

Emissionen von Staub (PM10) und Ammoniak (NH₃) aus traditionellen und neuen Stallsystemen mit Untersuchungen im Bereich der Mastschweinehaltung

Vertrag Nr. BUWAL/INT/501.01.16 (5.1.1)

Nigel R. Berry¹
Kerstin Zeyer²
Lukas Emmenegger²
Margret Keck¹

2005

¹Agroscope FAT Tänikon, Eidg. Forschungsanstalt für Agrarwirtschaft und Landtechnik, CH-8356 Ettenhausen

²Empa, Eidg. Materialprüfungs- und Forschungsanstalt, Überlandstrasse 129, CH-8600 Dübendorf

Finanzierung:

Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL), Abteilung Luft, NIS, Sicherheit, Bern

Agroscope FAT Tänikon, Eidgenössische Forschungsanstalt für Agrarwirtschaft und Landtechnik,
Ettenhausen

Empa, Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt, Dübendorf

Inhalt

1.	Zusammenfassung	5
2.	Projektauftrag und Kenntnisstand	9
2.1	Projektauftrag und -ziele	9
2.2	Verbreitung der Stallsysteme in der Schweiz	10
2.3	Emissionen aus der Tierhaltung	12
2.4	Massnahmen zur Emissionsminderung in der Schweinehaltung	13
2.4.1	Ammoniak	13
2.4.2	Staub PM10	15
2.5	Anforderungen an Messmethoden und Versuchsplanung	15
3.	Messmethodik bei Zwangslüftung	17
3.1	Ammoniak	17
3.1.1	Impinger (anreichernd)	17
3.1.2	Fourier-Transform Infrarotspektroskopie FTIR (kontinuierlich)	18
3.2	Staub PM10	20
3.2.1	Impaktor (anreichernd)	20
3.2.2	Tapered-Element Oscillating Microbalance TEOM (kontinuierlich)	21
3.3	Gesamt- und Schwebestaub	22
3.4	Luftvolumenstrom	22
3.5	Klimaparameter	23
4.	Untersuchungen bei traditionellen Stallsystemen	25
4.1	Übersicht der Versuchsvarianten	25
4.2	NH ₃ -Konzentration und -Emission	32
4.3	PM10-Konzentration und -Emission	35
4.4	Schwebe- und Gesamtstaub-Konzentration	37
5.	Methodenentwicklung für freie Lüftung	41
5.1	Konzept Tracergasmethode	41
5.2	Vorversuche zur Methodenentwicklung	41
5.3	Messaufbau	42
5.4	Analytik	43
5.5	Messunsicherheit	43
6.	Untersuchungen bei freier Lüftung	47
6.1	Übersicht der Versuchsanordnung	47
6.2	NH ₃ -Konzentration und -Emission	57
6.3	PM10-Konzentration und -Emission	59
7.	Vergleich der Versuchsvarianten	61
7.1	Statistische Auswertung	61
7.2	Ammoniak	61
7.3	PM10	64

8.	Berechnung einer N-Bilanz	67
9.	Diskussion	69
9.1	Messmethodik	69
9.2	NH ₃ -Emission, Einflussfaktoren und Minderungsansätze	70
9.3	PM10-Emission, Einflussfaktoren und Minderungsansätze	72
10.	Emissionen aus der Schweinehaltung in der Schweiz	75
10.1	Entwicklung des Schweinebestandes	75
10.2	Entwicklung der Beteiligung an den Tierhaltungsprogrammen BTS und RAUS.....	76
10.3	Abschätzung der Emissionen anhand von Emissionsfaktoren aus der Literatur und eigener Untersuchungen	76
11.	Folgerungen	79
11.1	Wichtigste Ergebnisse	79
11.2	Forschungsbedarf.....	80
12.	Literatur	83
13.	Anhang	89
14.	Abkürzungen	106

1. Zusammenfassung

Ziele

Ziele dieses Projektes sind ein Vergleich der Emissionen von Ammoniak NH_3 und Staub PM_{10} aus neuen Haltungssystemen mit traditionellen Stallsystemen in der Schweinemast, die Evaluierung und Entwicklung einer geeigneten Messmethodik für neue Stallsysteme mit Ausläufen sowie das Aufzeigen von Ansätzen zur Emissionsminderung.

Literatur

In einer Literaturübersicht werden die Emissionen von NH_3 und PM_{10} bei Schweinen und Rindvieh sowie Minderungsmaßnahmen in der Schweinehaltung dargestellt. In der Schweiz ist aufgrund der Verteilung der Grossvieheinheiten mit 74 % ein Grossteil der NH_3 -Emissionen auf die Rindviehhaltung zurückzuführen. Die Literaturangaben variieren bei Milchvieh im Anbindestall zwischen 240 und 800 mg $\text{NH}_3/\text{GVE}\cdot\text{h}$, bei Laufställen sind die Unterschiede mit einem Schwankungsbereich zwischen 260 und 3560 mg $\text{NH}_3/\text{GVE}\cdot\text{h}$ sehr gross. Die PM_{10} -Emissionen von Milchvieh variieren im Laufstall zwischen 6 und 84 mg $\text{PM}_{10}/\text{GVE}\cdot\text{h}$. Bei Mastschweinen liegen die Emissionen im Bereich von 736 bis 14800 mg $\text{NH}_3/\text{GVE}\cdot\text{h}$ sowie von 34 bis 133 mg $\text{PM}_{10}/\text{GVE}\cdot\text{h}$. In Stallsystemen für Mastschweine mit freier Lüftung waren die Emissionen tendenziell geringer. In der Literatur waren die Versuchsansätze sehr unterschiedlich, was deren Vergleichbarkeit erschwert.

Stallsysteme

In die Untersuchung wurden die in der Schweiz am meisten verbreiteten Stallsysteme in der Schweinemast einbezogen. Dies waren einerseits traditionelle Stallsysteme mit Zwangslüftung und andererseits ein neues Stallsystem mit Auslauf. Zu den traditionellen Stallsystemen zählten Teilspaltenboden (TS) mit Trocken- (FT) und Flüssigfütterung (FF). Zur Beschäftigung für die Schweine kamen ad libitum angebotene Strohpresswürfel (EP), geschnittene Einstreu (EG) und eine aufbereitete Einstreu (EA) zum Einsatz. Zudem wurde ein Stall mit Vollspaltenboden (VS) und Flüssigfütterung untersucht. Beim neuen Stallsystem war der eingestreute Liegebereich mit Zwangslüftung ausgeführt, der Auslauf war entweder zur Hälfte perforiert ($\frac{1}{2}$ PE) oder komplett planbefestigt (PL).

Methode

Gemessen wurden NH_3 - und PM_{10} -Emissionen sowie Schweb- und Gesamtstaubfraktionen. Bei Zwangslüftung kamen für den Luftvolumenstrom (Messventilatoren), die NH_3 - (Impinger, Fourier-Transform Infrarotspektroskopie FTIR) und PM_{10} -Konzentrationen (Impaktoren, Tapered-Element Oscillating Microbalance TEOM) bewährte Messmethoden zum Einsatz. Zur Quantifizierung der Emissionen im Auslauf wurde eine Tracer-Ratio-Methode mit Schwefelhexafluorid SF_6 entwickelt. Die Entwicklung und Anwendung dieser Methode im Praxiseinsatz ist gelungen. Die analytische Messunsicherheit beträgt für den Massenstrom von NH_3 und PM_{10} bei freier Lüftung etwa 18 %, bei Zwangslüftung etwa 9 %. Aufgrund der besser reproduzierbaren Verhältnisse, der grösseren Anzahl Messungen und der einfacheren Messeinrichtung sind die Ergebnisse bei Zwangslüftung besser abgesichert.

In den Ställen mit Teilspaltenboden wurde in der Vor-, Mittel- und Endmast gemessen. Bei den anderen Versuchsvarianten erfolgten die Messungen nur in der Mittel- oder in der Endmast. Die

Messungen fanden an je mindestens vier aufeinanderfolgenden Tagen im Sommer und im Winter statt. Erhoben wurden auch beschreibende Parameter zum Klima, den Tieren, dem Futter, der Einstreu und der Gülle.

Ergebnisse bei traditionellen Stallsystemen

Bei Teilspaltenboden mit Trocken- bzw. Flüssigfütterung waren die NH₃- und PM10-Emissionen im Sommer signifikant höher als im Winter (Sommer 3105 bzw. 3547 mg NH₃/GVE·h gegenüber im Winter 983 bzw. 947 mg NH₃/GVE·h; Sommer 145 bzw. 162 mg PM10/GVE·h gegenüber im Winter 124 bzw. 72 mg PM10/GVE·h).

Die NH₃-Emissionen waren in der Endmast signifikant höher als in der Vor- und Mittelmast, bei PM10 ergab sich ein linearer Anstieg im Verlauf der Mastabschnitte.

Bei Flüssigfütterung war die NH₃-Emission tendenziell höher, die PM10-Emission tendenziell tiefer als bei Trockenfütterung. Doch diese Unterschiede waren statistisch nicht signifikant.

Der Einsatz von geschnittenem Stroh oder aufbereiteter Einstreu führte bei Teilspaltenboden im Sommer in der Mittelmast zu einer signifikanten Reduktion der NH₃-Emissionen im Vergleich zu Strohpresswürfeln. Bei den PM10-Emissionen konnten die Unterschiede mit höheren Werten bei aufbereiteter Einstreu nicht abgesichert werden.

Bei Vollspaltenboden mit Flüssigfütterung war die NH₃-Emission signifikant höher als bei Teilspaltenboden, die PM10-Emission war tendenziell tiefer, statistisch jedoch nicht signifikant.

Ergebnisse bei neuen Stallsystemen mit eingestreutem Liegebereich und Auslauf

Für das Stallsystem mit eingestreutem Liegebereich und Auslauf ergab sich in der Endmast eine Bandbreite zwischen hohen Emissionswerten im Sommer von 8755-17263 mg NH₃/GVE·h sowie 251-444 mg PM10/GVE·h und tiefen Emissionswerten im Winter von 741-3011 mg NH₃/GVE·h sowie 52-194 mg PM10/GVE·h. Die Messungen erfolgten unter extremen Temperaturbedingungen im heissen Sommer und im kalten Winter. Im Sommer dominierte der Auslauf mit mehr als 80 % der NH₃- und PM10-Emission. Im Winter machte der Auslauf 18 % (4 bis 67 %) der gesamten NH₃-Emission und 16 % (7 bis 60 %) der PM10-Emission aus.

Die Unterschiede der NH₃- und PM10-Emission zwischen den einzelnen Tagen waren grösser als die Unterschiede zwischen den einzelnen Varianten. Im planbefestigten Auslauf war die NH₃-Emission höher und die PM10-Emission tiefer als im teilperforierten, doch diese Unterschiede waren nicht signifikant.

Ansätze zur Emissionsminderung

Als signifikante Einflussfaktoren auf die NH₃-Emissionen in den traditionellen Stallsystemen resultierten die Lebendmasse der Tiere, die Temperatur und Luftfeuchtigkeit der Zuluft. Zur Emissionsminderung eignet sich daher die Kühlung der Zuluft im Sommer (z. B. Ansaugen der Zuluft im Schatten, Erdwärmetauscher, Sprühkühlung). Auch Phasenfütterung mit reduziertem Rohproteingehalt ist geeignet.

Bei der Minderung der PM10-Emissionen spielt die Feuchtigkeit im Stall eine wichtige Rolle. PM10 stammt vor allem von der Haut der Tiere. Eine feuchte Bodenfläche hemmte die Aufwirbelung von Partikeln deutlich. Als eine Massnahme zur Emissionsminderung von PM10 ist das Versprühen von Öl zu prüfen.

Beim Stallsystem mit Auslauf korrelierten die Lufttemperatur, die Luftfeuchtigkeit sowie die Windgeschwindigkeit mit den NH₃- und PM10-Emissionen im Auslauf. Um direkte Sonneneinstrahlung während des Tages zu vermeiden, sollte die Auslauffläche im Sommerhalbjahr beschattet werden. Auch die Luftgeschwindigkeit über dem Boden sollte reduziert werden.

Entwicklung des Schweinebestandes und der Tierhaltungsprogramme

Der Gesamtschweinebestand in der Schweiz war von 1990 bis 1996 rückläufig und seither wieder steigend. Im Jahr 2003 lag die Beteiligung im RAUS-Programm (Regelmässiger Auslauf von Nutztieren im Freien) bereits bei 43,2 % des Schweinebestandes in Grossvieheinheiten und im BTS-Programm (Besonders tierfreundliche Stallhaltungssysteme) bei 45,7 %.

Abschätzung der Stallemissionen in der Schweiz

Von den Untersuchungen wurden Emissionsfaktoren als arithmetisches Mittel bzw. Median sowie Minimum und Maximum abgeleitet. Traditionelle Stallsysteme in der Schweinemast ergaben als arithmetisches Mittel 2,69 kg NH₃/Tier·Jahr (2,36-3,06) sowie 0,14 kg PM10/Tier·Jahr (0,11-0,17). Das neue Stallsystem mit Auslauf variierte zwischen 3,76-10,39 kg NH₃/Tier·Jahr (Median 5,55) und 0,15-0,34 kg PM10/Tier·Jahr (Median 0,20).

Bei den Mastschweinen ergab sich bei den NH₃-Emissionen von 1990 mit 2403 t/Jahr bis 1995 ein Rückgang auf 1750 t/Jahr und seither wieder ein kontinuierlicher Anstieg auf 2949 t/Jahr im Jahr 2003 bedingt durch die starke Zunahme beim Tierhaltungsprogramm RAUS. Die PM10-Emissionen wiesen dieselbe Entwicklung auf (1990 121 t/Jahr; 1995 88 t/Jahr; 2003 122 t/Jahr).

2. Projektauftrag und Kenntnisstand

2.1 Projektauftrag und -ziele

Im Rahmen der Agrarpolitik AP 2002 werden tierfreundliche Haltungssysteme mit Beiträgen gefördert (BTS-Verordnung 1998, RAUS-Verordnung 1998). Diese Haltungssysteme sind gekennzeichnet durch

- mehr Bewegungsraum für die Tiere und damit entsprechend grösseren mit Exkrementen verschmutzten Flächen,
- das Angebot von Auslaufflächen, was die Freisetzung von Ammoniak vor allem in der warmen Jahreszeit begünstigt,
- vermehrten Einsatz von Stroh, mit dem Risiko einer erhöhten Staub- und insbesondere Mykotoxinbelastung,
- freie Lüftung, was technische Massnahmen der Abluftreinigung erschwert.

Bei diesen Stallsystemen fehlen Angaben zu Emissionswerten von Ammoniak NH_3 und Staub PM_{10} . Systematische Untersuchungen sind notwendig, um das Ausmass der Emissionen bei einer stärkeren Verbreitung dieser Haltungssysteme abzuschätzen und allfällige Minderungs-massnahmen vorzuschlagen.

Als Ziele dieses Forschungsprojektes waren gemäss der Projektofferte vom 11.04.2001 formuliert:

- Vergleich der Emissionen von Ammoniak NH_3 und Staub PM_{10} von neuen Haltungssystemen mit traditioneller Stallhaltung für Schweine und Rindvieh.
- Ermitteln der NH_3 - und PM_{10} -Emissionen aus traditionellen Systemen.
- Evaluierung und Entwicklung geeigneter Messmethodik für neue, offene Stallsysteme und Ausläufe.
- Aufzeigen von Ansätzen zur Emissionsminderung und Beurteilung ihrer Wirkung.

Als Ergebnisse sollten Entscheidungsgrundlagen für die Bewilligungsbehörden über die Emissionswirkung verschiedener Systeme resultieren. Für deren Aussagekraft spielt dabei die Zuverlässigkeit der Grundlagen aus der Literatur und die erreichbare Messgenauigkeit in eigenen Untersuchungen eine ganz wesentliche Rolle. Die Untersuchung der frei gelüfteten Systeme erforderte umfangreiche methodische Entwicklungsarbeit. Die Erarbeitung der geeigneten Messmethodik nahm deshalb gerade in der Anfangsphase des Projektes einen wichtigen Raum ein. Nach Ende des ersten Drittels der Projektlaufzeit erfolgte der Entscheid, den Schwerpunkt der eigenen Untersuchungen auf die Schweinehaltung zu legen. Rindviehhaltung wurde in der Literaturübersicht berücksichtigt. Emissionen der Rindviehhaltung, vor allem mit Laufhöfen und geeignete Minderungs-massnahmen sollen in einem nachfolgenden Projekt untersucht werden.

Im Folgenden werden in der Literatur vorhandene Angaben zur Emission von NH_3 und PM_{10} in der Rindvieh- und Schweinehaltung aufgezeigt. Für den Bereich der Schweinehaltung folgt eine Literaturübersicht über Massnahmen zur Emissionsminderung. Weiter wurden Anforderungen

an Methoden zur Emissionsmessung und Versuchsplanung formuliert. Typische Stallsysteme in der Schweinemast wurden mit Blick auf ihre Verbreitung in der Schweiz beschrieben.

2.2 Verbreitung der Stallsysteme in der Schweiz

Für die Auswahl von Stallsystemen für Emissionsmessungen ist die Kenntnis von deren Verbreitung in der Praxis wichtig. Vom gesamten Viehbestand in der Schweiz machte im Jahr 2002 Rindvieh 74 % der Grossvieheinheiten aus, Schweine 15,3 % (Schweizerischer Bauernverband 2002). Dies bedeutet auch, dass der Grossteil der NH_3 -Emissionen vor allem auf die Rindviehhaltung zurückzuführen ist. In den letzten acht Jahren kam es in der Tierhaltung in der Schweiz zu deutlichen Veränderungen. Bei besonders tierfreundlichen Stallhaltungssystemen BTS handelt es sich um Mehrflächen-Haltungssysteme mit eingestreutem oder gleichwertigem Liegebereich (BTS-Verordnung 1998). Im RAUS-Programm haben die Tiere Zugang zu einem Laufhof, einem Auslauf oder einer Weide (RAUS-Verordnung 1998). Gemäss dem Agrarbericht 2003 des Bundesamtes für Landwirtschaft (BLW 2003) betrug 2002 die Beteiligung am RAUS-Programm des Bundes bei Rindvieh bereits 62,3 %, bei Schweinen 49,4 % bezogen auf Grossvieheinheiten der beitragsberechtigten Betriebe (die Direktzahlungen erhalten haben). Die Beteiligung am BTS-Programm machte bei Rindvieh 24,7 %, bei Schweinen 52,7 % bezogen auf Grossvieheinheiten aus.

Verlässliche aktuelle Statistiken zur Verbreitung der verschiedenen Stallsysteme in der Schweinemast in der Schweiz fehlten zu Projektstart. Daher wurde im Rahmen eines Expertengesprächs im April 2002 mit einem Vertreter der Suisseporcs, einem Futtermittellieferanten, zwei Vertretern vom Schweinegesundheitsdienst sowie Fachpersonen von Agroscope FAT Tänikon eine Schätzung über das Vorkommen der Stallsysteme und wichtige Managementaspekte vorgenommen.

Bei den als traditionelle Stallsysteme in der Schweinemast bezeichneten Voll- und Teilspaltenställen handelt es sich um wärme gedämmte Gebäude mit Zwangslüftung (Tab. 2.1). Auf den meisten Betrieben wird das Futter flüssig verabreicht. Die Belegung erfolgt meist im Rein-Raus-Verfahren, überwiegend abteilweise. Als Beschäftigungsmaterial werden häufig Strohpresswürfel eingesetzt. Flüssigentmischung herrscht vor.

Der Anteil Mastschweine in neuen Stallsystemen mit Auslauf betrug 2002 bereits über 40 % (Tab. 2.2). Vor allem bei Umbaulösungen von Ställen mit Teilspaltenboden oder Buchten mit separatem Kotplatz wurde ein Auslauf ergänzt. Bei Neubauten werden eher Ställe ohne Zwangslüftung mit geschütztem Liegebereich (Mikroklima) mit nicht überdachtem Auslauf gewählt. Die Liegefläche ist eingestreut. Gemäss Vorgaben von Coop NATURAplan (2003) muss im Auslauf der Festbodenanteil mindestens 70 % betragen. Die Reinigung des Auslaufs erfolgt meist von Hand, einmal täglich oder seltener. Sowohl Flüssig- als auch Trockenfütterung sind weit verbreitet. Eine kontinuierliche Belegung der Ställe ist am häufigsten.

Schnider (2002) weist für das Jahr 2000 bei traditionellen Stallsystemen eine mittlere Bestandesgrösse von 147 Mastschweinen anhand der Angaben des Bundesamtes für Statistik BFS aus; Betriebe mit neuen Stallsystemen und den Tierhaltungsprogrammen BTS und RAUS der AGIS-Datenbank waren mit einer mittleren Bestandesgrösse von 109 Tieren kleiner (Tab. 2.3). Wäh-

rend in der Deutschschweiz häufiger Umbauten vorgenommen werden, sind in der Westschweiz vor allem Neubauten und grössere Bestände anzutreffen. Auch die Tierzahl pro Bucht ist sehr unterschiedlich: In traditionellen Ställen sind Kleingruppen üblich, während in neuen Stallsystemen eher Grossgruppen gehalten werden. Mehrphasenfütterung mit reduziertem Rohproteingehalt ist bisher kaum verbreitet.

Tab. 2.1: Verbreitung traditioneller Stallsysteme in der Schweinemast im Jahr 2002

Anteil Tiere	60 %	
Stallsystem	Vollspalten	Teilspalten / Sep.Kotplatz
Wärme gedämmt	100 %	100 %
Zwangslüftung Freie Lüftung/Aussenklima	100 % 0 %	100 % 0 %
Mit Auslauf	0 %	0 %
Flüssig- Trocken- Breifütterung	100 % 0 % 0 %	85 % 15 % 0 %
Rein-Raus Abteilweise Rein-Raus Kontinuierliche Belegung	15 % 70 % 15 %	10 % 75 % 15 %
Einstreu bzw. Beschäftigung	Strohpresswürfel	Stroh u. Strohpresswürfel

Tab. 2.2: Verbreitung von neuen Stallsystemen in der Schweinemast im Jahr 2002

Anteil Tiere	40 %		
Stallsystem	Teilspalten/ separater Kotplatz	Geschützter Liegebereich/ Mikroklima/Ruhekisten	Tiefstreu/Kompost
Wärme gedämmt	100 %	100 %	0 %
Zwangslüftung Freie Lüftung / Aussenklima	100 % 0 %	0 % 100 %	10 % 90 %
Mit Auslauf davon perforiert		100 % 30 %	
0 %		60 %	
1-30 %		10 %	
31-100 %			
Flüssig- Trocken- Breifütterung		45 % 40 % 15 %	
Rein-Raus Abteilweise Rein-Raus Kontinuierliche Belegung		25 % 0 % 75 %	
Einstreumenge	0,2-0,4 kg/Tier·d		0,6 kg/Tier·d

Tab. 2.3: Angaben zum Management in der Schweinemast im Jahr 2002

	Traditionelle Stallsysteme	Neue Stallsysteme
Bestandesgrösse	Grösser	Kleiner
Anteil Neu- bzw. Umbau	Keine Neubauten mehr	In West-CH vor allem Neubau (20-30 % der Tiere), in Ost-, Zentral-CH vor allem Umbau (70-80 % der Tiere)
Gruppengrösse	<15 Tiere (Ø 9)	Neubau: 20-30 Tiere Umbau: 20-50 Tiere
Geschlechtsgetrennt	Vorwiegend	Weniger
Umstallen zur Ausmast	Bei Vollspaltenboden nicht, bei Teilspaltenboden 60 %	Bei Rein-Raus weniger Umstallen, kontinuierlich mehr Umstallen
	33 % der Tiere	Bei Neubau 20 % der Tiere, bei Umbau nicht
Fütterung rationiert	100 %	Neubau: 80 % Umbau: 50 %
Fütterung ad libitum	0 %	Umbau: 50 % (Vormast ad lib.)

2.3 Emissionen aus der Tierhaltung

Die Tabellen A1-A4 im Anhang ermöglichen eine Übersicht über Resultate der internationalen Literatur zu Emissionen von NH₃ und PM10 aus der Milchvieh- und Schweinehaltung. Neben der untersuchten Tierkategorie, dem Stallsystem und Angaben zur Fütterung sind jeweils Messdauer und -methode aufgeführt. Durchschnittliche Lufttemperaturen und Luftvolumenströme von Winter- und Sommermessungen sowie Emissionswerte sind darin berücksichtigt. Nur ein kleiner Teil der in der Literatur zitierten Studien erfüllt die in Kapitel 2.5 beschriebenen Anforderungen an Messmethoden und Versuchsplanung. Die Versuchsansätze in den einzelnen Studien waren sehr unterschiedlich, was deren Vergleichbarkeit erschwert.

Bei Milchviehställen liegen die NH₃-Emissionen im Anbindestall zwischen 240 mg/GVE·h (Amon et al. 1998) und 800 mg/GVE·h (Groot Koerkamp et al. 1997) (Tab. A1). Bei Laufställen mit Zwangs- oder freier Lüftung sind die Unterschiede mit einem Schwankungsbereich zwischen 260 (Seedorf et al. 1998a, b) und 3560 mg/GVE·h (Seipelt 1999) sehr gross. Bezogen auf eine Grossvieheinheit sind die NH₃-Emissionen bei Schweinen grösser als bei Rindvieh.

Die Resultate der NH₃-Emissionen bei Mastschweinen variieren um mehr als das zwanzigfache von 736 (Kaiser et al. 1998) bis über 14800 mg/GVE·h (Rathmer 2002, Tab. A2). In Stallsystemen mit freier Lüftung waren die Emissionen tendenziell geringer. Untersuchungen von Ställen mit Auslauf lagen nicht vor.

Für PM10 liegen weniger Daten vor, aber auch hier sind die Unterschiede zwischen den einzelnen Studien beträchtlich. Bei Milchvieh variieren sie im Laufstall zwischen 6 bis 84 mg/GVE·h (Seedorf et al. 1998 a, b), während sie bei Mastschweinen mit 34 bis 133 mg/GVE·h höher sind (Seedorf et al. 1998 a, b). Für Stallsysteme mit freier Lüftung lagen kaum Daten vor.

Eine Literaturübersicht von Klimont et al. (2002) zum prozentualen Anteil von PM10 am Gesamtstaub (Total Suspended Particles TSP) weist für Schweine Werte von 40 % bzw. 45 % aus.

Tabelle A1.5 im Anhang zeigt als Übersicht, in welchen Tierkategorien und Stallsystemen Emissionsuntersuchungen für NH₃ und PM10 vorliegen. Umfangreiche NH₃-Untersuchungen gibt es in der Schweinemast mit Vollspaltenboden. Andere Haltungsformen oder Tierkategorien sind nur vereinzelt oder nicht untersucht worden. In der Milchviehhaltung herrscht vor allem freie Lüftung vor, Zwangslüftung ist eher selten. Aufgrund methodischer Schwierigkeiten zur Quantifizierung des Luftwechsels bei freier Lüftung fehlen abgesicherte, aussagekräftige Emissionsuntersuchungen. Bei PM10 liegen nur vereinzelt punktuelle Messungen vor.

2.4 Massnahmen zur Emissionsminderung in der Schweinehaltung

2.4.1 Ammoniak

Tabelle A6 im Anhang enthält eine Zusammenfassung der Forschungsarbeiten zur Minderung der NH₃-Emissionen bei Schweinen. Die Minderungsansätze wurden in sechs Kategorien eingeteilt: Abluftreinigung, unterschiedliche Proteingehalte im Futter oder Austausch von Futterkomponenten, Verwendung von Futterzusätzen, Haltungsform, Lüftung, Management sowie Gülle- oder Einstreuzusätze.

Mit Hilfe von Biowäschern können Emissionen aus der Abluft reduziert werden (Hahne 1998). Allerdings ist diese Methode nur für Stallsysteme mit Zwangslüftung und zentraler Abluftführung bei erhöhten Kosten geeignet.

Durch Phasenfütterung mit abgestuften Proteingehalten können Emissionen reduziert werden. Die auf dem Markt üblichen Futterrationen für Schweine enthalten tendenziell eine Sicherheitsmarge an Rohprotein, welche über dem Bedarf liegt. Schweine in der Vor- und Mittelmast benötigen höhere Gehalte an Protein und essentiellen Aminosäuren als Schweine in der Endmast. In der Endmast sind 14 % Protein in der Trockenmasse normalerweise ausreichend. Kay und Lee (1997) konnten die Emissionen im Vergleich zu handelsüblichem Futter um etwa 50 % reduzieren, indem sie den Proteingehalt zwischen Versuchs- und Referenzgruppe um 6 % variierten. Das von Kay und Lee (1997) verwendete handelsübliche Futter entsprach eher dem Futter in der Schweiz, als jenes in der Studie von Pfeiffer et al. (1993). Bei Reduktion des Proteingehaltes um nur 1 % in der Vor- und Mittelmast sowie um 1,5 % in der Endmast konnten die Emissionen um 23 % gesenkt werden. Änderungen der Futterration erfordern zwar keine baulichen Massnahmen, allerdings sind Mehrkosten für das Futter mit reduziertem Proteingehalt, kleinere Chargen und getrennte Futterlager zu berücksichtigen.

Eine Reduktion des pH-Wertes der Gülle bietet eine weitere Möglichkeit zur Emissionsminderung. Zum Beispiel wirkt sich der Einsatz von Zuckerrübenschnitzel auf das Kohlenhydrat-Protein-Verhältnis im Dickdarm aus (Canh et al. 1997). Auch kleine Mengen an organischen Salzen als Futterzusatz können die Emissionen um mehr als 50 % verringern. Die Salze Calciumchlorid, -sulfat und -benzoat wurden getestet, wobei Calciumbenzoat am wirkungsvollsten war (Canh et al. 1998). Die Auswirkungen auf den Verdauungsapparat sind bisher nicht genau bekannt.

Möglicherweise erhöhen sie die Aufnahme von Wasser. Weitere Studien sind erforderlich, um Tierleistungen sowie die Emissionen zu untersuchen.

Durch geeignete bauliche Massnahmen gelangen Kot und Harn vom Boden schneller in den Güllenkanal. Dazu zählen Kotspalten an der Buchtenwand, geneigte planbefestigte Böden oder Spaltenböden mit grösseren Öffnungen. Die Verwendung von geneigten Flächen ist in der Praxis bereits verbreitet. Für die Vergrösserung der Spaltenweiten um bis zu 20 % sind Bodenelemente aus Metall oder Kunststoff als Ersatz für Beton erforderlich, was zu höheren Investitionen führt. Beim Einsatz von Teilspaltenböden mit bis zu 50 % Schlitzanteil können die Emissionen um 30 % reduziert werden (Aarnink et al. 1997). Zur Entmistung von Güllenkanälen eignen sich Schieber oder das Spülen, um frisch angefallene Gülle möglichst häufig aus den Kanälen in eine Sammelgrube zu befördern. Schieber im Güllenkanal erfordern eine glatte Fläche (z. B. Epoxidbeschichtung), um den Kanal gründlich zu reinigen (Groenestein 1994). Auch die Verwendung von V-förmigen Metallrinnen im Güllenkanal kann die Emission von Güllenoberflächen reduzieren. Die Bandbreite der Emissionsreduktion ist gross und variiert von 8 bis 53 % (den Brok und van Dijk 1994). Im Gegensatz zu Massnahmen bei der Fütterung hängt die Wirksamkeit dieser baulichen und verfahrenstechnischen Massnahmen von der Ausführung der bestehenden Ställe ab. Bei Umbauten können die Anpassungsmöglichkeiten begrenzt sein.

Die Schaffung eines separaten Mikroklimas wie z. B. Ruheboxen im Liegebereich ermöglicht eine Trennung des Kotbereichs (Gallmann 2003). In Kombination mit Schwerkraft-Schachtlüftung konnten die Emissionen gegenüber Vollspaltenboden mit Unterflurabsaugung um 32 % gesenkt werden.

Massnahmen im Bereich Management umfassen die Häufigkeit der Buchtenreinigung und Entleerung der Güllenkanäle sowie die Verwendung von verschiedenen Einstreutypen in Tiefstreu-ställen. Im Vergleich zu Vollspaltenställen mit tiefem Güllen Keller gelang es Hoeksma et al. (1992), die Emissionen durch mehrmals tägliches Entleeren oder Spülen von 0,4 m tiefen Güllenkanälen um mehr als 60 % zu senken. Auch Systeme zur mehrmaligen Entleerung der Güllenkanäle pro Woche erlaubten eine deutliche Reduktion der Emissionen. Im Kompoststall zeigte Kaiser (1999) auf, dass das Substrat, die Belüftung des Kompostes und insbesondere die Regulierung der Feuchtigkeit wichtig sind.

Die Verwendung von Güllenzusätzen hängt von deren Wirksamkeit und den Kosten ab. Eine Schwimmschicht aus Mineralöl auf der Gülle konnte die Emissionen reduzieren (Aarnink u. Wagmans 1997). Resultate einer Laborstudie (Derikx u. Aarnink 1993) und einer Praxisuntersuchung (Pahl et al. 2000) haben gezeigt, dass die Ölschicht eine gewisse Dicke erreichen muss, um die Emissionen wirksam zu reduzieren. Die Reduktion betrug über 40 % bei der Verwendung von Fritieröl, pflanzlichem oder Mineralöl. Bei Tiefstreu systemen können Zusätze in der Einstreu verwendet werden, wobei sich bei den Emissionen unterschiedliche Resultate zeigten und ein Anstieg der N₂O-Emissionen möglich ist (Thelosen et al. 1993).

Es konnten keine Studien gefunden werden, welche die Reduktion der NH₃-Emissionen in Stall systemen mit Auslauf untersuchten. Auch gab es bisher keine Untersuchung, in der die Einstreu in Praxissystemen variiert wurde.

2.4.2 Staub PM10

Tabelle A7 im Anhang zeigt die Resultate von Untersuchungen zur Reduktion der Staubkonzentrationen. Der Schwerpunkt der Minderungsstrategien lag bisher bei der Verminderung der Staubkonzentration der Stallluft, mit der Annahme, dass sich dies auch auf die Emission auswirkt. Nur von wenigen Untersuchungen liegen Staubemissionen vor. Die gemessenen Staubfraktionen umfassten nicht nur PM10. Daher wird in Tabelle A7 die Bezeichnung der jeweiligen Autoren verwendet.

Die Untersuchungen können in zwei Bereiche eingeteilt werden: einerseits die Fütterung und andererseits das Sprühen von Öl oder Wasser im Stall. Das Verfüttern von Fetten oder Ölen reduziert die Staubkonzentration im Stall um ungefähr 40 %, wobei die Wirkung auf die verschiedenen Staubfraktionen nicht klar ist (Chiba et al. 1987, Welford et al. 1992, Takai et al. 1998). Auch Futterpellets mit einer Fettschicht führten bei Trockenfütterung zu einer Verringerung von Staub (Li und Owen 1997). Im Vergleich zur mehlförmigen Trockenfütterung konnte mit Flüssigfütterung die Feinstaubkonzentration um 35 % reduziert werden (Zeitler et al. 1987). Bei Pellets war der Effekt jedoch unbedeutend.

Das Sprühen von reinem Öl oder einer Öl/Wasser-Emulsion sowie einem Emulgator führte zu einer beachtlichen Reduktion der Staubkonzentrationen um 50 % bis 92 % (Godbout et al. 2000). Das Öl wurde über den Fütterungsautomaten entweder über kurze Zeit während der Fütterung oder in bestimmten Abständen über den Tag hinweg versprüht. Der Einfluss auf die Tiere und die Trockenheit der Flächen wurde teilweise von Takai et al. (1993) untersucht. Er fand keine negativen Auswirkungen bei Lungenuntersuchungen von Schweinen.

2.5 Anforderungen an Messmethoden und Versuchsplanung

Im Anhang in den Tabellen A1-A4 sind Resultate der internationalen Literatur zu Emissionen von NH₃ und PM10 aus der Schweine- und Rindviehhaltung aufgeführt. Auch bei gleichen Stallsystemen kam es in verschiedenen Messungen zu einer sehr grossen Variation der Resultate (Kap. 2.3). Daher wurden die folgenden Anforderungen für Emissionsmessungen abgeleitet:

- Die Messausstattung muss vor Beginn der Versuche mit Blick auf den Einsatzbereich ausgewählt, getestet und kalibriert werden. Entweder fehlen die entsprechenden Angaben zu Hintergrundkonzentrationen oder diese wurden in vielen Studien nicht systematisch erfasst. Diese sollten jedoch gemessen und von den Abluftkonzentrationen abgezogen werden. Der wichtigste Einflussfaktor für die Erfassung von präzisen Emissionsdaten ist die kontinuierliche Messung der Lüftungsrate.
- Nach Möglichkeit sollten vergleichende Messungen zeitgleich erfolgen. Um Klimaeffekte auszuschalten, ist dies bei der Messung von Emissionen aus Stallsystemen mit Auslauf besonders wichtig. In praktisch allen Studien waren die Werte im Sommer höher als im Winter, daher sollten als Mindestanforderung Emissionsmessungen stets im Sommer und im Winter erfolgen, um die Bandbreite besser abdecken zu können. Messungen sollten während mehreren Tagen kontinuierlich durchgeführt werden, da bei Kurzzeitmessungen tageszeitliche Schwankungen der Emissionen oder Managementaspekte nicht berücksichtigt werden.

- In den meisten Studien werden die Daten nur pro Grossvieheinheit oder nur pro Tier angegeben. Um die Messungen mit anderen Studien vergleichen zu können, sind beide Einheiten zu berücksichtigen. Denn die Emissionen pro Grossvieheinheit sind aufgrund der Gewichtsunterschiede zwischen Vor- und Endmast im Vergleich zu den Werten pro Tier in der Vormast höher als in der Endmast. Wichtig ist, dass während dem Messzeitraum das Tiergewicht bekannt und für die jeweilige Tierkategorie typisch ist. Erst dies macht die Ergebnisse mit anderen Studien vergleichbar.
- Bei der Auswahl von Schweineställen für Emissionsmessungen spielt neben der Art der Luftführung auch die Fütterung eine wichtige Rolle. Es empfiehlt sich, die Emissionsmesswerte zur Kontrolle mit einer N-Bilanz zu vergleichen. Dazu sind der Zuwachs an Lebendmasse, der Futtermittelverzehr, die N-Mengen und -Gehalte in Futter und Gülle zu erfassen und zu analysieren.

3. Messmethodik bei Zwangslüftung

3.1 Ammoniak

Gemäss der schweizerischen Emissionsmessempfehlung (BUWAL 2001) erfolgt die Bestimmung von Ammoniak mittels anreichernder Probenahme in Schwefelsäure. Werden dabei Impinger verwendet, so wird die Summe von Ammoniak sowie gas- und partikelförmiger Ammoniumverbindungen erfasst. Für die kontinuierliche Bestimmung gibt es kein Referenzverfahren. Die hier verwendete Fourier-Transform Infrarotspektroskopie (FTIR) hat sich jedoch in verschiedenen Anwendungen bewährt (Emmenegger et al. 2004a, Hinz u. Linke 1998).

3.1.1 Impinger (anreichernd)

Impinger basieren auf einer starken Beschleunigung und anschliessenden Umlenkung des Gasstroms (Abb. 3.1). Dadurch werden einerseits die trägen Partikel auf einer Prallplatte abgeschieden, andererseits entstehen feine Gasblasen, aus denen die zu absorbierenden Substanzen in die wässrige Phase diffundieren und zurückgehalten werden (Hinds 1999).

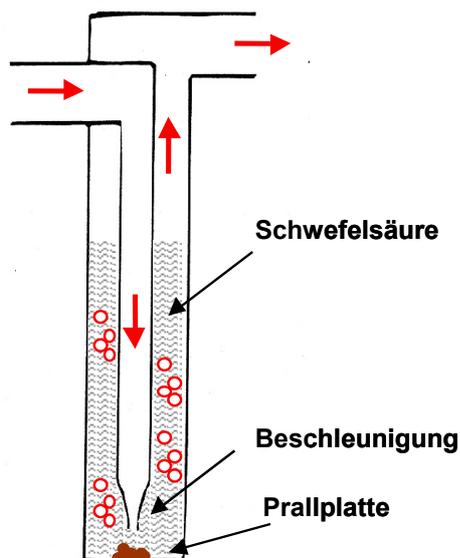


Abb. 3.1: Schematische Darstellung eines Impingers.

Der Abluft wurde über einen Teflonschlauch ein Teilvolumenstrom (ca. 2 l/min) mit einer geregelten Pumpe (Gil Air 5, Sensidyne, Clearwater, USA) entnommen und durch zwei in Serie geschaltete Impinger und einen Tropfenabscheider geleitet. Die Impinger wurden speziell für diese Untersuchungen von einem Glasbläser (Möller AG, Oerlikon, Schweiz) hergestellt. Ziel war neben guten Absorptionseigenschaften ein kleines Probevolumen, um eine tiefe Nachweisgrenze zu erreichen. Bei den verwendeten Impingern wurde bei einem Probevolumen von 20 ml mehr als 95 % der analysierten Ammoniakmenge in der ersten Flasche zurückgehalten. Die Schwefelsäurekonzentration wurde so gewählt, dass die Säurekonzentration mindestens das 5-fache der erwarteten NH_3 -Konzentration betrug. Diese Konzentration garantierte eine vollständige

Absorption, ohne die nachfolgende Analytik zu beeinträchtigen. Sie betrug 0,1 M H₂SO₄ im ersten Impinger der zwangsbelüfteten Ställe und 0,001 M H₂SO₄ bei der freien Lüftung. Aufgrund der guten Absorptionseigenschaften wurde der zweite Impinger nur während der ersten Versuche getrennt analysiert.

Für die Analytik der wässrigen Lösung wurde in einer Voruntersuchung sowohl die photometrische Bestimmung (Indophenolmethode, Merck) als auch Ionenchromatographie verwendet. Die Werte wiesen mit Abweichungen von weniger als 3 % eine sehr gute Übereinstimmung auf. Aufgrund der besseren Qualitätssicherung und Automatisierung wurde der Ionenchromatographie (Ionenchromatograph Dionex DX500 mit Kationensäule und chemischer Suppression) für alle weiteren Messungen der Vorzug gegeben.

Die analytische Nachweisgrenze in der sauren Lösung betrug 0,02 mg/l. Bei Felduntersuchungen ist die Nachweisgrenze durch Probenblindwerte gegeben. Sie beträgt zirka 0,1 mg/l. Bei einer 24 h Probennahme ergibt dies eine Nachweisgrenze von 0,02 mg/m³. Um sicherzustellen, dass in der unbeheizten Probenahmeleitung keine Adsorption von Ammoniak oder Ammoniumsalzen stattfindet, wurden die Schläuche am Ende der ersten Messkampagne mit verdünnter Säure extrahiert. Die darin gefundene Menge Ammonium entsprach weniger als 0,1 % der Gesamtkonzentration an Ammoniak.

3.1.2 Fourier-Transform Infrarotspektroskopie FTIR (kontinuierlich)

Die meisten gasförmigen Stoffe absorbieren Licht im mittleren Infrarotbereich. Diese Lichtabschwächung kann sowohl zur qualitativen, als auch zur quantitativen Bestimmung der jeweiligen Komponenten verwendet werden. Allerdings gibt es häufig keine Wellenlängenbereiche, in denen nur der gesuchte Stoff absorbiert. Deshalb müssen auch die anderen Substanzen bestimmt werden, welche unter Umständen interferieren können. Durch Linearkombination von bekannten Referenzspektren, mittels sogenannter classical-least-square (CLS)-Algorithmen, werden dann alle wichtigen Gaskomponenten quantifiziert. In Abbildung 3.2 ist als Beispiel das Infrarotspektrum der Luft in einem Schweinestall und das Ammoniak-Referenzspektrum dargestellt.

Für die Aufnahme der Referenzspektren wurden zertifizierte bzw. verdünnte Prüfgase verwendet oder Gasgemische durch kontinuierliche Injektion (Wasser) hergestellt. Die Referenzspektren wurden unter denselben spektroskopischen und instrumentellen Einstellungen wie die Messgasspektren aufgenommen. Zur Verdünnung der Prüfgase mit Stickstoff kamen Massenflussregler (MKS Instruments, Andover, USA) zum Einsatz. Bei der kontinuierlichen Injektion wurde mit Hilfe einer Schlauchquetschpumpe eine von der Software berechnete Flüssigkeitsmenge in einen Verdampfer (HOVACAL Kalibriergasgenerator, IAS GmbH, Frankfurt, Deutschland) dosiert. Für das Hintergrundspektrum diente Stickstoff als Nullgas.

Die Proben wurden mit ca. 2 l/min über ein Quarz Membranfilter (47 mm, MK 360, Munktell, Schweden) und Teflonleitungen abgesogen. Als Messgerät wurde ein Gasmet FTIR (Temet Instruments, Helsinki, Finnland) mit einem Peltier gekühlten Detektor und einer auf 40 °C thermostatisierten 9,8 m Gaszelle verwendet. Die ausgewerteten Spektralbereiche und Substanzen sind in Tabelle 3.1 dargestellt. Im vorgeschalteten Filter und in der Probenahmesonde wurden

nur Spuren an Ammoniak gefunden. In Laborversuchen wurde das Verhalten der Messzelle auf sprunghafte Änderungen (0-100 ppm) der NH₃-Konzentration untersucht. Bei einem Volumenstrom von 2 l/min wurden in weniger als zwei Minuten 90 % der maximalen Konzentration erreicht (t₉₀). Die Resultate waren unabhängig von der Temperatur der Probenahmeleitung (20-40 °C) und des Schlauchmaterials (PTFE, FEP). Aufgrund dieser Resultate wurden PTFE Schläuche verwendet und auf das Beheizen der Leitungen verzichtet. Eine leichte Verschleppung kann zwar nicht ausgeschlossen werden, ist aber bei den betrachteten Stallsystemen mit trägen Konzentrationsänderungen nicht relevant.

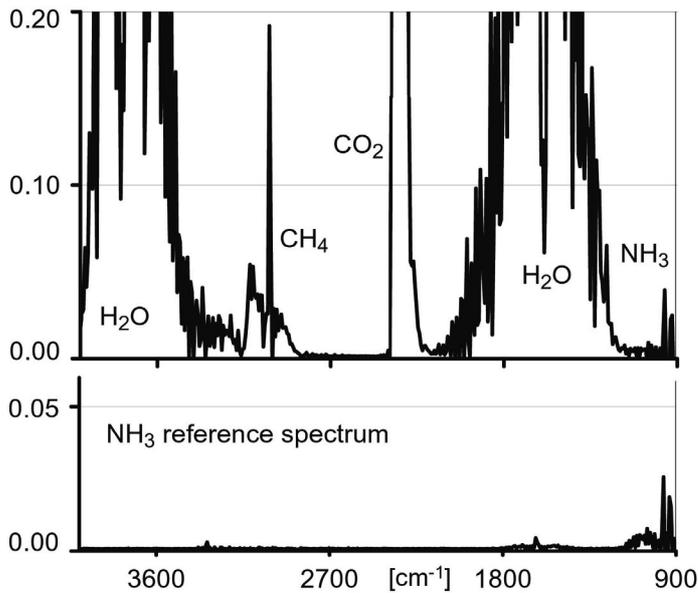


Abb. 3.2: Infrarotspektrum in einem Schweinestall. Die Konzentrationen der wichtigsten Gase betragen 17 ppm NH₃, 1 % H₂O, 610 ppm CO₂, 110 ppm CH₄.

Tab. 3.1: Ausgewertete Spektralbereiche (cm⁻¹) und berücksichtigte Interferenzen (x)

	NH ₃	H ₂ O	CO ₂	CO	CH ₄	N ₂ O
NH ₃	900-1050	X				
H ₂ O		3500-3600	X		X	X
CO ₂			2014-2223	X		X
CO		X		2000-2150		X
CH ₄		X			2800-2950	
N ₂ O		X			X	2500-2600 3450-3560

Während drei Messperioden (TS_EG_VM, TS_EG_MM, TS_EG_EM) wurden FTIR und Impinger parallel eingesetzt, wobei die FTIR-Ergebnisse deutlich höher lagen. Dem FTIR wurde daraufhin in einem Experiment ein Impinger seriell nachgeschaltet. Dadurch ist der direkte Vergleich von kontinuierlicher Messung und anreichernder Referenzmethode möglich. Bei diesem Versuch lag das FTIR 8 % tiefer als der Impinger. Die Differenzen konnten bisher nicht schlüssig erklärt wer-

den, sind aber möglicherweise auf die Probenahme oder auf unterschiedliches Verhalten gegenüber ammoniumhaltigen Partikeln zurückzuführen. Zudem stellte sich im Verlauf von weiteren Labormessungen heraus, dass sowohl die Elektronik, als auch das verwendete Interferometer fehlerhaft waren. Diese konnten später ausgetauscht werden. Der Geräteunterhalt und die Auswertung der FTIR-Messungen sind aufwändig und bedingen speziell geschultes Personal. Deshalb wurde entschieden, das FTIR-Messgerät nur zur Bestimmung von Tagesgängen im Hinblick auf das Verhalten der Tiere, Management- und eventuelle Minderungsmaßnahmen einzusetzen. Alle auf Tagesmittelwerten basierenden Emissionsfaktoren wurden mit der anreichernden Referenzmethode bestimmt.

Die Nachweisgrenze des Temet-FTIR beträgt ca. 0,5 ppm. Bei Konzentrationen unter 1 ppm hängt das Messergebnis stark von der Stabilität des Signalhintergrunds ab. Deshalb wäre bei tiefen Werten die Verwendung eines stickstoffgekühlten Detektors von Vorteil. Dadurch würde das Signal/Rausch-Verhältnis insbesondere bei tiefen Wellenzahlen deutlich besser. Für längere Messkampagnen ist die Verwendung von flüssigem Stickstoff jedoch zu aufwändig.

3.2 Staub PM10

Für die anreichernden Emissionsmessungen von Feinstaub mit einem aerodynamischen Durchmesser $<10\ \mu\text{m}$ (PM10) gibt es kein eigentliches Referenzverfahren. Es ist jedoch üblich, in Anlehnung an die Bestimmung von Gesamtstaub und an die Immissions-Messverfahren, eine gravimetrische Bestimmung nach Abscheidung der groben Partikel zu verwenden. Für die kontinuierliche Messung wurde mit Tapered-Element Oscillating Microbalance (TEOM) ein im Immissionsbereich erprobtes Verfahren eingesetzt.

3.2.1 Impaktor (anreichernd)

Die aerosolhaltige Probe wird mit einem definierten Volumenstrom in einer Düse beschleunigt und danach umgelenkt. Partikel $>10\ \mu\text{m}$ treffen aufgrund ihrer Trägheit auf eine geölte Prallplatte und werden darauf abgeschieden. Kleinere Partikel (PM10) bleiben im Gasstrom und werden auf dem nachfolgenden Filter zurückgehalten und gravimetrisch bestimmt. Die wichtigsten technischen Angaben sind in Abbildung 3.3 zusammengefasst.

Die verwendeten Impaktoren wurden für Anwendungen im Bereich der Arbeitsplatzhygiene entwickelt und zusätzlich für niedrige Luftgeschwindigkeiten validiert (Lai u. Chen 2000). Aufgrund der relativ hohen Konzentrationen eignen sie sich gut für den Stallbereich. Im Gegensatz zu den bei Immissionsmessungen üblichen high-volume Samplern können kleine, geregelte Pumpen verwendet werden. Dadurch ist es möglich, die Probenahme im Stallbereich zu montieren, ohne die Tiere zu stören. Um die Impaktoren zusätzlich vor grobem Staub sowie im Freien vor Regen oder hohen Luftgeschwindigkeiten zu schützen, wurde eine Aluminiumkappe entwickelt und aufgesetzt. Nach Optimierung von Filtern und Wägeverfahren wurde eine gute Reproduzierbarkeit erreicht. Die Nachweisgrenze, bestimmt aus Feldblindwerten, beträgt 0,1 mg bzw. $0,02\ \text{mg}/\text{m}^3$ bei Tagesmittelwerten.

Impaktor	PEM-200-4-10, MSP Corp.
Volumenstrom	4 l/min
Pumpe	GilAir 5, geregelt
Filter	S & S, GF 10 HY, 37 mm
Konditionierung	24 h, 22 °C, 50 % RH
Waage	Mettler AT 201, 0,01 mg



Abb. 3.3: Impaktor und technische Daten der Probenahme bzw. Gravimetrie.

3.2.2 Tapered-Element Oscillating Microbalance TEOM (kontinuierlich)

Beim Tapered-Element Oscillating Microbalance (TEOM) wird das Messgas durch einen Impaktor entnommen und durch ein Filterpapier gesaugt, auf dem die in der Luftprobe enthaltenen Partikel abgeschieden werden (Abb. 3.4). Der Filter ist am Ende einer schwingenden Hohlzylinder befestigt. Da die Eigenfrequenz dieses schwingenden Körpers von der Masse abhängig ist, lässt sich aus der Änderung der Eigenfrequenz die Masseänderung bzw. der Staubgehalt bestimmen. Es handelt sich also um eine „schwingende“ Mikrowaage.



Abb. 3.4: TEOM 1400 (Ruppert & Patashnick) und Hohlzylinder/Filter.

Grundsätzlich entspricht das TEOM einer kontinuierlichen Wägung. Allerdings ist diese nicht immer direkt vergleichbar mit der klassischen gravimetrischen Bestimmung, da das Gerät auf

einer sehr konstanten Temperatur - üblicherweise 40 °C - gehalten werden muss. Aufgrund der unterschiedlichen Flüchtigkeit der jeweiligen Proben muss deshalb für den Vergleich mit Referenzverfahren ein Korrekturfaktor bestimmt werden. Dieser ist für Immissionsmessungen gut bekannt. Für die hier verwendeten Emissionsmessungen im Stallbereich wurde der Korrekturfaktor jeweils aus den gravimetrischen Bestimmungen herangezogen. Es lassen sich daher mit dem TEOM sehr gut Konzentrationsverläufe messen, für die Bestimmung von Absolutwerten wäre jedoch eine Validierung für die jeweilige Situation nötig. Zudem kann das voluminöse Gerät normalerweise nicht direkt im Abluftstrom installiert werden. Dieses kontinuierliche Messverfahren wurde deshalb als Ergänzung zur anreichernden gravimetrischen Bestimmung in drei Messperioden eingesetzt.

3.3 Gesamt- und Schwebestaub

Zur Erfassung des Staubniederschlags wurde die Bergerhoff Methode nach VDI 2119 Bl. 2 (1996) verwendet. Dabei handelt es sich um eine gravimetrische Bestimmung. Während einer Messperiode (vier Tage) wurde in Bergerhoff-Töpfen, die an verschiedenen Orten im Stall (über und neben dem Tierbereich) aufgestellt waren, der trockene Niederschlag gesammelt. Nach dem Eindampfen wurde aus dem Rückstand die Menge des Staubniederschlags gravimetrisch ermittelt (EMPA 2000).

Als Schwebestaub wird jene Staubfraktion bezeichnet, welche durch einen horizontalen Filterhalter mit nach unten gerichteter Öffnung erfasst wird. Dies sind Partikel, deren Sinkgeschwindigkeit kleiner als die Geschwindigkeit der angesaugten Luft im Bereich des Filterhalters ist. Unter Annahme von kugelförmigen Partikeln mit einer Dichte von 1 gilt dies für Teilchen mit einem aerodynamischen Durchmesser $>43 \mu\text{m}$. Ein Luftvolumenstrom von 4 l/min wurde über einen Glasfaserfilter (S & S, GF 10 HY, 37 mm), welcher unterhalb des Abluftkanals montiert war, gesaugt. Der Filter wurde unter definierten Bedingungen (22 °C, 50 % rel. Feuchtigkeit) vor und nach der Probenahme gewogen. Die Schwebestaubkonzentration berechnet sich aus der Differenz der beiden Wägungen und dem Probeluftvolumen.

3.4 Luftvolumenstrom

Grundlage für die Bestimmung eines Emissionsfaktors ist der emittierte Massenstrom \dot{m} . Dieser wird wo möglich aus der Konzentration und dem Volumenstrom \dot{V} bestimmt, wobei c_{in} die ausserhalb des Stallsystems oder in der Zuluft zu findende Hintergrundkonzentration bezeichnet (Formel 1). In zwangsbelüfteten Stallsystemen werden die Gaskonzentrationen und der Volumenstrom direkt in der Abluft bzw. Zuluft gemessen.

$$\dot{m} = (c_{out} - c_{in}) \cdot \dot{V} \quad (1)$$

Der Luftvolumenstrom (m^3/h) wurde mit Messventilatoren (Fancom, B.V. Panningen, NL) gemessen. Ein im Messventilator integrierter Sensor liefert digitale Impulse, deren Frequenz f linear proportional mit dem Luftvolumenstrom ist. Pro Propellerblattumdrehung werden vier Impulse gesendet. Der Volumenstrom berechnet sich demnach aus Formel 2.

$$\dot{V} = \frac{f \cdot 60}{4} \quad (2)$$

Die Messventilatoren wurden unmittelbar unterhalb des Abluftventilators angebracht. Der Durchmesser der Mess- und Abluftventilatoren war jeweils identisch. Der Sensor des Messventilators war mit einem Datenlogger (Almemo-2290-8 V5, Ahlborn, D) verbunden. In Intervallen von einer Minute wurden die Daten gespeichert. Der Messfehler des Messventilators beträgt maximal 1 % bezogen auf den Messbereich.

3.5 Klimaparameter

In Tabelle 3.2 ist eine Übersicht über die in den Versuchen erfassten Klimaparameter und die dabei eingesetzten Messprinzipien dargestellt.

Tab. 3.2: Übersicht über Klimaparameter und die verwendete Messmethodik

Parameter	Messort	Messprinzip	Auflösung	Frequenz
Lufttemperatur	Güllekanal	NTC, Hobo (Onset, Bakrona, Zürich)	0,2 °C	10 Min.
Lufttemperatur, rel. Luftfeuchtigkeit	Zuluft, Abluft; Auslauf	NTC, Hotdog (Elpro, Buchs)	0,3 °C	10 Min.
Lufttemperatur, rel. Luftfeuchtigkeit	Im Freien	NTC, kapazitiver Dünnschichtsensor, ALMEMO FH A646 AG (Ahlborn, Holzkirchen, D)	0,1 °C 2 %	1 Min.
Windgeschwindigkeit	Auslauf	Hitzdrahtanemometer (Schmidt Feintechnik, St. Georgen, D)	+/- 2 %	1 Min.
Windgeschwindigkeit, -richtung	Im Freien	2-Achsen-Ultraschallanemometer, WindObserver II (Gill, Hampshire, GB)	0,01 m/s 1 °	1 Min.

4. Untersuchungen bei traditionellen Stallsystemen

Nach einer Übersicht und Beschreibung der einzelnen Versuchsvarianten werden die Ergebnisse der Emissionen von NH₃ und PM10 in traditionellen Stallsystemen aufgezeigt. Als Ergänzung dient die Schweb- und Gesamtstaub-Konzentration. Diese Parameter wurden zusätzlich bestimmt, weil sie besser als PM10 das subjektive Empfinden des Menschen beim Aufenthalt im Stall wiedergeben. Die menschliche Wahrnehmung wird vor allem durch grobe Staubfraktionen geprägt.

4.1 Übersicht der Versuchsvarianten

Das folgende Kapitel beschreibt die untersuchten traditionellen Stallsysteme in der Schweinemast und stellt die Versuchsvarianten sowie die Erhebungsparameter vor. Die beiden häufigsten Stallsysteme, zwei Fütterungssysteme, eine Beschäftigungs- und eine Einstreuart mit Stroh sowie ein neuartiges Einstreuverfahren wurden getestet (Tab. 4.1). Die Datenaufnahme verteilte sich auf Sommer- und Wintermessperioden, um Klimaeinflüsse zu integrieren und die Emissionsfaktoren über das ganze Jahr beurteilen zu können. Die Messungen fanden an jeweils vier aufeinanderfolgenden Tagen statt.

Tab. 4.1: Versuchsvarianten bei traditionellen Stallsystemen mit Zwangslüftung

Varianten	TS_FT_EG			TS_FF_EG			VS_FF_EP		TS_FF_EP	TS_FF_EA
	_VM	_MM	_EM	_VM	_MM	_EM	_MM	_EM	_MM	_MM
Stallsystem	Teilspalten						Vollspalten		Teilspalten	
Fütterung	Trocken			Flüssig						
Einstreu bzw. Beschäftigung	Weizenstroh geschnitten						Strohpresswürfel		Aufbereitet	
Mastabschnitt	Vor-mast	Mittel-mast	End-mast	Vor-mast	Mittel-mast	End-mast	Mittel-mast	End-mast	Mittel-mast	Mittel-mast
Saison	So/Wi	So/Wi	So/Wi	So/Wi	So/Wi	So/Wi	So	Wi	So	So

Abkürzungen:

TS Teilspalten; VS Vollspalten

FT Trockenfütterung; FF Flüssigfütterung

EG Einstreu geschnitten; EP Einstreu Presswürfel; EA Einstreu aufbereitet

VM Vormast; MM Mittelmast; EM Endmast

So Sommer; Wi Winter

Die Erhebung umfasste zweimal sechs Messperioden für Teilspaltenssysteme (TS) und zwei Messperioden für Vollspaltensysteme (VS). Bei den Varianten mit TS waren die Messperioden gleichmässig über die Vor-, Mittel- und Endmast verteilt. Die Varianten mit VS wurden in zwei verschiedenen Tierkategorien untersucht: im Sommer mit Tieren in der Mittelmast und im Winter mit Tieren in der Endmast. Für den Vergleich von Trockenfütterung (TF) und Flüssigfütterung (FF) erfolgten die Messungen in den TS-Systemen parallel, um Einflüsse wie das Klima auszuschliessen. Das Trockenfutter wurde mehlartig ad libitum über Futterautomaten verfüttert. Bei Flüssigfütterung kam das gleiche Futter wie beim Trockenfutter zum Einsatz, das Verhältnis war drei Teile Wasser zu einem Teil Trockenfutter. Zur Beschäftigung stand den Tieren in den

Varianten mit TS im Liegebereich geschnittene Einstreu (EG), bei VS Strohpresswürfel (EP) ad libitum in Wandbehältern zur Verfügung. In einer zusätzlichen Sommermessperiode mit TS in der MM wurden zeitgleich EP mit einer 2 cm dicken Schicht aufbereiteter Einstreu (EA) verglichen.

Tabelle 4.2 zeigt die Abmessungen und Lüftungssysteme der verschiedenen Varianten (Abb. A1). In den Varianten mit TS wurde die Zuluft über Rieselkanäle in die Abteile geführt. Bei VS erfolgte die Luftzufuhr in einem Kanal unterhalb des Futtergangs. Die Luft strömte über vier Bodenroste und zehn Öffnungen in 1 m Höhe ins Abteil. In allen Varianten wurden die Ställe mit Hilfe von thermostatisch gesteuerten Abluftventilatoren (Airmatech) entlüftet. Als zusätzliche Luftzufuhr waren bei VS die Fenster im Sommer geöffnet. In den Varianten TS_VM und TS_MM wurde die Zuluft im Winter beheizt, um die erforderliche Stalltemperatur (18 °C) aufrecht zu erhalten.

Tab. 4.2: Abmessungen der traditionellen Stallsysteme und Angaben zum Lüftungssystem

Varianten	TS_FT_EG			TS_FF_EG			VS_FF_EP		TS_FF_EP	TS_FF_EA
	_VM	_MM	_EM	_VM	_MM	_EM	_MM	_EM	_MM	_MM
Gesamtfläche/Tier [m²]	0,95			1,03			0,67		1,03	0,95
davon planbefestigt [m²/Tier]	0,62			0,68			—		0,68	0,62
davon perforiert [m²/Tier]	0,33			0,35			0,67		0,35	0,33
Zuluftführung	Rieselkanal						Öffnungen unter dem Futtergang		Rieselkanal	
Abluftführung	Unterdrucklüftung mit Oberflurabsaugung									

In Tabelle 4.3 ist die Lebendmasse der Tiere in den einzelnen Mastabschnitten dargestellt. Die täglichen Zunahmen lagen zwischen 0,55 und 1,04 kg pro Tier und Tag.

Tab. 4.3: Tierbezogene Parameter während der Versuchsvarianten mit traditionellen Stallsystemen und Zwangslüftung

Varianten	TS_FT_EG			TS_FF_EG			VS_FF_EP		TS_FF_EP	TS_FF_EA
	_VM	_MM	_EM	_VM	_MM	_EM	_MM	_EM	_MM	_MM
Anzahl Tiere	18			14			90	89	14	18
Mittlere Lebendmasse [kg/Tier]										
Sommer	34	59	92	35	61	98	65		56	53
Winter	26	50	86	25	48	84		80		
Mittlere tägl. Zunahme [kg/Tier-Tag]										
Sommer	0,79	1,00	0,63	0,79	0,99	0,55	0,89		0,93	0,76
Winter	0,77	0,68	1,04	0,66	0,79	1,03		0,75		

Angaben zur Fütterung sind in Tabelle 4.4 aufgeführt. Ziel war, die in der Praxis verbreitete Trocken- und Flüssigfütterung zu untersuchen. Zu diesem Zweck lieferte die Futtermittelfirma für die Systeme mit TS eine praxisübliche Futtermischung. Für den Fütterungsplan war der Tierhalter verantwortlich. Unter diesen Praxisbedingungen gab es Unterschiede bei den angebotenen Futtermengen. In den Varianten mit Trockenfütterung erhielten die Tiere im Winter mehr Futter als die Tiere mit Flüssigfütterung. Die Tiere in der Variante mit EA nahmen weniger Futter auf. In den Varianten mit TS war die Futtermenge im Sommer aufgrund der schwereren Tiere grösser als im Winter. Der Proteingehalt des gelieferten Futters war bei den Systemen mit TS in allen Fällen höher als die bestellten 175 g/kg TS. Die Futtervorlage erfolgte bei Flüssigfütterung zweimal täglich, bei Trockenfütterung ad libitum.

Tab. 4.4: Angaben zur Fütterung bei den traditionellen Stallsystemen mit Zwangslüftung

Varianten	TS_FT_EG			TS_FF_EG			VS_FF_EP		TS_FF_EP	TS_FF_EA
	_VM	_MM	_EM	_VM	_MM	_EM	_MM	_EM	_MM	_MM
Art	Trocken			Flüssig						
Futtermenge [kg TS/Tier-Tag]										
Sommer	1,40	2,16	2,39	1,38	2,34	2,47	1,79		1,79	1,24
Winter	1,21	1,68	2,15	0,98	1,48	2,00		2,31		
Energiegehalt der Ration [VES MJ/kg TS]										
Sommer	13,6			13,6			13,2			13,6
Winter	13,6			13,6				13,2		13,6
Rohproteingehalt der Ration [g/kg TS]										
Sommer	205	204	198	205	204	198	207		203	203
Winter	202	194	196	202	194	196		194		
Futtervorlage	Futterautomat, ad libitum			Trogfütterung						
Häufigkeit Futtervorlage	Einmal täglich, morgens			Zweimal täglich, morgens u. nachmittags						

Als Einstreu kam geschnittenes (EG) und aufbereitetes (EA) Stroh zum Einsatz (Tab. 4.5). Der Verbrauch an Strohpresswürfeln (EP) zur Beschäftigung betrug 16 g pro Tier und Tag. Entweder wurden die Würfel von den Tieren gefressen oder sie sind auf den Boden der Bucht gefallen. Diese Menge entspricht ungefähr der Strohmenge, die in den Varianten mit EG auf der Liegefläche von Hand verteilt wurde. In der Variante mit EA wurden für die zirka 2 cm dicke Einstreuschicht 215 g Einstreu pro Tier und Tag benötigt. Die im Handel erhältliche Einstreu bestand hauptsächlich aus Stroh und Cellulose. Sie war zerkleinert, unter Druck erhitzt, mit Natronlauge aufgeschlossen, 5 % Kalk zugegeben und mit Eukalyptusöl besprüht. Einige Tage vor Beginn der Emissionsmessungen wurde bei EA frisch eingestreut. Während den vier Messtagen wurde keine zusätzliche Einstreu verteilt. Somit kam es während den Messungen zu keiner zusätzlichen Staubemission.

Tab. 4.5: Einstreu bzw. Beschäftigung für die traditionellen Stallsysteme mit Zwangslüftung

Varianten	TS_FT_EG			TS_FF_EG			VS_FF_EP		TS_FF_EP	TS_FF_EA
	_VM	_MM	_EM	_VM	_MM	_EM	_MM	_EM	_MM	_MM
Art	Weizenstroh geschnitten						Presswürfel			Aufbereitet
Menge [g/Tier-Tag]	20 g						nv	nv	16 g	215 g
Häufigkeit	Einmal täglich, morgens						Ad libitum			Alle 8 Tage

Tabelle 4.6 enthält Angaben zur Entmistung und Gülle. Bei TS war die Gülletemperatur um bis zu 2 °C tiefer als die Lufttemperatur im Güllenkanal. Bei VS waren Luft- und Gülletemperatur höher als bei TS. Der Temperaturunterschied betrug 3-4 °C. Die Güllenkanäle waren in den Versuchsgruppen mit TS 1,0 m und mit VS 0,4 m tief. In den Varianten mit FF stieg die produzierte Gullenmenge über die Mastabschnitte stärker an als bei FT. In der Endmast wurde in der Sommergülle bei beiden Fütterungssystemen ein Anstieg von NH₄-N und N_{gesamt} festgestellt. Beide Fraktionen waren bei VS im Sommer höher als bei TS. Die VS-Gülle wies im Vergleich zu den TS-Systemen einen niedrigeren Trockensubstanzgehalt auf. Beim Einsatz von Strohpresswürfeln konnte sich auf der Gullenoberfläche keine Strohschwimmdecke aufbauen.

Tab. 4.6: Angaben zur Entmistung und Gülle bei den Stallsystemen mit Zwangslüftung

Varianten	TS_FT_EG			TS_FF_EG			VS_FF_EP		TS_FF_EP	TS_FF_EA
	_VM	_MM	_EM	_VM	_MM	_EM	_MM	_EM	_MM	_MM
Sommermessung										
Lufttemperatur im Güllenkanal [°C]*										
Mittelwert	22,3	18,1	20,3	21,4	17,4	21,0	27,7**		20,0	20,8
Min-Max	20,2-24,0	15,6-21,0	17,5-23,2	19,4-22,9	15,6-21,0	18,7-23,2			18,3-22,1	19,0-22,9
Stabw	0,9	1,2	1,6	0,8	1,1	1,2	nv		0,9	1,0
Güllentemperatur [°C]	20,2	16,6	19,3	19,5	16,3	19,6	23,8		18,9	19,5
Güllenpegel [cm]**	21	41	56	19	42	60	6		43	46
Güllenmenge [m ³ /Tier-d]	0,0026	0,0046	0,0031	0,0057	0,0059	0,0043	nv		0,0051	0,0081
Güllengehalt [g/l]										
NH ₄ -N	2,53	2,46	3,29	2,34	2,72	3,67	4,28		2,69	2,46
N _{Gesamt}	3,79	3,09	4,41	2,99	3,04	5,00	8,56		3,34	3,23
Schwimmdecke	ja	ja	ja	ja	ja	ja	nein		ja	ja
Wintermessung										
Lufttemperatur im Güllenkanal [°C]*										
Mittelwert	15,1	13,9	15,8	nv	nv	nv		20,0**		
Min-Max	13,7-16,0	13,3-14,5	14,5-16,8							
Stabw	0,8	0,3	0,6	nv	nv	nv		nv		
Güllentemperatur [°C]	13,7	13,8	13,8	13,2	13,8	13,8		17,0		
Güllenpegel [cm]**	13	30	53	11	30	63		6		
Güllenmenge [m ³ /Tier-d]	0,0027	0,0028	0,0026	0,0038	0,0037	0,0040		nv		
Güllengehalt [g/l]										
NH ₄ -N	2,99	3,60	4,35	2,05	3,05	3,19		3,10		
N _{Gesamt}	6,69	5,49	7,89	3,98	4,98	4,37		4,53		
Schwimmdecke	ja	ja	ja	ja	ja	ja		nein	ja	ja

Die Temperatur im Güllenkanal wurde 10 cm unterhalb des Spaltenbodens und in 2 cm Tiefe in der Gülle

* kontinuierlich bzw.

** nicht kontinuierlich gemessen.

In Tabelle 4.7 ist eine Übersicht der Klimaparameter im Sommer dargestellt. Die Maximaltemperaturen erreichten Werte zwischen 27 und 33 °C. In der Vormast war die mittlere Temperatur der Zuluft während einer Hitzeperiode ausserordentlich hoch (24 °C). Auch bei VS waren die Temperaturen der Zuluft im Mittel mit 21,8 °C sehr hoch. Durch den Stoffwechsel der Tiere erhöhte sich die Temperatur in der Abluft und die relative Luftfeuchtigkeit sank entsprechend. Da die Tierzahl nicht in allen Varianten gleich war, wurden in den Varianten mit FT und mit EA höhere Werte für den Luftvolumenstrom gemessen als bei FF und EP. Doch pro Tier gab es zwischen den Varianten nur kleine Unterschiede in den Luftwechselraten.

Tab. 4.7: Klimaparameter der traditionellen Stallsysteme im Sommer

Varianten	TS_FT_EG			TS_FF_EG			VS_FF_EP	TS_FF_EP	TS_FF_EA
	_VM	_MM	_EM	_VM	_MM	_EM	_MM	_MM	_MM
Zuluft Temperatur [°C]									
Mittelwert	24,2	15,6	17,6	24,2	15,6	17,6	21,8	20,0	20,0
Min-Max	16,4-32,8	9,3-27,2	9,7-27,5	16,4-32,8	9,3-27,2	9,7-27,5	13,4-32,8	11,7-26,9	11,7-26,9
Stabw	4,4	4,6	4,2	4,4	4,6	4,2	5,2	4,1	4,1
Zuluft Rel. Luftfeuchtigkeit [%]									
Mittelwert	62,8	79,1	56,1	62,8	79,1	56,1	65,8	60,5	60,5
Min-Max	24,0-95,5	19,8-98,7	27,7-85,0	24,0-95,5	19,8-98,7	27,7-85,0	23,2-99,8	31,0-89,5	31,0-89,5
Stabw	17,1	20,5	15,0	17,1	20,5	15,0	23,9	18,0	18,0
Abluft Temperatur [°C]									
Mittelwert	25,4	20,1	21,2	25,6	19,8	21,5	26,1	22,9	23,0
Min-Max	20,9-30,6	15,5-26,6	15,2-28,3	21,7-30,2	15,7-25,8	17,2-28,3	22,8-31,2	19,2-26,3	19,2-26,6
Stabw	2,5	2,7	3,1	2,2	2,4	2,6	2,3	1,9	1,8
Abluft Rel. Luftfeuchtigkeit [%]									
Mittelwert	57,4	58,2	52,5	54,9	60,4	56,0	52,9	51,6	52,9
Min-Max	32,5-71,2	30,7-68,7	33,5-71,0	34,0-69,6	33,0-72,0	38,2-78,3	28,5-73,6	38,2-65,5	37,0-66,5
Stabw	8,1	7,2	9,2	7,3	6,5	8,8	11,7	7,3	7,6
Luftvolumenstrom [m³/h]									
Mittelwert	2326	1750	2812	1788	1626	2414	5311	1592	1868
Min-Max	2149-2648	1325-3025	1780-3380	1646-2075	1148-2738	1374-3378	3200-5880	1028-1891	1007-2536
Stabw	46	540	430	44	561	661	619	277	573
Luftvolumenstrom [m³/h-Tier]									
Mittelwert	129	97	156	128	116	172	59	114	104
Min-Max	119-147	74-168	99-188	118-148	82-196	98-241	36-65	73-135	56-141
Stabw	3	30	24	3	40	47	7	20	32

Tabelle 4.8 zeigt die Resultate für die Klimaparameter im Winter. Die zusätzliche Heizung der Zuluft in der VM und MM bei TS sorgte für angemessene Temperaturwerte für diese Gewichtskategorien. In den Varianten mit TS und VS lag die Temperatur der Zuluft in der EM durchschnittlich bei 4 °C. Diese Temperaturunterschiede zwischen den Mastabschnitten beeinflussten auch die relative Luftfeuchtigkeit der Zuluft. Da die Zuluft in den Varianten TS_FT und TS_FF durch eine gemeinsame Öffnung einströmte, zeigten die Ablufttemperaturen in den Varianten mit FT bedingt durch die höhere Tierzahl tendenziell höhere Werte. Der Luftvolumenstrom pro Tier war in allen Wintermessungen tief.

Tab. 4.8: Klimaparameter der traditionellen Stallsysteme im Winter

Varianten	TS_FT_EG			TS_FF_EG			VS_FF_EP
	_VM	_MM	_EM	_VM	_MM	_EM	_EM
Zuluft Temperatur [°C]							
Mittelwert	18,5*	13,7*	4,0	18,5*	13,7*	4,0	4,5
Min-Max	13,5-23,8	9,2-15,9	1,2-9,7	13,5-23,8	9,2-15,9	1,2-9,7	2,8-7,3
Stabw	2,8	1,5	2,2	2,8	1,5	2,2	0,8
Zuluft Rel. Luftfeuchtigkeit [%]							
Mittelwert	37,6	29,2	95,0	37,6	29,2	95,0	95,0
Min-Max	31,0-45,0	24,5-40,0	95,0-100	31,0-45,0	24,5-40,0	95,0-100	95,0-100
Stabw	3,0	5,0	nv	3,0	5,0	nv	nv
Abluft Temperatur [°C]							
Mittelwert	19,7	16,8	19,9	17,7	14,5	18,5	19,9
Min-Max	16,8-22,6	15,2-21,8	17,9-21,6	15,1-20,1	12,9-18,3	15,9-20,5	19,2-21,0
Stabw	1,5	0,9	0,8	1,3	0,7	0,9	0,2
Abluft Rel. Luftfeuchtigkeit [%]							
Mittelwert	43,5	37,7	39,3	68,4	55,3	46,0	63,4
Min-Max	36,3-53,3	27,0-52,0	32,2-57,5	50,6-99,6	41,6-82,3	37,6-59,3	52,7-76,3
Stabw	3,7	4,2	5,3	12,3	5,5	4,7	5,4
Luftvolumenstrom [m³/h]							
Mittelwert	478	461	520	445	441	424	1953
Min-Max	423-809	409-538	467-713	401-705	389-499	380-598	1590-4720
Stabw	44	15	22	39	14	22	368
Luftvolumenstrom [m³/h-Tier]							
Mittelwert	28	27	31	32	32	30	22
Min-Max	25-48	24-32	27-42	29-50	28-36	27-43	18-53
Stabw	3	1	1	3	1	2	4

*Mit Zuluftheizung

Der Verschmutzungsgrad der Tiere und der Bodenfläche wurde täglich bonitiert. Mit Kot und Harn verschmutzte Bereiche wurden mit ihrem jeweiligen Flächenanteil erfasst (Abb. 4.1). Grösstenteils waren unter 0,4 m² pro Tier der Bodenfläche verschmutzt. Saisonale Unterschiede im Verschmutzungsgrad der Bodenfläche gab es keine. Doch bei Flüssigfütterung TS_FF war der Boden in allen Mastabschnitten deutlich mehr verschmutzt als bei Trockenfütterung TS_FT. Bei VS war der Verschmutzungsgrad am niedrigsten. Bei TS wurde der Anteil der Verschmutzung auf der Fläche mit Spaltenboden und mit planbefestigtem Boden getrennt analysiert. Der planbefestigte Boden war im Sommer deutlich mehr verschmutzt als im Winter. Die Schweine lagen häufig auf den kühleren, jedoch stärker verschmutzten Spalten, auch Kot und Harn fiel auf dem planbefestigten Boden an. Die stärkste Verschmutzung wurde bei Teilspaltenboden mit Strohpresswürfel TS_FF_EP_MM beobachtet, was möglicherweise darauf zurückzuführen ist, dass die Feuchtigkeit nicht durch Stroh aufgenommen werden konnte.

Der Verschmutzungsgrad der Tiere wurde in vier Stufen an den Körperpartien Schinken, Rücken-Bauchbereich, Gesäuge und Hals-Kopfbereich bewertet (Abb. 4.2). Auffällig ist hierbei der starke saisonale Einfluss. Die Schweine waren im Sommer deutlich stärker verschmutzt als im

Winter. Analog zur Verschmutzung der Bodenfläche waren die Tiere im Sommer bei Flüssigfütterung TS_FF tendenziell stärker verschmutzt als bei Trockenfütterung TS_FT. Die Tiere im Vollspaltenstall VS waren gegenüber den Tieren im Teilspaltenstall TS im Sommer deutlich weniger verschmutzt.

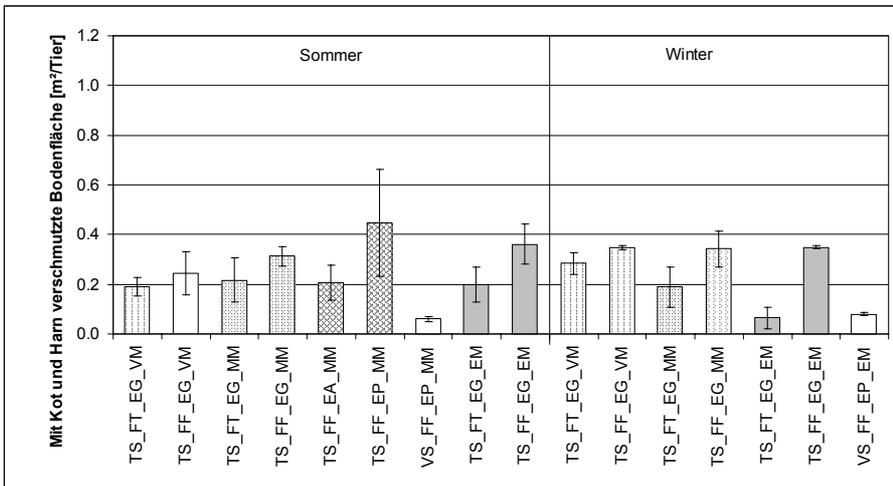


Abb. 4.1: Mit Kot und Harn verschmutzte Bodenfläche [m²/Tier] bei Teil- (TS) oder Vollspaltenboden (VS), mit Flüssig- (FF) oder Trockenfütterung (FT), Einstreu geschnitten (EG), aufbereitet (EA) oder Strohpresswürfel (EP), in der Vor- (VM), Mittel- (MM) und Endmast (EM) als Mittelwert und Standardabweichung.

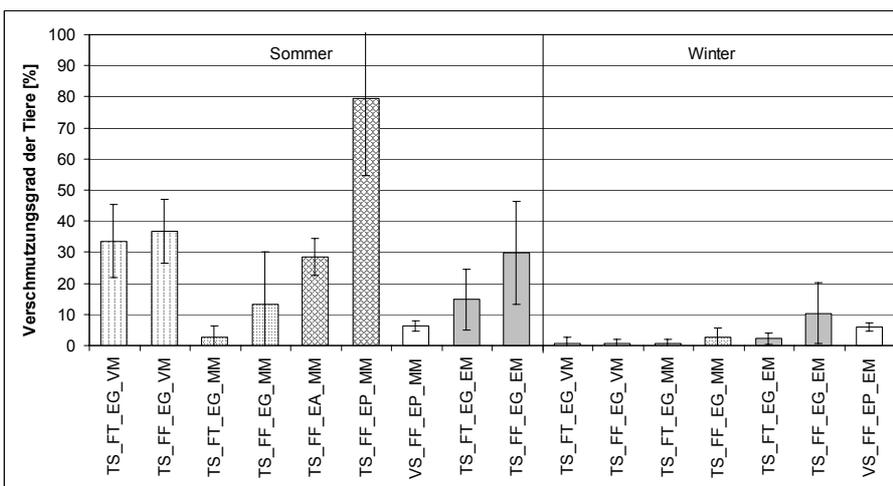


Abb. 4.2: Verschmutzungsgrad der Tiere [% der Körperoberfläche] bei Teil- (TS) oder Vollspaltenboden (VS), mit Flüssig- (FF) oder Trockenfütterung (FT), Einstreu geschnitten (EG), aufbereitet (EA) oder Strohpresswürfel (EP), in der Vor- (VM), Mittel- (MM) und Endmast (EM) als Mittelwert und Standardabweichung.

4.2 NH₃-Konzentration und -Emission

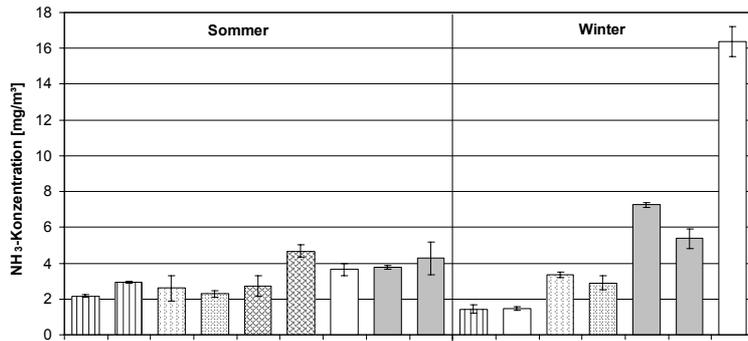
Abbildung 4.3a zeigt die Mittelwerte der NH₃-Konzentrationen. Diese lagen im Sommer zwischen 2,2 und 4,7 mg/m³. Im Winter haben die NH₃-Konzentrationen bei TS sowohl mit FT als auch mit FF im Laufe der Mastabschnitte zugenommen. Bei FF wurden tendenziell tiefere Werte als bei FT gemessen. Bei VS war die NH₃-Konzentration im Winter ungefähr dreimal so hoch wie die Werte für die vergleichbare Gruppe mit TS_FF.

Die NH₃-Emissionen pro Tier waren im Sommer bei Teilspaltenboden in allen Mastabschnitten unabhängig von der Fütterungsart deutlich höher (2,7 bis 8,2-fach) als im Winter (Abb. 4.3b). Im Sommer war die NH₃-Emission mit FF tendenziell höher (1,1 bis 1,3-fach) als mit FT. Aller-

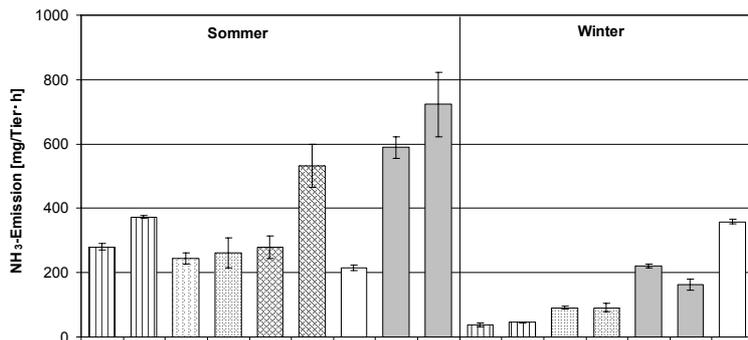
dings ergab sich im Sommer aufgrund der tieferen Werte bei TS_MM kein linearer Anstieg zwischen den drei Mastabschnitten. Der Vergleich der Einstreuverfahren zeigte bei TS_FF_EP doppelt so hohe NH₃-Emissionen pro Tier als bei TS_FF_EA und TS_FF_EG. Die höchste NH₃-Emission im Sommer wurde bei TS in der EM gemessen, die tiefste bei VS in der MM. Im Winter war der Vergleich zwischen FT und FF uneinheitlich. Im Gegensatz zum Sommer war die NH₃-Emission bei VS im Winter 2,2-fach höher als bei TS und 1,7-fach höher als bei VS im Sommer in der MM. Die tiefe Standardabweichung bei den Mittelwerten im Winter zeigte wiederum nur geringe Unterschiede zwischen den einzelnen Tagen.

In Abbildung 4.3d sind die Emissionen in Abhängigkeit von der Stallfläche berechnet. Die Emissionen pro Quadratmeter Stallfläche entsprechen den Emissionen pro Tier beim Vergleich der Mastabschnitte, den Jahreszeiten, den Fütterungs- und Einstreuverfahren. Der Vergleich zwischen TS und VS ergibt jedoch aufgrund der grösseren Fläche pro Tier bei TS andere Ergebnisse. Im Sommer wurden bei VS_FF_EP_MM leicht höhere Werte als bei TS_FF_EG_MM und gleich hohe Werte wie bei TS_FF_EA_MM gemessen. Im Winter war die NH₃-Emission bei VS gegenüber TS höher.

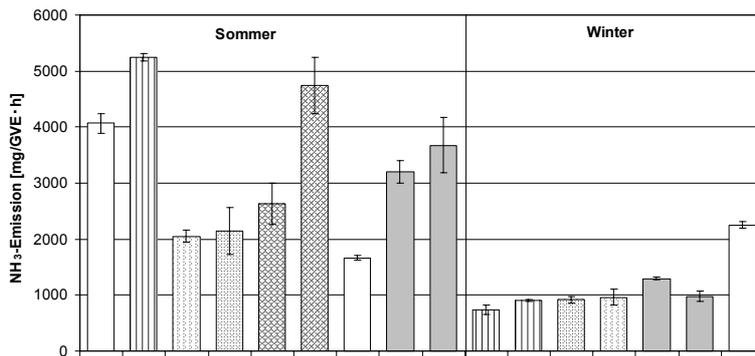
Abbildung 4.4 zeigt einen ausgewählten Tagesgang der NH₃-Emissionen, kontinuierlich mit dem FTIR während der Sommerperiode bei TS_EG_EM gemessen. Über den Tag hinweg ergab sich eine starke Variation der NH₃-Emission. Erhöhte Emissionen traten während den Fütterungszeiten, beim Einstreuen und Entmisten auf. In der Nacht waren die Emissionsraten bei beiden Fütterungsvarianten tiefer.



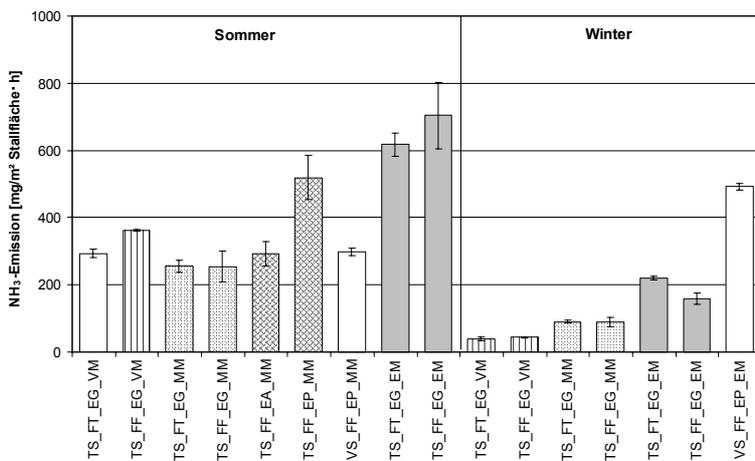
a) NH₃-Konzentration [mg/m³]



b) NH₃-Emission [mg/Tier h]



c) NH₃-Emission [mg/GVE h]



d) NH₃-Emission [mg/m² Stallfläche h]

Abb. 4.3: NH₃-Konzentration und -Emission bei Teil- (TS) oder Vollspaltenboden (VS), mit Flüssig- (FF) oder Trockenfütterung (FT), Einstreu geschnitten (EG), aufbereitet (EA) oder Strohpresswürfel (EP), in der Vor- (VM), Mittel- (MM) und Endmast (EM) als Mittelwert und Standardabweichung.

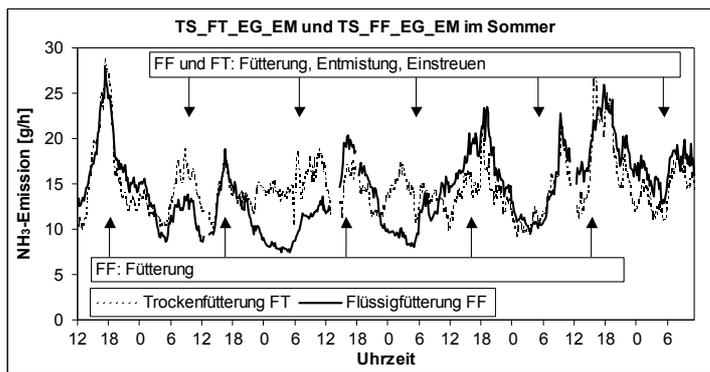


Abb. 4.4: Verlauf der NH_3 -Emission [g/h], kontinuierlich mit FTIR gemessen, bei Teilspaltenboden, Trocken- und Flüssigfütterung, Einstreu geschnitten in der Endmast im Sommer.

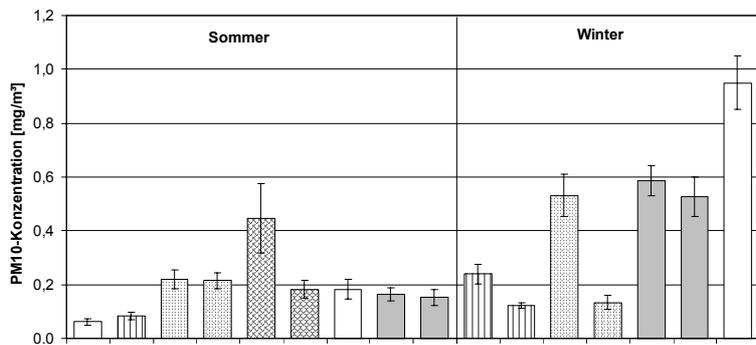
4.3 PM10-Konzentration und -Emission

Im Sommer waren die PM10-Konzentrationen grösstenteils kleiner als $0,25 \text{ mg/m}^3$ (Abb. 4.5a). Die Mittelwerte zeigten keine klaren Unterschiede zwischen den Mastabschnitten, Stallsystemen und Fütterungsarten. Bei den Einstreuverfahren waren EG und EP vergleichbar, doch bei EA waren die Konzentrationen doppelt so hoch, mit grösseren Schwankungen zwischen einzelnen Tagen. Auf den Stalleinrichtungen war auch eine leicht braune Staubschicht sichtbar, während bei den anderen Varianten die Staubschicht eher grau war. Im Winter waren nahezu alle gemessenen Werte höher als im Sommer. Bei FT waren die Konzentrationen höher als bei FF. Zudem wurde über die einzelnen Mastabschnitte hinweg eine Erhöhung der Konzentrationen festgestellt. Auch bei der PM10-Konzentration wurden, wie bei der NH_3 -Konzentration, im System mit VS besonders hohe Werte bestimmt.

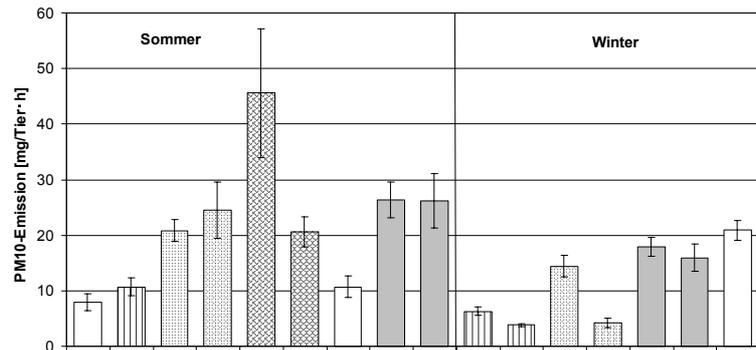
Abbildung 4.5b zeigt die PM10-Emission pro Tier. Im Sommer ergaben sich die tiefsten Emissionswerte bei TS in der VM ($6,3\text{-}12,6 \text{ mg/Tier}\cdot\text{h}$) und bei VS ($8,7\text{-}13,1 \text{ mg/Tier}\cdot\text{h}$). Wie bei der PM10-Konzentration waren bei EA in der MM die Werte am höchsten. Die PM10-Emissionen stiegen mit den Mastabschnitten an. Zwischen den Fütterungssystemen und zwischen den Einstreuvarianten mit EG und EP konnten keine Unterschiede festgestellt werden. Im Winter war die PM10-Emission in allen Varianten tiefer als im Sommer, nur bei VS war sie höher.

Wurde die PM10-Emission auf die Grossvieheinheiten (Abb. 4.5c) oder die Fläche bezogen (Abb. 4.5d), waren die Ergebnisse weitgehend gleich wie pro Tier. Bei VS waren die Werte pro Fläche höher als pro Tier.

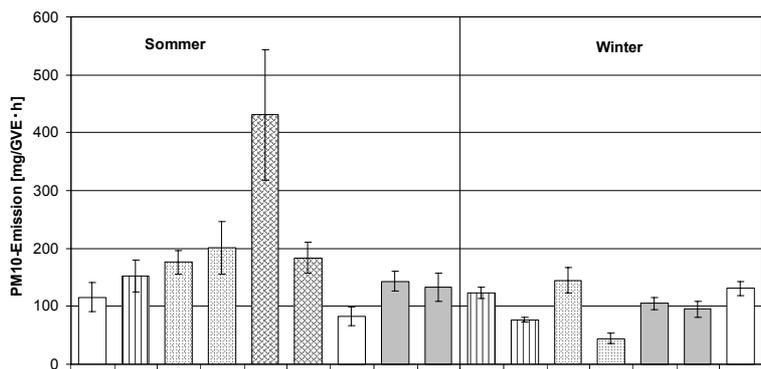
Bei den kontinuierlichen PM10-Messungen mit dem TEOM bei TS in der EM gab es die höchsten Emissionen während der Fütterungszeit, dem Einstreuen und der Entmistung der Buchten (Abb. 4.6). Ein leichter Anstieg war auch am späten Nachmittag zu erkennen, was möglicherweise auf die Fütterungszeit am Nachmittag im benachbarten Abteil zurückzuführen war. Die Fütterung der Tiere bei FF kann auch bei den Tieren mit FT zu erhöhter Aktivität geführt haben.



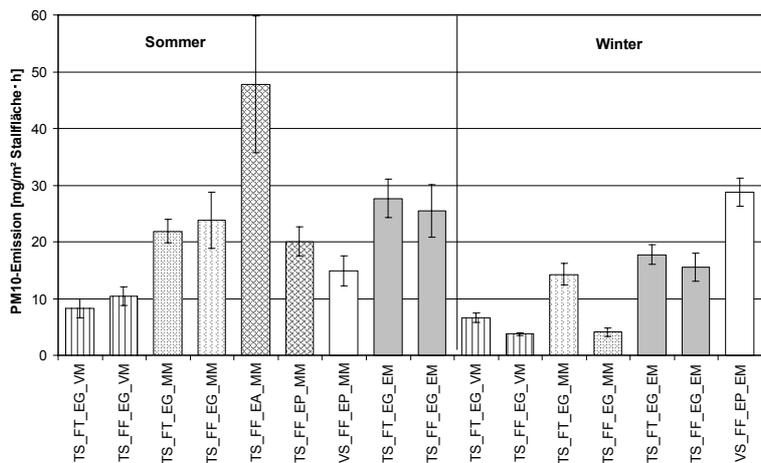
a) PM10-Konzentration [mg/m³]



b) PM10-Emission [mg/Tier h]



c) PM10-Emission [mg/GVE h]



d) PM10-Emission [mg/m² Stallfläche h]

Abb. 4.5: PM10-Konzentration und -Emission bei Teil- (TS) oder Vollspaltenboden (VS), mit Flüssig- (FF) oder Trockenfütterung (FT), Einstreu geschnitten (EG), aufbereitet (EA) oder Strohpresswürfel (EP), in der Vor- (VM), Mittel- (MM) und Endmast (EM) als Mittelwert und Standardabweichung.

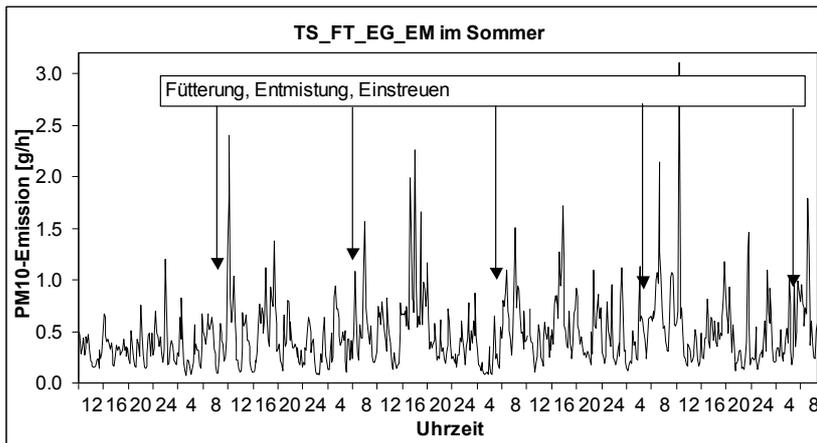


Abb. 4.6: Verlauf der PM10-Emission [g/h], kontinuierlich mit TEOM gemessen, bei Teilspaltenboden, Trockenfütterung, Einstreu geschnitten in der Endmast im Sommer.

In Abbildung 4.7 sind zum Vergleich die Tages- und Monatsmittelwerte der PM10-Konzentration an der NABEL-Station in Tänikon (Nationales Beobachtungsnetz für Luftfremdstoffe) aufgezeigt. Die Konzentrationen waren während einzelnen Wintermonaten höher als im Sommerhalbjahr. Dies ist nicht nur auf jahreszeitliche Emissionsschwankungen zurückzuführen, sondern beruht hauptsächlich auf der schwächeren Durchmischung der bodennahen Luftschichten.

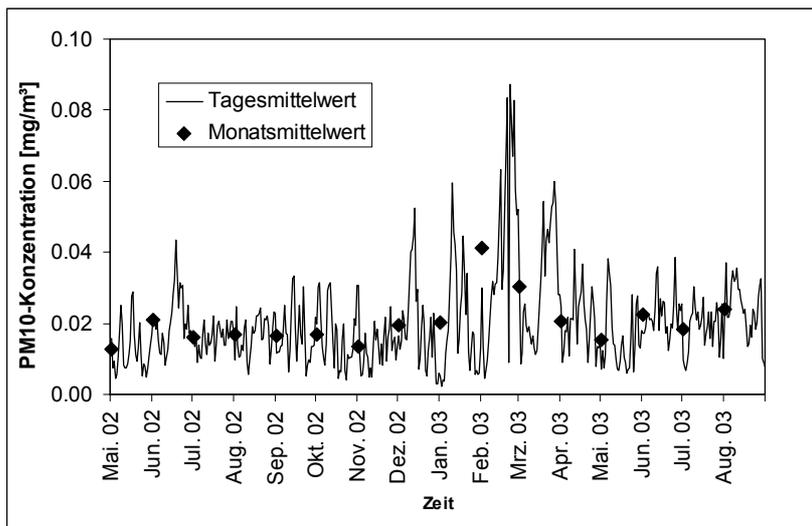


Abb. 4.7: PM10-Konzentration [mg/m³] als Tages- und Monatsmittelwerte der NABEL-Station in Tänikon während des Versuchszeitraums.

4.4 Schweb- und Gesamtstaub-Konzentration

Abbildung 4.8 zeigt die Resultate für die Schwebestaub-Konzentrationen. Bei TS_EG_MM wurden im Sommer keine Messungen durchgeführt. Zwischen den Mastabschnitten und den Fütterungssystemen konnten keine deutlichen Unterschiede festgestellt werden. Innerhalb der Varianten mit TS waren die Werte mit EA am höchsten. Im Winter waren die Schwebestaub-Konzentrationen in allen Varianten höher als im Sommer. Bei FT war im Winter die Schwebestaub-Konzentration deutlich höher als bei FF. Bei VS waren die Werte rund dreimal so hoch wie bei TS. Die Schwebestaub-Konzentration wird nicht pro Tier oder pro Buchtenfläche ausgewiesen. Geht man davon aus, dass die Schwebestaub-Konzentration mit den Tieren, der Einstreu und

den Stallarbeiten zusammen hängt, so muss das Stallvolumen pro Tier einen Einfluss haben. Da das Stallvolumen pro Tier bei TS grösser war, erklärt dies die tieferen Messwerte bei TS.

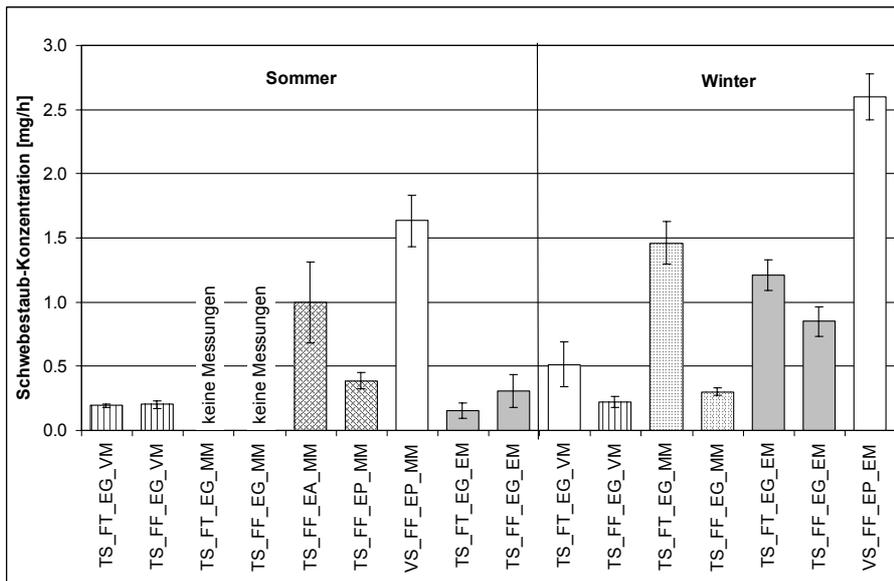


Abb. 4.8: Schwebestaub-Konzentration [mg/h] bei Teil- (TS) oder Vollspaltenboden (VS), mit Flüssig- (FF) oder Trockenfütterung (FT), Einstreu geschnitten (EG), aufbereitet (EA) oder Strohpresswürfel (EP), in der Vor- (VM), Mittel- (MM) und Endmast (EM) als Mittelwert und Standardabweichung.

Bei den Gesamtstaub-Konzentrationen waren die Messwerte über dem Tierbereich sechsmal höher als die Werte, die unter den Abluftventilatoren gemessen wurden (Abb. 4.9). Dies zeigt, dass der dominierende Teil dieser Staubfraktion sehr schnell sedimentiert. Für das subjektive Empfinden von Staub ist die Konzentration dieser grossen Partikel jedoch entscheidend. Im Sommer waren die Messwerte bei TS in der VM tiefer als im Winter. Deutliche Unterschiede zeigten sich nur bei den erhöhten Werten mit FT im Winter. Zum Ausmass der Staubablagerungen erfolgte eine Schätzung aufgrund der Messwerte im TS-System. Dies ergibt für ein praxisübliches Stallabteil mit 70 m² für 100 Mastschweine ausgehend von 3 g/m²·d im Laufe eines Mastdurchgangs von 110 Tagen insgesamt 23 kg Staub. Über das gesamte Jahr würde dies einer Menge von über 70 kg entsprechen. Dies stellt während der Stallnutzung eine zusätzliche sekundäre Staubquelle dar.

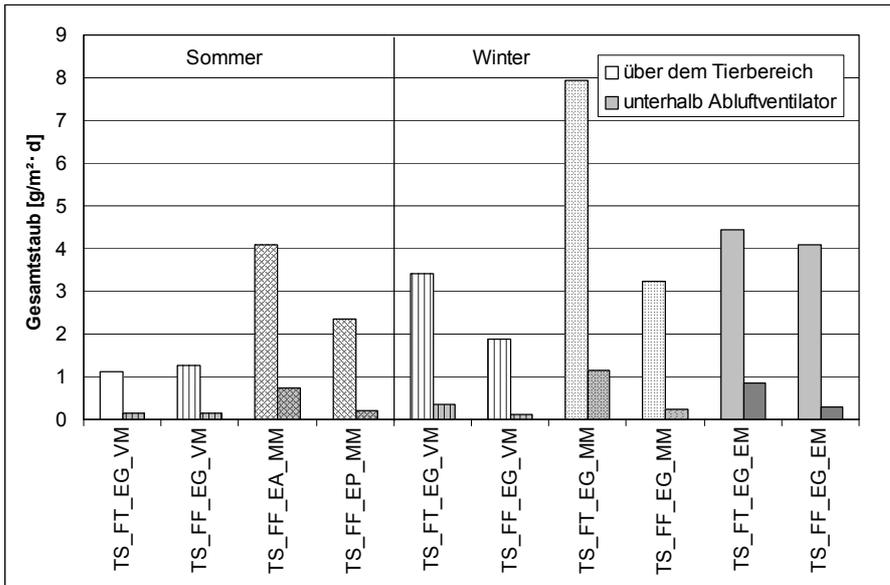


Abb. 4.9: Gesamtstaub-Konzentration $[\text{g/m}^2 \cdot \text{d}]$ bei Teilspaltenboden (TS), mit Flüssig- (FF) oder Trockenfütterung (FT), Einstreu geschnitten (EG), aufbereitet (EA) oder Strohpresswürfel (EP), in der Vor- (VM), Mittel- (MM) und Endmast (EM) im Sommer (So) oder Winter (Wi).

5. Methodenentwicklung für freie Lüftung

5.1 Konzept Tracergasmethode

Das hier verwendete Konzept beruht auf der Verwendung von Schwefelhexafluorid SF_6 als Tracergas und der Bestimmung des Konzentrationsverhältnisses von NH_3 zu SF_6 . Grundlage dafür bildet die kontinuierliche Zudosierung einer bekannten Menge Tracergas direkt an der emittierenden Oberfläche des Stallbereichs. Wichtig ist dabei, dass die räumliche Verteilung des SF_6 -Massenstroms für die NH_3 -Emissionen repräsentativ ist. Das Konzentrationsverhältnis der beiden Substanzen ist dann gleich dem Verhältnis von deren Massenstrom. Daraus ergibt sich nach Formel 3 der NH_3 -Massenstrom.

$$\dot{m}_{\text{NH}_3} = \frac{\dot{m}_{\text{SF}_6} \cdot c_{\text{NH}_3}}{c_{\text{SF}_6}} \quad (3)$$

Dieser Ansatz ist nicht von der vollständigen Durchmischung des Systems abhängig. Eine genau repräsentative Zudosierung von SF_6 kann aber in der Praxis nicht erreicht werden. Als Annäherung wird deshalb das Tracergas durch eine Vielzahl von Düsen nahe der emittierenden Oberfläche zudosiert. Zudem wird angenommen, dass die Emissionsquelle durch Vermischung in einer gewissen Distanz als relativ homogen erscheint. Desweiteren muss sich der Tracer gleich ausbreiten wie das zu bestimmende Gas. Dies bedingt im vorliegenden Fall eine starke Verdünnung von SF_6 , damit die Dichte mit jener von Umgebungsluft vergleichbar ist.

Bei i Zudosierungsarten von Tracergas und j Probenahmeorten berechnet sich der Massenstrom von NH_3 analog zu Formel 3 nach Formel 4:

$$\dot{m}_{\text{NH}_3} = \frac{\sum_i \dot{m}_{\text{SF}_6} (i) \cdot \sum_j c_{\text{NH}_3}}{\sum_j c_{\text{SF}_6}} \quad (4)$$

5.2 Vorversuche zur Methodenentwicklung

In diesem Kapitel werden die wesentlichen Vorversuche zur Evaluierung und Entwicklung einer geeigneten Messmethodik für neue, offene Stallsysteme und Ausläufe aufgeführt. Die wichtigsten Ergebnisse sowie die Schlussfolgerungen für die Messungen werden kurz beschrieben.

Die Zudosierung von SF_6 wurde mit Massenflussreglern von MKS Instruments durchgeführt. Der Einsatz der Massenflussregler wurde in einem Temperaturbereich von -5 bis 40 °C getestet. Es wurde festgestellt, dass diese nur bei Temperaturen über 15 °C zuverlässig betrieben werden können. Unterhalb bzw. oberhalb dieses Temperaturbereiches kann es zu grossen Abweichungen zwischen Anzeige und tatsächlichem Fluss kommen. Deshalb wurden die Massenflussregler im Winter in einem geschützten und beheizten Raum installiert.

Für die Zudosierung und Probenahme wurden verschiedene Schlauchmaterialien (Polyethylen, Teflon und PVC) bezüglich Adsorption bzw. Desorption von SF₆ untersucht. Die Schlauchlänge betrug etwa 10 m und der Fluss zirka 2 l/min. Die Schläuche wurden mit SF₆ Standardgas gespült, wobei nach 10 Minuten kein signifikanter Unterschied in der SF₆-Konzentration bestimmt werden konnte. Ausserdem konnte nach 10 Minuten Spülen mit Stickstoffgas kein SF₆ mehr nachgewiesen werden. Aufgrund dieser Ergebnisse und praktischer Überlegungen wurde für die Zudosierung PVC und für die Probenahme PTFE als Schlauchmaterial gewählt.

Für die Probenahme von SF₆ wurde ein Teilvolumenstrom über eine peristaltische Pumpe (Eco-line, Ismatec, Zürich, Schweiz) in einen Tedlarbag (V = 8 l, BGI Incorporated, Waltham, USA) gesogen. Für die Schlauchquetschpumpen wurden zwei verschiedene Schlauchmaterialien (Silicon, PharMed® Ismaprene) auf ihre Durchflussbeständigkeit getestet. Beide Schlauchmaterialien zeigten innerhalb eines Tages (24 h) eine hohe Flussbeständigkeit (Abweichung besser ± 5 %, ohne Temperaturkorrektur). Bei der Wintermessung traten beim Siliconschlauch jedoch nach einer Woche Ermüddungserscheinungen auf, weshalb bei den Sommermessungen PharMed®-Schläuche verwendet wurden. Diese wiesen bei Dauertests über 14 Tage im Labor eine grosse mechanische Robustheit auf.

Die Stabilität von SF₆ in Tedlarbags wurde durch Vergleichsmessungen mit einem Standardgas über einen Zeitraum von sieben Tagen überprüft. Die Abweichung zwischen der Injektion aus dem Tedlarbag und der Injektion aus der Gasflasche war über den gesamten Zeitraum kleiner als 10 %. Damit ist eine ausreichende Stabilität über die Probenahmezeit von 24 h gewährleistet.

Die Verwendung von Spritzen (V = 50 ml, Terumo Europe N.V., Leuven, Belgien) als Probenbehälter wurde in Vergleichsmessungen validiert. Die Abweichung zwischen Tedlarbag und Spritze betrug weniger als 3 %. Aufgrund der besseren Handhabung wurden für den Transport zwischen Messort und Labor als Probengefäss Spritzen verwendet.

5.3 Messaufbau

Das Tracergas, ca. 800 ppm, wurde aus konzentriertem SF₆ in zwei Verdünnungsschritten gravimetrisch hergestellt. Damit ist der Dichteunterschied zur Umgebungsluft deutlich unter 1 %. Zur gleichmässigen Verteilung des Gesamtvolumens über die Stallfläche wurde ein definierter Volumenstrom (200-500 ml) an Tracergas mittels Massenflussregler (0-500 ml/min) auf neun Zudosierpunkte verteilt (Abb. A2). Es wurde jeweils eine kritische Düse von 50 µm (Lenox Laser Inc., Geln Arm, USA) dazwischen geschaltet. Bei einem Überdruck von 250-700 mbar ergibt sich ein Durchfluss von ca. 20-40 ml/min pro kritische Düse. Das Tracergas wurde über PVC-Schläuche (Ø_i = 2 mm) in die Bucht geleitet. Innerhalb der Bucht wurden die Schläuche durch am Boden fest verschraubte Winkeleisen fixiert und somit vor Tieren und Exkrementen geschützt. Die Zudosierung erfolgte 4 cm über der emittierenden planbefestigten bzw. perforierten Stallfläche.

Die Proben wurden in jeder Auslaufbucht an sechs gleichmässig verteilten Probenahmepunkten 1,3 m über Boden entnommen (Abb. A2). Die Absaugung erfolgte durch Teflonschläuche (Ø_i = 4 mm) mittels geregelter Pumpen (GilAir, Sensidyne, Florida, USA) bei einem Fluss von 2 l/min.

Unmittelbar vor der Absorption von NH_3 mittels Impingern wurde ein kleiner Teilvolumenstrom (ca. 5 ml/min) über eine peristaltische Pumpe (Ecoline, Ismatec, Zürich, Schweiz) in Tedlarbags ($V = 8 \text{ l}$, BGI Incorporated, Waltham, USA) abgezogen. Für die Bestimmung von SF_6 wurde aus den Tedlarbags jeweils nach 24 h eine 50 ml Probe mittels Spritze entnommen.

5.4 Analytik

Die SF_6 -Proben wurden mit einem Varian Gaschromatographen (3400Cx-Serie, Varian, Palo Alto, USA) mit einem ECD-Detektor analysiert. Für die analytische Trennung wurde eine Molekularkapillarsäule (RT-Msieve 5\AA , 30 m, 0,53 mm ID, Restek Corporation, Bellefonte, USA) verwendet. Die Betriebstemperaturen waren $290\text{ }^\circ\text{C}$ für den ECD, $35\text{ }^\circ\text{C}$ für den Ofen und $70\text{ }^\circ\text{C}$ für die Injektion. Als Trägergas wurde Stickstoff verwendet. Die Nachweisgrenze betrug ca. 2 ppt. Die Linearität von SF_6 wurde im Konzentrationsbereich 0-1000 ppt untersucht (Abb. 5.1).

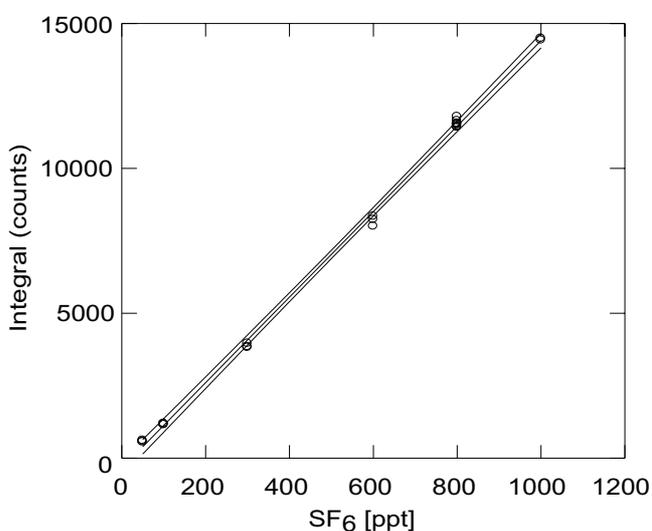


Abb. 5.1: Linearitätsprüfung der SF_6 Analytik mittels Gaschromatographie. Einzelwerte und 99 % Konfidenzintervall.

5.5 Messunsicherheit

Die Genauigkeit einer Messung wird üblicherweise durch die Angabe der Messunsicherheit des Messsystems zum Ausdruck gebracht. Diese Unsicherheit ergibt sich aus den Beiträgen, die durch die Unsicherheit bei der Formulierung der Messaufgabe, den verwendeten Messgeräten, nicht erfassten Einflussgrößen etc. geleistet werden (Bureau International des Poids et Mesures 1995). Um Beiträge an die Messunsicherheit miteinander vergleichen zu können und sie über die Fehlerfortpflanzung miteinander zu verknüpfen, wird oft die Standardunsicherheit angegeben. Dabei wird davon ausgegangen, dass die Streuung der Messwerte einer Normalverteilung entspricht.

Die Methode zur Bestimmung der Varianz hängt von der Möglichkeit der Anwendung statistischer Verfahren (Wiederholungen) und den vorhandenen Informationen zu einzelnen Einflussgrößen ab. Aus den einzelnen Beiträgen berechnet man über die Gesetze der Fehlerfort-

pflanzung eine kombinierte Standardunsicherheit und daraus durch Multiplikation mit dem Erweiterungsfaktor die erweiterte Unsicherheit (DIN 1995).

In Tabelle 5.1 sind die wichtigsten Einflussgrößen der verwendeten Messverfahren aufgeführt. Die angegebenen Werte wurden aufgrund von Messreihen, Literaturangaben, Herstellerangaben und Erfahrungswerten unter Annahme einer geeigneten statistischen Verteilung berechnet bzw. abgeschätzt. Angegeben wurde die relative Varianz (σ^2) und die Messunsicherheit als 95 %-Vertrauensintervall für den jeweiligen Verfahrensbereich. Als Beispiel ist zur Berechnung der Messunsicherheit u für die Probenahme und Analytik von PM10 Formel 5 angeführt.

$$u(\text{PM10}) = 2 \cdot (4.2 \cdot 10^{-4} + 1.0 \cdot 10^{-4} + 1.7 \cdot 10^{-5} + 4.2 \cdot 10^{-4})^{0.5} \cdot 100 \% = 6 \% \quad (5)$$

Tab. 5.1: Die wichtigsten Beiträge zur Messunsicherheit der verwendeten Verfahren. Die Einzelwerte sind als relative Varianz (σ^2) angegeben. Die daraus ermittelte relative Messunsicherheit bezieht sich auf ein 95 %-Vertrauensintervall bei einem Erweiterungsfaktor $k=2$.

Fehlerquellen	SF ₆		NH ₃	PM10
	Zudosierung	Probenahme, Analytik	Probenahme, Analytik	Probenahme, Analytik
Herstellung Gebrauchsstandard	1.7E-05	-	-	-
Auswaage zudosierte Menge an SF ₆	1.7E-05	-	-	-
Verteilung SF ₆ auf die Buchten	6.7E-05	-	-	-
Pumpeneinfluss	6.7E-05	6.7E-05	1.5E-04	4.2E-04
Absorptionseffizienz	-	-	4.2E-06	-
Auswaage Probeflaschen	-	-	1.7E-05	-
Unsicherheit Analytik	-	2.5E-03	1.6E-03	1.0E-04
Unsicherheit Standard	1.7E-05	1.7E-03	1.7E-05	-
Interferenzen	-	-	-	-
Feldblindwerte	-	1.7E-05	1.7E-05	1.7E-05
Handling Probenahme/Herstellung	4.2E-04	4.2E-04	1.5E-04	4.2E-04
Probenahmezeit	zu vernachlässigen			
Messunsicherheit	6 %	14 %	9 %	6 %

Aus der Unsicherheit der einzelnen Messparameter lässt sich über Fehlerfortpflanzung die Unsicherheit der berechneten Massenströme herleiten. Diese hängen im geschlossenen System von der Bestimmung des Volumenstroms ($\pm 3 \%$) ab. Bei freier Lüftung spielt die Zudosierung und Analytik von SF₆ eine grosse Rolle (Formel 3). Ein Beispiel zur Berechnung der Messunsicherheit u des Massenstroms von NH₃ bei freier Lüftung ist angeführt (Formel 6):

$$u(\dot{m}_{\text{NH}_3}) = (u^2(\dot{m}_{\text{SF}_6}) + u^2(c_{\text{NH}_3}) + u^2(c_{\text{SF}_6}))^{0.5} = (0.06^2 + 0.09^2 + 0.14^2)^{0.5} \cdot 100 \% = 18 \% \quad (6)$$

Entsprechend ergibt die analytische Messunsicherheit für den Massenstrom von NH_3 und PM_{10} bei Zwangslüftung zirka 9 %, bei freier Lüftung zirka 18 %.

Im Bereich der Emissionsmesstechnik ist die Bestimmung der Messunsicherheit aufgrund der einzelnen Beiträge besonders schwierig und kann sowohl zu deutlicher Unter- als auch Überschätzung der Unsicherheit führen (Emmenegger et al. 2004b). Deshalb ist ein Vergleich der ermittelten Messunsicherheiten mit anderen Feldstudien zur Abschätzung sinnvoll. Ammoniakmessungen wurden mit der Impingermethode in einer grossen Methodvalidierung in einem Autobahntunnel gemessen (Emmenegger et al. 2004a). Die dabei verwendeten Verfahren und Konzentrationsbereiche lassen sich sehr gut mit den vorliegenden Werten vergleichen. Die resultierende Messunsicherheit für die Konzentrationsbestimmung betrug $\pm 7\%$ und ist mit der hier gefundenen Messunsicherheit vergleichbar. Die Doppelbestimmungen während der ersten drei Messkampagnen ergaben bei Zwangslüftung eine Standardabweichung von ca. 10 % für die Konzentrationsbestimmung. Es ist davon auszugehen, dass die in Tabelle 5.1 angegebenen Werte eher niedrig geschätzt sind. Nicht berücksichtigt sind zudem alle Faktoren, welche mit der Reproduzierbarkeit und Repräsentativität der gesamten Versuchsanordnung zusammenhängen. Dazu gehören zum Beispiel saisonale Schwankungen, Meteorologie, Management und Betriebsauswahl, welche nur summarisch erfasst und beschrieben werden können.

Die Bestimmung der Massenströme durch die Tracergasmethode beruht auf verschiedenen Hypothesen bezüglich der Zudosierung bzw. dem Verhalten von SF_6 , NH_3 und PM_{10} . Diese Hypothesen würden idealerweise mit einem alternativen Verfahren verglichen, um die Gesamtunsicherheit besser abschätzen zu können. Ein anerkanntes, geeignetes Verfahren gibt es jedoch nicht. Diese Methode ist bisher nicht validiert. Mit grosser Wahrscheinlichkeit konnten gewisse nicht quantifizierte Beiträge zur Messunsicherheit nicht oder nur ungenügend berücksichtigt werden.

6. Untersuchungen bei freier Lüftung

Für die Untersuchungen mit neuen Stallsystemen wurde ein Praxisbetrieb mit zwangsbelüftem, eingestreutem Liegebereich und Auslauf ausgewählt. Wichtige Kriterien für die Auswahl dieses Praxisbetriebes waren: Einzelhoflage, keine andere Tierhaltung oder andere Emissionsquellen aus der Hauptwindrichtung, keine offene Hofdüngerlagerung im Nahbereich, Crossgruppenhaltung sowie Kooperationsbereitschaft der Landwirtsfamilie.

6.1 Übersicht der Versuchsanordnung

Die im folgenden Text verwendeten Abkürzungen für die Versuchsvarianten im Stallsystem mit Auslauf sind in Tabelle 6.1 erklärt. Der Liegebereich im Stall hatte bei allen Varianten einen eingestreuten, planbefestigten Boden (Abb. A2). Die Varianten unterschieden sich nur durch den Anteil der perforierten Fläche im Auslauf. Untersucht wurde ein Auslauf mit 50 % perforierter Fläche (½ PE) und ein komplett planbefestigter Auslauf (PL). Für den komplett planbefestigten Auslauf wurde auf dem bestehenden perforierten Boden eine Plastikfolie aufgelegt, um den Abfluss von Flüssigkeit in die Güllegrube zu verhindern. Darüber wurden Betonplatten zugeschnitten und verlegt. Im Sommer dauerten die Versuche in Bucht 3 und 6 eine Woche, im Winter in Bucht 1 und 3 zwei Wochen. Alle Messungen erfolgten mit Tieren in der EM.

Tab. 6.1: Versuchsvarianten im Stallsystem mit Auslauf

Varianten	½ PE_B6	PL_B3	½ PE_B1	½ PE_B3	½ PE_B1	PL_B3
Auslaufboden	50 % Perforiert	100 % Planbefestigt	50 % Perforiert	50 % Perforiert	50 % Perforiert	100 % Planbefestigt
Bucht Nr.	6	3	1	3	1	3
Fütterung	Flüssig					
Liegebereich Einstreu	Stroh geschnitten					
Mastabschnitte	Endmast					
Saison	Sommer 2003		Winter 2002/2003			
Messwoche Nr.	1		1		2	

Abkürzungen:

PL Planbefestigt; ½ PE 50 % Perforiert

B1 Bucht 1; B3 Bucht 3; B6 Bucht 6

Tabelle 6.2 zeigt die Abmessungen des Stallsystems mit Auslauf und Angaben zur Lüftung (Abb. A2). Die Gesamtfläche war bei allen Varianten identisch. Doch die Fläche pro Tier variierte zwischen den beiden Messwochen im Winter, weil in jeder Bucht zwei schwerere Tiere nach Abschluss der ersten Woche zur Schlachtung verkauft wurden. Bei ½ PE waren präzise 54 % der gesamten Stallfläche perforiert. Im Bericht wird die teilperforierte Variante vereinfacht mit ½ PE abgekürzt.

Die Zuluft in den Liegebereich strömte im Sommer durch die vollständig und im Winter durch die in der unteren Hälfte offenstehende Zutrittstüre zum Auslauf. Der Versorgungsgang für das

Stallpersonal hinter dem Liegebereich war mit Türen abgetrennt, um die Emissionen im Liegebereich buchtenweise messen zu können. Die Abluft wurde mit Unterdrucklüftung und Oberflurabsaugung buchtenweise abgeführt, vergleichbar mit den zwangsbelüfteten Stallsystemen. Die Hälfte der Auslauffläche im Freien war nicht überdacht.

Tab. 6.2: Abmessungen des Stallsystems mit Auslauf und Angaben zum Lüftungssystem

Varianten	½ PE_B6	PL_B3	½ PE_B1	½ PE_B3	½ PE_B1	PL_B3
Saison	Sommer		Winter			
Gesamtfläche [m²/Tier]	1,66	1,66	1,75	1,75	1,84	1,84
davon Auslauf planbefestigt [m²/Tier]	0,51	1,15	0,54	0,54	0,57	1,28
davon Auslauf perforiert [m²/Tier]	0,64	kein	0,67	0,67	0,71	kein
Zuluftführung	Liegebereich: Zuluft über Auslaufftüre; Auslauf: Freie Lüftung					
Abluftführung	Liegebereich: Unterdrucklüftung mit Oberflurabsaugung; Auslauf: Freie Lüftung					

Im Sommer waren 40 Mastschweine pro Bucht eingestallt (Tab. 6.3). Im Winter reduzierte sich die Anzahl Tiere von 38 in der ersten Woche auf 36 in der zweiten Woche. In Bucht 3 waren jeweils etwas schwerere Tiere eingestallt. Basierend auf der Wägung von Focustieren wurden die täglichen Zunahmen abgeleitet. Im Sommer waren die täglichen Zunahmen mit 900 g pro Tier und Tag höher als im Winter.

Tab. 6.3: Tierbezogene Parameter während den Versuchsvarianten im Stallsystem mit Auslauf

Varianten	½ PE_B6	PL_B3	½ PE_B1	½ PE_B3	½ PE_B1	PL_B3
Saison	Sommer		Winter			
Anzahl Tiere	40	40	38	38	36	36
Lebendmasse [kg/Tier]	78	84	90	100	94	103
Tägl. Zunahme [kg/Tier-Tag]	0,90	0,90	0,75	0,75	0,75	0,75

In den Versuchen wurde das gleiche Futter verwendet, das der Landwirt während des gesamten Jahres einsetzt. Alle Tiere erhielten die gleiche Futtermenge (2,69 kg Trockensubstanz/Tier·Tag), diese war grösser als die in der EM in den traditionellen Stallsystemen verfütterte Menge. Der Gehalt an verdaulicher Energie betrug 13,2 MJ/kg Trockensubstanz. Beim Proteingehalt zeigten sich Unterschiede. Im Sommer waren die Proteingehalte eher typisch (201 g/kg TS), während im Winter in der ersten Woche (225 g/kg TS) und in der zweiten Woche (229 g/kg TS) hohe Proteingehalte analysiert wurden. Dies war möglicherweise auf die Zugabe eines Zusatzstoffs aus Enzymen zurückzuführen, den der Landwirt im Winter einsetzte. Die Schweine erhielten drei mal pro Tag Flüssigfutter am Trog und zwar am Morgen, am frühen sowie am späten Nachmittag.

Am Morgen wurde im Liegebereich geschnittenes Weizenstroh eingestreut, im Sommer ungefähr ein Drittel (74 g/Tier·Tag) der im Winter verteilten Menge (200 g/Tier·Tag). Durch die geringere Strohmenge im Sommer hielten sich die Tiere eher im Liegebereich auf. Weniger Stroheinsatz ermöglichte den Schweinen direkten Kontakt mit dem kühleren Betonboden und erhöhte somit die Attraktivität der Liegefläche.

Tabelle 6.4 zeigt die Angaben zur Entmistung und Gülle. Im Sommer betrug die Lufttemperatur in den Güllenkanälen im Mittel zwischen 26,3 und 25,5 °C: vom späten Vormittag bis zum späten Nachmittag war die verschmutzte Fläche über dem Messpunkt der Sonneneinstrahlung ausgesetzt und erhitze dadurch die Luft unter den Spalten bzw. den planbefestigten Boden. Die Maximaltemperatur war beim planbefestigten Boden rund 4 °C tiefer als beim teilperforierten. Im Winter lagen die Temperaturen im Güllenkanal in beiden Messwochen unter null Grad. Da in beiden Buchten ein gemeinsamer Güllenkanal genutzt wurde, erfolgten gemeinsame Temperaturmessungen nur in der dazwischen liegenden, nicht belegten Bucht 2.

Im Sommer war die Temperatur der obersten Güllenschicht tiefer als die Temperatur der darüberliegenden Luft im Güllenkanal. Dies war vermutlich darauf zurückzuführen, dass die Güllenoberfläche im Kanal ungefähr 80 cm unter dem Temperatursensor für die Luft lag. Die Tiefe des Güllenkanals betrug 1,12 m. Im Winter war die oberste Güllenschicht in beiden Messwochen vollständig gefroren. Am Ende der zweiten Messwoche war der Güllenkanal knapp halb voll. Da sich der Güllenkanal unter insgesamt neun Buchten erstreckte, war es nicht sinnvoll, die Gullenmenge pro Tier aufgrund der geringen Veränderungen des Gullenpegels zu berechnen. Der Anstieg des Gullenpegels um 7,6 cm zwischen der ersten und zweiten Woche war vermutlich eher auf die Ausdehnung der gefrorenen Gülle als auf einen tatsächlichen Anstieg der Gullenmenge zurückzuführen. Daher wurde als Gullenmenge der in der EM in traditionellen Stallsystemen gemessene Wert übernommen und für weitere Berechnungen verwendet.

Da alle Schweine das gleiche Futter erhielten, wurden die Gullenproben pro Saison zu einer Sammelprobe zusammen geführt, um die Anzahl der zu analysierenden Proben zu reduzieren. Der Gehalt an $\text{NH}_4\text{-N}$ (2,42 bzw. 2,69 g/l) und N_{Gesamt} (5,44 bzw. 5,25 g/l) in der Gülle war im Winter und im Sommer sehr ähnlich. Das Ausmass einer Schwimmdecke im Sommer war schwierig zu bestimmen, da an gewissen Stellen schwimmende Teile vorhanden waren und an anderen nicht. Im Winter bildete das Eis eine schwimmende Decke von bis zu 10 cm Dicke.

Tab. 6.4: Angaben zur Entmistung und Gülle im Stallsystem mit Auslauf

Varianten	½ PE_B6	PL_B3	½ PE_B1	½ PE_B3	½ PE_B1	PL_B3
Saison	Sommer		Winter			
Lufttemperatur im Güllenkanal [°C]*						
Mittelwert	26,3	25,5	-3,59		-3,47	
Min-Max	20,6-34,9	21,0-30,7	-6,31-0,29		-6,31-0,16	
Stabw	4,3	2,6	1,2		1,4	
Güllentemperatur [°C]**	21,3		<0,0		<0,0	
Güllenpegel [cm]**	21,4		52,5		60,1	
Güllenmenge [m³/Tier]	0,320 [#]		0,337 [#]			
Güllengehalt [g/l]						
NH ₄ -N	2,42		2,69			
N _{Gesamt}	5,44		5,25			
Schwimmdecke	Nein		Ja (Eis)			
Häufigkeit der Entmistung						
Liegebereich	Einmal täglich					
Auslauf	Einmal täglich, im Bereich der SF ₆ -Zudosierung zweimal täglich					

Die Temperatur im Güllenkanal wurde 10 cm unterhalb des Spaltenbodens und in 2 cm Tiefe in der Gülle gemessen.

* kontinuierlich gemessen

** nicht kontinuierlich gemessen

geschätzter Wert (gemessen an der FAT)

In Tabelle 6.5 sind die Klimaparameter im Liegebereich aufgeführt. Im Sommer betrug die mittlere Ablufttemperatur im Liegebereich 26 °C. Die Ablufttemperatur war bei den beiden Varianten praktisch identisch, dies ist auf die gleiche Tierbelegung in den Parallelmessungen zurückzuführen. Im Winter betrug die mittlere Temperatur der Abluft in allen Varianten ungefähr 14 °C. Die Standardabweichung war sehr gering (<1 °C).

Der Luftvolumenstrom im Liegebereich war im Sommer wie auch im Winter in beiden Buchten nahezu gleich. Im Winter war der Luftvolumenstrom aufgrund der tiefen Aussentemperatur reduziert. Die Temperatur im Liegebereich konnte in einem akzeptablen Bereich gehalten werden.

Tab. 6.5: Klimaparameter während der Messungen im Stallsystem mit Auslauf

Varianten	½ PE_B6	PL_B3	½ PE_B1	½ PE_B3	½ PE_B1	PL_B3
Saison	Sommer		Winter			
Messwoche Nr.	1	1	1	1	2	2
Liegebereich						
Abluft Temperatur [°C]						
Mittelwert	26,3	26,6	14,3	14,8	13,9	14,4
Min-Max	21,8-31,2	22,3-31,4	12,8-16,0	12,2-17,0	10,6-16,0	11,1-16,7
Stabw	2,8	2,6	0,6	0,9	1,0	0,9
Abluft Rel. Luftfeuchtigkeit [%]						
Mittelwert	46,0	44,1	67,6	77,2	67,1	82,6
Min-Max	19,8-71,0	17,7-74,0	55,0-86,0	52,0-100	49,0-86,3	56,3-100
Stabw	10,6	10,4	5,7	12,1	6,2	12,4
Luftvolumenstrom [m³/h]						
Mittelwert	3389	3403	445	498	429	484
Min-Max	2253-3541	2283-3578	114-746	219-800	300-554	265-654
Stabw	143	137	113	112	29	31
Luftvolumenstrom [m³/h·Tier]						
Mittelwert	85	85	12	13	12	13
Min-Max	56-89	57-89	3-20	6-21	8-15	7-18
Stabw	4	3	3	3	1	1
Auslauf						
Auslauf Temperatur [°C]						
Mittelwert	27,5		-4,57		-4,51	
Min-Max	19,4-40,1		-8,10-2,24		-10,9-13,7	
Stabw	5,4		2,1		4,5	
Auslauf Rel. Luftfeuchtigkeit [%]						
Mittelwert	41,3		95,0		95,0	
Min-Max	10,0-75,5		95,0-100		60,5-100	
Stabw	15,4		nv		2,2	
Auslauf Windgeschwindigkeit [m/s]						
Mittelwert	0,55		0,81		0,55	
Min-Max	0,04-2,96		0,08-3,27		0,02-2,44	
Median	0,4		0,7		0,5	
Anteil der Messdauer mit einer Windrichtung als Mittelwert [%]						
Nord/Nordost	16		93		56	
West/Südwest	4		1		2	

Abbildung 6.1a zeigt den Verlauf der Lufttemperatur und Windgeschwindigkeit im Sommer im freien Feld beim Messpunkt Meteo 1 (Abb. A2). Der Temperaturverlauf war über die einzelnen Tage ähnlich, im Bereich zwischen 20 und 35 °C. Die Windgeschwindigkeit variierte am Nachmittag und am frühen Abend stark, während sie in der Nacht bei zirka 1 m/s lag. An fünf von sieben Tagen war der Verlauf der Windgeschwindigkeit nahezu identisch, während Abweichungen am dritten und siebten Tag der Messwoche auftraten. Hier schwankte die Windgeschwindigkeit tagsüber weniger. Die Windrichtung wurde beim Messpunkt Meteo 1 erhoben. Im Sommer dominierte in den ersten sechs Tagen Nord- bzw. Nordostwind (Abb. 6.1b). Am

siebten Tag war die Windrichtung variabel. Am Morgen wurden die grössten Schwankungen der Windrichtung gemessen, während die Windrichtung vom frühen Nachmittag an eher konstant war.

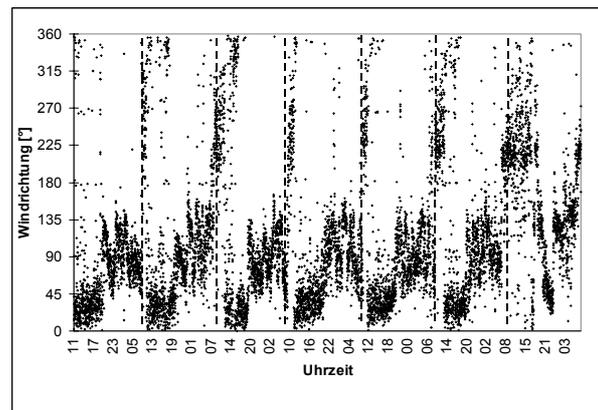
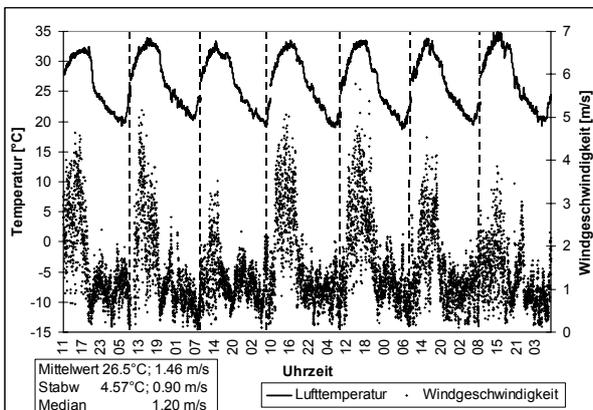


Abb. 6.1a: Tagesgang der Lufttemperatur [°C] und Windgeschwindigkeit [m/s] gemessen während der Messwoche 1 im Sommer.

Abb. 6.1b: Tagesgang der Windrichtung [°] gemessen während der Messwoche 1 im Sommer.

In Tabelle 6.5 sind auch die Klimaparameter vom Auslauf als Mittelwert, Minimum und Maximum dargestellt. Die Daten wurden beim Messpunkt Meteo 2 zwischen den beiden Versuchsbuchten in der Mitte eines nicht belegten Auslaufs gemessen (Abb. A2). Die Messsensoren waren 30 cm unterhalb einer weissen Kunststoffabdeckung vor direkter Sonneneinstrahlung und Regen geschützt.

Im Winter lagen die Lufttemperaturen in der ersten Messwoche stets, in der zweiten Messwoche meist unter null (Abb. 6.2a und c). In der ersten Messwoche gab es nur geringe tageszeitliche Schwankungen, in der zweiten Messwoche waren diese ausgeprägter. Die Windgeschwindigkeit variierte in der ersten Messwoche stark und lag durchschnittlich bei 2,38 m/s, in der zweiten Messwoche war sie mit 1,23 m/s tiefer und variierte weniger. Die Windrichtung konzentrierte sich in der ersten Messwoche auf Nord und Nordost (Abb. 6.2b). Der Wind drehte leicht in nordöstliche Richtung und blieb so während der gesamten zweiten Messwoche (Abb. 6.2d). In der Wintermessung lag meist Schnee und Eis.

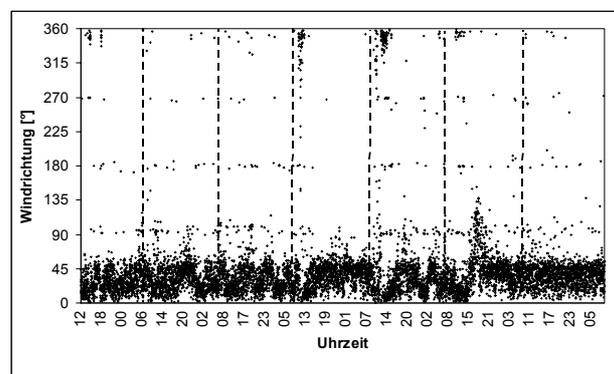
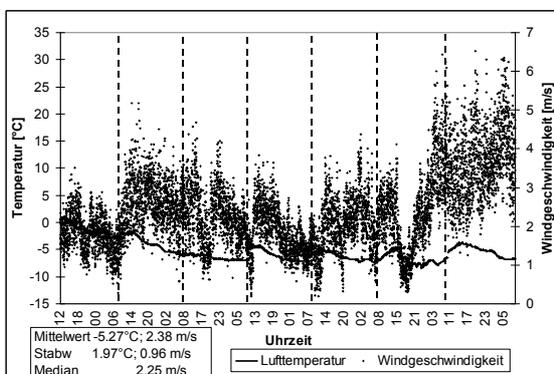


Abb. 6.2a: Tagesgang der Lufttemperatur [°C] und Windgeschwindigkeit [m/s] während der Messwoche 1 im Winter.

Abb. 6.2b: Tagesgang der Windrichtung [°] während der Messwoche 1 im Winter.

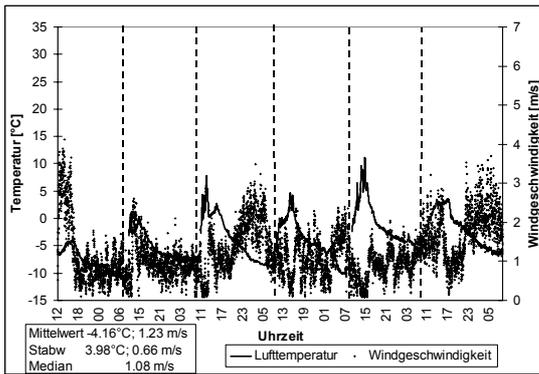


Abb. 6.2c: Tagesgang der Lufttemperatur [°C] und Windgeschwindigkeit [m/s] während der Messwoche 2 im Winter.

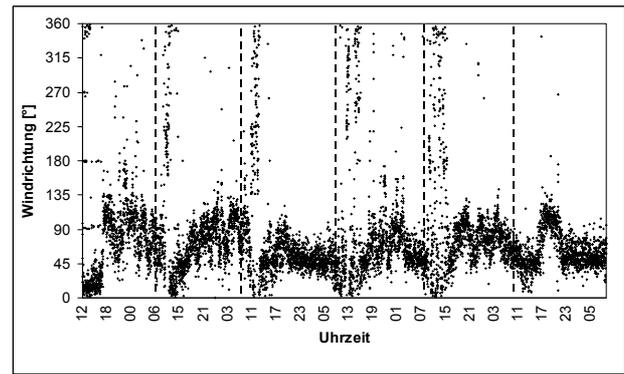


Abb. 6.2d: Tagesgang der Windrichtung [°] während der Messwoche 2 im Winter.

Die Windgeschwindigkeit im Auslauf war um rund 60 % tiefer als im offenen Feld. Dies ist insbesondere auf den Abschirmeffekt durch das Stallgebäude und das Dach zurückzuführen.

Im Sommer erfolgten im Auslauf umfassende Rauchttests, um die Luftströmung zu visualisieren und eine allfällige Luftverfrachtung zwischen den beiden belegten Ausläufen aufzuzeigen. Eine Luftverfrachtung zwischen den belegten Ausläufen war vor allem bei Wind aus Nord/Nordost und West/Südwest zu erwarten. Tagsüber wurden ausgeprägte thermische Effekte nach oben beobachtet. Ab einer gewissen Windgeschwindigkeit erfolgte eine Verfrachtung der Emissionen über die verschiedenen Buchten hinweg. In den meisten Fällen war allerdings die Windgeschwindigkeit viel zu tief, um eine wesentliche Verfrachtung zu verursachen. Aus diesem Grund sowie auch aufgrund des geringen Zeitanteils mit Wind aus Nord/Nordost und West/Südwest kann davon ausgegangen werden, dass die Luftverfrachtung in den Sommermesswochen keinen grossen Einfluss hatte (Tab. 6.5).

Im Winter war in beiden Wochen die Windrichtung aus Nord/Nordost vorherrschend. Es gab keine thermischen Effekte. Zwischen verschiedenen Windgeschwindigkeiten wurde nicht differenziert. In der ersten Messwoche machte die Windrichtung Nord/Nordost 93 % der Messdauer aus, in der zweiten Messwoche 56 %. Aufgrund dieser Werte muss von einem beträchtlichen Verfrachtungseffekt zwischen dem Auslauf 3 und dem Auslauf 1 ausgegangen werden. Der Zeitanteil mit Wind aus West/Südwest war kleiner als 2 % und wurde daher nicht berücksichtigt. Nur in der Wintersituation mit Wind aus Nord/Nordost wurden die Messwerte um die Verfrachtung korrigiert.

Tabelle 6.6 zeigt den prozentualen Anteil der feuchten und nassen Bodenfläche. Der Liegebereich war im Sommer stark vernässt. Bei PL_B3 war dies noch ausgeprägter als bei ½ PE_B6. Der Schwankungsbereich war im Sommer bei beiden Varianten gross. Im planbefestigten Teil des Auslaufs unter dem Dach bei der Zutrittstür zum Auslauf sammelte sich auch Harn vom Liegebereich. Im überdachten Auslauf hielten sich die Tiere während dem Fressen auf. Im planbefestigten Auslauf bei PL_B3 ergab dies wesentlich mehr feuchte oder nasse Fläche als im perforierten Teil des Auslaufs bei ½ PE_B6. Der nicht überdachte Teil des Auslaufs war in allen Varianten nass. Bei ½ PE_B6 war vor allem der geneigte planbefestigte Boden nass, bei PL_B3 vor

allem die Fläche bei der äusseren Wand des Auslaufs. Im Winter war der Liegebereich bei beiden Varianten nur vereinzelt in kleineren Randzonen feucht.

Tab. 6.6: Anteil der feuchten und nassen Bodenfläche im Stallsystem mit Auslauf als Mittelwert, Minimum und Maximum

Varianten	½ PE_B6	PL_B3	½ PE_B1	½ PE_B3	½ PE_B1	PL_B3
Saison	Sommer		Winter			
Messwoche Nr.	1	1	1	1	2	2
Liegebereich						
PL [%] Ø	40,9	48,1	13,4	25,3	8,04	14,3
Min-Max	15,0-72,5	21,3-86,3	5,0-28,8	10,0-38,8	1,25-8,8	1,25-25,0
Auslauf mit Dach						
PL [%] Ø	38,1	36,3	35,6	36,3	18,6	21,4
Min-Max	7,5-77,5	0,0-75,0	7,5-100	5,0-100	5,0-37,5	5,0-50,0
PE [%] Ø	2,1		27,1	25,0	1,7	
Min-Max	0,0-10,0		0,0-100	0,0-100	0,0-6,67	
PL [%] Ø		36,0				3,6
Min-Max		11,7-100				0,0-20,0
Auslauf ohne Dach						
PL [%] Ø	42,5	27,8	27,5	26,6	0,0	11,4
Min-Max	0,0-100	0,0-55,0	0,0-100	0,0-100		0,0-50,0
PE [%] Ø	16,9		25,0	25,0	0,0	
Min-Max	0,0-52,5		0,0-100	0,0-100		
PL [%] Ø		42,2				10,0
Min-Max		0,0-100				0,0-50,0

Die mit Kot oder Harn verschmutzte Bodenfläche (Tab. 6.7) unterscheidet sich von den Angaben zur Feuchtigkeit (Tab. 6.6). Die Ausläufe wurden jeden Morgen mit einem Handschieber ohne Wasser gereinigt. Im Sommer trocknete die mit Kot beschmutzte Fläche oft ab, im Winter waren Kot und Harn meist gefroren. Dies wurde dann nicht als feuchte oder nasse Fläche erfasst. In der Sommermesswoche waren die Liegebereiche in beiden Varianten gleich verschmutzt. Bei PL_B3 war der Auslauf stärker verschmutzt als bei ½ PE_B6, vor allem auf der Fläche bei der äusseren Wand des Auslaufs. Liegebereiche und Ausläufe waren im Winter wesentlich weniger verschmutzt als im Sommer. Im Auslauf gab es keine grossen Unterschiede zwischen den Varianten. Die Schweine nutzten vor allem die perforierte oder planbefestigte Fläche bei der äusseren Wand für das Ausscheidungsverhalten.

Tab. 6.7: Anteil der mit Kot und Harn verschmutzten Bodenfläche im Stallsystem mit Auslauf als Mittelwert, Minimum und Maximum

Varianten	½ PE_B6	PL_B3	½ PE_B1	½ PE_B3	½ PE_B1	PL_B3
Saison	Sommer		Winter			
Messwoche	1	1	1	1	2	2
Liegebereich						
PL [%] Ø Min-Max	37,2 15,0-72,5	43,4 22,5-86,3	11,2 5,0-21,0	16,4 5,0-33,8	9,5 2,5-25,0	11,8 2,5-27,5
Auslauf mit Dach						
PL [%] Ø Min-Max	38,1 7,5-77,5	36,9 0,0-75,0	17,5 7,5-27,5	13,8 0,0-22,5	23,6 10,0-42,5	26,4 5,0-55,0
PE [%] Ø Min-Max	2,1 0,0-10,0		1,7 0,0-10,0	0,4 0,0-1,7	4,3 0,0-15,0	
PL [%] Ø Min-Max		30,2 0,0-100				5,9 0,0-30,0
Auslauf ohne Dach						
PL [%] Ø Min-Max	49,7 25,0-80,0	33,8 20,0-55,0	12,9 3,0-30,0	11,5 7,00-15,0	16,4 0,0-32,5	18,2 2,50-27,5
PE [%] Ø Min-Max	55,3 17,5-100		43,1 27,5-62,5	46,2 22,0-100	29,3 15,0-72,5	
PL [%] Ø Min-Max		90,0 65,0-100				55,0 27,5-100

Die feuchte oder nasse bzw. mit Kot oder Harn verschmutzte Fläche wurde auch absolut in Quadratmetern pro Tier ausgewiesen (Abb. 6.3). Insgesamt waren bis maximal die Hälfte der gesamten Stallfläche feucht/nass oder verschmutzt. Im Sommer waren die nicht überdachten Flächen vom späten Vormittag bis zum späten Nachmittag starker Sonneneinstrahlung ausgesetzt, der Kot trocknete entsprechend ab. Die Liegebereiche wiesen im Sommer in beiden Varianten mehr Feuchtigkeit und Verschmutzung auf als im Winter. Im Winter waren vor allem die Flächen bei der äusseren Wand des Auslaufs verschmutzt. Der Anteil der feuchten und nassen Fläche war in der ersten Winterwoche grösser als in der zweiten. In der zweiten Woche waren Kot und Harn gefroren.

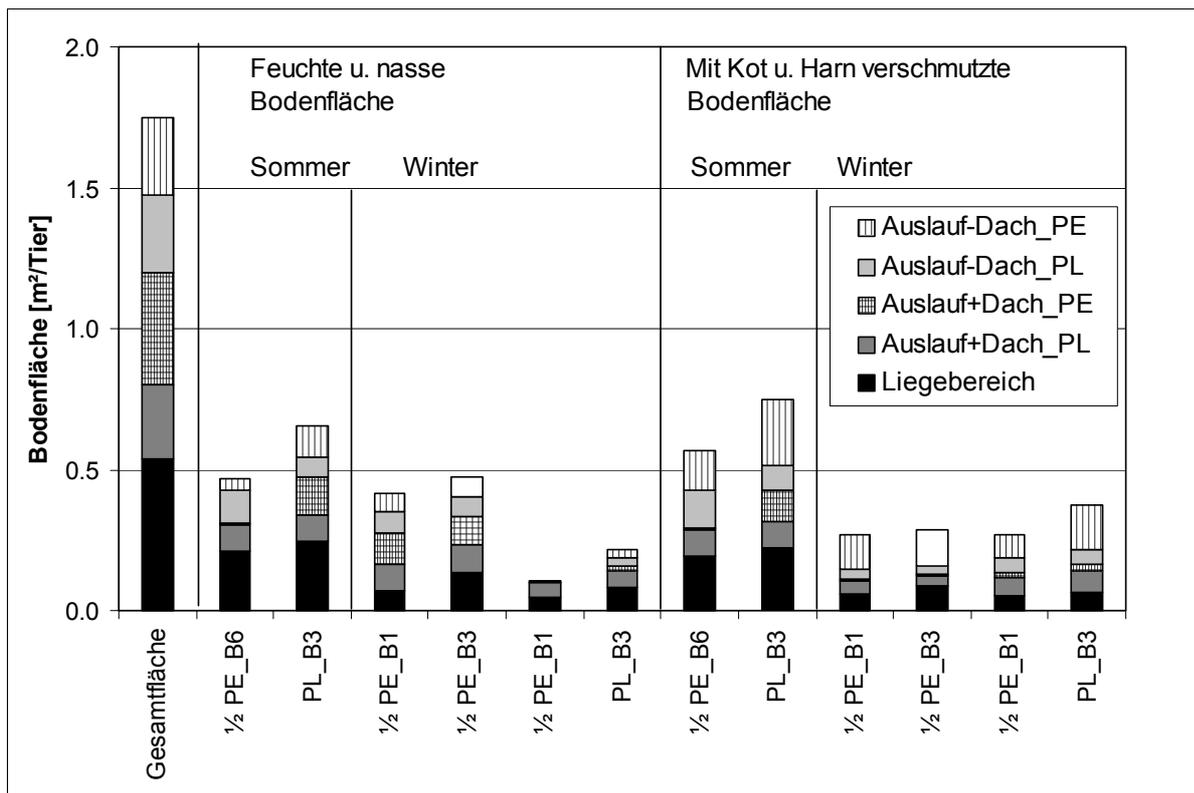


Abb. 6.3: Feuchte und nasse bzw. mit Kot und Harn verschmutzte Bodenfläche im Vergleich mit der Gesamtfläche [m²/Tier]; Abkürzungen: Auslauf-Dach Auslauf ohne Dach, Auslauf+Dach Auslauf mit Dach, PE perforiert, PL planbefestigt.

Tabelle 6.8 zeigt den Anteil der Tiere mit verschmutzter Körperoberfläche. Beurteilt wurden die Körperteile Schinken, Rücken-/Bauchbereich, Gesäuge und Hals-/Kopfbereich. Im Sommer waren die Schweine in beiden Gruppen wesentlich stärker verschmutzt als im Winter, Variante PL_B3 mehr als 1/2 PE_B6. Im Winter wurde nur ein geringer Anteil der Schweine als verschmutzt eingestuft, da sich die Tiere vor allem im Liegebereich im Stall aufhielten und dieser weitgehend sauber war.

Tab. 6.8: Anteil der Tiere mit verschmutzter Körperoberfläche im Stallsystem mit Auslauf als Mittelwert, Minimum und Maximum

Varianten	1/2 PE_B6	PL_B3	1/2 PE_B1	1/2 PE_B3	1/2 PE_B1	PL_B3
Saison	Sommer		Winter			
Messwoche Nr.	1	1	1	1	2	2
Schinken [%] Ø Min-Max	52,5 20,0-100	87,5 50,0-100	2,0 0,0-5,0	3,9 0,0-10,0	1,3 0,0-5,0	3,7 0,0-10,0
Rücken-Bauchbereich [%] Ø Min-Max	51,3 20,0-100	85,0 50,0-100	1,5 0,0-5,0	3,7 0,0-10,0	1,7 0,0-10,0	1,3 0,0-5,0
Gesäuge [%] Ø Min-Max	47,5 10,0-100	86,3 60,0-100	1,9 0,0-5,0	2,7 0,0-5,0	2,4 0,0-5,0	2,0 0,0-5,0
Hals-Kopfbereich [%] Ø Min-Max	52,5 20,0-100	83,8 40,0-100	1,5 0,0-5,0	2,1 0,0-5,0	1,7 0,0-5,0	1,3 0,0-5,0

6.2 NH₃-Konzentration und -Emission

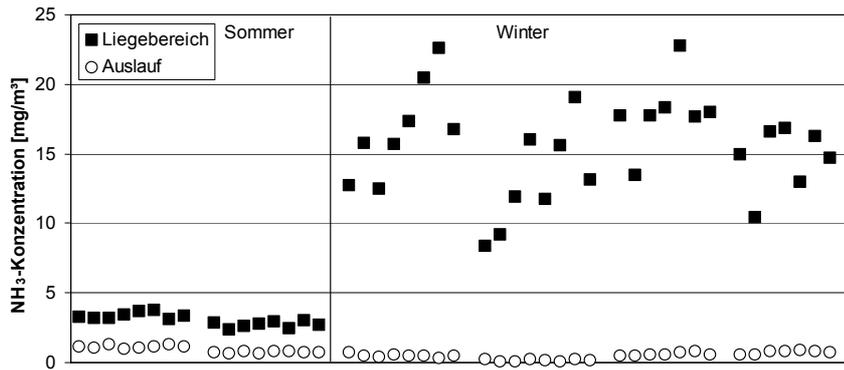
Abbildung 6.4a zeigt die Resultate für die NH₃-Konzentrationen im Auslauf und Liegebereich. Die Konzentrationen im Auslauf lagen im Winter zwischen 0,07 und 0,88 mg/m³ und im Sommer zwischen 0,69 und 1,29 mg/m³. Die Konzentrationen im Liegebereich variierten im Winter zwischen 8,4 und 22,8 mg/m³ und im Sommer zwischen 2,4 und 3,8 mg/m³. Im Sommer wurden bei Variante ½ PE_B6 sowohl im Liegebereich als auch im Auslauf etwas tiefere Werte als bei PL_B3 beobachtet. Im Winter gab es im Liegebereich zwischen den einzelnen Messtagen starke Schwankungen. Für die Mittelwerte ergaben sich daher beträchtliche Standardabweichungen (nicht dargestellt), welche grösser waren als die Unterschiede zwischen den Mittelwerten der Varianten. Der Vergleich der Varianten ist aus diesem Grund erschwert. Tendenziell höhere Konzentrationen im Liegebereich wurden bei ½ PE_B3 und PL_B3 im Vergleich zu ½ PE_B1 festgestellt.

Bei den NH₃-Emissionen pro Tier ergab sich in der Endmast im Sommer eine Bandbreite von 1391-2923 mg NH₃/Tier·h und im Winter von 134-600 mg NH₃/Tier·h (Abb. 6.4b). Im Winter machte der Auslauf 4 bis 67 % (Mittelwert 24 %, Median 18 %) der gesamten NH₃-Emission aus. Im Sommer dominierte der Auslauf in beiden Varianten mit 80 bis 89 % der gesamten NH₃-Emissionen (Mittelwert 86 %, Median 87 %). Der deutliche Unterschied zwischen Sommer und Winter ist vor allem auf die Emissionen vom Auslauf zurückzuführen, denn die Emissionen vom Liegebereich waren in beiden Jahreszeiten vergleichbar.

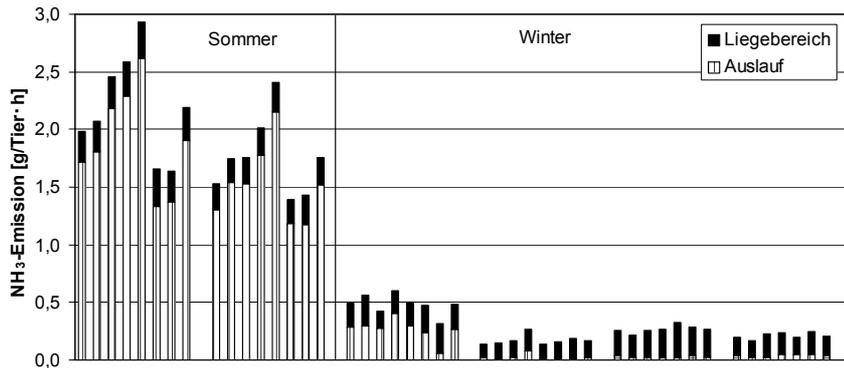
Im Vergleich zum traditionellen Stallsystem TS_FF_EG_EM waren diese Sommermesswerte 2,2- bis 3,4-fach höher. Im Winter gab es zwischen traditionellem und neuem Stallsystem kaum Unterschiede.

Die NH₃-Emissionen waren im Sommer bei PL_B3 rund 20 % höher als bei ½ PE_B6. Im Auslauf gab es im Sommer grosse Unterschiede zwischen den einzelnen Messtagen, diese verliefen bei den beiden Varianten meist parallel, während die Emissionen von der Liegefläche in der gleichen Grössenordnung waren. Bucht 3 ergab im Winter in der ersten Messwoche bei ½ PE höhere Emissionswerte als Bucht 1. Nach Einbau des planbefestigten Bodens in Bucht 3 war der Unterschied zwischen Bucht 1 und 3 geringer.

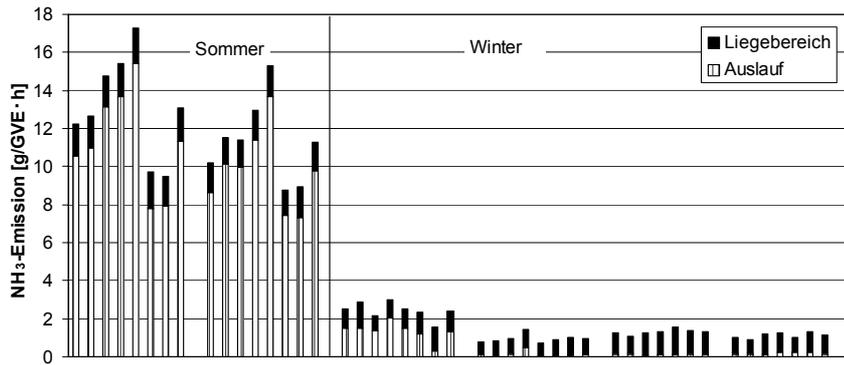
Mit der Bezugsgrösse pro Grossvieheinheit ergaben sich vergleichbare Aussagen wie pro Tier (Abb. 6.4c). Bezogen auf die Fläche war der Anteil der NH₃-Emissionen vom Liegebereich jedoch doppelt so hoch und vom Auslauf etwas geringer (Abb. 6.4d).



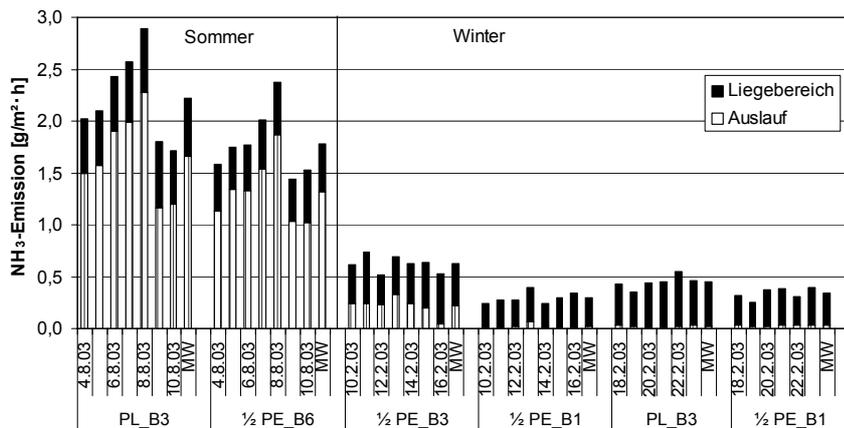
a) NH_3 -Konzentration [mg/m³]



b) NH_3 -Emission [g/Tier·h]



c) NH_3 -Emission [g/GVE·h]



d) NH_3 -Emission [g/m²·h]

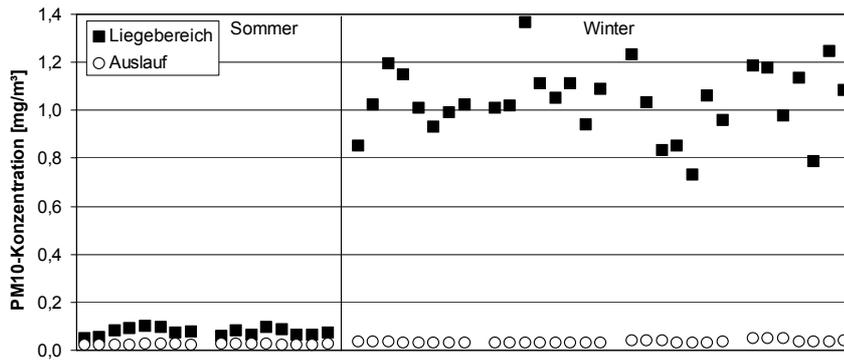
Abb. 6.4: NH_3 -Konzentration und -Emission im Liegebereich mit planbefestigtem (PL) oder teilperforiertem ($\frac{1}{2}$ PE) Auslauf, im Sommer und Winter als Tageswerte und Mittelwert (MW).

6.3 PM10-Konzentration und -Emission

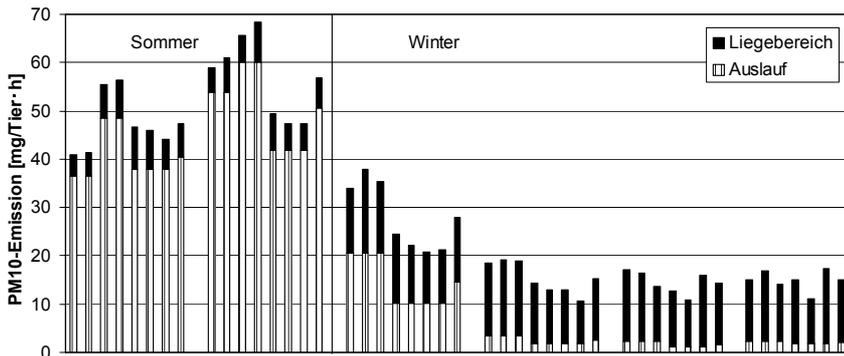
Im Sommer gab es bei der PM10-Konzentration keinen wesentlichen Unterschied zwischen den Varianten (Abb. 6.5a). In beiden Varianten waren die PM10-Konzentrationen im Liegebereich (0,05 bis 0,10 mg/m³) höher als im Auslauf (0,02 bis 0,03 mg/m³). Die PM10-Konzentrationen im Auslauf betragen im Winter mit 0,03 bis 0,05 mg/m³ nur 3 % der im Liegebereich gemessenen Werte (0,79 bis 1,37 mg/m³). Im Liegebereich traten zwischen den einzelnen Messtagen grosse Schwankungen auf.

Bei den PM10-Emissionen pro Tier waren die Werte im Sommer (40,8 bis 68,3 mg/Tier·h) deutlich höher als im Winter (10,7 bis 37,9 mg/Tier·h) (Abb. 6.5b). Im Sommer gab es grosse Unterschiede zwischen den Messtagen, wobei die Werte bei PL durchschnittlich rund 20 % tiefer waren als bei ½ PE. In beiden Varianten dominierte im Sommer der Auslauf mit 81 bis 92 % der gesamten PM10-Emissionen (Mittelwert 87 %, Median 86 %). Im Winter machte der Auslauf 7 bis 60 % (Mittelwert 24 %, Median 16 %) der gesamten PM10-Emission aus. Im Winter war der Anteil der PM10-Emission vom Liegebereich höher als im Sommer. Im Auslauf konnten im Winter zwischen den beiden Varianten keine Unterschiede festgestellt werden.

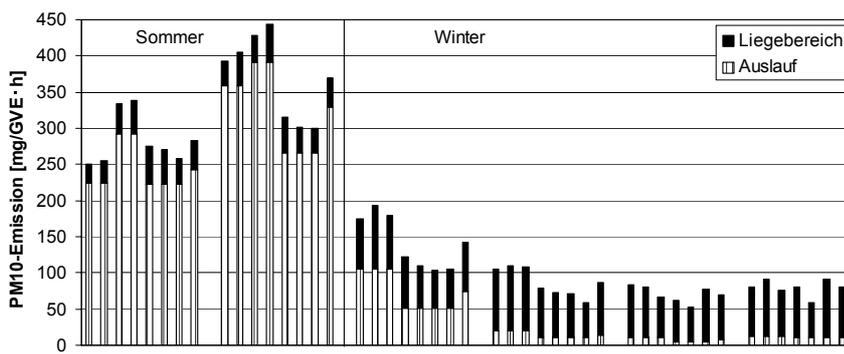
Die PM10-Emissionen bezogen auf die Grossvieheinheit (Abb. 6.5 c) unterschieden sich kaum von den PM10-Emissionen pro Tier (Abb. 6.5b). Der Unterschied der PM10-Emissionen zwischen Sommer und Winter war auf die Fläche bezogen (Abb. 6.5 d) geringer als pro Tier. Aufgrund der unterschiedlichen Grösse von Liegebereich und Auslauf war der Anteil der Emissionen vom Liegebereich deutlich höher als bei den Resultaten in Abbildung 6.5b.



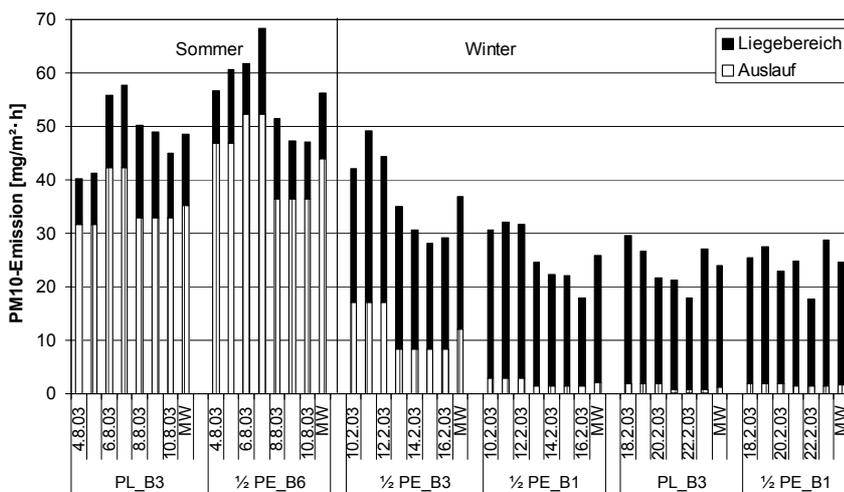
a) PM10-Konzentration [mg/m³]



b) PM10-Emission [mg/Tier·h]



c) PM10-Emission [mg/GVE·h]



d) PM10-Emission [mg/m²·h]

Abb. 6.5: PM10-Konzentration und -Emission im Liegebereich mit planbefestigtem (PL) oder teilperforiertem (½ PE) Auslauf, im Sommer und Winter als Tageswerte und Mittelwert (MW).

7. Vergleich der Versuchsvarianten

In diesem Kapitel wird der Einfluss der Versuchsvarianten auf die Konzentration und Emission von NH_3 und PM_{10} mit verschiedenen statistischen Methoden auf Signifikanz geprüft. Die Abkürzungen der Versuchsvarianten in den Tabellen 4.1 und 6.1 werden in den folgenden Kapiteln weiter verwendet.

7.1 Statistische Auswertung

Die Konzentrationen und Emissionen der Fütterungsvarianten wurden mit Hilfe der Log- oder Quadratwurzel-Funktionen transformiert und statistisch ausgewertet. Für die Resultate in den Tabellen 7.1 und 7.6 wurden alle Messwerte in ein Modell mit gemischten Effekten einbezogen. Die Messstage innerhalb einer einzelnen Variante wurden als Wiederholung behandelt, die Fütterung, Mastabschnitte und Jahreszeiten als fixe Effekte mit Interaktionen. Das Modell nutzte entweder eine symmetrische oder eine auto-regressive Korrelation.

Für den Vergleich von Teilspalten- mit Vollspaltenboden wurde eine einfaktorielle Varianzanalyse berechnet. Die Datensätze für die Tabellen 7.2 und 7.7 stammten im Sommer aus der MM und im Winter aus der EM, um Unterschiede zwischen den Mastabschnitten auszuschalten. Auch bei den Einstreu- bzw. Beschäftigungsverfahren wurde eine einfaktorielle Varianzanalyse verwendet (Tab. 7.3 und Tab. 7.8). Mit Blick auf einzelne fehlende Daten in beschreibenden Datensätzen und um innerhalb einer Variante unabhängige Daten zu erreichen, wurde nur der erste und vierte Tag einer Messperiode genutzt.

Beim neuen Stallsystem unterschieden sich die beiden Varianten im Auslaufboden: planbefestigt und teilperforiert. Es war nicht bekannt, ob sich dies auch auf den Liegebereich auswirkt. Die Datensätze vom Liegebereich und Auslauf wurden getrennt analysiert und dargestellt. Um einen ausgewogenen Datensatz zu erhalten, wurden die Sommermesswerte mit der zweiten Winterwoche verglichen, damit die Anzahl Messstage und die Varianten vergleichbar waren.

7.2 Ammoniak

Den Vergleich von Trocken- und Flüssigfütterung bei Teilspaltenboden zeigt Tabelle 7.1. Die Fütterung hatte weder im Sommer noch im Winter einen signifikanten Einfluss auf die NH_3 -Konzentrationen. Die NH_3 -Emissionsdaten zeigten unabhängig von der Bezugsgrösse pro Tier, pro Grossvieheinheit oder pro Quadratmeter Stallfläche ähnlich starke Effekte und werden daher im Folgenden gemeinsam diskutiert. Die Fütterung hatte keinen signifikanten Einfluss auf die NH_3 -Emissionen. Im Sommer waren jedoch die Werte signifikant höher als im Winter. Zwischen der VM und der MM einerseits sowie der EM andererseits wurde pro Tier und pro Stallfläche ein signifikanter Anstieg der Emissionen beobachtet. In der VM und der MM waren die Mittelwerte jedoch nahezu identisch. Pro Grossvieheinheit waren die Resultate in der MM tendenziell geringer als in der VM und der EM. Eine Interaktion konnte nur zwischen den Mastabschnitten und den Jahreszeiten festgestellt werden, was einerseits auf die unterschiedlichen Tiergewichte in den Jahreszeiten sowie andererseits auf die unterschiedliche Futtermenge hinweist.

Tab. 7.1: Einflussfaktoren auf die NH₃-Konzentration und -Emission mit Teilspaltenboden bei Trocken- oder Flüssigfütterung

Parameter	Fütterung		Saison Ø	rsd	Effekt (P-Wert)			Interaktionen		
	Trocken FT	Flüssig FF			Fütterung	Mastabschnitt	Saison	Fütterung: Mastabschnitt	Fütterung: Saison	Mastabschnitt: Saison
NH ₃ -Konzentration [mg/m ³] ^{###}										
Sommer	2,85	3,19	3,01	0,09 ⁽¹⁾	0,990	0,016	0,716	0,392	0,207	0,056
Winter	4,02	3,24	3,63							
Fütterung Ø	3,43	3,22								
NH ₃ -Emission [mg/Tier·h] [#]										
Sommer	371	460	413	0,13 ⁽²⁾	0,487	0,012	0,003	0,411	0,275	0,051
Winter	117	100	109							
Fütterung Ø	244	272								
NH ₃ -Emission [mg/GVE·h] [#]										
Sommer	3105	3547	3316	0,24 ⁽²⁾	0,527	0,083	0,003	0,369	0,392	0,060
Winter	983	947	965							
Fütterung Ø	2044	2190								
NH ₃ -Emission [mg/m ² Stallfläche·h] [#]										
Sommer	389	447	417	0,14 ⁽²⁾	0,950	0,011	0,002	0,438	0,324	0,049
Winter	117	97	107							
Fütterung Ø	253	265								

Datentransformation: # log(y); ## Wurzel(y)

Modelltyp Korrelation: (1) Symmetrisch oder (2) Auto-regression

In Tabelle 7.2 ist der Vergleich zwischen Teil- und Vollspaltenboden aufgezeigt. Bei VS waren die Konzentrationen signifikant höher als bei TS. Bei VS waren die Konzentrationen im Winter weit höher als im Sommer. Die Emissionswerte waren bei VS pro Tier und pro Quadratmeter Stallfläche signifikant höher. Die Jahreszeit hatte keinen signifikanten Einfluss. Die Unterschiede in den Konzentrationen sind auf die tieferen Lüftungsraten im Winter zurückzuführen. Die signifikante Interaktion zwischen Stallsystem und Jahreszeit zeigt, dass die Emissionen im Winter bei VS höher und im Sommer tiefer waren.

Tab. 7.2: Einflussfaktoren auf die NH₃-Konzentration und -Emission mit Teilspalten- oder Vollspaltenboden bei Flüssigfütterung

Parameter	Boden		Saison Ø	rse	Effekt (P-Wert)		Interaktion
	Teilspalten TS	Vollspalten VS			Stallsystem	Saison	Stallsystem: Saison
NH ₃ -Konzentration [mg/m ³]							
Sommer	2,3	3,9	3,1	0,37	1,40E-05	7,40E-06	4,20E-05
Winter	5,1	16,9	11,0				
Stallsystem Ø	3,7	10,4					
NH ₃ -Emission [mg/Tier·h] ^{###}							
Sommer	260	216	238	0,84	0,012	0,537	0,003
Winter	157	364	261				
Stallsystem Ø	208	290					
NH ₃ -Emission [mg/GVE·h] ^{###}							
Sommer	2132	1674	1903	2,56	0,029	0,077	0,003
Winter	938	2284	1611				
Stallsystem Ø	1535	1979					
NH ₃ -Emission [mg/m ² Stallfläche·h] ^{###}							
Sommer	253	300	277	0,85	0,0007	0,276	0,002
Winter	153	500	327				
Stallsystem Ø	203	400					

Datentransformation: ## Wurzel(y)

Der Einfluss verschiedener Einstreu- bzw. Beschäftigungsverfahren in der MM im Sommer auf Teilspaltenboden ist in Tabelle 7.3 dargestellt. Die Variante EP hatte signifikant höhere NH₃-Konzentrationen und -Emissionen als EG und EA. Die Emission war bei EP mehr als 50 % höher als bei EG.

Tab. 7.3: Einflussfaktoren auf die NH₃-Konzentration und -Emission mit Teilspaltenboden, Flüssigfütterung und verschiedenen Einstreu- bzw. Beschäftigungsverfahren

Parameter	Stroh			rse	Effekt (P-Wert) Variante
	geschnitten EG	aufbereitet EA	Presswürfel EP		
NH ₃ -Konzentration [mg/m ³]	2,32	2,97	4,73	0,56	0,046
NH ₃ -Emission [mg/Tier•h] ^{##}	260	289	525	1,67	0,049
NH ₃ -Emission [mg/GVE•h]	2132	2728	4660	568,5	0,043
NH ₃ -Emission [mg/m ² Stallfläche•h] ^{##}	253	303	510	1,65	0,054

Datentransformation: ## Wurzel(y)

Beim neuen Stallsystem mit Auslauf wurde der Einfluss des Auslaufbodens getestet (Tab. 7.4). Der Liegebereich mit planbefestigtem Auslauf (PL) wies höhere NH₃-Konzentrationen und – Emissionen als der Liegebereich mit teilperforiertem Auslauf auf. Der Unterschied der Emissionen vom Liegebereich war bei allen Bezugsgrößen signifikant, auch die Jahreszeit war signifikant. Im Sommer waren die Emissionswerte deutlich höher als im Winter. Sowohl der Liegebereich als auch die Tiere waren im Sommer bei PL mehr verschmutzt (Tab. 6.7 und 6.8).

Tab. 7.4: Einflussfaktoren auf die NH₃-Konzentration und -Emission im eingestreuten Liegebereich des Auslaufstalles

Parameter	Auslauf		Saison Ø	rsd	Effekt (P-Wert)	
	teilperforiert ½ PE	planbefestigt PL			Variante	Saison
NH ₃ -Konzentration [mg/m ³] [#]						
Sommer	2,7	3,4	3,1	0,08 ⁽²⁾	0,110	0,019
Winter	14,7	18,0	16,3			
Variante Ø	8,3	10,1				
NH ₃ -Emission [mg/Tier•h] [#]						
Sommer	232	289	260	0,03 ⁽¹⁾	0,008	0,008
Winter	173	240	207			
Variante Ø	205	266				
NH ₃ -Emission [mg/GVE•h]						
Sommer	1495	1720	1607	2,89 ⁽¹⁾	0,013	0,007
Winter	925	1162	1044			
Variante Ø	1231	1462				
NH ₃ -Emission [mg/m ² Liegebereich•h]						
Sommer	454	564	509	1,43 ⁽¹⁾	0,001	0,001
Winter	308	425	366			
Variante Ø	387	500				

Datentransformation: # log(y)

Modelltyp Korrelation: (1) Symmetrisch oder (2) Auto-regression

Der Einfluss des Auslaufbodens auf die NH₃-Konzentration und -Emission im Auslauf ist in Tabelle 7.5 aufgezeigt. Es gab zwar numerische Unterschiede zwischen den Mittelwerten, diese waren jedoch nicht signifikant. Dies ist auch auf die grossen Unterschiede zwischen den einzelnen Messtagen zurückzuführen. Bei den Konzentrationen war der jahreszeitliche Effekt nicht signifikant, während bei den Emissionen im Sommer ein signifikanter Anstieg mit grossen Unterschieden zu beobachten war.

Tab. 7.5: Einflussfaktoren auf die NH₃-Konzentration und -Emission im Auslauf mit den Varianten ½ PE und PL

Parameter	Auslauf		Saison Ø	rsd	Effekt (P-Wert)	
	teilperforiert ½ PE	planbefestigt PL			Variante	Saison
NH ₃ -Konzentration [mg/m ³] [#]						
Sommer	0,77	1,14	0,95	0,23 ⁽²⁾	0,783	0,472
Winter	0,76	0,60	0,68			
Variante Ø	0,76	0,89				
NH ₃ -Emission [mg/Tier·h] [#]						
Sommer	1521	1901	1711	0,57 ⁽²⁾	0,899	0,040
Winter	38	27	33			
Variante Ø	837	1037				
NH ₃ -Emission [mg/GVE·h] [#]						
Sommer	9800	11348	10574	0,72 ⁽²⁾	0,890	0,039
Winter	203	133	168			
Variante Ø	5371	6172				
NH ₃ -Emission [mg/m ² Auslauf·h] [#]						
Sommer	1323	1655	1489	0,57 ⁽²⁾	0,884	0,039
Winter	30	22	26			
Variante Ø	727	901				

Datentransformation: # log(y)

Modelltyp Korrelation: (1) Symmetrisch oder (2) Auto-regression

7.3 PM10

Der Vergleich von Trocken- und Flüssigfütterung bei Teilspaltenböden ergab keine signifikanten Unterschiede der PM10-Konzentrationen (Tab. 7.6). Die PM10-Emissionen waren auf die Stallfläche bezogen bei FT tendenziell höher. Die Emissionen nahmen mit den Mastabschnitten signifikant zu, mit Ausnahme der Werte pro Grossvieheinheit, bei denen sich in der MM höhere Werte ergaben. Im Sommer waren die Emissionen signifikant höher und die Konzentrationen tiefer. Die Interaktionen waren nicht signifikant.

Tab. 7.6: Einflussfaktoren auf die PM10-Konzentration und -Emission mit Teilspaltenböden bei Trocken- oder Flüssigfütterung

Parameter	Fütterung		Saison Ø	rsd	Effekt (P-Wert)			Interaktionen		
	Trocken FT	Flüssig FF			Fütterung	Mastabschnitt	Saison	Fütterung: Mastabschnitt	Fütterung: Saison	Mastabschnitt: Saison
PM10-Konzentration [mg/m ³] ^{###}										
Sommer	0,15	0,15	0,15	0,13 ⁽²⁾	0,412	0,103	0,063	0,393	0,142	0,212
Winter	0,45	0,26	0,36							
Fütterung Ø	0,30	0,21								
PM10-Emission [mg/Tier·h] ^{###}										
Sommer	18,4	20,5	19,4	0,12 ⁽²⁾	0,081	0,041	0,034	0,229	0,114	0,330
Winter	12,9	8,0	10,5							
Fütterung Ø	15,6	14,2								
PM10-Emission [mg/GVE·h] ^{###}										
Sommer	145	162	154	0,07 ⁽²⁾	0,101	0,542	0,084	0,294	0,176	0,453
Winter	124	72	98							
Fütterung Ø	135	117								
PM10-Emission [mg/m ² Stallfläche·h] ^{###}										
Sommer	19,3	19,9	19,6	0,12 ⁽¹⁾	0,050	0,044	0,029	0,319	0,187	0,283
Winter	12,9	7,8	10,3							
Fütterung Ø	16,1	13,9								

Datentransformation: ### Wurzel(y)

Modelltyp Korrelation: (1) Symmetrisch oder (2) Auto-Regression

Im Vergleich von Teil- und Vollspaltenböden waren die PM10-Konzentrationen bei VS signifikant höher (Tab. 7.7). Die Emissionswerte waren nicht signifikant, wobei die Resultate pro Tier und pro Grossvieheinheit bei TS tendenziell höher waren als bei VS. Jahreszeitlich signifikante

Effekte gab es nur bei den Konzentrationswerten, die im Winter dreimal höher waren als im Sommer.

Tab. 7.7: Einflussfaktoren auf die PM10-Konzentration und -Emission mit Teil- oder Vollspaltenboden bei Flüssigfütterung

Parameter	Boden		Saison Ø	rse	Effekt (P-Wert)		Interaktion Stallsystem: Saison
	Teilspalten TS	Vollspalten VS			Stallsystem	Saison	
PM10-Konzentration [mg/m ³]							
Sommer	0,24	0,21	0,22	0,050	0,027	0,0004	0,012
Winter	0,53	1,01	0,77				
Stallsystem Ø	0,38	0,61					
PM10-Emission [mg/Tier•h]							
Sommer	26,8	11,5	19,1	4,26	0,170	0,978	0,027
Winter	16,4	21,7	19,1				
Stallsystem Ø	21,6	16,6					
PM10-Emission [mg/GVE•h]							
Sommer	220	89	155	35,72	0,140	0,210	0,028
Winter	98	136	117				
Stallsystem Ø	159	113					
PM10-Emission [mg/m ² Stallfläche•h]							
Sommer	26,1	15,9	21,0	4,43	0,587	0,581	0,018
Winter	16,0	29,8	22,9				
Stallsystem Ø	21,0	22,9					

Datentransformation: ## Wurzel(y)

Tabelle 7.8 zeigt den Vergleich der Einstreu- bzw. Beschäftigungsverfahren. Bei EA waren die PM10-Konzentrationen und -Emissionen deutlich höher als bei EG und EP, aufgrund der geringen Datenmenge mit vier Messtagen in nur einem Mastabschnitt jedoch nicht signifikant.

Tab. 7.8: Einflussfaktoren auf die PM10-Konzentration und -Emission mit Teilspaltenboden, Flüssigfütterung und verschiedenen Einstreu- bzw. Beschäftigungsverfahren

Parameter	Stroh			rse	Effekt (P-Wert) Variante
	geschnitten EG	aufbereitet EA	Presswürfel EP		
PM10-Konzentration [mg/m ³]	0,24	0,41	0,18	0,36	0,248
PM10-Emission [mg/Tier•h]	27	39	20	9,14	0,258
PM10-Emission [mg/GVE•h]	220	366	175	92,2	0,244
PM10-Emission [mg/m ² Stallfläche•h]	26	40	19	9,42	0,214

Datentransformation: # log(y)

In Tabelle 7.9 sind die Resultate für die eingestreuten Liegebereiche der beiden Auslaufvarianten zusammengefasst. Bei den PM10-Konzentrationen und -Emissionen im Liegebereich ergaben sich keine Unterschiede zwischen den Varianten. Die Lüftungsraten und Strohmenge in den Liegebereichen waren in beiden Varianten gleich. Der jahreszeitliche Effekt zeigte tendenziell bis signifikant höhere Werte im Winter bei den PM10-Konzentrationen und -Emissionen. Diese Unterschiede im Winter könnten entweder auf die erhöhte Strohmenge oder den vermehrten Aufenthalt der Tiere im Liegebereich zurückzuführen sein.

Tab. 7.9: Einflussfaktoren auf die PM10-Konzentration und -Emission im eingestreuten Liegebereich mit den Varianten ½ PE und PL

Parameter	Auslauf		Saison Ø	rsd	Effekt (P-Wert)	
	teilperforiert ½ PE	planbefestigt PL			Variante	Saison
PM10-Konzentration [mg/m ³] ^{###}						
Sommer	0,07	0,08	0,08	0,10 ⁽¹⁾	0,748	0,002
Winter	1,09	0,96	1,02			
Variante Ø	0,54	0,49				
PM10-Emission [mg/Tier•h]						
Sommer	6,3	6,8	6,5	0,37 ⁽²⁾	0,760	0,094
Winter	12,8	12,8	12,8			
Variante Ø	9,3	9,5				
PM10-Emission [mg/GVE•h] ^{###}						
Sommer	40,8	40,1	40,5	0,11 ⁽¹⁾	0,114	0,019
Winter	68,5	62,0	65,2			
Variante Ø	53,6	50,2				
PM10-Emission [mg/m ² Liegebereich•h]						
Sommer	12,4	13,2	12,8	0,45 ⁽²⁾	0,797	0,114
Winter	22,8	22,7	22,7			
Variante Ø	17,2	17,6				

Datentransformation: ## Wurzel(y)

Modelltyp Korrelation: (1) Symmetrisch oder (2) Auto-Regression

Die PM10-Konzentrationen über den Ausläufen waren sowohl im Sommer als auch im Winter sehr tief (Tab. 7.10). Zwischen den beiden Auslaufvarianten gab es bei den Konzentrationen und Emissionen keine signifikanten Unterschiede. In der Auslaufvariante PL waren die Emissionen tendenziell geringer, was möglicherweise auf den grösseren Anteil der feuchten oder nassen Fläche im Sommer im Vergleich zu ½ PE zurückzuführen ist (vgl. Abb. 6.3). Die PM10-Emissionen im Sommer waren signifikant höher als im Winter.

Tab. 7.10: Einflussfaktoren auf die PM10-Konzentration und -Emission im Auslauf mit ½ PE und PL

Parameter	Auslauf		Saison Ø	rsd	Effekt (P-Wert)	
	teilperforiert ½ PE	planbefestigt PL			Variante	Saison
PM10-Konzentration [mg/m ³] ^{###}						
Sommer	0,026	0,025	0,025	19,48 ⁽²⁾	0,725	0,227
Winter	0,043	0,037	0,040			
Variante Ø	0,034	0,030				
PM10-Emission [mg/Tier•h] [#]						
Sommer	50,5	40,5	45,5	0,25 ⁽²⁾	0,538	0,034
Winter	2,1	1,7	1,9			
Variante Ø	28,2	22,6				
PM10-Emission [mg/GVE•h] [#]						
Sommer	328,7	243,3	286,0	0,44 ⁽²⁾	0,347	0,034
Winter	11,2	8,1	9,6			
Variante Ø	182,2	134,7				
PM10-Emission [mg/m ² Auslauf•h] [#]						
Sommer	44,0	35,2	39,6	0,24 ⁽²⁾	0,358	0,035
Winter	1,7	1,4	1,5			
Variante Ø	24,4	19,6				

Datentransformation: # log(y); ## Wurzel(y)

Modelltyp Korrelation: (1) Symmetrisch oder (2) Auto-Regression

8. Berechnung einer N-Bilanz

Um die NH_3 -Emissionsdaten mit Werten einer anderen Methode vergleichen zu können, wurde für jede Messperiode eine Stickstoffbilanz (N-Bilanz) berechnet. Die N-Aufnahme über das Futter abzüglich der N-Retention im Tierkörper und der $\text{NH}_4\text{-N}$ -Menge in der Gülle ermöglichte die Schätzung der N-Bilanz, d.h. die maximal als NH_3 verfügbare Stickstoffmenge, das sogenannte Emissionspotenzial. Dazu dienten neben der Lebendmasse der Schweine Futterproben während der Messperiode sowie Güllenproben vor und nach der Messperiode.

Die N-Aufnahme wurde aufgrund des Futtermittelsverzehrs pro Variante sowie der Ergebnisse von Futteranalysen berechnet. Die Annahme war, dass die tägliche Lebendmassezunahme der von Kirchgessner (1985) angegebenen N-Retention in den einzelnen Mastabschnitten folgt.

In den Varianten mit TS an der FAT wurden in den Güllenkanälen mehrere Absperrschieber installiert, um den Anstieg der Gullenmenge über die Zeit messen zu können. Diese Messungen fanden jeweils während einer Woche inklusive der vier Messtage statt, denn der Anstieg des Gullenpegels über nur vier Tage wäre zu gering und damit ungenau gewesen. Zur besseren Absicherung dieser Messungen erfolgten zusätzlich einzelne Aufzeichnungen zwischen den Perioden. Vor dem Einstellen der VM-Schweine wurden die Güllenkanäle geleert, so dass ausreichend Lagerkapazität für die gesamte Gülle aller Mastabschnitte vorhanden war. Anhand des Gullenpegels sowie der Kanalabmessungen konnte das Gullenvolumen geschätzt werden. Dieser Wert wurde anschliessend für die N-Bilanz der Messperioden an der FAT sowie für die beiden Praxisbetriebe verwendet, in denen es nicht möglich war, das Volumen zu quantifizieren. Das so ermittelte Gullenvolumen ohne Reinigungswasser war etwas kleiner als die Literaturangaben.

Abbildung 8.1 zeigt die Resultate der N-Bilanz. Bei Schweinen in der VM und der MM war der Anteil der N-Retention höher als in der EM. Die Lebendmassezunahme verlagert sich von Muskel- zu Fettansatz. Die Gullenanalysen in den verschiedenen Mastabschnitten zeigten, dass bei MM- und EM-Tieren vergleichbare Mengen an N anfielen, während bei VM-Tieren der N-Anfall in der Gülle geringer war. Der N-Überschuss war bei den EM-Schweinen bei weitem am grössten. Dies ist darauf zurückzuführen, dass bei fehlender Phasenfütterung die Proteinkonzentration im Futter für die EM-Schweine zu hoch war. Weiter ist zu beachten, dass ein zu knapper N-Überschuss bei gewissen VM- und MM-Gruppen insbesondere bei restriktiver FF möglicherweise die normale Gewichtszunahme pro Tag verringert. Da die Verdaulichkeit von Protein im Schweinefutter normalerweise bei 70 bis 85 % liegt, sind in den Daten der N-Bilanz auch unverdauliche Proteine enthalten. In gewissen Perioden ist der geringe N-Überschuss mehrheitlich auf diese Proteine zurückzuführen, wodurch sich das NH_3 -Emissionspotenzial verringert.

Der grösste N-Überschuss wurde im Winter bei EM-Schweinen im Stallsystem mit Auslauf beobachtet. Dies ist teils auf die grossen Futtermengen während der drei Fütterungszeiten zurückzuführen, hauptsächlich jedoch auf den höheren Proteingehalt in der Winterration. Bei VS ergab sich eine Unsicherheit durch die Ableitung der Gullenmenge im Sommer. Die Gullenmenge war vermutlich geringer als der an der FAT gemessene Wert pro Tier, da die Gülle einen niedrigeren Trockensubstanzgehalt und keine Schwimmschicht hatte.

Abgesehen von den Resultaten der VM im Sommer und der MM im Winter waren die Ergebnisse der N-Bilanz bei den zeitgleich gemessenen Gruppen etwa gleich gross, was deren Vergleichbarkeit mit den Emissionsdaten in Kapitel 6 erhöht.

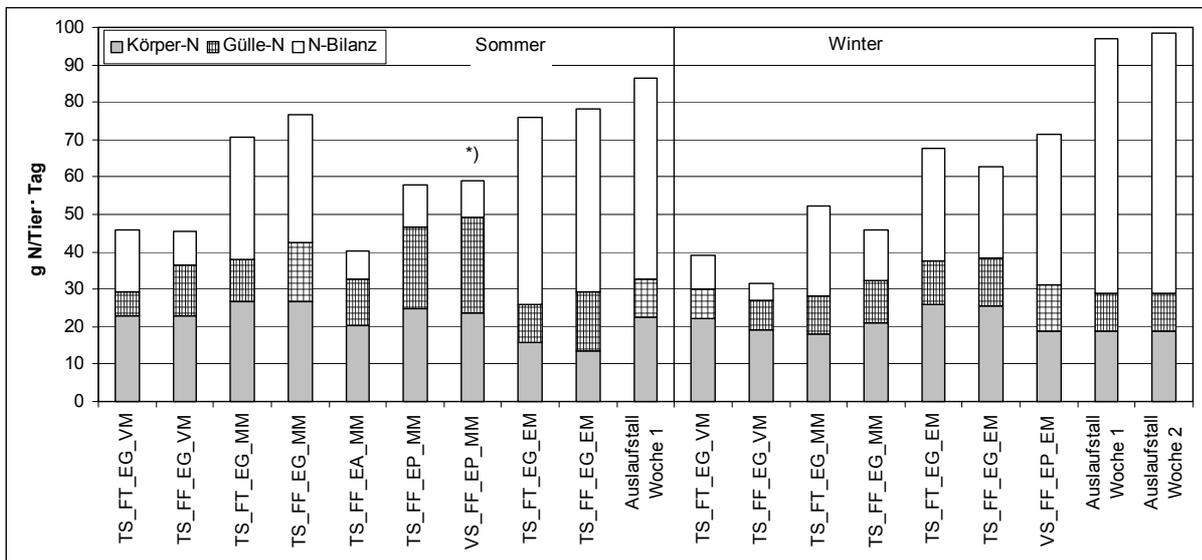


Abb. 8.1: Ergebnisse der N-Bilanz-Berechnung bei Teil- (TS) oder Vollspaltenboden (VS), mit Flüssig- (FF) oder Trockenfütterung (FT), Einstreu geschnitten (EG), aufbereitet (EA) oder Strohpresswürfel (EP), in der Vor- (VM), Mittel- (MM) und Endmast (EM) sowie im neuen Stallsystem mit Auslauf. *) Unsicherheit bei Gülle-N.

Abbildung 8.2 zeigt eine Regression der N-Bilanz-Daten im Vergleich mit den NH₃-Emissionsdaten. Im Sommer war die Korrelation niedriger als im Winter und die Emission grösser. Die NH₃-Emissionen machten im Sommer 45 % der N-Bilanz in traditionellen Stallsystemen aus, beim neuen Stallsystem mit Auslauf waren es 73 %; im Winter lag dieser Anteil bei 13 % beziehungsweise 8 %.

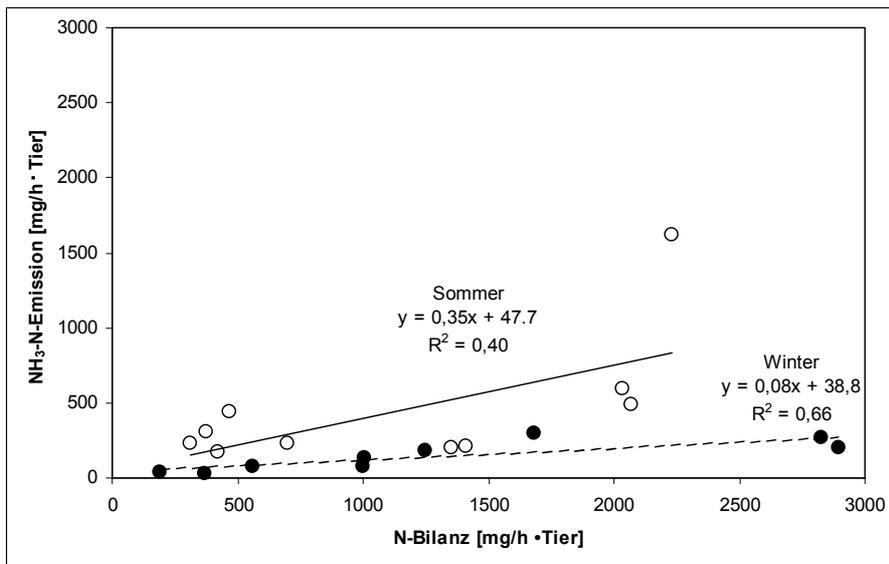


Abb. 8.2: Vergleich der NH₃-N-Emission mit der N-Bilanz während der Sommer- und Wintermessungen bei allen Varianten (○ Sommer, ● Winter).

9. Diskussion

Im folgenden Kapitel werden die Eignung der gewählten und entwickelten Messmethodik sowie die Ergebnisse der Emission von NH_3 und PM_{10} diskutiert und mit der Literatur verglichen. Relevante Einflussfaktoren auf die NH_3 - und PM_{10} -Emissionen werden identifiziert und mögliche Minderungsansätze vorgestellt.

9.1 Messmethodik

Die Situation im geschlossenen Stallsystem ist derjenigen von stationären industriellen Anlagen ähnlich. Entsprechend bot die Messmethodik keine grösseren Schwierigkeiten. Für Ammoniak konnte direkt auf das normierte Verfahren mittels Impingern zurückgegriffen werden. Die Impinger wurden neu konzipiert und speziell gebaut, damit sie auch für die tieferen Konzentrationen bei freier Lüftung geeignet sind und mit kleinen, geregelten Pumpen betrieben werden können.

Für PM_{10} gibt es kein geeignetes normiertes Verfahren für stationäre Anlagen. Deshalb wurden Impaktoren eingesetzt, die aus dem Bereich der Arbeitssicherheit stammen und für verschiedene Strömungsgeschwindigkeiten validiert sind. Dieses Konzept hat gut reproduzierbare Daten geliefert, ist einfach in der Benutzung und relativ günstig in der Anschaffung.

Einigen Aufwand erforderte die Messung des Volumenstroms, da die Geometrie der Kamine in den Ställen wegen grosser Turbulenzen keine Bestimmung der Luftgeschwindigkeit mittels Flügelradanemometer oder Pitot-Rohr erlauben. Durch den Einbau von Messventilatoren konnte der Volumenstrom jedoch verlässlich bestimmt werden.

Um Informationen über den zeitlichen Verlauf der Emissionen zu erhalten, wurden während der ersten Messperioden in geschlossenen Systemen zusätzlich FTIR bzw. TEOM als kontinuierliche Verfahren eingesetzt. Es zeigte sich, dass diese im Unterhalt und bei der Kalibrierung relativ aufwändig sind. Zudem wird bezüglich Analytik qualifiziertes Personal benötigt. Da für die weitere Bearbeitung der Fragestellung Tagesmittelwerte genühten, wurden nur einige exemplarische Tagesgänge ausgewertet. Auf einen weiteren Einsatz der kontinuierlichen Geräte wurde verzichtet.

In offenen Ställen mit Auslauf ist die Bestimmung von Emissionsraten deutlich komplexer als in geschlossenen Systemen, da der Volumenstrom nicht ermittelt werden kann. Deshalb musste erst eine geeignete Methode entwickelt werden. Die Verwendung von Schwefelhexafluorid als Tracer zeichnet sich einerseits durch seine Inertheit gegenüber Tier und Interferenzen sowie andererseits durch die empfindliche Analytik mittels Gaschromatographie aus.

Nebst der Lösung konzeptueller Fragen mussten zahlreiche praktische Herausforderungen angegangen werden. Dazu gehörte die kontrollierte Zudosierung des Tracers an zahlreichen Stellen im Aussenbereich und die Probenahme an zahlreichen Punkten mit je drei Parametern während der gesamten Messperioden (Abb. A2). Die PVC-Schläuche für die Zudosierung mussten vor Tieren und Exkrementen geschützt werden. Besondere Schwierigkeiten bereitete auch das Wetter, welches im Winter mit tiefen Temperaturen und grossen Schneefällen und im Sommer mit sehr heissen Temperaturen grosse Ansprüche an alle verwendeten Materialien und Geräte stell-

te. Insgesamt konnten mit der verwendeten Methodik plausible Resultate erzielt werden, und die Messeinrichtung hat sich in der in Kapitel 5 beschriebenen Form bewährt.

Probleme traten einzig in der zweiten Messwoche im Sommer auf. Diese Daten konnten nicht ausgewertet werden, weil die Werte im Vergleich mit der N-Bilanz nicht plausibel waren. Der Grund dafür lässt sich nicht abschliessend klären, liegt aber möglicherweise bei einer schlecht durchmischten, kurzfristig hergestellten Gasflasche mit SF₆-Tracergas.

Interessant wäre eine ergänzende Validierung über zusätzliche gasförmige Tracer. Dies hätte aber den Rahmen der vorliegenden Untersuchungen gesprengt. Eine weitere Absicherung der Methode könnte auch mit intensiveren, dreidimensionalen visuellen Strömungstests mit Rauch vor Ort erreicht werden. Bei PM₁₀ war der Unterschied zwischen der Hintergrundkonzentration und der Konzentration im Auslauf sehr tief und an der Grenze der Messgenauigkeit. Andere PM₁₀-Quellen, wie die umgebende Ackerfläche oder das Strohlager, spielten möglicherweise auch eine Rolle. Die Sicherstellung von genügend tiefen Hintergrundkonzentrationen konnte nur über weitgehende Anpassungen im Bereich der Stallbelegung und die grosse Flexibilität des landwirtschaftlichen Betriebes für diese Untersuchungen erreicht werden.

9.2 NH₃-Emission, Einflussfaktoren und Minderungsansätze

Die Emissionsübersicht der internationalen Literatur im Anhang Tab. A1.1 ermöglicht einen Vergleich mit den eigenen Messwerten. Dabei ist jedoch zu berücksichtigen, dass die Stallsysteme teils in bezug auf die Stallfläche pro Tier nicht vergleichbar sind und dass die für die Messung der Emissionen verwendeten Methoden nicht die gleichen sind wie in der vorliegenden Studie.

Daten zu Teilspaltenboden fehlten in der Literatur weitgehend. Ein Vergleich ist nur mit den Werten von Groot Koerkamp et al. möglich (1997). Die hier vorliegenden Daten für Teilspaltenboden in der Mittel- und Endmast waren im Sommer um ein Drittel tiefer als jene von Groot Koerkamp et al. (1997). Die tieferen Werte können sich auch durch den Einsatz von Stroh ergeben, das im Güllenkanal eine Schwimmdecke bildet.

Für Stallsysteme mit Vollspaltenboden ist die Datengrundlage in der Literatur weitaus grösser. Die Daten dieser Studie für die Endmast sind mit denen von Seedorf et al. (1998) und von Guingand et al. (1997) sehr ähnlich, wobei die Lüftungsraten bei Guingand et al. (1997) tiefer waren. Die eigenen Emissionswerte waren tiefer als die von Gallmann (2003) und wesentlich tiefer als die von Rathmer (2002). Wenn man die Unterschiede zwischen verschiedenen traditionellen Stallsystemen vernachlässigt, waren die Ergebnisse dieser Untersuchung tiefer als die Literaturangaben.

NH₃-Emissionen von Ausläufen wurden nur von Wachenfelt und Jeppsson (2001) in der Mittelmast veröffentlicht. Im Vergleich zu diesen Resultaten betrug die eigenen Untersuchungen in der Endmast nur vom Auslauf im Winter nur ein Drittel, im Sommer waren diese aber um 30 % erhöht. Während die NH₃-Emissionen von Aussenklimaställen ohne Auslauf in der Literatur (Niebaum 2001, Rathmer 2002, Gallmann 2003) im Winter mit dem untersuchten neuen Stallsystem mit Auslauf vergleichbar waren, ergaben sich im Sommer im neuen Stallsystem mit Auslauf wesentlich höhere NH₃-Emissionen.

Um relevante Einflussfaktoren auf die NH₃-Emission in traditionellen Ställen herauszufinden, wurden in einer schrittweisen Regression elf Variablen einbezogen, die theoretisch einen Einfluss auf die NH₃-Emissionen haben könnten (Tab. 9.1). Sich korrelierende Variablen wurden ausgeschlossen. Dies garantiert die Unabhängigkeit der Daten weitgehend. Lebendmasse, Zulufttemperatur und -feuchtigkeit waren signifikante Variablen. Die Korrelation des Modells war mit 0,89 sehr gut. Die im Kapitel 7.1 als signifikant identifizierten Faktoren, wie die Mastabschnitte und die jahreszeitlichen Effekte, wurden in dieser Regression bestätigt.

Tab. 9.1: Signifikante Einflussfaktoren auf die NH₃-Emission bei traditionellen Stallsystemen

NH ₃ -Emission [mg/h · Tier]			Modell		
Variablen	Wert	t-Wert	rse	P-Wert	r
Lebendmasse	1,48	4,44	0,19	0,0002	0,89
Zuluft Temperatur	0,91	4,12			
Zuluft Luftfeuchtigkeit	1,06	2,93			

Datentransformation: log(y,x)

Daraus lässt sich folgern, dass eine Kühlung der Zuluft im Sommer die Emissionen wirksam reduzieren kann. Die Kühlung kann durch verschiedene Mechanismen erfolgen, z. B. indem die Zuluft von einem beschatteten Ort angesaugt wird (z. B. unter Bäumen oder von der Nordseite eines Gebäudes) oder indem die Lufttemperatur durch Sprühkühlung oder Erdwärmetauscher reduziert wird. Bei tieferen Zulufttemperaturen kann auch die Lüftungsrate reduziert werden. Höhere Ventilationsraten im Sommer führen zu einem stärkeren Luftaustausch im Stall und zu einer Erhöhung der Luftgeschwindigkeit, was für die Schweine einen Abkühlungseffekt ergibt. In der Praxis sind die Stalltemperaturen meist um einige Grade höher als die Aussentemperatur. Daher sollten wirksamere Massnahmen ergriffen werden, um die Luft auf Temperaturen unter der Aussentemperatur abkühlen zu können. Durch die Kombination von kühler Zuluft und tieferen Lüftungsraten können die Emissionen am wirksamsten reduziert werden.

Zudem gibt es in der Literatur deutliche Argumente für Phasenfütterung mit reduziertem Proteingehalt im Futter. Diese Minderung lässt sich auch in bestehenden Ställen umsetzen. Eine Verwendung von Futterkomponenten mit unbekanntem Proteingehalt macht optimierte Fütterationen jedoch schwierig. Auch das Einstreuen von geschnittenem Stroh auf den planbefestigten Boden der Teilspaltenställe kann zu einer Reduktion der Emissionen führen. Das Stroh absorbiert die Flüssigkeit auf dem planbefestigten Boden und sorgt auch für die Bildung einer Schwimmdecke auf der Gülle, welche das Emissionspotenzial weiter verringert.

Um wichtige Einflussfaktoren im neuen Stallsystem mit Auslauf zu eruieren, wurden die Emissionen nur vom Auslauf separat analysiert. Aufgrund der starken Korrelation zwischen den einzelnen Klimavariablen konnte jedoch kein multiples Modell erstellt werden. Die einzelnen Variablen zeigten jedoch gute Korrelationen mit den Emissionen. Die an der Meteostation 1 oder 2 wie auch im Güllkanal gemessenen Lufttemperaturen korrelierten mit über 0,90 (r²). Bei der relativen Luftfeuchtigkeit war die Korrelation nur geringfügig kleiner. Die in der Mitte des Auslaufs gemessene Windgeschwindigkeit korrelierte mit 0,70 (r²). Auch für den Anteil der verschmutzten Fläche wurde eine vergleichbare Korrelation beobachtet.

Es zeigte sich deutlich, dass die klimatischen Effekte am stärksten waren und dass die Temperatur die wichtigste Einflussgrösse darstellte. Auch die Verschmutzung des Bodens war relevant. Mögliche Massnahmen zur Reduktion der Emissionen im Sommerhalbjahr liegen daher bei der Schaffung von Schatten, vor allem auf der Fläche über den Güllenkanälen. Dies kann durch ein Dach, Büsche oder Bäume erfolgen oder allenfalls mit Schattennetzen. Solche Netze werden normalerweise verwendet, um die Schweine im Auslauf vor Sonnenbrand zu schützen. Perforierte Güllenkanäle zwischen Liegebereich und Auslauf können dazu beitragen, dass sich Harn von der Liegefläche nicht entlang dem Gefälle breitflächig auf der planbefestigten Fläche verteilt. Weiter sind Lösungen nötig, um die Temperatur im Güllenkanal zu reduzieren. Der meist nicht überdachte Kotbereich stellt die grösste Emissionsquelle im Auslauf dar. Dies sollte bei der Emissionsreduktion im Zentrum stehen.

9.3 PM10-Emission, Einflussfaktoren und Minderungsansätze

Der Vergleich der PM10-Messungen mit Feinstaubmessungen aus der internationalen Literatur (Tab. A1.3) zeigt deutlich, dass die Literaturwerte für traditionelle Stallsysteme deutlich geringer sind als die eigene Untersuchung. Nach Groot Koerkamp et al. (1997) betragen die Feinstaubemissionen in Teilspaltensystemen nur ein Drittel gegenüber der eigenen Untersuchung. Bei Vollspaltensystemen in verschiedenen Ländern waren die Resultate nur mit Grossbritannien vergleichbar, während die Emissionen in den drei anderen europäischen Ländern rund zwei- bis dreimal tiefer waren (Seedorf et al. 1998 a,b). Teilweise lässt sich das durch den kleineren Cut-off (PM5) erklären. Unterschiede können auch in verschiedenen Messorten begründet sein. Die meisten Messungen waren auf Arbeitshygiene und Tiergesundheit fokussiert und erfolgten deshalb nicht in allen Studien im Abluftkamin.

Über PM10-Emissionen im Auslauf lagen keine publizierten Daten vor. Die vorliegenden Resultate zeigen jedoch, dass die Emissionen vom Stall mit Auslauf im Vergleich zu traditionellen Ställen im Sommer doppelt so hoch waren, während sie im Winter mit den traditionellen Ställen vergleichbar waren. Die Emission im Auslauf wurde höchstwahrscheinlich eher überschätzt, da es schwierig war, die Emissionen nur vom Auslauf zu isolieren. Eine grobe Korrektur mit der Hintergrundkonzentration ist erfolgt. Staub vom Strohlager über den Ausläufen wie auch Mineralstaub von der Ackerfläche konnte nicht separat berücksichtigt werden. Dies hätte einen wesentlich grösseren Probenumfang für die Hintergrundkonzentration erfordert.

In der Regressionsanalyse für PM10-Emissionen aus traditionellen Ställen liessen sich 90 % der Variation auf fünf signifikante Variablen zurückführen (Tab. 9.2). Wiederum korrelierte die Lebendmasse positiv als wichtigster Faktor innerhalb des Modells. Denn das Wachstum der Haut kann mit zunehmendem Alter der Schweine eine wichtige Emissionsquelle darstellen und erklärt zum Teil, warum der Effekt zwischen den Mastabschnitten fast linear ist. Der $\text{NH}_4\text{-N}$ -Gehalt in der Gülle korrelierte mit dem Modell negativ, wie auch der Anteil der nassen Fläche und die relative Luftfeuchtigkeit der Abluft. Diese Faktoren sind voneinander abhängig und weisen darauf hin, dass ein Anstieg der Feuchtigkeit die PM10-Emissionen reduziert. Die Anlagerung von Wasser kann zum Wachstum von Partikeln grösser als PM10 und zur Sedimentation führen. Vermutlich wird Staub auf dem feuchten Stallboden oder sogar in Wassertropfen fixiert. Denkbar ist auch, dass bei steigendem Güllenpegel zwischen den Mastabschnitten und höheren $\text{NH}_4\text{-N}$

N-Konzentrationen in der Gülle aufgrund der höheren Temperaturen im Güllenkanal und abnehmendem Diffusionsgradienten weniger Feuchtigkeit aus dem Güllenkanal stammt. Die Variable, die als letztes ins Modell einging, war die Temperatur der Zuluft. Die Emissionen im Sommer waren höher als im Winter. Grössten Einfluss auf die PM10-Emissionen haben das Wachstum der Schweine sowie die Feuchtigkeit im Stall. Leider fehlen in dieser Studie Daten zur Tieraktivität als unabhängige Variable.

Tab. 9.2: Signifikante Einflussfaktoren auf die PM10-Emissionen bei traditionellen Stallsystemen

PM10-Emission [mg/h·Tier]			Modell		
Variablen	Wert	t-Wert	rse	P-Wert	r
Lebendmasse	1,19	6,29	0,70	0,0027	0,90
Güllengehalt [NH ₄ -N]	-6,81	-3,98			
Feuchte u. nasse Bodenfläche	-2,47	-2,44			
Abluft Luftfeuchtigkeit	-1,03	-2,43			
Zuluft Temperatur	0,54	2,36			

Datentransformation: Wurzel(y,x)

Diese relevanten Einflussfaktoren in Kombination mit den Daten der kontinuierlichen PM10-Messung (Abb. 4.10) zeigen, dass zum einen Versprühen von Öl und zum anderen direktes Besprühen über den Tieren Partikel direkt von den Tieren reduzieren kann. Die Sprühintervalle müssen auf die Fütterungszeiten abgestimmt sein, um zumindest die mit den kontinuierlichen TEOM-Daten gezeigten Emissionsspitzen reduzieren zu können. Diese Massnahme kann in bestehenden Gebäuden wie auch in allen traditionellen Stallsystemen integriert werden. Der Einsatz von pflanzlichem Öl wäre für diesen Zweck geeignet. Wenn auf die Liegeflächen im Stall eine gewisse Menge an geschnittenem Stroh eingestreut wird, ergibt das mit Blick auf PM10-Emissionen kein Problem.

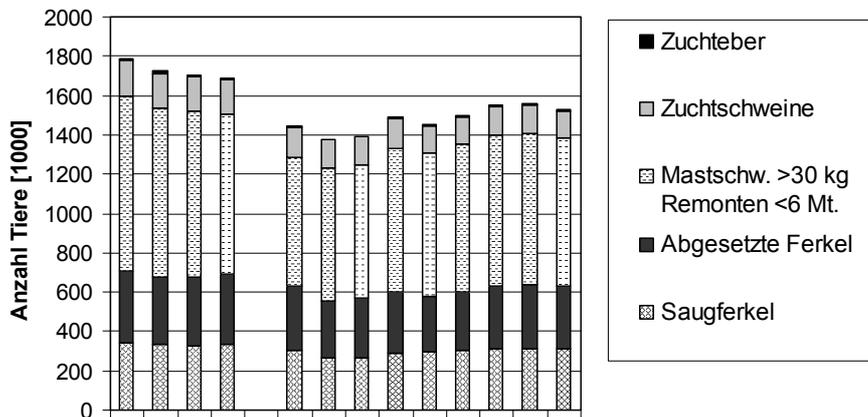
Aus den gleichen Gründen wie bei NH₃ konnte für die PM10-Emissionen im Auslauf kein multiples Modell erstellt werden. Interessant ist, dass die Klimavariablen stark mit den PM10-Emissionen korrelierten und dass die Reihenfolge der Variablen fast gleich war wie bei den NH₃-Emissionen. So korrelierte die an den Meteostationen oder im Güllenkanal gemessene Lufttemperatur mit 0,92 (r²) positiv mit den Emissionsdaten. Dies zeigt, dass die starken jahreszeitlichen Effekte in der Analyse bestätigt wurden, insbesondere die höheren Werte im Sommer. Die Windgeschwindigkeit und die Luftfeuchtigkeit korrelierten mit 0,82 (r²) negativ, was wiederum die tieferen Emissionswerte im Winter bestätigt. Die Reduktion der höheren PM10-Emissionen im Auslauf ist vor allem in der warmen Periode zu diskutieren.

10. Stallemissionen aus der Schweinehaltung in der Schweiz

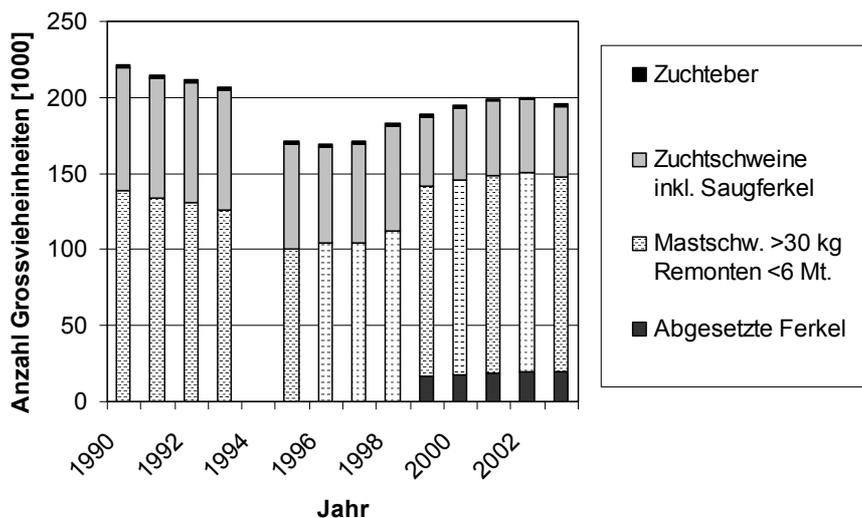
Aus der Entwicklung des Schweinebestandes und den Emissionsfaktoren resultiert der Verlauf der NH₃-Emissionen in der Schweiz im Zeitraum von 1990 bis 2003. Die den folgenden Abbildungen zugrunde liegenden Datentabellen sind im Anhang A8 bis A9 zu finden.

10.1 Entwicklung des Schweinebestandes

Die Entwicklung des Schweinebestandes in der Schweiz ist in den Statistischen Erhebungen und Schätzungen über Landwirtschaft und Ernährung des Schweizerischen Bauernverbandes im Zeitraum von 1990 bis 2002 dokumentiert. Aktuelle Daten für das Jahr 2003 wurden vom Schweizerischen Bauernverband (Schmid 2005) zur Verfügung gestellt. In Abbildung 10.1a sind die Tierzahlen in den einzelnen Kategorien aufgeführt, in Abbildung 10.1b ist der Tierbestand anhand der Faktoren für die Umrechnung des Tierbestandes in Grossvieheinheiten (Landwirtschaftliche Begriffsverordnung 2003) dargestellt. Der Gesamtschweinebestand war bis 1996 rückläufig und seither wieder leicht steigend.



a) Anzahl Tiere



b) Anzahl Grossvieheinheiten

Abb. 10.1: Entwicklung des Schweinebestandes im Zeitraum von 1990 bis 2003 (Schweizerischer Bauernverband 1994-2003). 1999 wurde die Berechnungsweise der Grossvieheinheiten verändert.

10.2 Entwicklung der Beteiligung an den Tierhaltungsprogrammen BTS und RAUS

Als Tierhaltungsprogramme des Bundes wurden 1993 „Regelmässiger Auslauf von Nutztieren im Freien RAUS“ (KF-Verordnung 1997, RAUS-Verordnung 1998) sowie 1996 „Besonders tierfreundliche Stallhaltungssysteme BTS“ (BTS-Verordnung 1998) eingeführt. Die Beteiligung der Betriebe mit Schweinehaltung an diesen Programmen verzeichnete einen starken Anstieg (Abb. 10.2). Im Jahr 2003 lag die Beteiligung im RAUS-Programm bereits bei 43,2 % des Schweinebestandes in Grossvieheinheiten und im BTS-Programm bei 45,7 %. Der Grossteil der Betriebe erfüllt zugleich die BTS- und die RAUS-Vorgaben, weniger als 2,5 % der Grossvieheinheiten laufen nur unter dem BTS-Programm.

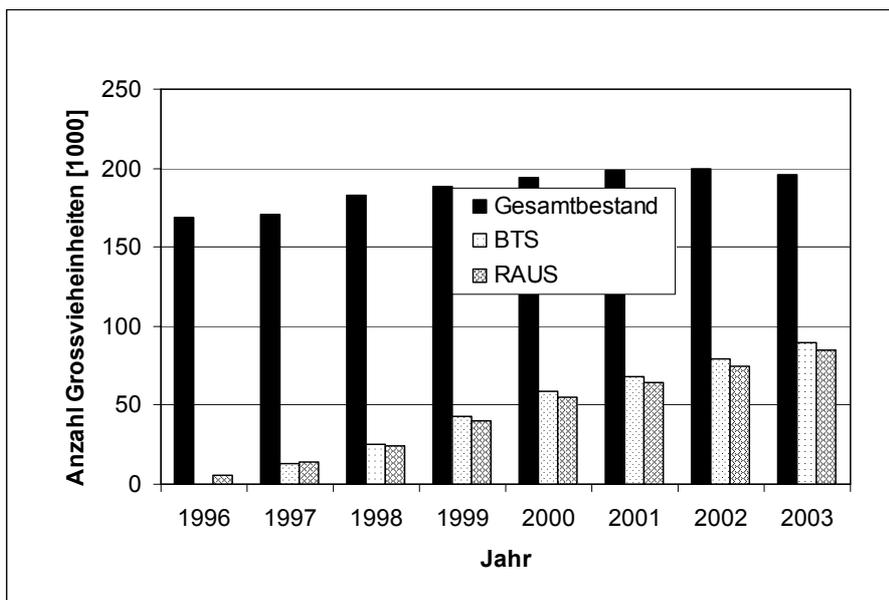


Abb. 10.2: Entwicklung der Beteiligung beim BTS- und RAUS-Programm im Vergleich mit dem Gesamtschweinebestand in Grossvieheinheiten im Zeitraum von 1996 bis 2003 (Bundesamt für Landwirtschaft 2004, Schweizerischer Bauernverband 1994-2003).

10.3 Abschätzung der Stallemissionen anhand von Emissionsfaktoren aus der Literatur und eigener Untersuchungen

Emissionsfaktoren für den Stallbereich der Schweinemast wurden soweit möglich von den vorliegenden Untersuchungen in traditionellen Stallsystemen und neuen, eingestreuten Stallsystemen mit Auslauf abgeleitet (Tab. 10.1). Für die Haltung von Zuchtsauen inklusive Ferkelaufzucht waren nur sehr grobe Literaturwerte für NH_3 -Emissionen verfügbar. Zu beachten ist, dass die Literaturwerte für Zuchtsauen nicht auf die Haltungssituation in der Schweiz zutreffen. Zum einen haben die Tierschutzvorschriften in der Schweiz mittlerweile zu stark abweichenden Haltungsformen geführt und zum anderen liegen über Haltung mit Auslauf in der Literatur keine Emissionsfaktoren vor. Beim PM10-Emissionsfaktor von Klimont et al. (2002) ist unklar, für welche Tierkategorie Schwein (Mastschwein oder Zuchtschwein) dieser gilt.

Die Messungen in den vorliegenden Untersuchungen erfolgten jeweils nur in einem Betrieb pro Stallsystem. Um die Variation innerhalb dieser Versuchszeiträume aufzuzeigen, basieren beim traditionellen Stallsystem die Berechnungen der Emissionsfaktoren auf Mittelwerten, Minima

und Maxima der Untersuchungen im Teilspaltenstall mit Flüssigfütterung und geschnittener Einstreu TS_FF_EG. Neben den Angaben pro Tier und Jahr sowie pro Grossvieheinheit und Jahr ist als weitere Bezugsgrösse pro Mastschweineplatz und Jahr aufgeführt. Dabei wurde durchschnittlich von 3,2 Umtrieben pro Jahr ausgegangen. Ein Umtrieb umfasste 30 Tage Vor-, 30 Tage Mittel- und 50 Tage Endmast sowie fünf Tage Leerzeit für Reinigung, Ein- und Ausställen.

Im neuen, eingestreuten Stallsystem mit Auslauf wurden aufgrund der grossen Streuung der Messwerte statt Mittelwerten Medianwerte verwendet. Da die aufwändigen Messungen im neuen Stallsystem mit Auslauf nur in der Endmast durchgeführt werden konnten, wurde für die Schätzung der Gesamtemissionen eines Mastdurchgangs das Verhältnis zwischen Vor-, Mittel- und Endmast bei traditionellen Stallsystemen herangezogen. Die Messungen fanden unter sehr heissen und sehr kalten Bedingungen statt. Aussagen über den Witterungseinfluss über ein gesamtes Jahr waren nicht möglich. Doch die ermittelten Minima und Maxima zeigen zumindest eine Bandbreite der NH₃- und PM10-Emissionen in einem Stall auf.

Tab. 10.1: Emissionsfaktoren für NH₃ und PM10 bei traditionellen und neuen Stallsystemen für Mastschweine, abgeleitet von den vorliegenden Untersuchungen sowie für Zuchtschweine aus der Literatur als Mittelwert bzw. Median, Minimum und Maximum.

Tierkategorie	Emission	NH ₃	PM10	NH ₃	PM10	NH ₃	PM10
Stallsystem	Einheit	[kg/Tier a]	[kg/Tier a]	[kg/GVE a]	[kg/GVE a]	[kg/MSP a]	[kg/MSP a]
Mastschweine							
Traditionell	Mittelwert	2,69	0,14	20,31	1,02	2,59	0,13
	Minimum	2,36	0,11	18,31	0,85	2,27	0,11
	Maximum	3,06	0,17	22,61	1,26	2,95	0,16
Neu	Median	5,55	0,20	46,02	1,62	5,35	0,19
	Minimum	3,76	0,15	33,23	1,22	3,63	0,14
	Maximum	10,39	0,34	76,74	2,75	10,02	0,33
Zuchtschweine, inkl. Ferkel bis 25 kg							
	Quelle	Döhler et al. 2002 Klimont et al. 2002					
Traditionell	Mittelwert	7,32	0,44				
	Minimum	3,67	k.A.				
	Maximum	10,98	k.A.				

In Tabelle 10.2 ist die Veränderung der Emissionen von NH₃ und PM10 aus der Mast- und Zuchtschweinehaltung der Schweiz im Zeitraum von 1990 bis 2003 aufgeführt. Wie bereits bei den Emissionsfaktoren, sind Mittelwerte sowie Minima und Maxima aufgeführt. Berücksichtigt wurde der Anteil Grossvieheinheiten in traditionellen und neuen Stallsystemen in der Schweinemast anhand der Beteiligung am RAUS-Programm. Veränderungen im Bereich der Fütterung und Produktionstechnik sind nicht berücksichtigt. Bei den Mastschweinen ergab sich von 1990 bis 1995 ein Rückgang der NH₃-Emissionen bedingt durch rückläufige Tierzahlen und seither wieder ein kontinuierlicher Anstieg bedingt durch die starke Zunahme beim Tierhaltungsprogramm RAUS. Die PM10-Emissionen aus der Schweinemast wiesen dieselbe Entwicklung auf.

Für die Emissionsfaktoren von Zuchtschweinen konnten nur sehr grobe Angaben aus der Literatur herangezogen werden. Eine Differenzierung in traditionelle und neue Stallhaltungssysteme war aufgrund fehlender Emissionsdaten nicht möglich. Tatsächlich würde dies die NH₃- und PM10-Emissionen von der Haltung mit Zuchtschweinen noch erhöhen.

Tab. 10.2: Berechnung der Emissionen von NH₃ und PM10 bei Mast- und Zuchtschweinen im Bereich Stall im Zeitraum von 1990-2003 als Mittelwert, Minimum und Maximum.

Jahr	NH ₃ [t/a]						PM10 [t/a]			
	Mastschweine			Zuchtschweine			Mastschweine			Zuchtschweine
	Mittelwert	Minimum	Maximum	Mittelwert	Minimum	Maximum	Mittelwert	Minimum	Maximum	Mittelwert
1990	2403	2108	2737	1313	658	1970	121	101	151	79
1991	2323	2038	2646	1282	643	1924	117	98	146	77
1992	2278	1999	2594	1274	639	1912	115	96	143	76
1993	2190	1921	2494	1281	642	1922	111	92	137	77
1994										
1995	1750	1535	1993	1118	561	1677	88	74	110	67
1996	1882	1625	2237	1018	510	1527	93	77	118	61
1997	1968	1666	2466	1062	533	1594	95	78	123	64
1998	2228	1849	2928	1115	559	1673	104	86	139	67
1999	2418	1950	3388	997	500	1496	109	89	150	60
2000	2622	2067	3847	1035	519	1553	115	93	163	62
2001	2754	2144	4141	1065	534	1598	118	95	171	64
2002	2880	2211	4443	1062	532	1593	121	97	178	63
2003	2949	2228	4682	1033	518	1549	122	97	182	62

Als Ausblick auf die kommenden Jahre ist beim Schweinebestand eher kein weiterer Anstieg zu erwarten. Die bisher stark zunehmende Beteiligung am BTS- und RAUS-Programm wird nicht im gleichen Ausmass weiter ansteigen, sondern aufgrund der aktuellen Marktsättigung mit Labelprodukten eher etwas abflachen. Zumindest die Anforderungen an das Tierhaltungsprogramm BTS werden bei den meisten Betrieben mit Neubauten zukünftig wohl eingehalten werden. Ob weiterhin auch das RAUS-Programm berücksichtigt wird, scheint eher fraglich. Ohne einen Rückgang der Schweinebestände und wesentliche Veränderungen in der Produktionstechnik wird das Niveau der NH₃- und PM10-Emissionen der Schweiz in den kommenden Jahren vermutlich leicht ansteigen.

11. Folgerungen

11.1 Wichtigste Ergebnisse

Literatur

Die Literaturangaben variieren bei Milchvieh für NH_3 im Anbindestall zwischen 240 und 800 mg/GVE·h, bei Laufställen sind die Unterschiede mit einem Schwankungsbereich zwischen 260 und 3560 mg/GVE·h sehr gross. Die PM10-Emissionen von Milchvieh variieren zwischen 6 und 84 mg/GVE·h.

Bei Mastschweinen liegen die NH_3 -Emissionen im Bereich von 736 bis 14800 mg/GVE·h und die PM10-Emissionen von 34 bis 133 mg/GVE·h. In Stallsystemen für Mastschweine mit freier Lüftung waren die Emissionen tendenziell geringer.

Traditionelle Stallsysteme

Bei Teilspaltenboden in der Schweinemast waren die NH_3 - und PM10-Emissionen im Sommer signifikant höher als im Winter (Tab. 7.1 und 7.6).

Die NH_3 -Emissionen waren in der Endmast signifikant höher als in der Vor- und Mittelmast, bei PM10 ergab sich ein linearer Anstieg im Verlauf der Mastabschnitte (Abb. 4.3 und 4.5, Tab. 7.1 und 7.6).

Bei Flüssigfütterung war die NH_3 -Emission tendenziell höher, die PM10-Emission tendenziell tiefer als bei Trockenfütterung. Doch diese Unterschiede waren statistisch nicht signifikant (Tab. 7.1 und 7.6).

Bei Vollspaltenboden mit Flüssigfütterung war die NH_3 -Emission signifikant höher als bei Teilspaltenboden, die PM10-Emission war tendenziell tiefer, statistisch jedoch nicht signifikant (Tab. 7.2 und 7.7).

Der Einsatz von geschnittenem Stroh oder aufbereiteter Einstreu führte bei Teilspaltenboden im Sommer zu einer signifikanten Reduktion der NH_3 -Emissionen im Vergleich zu Strohpresswürfeln. Bei den PM10-Emissionen konnten die Unterschiede mit höheren Werten bei aufbereiteter Einstreu nicht abgesichert werden (Tab. 7.3 und 7.8).

Neue Stallsysteme mit eingestreutem Liegebereich und Auslauf

Eine Tracer-Ratio-Methode mit Schwefelhexafluorid SF_6 zur Quantifizierung von NH_3 - und PM10-Emissionen im Auslauf wurde entwickelt und im Praxiseinsatz erfolgreich angewendet.

Für das Stallsystem mit eingestreutem Liegebereich und Auslauf ergab sich in der Endmast eine Bandbreite zwischen hohen Emissionswerten an heissen Sommertagen von 8755-17263 mg NH_3 /GVE·h sowie 251-444 mg PM10/GVE·h und tiefen Emissionswerten an kalten Wintertagen von 741-3011 mg NH_3 /GVE·h sowie 52-194 mg PM10/GVE·h.

Im Sommer dominierte der Auslauf mit mehr als 80 % der NH_3 - und PM10-Emission. Im Winter machte der Auslauf 18 % der gesamten NH_3 -Emission und 16 % der PM10-Emission aus.

Die Unterschiede der NH_3 - und PM10-Emission zwischen den einzelnen Tagen waren grösser als die Unterschiede zwischen den einzelnen Varianten. Im planbefestigten Auslauf war die

NH₃-Emission höher und die PM10-Emission tiefer als im teilperforierten, doch diese Unterschiede waren nicht signifikant.

Das Stallsystem mit eingestreutem Liegebereich und Auslauf wies im Sommer wesentlich höhere NH₃- und PM10-Emissionen auf als die traditionellen Stallsysteme mit Teil- oder Vollspaltenboden.

Emissionsminderung

Die Lebendmasse der Tiere, die Temperatur und Luftfeuchtigkeit der Zuluft resultierten als signifikante Einflussfaktoren auf die NH₃-Emissionen in den traditionellen Stallsystemen. Zur Emissionsminderung eignet sich daher die Kühlung der Zuluft im Sommer (z. B. Ansaugen der Zuluft im Schatten, Erdwärmetauscher, Sprühkühlung).

Beim eingestreuten Stallsystem mit Auslauf sollte die Auslauffläche im Sommerhalbjahr beschattet werden, um direkte Sonneneinstrahlung zu vermeiden. Auch die Temperatur im Güllekanal des meist nicht überdachten Kotbereichs ist zu reduzieren.

Bei der Minderung der PM10-Emissionen spielt die Feuchtigkeit im Stall eine wichtige Rolle. PM10 stammt vor allem von der Haut der Tiere. Als eine Massnahme zur Emissionsminderung von PM10 ist das Versprühen von Öl zu prüfen.

Entwicklung des Schweinebestandes und der Tierhaltungsprogramme

Der Gesamtschweinebestand in der Schweiz war von 1990 bis 1996 rückläufig und seither wieder leicht steigend. Im Jahr 2003 lag die Beteiligung am RAUS-Programm bereits bei 43,2 % des Schweinebestandes in Grossvieheinheiten und am BTS-Programm bei 45,7 %.

Abschätzung der Stallemissionen in der Schweiz

Von den Untersuchungen wurden Emissionsfaktoren als Mittel, Minima und Maxima abgeleitet. Traditionelle Stallsysteme in der Schweinemast ergaben 2,69 kg NH₃/Tier-Jahr (2,36-3,06) sowie 0,14 kg PM10/Tier-Jahr (0,11-0,17). Das neue Stallsystem mit Auslauf variierte zwischen 3,76-10,39 kg NH₃/Tier-Jahr (Median 5,55) und 0,15-0,34 kg PM10/Tier-Jahr (Median 0,20).

Bei den Mastschweinen ergab sich bei den NH₃-Emissionen von 1990 mit 2403 t/Jahr bis 1995 ein Rückgang auf 1750 t/Jahr und seither wieder ein kontinuierlicher Anstieg auf 2949 t/Jahr im Jahr 2003 bedingt durch die starke Zunahme beim Tierhaltungsprogramm RAUS. Die PM10-Emissionen wiesen dieselbe Entwicklung auf (1990 121 t/Jahr; 1995 88 t/Jahr; 2003 122 t/Jahr).

11.2 Forschungsbedarf

In folgenden Bereichen der Schweinehaltung besteht noch Forschungsbedarf:

- Bei Mastställen mit Auslauf ist das ermittelte Emissionsniveau in mehreren Ställen und über längere Messzeiträume abzusichern.
- Bei Ställen für Zuchtsauen (Abferkel-, Galtsauen-, Deckstall) und Ferkelaufzucht fehlen Emissionswerte sowohl in traditionellen wie auch neuen Stallsystemen.
- Bei Stallsystemen mit Auslauf sind Minderungsmaßnahmen bisher nicht untersucht.

- Haltungsformen in der Schweinemast sind zu entwickeln bzw. gezielt zu fördern, die zum einen tiergerecht und zum anderen nicht mit höheren NH_3 - und PM_{10} -Emissionen verbunden sind.

In folgenden Bereichen der Rindviehhaltung besteht noch Forschungsbedarf:

- Bei frei belüfteten Laufställen und für Laufhöfe fehlen Emissionswerte weitgehend.
- Bei frei belüfteten Ställen und Laufhöfen sind Minderungsmaßnahmen kaum untersucht.
- Planbefestigte und perforierte Laufflächen mit darunterliegender Güllengrube sind bisher nicht vergleichend untersucht.
- Neuere Entwicklungen bei Laufflächen gehen in Richtung weich, verformbar, tiergerecht. Wie sich diese Laufflächen auf die NH_3 -Emissionen auswirken, ist nicht geklärt.
- Angaben zu PM_{10} -Emissionen aus der Rindviehhaltung sind unzureichend.
- Bei der Weiterentwicklung von Stallsystemen ist in Zukunft verstärkt darauf zu achten, dass Tiergerechtheit, Umweltverträglichkeit und Wirtschaftlichkeit im Einklang sind. Ein Bewertungssystem ist erforderlich, das eine Abwägung der verschiedenen Aspekte ermöglicht. Es könnten sich auch Konsequenzen für die Anforderungen von Tierhaltungsprogrammen ergeben.

12. Literatur

- Aarnink A.J.A., Swierstra D., van den Berg A.J. und Speelman L., 1997: Effect of type of slatted floor and degree of fouling of solid floor on ammonia emission rates from fattening piggeries. *J. of Agric. Eng. Res.* 66, S. 93-102.
- Aarnink A.J.A. und Wagemans M.J.M., 1997: Ammonia volatilization and dust concentration as affected by ventilation systems in houses for fattening pigs. *Transactions of the ASAE*, 40, S. 1161-1170.
- Aarnink A.J.A., Van den Berg A.J., Keen A., Hoeksma P. und Versteegen M.W.A., 1996: Effect of slatted floor area on ammonia emission and on the excretory and lying behaviour of growing pigs. *J. agric. Engng. Res.* 64, S. 299-310.
- Amon B., Amon T. und Boxberger J., 2000: Untersuchung der Ammoniakemissionen in der Landwirtschaft Österreichs zur Ermittlung der Reduktionspotentiale und Reduktionsmöglichkeiten. *Der Förderungsdienst* 48, 1. S. 4-8.
- Andersson M., 1996: Performance of bedding materials in affecting ammonia emissions from pig manure. *J. agric. Engng. Res.* 65, S. 213-222.
- Brehme G., 2000: Quantifizierung des Luftvolumstromes in frei gelüfteten Rinderställen mit Hilfe der Kompartimentalisierungsmethode zur Bestimmung umweltrelevanter Emissionsmassenströme. Dissertation der Fakultät für Agrarwissenschaften der Georg-August-Universität Göttingen.
- Brok G.M. den und van Dijk J.F.G.M., 1994: Voorlopig nog wisselende onderzoeksresultaten met mestafvoer uit kraamstal. *Varkens, vakblad voor fokkerij en vleesvarkenshouderij*, 3 mei, 1994. In: *Dutch solutions to pollution control at pig farms: N and P equilibrium*. Hrsg.: N. Verdoes und J.A.M Voermans, Research institute for pig husbandry, Rosmalen, Netherlands.
- Brose G., 2000: Emission von klimarelevanten Gasen, Ammoniak und Geruch aus einem Milchviehstall mit Schwerkraftlüftung. Dissertation Universität Hohenheim, VDI-MEG-Schrift Nr. 362.
- BTS-Verordnung, 1998: Verordnung des EVD über besonders tierfreundliche Stallhaltungssysteme (BTS-Verordnung) vom 7. Dezember 1998.
- Bundesamt für Landwirtschaft, 2002: *Agrarbericht 2002*. Bundesamt für Landwirtschaft (BLW), Bern.
- Bundesamt für Landwirtschaft, 2003: *Agrarbericht 2003*. Bundesamt für Landwirtschaft (BLW), Bern.
- Bundesamt für Landwirtschaft, 2004: *Agrarbericht 2004*. Bundesamt für Landwirtschaft (BLW), Bern.
- Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft BUWAL, 2001: *Empfehlungen über die Emissionsmessung von Luftfremdstoffen bei stationären Anlagen*. Bern.
- Bureau International des Poids et Mesures, 1995: *Guide to the expression of uncertainty in measurement*, International Organization for Standardization, Genf.
- Canh T.T., Aarnink A.J.A., Mroy Z., Jongbloed A.W., Schrama J.W. und Versteegen M.W.A., 1998: Influence of electrolyte balance and acidifying calcium salts in the diet of growing-finishing pigs on urinary pH, slurry pH and ammonia volatilisation from slurry. *Livestock production science*. 56, 1, S. 1-13.
- Canh T.T., Versteegen M.W.A., Aarnink A.J.A. und Schrama J.W., 1997: Influence of dietary factors on nitrogen partitioning and composition of urine and feces of fattening pigs. *J. Anim. Sci.* 75, S. 700-706.
- Chang C.W., Chung H., Huang C.F. und Su H.J.J., 2001: Exposure assessment to airborne endotoxin, dust, ammonia, hydrogen sulphide and carbon dioxide in open style swine houses. *Ann. Occup. Hyg.* 45, 6, S. 457-465.

- Chiba L.I., Peo E.R. Jr. und Lewis A.J., 1987: Use of dietary fat to reduce aerial ammonia and bacterial colony forming particle concentrations in swine confinement buildings. Transactions of the ASAE 30, 2, S. 464-468.
- Coop NATURApplan, 2003: Richtline Coop Naturaplan Porc: Anforderungen an die Zucht und Mast von Schweine gültig ab 1. März 2003.
- Demmers T.G.M., Phillips V.R., Short L.S., Burgess L.R., Hoxey R.P. und Wathes C.M., 2001: Validation of ventilation rate measurement methods and the ammonia emission from naturally ventilated dairy and beef buildings in the United Kingdom. J. agric. Engng. Res. 79, 1, S. 107-116.
- Derikx P.J.L. und Aarnink A.J.A., 1993: Reduction of ammonia emission from slurry by application of liquid top layers. In: Proceedings of the first International symposium on nitrogen flow in pig production and environmental consequences. Hrsg.: Verstegen M.W.A, den Hartog L.A., van Kempen G.J.M. und Metz J.H.M. 8-11 June, Wageningen, NL, S. 344-349.
- DIN Deutsches Institut für Normung (Berlin West), 1995: Leitfaden zur Angabe der Unsicherheit beim Messen. Beuth, Berlin.
- Döhler H., Eurich-Menden B., Dämmgen U., Osterburg B., Lüttich M., Berg W., Brunsch R., 2002: BMVEL/UBA-Ammoniak-Emissionsinventar der deutschen Landwirtschaft und Minderungsszenarien bis zum Jahre 2010. Hrsg.: Umweltbundesamt, Berlin. Forschungsbericht 299 42 245/02, UBA-FB 000249.
- Emmenegger L., Mohn J., Sigrist M., Mariniöv D., Steinemann U., Zumsteg F. und Meier M., 2004a: Measurement of Ammonia Emissions Using Various Techniques in a Comparative Tunnel Study. International Journal of Environment and Pollution, submitted February 2004.
- Emmenegger L., Poulleau J., Raventos C., Blank F, Gould R., Kassman H., Pilage E., Reynaud S., Rokkjaer J. und Waeber M., 2004b: Uncertainty budget and interlaboratory field tests in SO₂ and NO_x emission measurements. Gefahrstoffe - Reinhaltung der Luft 11/12, S. 495-500.
- EMPA: Technischer Bericht zum Nationalen Beobachtungsnetz für Luftfremdstoffe (Nabel), EMPA Dübendorf 2000.
- Gallmann E., 2003: Vergleich von zwei Haltungssystemen für Mastschweine mit unterschiedlichen Lüftungsprinzipien – Stallklima und Emissionen. VDI-MEG Schrift 404, Dissertation Universität Hohenheim.
- Godbout S., Lemay S.P., Joncas R., Larouche J.P., Martin D.Y., Leblanc M., Marquis A., Bernier J.F., Zijlstra R.T., Barber E.M. und Massé D., 2000: Reduction of odour and gas emissions from swine buildings using canola oil sprinkling and alternate diets. Proc. Second Int. conference, air pollution from agricultural operations. Des Moines, Iowa, Oct 9-11., S. 211-219.
- Groenestein C.M., 1993: Animal waste management and emission of ammonia from livestock housing systems: field studies. In Livestock Environment IV. Fourth International symposium 6-9 July, Coventry UK., S. 1169-1175.
- Groenestein C.M., 1994: Ammonia emission from pig houses after frequent removal of slurry with scrapers. International conference on agricultural engineering, Milano'94, Aug 29 – Sep 1, Vol 1, S. 543-550.
- Groenestein C.M. und van Faassen H.G., 1996: Volatilization of ammonia, nitrous oxide and nitric oxide in deep litter systems for fattening pigs. J. agric. Engng. Res. 65, S. 269-274.
- Groot Koerkamp P.W.G., Metz J.H.M., Uenk G.H., Phillips V.R., Holden M.R., Sneath R.W., Short J.L., White R.P., Hartung J., Seedorf J., Schröder M., Linkert K.H., Pedersen S., Takai H., Johnsen J.O. und Wathes C.M., 1998: Concentrations and emissions of ammonia in livestock buildings in Northern Europe. J. agric. Engng. Res. 70, 1, 79-95.

- Groot Koerkamp P.W.G. und Uenk G.H., 1997: Climatic conditions and aerial pollutants in and emissions from commercial animal production systems in the Netherlands. Proc. of the Int. Symp. Ammonia and odour control from animal production facilities. Vinkeloord (NL), Oct 6 – 10, Vol 1, S. 139-144.
- Guingand N., Granier R. und Massabie P., 1997: Influence of hygrometry, temperature and air flow rate on the evolution of ammonia levels. Proc. of the Int. Symp. Ammonia and odour control from animal production facilities. Vinkeloord (NL), Oct 6 - 10., Vol 1, S. 111-119.
- Gustafsson G., 1994: Efficiency of different dust reducing methods in pig houses. CIGR 12th World congress on agricultural engineering, Milano, Aug 29 – Sep 1, Vol 1, S. 551-558.
- Gustafsson G., 1999: Factors affecting the release and concentration of dust in pig houses. J. agric. Engng. Res. 74, S. 379-390.
- Hahne J., Bernges T. und Vorlop K-L., 1998: Abluftbehandlung aus Schweinemastanlagen. Landtechnik 53, 5, S. 324-325.
- Hendriks J.G.L., Vrielink M.G.M. und van der Peet-Schwering C.M.C., 1997: Reducing ammonia emission from pig housing by adding acid salts to the feed. Hrsg.: Bottcher R.W. und Hoff S.J. Proc. of fifth Int. Symp. ASAE, Bloomington, Minnesota, USA. Vol 1, S. 65-70.
- Hesse D., 1994: Comparison of different old and new fattening pig husbandries with focus on environment and animal welfare. Proc. of the CIGR XII World Congress on Agricultural Engineering, Milano 29 Aug-1 Sep, Vol 1, S. 559-566.
- Hinds W.C., 1999: Aerosol technology properties, behavior, and measurement of airborne particles. Wiley, New York.
- Hinz T. und Linke S., 1998: A Comprehensive Experimental Study of Aerial Pollutants in and Emissions from Livestock Buildings. Part 1: Methods, J. agric. Engng Res. 70, S. 111-118.
- Hoeksma P., Verdoes N., Oosthoek J. und Voermans J.A.M., 1992: Reduction of ammonia volatilisation from pig houses using aerated slurry as recirculation liquid. Livestock Production Science. 31, S. 121-132.
- Hörnig G., Berg W. und Türk M., 1997: Harmful gas and odour emissions under use of feed and slurry additives. Hrsg.: Bottcher R.W. und Hoff S.J.. Proc. of fifth Int. Symp. ASAE, Bloomington, Minnesota, USA. Vol 1, S. 78-85.
- Kaiser S., Brehme G., Hoffman A. und Van den Weghe H., 1998: Emissionsverhalten eines freigelüfteten Mastschweinstalles mit Ruhebetten ohne nährstoffbedarfsangepasste Fütterung. In: Umweltverträgliche Mastschweinställe. Auswirkungen von Fütterung und Lüftung auf Ammoniakemissionen und Nährstoffbilanzen. KTBL-Arbeitspapier 259, S. 91-117.
- Kaiser S., 1999: Analyse und Bewertung eines Zweiraumkompoststalls für Mastschweine unter besonderer Berücksichtigung der gasförmigen Stoffströme. VDI-MEG Schrift 334, Dissertation Georg-August-Universität Göttingen.
- Kay R.M. und Lee P.A., 1997: Ammonia emission from pig buildings and characteristics of slurry produced by pigs offered low crude protein diets. Proc. of the Int. Symp. Ammonia and odour control from animal production facilities. Vinkeloord (NL), Oct 6 - 10. Vol 1 S. 253-259.
- Keck M., 1997: Ammonia emission and odour thresholds of cattle houses with exercise yards. Proc. of the Int. Symp. Ammonia and odour control from animal production facilities. Vinkeloord (NL), Oct 6 - 10., Vol 1, S. 349-354.
- KF-Verordnung, 1997: Verordnung des EVD über Kontrollierte Freilandhaltung (KF-Verordnung) vom 28. Februar 1997.
- Kirchgessner M., 1985: Tierernährung: Leitfaden für Studium, Beratung und Praxis. DLG-Verlag, Frankfurt am Main.

- Klimont Z., Cofala J., Bertok I., Amann M., Heyes C., Gya F., 2002: Modeling Particulate Emissions in Europe. A Framework to Estimate Reduction Potential and Control Costs. Interim Report IR-02-076, International Institute for Applied Systems Analysis, Laxenburg, Austria.
- Lai C.Y. und Chen C.C., 2000: Performance characteristics of PM10 samplers under calm air conditions, *Journal of the Air & Waste Management Association* 50, S. 578-587.
- Landwirtschaftliche Begriffsverordnung, 2003: Verordnung über landwirtschaftliche Begriffe und die Anerkennung von Betriebsformen (Landwirtschaftliche Begriffsverordnung) vom 26. November 2003.
- Lemay S.P., Chénard L., Barber E.M. und Fengler R., 2000: Optimization of a sprinkling system using undiluted canola oil for dust control in pig buildings. Proc. Second Int. conference, air pollution from agricultural operations. Des Moines, Iowa, Oct 9-11. S. 337-344.
- Li X.W. und Owen J.E., 1997: Feed and feeding method effects on livestock environment. *Livestock environment* 5, Vol 2. Proceedings of the fifth symposium, Minnesota USA, May 29-31. Hrsg.: R. W. Bottcher und Hoff S. J. S. 599-606.
- Misselbrook T.H., Pain B.F. und Headon D.M., 1998: Estimates of ammonia emission from dairy cow collecting yards. *J. agric. Engng. Res.* 71, S. 127-135.
- Ni J., Berckmans D. und Vinckier C., 1996: Influence of contaminated floor on ammonia emission from a pig house. *AgEng Madrid*. Paper 96B-062.
- Niebaum A., 2001: Quantifizierung gasförmiger Emissionen aus quer gelüfteten Aussenklimaställen für Mastschweine mit Hilfe der Tracergas-Technik. VDI-MEG-Schrift 370. Dissertation Georg-August-Universität Göttingen.
- Pahl O., Williams A.G., Sneath R.W., Goodman J., Taylor L., Godwin R.J. und Hann M.J., 2000: Reducing ammonia emissions from pig production - experiences with oil and foam as a cover material for slurry under slats. Proc. Second Int. conference, air pollution from agricultural operations. Des Moines, Iowa, Oct 9-11. S. 100-107.
- Pearson C.C. und Sharples T.J., 1995: Airborne dust concentrations in livestock buildings and the effect of feed. *J. agric. Engng Res.* 60, S. 145-154.
- Pfeiffer A., Arends F., Langholz H.J. und Steffens G., 1993: The influence of various pig housing systems and dietary protein levels on the amount of ammonia emissions in the case of fattening pigs. In: Proceedings of the first International symposium on nitrogen flow in pig production and environmental consequences. Hrsg.: Verstegen M.W.A, den Hartog L.A., van Kempen G.J.M. und Metz J.H.M.. 8-11 June, Wageningen, NL, S. 313-317.
- Rathmer B., 2002: Vergleich von zwei Haltungssystemen für Mastschweine mit unterschiedlichen Lüftungsprinzipien – Stallklima und Emissionen. VDI-MEG Schrift 386, Dissertation Technische Universität Münschen.
- RAUS-Verordnung, 1998: Verordnung des EVD über den regelmässigen Auslauf von Nutztieren im Freien (RAUS-Verordnung) vom 7. Dezember 1998.
- Schmid, 2005: Schweinebestand 2003. Mündliche Mitteilung vom 5.1.2005, Schweizerischer Bauernverband, Brugg.
- Schnider R., 2002: Gesundheit von Mastschweinen in unterschiedlichen Haltungssystemen – Vergleich zwischen Vollspalten- und Mehrflächensystemen mit Einstreu und Auslauf. FAT-Schriftenreihe 55, FAT, Tänikon.
- Schweizerischer Bauernverband, 1994-2003: Statistische Erhebungen und Schätzungen über Landwirtschaft und Ernährung. Diverse Jahrgänge, Brugg.
- Seedorf J., Hartung J., Schröder M., Linkert K.H., Pedersen S., Takai H., Johnsen J.O., Metz J.H.M., Groot Koerkamp P.W.G., Uenk G.H., Phillips V.R., Holden M.R., Sneath R.W., Short J.L., White R.P. und Wathes C.M., 1998a: A survey of ventilation rates in livestock buildings in Northern Europe. *J. agric. Engng. Res.* 70 (1), S. 39-47.

- Seedorf J., Hartung J., Schröder M., Linkert K.H., Pedersen S., Takai H., Johnsen J.O., Metz J.H.M., Groot Koerkamp P.W.G., Uenk G.H., Phillips V.R., Holden M.R., Sneath R.W., Short J.L., White R.P. und Wathes C.M., 1998b: Temperature and moisture conditions in livestock buildings in Northern Europe. *J. agric. Engng. Res.* 70 (1), S. 49-57.
- Seipelt F., Ross A., Steffens G. und Van den Weghe H., 1999: Quantifizierung gasförmiger Emissionen aus frei gelüfteten Milchviehställen mittels Tracergaseinsatz nach der Abklingmethode. In: *Bau, Technik und Umwelt in der Landwirtschaftlichen Nutztierhaltung*, Hrsg.: Institut für Landtechnik der TU München-Weihenstephan, S. 69-74.
- Takai H., Jacobson L.D. und Pedersen S., 1996: Reduction of dust concentration and exposure in pig buildings by adding animal fat in feed. *J. agric. Engng. Res.* 63, S. 113-120.
- Takai H., Moller F., Iversen M., Jorsal S.E. und Bille-Hansen V., 1993: Dust control in swine buildings by spraying of rapeseed oil. *Livestock Environment 4*, fourth Int. Symp. University of Warwick, Coventry, UK, 6-9 July. Hrsg.: Eldridge Collins and Chris Boon, S. 726-733.
- Takai H. und Pedersen S., 2000: A comparison of different dust control methods in pig buildings. *App. Engng in Agric.* Vol 16 (3), S. 269-277.
- Takai H., Pedersen S., Johnsen J.O., Metz J.H.M., Groot Koerkamp P.W.G., Uenk G.H., Phillips V.R., Holden M.R., Sneath R.W., Short J.L., White R.P., Hartung J., Seedorf J., Schröder M., Linkert K.H. und Wathes C.M., 1998: Concentrations and emissions of airborne dust in livestock buildings in Northern Europe. *J. agric. Engng. Res.* 70 (1), S. 59-77.
- Thelosen J.G.M., Heitlager B.P. und Voermans J.A.M., 1993: Nitrogen balances of two deep litter systems for finishing pigs. In: *Proceedings of the first International symposium on nitrogen flow in pig production and environmental consequences*. Hrsg.: Verstegen M.W.A, den Hartog L.A., van Kempen G.J.M. und Metz J.H.M. 8-11 June, Wageningen, NL, S. 318-323.
- Van't Ooster A., Scholtens R. und van der Heiden-de V., 1994: Emissie uit de rundveestal. Ammoniakemissie uit natuurlijk geventileerde stallen is nu mogelijk. *Lanbouwmecanisatie 7*, S. 12-14.
- VDI 2119 Bl. 2, 1996: Messung partikelförmiger Niederschläge - Bestimmung des Staubniederschlags mit Auffanggeräten aus Glas (Bergerhoff Verfahren) oder Kunststoff.
- Von Wachenfelt Hans und Jeppsson K-H., 2001: Ammonia emissions from outdoor areas and yards for pigs. In: *Animal welfare considerations in livestock housing systems. Proc. of the Int. Symp. CIGR. 2nd technical section. 23 - 25 Oct 2001*, (data by personal communication).
- Welford R.A., Feddes J.J.R. und Barber E.M., 1992: Pig building dustiness as affected by canola oil in the feed. *Canadian Agricultural Engineering* 34, S. 365-373.
- Zeitler M.H., König M. und Groth W., 1987: Der Einfluss von Futterform (mehlförmig, pelletiert, flüssig) und Jahreszeit auf die Konzentration und Korngrößenverteilung luftgetragener Staubpartikel in Mastschweinställen. *Deutsche Tierärztl. Wochenschrift* 94 (7), S. 420-424.
- Zhu J., Jacobsen L., Schmidt D. und Nicolai R., 2000: Daily variations in odor and gas emissions from animal facilities. *App. Engng. In Agric.* 16 (2), S. 153-158.

13. Anhang

Tab. A1: Literaturübersicht NH₃-Emissionen der Milchviehhaltung

Literatur sortiert nach Messdauer; Abkürzungen: FL Freie Lüftung, k.A. keine Angabe, Perf. Perforiert, Planb. Planbefeuchtet, So Sommer, Wi Winter, XP Rohprotein, ZL Zwangslüftung

Stallsystem, Tierzahl, (Land)	Lauffläche	Fütterung	Messzeit, -dauer	Messmethode: Luftvolumenstrom, NH ₃	Temp. [°C] So/Wi	Luftvolumenstrom [m ³ /GVE-h] So/Wi	NH ₃ -Emission [mg/GVE-h]	Quelle
Liegeboxen Milchvieh, Kälber	Perf.		190 Tage	Tracergas CO ₂ , CO ₂ - und Wärme- bilanz, Luftdruckunterschied		FL	1820	Van't Ooster 1994
Liegeboxen/Stroh Geschlossener Stall mit Schacht- lüftung, 82 GVE	Perf.	So: Gras 20,2 % XP + Kraffutter 16,2 % XP, nach Bedarf	24 h, 20 min Intervalle	Messventilator, Anemometer, NDIR	18,3	184, FL/ZL	598	Brose 2000
		Wi: Heu 12,4 % XP + Kraffutter 16,2 % XP, nach Bedarf			12,8	169, FL/ZL	506	
Liegeboxen/Stroh, Schieber alle 2 h, Spaceboards, Firstlüftung, 97 Tiere	Planb.	k.A.	Frühjahr	Tracergas CO ₂ , Injektion konstant 0,6 mg/m ³ , Thermal Konverter, Chemilumines- zenz, NOx-Analysator	k.A.	FL	1952	Demmers et al. 2001
		k.A.	Frühjahr		k.A.	FL	658	
Mast, Einstreu, Spaceboards, Firstlüftung, 99 Tiere	Planb.	k.A.	Wi	Anemometer, NOx-Analysator	16,9	98 m ³ /Tier-h, ZL	437 mg/Tier-h	Groenestein 1993
Anbindestall (DK)	Rost 1 m ² /Tier	k.A.	190 Tage	Massenbilanz	k.A.	ZL	1929 mg/Tier-h	
Referenz (Laufstall)	Perf.	k.A.	24 h, 2 Wochen	Anemometer, FTIR	k.A.	ZL	237	Amon et al. 1998
Anbindestall, 12 Kühe	Rost Einstreu 2 kg /Kuh d	4 Jahreszeiten	24 h, 13 d				242	
Tretmiststall, Einstreu 2 kg /Kuh d, 16 Kühe + Nachzucht	Planb.	So-Ration	24 h, 5 d, So				692	
Wartezimmer (vor dem Melk- stand), Nutzung ca. 80 min/d, täglich gereinigt, 70 Tiere	Planb. mit Gefälle	Raigras+Kraffutter	24 h, 5 d, Wi	Lindvall-Box (0,9 m ²), 1 m/s Nasschemisch mit Orthophosphorsäure	16,5	ZL	447,5 mg/m ² h	Misselbrook et al. 1998
		Grassilage+Kraffutter	24 h, 5 d, Wi		3,9		54,1 mg/m ² h	

Stallsystem, Tierzahl, (Land)	Lauffläche	Fütterung	Messzeit, -dauer	Messmethode: Luftvolumenstrom, NH ₃	Temp. [°C] So/Wi	Luftvolumenstrom [m ³ /GVE-h] So/Wi	NH ₃ -Emission [mg/GVE-h]	Quelle
Laufhof	Planb. je 0,6 kg/m ² Harn u. Kot	k.A.	24 h, 15x2 d, So	2 Windtunnel (2 m ²) 0,5 m/s, Nasschemisch mit Salzsäure	k.A.	ZL	218 mg/m ² -h	Keck 1997
Anbindestall	k.A.	So + Wi Ration	24 h, 2x1 d, Wi + So	CO ₂ -Bilanz, NH ₃ -Konverter + NOx-Analysator mit IR	14,6	227 m ³ /Tier-h, ZL	974 mg/Tier-h	Groot Koer- kamp et al. 1997
Liegeboxen	k.A.				12,2	838 m ³ /Tier-h, FL	2001 mg/Tier-h	
Einstreu (UK)	k.A.	k.A.	24 h, 2x1 d, Wi	CO ₂ -Bilanz, NH ₃ -Konverter + NOx-Analysator mit IR	12,4	404, FL	260	Seedorf et al. 1998a, b; Groot Koer- kamp et al. 1998
Liegeboxen (UK)	k.A.				12,2	375, FL	1048	
Einstreu (NL)	k.A.	k.A.	24 h, 2x1 d, So/Wi	CO ₂ -Bilanz, NH ₃ -Konverter + NOx-Analysator mit IR	16,1/12,4	212/201, ZL/FL	890	
Liegeboxen (NL)	k.A.				16,8/12,2	452/647, ZL/FL	1769	
Einstreu (DK)	k.A.	k.A.	24 h, 2x1 d, So/Wi	CO ₂ -Bilanz, NH ₃ -Konverter + NOx-Analysator mit IR	16,1/12,4	323/176, ZL/FL	491	
Liegeboxen (DK)	k.A.				16,8/12,2	385/364, ZL/FL	843	
Einstreu (D)	k.A.	k.A.	24 h, 2x1 d, Wi	CO ₂ -Bilanz, NH ₃ -Konverter + NOx-Analysator mit IR	12,4	194, ZL/FL	467	
Liegeboxen (D)	k.A.				12,2	275, ZL/FL	1168	
Liegeboxen, Autodungschieber	Perf.	k.A.	50 Kurzzeit-, Einzelmessungen	Tracergas SF ₆ , Abklümmethode, Dosierung in Seitenwandöff- nungen mit kritischen Düsen 0,5 l/min, Probenahme First, Photoakustische Spektroskopie, NDIR	k.A.	FL	1621	Seipelt 1999
Liegeboxen, Schieber	Planb.						1679	
Liegeboxen	Perf.						2387	
Tretmiststall	Einstreu						3562	
200 Milchkühe	8,7 m ² /Tier	k.A.	12 h, Kurzzeit, Wi	CO ₂ -Bilanz, Tedlarbags + Sensi- dyne tubes, leeseitig des Gebäudes	9,9	922 m ³ /Tier-h, FL	585	Zhu et al. 2000
Liegeboxen/Stroh, Offenstall, Schachtlüftung, 135 Tiere	Planb.	k.A.	32 sec	Tracergas Krypton 85, Abklümmethode in 2/2,5 m Höhe, Kompartimentalisierung, IR Analysator	k.A.	963 m ³ /Tier-h, FL	3000	Brehme 2000
Liegeboxen/Stroh, Offenfront, Spaceboards, 39 Tiere	Perf.	k.A.			k.A.	8974 m ³ /Tier-h, FL	900	

Tab. A2: Literaturübersicht NH₃-Emissionen der Schweinehaltung

Literatur sortiert nach Tierkategorie, Abkürzungen: FL Freie Lüftung, k.A: keine Angabe, Perf. Perforiert, Planb. Planbefestigt, So Sommer, Wi Winter, XP Rohprotein, ZL Zwangslüftung

Stallsystem, Lebendmasse, (Land)	Haltung	Fütterung	Messzeit, -dauer	Messmethode: Luftvolumenstrom, NH ₃ NOx-Analysator, IR	Temp. [°C] So/Wi	Luftvolumenstrom [m ³ /GVE·h] So/Wi	NH ₃ -Emission [mg/GVE·h]	Quelle
Sauen	Kastenstand	k.A.	24 h, 1 d, So/Wi	CO ₂ -Bilanz, NH ₃ -Konverter + NOx-Analysator, IR	20,2	58 (30-100) m ³ /Tier·h, ZL	535 mg/Tier·h	Groot Koerkamp et al. 1997
Sauen (UK)	Einstreu	k.A.	24 h, 1 d, So/Wi	CO ₂ -Bilanz, NH ₃ -Konverter + NOx-Analysator, IR	21,4/18,7	456/140, ZL	744	Seedorf et al. 1998a, b; Groot Koerkamp et al. 1998
	Perf.				22,5/19,4	121/175, ZL	1049	
	Perf.				22,5/19,4	159/113, ZL	1282	
Sauen (D)	Einstreu	k.A.	24 h, 1 d, So/Wi		21,4/18,7	614/417, ZL	3248	
	Perf.				22,5/19,4	234/69, ZL	1212	
Sauen (DK)	Perf.	k.A.	24 h, 1 d, So/Wi		22,5/19,4	392/210, ZL	1701	
Absetzferkel	Perf. + Schieber 0,25 m ² /Tier	k.A.	24 h, 2x3 Wochen	Anemometer, NOx-Analysator	k.A.	ZL	31,3 mg/Tier·h	Groenestein 1993
	Perf. Referenz			Referenz			142 mg/Tier·h	
Absetzferkel	Teilperf.	k.A.	24 h, 1 d, So/Wi	CO ₂ -Bilanz, NH ₃ -Konverter + NOx-Analysator, IR	24,5	13 (3,8-24) m ³ /Tier·h, ZL	26,6 mg/Tier·h	Groot Koerkamp et al. 1997
Absetzferkel (UK)	Perf.	k.A.	24 h, 1 d, So/Wi	CO ₂ -Bilanz, NH ₃ -Konverter + NOx-Analysator, IR	25,1/24,7	253/302, ZL	1047	Seedorf et al. 1998a, b; Groot Koerkamp et al. 1998
						373/315, ZL	786	
Absetzferkel (DK)						492/300, ZL	1562	
Absetzferkel (D)						431/207, ZL	649	
Mastschweine 40-73 kg	Perf.	4,5 g Lysin, 18,2 % XP	3 d, kontin.	Luftvolumenstrom konstant Nasschemisch mit H ₂ SO ₄	24,0	5-16 m ³ /Tier·h, ZL	274 mg/Tier·h	Guingand et al. 1997
						15-40 m ³ /Tier·h, ZL	343 mg/Tier·h	
Mastschweine Mittelmast	Teilperf.	k.A.	24 h, 1 d, So/Wi	CO ₂ -Bilanz, NH ₃ -Konverter + NOx-Analysator, IR	22,0	31 (12-67) m ³ /Tier·h, ZL	385 mg/Tier·h	Groot Koerkamp et al. 1997
Mastschweine 63 kg, Reinigung 1,3 d vor Messung	Einstreu + planb. mit Gefälle	Pellets	8-10 h, 8 d, Apr.-Mai	Mikrometeorologische Kammer, 0,09 m über Auslauf u. planb. Boden	16,1	ZL	1055 (66 mg/m ² ·h) 1008 (93 mg/m ² ·h)	Wachenfelt u. Jeppsson 2001

Stallsystem, Lebendmasse, (Land)	Haltung	Fütterung	Messzeit, -dauer	Messmethode: Luftvolumenstrom, NH ₃	Temp. [°C] So/Wi	Luftvolumenstrom [m ³ /GVE·h] So/Wi	NH ₃ -Emission [mg/GVE·h]	Quelle
Mastschweine	Mikroklima, Teilperf.	k.A.	27 d, Wi 64/62 d Frühj. 69 d Herbst	Messventilator, NDIR-Spektroskopie	9,1 13,8/11/8 16,8	FL	2812 4012/3862 3600	Gallmann 2003
	Perf.							
Mastschweine	Kompost + Präparat 1 m ² /Tier	k.A.	113 d, kontin.	Anemometer, NOx-Analysator	k.A.	ZL	148 mg/Tier·h	Groenestein 1993
	Perf. (Referenz)							
Mastschweine (UK)	Einstreu	k.A.	24 h, 1 d, So/Wi	CO ₂ -Bilanz, NH ₃ -Konverter + NOx-Analysator, IR	20,0/14,3	795/397, ZL	1429	Seedorf et al. 1998a, b; Groot Koerkamp et al. 1998
	Perf.							
Mastschweine (NL)	Perf.	k.A.	24 h, 1 d, So/Wi	CO ₂ -Bilanz, NH ₃ -Konverter + NOx-Analysator, IR	23,3/19,9	467/256, ZL	2592	Seedorf et al. 1998a, b; Groot Koerkamp et al. 1998
	Perf.							
Mastschweine (DK)	Einstreu	k.A.	24 h, 1 d, So/Wi	CO ₂ -Bilanz, NH ₃ -Konverter + NOx-Analysator, IR	20,0/14,3	721/499, ZL	3751	Seedorf et al. 1998a, b; Groot Koerkamp et al. 1998
	Perf.							
Mastschweine (D)	Perf.	k.A.	24 h, 1 d, So/Wi	CO ₂ -Bilanz, NH ₃ -Konverter + NOx-Analysator, IR	23,3/19,9	646/185, ZL	2568	Seedorf et al. 1998a, b; Groot Koerkamp et al. 1998
	Perf.							
Mastschweine	Tiefstreu, 1 m ² /Tier	k.A.	24 h, 60 d, Wi	Anemometer, Nasschemisch mit Indophenol	14,0	59,4 m ³ /Tier·h, ZL/FL	433 mg/Tier·h	Hesse 1994
	Schrägmist 10 %, 1 m ² /Tier							
	Perf., 0,7 m ² /Tier							
	Teilperf., 0,85 m ² /Tier							
	Schrägmist 10 %, 1 m ² /Tier							
Mastschweine, 730 Tiere, geschlossen	Mikroklima, Planb., Windschutznetze, 1,05 m ² /Tier	Trockenfütterung ad lib.	3 d, Herbst, Kurzzeit	Tracegas SF ₆ , Abklingsmethode, 8 Dosierorte in 2 m Höhe, 5 Probenorte in 2,5 m Höhe, Photoakustische Spektroskopie, NDIR	k.A.	70,3 m ³ /Tier·h, FL	736	Kaiser et al. 1998
	halboffen							
	offen							
						82,8 m ³ /Tier·h, FL	1214	
						123,9 m ³ /Tier·h, FL	842	

Stallsystem, Lebendmasse, (Land)	Haltung	Fütterung	Messzeit, -dauer	Messmethode: Luftvolumenstrom, NH ₃	Temp. [°C] So/Wi	Luftvolumenstrom [m ³ /GVE·h] So/Wi	NH ₃ -Emission [mg/GVE·h]	Quelle
Mastschweine 35-53 kg, 52 Tiere	Perf.	17,5-16,6 % XP	Frühjahr 66 d/ So 119 d/ Wi 109 d	Kapselung, Messventilator, photoakustische Spektroskopie	k.A.	77/72/38 m ³ /Tier·h, ZL	11600/14800/9100	Rathmer 2002
	Mikroklima, Teilperf.							
	Mikroklima, Einstreu							
Mastschweine 800 Tiere	Mikroklima, Teilperf., 1,5 m ² /Tier	Multi- phasen- fütterung	6 d, So 9 d, Wi	Tracergas SF ₆ , Injektion kon- stant, 28 Dosierungsorte in 1,5 m Höhe, 42/38 Probenahmeorte seitl. Öffnungen/First, photo- akustische Infrarotspektros- kopie, Korrektur Massenstrom	k.A.	FL	1000 1118	Niebaum 2001
Mastschweine 450 Tiere	Mikroklima, Teilperf., 1,4 m ² /Tier		11 d, So 12 d, Wi			106/117/58 m ³ /Tier·h, ZL/FL	3200/4700/1100	

Tab. A3: Literaturübersicht PM10-Emissionen der Milchviehhaltung

Abkürzungen: FL Freie Lüftung, k.A: keine Angabe, Planb. Planbefestigt, So Sommer, Wi Winter, ZL Zwangslüftung

Stallsystem, Lebendmasse, (Land)	Haltung	Fütterung	Messzeit, -dauer	Messmethode: Luftvolumenstrom, Staub	Temperatur [°C] So/Wi	Luftvolumenstrom [m³/GVE·h] So/Wi	Gesamt-/ Feinstaub-Emission [mg/GVE·h]	Quelle
Anbindestall	k.A.	So + Wi-Ration	4x12 h	CO ₂ -Bilanz, IOM 50 % Cut-off PM5; 2 l/min (G); 1,9 l/min (F)	14,6	227 m³/Tier·h, ZL	- /11 mg/Tier·h	Groot Koerkamp et al. 1997
Liegeboxen	k.A.				12,2	838 m³/Tier·h, FL	- /15,6 mg/Tier·h	
Einstreu (UK)	Einstreu	So + Wi-Ration	4x12 h	CO ₂ -Bilanz, IOM 50 % Cut-off PM5; 2 l/min (G); 1,9 l/min (F)	16,1/12,4	k.A./404, FL	142/84	Seedorf et al. 1998a, b; Takai et al. 1998
Liegeboxen (UK)	Planb.				16,8/12,2	k.A./375, FL	21/18	
Einstreu (NL)	Einstreu				16,1/12,4	212/201, ZL/FL	60/13	
Liegeboxen (NL)	Planb.				16,8/12,2	452/647, ZL/FL	216/54	
Einstreu (DK)	Einstreu				16,1/12,4	323/176, ZL/FL	79/9	
Liegeboxen (DK)	Planb.				16,8/12,2	385/364, ZL/FL	115/13	
Einstreu (D)	Einstreu				16,1/12,4	k.A./194, ZL/FL	76/6	
Liegeboxen (D)	Planb.				16,8/12,2	k.A./275, ZL/FL	338/29	

Tab. A4: Literaturübersicht PM10-Emissionen der Schweinehaltung

Abkürzungen: F Feinstaub, FL Freie Lüftung, G Gesamtstaub, k.A: keine Angabe, Perf. Perforiert, Planb. Planbefestigt, So Sommer, Wi Winter, ZL Zwangslüftung

Stallsystem, Lebendmasse, (Land)	Haltung	Fütterung	Messzeit, -dauer	Messmethode: Luftvolumenstrom, Staub	Temperatur [°C] So/Wi	Luftvolumenstrom [m³/GVE-h] So/Wi	G Gesamt-/ F Feinstaub-Emission [mg/GVE-h]	Quelle
Sauen	Kastenstand	k.A.	4x12 h	CO ₂ -Bilanz, IOM 50 % Cut-off PM5; 2 l/min (G); 1,9 l/min (F)	20,2	58 m³/Tier-h, ZL	- /6,4 mg/Tier-h	Groot Koerkamp et al. 1997
Sauen (UK)	Einstreu				21,4/18,7	456/140, ZL	144/49	Seedorf et al. 1998a, b; Takai et al. 1998
	Perf.				22,5/19,4	121/175, ZL	121/13	
Sauen (NL)	Perf.					159/113, ZL	151/18	
Sauen (DK)	Perf.					392/210, ZL	949/141	
Sauen (D)	Einstreu				21,4/18,7	614/417, ZL	753/46	
Sauen (D)	Perf.				22,5/19,4	234/69, ZL	162/19	
Absetzferkel	Teilperf.				24,5	13, ZL	- /3,3 mg/Tier-h	Groot Koerkamp et al. 1997
Absetzferkel (UK)	Perf.				25,1/24,7	253/302, ZL	687/60	Seedorf et al. 1998a, b; Takai et al. 1998
Absetzferkel (NL)						373/315, ZL	1309/122	
Absetzferkel (DK)						492/300, ZL	1364/51	
Absetzferkel (D)						431/207, ZL	724/69	
Mastschweine	Teilperf.				22,0	31, ZL	- /6,4 mg/Tier-h	Groot Koerkamp et al. 1997
Mastschweine (UK)	Einstreu				20,2/14,3	795/397, ZL	561/73	Seedorf et al. 1998a, b; Takai et al. 1998
Mastschweine (UK)	Perf.			23,3/19,9	467/256, ZL	895/133		
Mastschweine (NL)	Perf.				232/110, ZL	418/40		
Mastschweine (DK)	Einstreu			20,0/14,3	721/499, ZL	890/69		
Mastschweine (DK)	Perf.			23,3/19,9	646/185, ZL	604/57		
Mastschweine (D)	Perf.				469/156, ZL	532/34		

Tab. A5: Übersicht über die Datengrundlage in der Milchvieh- und Schweinehaltung

Symbole: Datengrundlage gut XXXX; mässig XXX, nicht gut XX, vereinzelt X, nicht vorhanden O

	NH ₃ -Emission		Staub-emission		NH ₃ -Emission				Staubemission				
	Zwangs-	Freie	Zwangs-	Freie	Sauen	Mastschweine	Zwangs-	Freie	Zwangs-	Sauen	Freie	Zwangs-	Mastschweine
Lüftung													
Stallsystem													
Anbindestall (Gülle)	XX	X	O	O	XX	X	XXXX	X	O	X	O	X	O
Anbindestall (Festmist)	X	X	X	O	O	X	XX	X	O	O	O	X	O
Tiefstreu	O	X	X?	X?	O	X	O	X	O	O	O	O	O
Tretmist+planbefestigt	X	X	O	O	O	X	X	X?	O	O	O	O	O
Liegeboxen+planbefestigt	X	X	X?	X?	X	X	X?	X	X	X	O	O	O
Liegeboxen+perforiert	X	X	X?	X?	X?	X	X	X?	O	X?	O	X?	O
Laufhof/planbefestigt	O	X	O	O	O	O	X	O	O	O	O	O	O
Laufhof/perforiert	O	O	O	O	O	O	O	X	O	O	O	O	O

Tab. A6: Literaturübersicht NH₃-Emissionsminderung in der Schweinehaltung

Literatur sortiert nach Abluftreinigung, Futtermittler, Futtermittelzusätze, Fütterungsform, Lüftung, Management, Gülle-, Einstreuzusätze; Abkürzungen: B Bestehende Ställe, EM Endmast, FA Ferkelaufzucht, FL Freie Lüftung, k.A: keine Angabe, L Labor, MM Mittelmast, N Neubauten, P Perforiert, Planb. Planbefestigt, U Umbauten, VM Vormast, XP Rohprotein, Z Zuchtsauen, ZL Zwangslüftung
Eignung: geeignet für B, U, N; nur teilweise geeignet für (B) oder (U), Neubau erforderlich N

Kategorie, Tierzahl	Kontrolle	Massnahme	Messung	NH ₃ -Emissionsminderung [%]	NH ₃ -Emission [mg/Tier-h]	Bemerkungen	Eignung	Quelle
MM-EM	Unbehandelte Abluft 7,4 ppm NH ₃	2 Biowäscher, mit Schwefelsäure a) 663 m ³ /h mit pH 5 b) 1410 m ³ /h mit pH 3	P	a) -95 % b) -99 %	a) 0,4 ppm b) 0,08 ppm	Kosten hoch	(B): zentrale Abluftführung	Hahne et al. 1998
a) VM-MM b) EM, 192	a) 22,5 % XP b) 20,5 % XP	a) 16,5 % XP b) 14,0 % XP	P	a) -58 % b) -46 %	a) 137 b) 282	Wasseraufnahme geringer, Güllemenge niedriger, -pH tiefer	B	Kay u. Lee 1997
VM-EM	VM-MM 18 % XP, EM 16,5 % XP	VM-MM 17 % XP, EM 14 % XP	P	-23 %	516		B	Pfeiffer et al. 1993
MM	36 % Tapioka	Zuckerrübenschnitzsilage 50/100/150 g/kg Trockensubstanz	L Gülleproben, 7 d	-15 % pro 50 g/kg Substitution		Gülle-pH um 0,45 pro 50 g/kg tiefer, da mehr freie flüchtige Fettsäuren	B	Canh et al. 1997
Jungsauen	Ration mit CaCO ₃	3 oder 6 g Ca/kg Futter ersetzt durch a) Ca SO ₄ b) Ca Cl ₂ c) Ca-Benzozat	L Gülleproben	a) -30 % b) -33 % c) -54 %		c) Benzoat umgewandelt zu Hippursäure	B	Canh et al. 1998
VM-MM, 757	k.A.	2 % Bentonit in Ration	P	-16 %	223	Effekt auf Kationenaustauschkapazität, Adsorption, Wasser	B	Hörning et al. 1997
VM-EM, je 99	VM: 18 % XP, 0,55 % CaCO ₃ ; MM-EM 16 % XP, 1,13 % CaCO ₃	CaCO ₃ ersetzt durch 1 % (VM) und 2 % (EM) organ. Säuren (Calciumoxid, Schwefel-, Ameisen-, Essig-, Propion-, Benzoe-, Zitronensäure u. Calciumbenzoat)	P	-37 %	143	Wasseraufnahme nur leicht erhöht	B	Hendriks et al. 1997
FA, 12x40; VM-EM, 4x36	FA: 50 % Perf. Metall, Planb. gewölbt 4 % Gefälle, 17,5 % XP; VM-EM: 50 % Perf. Beton; 18,5/17,5/16 % XP	25 % Perf., planb. 2 % Gefälle	P	FA: -20 % VM-EM: -10 %	FA: 32,5 VM-EM: 237	Bei 25 % Perf. grössere mit Harn verschmutzte Fläche.	(U)	Aarnink et al. 1996

Kategorie, Tierzahl	Kontrolle	Massnahme	Messung	NH ₃ -Emissionsminderung [%]	NH ₃ -Emission [mg/Tier·h]	Bemerkungen	Eignung	Quelle
VM-EM, je 36	Teilperf. (25 % Perf.); Betonspalten 100 mm Breite/20 mm Spalten- weite/15 % Lochanteil	a) Betonspalten 70 mm/18 mm/18 % b) Gussrost 25 mm/15 mm/32 % c) Dreikanntrost 10 mm/10 mm/50 %	L	a) -3 % b) -15 % c) -30 %		Ureaseaktivität war auf glatten Metallrosten reduziert.	(U)	Aarmink et al. 1997
EM	Güllenlagerung unter Spaltenboden	a) Beton/Epoxidbeschichtung/ Schieber b) Beton/Epoxidbeschichtung, 3 % Gefälle/ Schieber c) Kunststoff/1 % Gefälle/Schieber	P	a) -20 % b) -27 % c) -12 %	a) 304 b) 279 c) 333	Schieber läuft alle 2-6 h.	(U)	Groenestein 1994
Z (Abferkel- stall), 10	7,91 kg NH ₃ / Tierplatz·a	a) Haglando-Schieber, 4-6x/d b) geneigter Boden c) Flushing d) Biologic Schieber+Beschichtung e) R&R-Schieber+Polyesterwanne	P	a) -8 % b) -34 % c) -53 % d) -11 % e) -51 %	kg/Tierpl.-a: a) 7,29 b) 5,22 c) 3,68 d) 7,05 e) 3,86	Kanalboden muss sehr glatt sein.	(U)	Brok den u. van Dijk 1994
EM, 54/48	Perf., Unterflurabsaugung, ZL	Teilperf., Mikroklima+FL	P	-32 %	3570 mg/GVE·h		(U)	Gallmann 2003
VM-EM	Teilperf. - planb. versch. Verschmutzungsgrade	a) planb. sauber b) Verschmutzt + Stalltemperatur >17,5 °C	P	a) -50 % b) +12 % pro °C			B	Ni et al. 1996
VM-EM	Perf., nährstoffangepasst	Zweiraum-Kompoststall a) mit Stroh b) mit Sägespänen c) mit Sägespänen d) mit Sägespäne/Stroh-Gemisch	P	a) +48 % b) -2 % c) -27 % d) +11 %	a) 420 b) 228 c) 214 d) 257	Erhöhte N ₂ O-Emission	N	Kaiser 1999
MM, je 80	Perf. mit Güllekeller (Lagerdauer 6 Monate)	a) Teilperf., Entleeren 1x/Woche b) ebener Kanal, 3x/d c) Abflussröhren, 3x/d d) geneigter Kanal, Flushing, 6x/d	P	a) -10 % b) -63 % c) -65 % d) -38 %		b)-d) nicht geeignet bei Stroheinsatz	N	Hoeksma et al. 1992
VM-EM	Teilperf., versch. Zu-, Abluftsysteme	Mineralbeschicht auf Gülleoberfläche von 10 mm	P	-45/-27 %	k.A.	Temperatur der Gülleoberfläche relevant. Ölschicht reduzierte Staubkonzentration.	B	Aarmink u. Wagemans 1997
FA, 720	Perf.	Fritieröl auf Gülleoberfläche, in restlos entleer- tem Kanal	P	-50 %		Mind. 3 mm Ölschicht, Kurz- zeitwirkung	(B)	Pahl et al. 2000
VM-EM Gülle	Gülle in vitro	Mineralöl auf Gülleoberfläche: 0,5/1,5/2,5 mm	L	-41/-93/-96 %		Bei höherem Faseranteil (Rinder- gülle, Einstreu) dickere Ölschicht nötig.	(B)	Derikx u. Aar- nink 1993

Kategorie, Tierzahl	Kontrolle	Massnahme	Messung	NH ₃ -Emissionsminderung [%]	NH ₃ -Emission [mg/Tier-h]	Bemerkungen	Eignung	Quelle
VM-EM, je 18	Perf. mit Güllekeller	Kompoststall mit Sägemehl a) 40-50 cm +Envistim b) 70cm +Bactostim	P	a) -20 % b) -60 %		Erhöhte N ₂ O-Emission	N	Groenestein and van Faassen 1996
Schweine	Gülle 3 kg 219 mg NH ₃ /m ² ·h	a) +0,5 kg Stroh b) +0,2 kg Stroh+0,3 kg Torf c) +0,2 kg Stroh+0,3 kg Absorbera d) +0,2 kg Stroh+0,3 kg Purifin e) +0,2 kg Stroh+0,3 kg Papier	L	a) -91 % b) -88 % c) -78 % d) +69 % e) -99 %		Mischungen vergleichbar mit Tretstreu in Schweden	N	Andersson 1996
VM-EM, 144	Perf. mit Güllekeller, 80 Tiere	Kompoststall mit Holz-, Rindenschnitzeln +Ecopor	P	Keine Reduktion		Erhöhte N ₂ O-Emission	N	Thelosen et al. 1993

Tab. A7: Literaturübersicht PM10-Minderung in der Schweinehaltung

Literatur sortiert nach Futterart, Vernebelung/Versprühung von Öl oder Wasser;
 Abkürzungen: B Bestehende Ställe, c Konzentration, EM Endmast, FA Ferkelaufzucht, FL Freie Lüftung, k.A: keine Angabe, L Labor, MM Mittelmast, N Neubauten, P Praxis, Perf. Perforiert, Planb. Planbefestigt, TS Trockensubstanz, U Umbauten, VM Vormast, XP Rohprotein, Z Zuchtsauen, ZL Zwangslüftung
 Eignung: geeignet für B, U, N; nur teilweise geeignet für (B) oder (U), Neubau erforderlich N

Kategorie, Tierzahl	Kontrolle	Massnahme	Messung	Staubparameter/ Methode	Minderung der Konzentration [%]	Konzentration Massnahme	Bemerkungen	Eignung	Quelle
a) FA, b) VM-EM je 60	Ohne Fettzugabe	4 % tierisches Fett in Futterration	P	Gesamtstaub Alveolengängiger Staub PM5	a) -37, b) -42 % a) -57, b) -39 %	a) 2,26, b) 1,16 mg/m ³ a) 0,12, b) 0,07 mg/m ³	Gesamtstaub war abh. von Probnahmeort, alveolengängiger unabhängig	B	Takai et al. 1996
VM-MM je 250	Teilperf., Offentfront, Trockenfutter ad lib	7 % tierisches Fett in Futterration (Talg)	P	Gesamtstaub 4-Stufen-Kaskadenimpaktor	-53 %	10 mg/m ³ PM14		B	Chiba et al. 1987
EM	Trockenfutter	2 % Rapsöl	P	Inhalierbarer Staub Alveolengängiger Staub	-31 % +46 %		Ergebnisse unschlüssig	B	Welford et al. 1992; in: Pearson u. Sharples 1995
Allgemein	Pellets, nicht umhüllt	Pellets mit 2 % Lignin und 2 % Fett umhüllt	L	Alveolengängiger Staub PM5 Spezieller Test	-33 %		Transport und Förderung von Futter ist zu beachten.	B	Li u. Owen 1997
Schweine	Trockenfutter (Mehl)	a) Flüssigfütterung b) Pellets	P	Gesamtstaub <20 µm Gesamtstaub <20 µm	-49 % -35 % -31 % n. sign.			U	Zeitler et al. 1987; in: Pearson u. Sharples 1995
MM 12x4	Perf., Trockenfutter	Canola-Öl versprüht a) 12 ml/m ² -d b) 31 ml/m ² -d	P	Gesamtstaub (2 l/min)	a) -79 % b) -92 %	0,08 mg/m ³	Einatmen von Öl, Effekt auf Schweine unklar	B	Godbout et al. 2000
MM-EM, 2x72	k.A.	Canola-Öl versprüht Tag 1/2: 44 s, 40 ml/m ² -d Tag 3/4: 22 s, 20 ml/m ² -d Tag ≥4: 6 s, 5 ml/m ² -d	P	Gesamtstaub Inhalierbarer Staub >0,5 µm Alveolengängiger Staub PM5	-87 % -90 % -86 %	0,36 mg/m ³		B	Lemay et al. 2000

Kategorie, Tierzahl	Kontrolle	Massnahme	Messung	Staubparameter/ Methode	Minderung der Konzentration [%]	Konzentration Massnahme	Bemerkungen	Eig-nung	Quelle
a) FA b) VM c)-EM	0,43 mg/m ³ Alveolen- gängiger Staub	Rapsöl/Wasser/Emulsion 5-15 % Ölkonzentration 5-90 s/d versprüht 5-15 ml/Tier-d	P	Alveolengängiger Staub PM5	a) -76 % b) -54 % c) -52 %	a) 0,13 mg/m ³ b) 0,23 mg/m ³ c) 0,15 mg/m ³	Keine patho- logischen Lungen- befunde	B	Takai et al. 1993
EM	Teilperf., mit Häckselstroh, Trockenfutter	a) Wasser (464 g/Tier-d) b) Öl/Wasser-Gemisch (3,1 g Öl/Tier-d) + 4 % Fett in Futter c) Flüssigfütterung d) Öl/Wasser-Gemisch (3,3 g Öl/Tier-d) gesteuert mit Aktivi- tätssensor + 4 % Fett in Futter	P	Gesamtstaub/ Alveolengängiger Staub PM5 mit SKC-Zyklon	a) -29/-13 % b) -79/-87 % c) -49/-27 % d) -73/-66 %	a) 1,15/0,14 mg/m ³ b) 1,16/0,04 mg/m ³ c) 1,33/0,13 mg/m ³ d) 0,59/0,05 mg/m ³		B	Takai u. Pedersen 2000
VM-EM	k.A.	a) Elektrostatik b) Ionisation c) Staubsauger d) Versprühung von Wasser, Flachstrahl Düsen e) Versprühung von Wasser, Düsenkegel f) Öl/Wasser-Gemisch auf Tiere g) Öl/Wasser-Gemisch über Trog		Gesamtstaub Alveolengängiger Staub mit SKC-Zyklon	a) begrenzter Effekt b), c) kaum Effekt d) Alveoleng. -50 % e) Alveoleng. -15 bis -60 % f) Alveoleng. -4 bis -51 % g) Gesamtst. bis -50 %			B	Gustafsson 1994

Tab. A8: Entwicklung des Schweinebestandes im Zeitraum von 1990 bis 2003 (Statistische Erhebungen und Schätzungen über Landwirtschaft und Ernährung des Schweizerischen Bauernverbandes 1994-2003); a) Anzahl Tiere, b) Anzahl Grossvieheinheiten.

a) Anzahl Tiere

Jahr	Mastschw. >30 kg					Gesamtbestand
	Saugferkel	Abgesetzte Ferkel	Remonten <6 Mt.	Zuchtschweine	Zuchteber	
1990	345500	359300	894400	179400	8400	1787000
1991	335600	339000	864700	175200	8100	1722600
1992	326900	348900	847800	174100	8000	1705700
1993	334039	359507	814985	175002	8248	1691781
1994						
1995	304738	329707	651300	152767	7112	1445624
1996	269366	289038	675616	139086	6253	1379359
1997	266919	302670	673802	145143	6379	1394913
1998	287004	314118	727075	152338	6420	1486955
1999	295465	281003	734382	136226	6174	1453250
2000	303030	296628	750869	141448	6248	1498223
2001	314854	318751	762514	145508	6084	1547711
2002	311379	326586	767887	145081	5784	1556717
2003	308018	322842	751679	141116	5278	1528933

b) Anzahl Grossvieheinheiten

Jahr	Mastschw. >30 kg		Zuchtschweine	Zuchteber	Gesamtbestand
	Abgesetzte Ferkel	Remonten <6 Mt.	inkl. Saugferkel		
1990		138801	80730	2100	221631
1991		134099	78840	2025	214964
1992		131226	78345	2000	211571
1993		126281	78751	2062	207094
1994					
1995		100772	68745	1778	171295
1996		104804	62589	1563	168956
1997		104052	65314	1595	170961
1998		112691	68552	1605	182848
1999	16860	124845	45567	1544	188815
2000	17798	127648	47409	1562	194417
2001	19125	129627	48714	1521	198987
2002	19595	130541	48306	1446	199888
2003	19371	127785	46986	1320	195461

Tab. A9: Entwicklung der Beteiligung am BTS- und RAUS-Programm im Vergleich mit dem Gesamtschweinebestand in Grossvieheinheiten im Zeitraum von 1996 bis 2003 (Statistische Erhebungen und Schätzungen über Landwirtschaft und Ernährung des Schweizerischen Bauernverbandes 2001-2003, Bundesamt für Landwirtschaft 2002-2004).

Jahr	Gesamtbestand	BTS		RAUS	
	GVE	GVE	% vom Gesamtbestand	GVE	% vom Gesamtbestand
1996	168956			5796	3.4
1997	170961	13445	7.9	14002	8.2
1998	182848	25235	13.8	24139	13.2
1999	188815	43290	22.9	40037	21.2
2000	194417	58328	30.0	54761	28.2
2001	198987	68406	34.4	64371	32.3
2002	199888	79399	39.7	74369	37.2
2003	195461	89363	45.7	84521	43.2

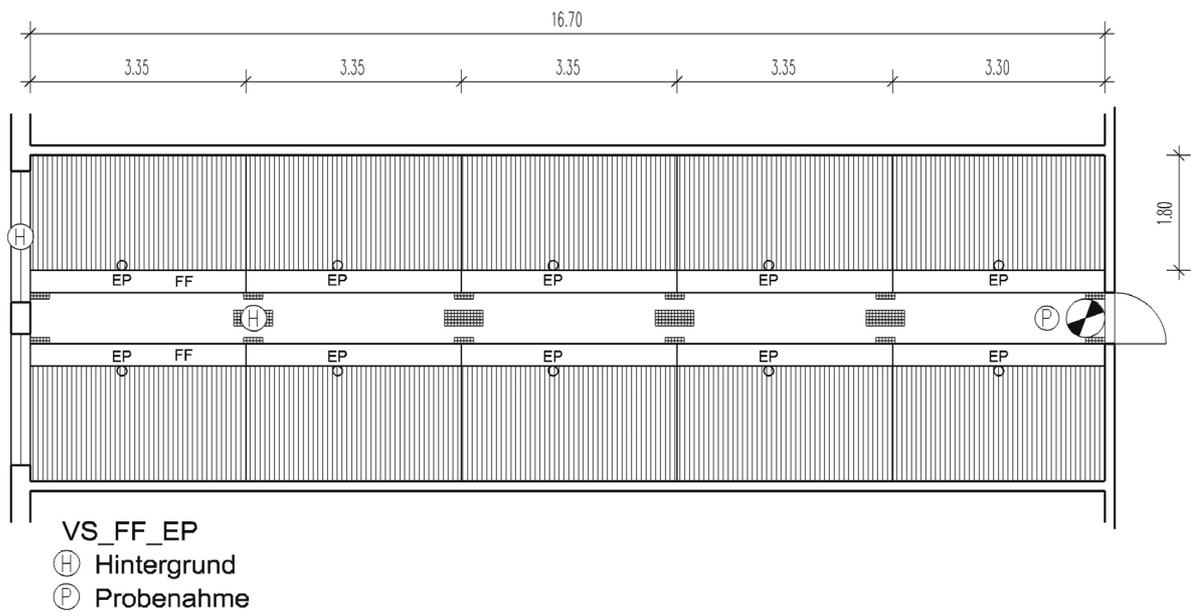
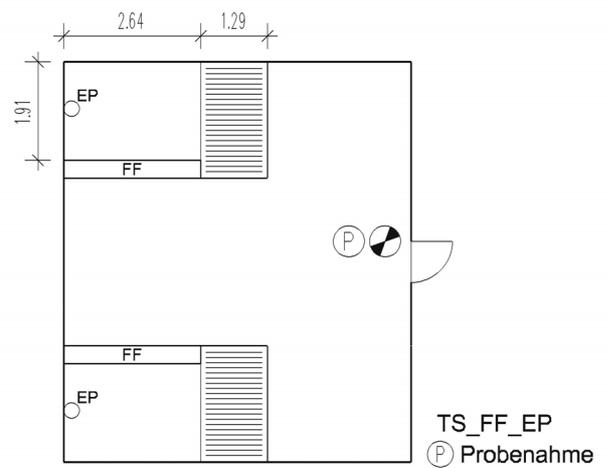
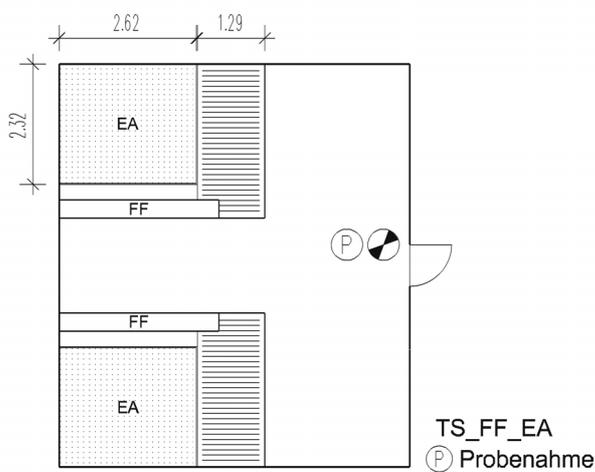
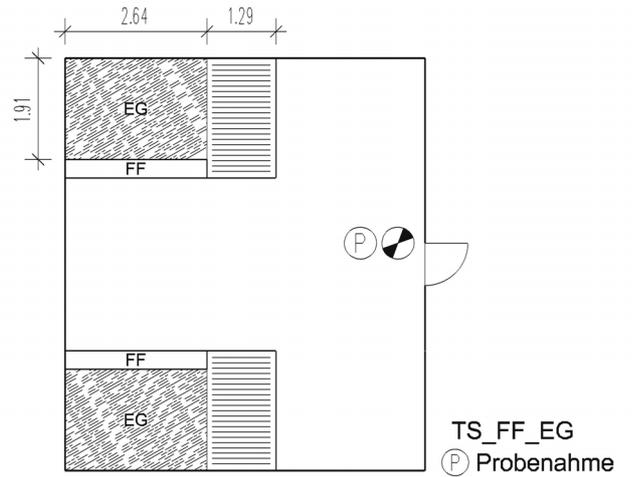
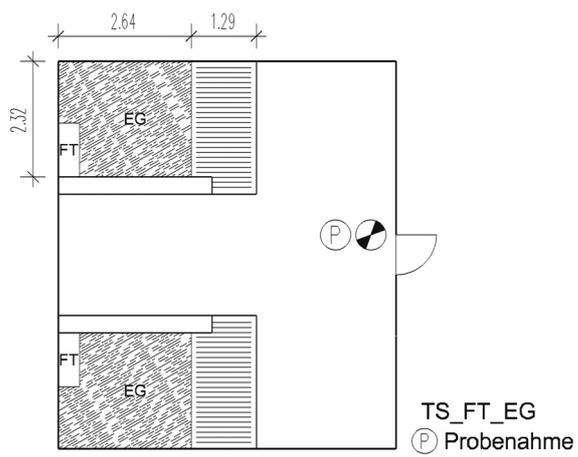


Abb. A1: Grundrisse der traditionellen Stallsysteme.

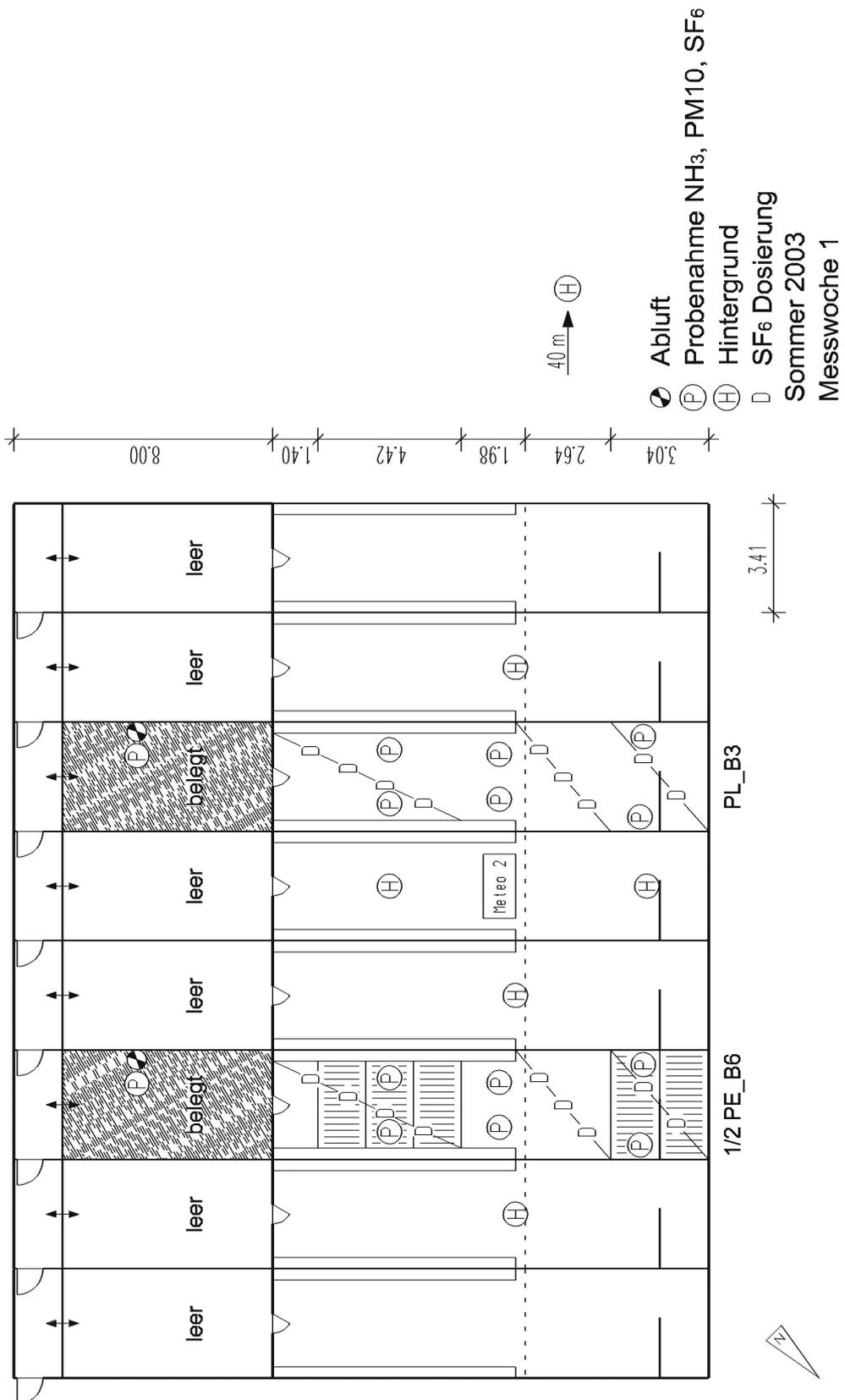


Abb. A2: Grundriss des Stallsystems mit eingestreutem Liegebereich und Auslauf in der Sommermessung 2003.

14. Abkürzungen

Ø	durchschnittlich
a	Jahr
B1, B3, B6	Bucht 1, Bucht 3, Bucht 6
CH ₄	Methan
C _{in}	Hintergrundkonzentration in der Zuluft
CO	Kohlenmonoxid
CO ₂	Kohlendioxid
C _{out}	Konzentration in der Abluft
d	Tag
EA	Einstreu aufbereitet
EG	Einstreu geschnitten
EM	Endmast
EP	Strohpresswürfel
ESAS	Emissionen von Staub und Ammoniak aus neuen Stallsystemen
f	Frequenz
FEP	Perfluorethylenpropylen
FF	Flüssigfütterung
FL	Freie Lüftung
FT	Trockenfütterung
FTIR	Fourier-Transform Infrarotspektroskopie
GVE	Grossvieheinheit, entspricht 500 kg Lebendmasse bzw. Landwirtschaftliche Begriffsverordnung (2003)
H ⁺	Wasserstoff-Ionen
H ₂ O	Wasser
H ₂ SO ₄	Schwefelsäure
k.A.	keine Angabe
kg	Kilogramm
l	Liter
M	molar
ṁ	Massenstrom
mg	Milligramm
min	Minute
MJ	Megajoule
MM	Mittelmast
MSP	Mastschweineplatz
MW	Mittelwert
µm	Mikrometer
N	Nord
N ₂ O	Lachgas
NABEL	Nationales Beobachtungsnetz für Luftfremdstoffe

N _{Gesamt}	Gesamt-Stickstoff
NH ₃	Ammoniak
NH ₄ -N	Ammonium-Stickstoff
nv	nicht vorhanden
PE	perforiert
PE_B1	perforiert Bucht 1
PE_B3	perforiert Bucht 3
PE_B6	perforiert Bucht 6
PL	planbefestigt
PL_B3	planbefestigt Bucht 3
PM10	Particulate Matter, kleiner als 10 µm
ppm	parts per million
PTFE	Polytetrafluoroethylen
PVC	Polyvinylchlorid
P-Wert	Signifikanzniveau
r	Korrelation
r ²	Bestimmtheitsmass
RH	Relative Luftfeuchtigkeit
rsd	Standardabweichung der Residuen
rse	Fehler der Residuen
SF ₆	Schwefelhexafluorid
So	Sommer
TEOM	Tapered-Element Oscillating Microbalance
TS	Teilspaltenboden
TS	Trockensubstanz
t-Wert	Statistischer Testwert
\dot{V}	Volumenstrom
VES	Verdauliche Energie Schwein
VM	Vormast
VS	Vollspaltenboden
W	Westen
Wi	Winter
XP	Rohprotein
ZL	Zwangslüftung

Unser Dank gilt...

dem Auftraggeber, Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft für die Teilfinanzierung,
vertreten durch Jiri Mika

den beiden Praxisbetrieben für die Zusammenarbeit
Agroscope ALP Liebefeld-Posieux für die Analytik von Futterproben
Agroscope FAL Reckenholz für die Analytik von Hofdüngerproben

Agroscope FAT Tänikon

Messtechnik: Beat Kürsteiner und Linus Beerli

Praktikum: Katharina Paucirova

Sekretariat: Jacqueline Gabriel

Übersetzung: Regula Wolz

Tierbetreuer: Bruno Horat und Vid Vidovic

Versuchstechniker: Gallus Jöhl, Reto Rutishauser und Martin Schlatter

Empa

Labor: Claudia Zellweger und Elisabeth Wettstein

Unterstützung für Gaschromatographie: Stefan Reimann

Praxismessungen: Diana Stork