



Das Lebensministerium



Quantifizierung von Emissionen in der Rinderhaltung

Schriftenreihe des Landesamtes für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie,
Heft 33/2008

Freistaat  Sachsen

Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie

Quantifizierung von Emissionen in der Rinderhaltung

Thomas Heidenreich, Dr. Jens Lippmann, Carsten Höferth, Dr. Ute Wanka †

Inhaltsverzeichnis

1	Zielsetzung	1
2	Untersuchungsbasis und Methodik	1
2.1	Luftvolumenstrom und Außenklima	3
2.2	Gas-, Staub- und Geruchsmessungen	7
3	Ergebnisse	9
3.1	Bestimmung der Abluftströme und Wertung der eingesetzten Messverfahren	9
3.2	Berechnung der Volumenströme	13
3.3	Bestimmung der Konzentrationen der gemessenen Stallraumlasten	15
3.4	Ermittlung der Massenströme	23
3.5	Ableitung von Emissionsfaktoren und Luftvolumenstrom	24
4	Fazit	27
	Literaturverzeichnis	29
	Anhang: Technische Daten der eingesetzten Messtechnik	30

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Lageplan und Anströmungsprofil am Standort 1	2
Abbildung 2:	Lageplan und Anströmungsprofil am Standort 2	3
Abbildung 3:	Anordnung der Messtechnik im Versuchstall Standort 1	4
Abbildung 4:	Anemometerhöhenanordnung Standort 1	5
Abbildung 5:	Unterschiedliche Anemometerhöhen	5
Abbildung 6:	Anemometermessfeld	5
Abbildung 7:	Anordnung der Messtechnik im Versuchstall Standort 2	6
Abbildung 8:	Anemometerhöhenanordnung Standort 2	6
Abbildung 9:	Strömungsgeschwindigkeit bei verschiedenen Messverfahren für die untersuchten Standorte	10
Abbildung 10:	Volumenströme bei verschiedenen Messverfahren für die untersuchten Standorte	11
Abbildung 11:	Strömungsgeschwindigkeit aus den Messungen Wetterstation (Schalenanemometer, Außen), Ultraschallanemometer (USA, Stallinnenraum) und Flügelradanemometer (FRA, Luftwechselfläche) am Standort 1	12
Abbildung 12:	Strömungsgeschwindigkeit aus den Messungen Wetterstation (Schalenanemometer, Außen), Ultraschallanemometer (USA, Stallinnenraum) und Flügelradanemometer (FRA, Luftwechselfläche) am Standort 2	12
Abbildung 13:	Verläufe der Außenlufttemperatur und -feuchte sowie Stalllufttemperatur während der Messreihen am Standort 1	16
Abbildung 14:	Verläufe der Außenlufttemperatur und -feuchte sowie Stalllufttemperatur während der Messreihen am Standort 2	16
Abbildung 15:	Verlauf der Staubkonzentration in der Stallluft über 48 Stunden am Standort 1	19
Abbildung 16:	Verlauf der Staubkonzentration in der Stallluft über 48 Stunden am Standort 2	20
Abbildung 17:	Linien der mittleren Außenlufttemperatur in sächsischen Teilgebieten im Jahresverlauf.....	24

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Messzeitfenster zur Quantifizierung der Emissionen	7
Tabelle 2:	Bewertung verfügbarer Messtage und Einzelmessungen	8
Tabelle 3:	Daten des Volumenstromes mit (USA bzw. FRA) und ohne (Richt. selekt.) Giebelanströmung in den Messzeitfenstern am Standort 1.....	14
Tabelle 4:	Daten des Volumenstromes mit (USA bzw. FRA) und ohne (Richt. selekt.) Giebelanströmung in den Messzeitfenstern am Standort 2.....	14
Tabelle 5:	Einfluss des Messverfahrens und der Platzierung im Messfeld auf die Daten des Volumenstromes an beiden Standorten.....	15
Tabelle 6:	Mittlere Daten der Gaskonzentrationen und der Stalllufttemperatur an den Untersuchungsstandorten	18
Tabelle 7:	Staubkonzentrationen im Stall an den Untersuchungsstandorten.....	21
Tabelle 8:	Geruchsstoffkonzentrationen im Abluftstrom und Außenbereich sowie Luftströmungsrichtung zur Probennahme an den Untersuchungsstandorten	22
Tabelle 9:	Stündliche Massenströme für ausgewählte Stallraumlasten innerhalb der Messzeitfenster an beiden Standorten.....	23
Tabelle 10:	Jährliche Emissionsfaktoren je Tierplatz (kalkuliert) für Gase und Staub an beiden Standorten	25
Tabelle 11:	Verhältnis der Massenströme für ausgewählte Gaskonzentrationen im Jahresverlauf unter Berücksichtigung der Anströmungsrichtung an beiden Standorten.....	25
Tabelle 12:	Luftvolumenstrom in m ³ je Tierplatz	27

Abkürzungen

A x	Anemometer mit Nummer
FRA	Flügelradanemometer
G x	Gasmessstelle mit Nummer
GE x	Geruchsprobennahmeort mit Nummer
GE	Geruchseinheit
GV	Großvieheinheit
T x	Temperaturfühler mit Nummer
TMR	Totale Misch-Ration
TP	Tierplatz
USA	Ultraschallanemometer
Vent.	Unterstützungsventilatoren

1 Zielsetzung

Mit der zunehmenden Berücksichtigung von Wechselwirkungen einzelner Stallraumlasten aus Tierhaltungsanlagen gegenüber der Umwelt sowie Anliegern wird es erforderlich, belastbare Daten zum Emissionsverhalten verschiedener Tierhaltungen zur Verfügung zu stellen. Hierbei rückt die Beurteilung der Standortsicherheit von Nutztierhaltungen zunehmend in den Betrachterfokus.

Während es bei geregelten Zwangslüftungssystemen methodisch möglich ist, umfangreiche Datenpools zu den Gas-, Staub- und Geruchskonzentrationen in der Stallluft und zum Luftvolumenstrom zur Verfügung zu stellen, existieren für die kontinuierliche Messung von Volumenströmen in frei belüfteten Ställen derzeit keine validierten Messmethoden. Hiervon sind insbesondere Rinderställe mit freier Lüftung betroffen. Dennoch ist es auch hier nötig, eine verlässliche Datenbasis zur Verfügung zu stellen.

Deshalb wurde das Vorhaben zur Bereitstellung erster kontinuierlicher und belastbarer Volumen- und Massenstromdaten initiiert. Die hieraus gewonnenen Rohdaten sollten nunmehr fachbezogen zusammengestellt und bewertet werden. Zielstellung des Vorhabens ist es,

- die Aussagegenauigkeit des eingesetzten Messequipments zu bewerten,
- die Volumenströme und Konzentrationen von Methan, Lachgas, Kohlendioxid, Ammoniak, Staub und Geruch für frei belüftete Milchviehställe zu quantifizieren und
- das Emissionsverhalten dieser Ställe zu bewerten.

2 Untersuchungsbasis und Methodik

Für die Erhebung der Rohdaten standen zwei Milchviehanlagen mit jeweils drei Produktionsställen zur Verfügung. Davon wurde je ein Stall für die Messungen ausgewählt. Für die Auswahl der Ställe war es wesentlich, dass sie über eine reine Querlüftung verfügen.

Beschreibung Standort 1 (Abbildung 1):

Stallbauform: Typ L 203, 21 x 75 m

Tierplätze: 230

Aufstallung: Fressliegebox als Tiefbox, 4-reihig, eingestreut (Festmist)

Fütterung: Totale Misch-Ration (TMR)

Lüftung: Freie Lüftung als Querlüftung mit Unterstützungslüftung im Sommer, max. Lüftungsfläche: 124,03 m²

Entmistung: Traktor mit Frontlader, Lagerung auf Festmistplatte

Einstreu: Traktor mit Ballenauflöser, ca. 4 kg/TP * Tag

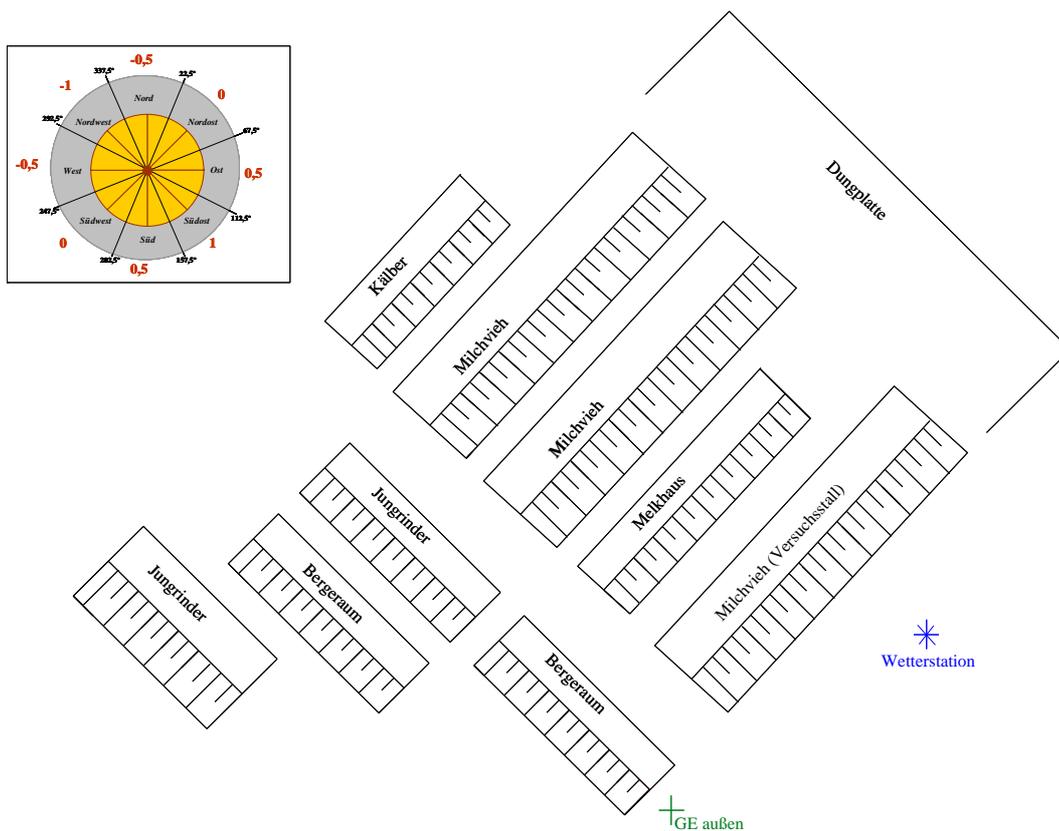


Abbildung 1: Lageplan und Anströmungsprofil am Standort 1

Beschreibung Standort 2 (Abbildung 2):

Stallbauform: L 203, 21 x 75 m

Tierplätze: 240

Aufstallung: vom Fressplatz getrennte Hochliegebox, 3 + 1-reihig, Flüssigmist

Fütterung: Totale Misch-Ration (TMR)

Lüftung: Freie Lüftung als Querlüftung mit Unterstützungslüftung im Sommer,
max. Lüftungsfläche: 126 m²

Entmistung: Klappschieber, Lagerung in Güllehochbehältern

Einstreu: Strohmehl auf Liegematte, manuell, ca. 100 g / TP * Tag

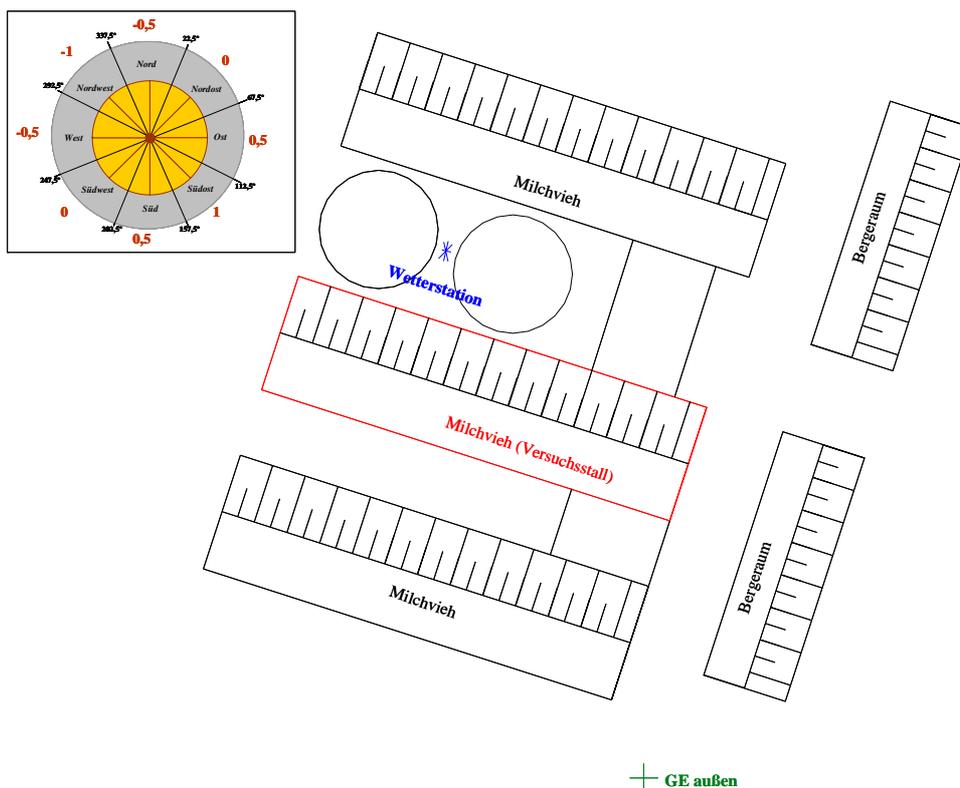


Abbildung 2: Lageplan und Anströmungsprofil am Standort 2

2.1 Luftvolumenstrom und Außenklima

Zur Messung des Luftvolumenstromes kamen drei verschiedene Verfahren zur Anwendung: Flügelradanemometer, Ultraschallanemometer, Tracergasmethode.

- Flügelradanemometer (FRA):

Zur Messung der Zu- bzw. Abluftvolumenströme kamen 24 Flügelradanemometer am Standort 1 sowie 23 Flügelradanemometer am Standort 2 zum Einsatz. Die unterschiedliche Anzahl resultierte aus dem Ausfall einer Messplatine. Die Anemometer wurden entlang einer Stallwand in drei unterschiedlichen Höhen in die Raster der Wand montiert. Die Montagehöhen betragen: oben = 0,3 m, mitte 1,0 m, unten 1,7 m unter Stalldecke. Eines der mittleren Raster wurde als Messfeld mit neun Flügelradanemometern ausgestattet (Abbildungen 3 bis 6). Durch diese Anordnung sollte gewährleistet werden, dass bei unterschiedlichen Jalousieöffnungshöhen eine ausreichende Messgenauigkeit erfolgt. Durch die Variation der Anzahl der Anemometer in den drei Höhengruppen stand für die verschiedenen Messreihen eine unterschiedliche Anzahl Messstellen zur Verfügung:

Sommer: mind. 23, Übergang: mind. 17 und Winter: mind. 8 Anemometer

Die Abfrage der Strömungsgeschwindigkeit erfolgte im einminütigen Intervall als Spannungswert. Mittels einer Kalibrierkurve wurden diese Spannungen in Windgeschwindigkeiten umgerechnet.

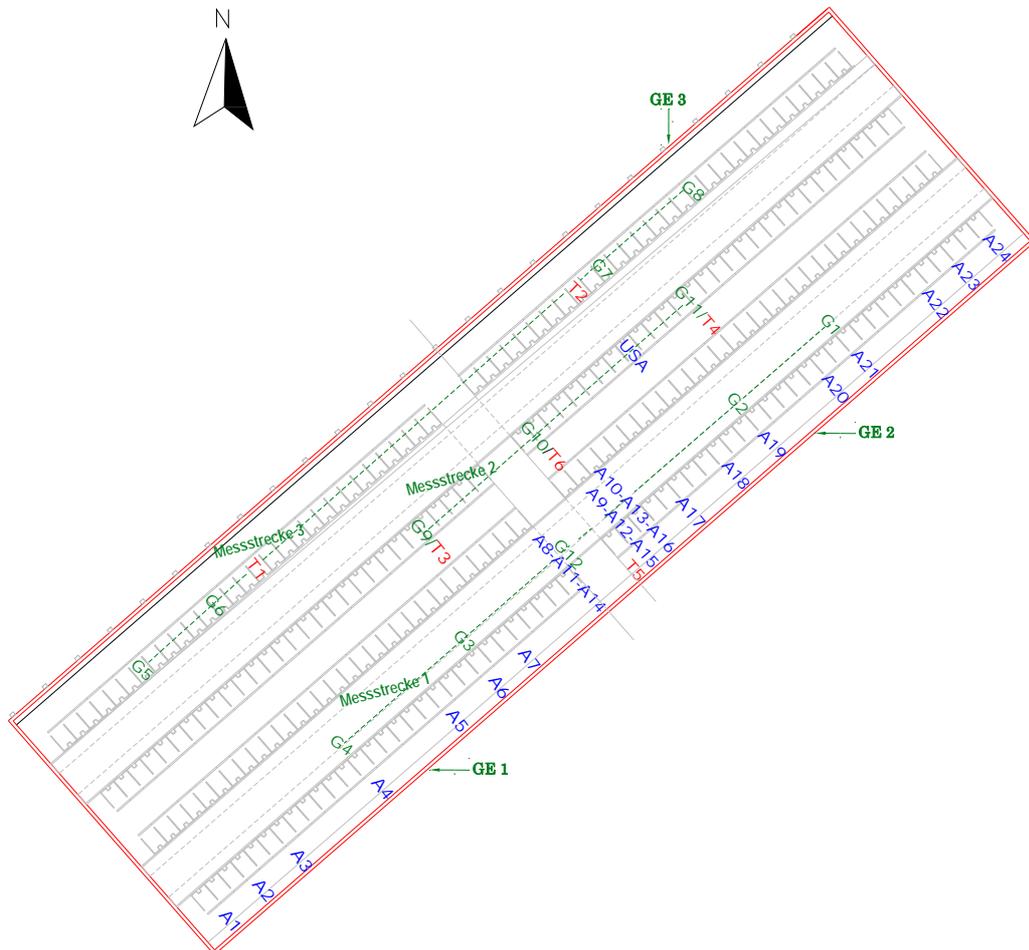


Abbildung 3: Anordnung der Messtechnik im Versuchstall Standort 1

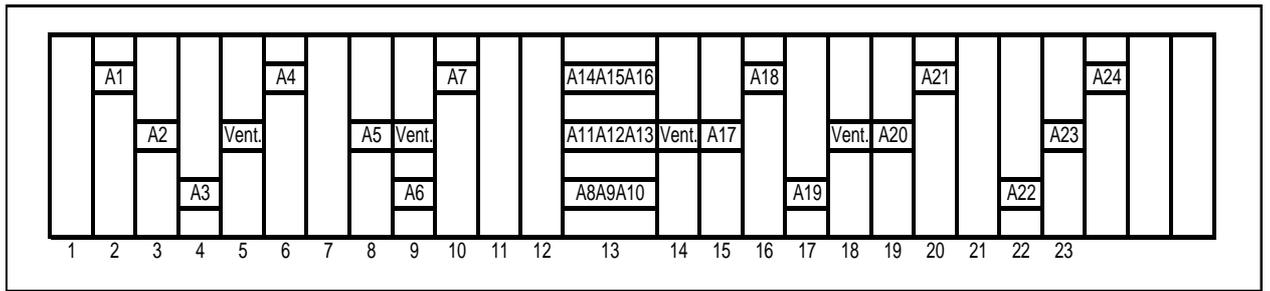


Abbildung 4: Anemometerhöhenanordnung Standort 1



Abbildung 5: Unterschiedliche Anemometerhöhen

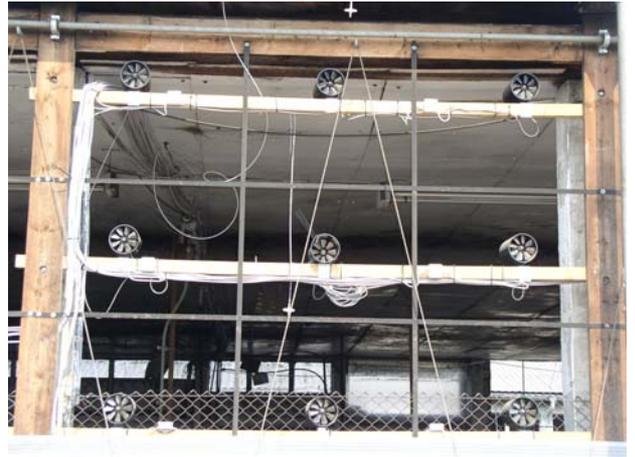


Abbildung 6: Anemometermessfeld

- **Ultraschallanemometer (USA):**

Neben der Erfassung des Luftvolumenstromes mittels Anemometern wurde zusätzlich ein Ultraschallanemometer (USA) im Stall eingesetzt. Der Aufstellungsort wurde so gewählt, dass eine relativ freie Anströmung durch die Querlüftung möglich war (Abbildungen 3, 7 und 9). Die Montagehöhe des USA betrug 2,5 m über Fußboden bzw. 1,0 m unter Stalldecke.

Als Fragestellung stand hierbei, inwieweit der Luftvolumenstrom auch mittels eines einzigen dreidimensional arbeitenden Messgerätes möglich ist. Das Ultraschallanemometer stellte in 30-sekündigem Intervall Parameter wie Windrichtung, Windgeschwindigkeit und Stallraumtemperatur bereit.

- **Tracergasmessungen:**

Als dritte Messmethode wurden Tracergasmessungen mit Krypton 85 (Abklingmethode) mit mindestens einer Messreihe je Messperiode durch das Leibniz-Institut für Agrartechnik (ATB) Potsdam-Bornim durchgeführt. Diese Messungen dienen der Validierung der favorisierten kontinuierlichen Messungen mittels Anemometern. Die Ausbringung und Verteilung des Tracergases erfolgte manuell. Zur Erfassung der Konzentrationswerte des Krypton 86 waren 18 Flächenzählrohre gleichmäßig im Stall verteilt.

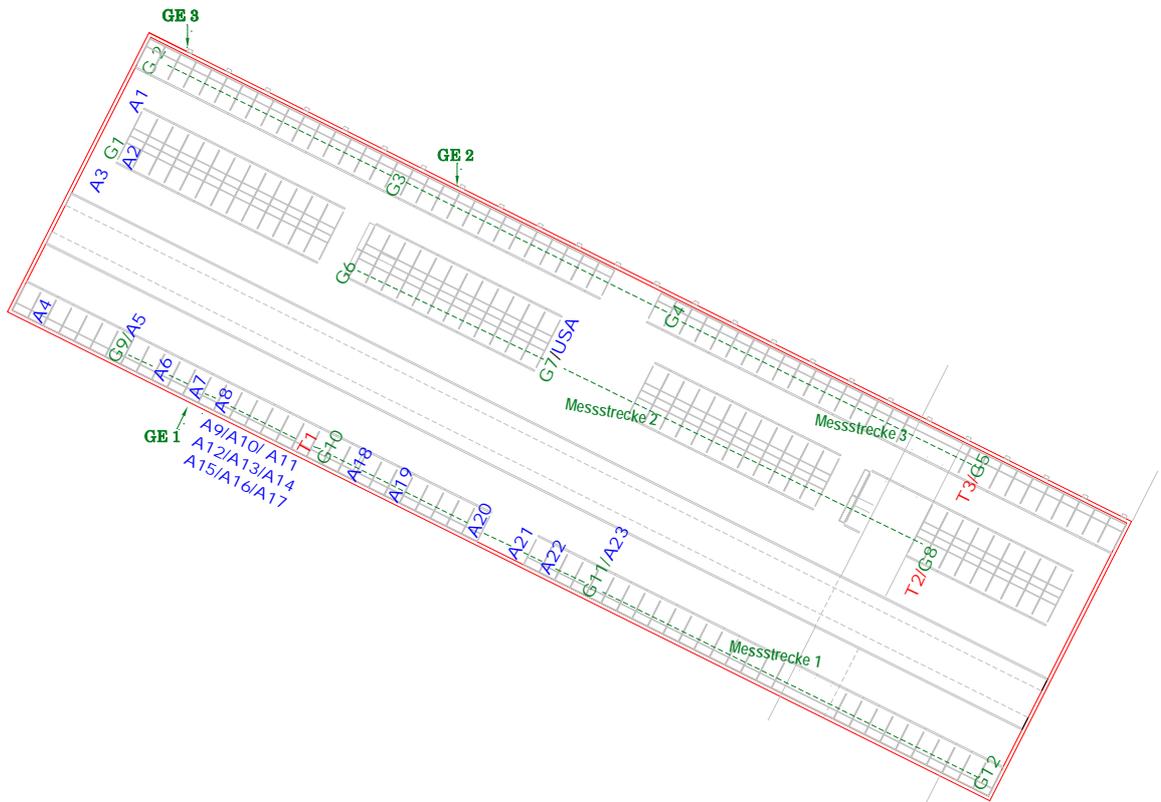


Abbildung 7: Anordnung der Messtechnik im Versuchstall Standort 2

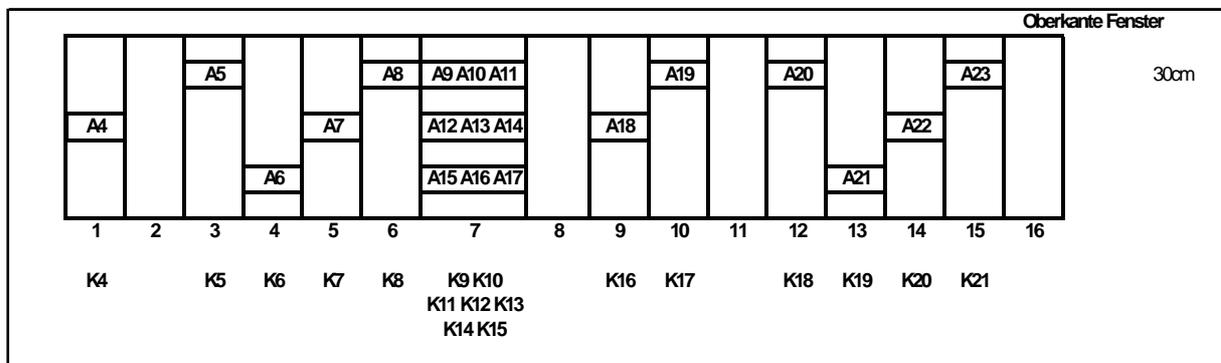


Abbildung 8: Anemometerhöhenanordnung Standort 2

Zeitgleich wurde das Wettergeschehen am Standort mittels Wetterstation DL 15 der Fa. Thies festgehalten. Der Standort der Wetterstation ist den Abbildungen 1 und 2 zu entnehmen. Die Messung der Wetterdaten erfolgte am Standort 1 in einer Höhe von 2 m über Boden, am Standort 2 auf Grund von Gebäudeeinflüssen in einer Höhe von 8 m. Es wurden die Parameter Windrichtung, Windgeschwindigkeit, Lufttemperatur, Luftfeuchte und Taupunkttemperatur im 5-minütigem Intervall aufgezeichnet.

2.2 Gas-, Staub- und Geruchsmessungen

Die beiden ausgewählten Ställe wurden von April 2006 bis Februar 2007 innerhalb von definierten Zeitfenstern (Tabelle 1) untersucht. In diesen Zeitfenstern von ca. 10 - 14 Tagen wurden je Außenklimabereich „Winter“ (< 8 °C), „Sommer“ (> 18 °C) und „Übergang“ (8 – 18 °C) die Erhebung der Rohdaten an den Standorten durchgeführt.

Tabelle 1: Messzeitfenster zur Quantifizierung der Emissionen

	Standort 1		Standort 2	
	Zeitraum	Tage	Zeitraum	Tage
Sommer	28.7. – 21.8.06	23	5.9. – 20.9.06	15
Übergang	7.4. – 21.4.06 2.11. – 16.11.06	30	13.10. – 25.10.06	12
Winter	10.12. – 15.12.06 23.1. – 28.1.07	12	2.2. – 21.2.07	19

In den Messzeitfenstern wurde quasikontinuierlich die Konzentration der gasförmigen Stallraumlasten Methan, Kohlendioxid, Lachgas und Ammoniak gemessen. Hierfür wurden 11 Messstellen an ausgewählten Positionen auf einer linken und rechten Längsachse im Abluftbereich (Abstand zur Stallwand = 1 m) und entlang einer zentralen Längsachse in der Stallmitte in einer Höhe von 3,0 m über Stallboden sowie an einem Referenzmesspunkt im Außenbereich eingerichtet (Abbildungen 3 und 7). Über Messschläuche, Bypasspumpenstrecke und Messstellenumschalter wurden die Luftproben jeder Messstelle im Rhythmus von ca. 25 Minuten analysiert. Somit stehen stündlich mindestens zwei Messwerte für jeden Probenpunkt zur Verfügung. Zusätzlich erfolgte eine kontinuierliche Stallinrentemperaturerfassung an mind. drei Messpunkten im Stall. Die dazu zum Einsatz gekommene Technik ist in Tabelle A1 dargestellt.

Zusätzlich fanden diskontinuierliche Messungen zur Staub- (Gesamtstaub, PM 10; PM 2,5; PM 1,0) und Geruchsstoffkonzentration (Geruchsschwelle) statt. Die Orte der Probenahme zur Geruchsstoffkonzentration sind aus den Abbildungen 1 und 2 bzw. 3 und 7 ersichtlich. Die Staubkonzentrationen wurden im Tierbereich, stallmittig in einem Meter Höhe gemessen. Die Messungen erfolgten mit dem Messsystem der Fa. Grimm im Intervall von einer Minute. Durch Rückwägung des integrierten Filters wurde der Gesamtstaubgehalt im Messzeitraum gravimetrisch ermittelt. Hieraus wurde ein Korrekturfaktor „c“ gebildet. Dieser ermöglicht eine nachträgliche Anpassung der Messwerte an die Messbedingungen. Hierzu ergänzend wurden gravimetrische Bestimmungen zum Gesamtstaub und PM 10 durchgeführt. Die messtechnischen Parameter sind in Tabelle A2 zusammengestellt.

Die Messungen wurden überwiegend über 24 Stunden durchgeführt, wodurch ein repräsentativer Tagesmittelwert zur Verfügung steht. Ergänzend wurden Teilmessungen über nur wenige Stunden integriert. Eine Analyse des Keimgehaltes im Stallstaub erfolgte nicht.

Die Geruchsstoffkonzentration an den Probennahmestellen wurde als Momentwert erfasst. Hierfür sind unter Beachtung der Hintergrundparameter (z. B. aktuelle Betriebssituation) repräsentative Messsituationen ausgewählt worden. Die nachfolgende Olfaktometrie wurde an der Universität Halle durchgeführt. Die Probennahmen und Bestimmung der Geruchsstoffkonzentration erfolgte nach DIN – EN 13725. Die Probennahme der Geruchsstoffkonzentration erfolgte als 30-minütige Sammelprobe in den Messserien zu je drei Stall- und einer Außenluftprobe. Entnommen wurde die Probeluft unmittelbar im Zu- bzw. Abluftstrom. Die Bewertung erfolgte am Olfaktometer T07 mit der Bestimmung der Geruchsschwelle über ein etabliertes Probandenteam.

Mittels des beschriebenen Equipments wurden auswertbare Datenpools an den nachfolgend zusammengestellten Messtagen bzw. -reihen durchgeführt (Tabelle 2).

Tabelle 2: Bewertung verfügbarer Messtage und Einzelmessungen

Parameter		Standort 1			Standort 2		
		Sommer	Über-gang	Winter	Sommer	Über-gang	Winter
Klima		23	16 / 16	7 / 6	15	12	19
Stallgase / -temperatur		23	16 / 16	7 / 6	15	12	19
Luftstrom- geschwindigkeit/ Volumenstrom	FRA	23	16 / 16	7 / 6	15	12	19
	USA	23	16 / 16	7 / 6	15	12	19
	Tracer- gas	1	1 / 1	1	1	1	1
Staub ¹⁾		2	2	2			2
Geruch ¹⁾			3	2		2	2

¹⁾ Einzelmessungen

Für die Stallgaskonzentrationen, die Lufttemperatur und die Volumenstrombestimmung liegen für jeden Analysezeitraum repräsentative Datenpools vor. Die Werte für den Staubgehalt der Abluft liegen nur für Standort 1 komplett vor. Für die Geruchsstoffkonzentrationen sind für beide Standorte im Sommer keine Daten verfügbar.

Aufgrund der unterschiedlichen Erfassungszyklen der Einzelmesswerte ist der kleinste gemeinsame Bezugszeitraum **eine Stunde**. Deshalb wurden alle Urdaten zu Stundenmittelwerten zusammengeführt. Auf der Basis dieses Datenpools werden methodisch nachfolgende Analysestufen zur Ableitung von Daten zum Emissionsverhalten der untersuchten Stallungen bearbeitet:

- Wertung der eingesetzten Messverfahren zur Bestimmung der Abluftströme
- Bestimmung der Konzentrationen der gemessenen Stallraumlasten
- Berechnung der stündlichen Volumen- und Massenströme
- Ableitung der jährlichen Frachten und der Emissionsfaktoren

3 Ergebnisse

3.1 Bestimmung der Abluftströme und Wertung der eingesetzten Messverfahren

Eine wichtige Grundlage für die Quantifizierung von Emissionen ist eine sichere Bestimmung des anzusetzenden Volumenstromes im Abluftbereich. Während bei zwangsbelüfteten Stallungen definierte Strömungsrichtungen und Luftwechselflächen vorhanden sind und somit durch Bestimmung der Strömungsgeschwindigkeit relativ genaue Aussagen zum Volumenstrom getroffen werden können, sind die Messbedingungen für diese Parameter in frei gelüfteten Stallungen schwierig.

Die Luftwechselfläche lässt sich aber auch in diesen Ställen – wenngleich mit erhöhtem Aufwand – ermitteln. Zur Bestimmung von Strömungsgeschwindigkeiten können Anemometer eingesetzt werden. Bisher wurden hier Flügelradanemometer (FRA) verwendet. Ihr Nachteil ist, dass sie nur mit erhöhtem technischem Aufwand die Strömungsrichtung erfassen und die abgeleitete Geschwindigkeit nur für die mit dem Flügelrad überstrichene Fläche gilt. Das Ultraschallanemometer (USA) kann demgegenüber dreidimensional Geschwindigkeit und Richtung des Luftstromes ermitteln, sein Messfeld ist insbesondere bei unterschiedlichen Strömungsverhältnissen räumlich deutlich limitiert. Aufgrund der großen und zusammenhängenden Luftwechselfläche in frei belüfteten Ställen müssten eine Vielzahl dieser Messgeräte in der Luftwechselfläche etabliert werden. Kostengründe stehen einem derartigen Einsatz von USA entgegen.

Als einfachere Lösung wurden FRA über die Luftwechselfläche systematisch verteilt. Dieses Messverfahren ist an einen hohen technischen Aufwand gebunden. Deshalb wurde zeitgleich ein USA in der Stallmitte etabliert. Beide Messverfahren wurden mit einer Tracergasmessung verglichen. Diese Messmethodik ermittelt über die zeitliche Konzentrationsverdünnung eines Gases die Luftwechselrate. Das Messverfahren wird i. d. R. diskontinuierlich durchgeführt und gestattet somit nur eine zeitlich deutlich eingeschränkte Aussage. Zum Methodenvergleich der ermittelten Strömungsgeschwindigkeiten wurden die Daten (Volumenströme) der Tracergasmessung auf der Basis der aktuellen Luftwechselfläche auf die Strömungsgeschwindigkeit zurückgeführt. Die Daten der drei Vergleichsverfahren und der Wetterstation im Außenbereich sind in Abbildung 9 gegenübergestellt.

Die Außenwindbedingungen spiegeln die Strömungsgeschwindigkeit im Stall nur unzureichend wider. Sowohl das Niveau als auch der Kurvenverlauf weichen deutlich ab. Die Daten der im Stall angewandten Messverfahren korrespondieren auf vergleichbarem Niveau. Die Werte der USA-Messungen zeigen überwiegend ein etwas niedrigeres Niveau als die FRA- und Tracergasmessungen. Diese wiederum folgen im Trend besser den Außenströmungsverhältnissen. Ursachen hierfür sind darin zu suchen, dass nur eine zentral im Stall angeordnete Messstelle für das USA vorhanden war und mit der Anordnung der Messstelle im Stallinneren die Außenbeeinflussung deutlich abnimmt.

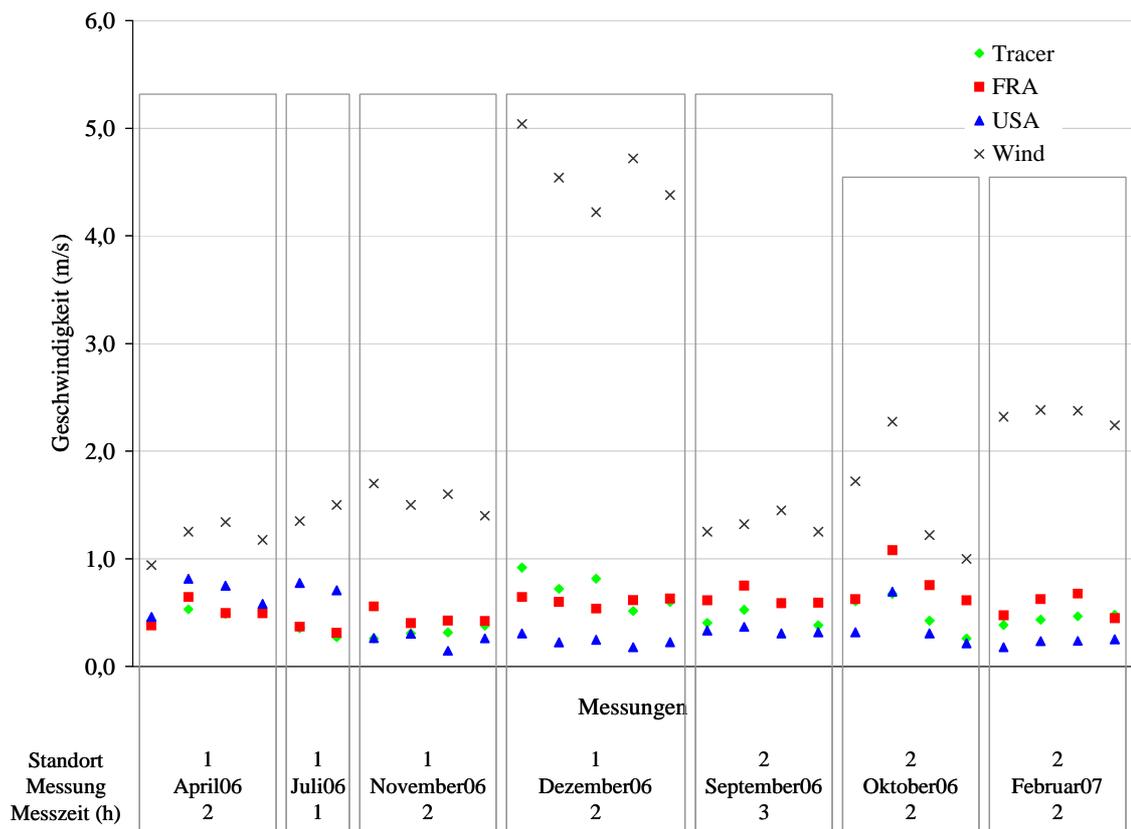


Abbildung 9: Strömungsgeschwindigkeit bei verschiedenen Messverfahren für die untersuchten Standorte

In der Abbildung 10 werden von den Geschwindigkeiten abgeleitet die gemessenen Volumenströme gegenübergestellt.

Die Werte der Messungen zeigen keine eindeutige Vorzüglichkeit eines Messverfahrens. Mit Ausnahme der ersten sechs Messzeitfensterbefunde unterschätzten die Messbefunde des USA im Vergleich zur Tracergasmessung tendenziell deutlich. Demgegenüber liegen die Messergebnisse der FRA überwiegend etwas oberhalb der Tracergasmessergebnisse. Die Kurvenverläufe zeigen jedoch weitestgehend analoge Messtendenzen. Hieraus kann abgeleitet werden, dass die Messung mit FRA bei ausreichender Anzahl und Verteilung im Luftwechselbereich ein gegenüber der Tracergasmessung (Abklingmethode) einsetzbares, kontinuierliches Messverfahren darstellt. Für das USA-Messverfahren kann abgeleitet werden, dass die Möglichkeit für die Etablierung eines im Aufwand reduzierten Messverfahrens gegeben ist. Ein USA reicht dazu aber nicht aus. Hierzu sind weitere Untersuchungen erforderlich, um insbesondere die Repräsentanz der Messstellenanzahl und der Messorte im Stall bezüglich einer belastbaren Befundlage zum Luftwechselvolumen herauszuarbeiten. Trotz der mit den USA ermittelten, tendenziell geringeren Luftraten zu den FRA sollen im weiteren Verlauf die Ergebnisse beider Messverfahren dargestellt werden.

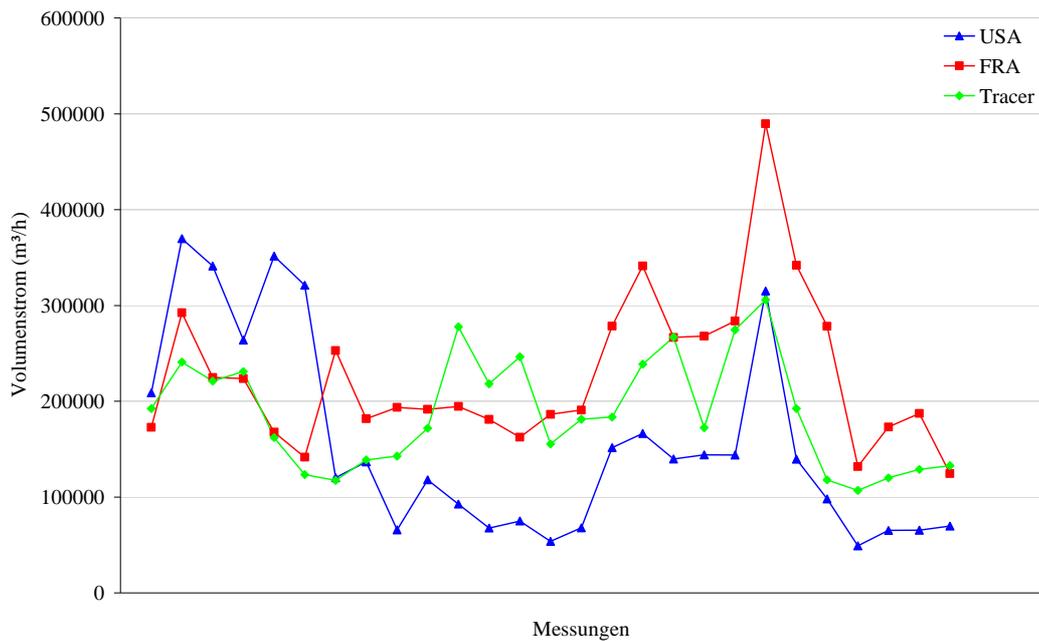


Abbildung 10: Volumenströme bei verschiedenen Messverfahren für die untersuchten Standorte

Auf der Basis bisheriger Ableitungen können die FRA- und USA-Messungen zur Erweiterung des Messzeitfensters – im Gegensatz zu den Einzelmessungen mit Tracergas - für die Bestimmung der Strömungsgeschwindigkeit und damit zur Kalkulation eines Volumenstromes eingesetzt werden.

Primär von Interesse ist, wie sich die in den gegenüber den Tracergasmessungen erweiterten Zeitfenstern gemessenen Luftströmungsgeschwindigkeiten darstellen. Auch hier sollen die an den zwei Standorten gemessenen Datenverläufe (Abbildungen 11 und 12) über alle Messzeitfenster besprochen werden.

Die Windgeschwindigkeiten im Außenbereich werden im Stall nicht erreicht. Diese liegen sowohl an der Luftwechselfläche als auch im Stallinneren deutlich darunter. Die Messsysteme im Stall registrieren die Daten mit annähernd ähnlichem Verlauf. Dabei liegt die Strömungsgeschwindigkeit im Stall unter der an der peripheren Luftwechselfläche. Somit bestätigen die Ergebnisse der Messungen die Aussagen aus dem Messwertevergleich Anemometer- und Tracergasmessungen (Abbildung 10). Hierbei ist auch von Interesse, ob es nachweisbare Beziehungen zwischen den Messdaten der FRA und des USA gibt. Hieraus könnte eine mögliche Austauschbarkeit der Messsysteme und des Messortes abgeleitet werden. Weiterhin ist bei Verwendung der FRA in der Luftwechselfläche eine Reduzierung der Anzahl der FRA von Interesse. Dieser Frage soll im nächsten Abschnitt direkt an den Daten der Volumenströme nachgegangen werden.

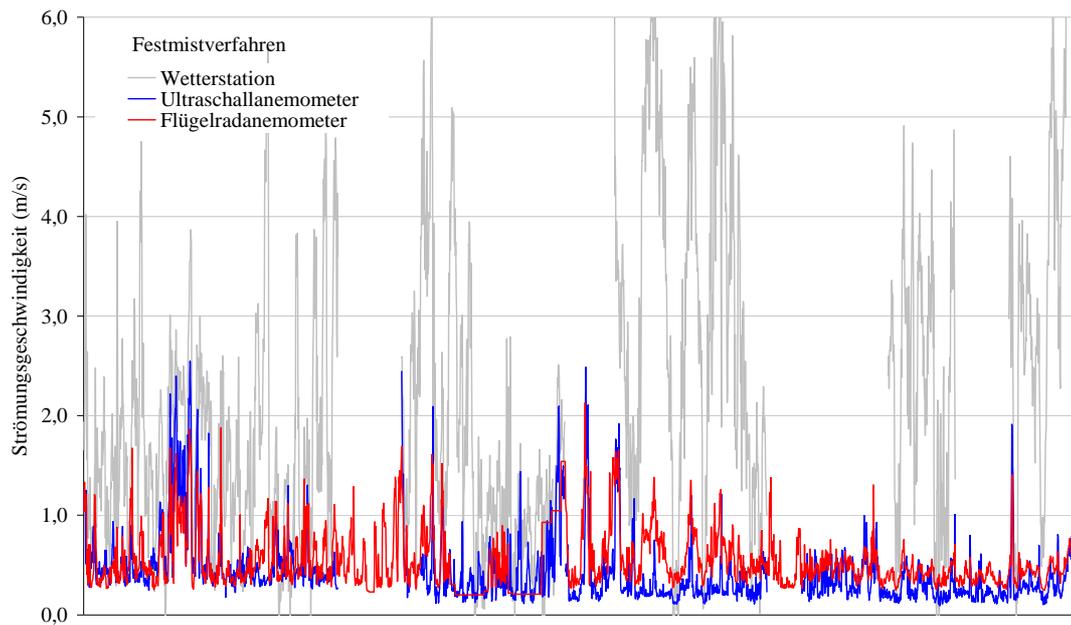


Abbildung 11: Strömungsgeschwindigkeit aus den Messungen Wetterstation (Schalenanemometer, Außen), Ultraschallanemometer (USA, Stallinnenraum) und Flügelradanemometer (FRA, Luftwechselfläche) am Standort 1

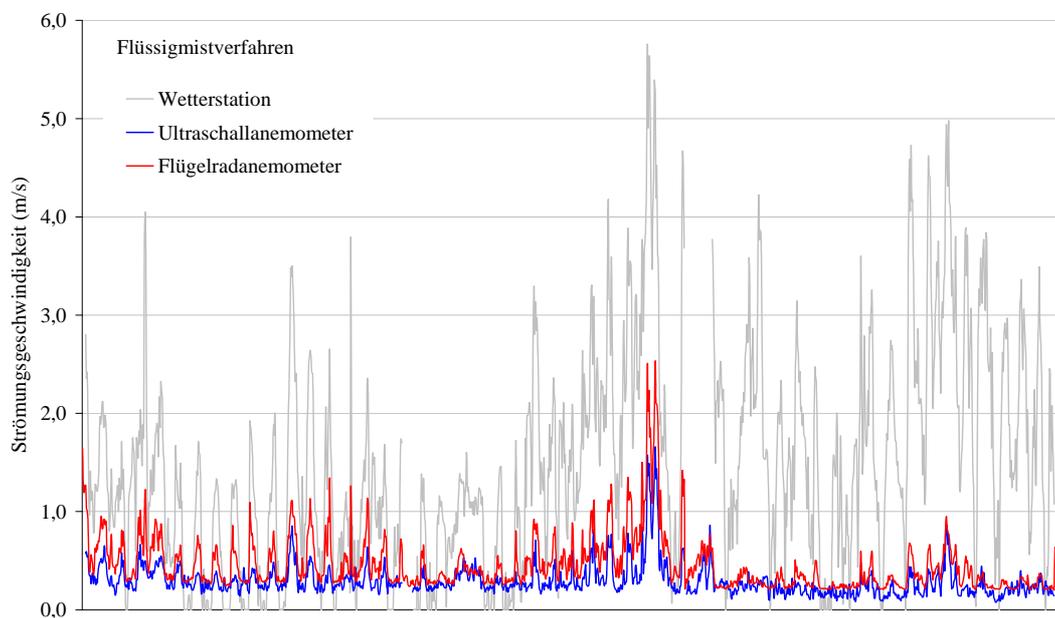


Abbildung 12: Strömungsgeschwindigkeit aus den Messungen Wetterstation (Schalenanemometer, Außen), Ultraschallanemometer (USA, Stallinnenraum) und Flügelradanemometer (FRA, Luftwechselfläche) am Standort 2

3.2 Berechnung der Volumenströme

Mit den vorliegenden Stundenmittel der Strömungsgeschwindigkeiten in den Stallungen kann unter Hinzunahme der jeweiligen Luftwechselflächen ein mittlerer Volumenstrom je Stunde berechnet werden. Aufgrund der suboptimalen örtlichen Gegebenheiten ist eine ungehinderte Anströmung der Luftwechselflächen nicht generell gegeben. Deshalb wird der Volumenstrom – berechnet aus den Daten der Strömungsgeschwindigkeit der FRA- und USA-Messungen – unabhängig und in Abhängigkeit von der Windrichtung gegenübergestellt. Hiermit soll in einem zweiten Schritt überprüft werden, ob die Anströmungsrichtung einen Einfluss auf die gemessene Luftwechselrate hat. Zu diesem Zweck wurden mit Berücksichtigung der Windrichtung alle Messdatensätze entfernt, die einen größeren Anströmwinkel als $\pm 45^\circ$ zur Längsachse der Anemometer aufwiesen.

In den nachfolgenden Tabellen 3 und 4 werden die Ergebnisse aller Strömungsrichtungen und nur der für die Anemometer günstigen Richtungen (Richt. selekt.) des USA und der FRA gegenübergestellt.

Für die beiden Datenpools USA und FRA liegen am Standort 1 für die Zeitfenster „Sommer“ 675 bzw. selektiert 362, „Übergang“ 1030 bzw. 466 und „Winter“ 770 bzw. 154 Datensätze vor. Mit der Selektion ungünstiger Anströmungsbedingungen reduziert sich der Datenumfang deutlich. Hieraus wird ersichtlich, dass zur Sicherung einer ausreichenden Datenbasis erheblich verlängerte Messzeitfenster nötig wären. Da diese Zeiträume mit stabilem Außenklima nur selten zu gewährleisten sind, ist die Verwendung möglichst aller ermittelten Datensätze erforderlich. Weiterhin wäre wünschenswert, die Gesamtanzahl der eingesetzten Anemometer reduzieren zu können, ohne dabei die Aussagegesicherheit zu verschlechtern. Um dazu eine qualifizierte Aussage treffen zu können, wurden in der Tabelle 5 Korrelationskoeffizienten zusammengestellt.

Tabelle 3: Daten des Volumenstromes mit (USA bzw. FRA) und ohne (Richt. selekt.) Giebelanströmung in den Messzeitfenstern am Standort 1

Außenklimabereich	Gerät	Windrichtung	Volumenstrom	
			n	m³/h
Sommer	USA	alle Richtungen	675	247270
		Richt. selekt.	362	296307
	FRA	alle Richtungen	675	264282
		Richt. selekt.	362	284512
Übergang	USA	alle Richtungen	1030	93894
		Richt. selekt.	466	115766
	FRA	alle Richtungen	1030	169645
		Richt. selekt.	466	189799
Winter	USA	alle Richtungen	770	51551
		Richt. selekt.	154	39644
	FRA	alle Richtungen	770	83231
		Richt. selekt.	154	62713

Tabelle 4: Daten des Volumenstromes mit (USA bzw. FRA) und ohne (Richt. selekt.) Giebelanströmung in den Messzeitfenstern am Standort 2

Außenklimabereich	Gerät	Windrichtung	Volumenstrom	
			n	m³/h
Sommer	USA	alle Richtungen	409	111779
		Richt. selekt.	258	114964
	FRA	alle Richtungen	409	182416
		Richt. selekt.	258	179060
Übergang	USA	alle Richtungen	361	122742
		Richt. selekt.	258	134657
	FRA	alle Richtungen	361	200531
		Richt. selekt.	258	215050
Winter	USA	alle Richtungen	478	33334
		Richt. selekt.	297	34433
	FRA	alle Richtungen	478	47949
		Richt. selekt.	297	52118

Tabelle 5: Einfluss des Messverfahrens und der Platzierung im Messfeld auf die Daten des Volumenstromes an beiden Standorten

Korrelation Volumenstrom		Standort 1			Standort 2		
		Sommer	Übergang	Winter	Sommer	Übergang	Winter
FRA - USA	alle Richt.	0,77	0,54	0,82	0,82	0,94	0,80
	Richt. selekt.	0,78	0,52	0,92	0,82	0,95	0,84
FRA Oben-Mitte	gesamt	0,99	0,95	-	0,97	0,99	-
FRA Oben-Unten	gesamt	0,85	0,36	-	0,96	0,98	-

Die mit dem FRA gemessenen Volumenströme korrelieren relativ gut mit den USA-Werten. Zwischen den Messzeitfenstern ist die Beziehung jedoch verschieden stark. Die Selektion der Stundenmittelwerte des Volumenstromes unter ungünstigen Anströmungsverhältnissen verbessert die Beziehung beider Messreihen nur unwesentlich. Hieraus kann abgeleitet werden, dass das Selektieren günstiger Anströmungsbedingungen zur Ermittlung des Volumenstromes keine Aussageverbesserung bringt und möglicherweise auch zu einer Fehleinschätzung des Luftvolumenstromes führen kann.

Betrachtet man die Beziehungen zwischen den Ebenen im Anströmbereich, so werden diese erwartungsgemäß schwächer, wenn die Luftwechselfläche teilweise geschlossen ist (FRA Oben-Unten, Übergang am Standort 1). Zwischen den Messebenen im Winter ist keine Korrelation der Messwerte nachweisbar, da hier die mittlere und untere Ebene weitgehend durch die Jalousie abgedeckt waren. Betrachtet man die Befunde im „Sommer“ so korrelieren die Messebenen bei ungehinderter Passage des Luftstroms deutlich. Damit kann die Anzahl der Anemometer in vertikaler Ausdehnung verringert werden. Zu erfassen ist jedoch in jedem Betriebszustand die tatsächliche Größe der Luftwechselfläche. In horizontaler Ausdehnung konnten keine gesicherten Befunde für eine Reduzierung der FRA-Anzahl in der Luftwechselfläche herausgearbeitet werden. Damit sollte möglichst jedes Teilsegment der Fläche mit einem FRA ausgerüstet werden. Für die Ermittlung der repräsentativen Etablierung der FRA im Teilsegment sind weitere Untersuchungsansätze nötig.

Aufgrund diskutierter Defizite des eingesetzten USA-Messsystems wurden die Messdaten des FRA-Messsystems für die weitere Ableitung von Emissionsmassenströmen benutzt. Dieses System empfiehlt sich im Vergleich der angewandten Messsysteme hinreichend.

3.3 Bestimmung der Konzentrationen der gemessenen Stallraumlasten

Lufttemperatur und Stallgase

Die mittlere Außenlufttemperatur lag während der Messzeitfenster an beiden Standorten in den fokussierten Wertebereichen. Die Mittelwerte der Außenlufttemperatur lagen in den Messzeitfenstern „Sommer“, „Übergang“ und „Winter“ an den Standorten 1 bzw. 2 bei 18,5 °C bzw. 18,2 °C, 8,6 °C bzw. 12,6 °C und 2,1 °C bzw. 4,3 °C. Die relative Luftfeuchte rangierte insgesamt zwischen 70 %

(Sommer, Standort 2) und 86 % (Winter, Standort 2). Erwartungsgemäß stieg sie im Mittel von „Sommer“ über „Übergang“ zum „Winter“ an. In den folgenden Abbildungen 13 und 14 sind die Verläufe der Außenlufttemperatur und -feuchte sowie der Stalltemperatur abgebildet.

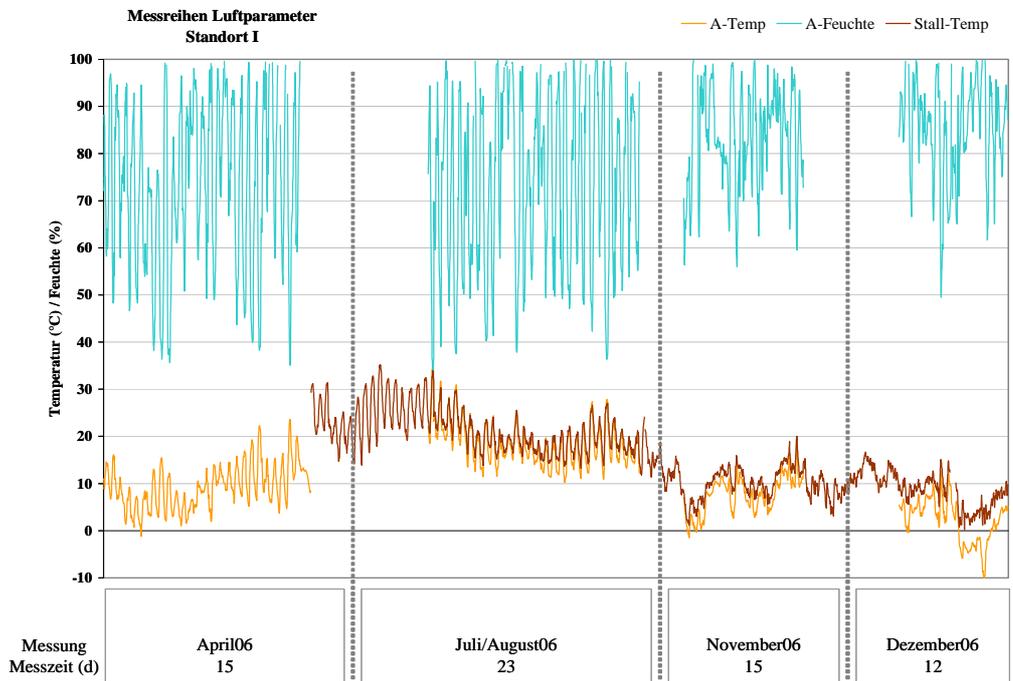


Abbildung 13: Verläufe der Außenlufttemperatur und -feuchte sowie Stalllufttemperatur während der Messreihen am Standort 1

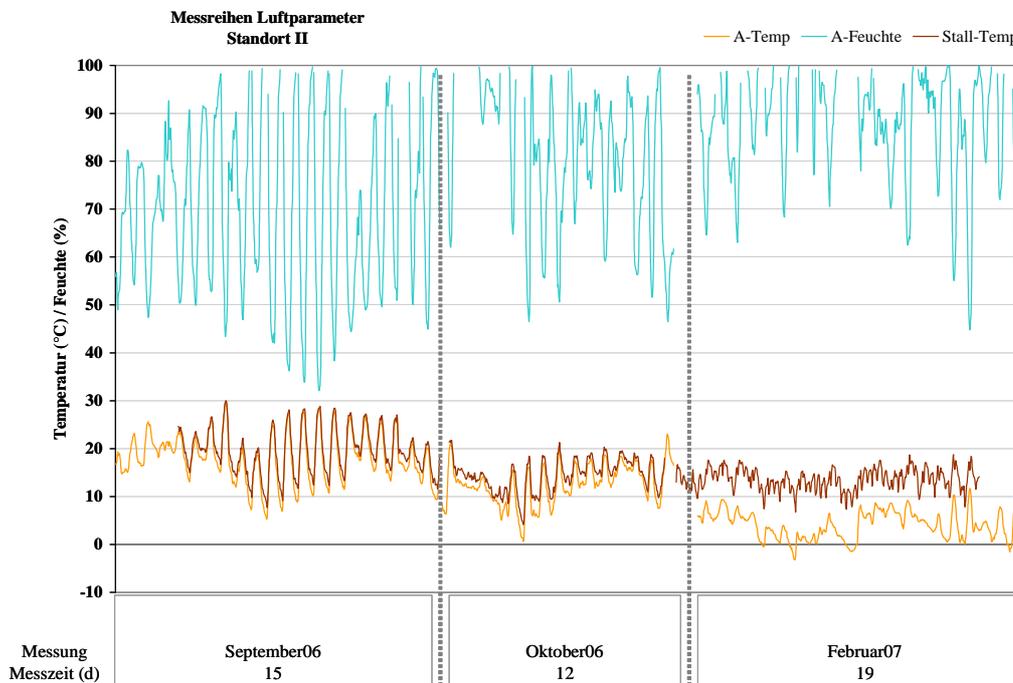


Abbildung 14: Verläufe der Außenlufttemperatur und -feuchte sowie Stalllufttemperatur während der Messreihen am Standort 2

Eine große Variabilität zeigt erwartungsgemäß die Außenluftfeuchte. Die Extremwerte lagen bei 30 % und nahe 100 %. Aufgrund der territorialen Nähe der Untersuchungsstandorte zueinander sind in den Verläufen keine Besonderheiten abzuleiten.

Die Stalltemperatur am Standort 1 lag im Mittel bei 21,7 °C (Sommer), 11,1 °C (Übergang) und 8,8 °C (Winter). Dabei traten maximale Auslenkungen zwischen 1 und 35 °C auf. Aufgrund der direkten thermischen Kopplung von Außen- und Stallbereich folgen die Stalltemperaturen den Außenwerten auf höherem Niveau nach. Hierbei puffert die Stallhülle in Verbindung mit der Wärmeerzeugung der Milchkühe und der reduzierten Luftwechselfläche im Winter die Temperaturabsenkung deutlich ab.

Analog zeigen sich die Verläufe am Standort 2. Im Mittel wurden hier Stalltemperaturen von 19,5 °C (Sommer), 14,5 °C (Übergang) und 13,6 °C (Winter) erreicht. Hierbei tritt innerhalb der Wintermessung eine deutlichere Niveauehebung der Stalltemperatur gegenüber den Außenwerten im Vergleich mit Standort 1 auf. Ursache hierfür ist primär die geringere Luftwechselfläche am Standort 2.

Die Gaskonzentrationen an Ammoniak, Lachgas, Kohlendioxid und Methan wurden in drei Stallraumbereichen gemessen (Abb. 3 und 7, Messstrecken). Hiermit sollte eine Aussage ermöglicht werden, welchen Einfluss die Lage des Messpunktes zur Luftwechselfläche hat. Von Interesse war dabei auch, inwieweit die wechselnden Anströmungsverhältnisse innerhalb der Messzeitfenster die Konzentrationswerte in den peripheren Abluftbereichen im Mittel beeinflusst. Am Standort 1 lag die Stallnordseite in über 40 % der Stundenmittelwerte im Anströmungsbereich (Abb. 3, Messstrecke 3). Demgegenüber wurde die Stallsüdseite im Mittel in unter 20 % der Stundenmittel angeströmt (Abb. 3, Messstrecke 1). Am Standort 2 waren die Anströmungssituationen eher umgekehrt. Hier wurde die Nordseite in 30 % (Abb. 7, Messstrecke 3), die Südseite in annähernd 50 % der Stundenmittelwerte angeströmt (Abb. 7, Messstrecke 1). Diese Anströmungsverhältnisse müssten eine Verschiebung der Stallgaskonzentrationen in den Abströmungsbereich bewirken. In Tabelle 6 sind die mittleren Daten der Gaskonzentrationen zusammengestellt.

Tabelle 6: Mittlere Daten der Gaskonzentrationen und der Stalllufttemperatur an den Untersuchungsstandorten

Parameter	Messpunkte	Standort 1			Standort 2		
		Sommer	Über-gang	Winter	Sommer	Über-gang	Winter
Ammoniak mg/m ³	Messstrecke 1	0,5	1,4	1,8	1,3	2,0	4,7
	Messstrecke 2	0,6	1,9	2,3	1,2	2,0	5,0
	Messstrecke 3	0,5	1,3	2,0	1,2	1,7	4,1
	Außen	0,3	1,0	1,1	0,6	0,7	1,1
Lachgas mg/m ³	Messstrecke 1	0,6	0,8	1,0	0,6	0,7	0,8
	Messstrecke 2	0,6	0,9	1,0	0,6	0,7	0,7
	Messstrecke 3	0,6	0,8	1,0	0,6	0,7	0,7
	Außen	0,5	0,8	0,9	0,6	0,7	0,7
Kohlendioxid mg/m ³	Messstrecke 1	1294	1234	1332	1491	1391	2187
	Messstrecke 2	1483	1422	1513	1484	1311	2210
	Messstrecke 3	1355	1225	1389	1405	1182	1984
	Außen	1109	1072	975	1050	808	935
Methan mg/m ³	Messstrecke 1	10,7	18,4	26,6	13,8	24,6	55,3
	Messstrecke 2	15,6	25,4	33,7	13,9	22,1	57,0
	Messstrecke 3	12,3	17,9	28,6	12,0	17,1	47,8
	Außen	5,9	12,6	12,4	3,5	3,3	8,0
Stalltemperatur	°C	21,7	11,1	8,8	19,5	14,5	13,6

Der Ammoniakwert ist gegenüber dem Außenmesswert leicht erhöht. Hierbei sind standort-spezifische Differenzen festzuhalten. Insbesondere in der Wintermessung sind die Daten am Standort 2 deutlich erhöht. Aufgrund der Höhe der Außenmesswerte wird aber deutlich, dass an beiden Standorten eine entsprechende Vorbelastung durch die anderen Ställe vorhanden ist. Die Ammoniakkonzentrationen in der Stall- und Abluft liegen insgesamt auf einem relativ niedrigen Niveau. Erwartungsgemäß liegen die Werte im mittleren Stallraum (Messstrecken 2) über den im peripheren Abluftbereich. Zwischen den Abluftbereichen der südlichen und nördlichen Stallseite sind keine signifikante Differenzen festzustellen. Die deutlich differente Anströmung der Stallseiten hat auf die Konzentration im nördlichen bzw. südlichen Luftwechselstrom keinen Einfluss.

Die Lachgaskonzentration ist tendenziell im mittleren Stallraum gegenüber den peripheren Abluftbereichen ebenfalls leicht erhöht. Das gemessene Niveau unterscheidet sich im Mittel in allen Messbereichen nicht vom Referenzniveau im Außenbereich.

Die Kohlenstoffdioxidkonzentration liegt erwartungsgemäß auf niedrigem Niveau und ist gegenüber dem Referenzwert im Außenbereich etwas erhöht. Die Konzentration liegt im mittleren Stallraum wiederum über den Abluftbereichen.

Die Methankonzentration in der Stallluft hebt sich deutlich vom Referenzwert des Außenbereiches ab. Diese Tendenz entspricht den Erwartungen, da insbesondere den Wiederkäuern ein nennenswerter Anteil bei der Methanfreisetzung zugesprochen wird. Die Daten am Standort 1 übersteigen das Außenluftniveau um das 2- bis 3-Fache.

Noch deutlicher ist der Niveauunterschied am Standort 2. Hier liegen die Stallkonzentrationen 4- bis 10-fach über den Außenwerten. Die Reduzierung der Abluffläche im „Winter“ und z. T. im „Übergang“ erhöht den Methangehalt der Stallluft deutlich. Tendenziell ist dabei festzuhalten, dass mit der Verringerung der Abluffläche die Differenzen im Konzentrationsniveau zwischen mittlerem Stallraum und peripheren Abluftbereichen deutlich geringer werden. Aufgrund der besprochenen Gaskonzentrationen in der Stall- und Außenluft sowie der Umwelt- bzw. Klimarelevanz haben insbesondere Ammoniak und Methan in den untersuchten Rinderhaltungen einen zu diskutierenden Einfluss auf das Emissionsverhalten der Ställe.

Luftgetragene Stäube

Die Untersuchungen umfassen in den Rinderhaltungen nur den „unbelebten Anteil“ des Bioaerosols im Stall. Aufgrund von Literaturbefunden insbesondere zur Legehennenhaltung unterliegt die Konzentration von Staub in der Stallluft erheblichen Tagesschwankungen. Ursache hierfür sind insbesondere die tagesrhythmischen Tieraktivitäten. Ob das in den untersuchten Milchviehhaltungen auch so ist, sollen die Abbildungen 15 und 16 zu den Konzentrationsverläufen von Staub in der Stallluft an den untersuchten Standorten zeigen.

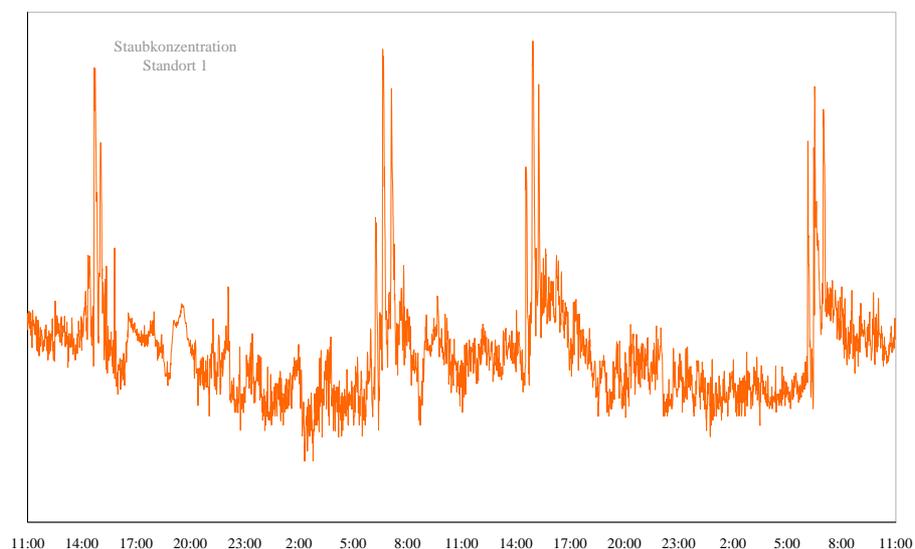


Abbildung 15: Verlauf der Staubkonzentration in der Stallluft über 48 Stunden am Standort 1

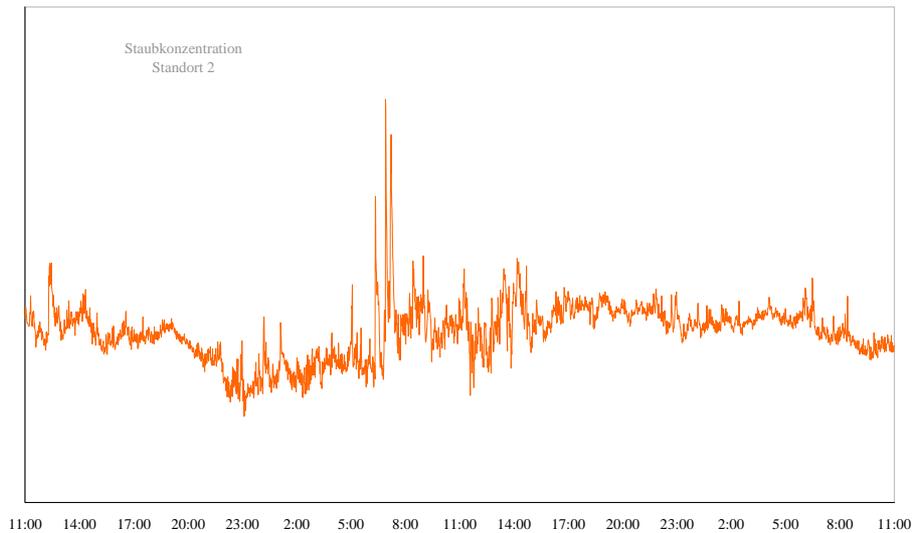


Abbildung 16: Verlauf der Staubkonzentration in der Stallluft über 48 Stunden am Standort 2

Im täglichen Ablauf sind am Standort 1 mit Festmistverfahren deutliche Konzentrationsspitzen zu sehen. Diese treten rhythmisch in Erscheinung und begleiten die Entmistungs- und Einstreuprozesse im Stall. Deutlich ist dabei zu sehen, dass jeder Anstieg aus drei Einzelspitzen besteht, die jeweils das maschinelle Einstreuen eines Laufganges mit zugehörigen Fressliegeboxen charakterisieren. Demgegenüber ist am Standort 2 nur ein Anstieg festzustellen, der auf das wöchentlich einmal stattfindende Einstreuen der Liegeboxen zurückzuführen ist. Auch hier besteht der Anstieg aus drei Einzelspitzen, die für jeweils eine (Doppel-)Liegeboxenreihe stehen. Ein Einfluss durch die Tieraktivität ist nicht zu belegen.

In Tabelle 7 sind die massekorrigierten mittleren Daten für die untersuchten Standorte zusammengestellt. Der Korrekturfaktor c wurde für jede Messreihe durch Rückwägung des Filters ermittelt.

Für den Standort 2 liegen nur Winterbefunde vor. Diese stützen die Winterbefunde am Standort 1. Das Konzentrationsniveau liegt am Standort 1 für die Fraktionen Gesamt- und PM 10- Staub jedoch fast doppelt so hoch. Bei den Fraktionen PM 2,5 und PM 1 sind kaum Unterschiede erkennbar. Die Ursache für die höheren Werte am Standort 1 ist, wie bereits dargestellt, im angewandten Festmistverfahren zu sehen. Die im Messzeitfenster „Sommer“ ermittelten Daten liegen im Niveau um ca. 25 % über den Messungen im „Winter“. Primäre Ursache hierfür ist in der um ca. 20 % erhöhten mittleren relativen Luftfeuchte (85 %) unter Winterbedingungen zu suchen.

Als maximaler Gesamtstaubwert wurden $0,262 \text{ mg/m}^3$ Stallluft ermittelt. Das Konzentrationsniveau liegt damit deutlich unter dem nach TA Luft zulässigen Wert von 20 mg/m^3 .

Tabelle 7: Staubkonzentrationen im Stall an den Untersuchungsstandorten

	Messreihe	C-Faktor	Staubkonzentration µg/m ³			
			Gesamt	PM 10	PM 2,5	PM 1,0
Standort 1	Sommer 1	0,88	201,9	49,9	17,1	15,3
	Sommer 2	0,75	-	14,4	5,4	4,5
	Übergang 1	0,41	261,7	107,3	-	0,7
	Übergang 2	0,35	175,7	63,6	-	-
	Übergang 3	0,43	132,8	35,6	20,5	18,8
	Winter 1	0,55	165,1	20,5	5,4	4,6
	Winter 2	0,55	171,2	42,2	12,2	10,3
Standort 2	Winter 1	0,65	93,4	25,5	12,0	11,1
	Winter 2	0,51	89,9	13,7	6,4	5,9

Geruchsstoffe

Aufgrund des hohen analytischen Aufwandes liegen nur wenige Befunde zur Geruchsstoffkonzentration in der Stall- und Außenluft vor (Tabelle 8). Ein weiterer Nachteil liegt in der Probenahme. Wegen des Fehlens einer validierten kontinuierlichen Datenerfassung sind bisher nur Momentbefunde zu erstellen. Damit spiegelt der gewonnene Wert nur einen geringen zeitlichen Abschnitt eines bestimmten Betriebszustandes im Stall wider. Wegen der häufigen Änderungen und kaum zu standardisierenden Hintergrundparameter ist generell die Repräsentanz derartiger Befunde zu hinterfragen. Diese Sachverhalte charakterisieren jedoch den überwiegenden Anteil an Untersuchungen bei allen Tierarten zu dieser Fragestellung. Der Versuch, innerhalb der Messfenster mittels elektronischer Nasen eine kontinuierliche Datenerfassung zu realisieren, schlug fehl.

In Tabelle 8 wurden die gewonnenen Daten zur Geruchsstoffkonzentration im Abluftstrom und in der Außenluft sowie die zum Messzeitpunkt ausgewiesene Luftströmungsrichtung im Außenbereich (Wetterstation) und im Stall (USA) zusammengestellt.

Unterstellt man, dass der untersuchte Stall die Ursache für eine Erhöhung der Geruchsstoffkonzentration im Umfeld von Tierhaltungen ist, so ist mit einer Konzentrationserhöhung von Zuluft nach Abluftbereich zu rechnen. Dabei müsste die Außenluftprobe höchstens auf dem Niveau der Zuluftprobe liegen. Aus der Tabelle 8 ist ersichtlich, dass es bereits Differenzen im Strömungsprofil zwischen Stall und Außenbereich gibt. So scheint die Stalldurchströmung nur partiell an die Außenwindrichtung, insbesondere bei Gebäudeeinflüssen, gekoppelt. Im Kontext mit der Stellanströmung existieren am Standort 1 keine plausiblen Beziehungen zur Geruchsstoffkonzentration zwischen Zu- und Abluft. Berücksichtigt man jedoch, dass der Versuchsstall Teil einer aus mehreren Ställen bestehenden Anlage ist, kann einerseits von einer nicht zu unterschätzenden Vorbelastung durch die weiteren Emittenten, wie auch von einer erheblichen Beeinflussung der Strömungsrichtung der Luft durch benachbarte Gebäude ausgegangen werden. Hingegen sind die Werte für den Zu- und Abluft-

bereich am Standort 2 plausibel. Hier liegen die Werte im Abluftbereich deutlich über dem Zuluftbereich.

Die Werte der Außenluft sind dagegen im Zusammenhang mit der Anströmung der Stalles in der Messsituation sehr hoch. Hier ist eine Beeinflussung durch die räumliche Nähe weiterer Tierhaltungen zum Außenmesspunkt als Ursache zu sehen, die erst im Rahmen der Auswertungen erkannt wurde.

Tabelle 8: Geruchsstoffkonzentrationen im Abluftstrom und Außenbereich sowie Luftströmungsrichtung zur Probennahme an den Untersuchungsstandorten

	Außenklimabereich	Strömungsrichtung		Geruchsstoffkonzentration GE/m ³		
		Stall	Außen	GE 1 u. 2	GE 3	Außen
Standort 1	Übergang	Süd	Süd	54	20	13
		Südost	West	26	32	17
		Süd	West	59	34	12
	Winter	Ost	Südwest	7	11	6
		Südost	West	27	27	19
	Außenklimabereich	Strömungsrichtung		Geruchsstoffkonzentration GE/m ³		
		Stall	Außen	GE 1	GE 2 u. 3	Außen
Standort 2	Übergang	Süd	Südwest	34	98	67
		Südwest	Südwest	20	95	48
	Winter	Süd	West	4	153	11
		Ost	Süd	17	112	34

Wegen der nur schwer erklärbaren Konzentrationsunterschiede zwischen Zu- und Abluft, insbesondere am Standort 1, wird bei der Beurteilung der Geruchsemissionen aus den vorliegenden Befunden auf zwei Berechnungsvarianten zurückgegriffen. Variante 1: Abzug der Vorbelastung (Vorbelastung am Standort 1 = Außenprobe, am Standort 2 = Zuluftprobe), zum Zweiten ohne Abzug der Vorbelastung, also als worse case. Als Daten für die Geruchskonzentration im Luftwechselbereich der untersuchten Milchviehställe können im Mittel 46 GE/m³ Luft festgehalten werden, darunter Standort 1 mit 29,7 GE/m³ (worse case: 36,6 GE/m³) und Standort 2 mit 53,3 GE/m³ Luft (worse case: 114,5 GE/m³).

3.4 Ermittlung der Massenströme

Aufbauend auf den mittels FRA gemessenen Volumenströmen (Tabellen 3 und 4) sollen im Weiteren Massenströme berechnet werden. Hierfür wurden die Konzentrationen im peripheren Luftwechselbereich (Messstrecken 1 und 3) der Ställe (Tabelle 6) aufgrund geringer Niveauunterschiede gemittelt. Auf den Abzug der Vorbelastung über die Außenluftkonzentration der Gase wurde hier, wie bereits bei den Gerüchen dargestellt, verzichtet und so eine Berechnung im Rahmen eines worst case durchgeführt. Ausnahme stellt die Kohlenstoffdioxidkonzentration dar, weil hier die allgemeine Vorbelastung mit 748 mg/m³ (2006) Luft nicht unerheblich und deshalb zu berücksichtigen ist. Mit der Mittelung der Konzentrationen kann im ersten Schritt auf eine Berücksichtigung der Strömungsrichtung im Stall verzichtet werden. In der nachfolgenden Tabelle 9 werden die Massenströme für die gasförmigen Stallraumlasten nach Standort und Messzeitfenster zusammengestellt. Hierbei wurde der je Standort vorhandene Datenpool sowohl mit als auch ohne Berücksichtigung der Stallanströmung (Basis Windrichtung an der Wetterstation) gegenübergestellt.

Tabelle 9: Stündliche Massenströme für ausgewählte Stallraumlasten innerhalb der Messzeitfenster an beiden Standorten

Standort	Außenklimabereich	FRA	Massenstrom				
			NH ₃	CO ₂	CH ₄	Gesamtstaub	PM 10
			g/h*TP	g/h*TP	g/h*TP	g/h*TP	g/h*TP
1	Sommer	Gesamt	0,57	662,4	13,21	0,23	0,04
		Richt. selekt.	0,42	713,1	14,23	0,25	0,04
2		Gesamt	0,95	532,0	9,80	-	-
		Richt. selekt.	0,93	522,3	9,62	-	-
1	Übergang	Gesamt	1,00	355,2	13,39	0,14	0,05
		Richt. selekt.	1,11	397,3	14,98	0,16	0,06
2		Gesamt	1,55	449,9	17,42	-	-
		Richt. selekt.	1,66	482,5	18,68	-	-
1	Winter	Gesamt	0,69	221,6	9,99	0,06	0,01
		Richt. selekt.	0,52	167,0	7,53	0,05	0,01
2		Gesamt	0,88	267,2	10,30	0,02	0,004
		Richt. selekt.	0,96	290,4	11,19	0,02	0,004

Die stündlichen Massenströme der emittierten Gase variieren sowohl in Abhängigkeit des Aufstallungssystems wie auch vom Stichprobenumfang (Gesamt, Richt. selekt.) und natürlich zwischen den Messzeitfenstern. Die Eliminierung von Daten unter ungünstigen Anströmverhältnissen verursacht eine ungerichtete marginale Niveauverschiebung.

So kann auf Grundlage der vorhandenen Datenbasis aus Tabelle 9 im folgenden Abschnitt eine Kalkulation des jährlichen Ausstoßes an Ammoniak, Kohlendioxid, Methan und Staub (Gesamt, PM 10) sowie der Geruchseinheiten abgeleitet werden.

3.5 Ableitung von Emissionsfaktoren und Luftvolumenstrom

Zur Bewertung der jährlichen Massenströme an Ammoniak, Kohlendioxid, Methan und Staub werden die mittleren Daten der stündlichen Massenströme je Tierplatz für die Zeitfenstermessungen „Sommer“, „Winter“ und „Übergang“ auf den Bezugszeitraum hochgerechnet. Zu diesem Zweck müssen die zu Grunde gelegten Zeiträume definiert werden. In der nachfolgenden Abbildung 17 sind die aus mehreren Jahren in Sachsen zusammengestellten mittleren Temperaturkurven dargestellt.

Aufgrund der vorliegenden Temperaturbefunde kann in den Monaten Dezember – Februar der für „Winter“ fokussierte Temperaturbereich unter 8 °C (Versuchsmessdaten zwischen 2,1 und 4,3 °C im Mittel) gesichert werden. Die höchsten mittleren Erwartungswerte liegen in den Monaten Juni – August. Für diesen Zeitbereich liegen die mittleren Messdaten über 18 °C. Hieraus ergeben sich für den Außenklimabereich „Übergang“ die Monate März – Mai und September – November mit einem Temperaturbereich von 8 bis 18 °C.

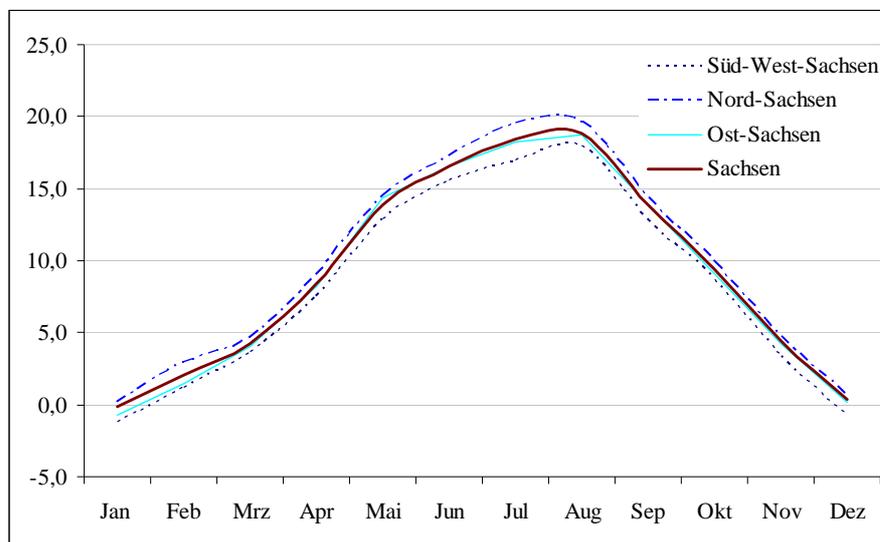


Abbildung 17: Linien der mittleren Außenlufttemperatur in sächsischen Teilgebieten im Jahresverlauf

Damit sind für die Kalkulation der jährlichen Emissionen 2 208 Stunden für die Daten der Sommermessung, 4 392 Stunden für die Übergangsmessung und 2 160 Stunden für die Daten der Wintermessung (Tabelle 9) in Ansatz zu bringen. Hieraus ergeben sich die in Tabelle 10 zusammengestellten jährlichen Emissionsfaktoren.

Tabelle 10: Jährliche Emissionsfaktoren je Tierplatz (kalkuliert) für Gase und Staub an beiden Standorten

Standort	Datenpool FRA	Massenstrom				
		NH ₃	CO ₂	CH ₄	Gesamtstaub	PM 10
		kg/Tpl.*a	kg/Tpl.*a	kg/Tpl.*a	kg/Tpl.*a	kg/Tpl.*a
1	Gesamt	7,13	3501,2	109,6	1,26	0,33
	Richt. selekt.	7,38	3680,5	113,5	1,34	0,36
2	Gesamt	10,79	3728,1	120,4	0,60	0,20
	Richt. selekt.	11,4	3899,7	127,5	0,63	0,21

Die jährlichen Emissionsraten je Tierplatz variieren zwischen den untersuchten Standorten bei Ammoniak und Staub deutlich. Dabei ist zu berücksichtigen, dass es sich bei den E-Faktoren für Gesamt- und PM 10-Staub am Standort 2 um hochgerechnete Werte handelt. Die Hochrechnung erfolgte auf Basis der Relation der Wintermessungen beider Standorte zueinander und unter Bezugnahme auf die weiteren Messungen am Standort 1.

Die Differenz zwischen den Daten – unter Berücksichtigung der Anströmungsrichtung des Stalls (Gesamt = alle Datensätze, Richt. selekt. = nur Queranströmung) – variiert geringfügig. Allerdings ist zu beobachten, dass die Datenselektion jeweils zu höheren jährlichen Massenströmen führt. Dabei stellt sich die Frage, welche Höhe diese Niveaushiftung erreicht (Tabelle 11).

Tabelle 11: Verhältnis der Massenströme für ausgewählte Gaskonzentrationen im Jahresverlauf unter Berücksichtigung der Anströmungsrichtung an beiden Standorten

Standort	Außenklima- bereich	FRA	Massenstrom		
			NH ₃	CO ₂	CH ₄
			%	%	%
1	Alle	Richt. selektiert	104	105	104
2		/ gesamt	106	105	106

Mit der Berücksichtigung der Stallanströmung rangieren die hieraus berechneten Werte oberhalb der Werte aus dem unselektierten Pool. Die Abweichung beträgt 4 - 6 %. Unter Berücksichtigung weiterer möglicher Messfehler sowie der deutlich reduzierten Datenpools (Tabellen 3 und 4) sind die Abweichungen jedoch für die Gesamtbewertung nicht wesentlich.

Der ermittelte Emissionsfaktor für Ammoniak liegt für den untersuchten Stall mit Festmistverfahren zwischen 7,1 und 7,4 kg je Tierplatz im Jahr und damit deutlich unter dem Wert der TA Luft mit 14,57 kg je Tierplatz im Jahr. Auch der Stall am Standort 2 mit Flüssigmistverfahren erreicht den Emissionsfaktor der TA Luft mit 10,8 bis 11,4 kg je Tierplatz und Jahr nicht. Dabei ist jedoch zu berücksichtigen, dass nach Lesart der TA Luft bei den angegebenen Emissionsfaktoren die Emissionen der diffusen Quellen wie Gülle-, Jauche- und Festmistlagerung enthalten sind.

Für Methan wurde ein Emissionsfaktor zwischen 110 und 113 kg je Tierplatz im Jahr am Standort 1 ermittelt. Am Standort 2 lag dieser zwischen 120 und 127 kg je Tierplatz und Jahr. Damit werden aus der Milchviehhaltung mit Flüssigmistverfahren 10 bis 12 % mehr klimarelevante Stallraumgase emittiert. Inwieweit hier ein verfahrensabhängiger Einfluss vorliegt, ist auf Grund der relativ geringen Unterschiede nicht ableitbar. Unter Berücksichtigung der in den Messzeiträumen ermittelten durchschnittlichen Stallinnentemperaturen ist ein auch ein Einfluss der Temperatur nicht auszuschließen.

Der Emissionsfaktor für Staub liegt mit ca. 1,3 kg je Tierplatz im Jahr am Standort 1 und hochgerechneten 0,62 kg je Tierplatz im Jahr am Standort 2 im Wertebereich anderer Messungen. Hierbei entsteht beim Flüssigmistverfahren nur eine halb so hohe Staubfracht wie beim Festmistverfahren. Zwischen 25 und 30 % der Gesamtstaubemissionen entfallen auf die Fraktion PM 10.

Für den Staub wurde ein mittleres Konzentrationsniveau von 144 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ an Gesamtstaub und 33 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ der Fraktion PM 10 aus den Messergebnissen für die den Standort 1 abgeleitet. Ein jahreszeitlicher Einfluss auf die Konzentration an Staub in der Stallluft konnte nicht belegt werden. Die Hochrechnung für den Standort 2 ergab 63 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ Gesamtstaub sowie 18 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ Feinstaub (PM 10).

Die Geruchsemissionen verhalten sich gegenüber Staub erwartungsgemäß gegenläufig. Bei der Berechnung von Emissionsfaktoren ist zu berücksichtigen, dass für beide Standorte keine Sommermesswerte vorliegen. Auf Grund der Relation der ermittelten Gaskonzentrationen und des hohen Luftwechsels während des Messfensters „Sommer“ ist anzunehmen, dass die Geruchskonzentration der Abluft nicht über die Konzentrationen des Messfensters „Übergang“ ansteigt. Zur Ermittlung eines Emissionsfaktors wurden deshalb die Geruchskonzentrationen „Sommer“ und „Übergang“ für den jeweiligen Standort entsprechend gleichgesetzt und mit den ermittelten Luftraten verrechnet. Ohne Abzug der Vorbelastungen am jeweiligen Standort werden im Jahresmittel aus der Milchviehhaltung mit Festmistverfahren zwischen 9 und 10 GE je Sekunde und Tierplatz (8 GE/s*GV) emittiert. Beim Flüssigmistverfahren erreichen im untersuchten Standort 2 die Geruchsemission 18 bis 19 GE je Sekunde und Tierplatz (15,5 GE/s*GV). Berücksichtigt man weiterhin die Anströmungsverhältnisse am Standort 2, erscheint es hier gerechtfertigt, die Vorbelastung in der Zuluft bei der Ausweisung eines Emissionsfaktors abzuziehen. Unter diesen Bedingungen werden am Standort 2 zwischen 12 und 13 GE je Sekunde und Tierplatz emittiert. Die entspricht einem Emissionsfaktor von 10,5 GE/s*GV.

Neben den Emissionsfaktoren lässt sich für die untersuchten Ställe (L203) auch ein mittlerer Volumenstrom je Tierplatz berechnen (Tabelle 12). Dies kann für weiterführende Untersuchungen oder Simulationen von Interesse sein. Mit einer Differenz von 89 $\text{m}^3 / \text{TP} \cdot \text{h}$ sind die Abweichungen zwischen den beiden Standorten relativ gering.

Tabelle 12: Luftvolumenstrom in m³ je Tierplatz

Standort	Außenklimabereich	Volumenstrom
1	Sommer	1149
2		760
1	Übergang	738
2		836
1	Winter	362
2		200
1	Jahresmittelwert	749
2		660

Im Vergleich mit den nach DIN 18910-1:2004 berechneten Werten für Winter- und Sommerluftrate in Höhe von 130 und 450 m³/Tier und Stunde liegen die ermittelten Werte um das 1,5- bis 2,5-Fache höher. Entsprechend kann davon ausgegangen werden, dass es im Winter nicht zu einer Durchfeuchtung der Bausubstanz kommt. Im Sommer erhöhen die ermittelten Luftraten den Kuhkomfort und sind somit Beitrag zur artgerechten Tierhaltung.

4 Fazit

- Die Bestimmung der Volumenströme erfolgte vergleichend in zeitlich eingeschränkten Zeitfenstern mittels FRA, USA und Tracergas. Die Strömungsgeschwindigkeit im Stall liegt deutlich unter den Daten der Außenluftströmung.
- Die Befunde der Geschwindigkeitsmessungen liegen zwischen den eingesetzten Messsystemen auf vergleichbarem Niveau, wobei die USA-Daten unterhalb der Tracergas- und FRA-Daten liegen. Die mittels FRA ermittelten Luftwechselraten liegen tendenziell über den Tracergas-Daten.
- Mit einer hohen Anzahl an Anemometern im Luftwechselbereich stellt das FRA-Messsystem eine kontinuierlich messende Alternative zur Tracergasmessung (Abklümmethode) dar. Bedingung für den Einsatz ist jedoch eine reine Querlüftung durch den Stall. Die Korrelation der drei Messebenen gestattet eine Reduzierung der Anzahl an FRA im Messfeld in vertikaler Ausdehnung. Die verbleibenden FRA müssen jedoch frei durchströmt werden können. Zur Festlegung genauer Positionierung der FRA in vertikaler Ausdehnung im Messfeld sind erweiterte Untersuchungen nötig.
- Die USA-Daten und deren Korrelation zu den FRA-Daten schließen das USA von einer alternativen Verwendung nicht aus. Zu Positionierung und Festlegung der notwendigen Anzahl an USA sind weitere Untersuchungen nötig.
- Die Außenwindrichtung korrespondiert nur gering mit der Durchströmungsrichtung im Stall. Der Vergleich der Korrelationskoeffizienten zwischen FRA und USA zeigt, dass die Selektion von Datensätzen mit ungünstiger Anströmungsrichtung keinen wesentlichen Einfluss nimmt.

- Die gemessenen mittleren Gaskonzentrationen lagen an den peripheren Messstrecken auf vergleichbarem Niveau. Das Niveau der zentralen Messstrecken war gegenüber den peripheren Bereichen leicht erhöht.
- Die Ammoniakkonzentration in den untersuchten Milchviehhaltungen betrug im Sommer zwischen 0,5 und 1,3 mg je m³. Während der Wintermessungen stieg sie auf 1,8 bis 5,0 mg je m³ an.
- Die Lachgaskonzentration im Stall lag auf dem Niveau der gemessenen Außenluftwerte und wird somit nicht relevant für die Emissionsbetrachtung.
- Die Kohlendioxidkonzentration lag im Mittel bei 1 400 mg je m³. In Abhängigkeit von der Reduzierung der Luftwechselfläche (Winter) stieg sie bis 2 000 mg je m³ an.
- Die Methankonzentration lag im Sommer zwischen 12 und 14 mg je m³. Sie stieg im Winter auf bis zu 57 mg je m³ Luft.
- Die Staubkonzentration zeigt im Tagesverlauf während der Entmistungs- und Einstreu-prozesse deutliche Spitzen. Diese sind nicht auf Tieraktivitäten zurückzuführen. Während der verbleibenden Zeiträume liegen die Konzentrationen auf relativ einheitlichem Niveau. Insgesamt betrug die Konzentration bei Gesamtstaub 188 µg und PM 10-Staub 50 µg je m³ am Standort 1 - Festmist).
- Die Geruchstoffkonzentration zeigte am Standort 1 keine gerichtete Tendenz in Abhängigkeit von der Stalldurchströmung, jedoch entsprechend am Standort 2. Wegen des geringen Datenumfanges und teilweise nicht erklärbarer Messpunktniveaus ist eine Emissionsbewertung am Standort 1 nur als worse case gerechtfertigt. Die ermittelten Geruchstoffkonzentrationen lagen im Mittel bei 46 GE je m³, erreichten im Maximum bis 153 GE/m³ Luft.
- Die Massenkonzentration an Gesamtstaub liegt im Maximum innerhalb der Messzeitfenster bei 262 µg je m³. Hiermit wird der Vorsorgewert der TA-Luft 20 mg/m³ deutlich unterschritten.
- Der Staub-Emissionsfaktor variiert zwischen den Milchviehhaltungen in Abhängigkeit vom Aufstallungs- und Entmistungsverfahren. Beim Festmistverfahren liegt der Emissionsfaktor mit ca. 1,3 kg je Tierplatz im Jahr deutlich über dem Flüssigmistverfahren.
- Der jährliche Massenstrom an Ammoniak beträgt ca. 7,1 kg bzw. 10,8 kg je Tierplatz (Standort 1 bzw. 2). Beide Werte liegen damit unterhalb des Emissionsfaktors der TA-Luft (14,57 kg je Tierplatz und Jahr). Dabei ist allerdings zu berücksichtigen, dass im Gegensatz zum Wert der TA Luft die Dunglagerung hier nicht enthalten ist.
- Die jährlichen Massenströme an Kohlenstoffdioxid betragen am 1. Standort 3 500 kg sowie am 2. Standort 3 730 kg je Tierplatz. Sie entsprechen damit in der Höhe der CO₂ -Menge, die sich auch kalkulatorisch über die Formeln der DIN 18910-1:2004 ermitteln lässt.
- Die Emissionen an Methan betragen 110 (Standort 1) bzw. 120 kg (Standort 2) je Tierplatz. Hierfür existieren derzeit keine Grenzwerte.
- Das Festmistverfahren wird gegenüber dem Flüssigmistverfahren durch eine geringere Konzentration und einen geringeren Massenstrom der Stallraumlasten Ammoniak und Me-

than sowie den Geruchsemissionen charakterisiert. Bezüglich der staubförmigen Stallraumlast ist das Verhältnis umgekehrt.

- Auf der Basis der vorliegenden Befunde sind weitere Messungen zur Konsolidierung der methodischen Herangehensweise und der Messergebnisse erforderlich.

Literaturverzeichnis

DIN EN 13725, Ausgabe: 2003-07, Luftbeschaffenheit - Bestimmung der Geruchsstoffkonzentration mit dynamischer Olfaktometrie; Beuth Verlag GmbH Berlin

DIN 18910-1, Ausgabe: 2004-11, Wärmeschutz geschlossener Ställe - Wärmedämmung und Lüftung - Teil 1: Planungs- und Berechnungsgrundlagen für geschlossene zwangsbelüftete Ställe; Beuth Verlag GmbH Berlin

Erste Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Bundes-Immissionsschutz-Gesetz (Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft - TA Luft) vom 24. Juli 2002 (GMBI. 2002, Seiten 501-606)

Anhang: Technische Daten der eingesetzten Messtechnik

Tabelle A1: Messtechnik zur Bestimmung des Volumenstromes

Volumenstrom	
Messgerät:	Flügelradanemometer
	Wechselstromgenerator, Kalibrierfunktion $v = 0,0049 \cdot u + 0,2$ Gleichstromgenerator, Kalibrierfunktion $v = 0,0070 \cdot u + 0,036$
	Messbereich: 0,4 – 25 m/s, Anlauf 0,6 m/s Signal: u ... mV Messkanal: Durchmesser 160 mm, Länge 200 mm Temperaturbereich: max. 80 °C
Messgerät:	Ultraschallanemometer Firma METEK
	Ultraschallimpulse im dreidimensionalen Messfeld
	Messbereich: WG 0 – 50 m/s, WR 0 – 360 °, T -30 – 50 °C Signal: Hz Temperaturbereich: -30 – 50 °C

Tabelle A2: Messtechnik zur Bestimmung der Analyseparameter

Wetterparameter	
Messgerät	Wetterstation DL 15 der Fa. Thies clima - kontinuierlich 5 min. Takt

Tabelle A3: Messtechnik zur Bestimmung der Analyseparameter

Stalltemperatur:	
Messgerät:	Widerstandsthermometer Pt 100
Messbereich:	Messbereich: -50 – 150 °C
Genauigkeit:	± 0,3 °C
Registrierung:	kontinuierlich mit Innova Systemsoftware 7300
Wasserdampfanteil in der Abluft :	
Messgerät:	Multigasmonitor 1312, Fa. Innova Air Tech Instruments
Messbereich:	0,1 – 100 g/m ³
Genauigkeit:	± 1,5 % vom Messwert
Registrierung:	quasikontinuierlich mit Innova Systemsoftware 7300
Abgasdichte:	
Ermittlung:	Die Abgasdichte wird berechnet aus der Dichte der Luft und dem tatsächlichen Wassergehalt des Abgases.
Gas:	
Messgerät:	Multigasmonitor 1312, Fa. Innova Air Tech Instruments
Komponenten:	Kohlendioxid CO ₂ , Lachgas N ₂ O, Methan CH ₄ , Ammoniak NH ₃ , Wasserdampf H ₂ O
Messverfahren:	Photoakustische IR-Spektroskopie
Messbereichsendwerte nach Herstellerangaben:	CO ₂ ... 15000 ppm, N ₂ O... 30 ppm, NH ₃ ... 800 ppm, H ₂ O... 100 g/m ³
Nachweisgrenzen nach Herstellerangaben:	CO ₂ ... 1,50 ppm, N ₂ O ... 0,03 ppm, CH ₄ ... 0,25 ppm, NH ₃ ... 0,80 ppm, H ₂ O 0,10 g/m ³
Probennahme:	Multiplexer 1309, Fa. Innova Air Tech Instruments
	unbeheiztes PET-Rohr bis zum Messstellenumschalter, Staubfilter am Messgaseingang

Tabelle A4: Messtechnik zur Bestimmung der Analyseparameter des Bioaerosols

Bioaerosol	
Messgerät:	Staubmessgerät 1.105, Fa. GRIMM
	90° Streulichtmessung
	Massenkonzentrationsbereich: 1,0 – 50000 µg/m ³
	Erfassbare Partikelgröße: 0,75 µm
	Kanäle: PM10, PM 2,5, PM 1,0
	Massekonzentration und Partikelanzahl
	Betrieb: 4 – 40 °C, < 95 % rel. Luftfeuchte
	PGP-System mit Filter, Impingement, Andersen Sammler

Tabelle A5: Messtechnik zur Bestimmung der Analyseparameter des Geruchs

Geruch	
Messgerät:	Probennahmegerät, Olfaktometer T07

Impressum

Herausgeber: Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie
Pillnitzer Platz 3, 01326 Dresden
Internet: www.smul.sachsen.de/lfulg

Autoren: Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie
Thomas Heidenreich
Referat Betriebs-, Umweltökonomie, Verfahrensbewertung
August-Böckstiegel-Str. 3, 01326 Dresden
Tel. 0351 2612-2520; Fax 0351 2612-2099
E-Mail: thomas.heidenreich@smul.sachsen.de
Carsten Höfert, Dr. Ute Wanka †

Dr. Jens Lippmann
Albrecht-Daniel-Thaer-Institut für Agrarwissenschaften e.V.
an der Universität Leipzig
Gustav-Kühn-Str. 8
04159 Leipzig
Tel. 0341 9738-482/484, Fax 0341 9738-489
E-Mail: jens.lippmann@uni.leipzig.de

Redaktion: siehe Autoren

Endredaktion: Öffentlichkeitsarbeit
Präsidialabteilung

ISSN: 1867-2868

Redaktionsschluss: November 2008

Für alle angegebenen E-Mail-Adressen gilt:

Kein Zugang für elektronisch signierte sowie für verschlüsselte elektronische Dokumente

Verteilerhinweis

Diese Informationsschrift wird von der Sächsischen Staatsregierung im Rahmen der Öffentlichkeitsarbeit herausgegeben. Sie darf weder von Parteien noch von Wahlhelfern zum Zwecke der Wahlwerbung verwendet werden. Dies gilt für alle Wahlen.