/459-2506  
 Fax: +49/(0)711/459-2519  
 E-mail: [gallmann@uni-hohenheim.de](mailto:gallmann@uni-hohenheim.de)

PD Dr. habil. Eberhard Hartung  
 Institut für Agrartechnik  
 Universität Hohenheim  
 Garbenstrasse 9  
 70599 Stuttgart  
 Tel.: +49/(0)711/459-2507  
 Fax: +49/(0)711/459-4307  
 E-mail: [vtp440ha@uni-hohenheim.de](mailto:vtp440ha@uni-hohenheim.de)

Prof. Dr. Thomas Jungbluth  
 Institut für Agrartechnik  
 Universität Hohenheim  
 Garbenstrasse 9  
 70599 Stuttgart  
 Tel.: +49/(0)711/459-2835  
 Fax: +49/(0)711/459-4307  
 E-mail: [jungblut@uni-hohenheim.de](mailto:jungblut@uni-hohenheim.de)