

„Untersuchung zur Minderung der Ammoniakemissionen im Rinderstall durch ein Spaltenbodenreinigungssystem“

Auftragnehmer: **Westermann GmbH & Co KG**
Schützenhof 23
49716 Meppen

Projektpartner: **Johann Heinrich von Thünen-Institut**
Bundesforschungsinstitut für Ländliche Räume, Wald und
Fischerei
Institut für Ökologischen Landbau
Trenthorst 32
23847 Westerau

Projektlaufzeit: 01.04.2009 – 31.03.2011

Projektförderung: **Deutsche Bundesstiftung Umwelt (DBU)**
An der Bornau 2
49090 Osnabrück



Juli 2011

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung und Zielsetzung	8
1.1	Stand des Wissens	8
1.2	Zielsetzung	9
2	Versuchsaufbau	10
2.1	Vorentwicklung des Spaltenreinigungsgeräts CM3	10
2.2	Versuchsstall	12
2.3	Beprobung des Spaltenbodens	13
2.3.1	Versuchsphase 1 (2009)	15
2.3.2	Versuchsphase 2 (2010)	16
2.4	Reinigung des Spaltenbodens	18
3	Messung der Ammoniakkonzentration	19
3.1	Aufbau Messkammern	19
3.1.1	Versuchsphase 1 (2009)	19
3.1.2	Versuchsphase 2 (2010)	19
3.1.3	Strömungsversuch	19
3.2	Nasschemische Analyse	21
4	Beurteilung der Reinigungswirkung	23
4.1	Emissionsverhalten des Betonbodens	23
4.1.1	Ammoniakemissionen des Spaltenbodenbetons	23
4.1.2	10-Tage Langzeitmessung	23
4.2	Versuchsphase 1 (2009)	24
4.3	Versuchsphase 2 (2010)	25
4.3.1	Messung zu unterschiedlichen Zeitpunkten nach der Reinigung	25
4.3.1.1	Ammoniakemissionen	25
4.3.1.2	Gravimetrische Bestimmung der Spaltenverschmutzung	27
4.3.2	Weidehaltung vs. ganztägige Stallhaltung	32
4.3.3	Empfehlung zur Häufigkeit der Reinigung	34
5	Einfluss des Tierbesatzes auf die Spaltenbodenverschmutzung	35
6	Versuchsstand	38
6.1	Künstlich verschmutzte Spalten	39
6.2	Natürlich verschmutzte Spalten	42
6.3	Empfehlung für die Weiterentwicklung des Reinigungsgerätes	44
7	Fazit	45
7.1	Reinigungswirkung auf die Ammoniakemissionen	45
8	Literatur	46

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Schematische Darstellung des Reinigungsaggregats (System Westermann).....	10
Abbildung 2:	Erste Version des Reinigungsaggregats der Fa. Westermann am CM3 mit zwei Vorratsbehältern.	11
Abbildung 3:	Reinigungsaggregat in der Version mit seitlichen Schürfblechen und Einzelbehälter zu Versuchsbeginn im Juni 2009.....	12
Abbildung 4:	Auflager für die Versuchsspalten.....	13
Abbildung 5:	Lage der Beprobungsspalten als Ausschnitte der Spaltenelemente zwischen den roten Schnittmarkierungen zur Messung der Ammoniakemissionen	13
Abbildung 6:	Stallskizze mit Lage der Spaltenelemente. Der weiß gestreifte Bereich stellt den gereinigten Teil des Stall dar, der grau gestreifte Bereich den unbehandelten Kontrollbereich. A-F: Testelemente	14
Abbildung 7:	Prüfspalte mit Spaltenanker und Hängewaage	14
Abbildung 9:	Luftgeschwindigkeit in einer Messkammer für drei verschiedene Ebenen.....	20
Abbildung 10:	Messkammer mit Beprobungsspalten und Klarsichtabdeckung	21
Abbildung 11:	Schema des Ammoniakbestimmung (nasschemisch) im klimatisierten Versuchscontainer.....	21
Abbildung 12:	Segment Flow Analyzer zur Bestimmung der Ammoniakkonzentration (Labor des Instituts für Agrarrelevante Klimaforschung des vTI).....	22
Abbildung 13:	Langzeitmessung der Ammoniakemissionen über 10 Tage	24
Abbildung 14:	Ammoniakemissionen der Beprobungsspalten während der Weidesaison (* = $p \leq 0,05$)	25
Abbildung 15:	Ammoniakemissionen der Beprobungsspalten während der ganztägigen Stallhaltung (* = $p \leq 0,05$)	26
Abbildung 19:	Menge Gülle auf den individuellen Versuchsspalten während der ganztägigen Stallhaltung	30
Abbildung 20:	Anfallende Güllemenge in verschiedenen Funktionsbereichen des Stalles während der Weidehaltung im Sommer	31
Abbildung 21:	Anfallende Güllemenge in verschiedenen Funktionsbereichen des Stalles während der ganztägigen Stallhaltung im Winter	31
Abbildung 22:	Zusammenhang zwischen der Temperatur im Stall (24 Std. vor der Messung) und den Ammoniakemissionen während der Weidesaison ($y = 11,334 - 0,2661x$, $R^2 = 0,1$)	33
Abbildung 23:	Zusammenhang zwischen der Temperatur im Stall (24 Std. vor der Messung) und den Ammoniakemissionen während der ganztägigen Stallhaltung ($y = 8,7731 + 0,1795x$, $R^2 = 0,01$).....	33
Abbildung 24:	Kotkonsistenz auf den Spalten während der Weidehaltung und der ganztägigen Stallhaltung (* = $p \leq 0,05$)	34
Abbildung 25:	Verteilung der Tiere über 24 Stunden. Schwarze Balken zeigen die Anzahl Tiere im Bereich des Futtertisches, graue Balken im Bereich der Liegeboxen an (unterschiedliche Buchstaben zeigen einen statistisch signifikanten Unterschied der Mittelwerte an).	35
Abbildung 26:	Anzahl der Tiere Zwischen der Reinigung und der Messung zu den unterschiedlichen Zeitvarianten an den individuellen Beprobungsorten ($p = 0,05$)	36

Abbildung 27:	Zusammenhang zwischen Menge Gülle auf Spalten und Belegungsdichte.....	37
Abbildung 28:	Zusammenhang zwischen Menge NH ₃ von Spalten und Belegungsdichte.....	37
Abbildung 29:	Ammoniakemissionen von den künstlich verschmutzten Spalten (p= 0,05).....	40
Abbildung 30:	Menge Gülle auf den künstlich verschmutzten Spalten nach der Reinigung (p= 0,05).....	41
Abbildung 31:	Ammoniakemissionen der natürlich verschmutzten Spalten (p= 0,05)	42
Abbildung 32:	Menge Gülle auf den natürlich verschmutzten Spalten nach der Reinigung (p= 0,05).....	43

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Nährstoffgehalte der Gülle aus Güllelager unterhalb des Spaltenbodens während des Versuchszeitraums 2010	15
Tabelle 2: Inhaltsstoffe der TMR während des Versuchszeitraums 2010	15
Tabelle 3: Milchproben während des Versuchszeitraums 2010	15
Tabelle 4: Kontrollvarianten in Versuchsphase 1	15
Tabelle 5: Messzeiträume der Versuchsphase 2	17
Tabelle 6: Messung der Kotkonsistenz (Trampler, 2002) und (Pfadler, 1981)	17
Tabelle 7: Ammoniakemissionen der gebrauchten Betonspaltenböden	23
Tabelle 8: Ammoniakemissionen der Spaltenbodenelemente in drei Messesequenzen	24
Tabelle 9: Güllemenge auf den Spaltenelementen (* = $p \leq 0,05$)	25
Tabelle 10: Vergleich Kontrollspalten und gereinigte Spalten	27
Tabelle 11: Mechanische Reinigungswirkung direkt nach der Reinigung der Versuchsspalten auf den individuellen Versuchsspalten	29
Tabelle 12: Unterschiedliche Indices zeigen signifikante Unterschiede zwischen der Menge Gülle (kg) auf den einzelnen Spalten während der Weideperiode an	30
Tabelle 13: Unterschiedliche Indices zeigen signifikante Unterschiede zwischen der Menge Gülle (kg) auf den einzelnen Spalten während der ganztägigen Stallhaltung an	31
Tabelle 14: Angepasste Mittelwerte der Ammoniakemission und der Menge Gülle auf den Kontrollspalten während beider Messperioden	32
Tabelle 15: Mittlere Temperaturen im Stall, jeweils 24 Std. vor den Messungen	32
Tabelle 16: Mittlere Anzahl Tiere über 24 Std. auf der Futtertisch- und Liegeboxseite (* = $p \leq 0,05$)	35
Tabelle 17: Reinigungsvarianten Versuchstand	38
Tabelle 18: Gülle auf den künstlich verschmutzten Spaltenelementen	40
Tabelle 19: Reinigungswirkung auf die Ammoniakemissionen von den unterschiedlich verschmutzten Spalten	41
Tabelle 20: Reinigungswirkung auf die Menge Gülle auf den unterschiedlich verschmutzten Spalten	42

1 Einleitung und Zielsetzung

1.1 Stand des Wissens

Stoffeinträge aus der Landwirtschaft in die Umwelt werden immer mehr zu einem Gegenstand des öffentlichen Interesses. So führen Emissionen von Ammoniak zu Eutrophierung und Versauerung von Ökosystemen. Zudem sind sie indirekt klimarelevant und beeinflussen zum Teil die Ozonkonzentrationen in der Stratosphäre (Döhler et al., 2002). Eine Überwachung der Ammoniakemissionen ist wichtig für die Umwelt sowie die Sicherheit und Gesundheit von Mensch und Tier (Phillips et al., 1998). Dem Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz zufolge trägt die Land- und Forstwirtschaft zu rund 13 % der gesamten Treibhausgasemission in Deutschland bei (BMELV, 2003). Ca. 90 % der Ammoniakemissionen stammen aus der Tierhaltung und davon ca. 50 % aus der Rinderhaltung (Döhler et al., 2002). Demnach sind Reduktionsmaßnahmen für den Austrag von klima- und umweltrelevanten Gasen unumgänglich. Deutschland hat sich daher 2002 zu einer Verminderung des Ausstoßes von Schadgasen durch die Unterzeichnung des Kyoto-Protokolls verpflichtet. Grundlage hierfür ist eine abgesicherte statistische Datenbasis zur Erstellung von Emissionsinventaren, welche nach Döhler et al., 2002 nur unzureichend zur Verfügung stehen.

Besonders der Bereich der Rinderhaltung stellt hier eine große Herausforderung bei der Ermittlung von Emissionsraten dar. Heute existieren hauptsächlich frei gelüftete Ställe in der Rinderhaltung, da diese kostengünstiger als zwangsgelüftete Systeme sind und den Haltungsbedürfnissen der Tiere gerechter werden (Macuhová et al., 2008). Bei der Ermittlung der Emissionsraten stellen jedoch die zahlreichen und großen Öffnungen in den Stallgebäuden sowie die stark schwankenden meteorologischen Bedingungen sehr variable Faktoren bei der Ermittlung der Ventilationsraten eines Stalles dar.

Ein großer Teil der Ammoniakemissionen aus Rinderställen stammt von den Laufflächen. Ammoniak entsteht durch die Hydrolyse von Harnstoff. Der Harnstoff findet sich hauptsächlich im Harn und wird durch das Enzym Urease, welches hauptsächlich im Kot vorkommt zu Ammoniak und Kohlenstoffdioxid (Muck 1982).

Besonders bei Spaltenböden zeigt die praktische Erfahrung, dass der Selbstreinigungseffekt dieser Böden ungenügend ist. Daher ergibt sich der Bedarf eines adäquaten Reinigungsgerätes für Spaltenböden in Rinderställen (Braam et al., 1997). Verschiedene Ansätze wurden hier bereits untersucht, um die Ammoniakemission von Laufflächen zu vermindern. Der grundlegende Ansatz hierbei ist es, den Mist von den Laufflächen in das Güllelager zu verlagern, um die emittierende Oberfläche zu verringern. Hamelin et al., 2010 untersuchten dazu unterschiedliche Designs von Spaltenböden. Grundsätzlich zeigte sich hier, dass die Benutzung einer ausgeprägten Abrisskante positiv zum Selbstreinigungseffekt der Böden beiträgt. Määttä et al., 2008 verwendeten verschiedene Beschichtungen für Betonspaltenböden und kamen zu dem Schluss, dass Epoxid-Beschichtungen das größte Potenzial aufweist um den Sauberkeitsgrad von Spalten zu erhöhen.

Kroodsma et al., 1993 verwendete Wasser, um Spaltenböden abzuspielen. Es wurden signifikant positive Effekte auf die Ammoniakemissionen gefunden, allerdings unter Einsatz großer Wassermengen. Alle diese Ansätze bedeuten einen hohen Kostenfaktor in der Entwicklung und Produktion der Spaltenböden, oder einen hohen Arbeitsaufwand. Daher wurde versucht, ein spezielles Reinigungsgerät zu entwickeln, welches die Ammoniakemissionen herkömmlicher Spaltenböden unter einem geringen Aufwand an Wassermenge effektiv reduzieren kann.

Die Intensität der Emissionsquellen variiert stark in Ställen. So stellen Laufflächen, Güllelager, Liegeplätze und die Tiere selber unterschiedliche Quellen dar, die es bei

Emissionsmessungen zu beachten gilt. So gibt es unterschiedliche Ansätze, die Emissionen in Teilbereichen zu betrachten.

Andersson, (1994) untersuchte in einer Klimakammer mit kontrollierter Innentemperatur und Ventilationssystem die Ammoniakemissionen aus einem künstlichen Güllelager (Klimakammer). Ebenfalls im Labormaßstab, untersuchten Fleming et al. (2008) verschiedene Einstreumaterialien auf ihr Emissionspotential. Hierbei wurden die verschiedenen Einstreumaterialien in Containern unter kontrollierten klimatischen Bedingungen auf die Ammoniakemissionen hin untersucht. Hamelin et al. (2010), Misselbrook et al. (2005b) und Ndegwa et al. (2009) verwendeten ebenfalls Durchflussskammern um unter klimatische standardisierten Bedingungen verschiedene Gülleproben auf ihr Emissionspotential hin zu untersuchen. Um speziell den Ammoniak zu erfassen wurden Säure-Fallen an Luftein- und -ausgang installiert um Sammelproben über mehrere Stunden zu erhalten.

Loubet et al. (1999) verwendeten einen Windtunnel zur Messung von Emissionsraten. Prinzipiell wird bei dieser Messung der Unterschied zwischen der Gaskonzentration im Lufteinlass und -Auslass in einem bekannten Luftstrom gemessen um so die Rate der Emission zu bestimmen. Die Wiederfindungsrate in diesem Fall betrug 70-87%. Die hauptsächlichsten Fehlerursachen sind die ungleiche Verteilung der Luft und des Gaskonzentrationsprofils in Messraum innerhalb des Tunnels.

(Navaratnasamy, Edeogu, and Feddes) verglichen in einem Laborversuch die Effektivität der Messung von Emissionsraten mit einem Windtunnel und einer belüfteten Messkammer. Die Untersuchungen gaben Aufschluss darüber, dass die Messergebnisse der belüfteten Messkammer geringeren Schwankungen unterlag als die des Windtunnels. Zudem konnten mit der Messkammer höhere Emissionsraten gemessen werden.

Elzing and Monteny (1997) untersuchten mit Hilfe einer „Lindvall-Box“ (einer nach unten hin offenen Messkammer, beschrieben in (Lindvall, Noren, and Thyselius)) die Emissionen von verschmutzten Rinder-Spaltenböden unter klimatisch kontrollierten Bedingungen.

Hierbei wurde wiederum die Differenz zwischen der Gaskonzentration im Luftein- und -ausgang untersucht und mit der Ventilationsrate zur Emissionsrate umgerechnet.

Vorteil dieser Methoden im Labormaßstab sind die kontrollierten klimatischen Bedingungen und die Wiederholbarkeit der simulierten Verschmutzung verschiedener Stallbereiche. Jedoch bleiben diese Versuche nur eine Annäherung an die realen Bedingungen im Stall.

Kroodsma et al. (1993) benutzten wie Elzing and Monteny (1997) eine „Lindvall-Box“ um Emissionen von Spaltenböden zu bestimmen, wendeten diese jedoch im Stall selber an. Auch Misselbrook et al. (2001) verwendeten eine Durchflussskammer direkt im Stall, um Emissionen mit Hilfe von Passivsammlern in den Kammern unter konstantem Luftfluss zu bestimmen.

Mosquera et al. (2010) setzten ebenfalls eine dynamisch Durchflussskammer direkt im Stall auf Spaltenböden und dem darunter liegenden Güllelager ein.

Der Vorteil von Messungen im Stall ist die direkte Abbildung der klimatischen Bedingungen sowie der direkte Einfluss der Tiere auf die Emissionen. Jedoch ist die Reproduzierbarkeit durch die hohe Inhomogenität der Verschmutzung sehr niedrig. Diese Messungen können lediglich stichprobenartig Momentaufnahmen der eigentlichen Emissionslage im Stall geben. Zudem interagieren die Messungen mit den täglichen Arbeitsabläufen im Stall.

1.2 Zielsetzung

Ziel des Projekts war es, zunächst ein spezielles Reinigungssystem für Spaltenböden zu entwickeln und in einem weiteren Projektabschnitt den Effekt des Reinigungsgerätes auf die Ammoniakemissionen unter kontrollierten klimatischen Bedingungen zu erfassen und zu bewerten. Aus den Ergebnissen sollen Empfehlungen für weitere Entwicklungen abgeleitet werden..

2 Versuchsaufbau

2.1 Vorentwicklung des Spaltenreinigungsgeräts CM3

Für die Durchführung des Projekts wurde von der Fa. Westermann ein selbstfahrendes Spaltenreinigungsgerät mit der Bezeichnung „Cleanmeleon CM3“ entwickelt. Im Text wird das Gerät im Folgenden mit der technischen Abkürzung „CM3“ bezeichnet. Die selbstfahrende Arbeitsmaschine CM3 ist ein universell einsetzbares Arbeitsgerät, an das auch andere Systemkomponenten angekoppelt werden können. Das Trägerfahrzeug ist dieselmotorbetrieben, hat drei Räder und kann nahezu auf Stelle wenden.

Das zu entwickelnde Reinigungsaggregat wurde so konzipiert, dass es mit einer universellen Gerätekupplung auch an andere in der Landwirtschaft übliche Hoflader angekoppelt werden kann. Für den Antrieb der Hochdruckpumpe wird der Ölkreislauf des Trägerfahrzeugs verwendet. Die Ölanschlüsse sind genormt.

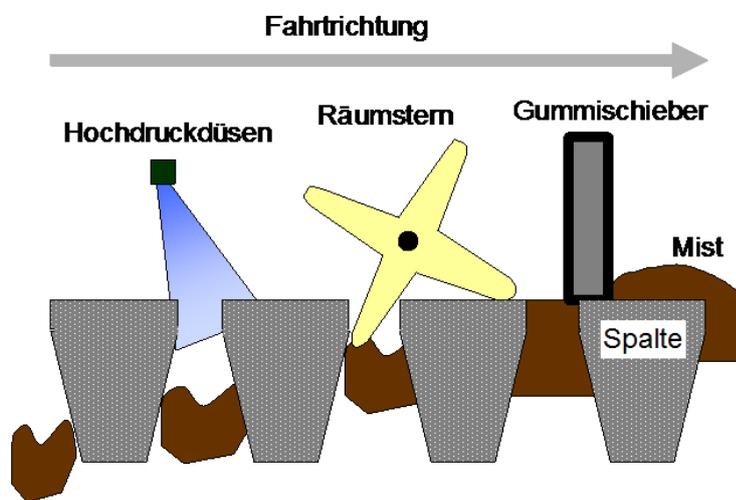


Abbildung 1: Schematische Darstellung des Reinigungsaggregats (System Westermann)

Das dreistufige Reinigungsaggregat besteht aus einem Gummischieber, welcher die Gülle vom Spaltenboden abschiebt, aus mechanisch vorangetriebenen, flexiblen Räumsternen aus Kunststoff, um den Kot durch die Spalten hindurch zu drücken, sowie Hochdruckreinigungsdüsen, um den restlichen Kot und Harn von den Spalten zu spülen (siehe Abbildung 1). Die Arbeitsbreite beträgt 1,2 m. Der für die Nassreinigung benötigte Wassertank (Füllmenge 150 l) befindet sich über dem Reinigungsmodul. Die für die Reinigung der gesamten Versuchsfläche (95,2 m²) benötigte Wassermenge betrug ca. 1 l pro m². Die Fahrgeschwindigkeit im Stall während der Reinigung betrug $2,9 \pm 0,3$ km/h.

In der Vorentwicklung des Reinigungssystems wurde zunächst eine Variante entwickelt, bei der zwei Wasservorratsbehälter direkt über dem Reinigungsaggregat montiert wurden (s. Abbildung 2).



Abbildung 2: Erste Version des Reinigungsaggregats der Fa. Westermann am CM3 mit zwei Vorratsbehältern.

Nach ersten Erprobungen in der Vorentwicklung ab Juni 2008 wurde der zweite Behälter am Reinigungsaggregat weggelassen, da die mitgeführte Wassermenge eines Behälters für die zu reinigenden Laufflächen vollkommen ausreichend war. Außerdem wurden seitliche Leit- bzw. Schürfbleche (s. Abbildung 3) zur Einhaltung eines gleichmäßigen Abstands Spaltenboden/Reinigungsaggregat angebracht. In dieser Ausführung kam das Reinigungsaggregat im Versuch ab Juni 2009 zum Einsatz.



Abbildung 3: Reinigungsaggregat in der Version mit seitlichen Schürfblechen und Einzelbehälter zu Versuchsbeginn im Juni 2009.

2.2 Versuchsstall

Da für dieses Projekt kein geeigneter Versuchsstall in Trenthorst zur Verfügung stand, musste als erster Schritt ein privater Betrieb gefunden werden, welcher sich für die spezielle Versuchsanstellung eignet.

Kriterien für die Wahl des Versuchsbetriebs waren folgende:

- Vorhandensein eines praxisüblichen Spaltenbodens
- die Aufteilung des Stalls musste so gestaltet sein, dass die Durchführung einer Kontrollmessung unter denselben Bedingungen wie die Messung der gereinigten Spalten möglich ist
- die Entfernung des Betriebs zum Institut muss täglich zu bewältigen sein
- die Kooperation des Landwirts musste gewährleistet sein
- genügend Platz für einen Versuchscontainer vor Ort sollte vorhanden sein
- ein Betrieb mit biologischer Wirtschaftsweise war gewünscht

Ausgewählt wurde der Versuchsbetrieb:

Witten, Wegener GbR
(Ansprechpartner: Karsten Witten)
Hauptstr. 77
23898 Labenz

In dem frei gelüfteten Stall in Labenz sind 86 Kühe der Rasse Deutsche Holstein auf Spaltenboden und in Hochboxen mit Einstreu aus Stroh untergebracht. Von Ende April bis

Anfang Oktober 2009 und 2010 befanden sich die Tiere tagsüber auf den an den Stall angrenzenden Weiden.

Zweimal am Tag wurden die Tiere während des ganztägigen Stallaufenthalts zwischen Oktober und April mit einer TMR aus 38 kg Kleegrassilage, 38 kg Gersten-Ganzpflanzensilage, 4,5 kg Weizen- und Roggenschrot, 1 kg Lein-Expeller pro Kuh und Tag sowie Heu ad libitum gefüttert. Während die Tiere in der Weidesaison von April bis Oktober zusätzlich auf der Weide waren, wurde die Ration an Silage um 50 % und das Kraftfutter um ein Drittel gekürzt.

Die Temperatur und relative Luftfeuchte im Stall wurde während des gesamten Versuchszeitraums mittels zwei Datenloggern (Onset, Model U12-012, Cape Cod, MA, USA), welche 2,5 m über den Liegeboxen angebracht wurden, gemessen und aufgezeichnet. Die Mittelwerte wurden täglich über die 24 Stunden bevor Spalten aus dem Stall entnommen wurden berechnet, um einen eventuellen „Voreffekt“ der Stalltemperatur auf die Ammoniakemission unter kontrollierten Bedingungen zu erfassen.

2.3 Beprobung des Spaltenbodens

Um die Emissionen des Spaltenbodens in Messkammern messen zu können, mussten Teilstücke (62 cm x 50 cm x 20 cm) aus den ursprünglichen Spaltenbodenelementen (270 cm x 50 cm x 20 cm) herausgeschnitten werden (s. Abbildung 5). Die Fläche dieser Prüfelemente beträgt ca. 1,3 m². Für den Versuch wurden die 15-Jahre alten, schon im Stall vorhandenen und gebrauchten Spalten (R55-20, Firma Miesner, Heeslingen-Wertzen) zerschnitten und wieder eingesetzt (Abb. 2). Nach Abschluss des Versuchs wurden die zerschnittenen Versuchsspalten durch neue Spaltenbodenelemente der Firma Miesner ersetzt.

Um die zerschnittenen Spaltenelemente wieder sicher im Stall verlegen zu können wurde eine Stahlkonstruktion gefertigt, welche unter den Spalten liegend als Auflager diente (s. Abbildung 4).

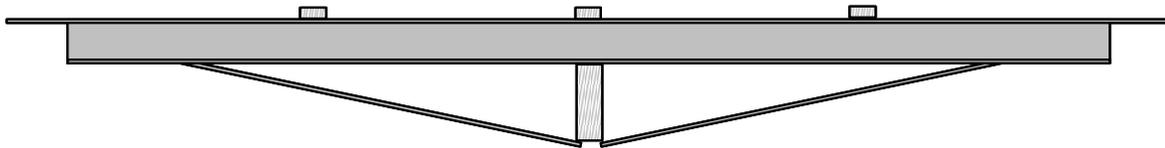


Abbildung 4: Auflager für die Versuchsspalten

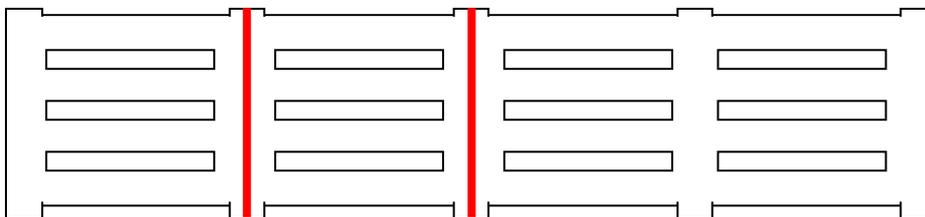


Abbildung 5: Lage der Beprobungsspalten als Ausschnitte der Spaltenelemente zwischen den roten Schnittmarkierungen zur Messung der Ammoniakemissionen

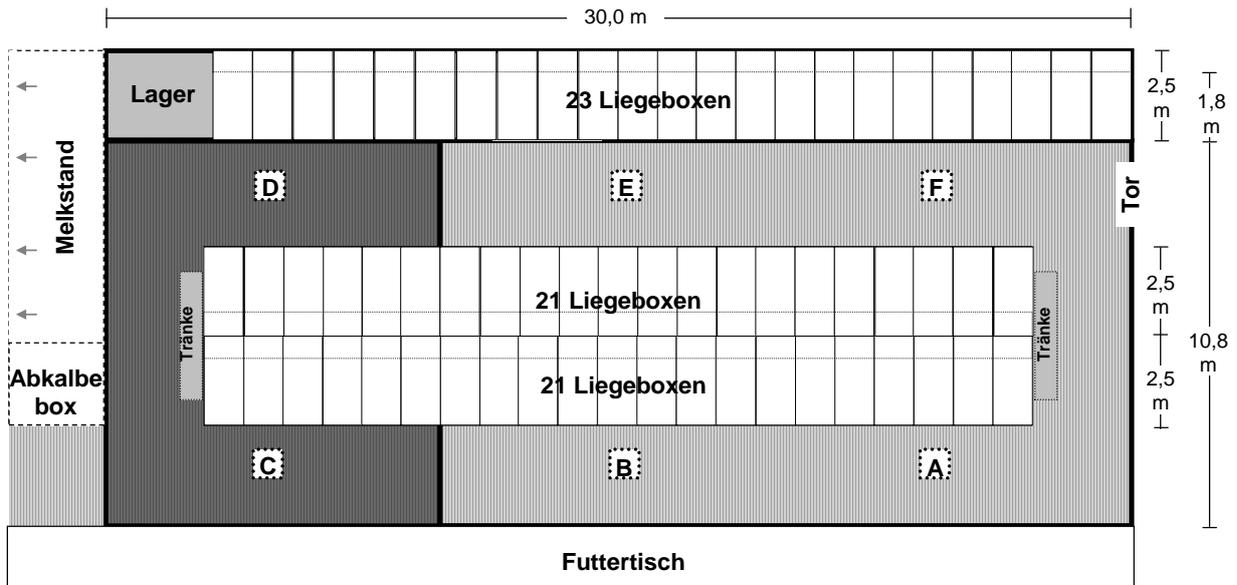


Abbildung 6: Stallskizze mit Lage der Spaltenelemente. Der weiß gestreifte Bereich stellt den gereinigten Teil des Stall dar, der grau gestreifte Bereich den unbehandelten Kontrollbereich. A-F: Testelemente

Dieses Auflager hinderte die einzelnen Teilelemente der geschnittenen Spalte auch daran zu verrutschen, wenn einzelne Teile herausgenommen werden. Insgesamt befanden sich sechs wechselbare Spaltenelemente im Stall (s. Abbildung 6). Drei im Laufbereich auf Seiten des Futtertisches (A-C) und drei im gegenüberliegenden Gang zwischen den Liegeboxen (D-F).



Abbildung 7: Prüfspalte mit Spaltenanker und Hängewaage

Um die Beprobungselemente sicher für die Messung aus dem Stall transportieren zu können wurde eine spezielle Hebevorrichtung entwickelt, die es erlaubt die Spalten mit einem Hoftrac einfach zu bewegen (s. Abbildung 7). Hinter diesen „Spaltenanker“ wurde zudem eine Hängewaage (Auflösung 50 g, KHW003, Firma Bosche, Damme) installiert, welche es ermöglichte, das Gewicht der Spalte (ca. 85 kg) und somit die Masse der anhaftenden und darauf befindlichen Gülle zu erfassen.

Die Untersuchung der Gülle- und Futterproben (s. Tabelle 1 und Tabelle 2) wurden vom Landwirtschaftlichen Labor Dr. Janssen GmbH in Gillersheim durchgeführt.

Tabelle 1: Nährstoffgehalte der Gülle aus Güllelager unterhalb des Spaltenbodens während des Versuchszeitraums 2010

	n =	pH	TS (%)	Ges.-N (kg/m ³)	NH ₄ ⁺ -N (kg/m ³)	
März	4	7,2 ± 0,2	7,4 ± 2,8	2,7 ± 0,7	0,9 ± 0,1	ganzt. Stallhalt.
April	2	7,1 ± 0,1	11,5 ± 1,3	3,7 ± 0,4	1,0 ± 0,2	ganzt. Stallhalt.
Mai	3	n.a.	8,0 ± 0,1	3,9 ± 0,2	1,7 ± 0,2	Weidesaison
Juni	2	n.a.	9,6 ± 2,3	4,7 ± 0,7	1,6 ± 0,3	Weidesaison
Juli	4	7,1 ± 0,05	9,4 ± 2,0	3,6 ± 0,4	1,3 ± 0,2	Weidesaison
August	3	6,9 ± 0,1	10,2 ± 1,1	4,1 ± 0,8	1,1 ± 0,1	Weidesaison
Oktober	3	7,1 ± 0,1	8,8 ± 1,6	3,3 ± 0,1	1,1 ± 0,2	ganzt. Stallhalt.
November	3	7,2 ± 0,1	9,5 ± 0,5	3,6 ± 0,1	1,3 ± 0,1	ganzt. Stallhalt.

Tabelle 2: Inhaltsstoffe der TMR während des Versuchszeitraums 2010

	n =	TS (%)	Rohprotein (g/kg TM)	nxP (g/kg TM)	
März	4	34,4 ± 2,0	149,3 ± 11,4	158,5 ± 4,3	ganzt. Stallhalt.
April	2	34,8 ± 0,6	146,8 ± 26,8	139,4 ± 4,3	ganzt. Stallhalt.
Mai	4	35,5 ± 0,8	188,5 ± 5,3	150,0 ± 0,6	Weidesaison
Juni	1	35,5	204,5	153,8	Weidesaison
Juli	4	32,0 ± 1,0	147,1 ± 15,7	132,0 ± 11,9	Weidesaison
August	3	32,1 ± 1,5	120,1 ± 9,6	114,0 ± 9,2	Weidesaison
Oktober	3	32,8 ± 0,9	139,3 ± 2,7	151,5 ± 2,4	ganzt. Stallhalt.
November	3	36,0 ± 3,3	147,1 ± 3,8	143,4 ± 5,0	ganzt. Stallhalt.

Tabelle 3: Milchproben während des Versuchszeitraums 2010

	n =	Fett (%)	Protein (%)	Harnstoff (mg/l)	
März	6	4,2 ± 0,1	3,1 ± 0,03	150,8 ± 27,8	ganzt. Stallhalt.
April	6	4,0 ± 0,1	3,1 ± 0,1	203,8 ± 50,9	ganzt. Stallhalt.
Mai	6	3,8 ± 0,1	3,1 ± 0,1	268,7 ± 31,1	Weidesaison
Juni	6	3,7 ± 0,1	3,1 ± 0,02	265,2 ± 39,6	Weidesaison
Juli	5	3,6 ± 0,1	3,0 ± 0,1	213,0 ± 28,8	Weidesaison
August	6	4,0 ± 0,1	3,2 ± 0,1	184,0 ± 29,6	Weidesaison
Oktober	6	4,2 ± 0,1	3,3 ± 0,1	235,8 ± 47,0	ganzt. Stallhalt.
November	6	4,0 ± 0,1	3,1 ± 0,04	231,8 ± 11,8	ganzt. Stallhalt.

2.3.1 Versuchsphase 1 (2009)

Um die Ammoniakemissionen von dem gereinigten Spaltenboden mit Emissionen von unbehandelten Flächen vergleichen zu können, wurden Kontrollmessungen in zwei verschiedenen Varianten durchgeführt.

Tabelle 4: Kontrollvarianten in Versuchsphase 1

Datum	Zeit zw. Reinigung und Messung (h)	Kontrollvariante	Messungen gereinigte Spalten	Kontrollmessungen
21.08.09 - 02.09.09	0	1	n= 12	n= 6
04.09.09 - 14.09.09	2	1	n= 12	n= 6
13.10.09 - 23.10.09	0	2	n= 12	n= 6

Kontrollvariante 1:

- Reinigung des ganzen Stalls für 4 Messwiederholungen (je 3 Spalten)
- 2 Kontrollmessungen ohne Reinigung (je 3 Spalten)

Kontrollvariante 2:

- Reinigung $\frac{3}{4}$ des Stalls, 6 Messwiederholungen (je 2 Spalten)
- zeitlich parallele Kontrollmessung in $\frac{1}{4}$ des Stalls (je 1 Spalte)

Bei der Kontrollvariante 1 wurde der gesamte Beprobungsbereich des Stalls mit dem Cleanmeleon 3 für jeweils zwei aufeinander folgende Messsequenzen (vier Tage) gereinigt. Danach wurde der Stall für zwei aufeinander folgende Tage nicht gereinigt und Kontrollmessungen der ungereinigten Spaltenelemente (eine Messsequenz) wurde durchgeführt. Dieses Schema wurde wiederholt, um vier Messungen von jeweils drei gereinigten Spaltenelementen und zwei Messungen von jeweils drei Kontrollspaltenelementen zu erhalten.

In der Kontrollvariante 2 wurden nur Dreiviertel des Beprobungsbereichs mit vier Testelementen (A, B, E, und F) täglich gereinigt und ein Drittel des Stallbereichs als Kontrollbereich mit zwei Testspaltenelementen (C und D) unbehandelt gelassen (siehe (s. Abbildung 6). Jeden zweiten Tag wurden mit sechsfacher Wiederholung je zwei gereinigte Spalten und eine Kontrollspalte beprobt.

Während des Versuchs wurden drei Messsequenzen durchgeführt. Die erste beinhaltete Kontrollvariante 1 und Messungen direkt nach der Reinigung. Während der zweiten Sequenz wurden die Spalten zwei Stunden nach der Reinigung beprobt. Die dritte Sequenz wurde mit der Kontrollvariante 2 durchgeführt, wobei die Ammoniakemissionen von den Spalten wieder direkt nach der Reinigung gemessen wurden.

Die Spaltenelemente wurden vor jeder Messung mit der Kranwaage gewogen, um die Menge Gülle auf den Spalten zu erfassen. Mit einem Metallspachtel wurde vor jeder Messung der an den geschnittenen Seitenrändern anhaftende Kot jeder Spalte entfernt, um Verfälschungen der Kotmenge durch variabel große Abstände zwischen den Beprobungselementen und den festen Spaltenbodenelementen zu vermeiden.

2.3.2 Versuchsphase 2 (2010)

In der zweiten Versuchsphase in 2010 wurde ein fester Kontrollbereich (ein Drittel des Stalls mit Spalten C und D) bestimmt, welcher zu keiner Zeit gereinigt wurde. Zwei Drittel des Stalls wurden als „Reinigungsbereich“ (Spalten A, B, E und F) täglich während des Versuchzeitraums mit dem Cleanmeleon 3 gereinigt. Dies wurde festgelegt, um nachhaltige Reinigungseffekte im gereinigten Bereich zu erfassen und um zeitliche „Verschleppungseffekte“ aus dem Kontrollbereich zu vermeiden.

Messungen wurden während zwei verschiedenen Saisons durchgeführt. Während der „Winterperiode“, wenn die Tiere den ganzen Tag im Stall verbrachten und in der „Sommerperiode“ wenn die Tier tagsüber von 7:30 bis 16:30 auf der Weide waren.

Zudem wurden Messungen direkt, zwei Stunden, vier Stunden und sechs Stunden nach der Reinigung durchgeführt. Damit sollte die Nachhaltigkeit der Reinigung auf die Ammoniakemissionen ermittelt werden. Pro Versuchswoche wurde jeweils eine zeitliche Variante durchgeführt, indem die „nach-0-Stunden-Messung“ Montags, die „nach-2-Stunden-Messung“ Dienstags, die „nach-4-Stunden-Messung“ Mittwochs und die „nach-6-Stunden-Messung“ Donnerstags durchgeführt wurden (Ausnahme: 13. -16.11.10, nur „nach-0-Stunden-Messungen“). Diese Schema stellte die zeitlich am günstigsten durchzuführende Methode dar.

Pro Messtag wurden zwei gereinigte und zwei nicht gereinigte Kontrollspalten beprobt.

Zudem wurden die gereinigten Spaltenelemente immer direkt vor und direkt nach der Reinigung sowie direkt vor der Ammoniakmessung mit der Hängewaage gewogen. Somit konnte der direkte mechanische Reinigungseffekt der Spalten durch das Reinigungsgerät

erfasst werden. Auch hier wurde der den Schnittflächen der Beprobungselemente anhaftende Kot mit einem Metallspachtel vor jeder Messung entfernt.

Tabelle 5: Messzeiträume der Versuchsphase 2

Saison	Zeitpunkt Messung nach Reinigung	Messzeitraum	ca. Uhrzeit Messung	n =
Weidegang	0 Std	10.05.10 – 31.05.10; 28.06.10 – 16.08.10	9:30	24
	2 Std	11.05.10 – 01.06.10; 29.06.10 – 17.08.10	11:30	24
	4 Std	12.05.10 – 02.06.10; 30.06.10 – 18.08.10	13:30	24
	6 Std	13.05.10 – 03.06.10; 01.07.10 – 19.08.10	15:30	20
ganztägige Stallhaltung	0 Std	09.03.10 – 12.04.10; 01.11.10 – 16.11.10	9:30	24
	2 Std	10.03.10 – 13.04.10; 02.11.10 – 09.11.10	11:30	16
	4 Std	11.03.10 – 14.04.10; 03.11.10 – 10.11.10	13:30	16
	6 Std	18.03.10 – 15.04.10; 04.11.10 – 11.11.10	15:30	14

Zusätzlich zu den gravimetrischen und den Emissionsmessungen wurden in 2010 an jedem Messtag Messungen der Konsistenz des Kots auf den Spalten durchgeführt, um einen potentiellen Zusammenhang zwischen Verschmutzungsgrad und Viskosität des Kots zu untersuchen. Hierzu wurde nach Pfadler (1981) eine Messung des Durchmessers eines künstlich erzeugten Kotfladens vorgenommen. Eine Sammelprobe des Kots von den Spalten wurde dazu in einen oben und unten offenen, kegelförmigen Behälter (oberer Durchmesser: 13 cm, unterer Durchmesser: 20 cm, Höhe: 20 cm) gegeben und damit ein Fladen auf einem Messtisch produziert (70 cm x 70 cm). Dieser Tisch konnte um 4 cm angehoben und wieder fallen gelassen werden. Diese „Rütteln“ wurde 15-mal wiederholt um eine gleichmäßige Verteilung zu gewährleisten (s. Abbildung 8)



Abbildung 8: Kotfladen zur Ermittlung der Konsistenz

Durch einen Vergleich der gemessenen Durchmesserwerte mit der kategorisierten Tabelle nach (Trampller, 2002) wurde das Schema (Tabelle 6) erstellt, wonach eine Klassifizierung der Kotkonsistenz auf den Spalten mit einer Note von 1 bis 5 durchgeführt werden konnte.

Tabelle 6: Messung der Kotkonsistenz (Trampller, 2002) und (Pfadler, 1981)

Note	Durchmesser Kotfladen <i>geändert nach (Pfadler, 1981)</i>	<i>Kotkonsistenz kategorisiert nach (Trampller, 2002)</i>
1	≥ 35 cm	sehr flüssig, dünn. „Erbsensuppe“, Kotpfütze, keine Ringe oder Grübchen, in bogenförmigem Strahl abgesetzt
2	32,0 - 34,5 cm	dünnbreig, verläuft weniger als 2,5 cm hoch, Ringe
3	29,0 - 31,5 cm	mittellbreig, „Haferbrei“, 3 bis 4 cm hoch, Ringe, Grübchen, klebt an Stiefelspitze
4	26,0 - 28,5 cm	dick, klebt nicht, 5 bis 8 cm hoch, keine Ringe, Grübchen
5	$\leq 25,5$ cm	feste Kotballen/-scheiben, über 8 cm hoch

2.4 Reinigung des Spaltenbodens

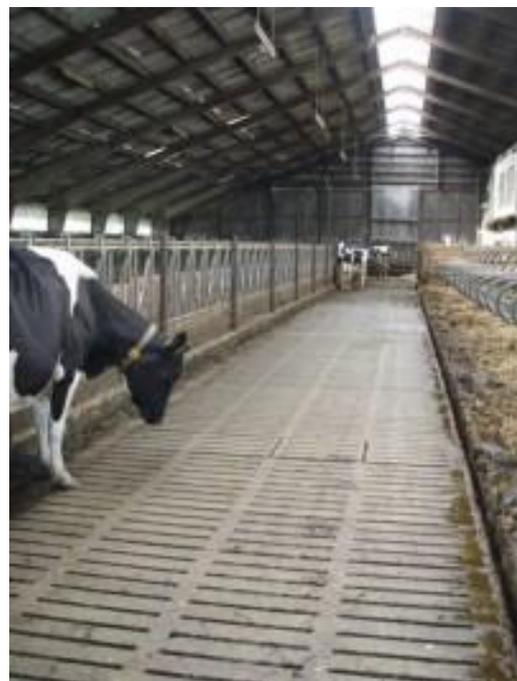


Abbildung 9: Reinigungsgerät (links oben) Entnahme des Probe-Spaltenelements (rechts oben) feuchter Spaltenboden direkt nach der Reinigung (links unten) und abgetrockneter Spalten nach der Reinigung

Abbildung 9 zeigt die unterschiedlichen Phasen der Spaltenbodenreinigung während der Versuchsabschnitte. Zunächst wurden die zu reinigenden Stallabschnitte mit dem Reinigungsgerät gleichmäßig gereinigt und danach in einem zweiten Schritt die zu beprobenden Elemente entnommen und gegen Wechselemente ausgetauscht. Direkt nach der Reinigung ist die Lauffläche noch feucht, trocknet aber je nach Witterung entsprechend schnell ab.

3 Messung der Ammoniakkonzentration

3.1 Aufbau Messkammern

Der Versuchscontainer (6,0 m x 2,4 m x 2,6 m) zur Messung der Ammoniakemissionen unter kontrollierten Bedingungen wurde unmittelbar neben dem Stall installiert. Eine Klimaanlage sorgte für eine Temperatur von $20 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ in den Messkammern während den Messungen.

3.1.1 Versuchsphase 1 (2009)

In der ersten Versuchsphase 2009 wurden vier luftdichte PE-Messkammern (120 cm x 80 cm x 60 cm) in Betrieb genommen. Die Kammern waren mit einem Acryldeckel (verstärkt durch einen Holzrahmen) abgedeckt und durch Spanngurte gesichert. Jeweils eine der Kammern diente bei den Messungen (in rotierender Reihenfolge) als Blindmessung, um zu überprüfen, dass das Material kein Ammoniak emittiert, welches die Messergebnisse verfälschen könnte. In diesen Blindkisten wurden Werte von ca. $0,01 \text{ mg NH}_3 \text{ h}^{-1}$ gemessen, was zu vernachlässigen ist.

Darüber hinaus wies jede Kiste am Lufteingang eine Gaswaschflasche auf, um als „Falle“ den Ammoniak aus der Umgebungsluft abzufangen. Dies führte jedoch zu relativen Luftfeuchten von bis zu 100 % in den Messkammern und wurde im darauf folgenden Versuchsjahr 2010 nicht wiederholt.

3.1.2 Versuchsphase 2 (2010)

In der zweiten Versuchsphase in 2010 wurde auf die Blindprobe verzichtet, um vier Messkammern für die eigentlichen Emissionsmessungen zur Verfügung zu haben. Da die Eingangsfläche am Lufteingang der Messkammer nicht mehr eingesetzt wurde, wurde mit einer einzelnen Gaswaschflasche die Ammoniakkonzentration in der Umgebungsluft des Versuchscontainers gemessen und später rechnerisch von den Messwerten aus den Messkammern subtrahiert. Die relative Luftfeuchte in den Messkammern konnte durch das direkte Ansaugen der Umgebungsluft auf ca. 80 % reduziert werden.

3.1.3 Strömungsversuch

Die Messkammern (Volumen 335 l) werden mit einer Durchflussrate von ca. 12 l/min durchströmt. Dies bedingt einen Luftaustausch innerhalb Kiste von 2,1-mal pro Stunde.

Um den Luftfluss innerhalb der Kammern zu bestimmen, wurden Windgeschwindigkeit-Messungen durchgeführt. Die Messungen fanden in drei verschiedenen Höhen mit einer Versuchsspalte in der Messkammer statt. Auf einer Höhe von 3 cm über dem Messkammerboden (unterhalb der Spalte), in 17,5 cm (mittlere Höhe von der Versuchsspalte) und in einer Höhe von 25 cm über dem Messkammerboden, oberhalb der Versuchsspalte. In diesen drei Höhen wurden alle 20 cm in drei parallelen Reihen sowie am Luftein- und -ausgang die Windgeschwindigkeit mit einem thermischen Anemometer (Airflow, Model TA-5, Rheinbach, Germany) in drei Wiederholungen gemessen. Hierzu wurde ein Acrylglas-Deckel mit passenden Löchern für den Anemometer in den entsprechenden Positionen versehen und mit Gummistopfen luftdicht verschlossen. Die Messungen wurden bei laufender Membranpumpe durchgeführt.

Die Werte innerhalb der Kammer sollten eine Windgeschwindigkeit von ca. 0,8 m/s, welche in dem natürlich gelüfteten Versuchsstall in Bodennähe gemessen wurden, nicht überschreiten.

Die Luftgeschwindigkeit innerhalb der Messkammer ist in Abbildung 10 dargestellt. Die Grafik zeigt die gemittelten Werte der Windgeschwindigkeit längs der Messkammer. Das Spaltenelement unterhalb der Grafik zeigt an, in welcher Position sie sich während der Messung in der Messkammer befindet.

Die höchsten Flussraten finden sich direkt oberhalb der Spalte (bis zu 0,12 m/s), mittig in der Messkammer sowie an dem Luftein- (0,24 m/s) und -ausgang (0,36 m/s). Diese Werte sind niedriger, als die im Stall gemessenen.

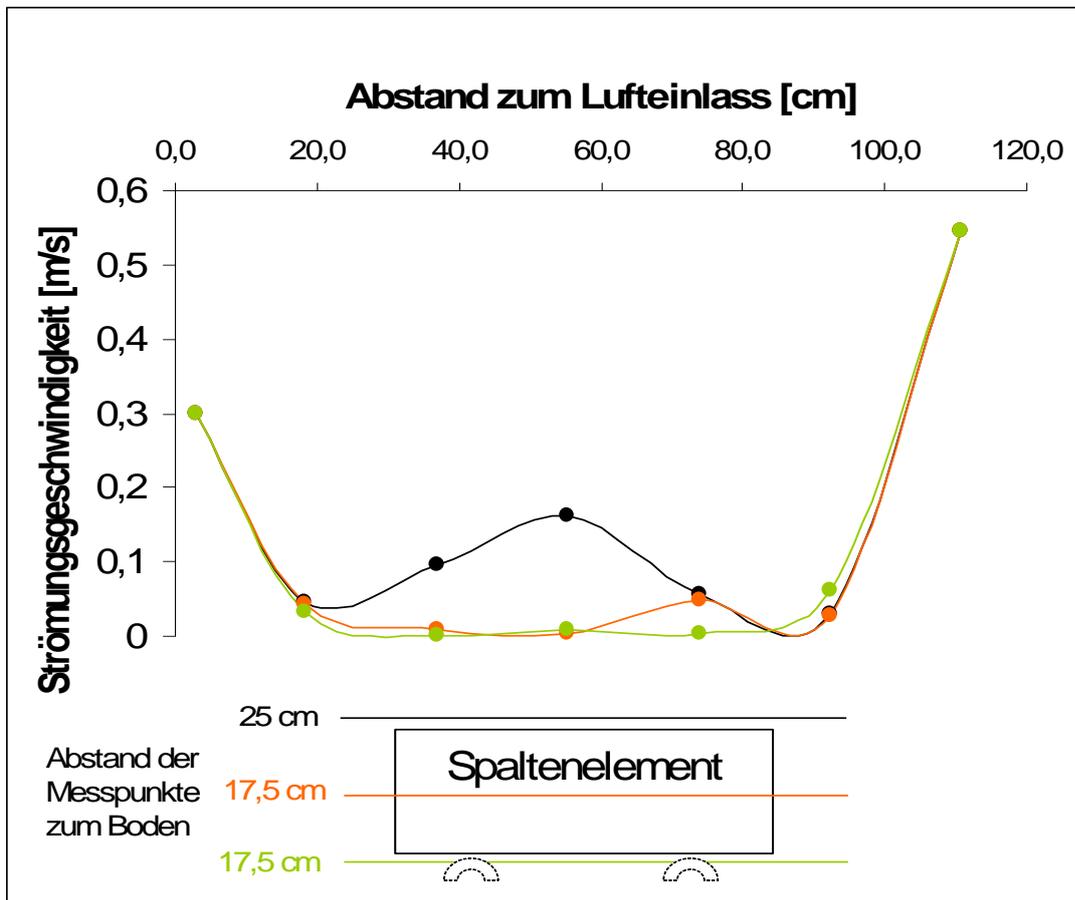


Abbildung 10: Luftgeschwindigkeit in einer Messkammer für drei verschiedene Ebenen



Abbildung 11: Messkammer mit Beprobungsspalten und Klarsichtabdeckung

3.2 Nasschemische Analyse

Um den von den Spalten emittierten Ammoniak in den Kisten zu messen, wurde mittels Membranpumpen (Iwaki, Model APN-085LVX1-E4, Tokyo, Japan) die ammoniakhaltige Luft aus den Kisten durch zwei in Serie geschaltete Gaswaschflaschen (Volumen: 500 ml) hindurch geleitet. Diese Flaschen waren mit 250 mg Schwefelsäure (0,1n) gefüllt. Der hindurchgeleitete Ammoniak reagiert mit der Schwefelsäure zu Ammoniumsulfat, was in einem sauren Milieu sehr stabil ist.

Das Gewicht der Säure wurde vor und nach der Messung mit einer Laborwaage (Sartorius, Göttingen, Deutschland) erfasst um eventuelle Verdunstungen und die exakte Endmenge der Säure zu erfassen. Die in Strömungsrichtung hinten gelegene Waschflasche weiß zudem eine Fritte auf, um sicher zu gehen, dass die gesamte Menge des Ammoniaks mit der Säure reagiert.

Mit Trommelgaszählern (Ritter, Model TG5, PVC, Bochum, Deutschland) wurde das Luftvolumen der gesaugten Luft bestimmt (s. Abbildung 12).

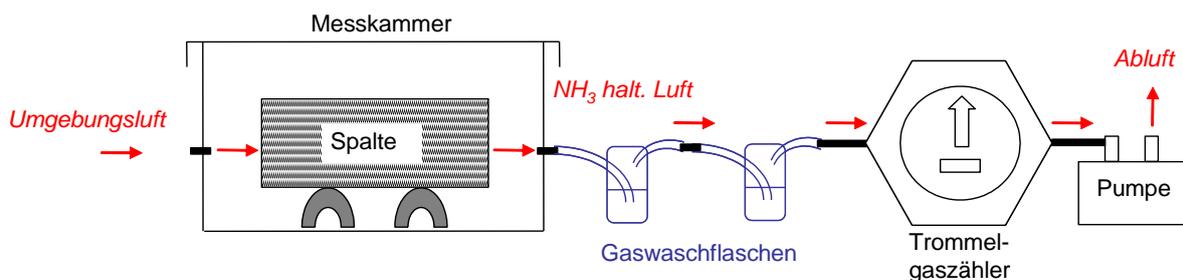


Abbildung 12: Schema des Ammoniakbestimmung (nasschemisch) im klimatisierten Versuchscontainer



Abbildung 13: Segment Flow Analyzer zur Bestimmung der Ammoniakkonzentration (Labor des Instituts für Agrarrelevante Klimaforschung des vTI)

Nach einer Messdauer von 24 Stunden wurden die Ammoniakproben in 100 ml PE-Flaschen abgefüllt und umgehend gekühlt. Die Konzentration des Ammoniaks, welches nach dem Hindurchleiten durch die Säure als Ammoniumsulfat vorliegt, wurde im Labor des Instituts für agrarrelevante Klimaforschung photometrisch bestimmt. Dies Messung erfolgt mit einem Segment Flow Analyzer (Skalar, Model San⁺⁺, Breda, The Netherlands; s. Abbildung 13). Basierend auf eine Modifikation der „Berthelot-Reaktion“ wird die Lichtabsorption des Farbstoffs Indophenol bei einer Wellenlänge von 660 nm gemessen. Die Intensität der Absorption ist proportional zur Konzentration des Ammoniaks in der Säurelösung.

Berechnung der Emissionen:

Die Menge des Ammoniaks in den Flaschen wurde durch die photometrisch bestimmte Konzentration des Ammoniumsulfats und das nach der 24 Stunden-Messung finale Volumen der Schwefelsäure in den Flaschen bestimmt (Gleichung 1). Die Ammoniakemission von den Spalten in $\text{mg NH}_3 \text{ h}^{-1} \text{ m}^{-2}$ wurde in Anhängigkeit der Gesamtoberfläche der Spaltenelemente und der Zeit der Messung in Stunden ermittelt (Gleichung 2). Die im Folgenden angegebenen Werte sind somit Durchschnittswerte der Emissionen über 24 Stunden.

$$m_{\text{NH}_3;\text{b}1,2} = c_{\text{NH}_4^+} \times \frac{m_{\text{H}_2\text{SO}_4}}{\rho_{\text{H}_2\text{SO}_4}} \times \frac{M_{\text{NH}_3}}{M_{\text{NH}_4^+}} \quad (\text{Gleichung 1})$$

$$m_{\text{NH}_3;\text{sl}} = \frac{(m_{\text{NH}_3;\text{b}1} + m_{\text{NH}_3;\text{b}2})}{A_{\text{sl}} \times t} \quad (\text{Gleichung 2})$$

Wobei:

$m_{\text{NH}_3;\text{b}1,2}$ = Menge NH_3 in Flasche 1 und 2 (mg)

$c_{\text{NH}_4^+}$ = NH_3 -Konzentration in den Flaschen (mg/l), mittels Photometrie bestimmt

$m_{\text{H}_2\text{SO}_4}$ = Gewicht H_2SO_4 (kg)

$\rho_{\text{H}_2\text{SO}_4}$ = Dichte H_2SO_4 (kg/l)

M_{NH_3} = molekulare Masse NH_3 (mol/l)

$M_{\text{NH}_4^+}$ = molekulare Masse NH_4^+ (mol/l)

$m_{\text{NH}_3;\text{sl}}$ = Menge NH_3 von den Spalten emittiert ($\text{mg NH}_3 \text{ h}^{-1} \text{ m}^{-2}$)

A_{sl} = Oberfläche der Spaltenelemente (m^2)

t = Zeit (h)

4 Beurteilung der Reinigungswirkung

4.1 Emissionsverhalten des Betonbodens

4.1.1 Ammoniakemissionen des Spaltenbodenbetons

Für die Beurteilung der Ammoniakemissionen von den Spaltenböden ist es wichtig zu wissen, welcher Anteil des emittierten Ammoniaks direkt von Kot und Harn verursacht wird, und welcher Teil von dem Spaltenbodenmaterial selber generiert wird. Bei Betonspalten ist nach 15-jähriger Benutzung von einem gewissen Teil Eigenemission auszugehen.

Aus diesem Grund wurden in drei Wiederholungen jeweils drei Spaltenelemente verschmutzt aus dem Stall entnommen und mit einem Hochdruckreiniger komplett gereinigt. Danach wurden sie für 1 min in einen 400l-Behälter mit Wasser getaucht um eine komplette und gleichmäßige Benetzung der Betonspaltenoberfläche zu gewährleisten. Nach einer Abtropfungsphase von einer weiteren Minute außerhalb des Wasserbeckens wurden die Ammoniakemissionen der Spaltenelemente in nassem Zustand über 24 Stunden in den Messkammern ermittelt. Nach dieser Messphase wurden die Spaltenelemente über 48 Stunden bei 20 °C Raumtemperatur getrocknet und erneut die Ammoniakemissionen der trockenen Spalten ermittelt.

Tabelle 7 gibt die gemittelten Werte der Ammoniakemission von hochdruckgereinigten nassen und trockenen Spalten an.

Tabelle 7: Ammoniakemissionen der gebrauchten Betonspaltenböden

Beton	mg NH ₃ h ⁻¹ m ⁻²	Stabw
nass	1,58	± 0,17
trocken	0,38	± 0,13

4.1.2 10-Tage Langzeitmessung

Zur Ermittlung der optimalen Messdauer für die Ammoniakemissionen von den Spaltenelementen in den Messkammern, wurde eine Dauermessung über zehn Tage durchgeführt. Hierzu wurden drei verschmutzte Spalten in den Messkammern beprobt und alle 12 Stunden neue Gaswaschflaschen an die Kammern angeschlossen. Abbildung 14 zeigt den mittleren zeitlichen Verlauf der Ammoniakemissionen der Versuchsspalten. Nach 24 Stunden verringern sich die Emissionen bereits deutlich.

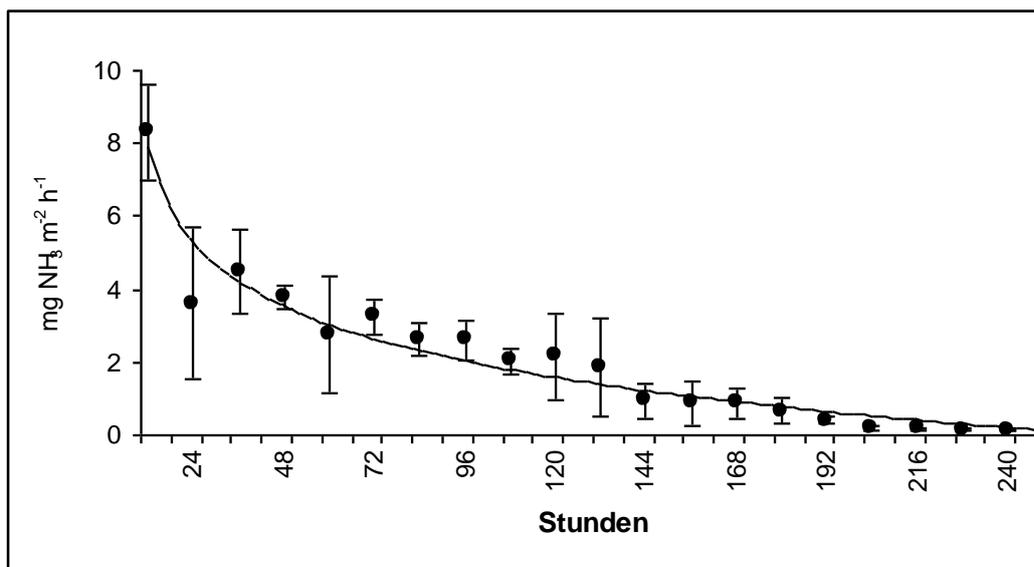


Abbildung 14: Langzeitmessung der Ammoniakemissionen über 10 Tage

Daraus wurde geschlossen, dass eine Messdauer von 24 Stunden den Großteil des von Spalten emittierten Ammoniaks erfasst. Diese Zeitspanne fand auch in anderen Untersuchungen Anwendung (s. a. Elzing and Monteny, 1997b; Ndegwa et al., 2009).

4.2 Versuchsphase 1 (2009)

Tabelle 8 zeigt die Ergebnisse der Ammoniakmessungen von den Spaltenböden in Versuchsphase 1. Die höchsten Ammoniakwerte ($16,3 \pm 4,0 \text{ mg NH}_3 \text{ h}^{-1} \text{ m}^{-2}$) finden sich bei den Kontrollmessungen, direkt nach der Reinigung, wenn die Temperaturen ($21,2 \text{ C}$) am höchsten sind. Der beste Reinigungseffekt ($- 38,1 \%$) wurde direkt nach der Reinigung bei niedrigen Temperaturen im Stall ($8,6 \text{ °C}$) gefunden.

Im Vergleich von Kontrollvariante 1 (zeitliche Trennung von Kontrollmessung und Messung der gereinigten Spalten) zu Kontrollvariante 2 (räumliche Trennung von Kontrollmessung und Messung der gereinigten Spalten) ergibt sich bei der Kontrollvariante 2 mit dem festgelegten Kontrollbereich im Stall ein besserer Reinigungseffekt. Dies deutet auf einen nachhaltigen Effekt der Reinigungswirkung hin. Aus diesem Grund wurde diese Kontrollvariante für die weiteren Messungen in 2010 übernommen und die Reinigung der Versuchspalten im Versuchszeitraum täglich durchgeführt.

Tabelle 8: Ammoniakemissionen der Spaltenbodenelemente in drei Messsequenzen

Datum der Messung	Zeitp. Messung nach Reinigung (Std) und Kontrollvariante	NH ₃ -Emission, adj.Mittel (mg NH ₃ h ⁻¹ m ⁻²)		Reinigungseffekt in %	Mittlere Temperatur im Stall 24 Std. vor der Messung (°C)
		gereinigt	Kontrolle		
21.08.-02.09.	0, Var. 1	$13,3 \pm 2,2$	$16,3 \pm 4,0$	n.s. - 18,9	21,1
04.09.-14.09.	2, Var. 1	$13,7 \pm 1,3$	$11,2 \pm 1,9$	n.s. + 18,5	17,4
13.10.-23.10.	0, Var. 2	$8,8 \pm 2,1$	$14,2 \pm 3,4$	n.s. - 38,1	8,6

Tabelle 9: Güllemenge auf den Spaltenelementen (* = $p \leq 0,05$)

Zeitpunkt Messung nach d. Reinigung in Std	Menge Gülle auf Spalten, adj.Mittel (kg)			Reinigungseffekt in %
	gereinigt	Kontrolle		
0	2,2 ± 0,1	3,2 ± 0,1	*	- 29,6
2	2,7 ± 0,2	2,8 ± 0,3	n.s.	- 2,4
0	1,5 ± 0,1	2,2 ± 0,2	*	- 33,2

* signifikant für $P < 0,05$

Die gravimetrischen Untersuchungen der Menge Gülle auf den Spalten bestätigen die Tendenz der Ergebnisse der Ammoniakemissionen. Direkt nach der Reinigung ergibt sich bei Kontrollvariante 2 ein mechanischer Reinigungseffekt von -33,2 %. Bei den Messungen zwei Stunden nach der Reinigung findet sich dieser Effekt bei einer Wirkung von -2,4 % nicht mehr.

Bei einem Vergleich der Ammoniakemissionen und den gravimetrischen Messungen Gülle auf den Flächen zeigt sich, dass bei einer höheren Menge Gülle auf den Flächen auch eine höhere Ammoniakemission von den Spalten zu finden ist. Zwar gibt eine Regressionsanalyse nur eine Signifikanz von $p = 0,138$, zeigt jedoch eine deutliche Tendenz.

4.3 Versuchsphase 2 (2010)

4.3.1 Messung zu unterschiedlichen Zeitpunkten nach der Reinigung

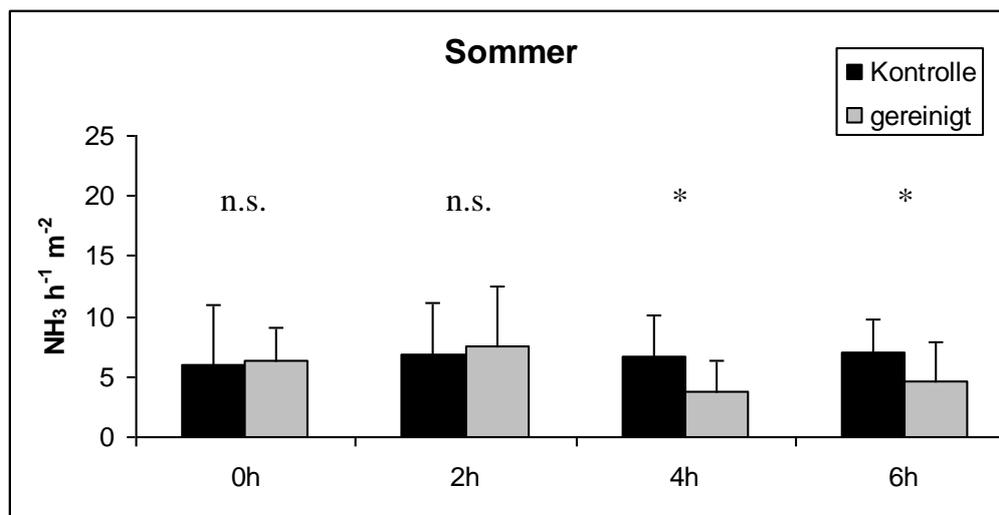


Abbildung 15: Ammoniakemissionen der Beprobungsspalten während der Weidesaison (* = $p \leq 0,05$)

4.3.1.1 Ammoniakemissionen

Die Ammoniakemissionen während der Weidesaison

(siehe Abbildung 15) liegen zwischen 3,8 mg NH₃ h⁻¹ m⁻² (gereinigt, vier Stunden nach der Reinigung) und 7,5 mg NH₃ h⁻¹ m⁻² (gereinigt, zwei Stunden nach der Reinigung), wobei die Kontrollmessungen zwischen 6,0 mg NH₃ h⁻¹ m⁻² (direkt nach der Reinigung) und 7,0 mg NH₃ h⁻¹ m⁻² (sechs Stunden nach der Reinigung). Ein statistisch signifikanter Unterschied zwischen den gereinigten Flächen und den Kontrollspalten ergibt sich jedoch erst nach 4 Stunden. Tabelle 10 gibt die Differenz der Ammoniakemissionen von den gereinigten und

von den nicht behandelten Kontrollspalten in Prozent an. Auch hier zeigt sich ein positiver Reinigungseffekt von -43,8 % bzw. -32,7 % erst nach vier bzw. nach sechs Stunden.

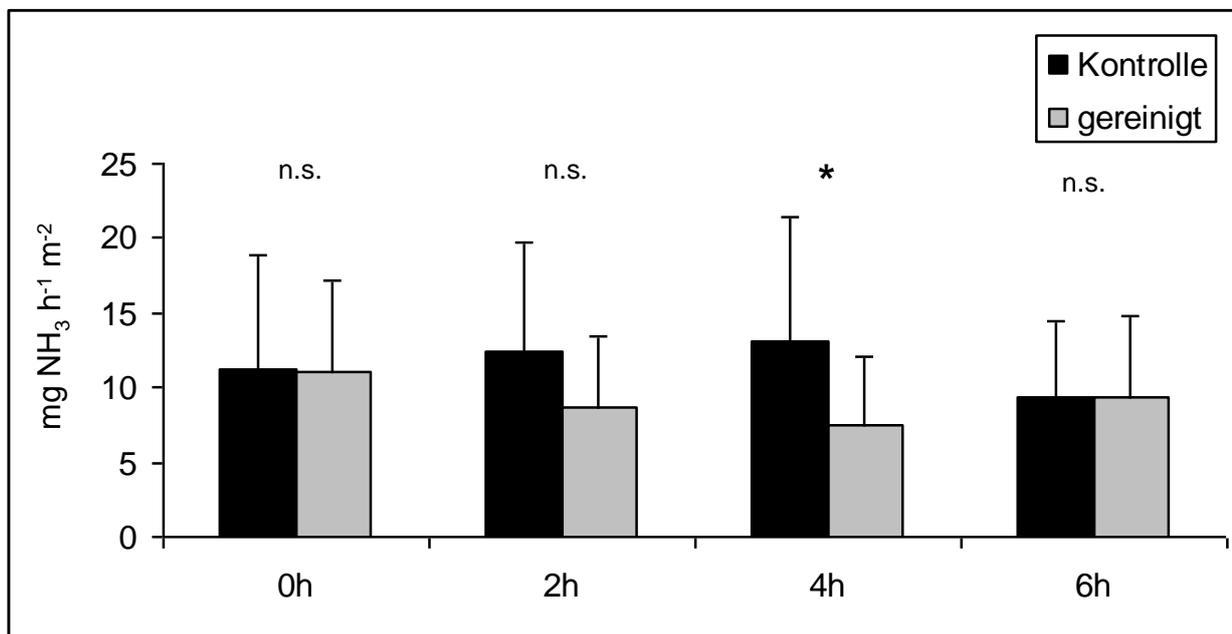


Abbildung 16: Ammoniakemissionen der Beprobungsspalten während der ganztägigen Stallhaltung (* = $p \leq 0,05$)

Bei den Emissionsmessungen während der Winterperiode, wenn die Tiere sich den ganzen Tag im Stall aufhalten erhalten wir Messwerte zwischen $7,5 \text{ mg NH}_3 \text{ h}^{-1} \text{ m}^{-2}$ (gereinigt, Messung vier Stunden nach Reinigung) und $13,1 \text{ mg NH}_3 \text{ h}^{-1} \text{ m}^{-2}$ (Kontrollmessung, vier Stunden nach der Reinigung). Die Ammoniakwerte von den Kontrollflächen befinden sich im Bereich von $9,3 \text{ mg NH}_3 \text{ h}^{-1} \text{ m}^{-2}$ (sechs Stunden nach der Reinigung) und $13,1 \text{ mg NH}_3 \text{ h}^{-1} \text{ m}^{-2}$ (vier Stunden nach der Reinigung).

Auch bei diesen Messungen während der Winterperiode setzt ein Reinigungseffekt erst nach vier Stunden ein. Allerdings ist dieser nach sechs Stunden nicht mehr gegeben, da die Tiere im Stall die Flächen kontinuierlich wieder verschmutzen (s. Abbildung 16).

Tabelle 10 zeigt eine prozentuale Reinigungswirkung von -42,5 % vier Stunden nach der Reinigung, welche nach sechs Stunden mit +0,6 % nicht mehr gegeben ist.

Ein Grund für diesen „verspäteten Reinigungseffekt“ kann das zusätzliche Wasser sein, welches nach der Reinigung noch an den Spalten haftet. Ammoniak, welches in Wasser leicht löslich ist verdunstet mit dem Wasser während des Abtrocknungsprozesses und wird somit erst nach und nach abgegeben (Hamelin et al., 2010).

Auch führt der Reinigungsprozess durch das Überfahren des Spaltenbodens und das Abschieben der Gülle zu einer besseren Vermischung von Kot und der Harnlachen. Diese Vermischung begünstigt die Hydrolyse von Harnstoff (aus dem Harn) mit dem Enzym Urease (aus dem Kot) zu Ammoniak und Kohlenstoffdioxid (Muck 1982), weswegen es direkt nach der Reinigung eine Überlagerung von Emissionsreduktion mit verstärkter Ureaseaktivität kommen kann.

Tabelle 10: Vergleich Kontrollspalten und gereinigte Spalten

Saison	Zeitpunkt Messung nach Reinigung	Reinigungswirkung auf NH ₃ -Emissionen von Spalten (%)	Mechanische Reinigungswirkung auf Menge Kot auf Spalten (%)
Weidegang	0 Std	+ 6,1	- 35,3
	2 Std	+ 9,7	- 11,7
	4 Std	- 43,8	- 54,9
	6 Std	- 32,7	- 15,2
ganztägige Stallhaltung	0 Std	- 1,8	- 32,7
	2 Std	- 29,6	- 1,1
	4 Std	-42,5	- 28,8
	6 Std	+ 0,6	- 5,5

4.3.1.2 Gravimetrische Bestimmung der Spaltenverschmutzung

Abbildung 17 zeigt die Menge Gülle auf den Spalten, gemessen direkt vor der Messung. Während der Weideperiode findet sich zu jeder Messzeit (0, 2, 4 und 6 Stunden nach der Reinigung ein statistisch signifikanter Unterschied zwischen den gereinigten Spaltenelementen und den unbehandelten Kontrollspalten. Tabelle 10 zeigt jedoch den größten Unterschied in dieser mechanischen Reinigungswirkung (54,9 %) vier Stunden nach der Reinigung, was auch schon bei den Ammoniakmessungen gefunden wurde.

Im Vergleich zu den gravimetrischen Messungen der Versuchsphase 1 in 2009 zeigt sich die Reinigungswirkung in 2010 als effektiver. Dies steht in Zusammenhang mit den Modifikationen am Reinigungsgerät.

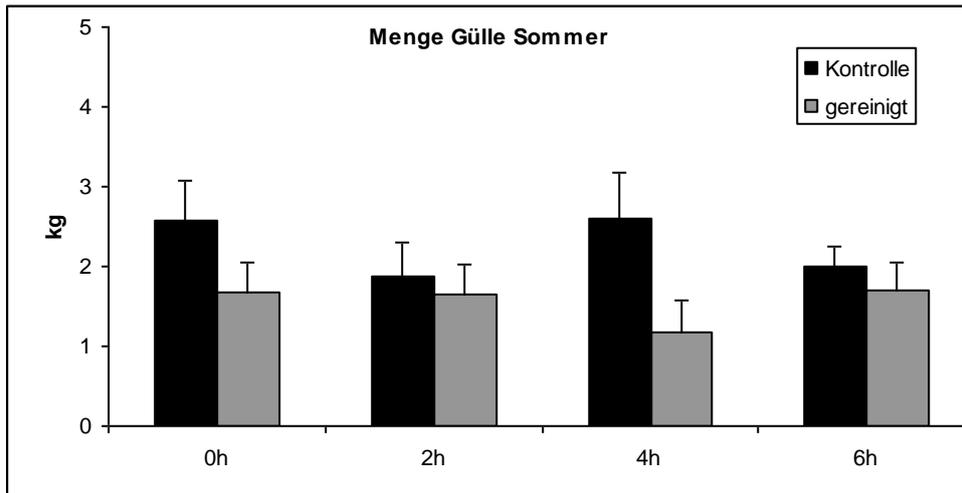


Abbildung 17: Menge Gülle auf den Versuchsspalten während der Weidesaison (* = $p \leq 0,05$)

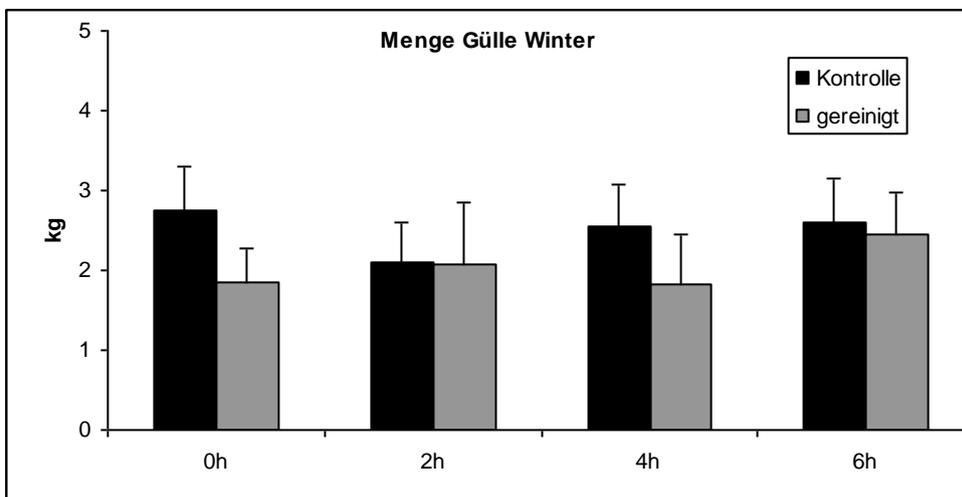


Abbildung 18: Menge Gülle auf den Versuchsspalten während der ganztägigen Stallhaltung (* = $p \leq 0,05$)

Die gravimetrischen Messungen in der „Winterphase“ zeigen nur direkt und vier Stunden nach der Reinigung signifikante Unterschiede zwischen der Menge Gülle auf den gereinigten Spalten und den nicht gereinigten Kontrollspalten. Die prozentuale mechanische Reinigungswirkung ist mit -42,5 % nach vier Stunden am höchsten. Eine mögliche Erklärung für die fehlende Reinigungswirkung zwei Stunden nach der Reinigung wird anhand von Anwesenheitskontrollen der Tiere in den unterschiedlichen Stallsektoren in Kapitel 6 untersucht.

Tabelle 11: Mechanische Reinigungswirkung direkt nach der Reinigung der Versuchsspalten auf den individuellen Versuchsspalten

Spalte Nr. #	Beobachtungen	Direkte mechanische Reinigungswirkung (%)
3	49	22,2 ± 12,8
5	16	21,1 ± 17,6
6	46	21,6 ± 11,4
7	35	18,9 ± 10,4
9	33	21,8 ± 16,2
10	37	20,3 ± 8,8
12	41	27,2 ± 12,4
13	19	20,8 ± 7,0
14	13	24,5 ± 11,6

Tabelle 11 zeigt keine signifikanten Unterschiede der individuellen Spaltenbodenelemente auf die direkte mechanische Reinigungswirkung. Auch auf die Emissionswerte konnte kein direkter Einfluss der einzelnen Spalte gefunden werden. Abbildung 19 und Tabelle 12 zeigen auch, dass sich während der Weidesaison eine unterschiedliche Verteilung der Menge Gülle auf den Spalten findet. So ergibt sich direkt, vier und sechs Stunden nach der Reinigung eine signifikant höhere Menge Gülle auf den beiden Kontrollspalten C und D. Zwei Stunden nach der Reinigung ergibt sich nur bei Spalte E (mittig liegend auf Seiten der Liegeboxen, siehe Abbildung 6) eine statistisch signifikant geringere Menge Gülle als auf der Kontrollspalte C (auf Seiten des Futtertisches nach Ausgang von Melkstand). Zwar ergeben sich durch den täglichen Arbeitsablauf bedingte Abweichungen in der Intensität der Verschmutzung der individuellen Beprobungsorte, durch eine tendenziell höhere Verschmutzung der Spalte C und eine tendenziell niedrigere Verschmutzung des Beprobungsortes E doch gleichen sich diese Schwankungen im Mittel (s. Abbildung 19) wieder aus.

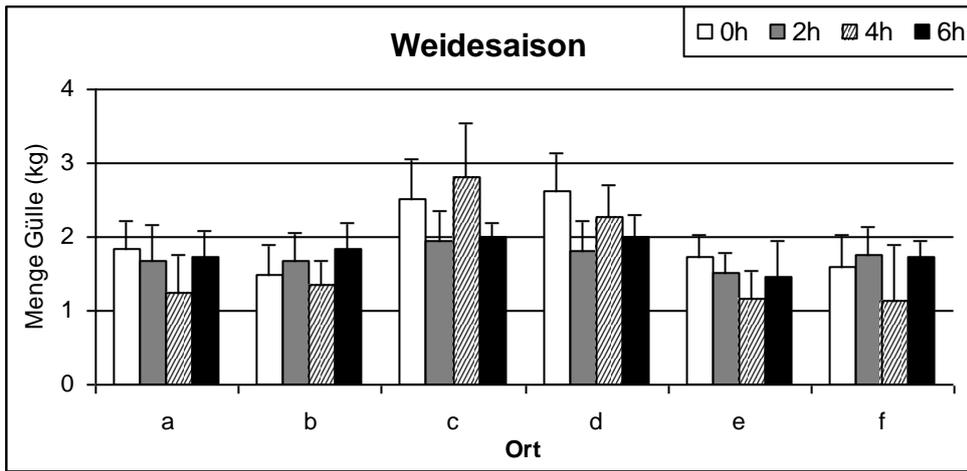


Abbildung 19: Menge Gülle auf den individuellen Versuchsspalten während der Weidesaison

Tabelle 12: Unterschiedliche Indices zeigen signifikante Unterschiede zwischen der Menge Gülle (kg) auf den einzelnen Spalten während der Weideperiode an

Beprobungsort	Stunden zwischen Reinigung und Messung			
	0	2	4	6
A	a	ab	a	ab
B	a	ab	a	ab
C	b	b	c	b
D	b	ab	b	b
E	a	a	a	a
F	a	ab	a	ab

Wie auch bei den gravimetrischen Messungen während der Sommerperiode bestätigen die individuellen Messungen der Menge Gülle auf den einzelnen Beprobungsorten die mittleren Werte der Menge Gülle auf den Kontroll- und gereinigten Flächen während der Winterperiode (Abbildung 20 und Tabelle 13). Lediglich Beprobungsort C zeigt wieder eine höhere Verschmutzung als Beprobungsort D vier Stunden nach der Reinigung und Beprobungsort E eine geringere Verschmutzung als die restlichen gereinigten Beprobungsorte A, B und F zwei und sechs Stunden nach der Reinigung.

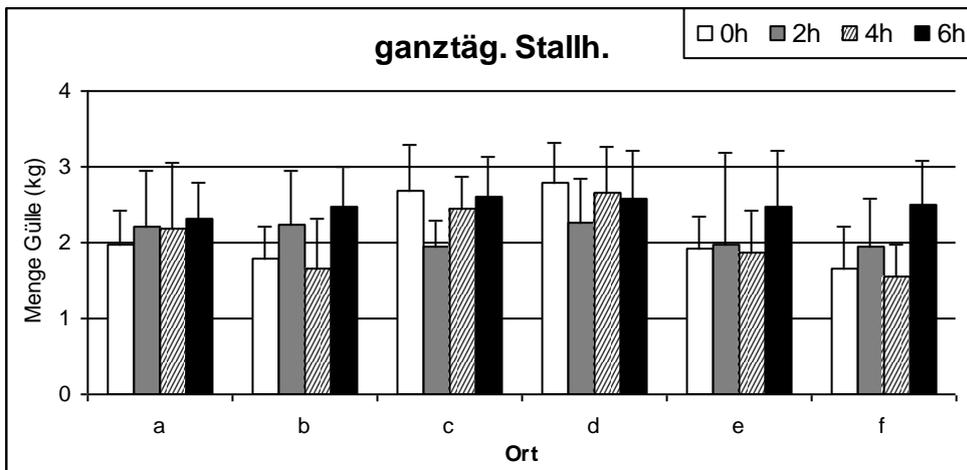


Abbildung 20: Menge Gülle auf den individuellen Versuchsspalten während der ganztägigen Stallhaltung

Tabelle 13: Unterschiedliche Indices zeigen signifikante Unterschiede zwischen der Menge Gülle (kg) auf den einzelnen Spalten während der ganztägigen Stallhaltung an

Beprobungsort	Abstand (h) zwischen Reinigung und Messung			
	0	2	4	6
A	a	a	ab	a
B	a	a	a	a
C	b	a	b	a
D	b	a	cb	a
E	a	a	a	a
F	a	a	a	a

Abbildung 21 und Abbildung 22 zeigen, wie viel Gülle sich vor der Reinigung auf den Spalten in den gereinigten Bereichen von Futtertisch (F) und Liegeboxenseite (L) sowie die beiden entsprechenden Kontrollflächen (FK und LK) befunden hat.

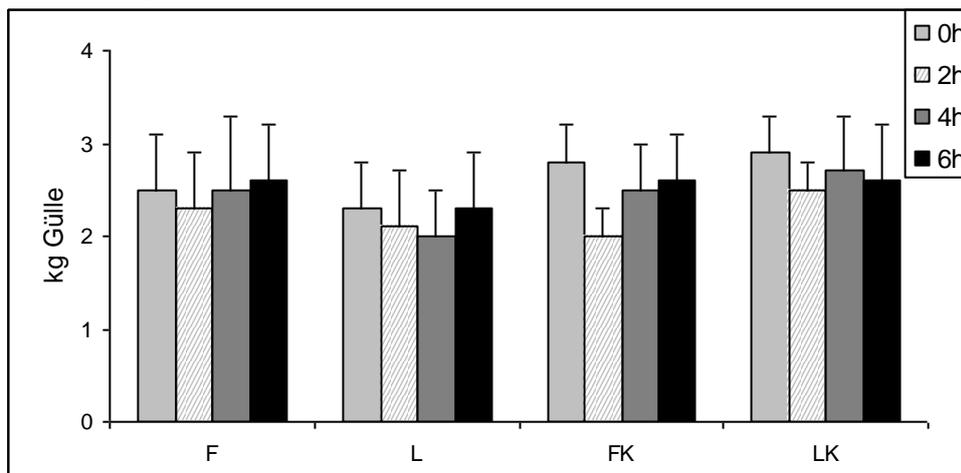


Abbildung 21: Anfallende Güllemenge in verschiedenen Funktionsbereichen des Stalles während der Weidehaltung im Sommer

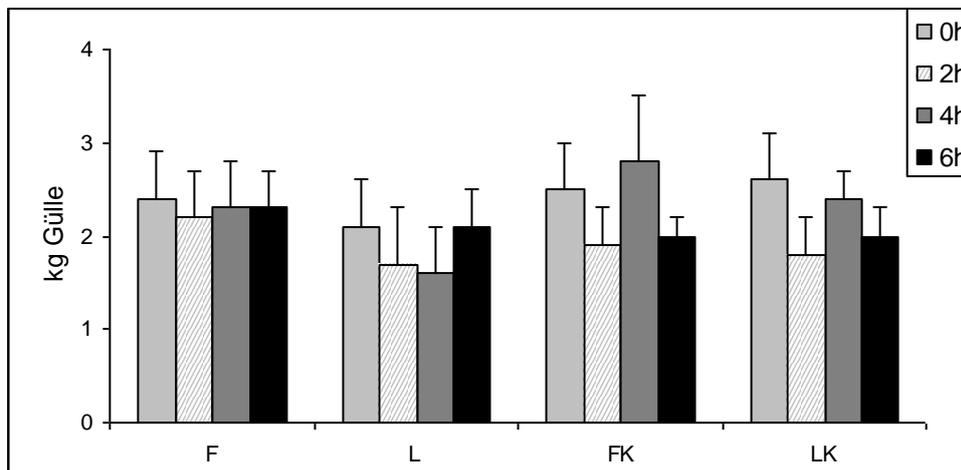


Abbildung 22: Anfallende Güllemenge in verschiedenen Funktionsbereichen des Stalles während der ganztägigen Stallhaltung im Winter

Einen statistisch signifikanten Unterschied zwischen den Mengen der Gülle auf den Versuchsflächen jeweils vor den Messungen findet sich zu beiden Versuchsperioden zwischen den gereinigten Flächen auf der Liegeboxenseite und den Kontrollflächen. Auf Seiten des Futtertisches konnte im Vergleich zu den Kontrollflächen keine statistisch signifikante Verminderung der Menge Kot vor den Messungen festgestellt werden. Da die Messspalten sich mittig der Laufflächen befanden, kann es eine Rolle gespielt haben, dass auf Seiten der

Liegeboxen mehr Kot am Rand der Laufflächen (bedingt durch den Zusammenhang zwischen Aufstehen und Abkoten der Tiere) zu finden ist als auf Seiten des Futtertisches. (Pfadler, 1981) fand ebenfalls den Zusammenhang einer stärkeren Verschmutzung der Laufflächen auf der Futtertischseite als auf den Laufflächen zwischen den Liegeboxen.

4.3.2 Weidehaltung vs. gantztägige Stallhaltung

Tabelle 14: Angepasste Mittelwerte der Ammoniakemission und der Menge Gülle auf den Kontrollspalten während beider Messperioden

Messperiode	Angepasste Mittelwerte der Ammoniakemission (mg NH ₃ h ⁻¹ m ⁻²)	sig.	Angepasste Mittelwerte der Menge Gülle (kg)	sig
Sommer	9,4 ± 3,9	*	2,5 ± 0,6	*
Winter	14,2 ± 7,3		2,8 ± 0,6	

Die Messwerte der Ammoniakemission und der gewogenen Menge Gülle auf den Kontrollspalten sind in der Sommerperiode, also während des Weidegangs signifikant geringer, als während der Winterperiode, wenn die Tiere jeden Tag 24 Stunden lang im Stall wahren. (Tabelle 14)

Ein Grund hierfür ist die längere Aufenthaltszeit der Tiere im Stall während des Winters und der damit verbundenen erhöhten Verschmutzung der Laufflächen. Im Sommer wird bei Teil des Kotes und Harns auf der Weide abgegeben, welcher somit im Stall nicht zu den Emissionen beitragen kann. Dies wurde ebenso von (Ngwabie et al., 2009) gefunden.

Tabelle 15 zeigt die mittleren Temperaturen im Stall, welche 24 Stunden vor den Messungen erfasst wurden. Wie zu erwarten sind die Temperaturen während der Weidesaison höher als während der Winterperiode.

Tabelle 15: Mittlere Temperaturen im Stall, jeweils 24 Std. vor den Messungen

Saison	Zeitpunkt Messung nach Reinigung	Mittlere Temperatur im Stall 24 Std. vor der Messung (°C)
Weidegang	0 Std	20,2
	2 Std	19,9
	4 Std	19,2
	6 Std	19,0
gantztägige Stallhaltung	0 Std	9,1
	2 Std	8,4
	4 Std	9,2
	6 Std	11,0

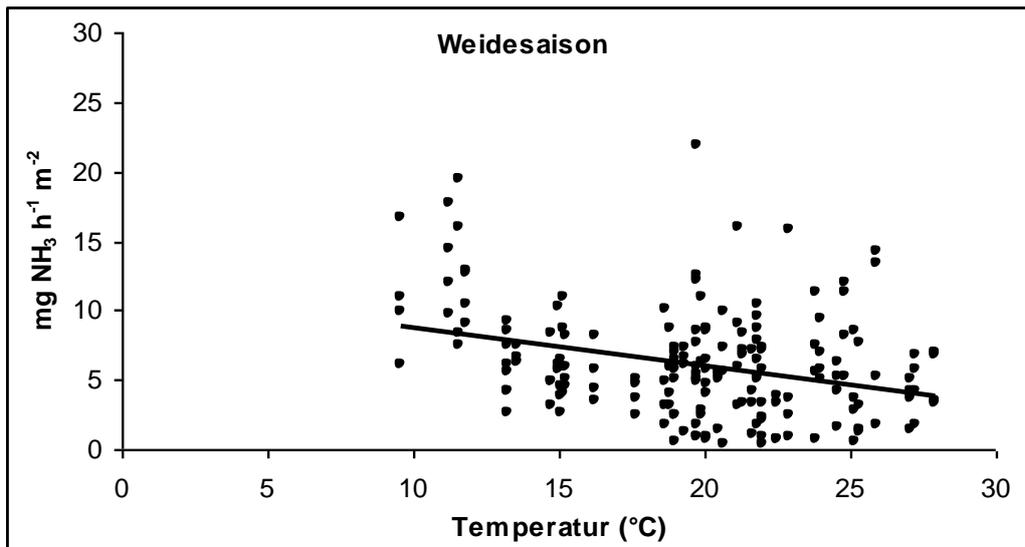


Abbildung 23: Zusammenhang zwischen der Temperatur im Stall (24 Std. vor der Messung) und den Ammoniakemissionen während der Weidesaison ($y = 11,334 - 0,2661x$, $R^2 = 0,1$)

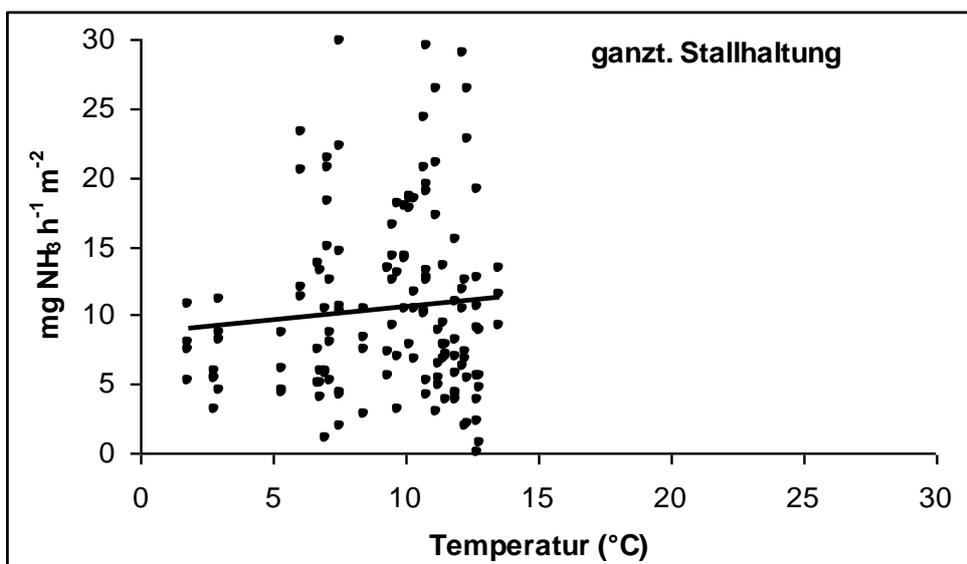


Abbildung 24: Zusammenhang zwischen der Temperatur im Stall (24 Std. vor der Messung) und den Ammoniakemissionen während der ganztägigen Stallhaltung ($y = 8,7731 + 0,1795x$, $R^2 = 0,01$)

Während der ganztägigen Stallhaltung sind die Ammoniakemissionen positiv mit der Stalltemperatur korreliert, was durch die erhöhte mikrobiologische Aktivität bedingt durch gesteigerte Temperaturen zu erklären ist. Jedoch besteht eine negative Tendenz der Emissionen während der Weidesaison. Eine Austrocknung der Spaltenoberflächen und darauf befindlichen Gülle und eine damit einhergehende verringerte mikrobiologische Aktivität und somit Überlagerung des Temperatureinflusses könnte ein Grund dafür sein. Zudem findet der Abbau des Harnstoffes im Harn durch das Enzym Urease zu Ammoniak und Kohlenstoffdioxid in den ersten Stunden nach Abgabe statt (Muck and Richards, 1983; Muck, 1982; Elzing and Monteny, 1997). Möglich ist, dass eine Erhöhung der Temperatur im Stall zu einem beschleunigten Abbau des Harnstoffes, durch die erhöhte Aktivität der Urease führt und demnach der schon emittierte Ammoniak nicht mehr in den Messkammern gemessen werden

kann. (Misselbrook et al. 2001) konnte in einer Studie keine saisonalen Temperatureinflüsse feststellen. Dies deutet auf eine Vielzahl von klimatischen Einflüssen neben der Außentemperatur hin, welche die Ammoniakemissionen beeinflussen.

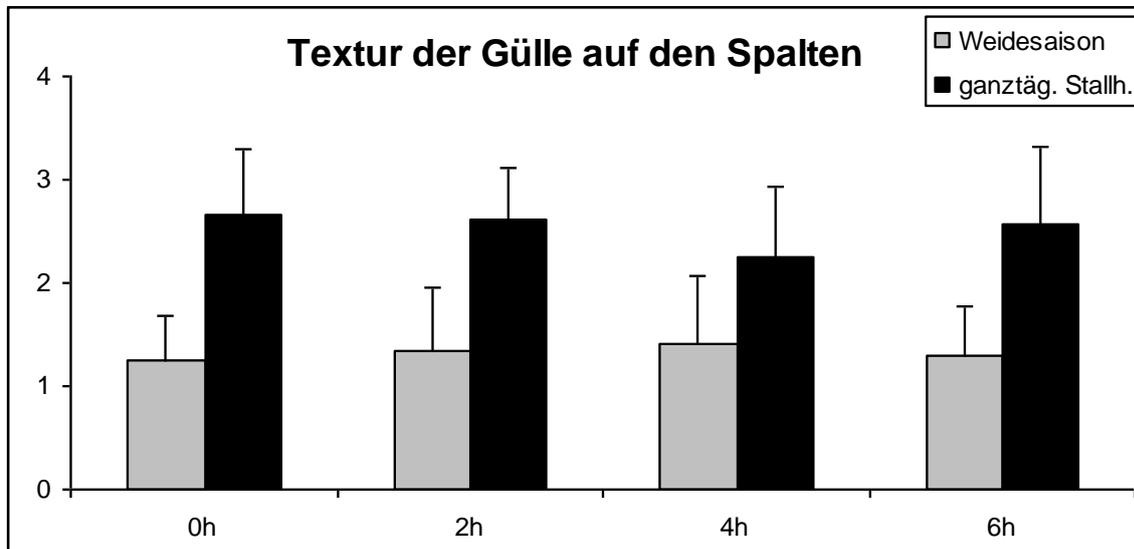


Abbildung 25: Kotkonsistenz auf den Spalten während der Weidehaltung und der ganz täglichen Stallhaltung (* = $p \leq 0,05$)

Abbildung 25 zeigt, dass der Kot auf den Spalten während der Weidesaison (Konsistenz-Note $1,3 \pm 0,6$) eine signifikant höhere Viskosität aufweist als während der ganz täglichen Stallhaltung im Winter (Konsistenz-Note $2,5 \pm 0,7$). Grund dafür ist das zusätzliche frische Gras durch den Weidegang und den damit verbundenen flüssigeren Kot, welcher auch während der gesamten Weideperiode bei den Tieren zu beobachten war. Die geringere Viskosität des Kots begünstigt ein besseres Abrutschen des Kots durch die Spalten und somit eine geringere Ablagerung und Verschmutzung während der Sommerzeit.

Zwischen den Messungen nach unterschiedlichen Zeitpunkten (0, 2, 4 und 6 Stunden) gibt es pro Saison keinen signifikanten Unterschied.

4.3.3 Empfehlung zur Häufigkeit der Reinigung

Obwohl die Spalten nach der Reinigung oberflächlich als sehr „sauber“ betrachtet werden können und die Laufflächen kaum Spuren von Kot und Einstreumaterial aufweisen, bleibt nach wie vor eine größere Menge Kot (zwischen 1,2 kg während der Weideperiode und 1,8 kg während der ganz täglichen Stallhaltung) an den Seitenrändern der Spaltenschlitze zurück. Demnach fehlt die „Tiefenwirkung“ der Reinigung, was zu einer maximalen Reduktion der Emissionen 43,8 % vier Stunden nach der Reinigung während der Weidehaltung im Sommer. Wenn sich die Tiere im Sommer auf der Weide befinden, kann der Spaltenboden nach der Reinigung abtrocknen. Daher empfiehlt sich eine Reinigung, sobald die Tiere den Stall verlassen haben.

Im Winter stellt sich erst vier Stunden nach der Reinigung ein Reinigungseffekt ein, welcher nach sechs Stunden jedoch nicht mehr zu finden ist. Da sich allerdings auch kein Effekt bis vier Stunden nach der Reinigung einstellt, kann bei einer zu häufigen Reinigung kein zusätzlicher Effekt erwartet werden. Daher ergibt sich der beste ökologische und ökonomische Nutzen bei einer täglichen Reinigung alle vier Stunden tagsüber. Dies würde bei einem Tagesablauf, bei dem morgens um 6:00 und abends um 18:00 gemolken wird sinnvoll ergeben, tagsüber viermal den Spaltenboden zu reinigen, um eine Reduktion der Ammoniakemissionen zu erwirken.

5 Einfluss des Tierbesatzes auf die Spaltenbodenverschmutzung

Während der gesamten Versuchsphase waren sechs Videokameras im Stall in ca. 3 m Höhe installiert. Über 24 Stunden wurden täglich die Laufflächen sowie die Liegeboxen des Versuchsbereichs aufgezeichnet und die Anzahl und Position der Tiere in sechs Sektoren des Stalls ermittelt. Aus Zeitgründen wurden vier komplette Tage (08.11.10 - 11.11.10) über 24 Stunden, sowie an fünfmal vier Versuchstagen (16.3.10 - 18.3.10, 30.3.10 - 1.4.10, 6.4.10 - 8.4.10, 2.11.10 - 4.11.10, 9.11.10 - 11.11.10) die Phase zwischen Reinigung und Beprobung der Versuchsspalten (pro Messeinheit 0, 2, 4 und 6 Stunden je fünf Wiederholungen) beobachtet. Betrachtet wurden die Bilder in einem Raster von 10 Minuten. Untersucht wurden die Anzahl anwesender Tiere sowie deren Position im Stall. Unterschieden wurde zwischen den Positionen „Laufgang“, „Box“ und „Laufgang/Box“. Bei letzterer Position befand sich das Tier mit mindestens einem Bein auf dem Laufgang mit dem Spaltenboden und den restlichen Beinen in der Box oder umgekehrt.

Betrachtet wurden die sechs gleichgroßen Stallabschnitte, in denen sich die sechs Beprobungsspalten (A-F) befanden. Die Positionen C und D sind jeweils die beiden Sektoren, in denen auf den Kontrollflächen keine Reinigung stattfand.

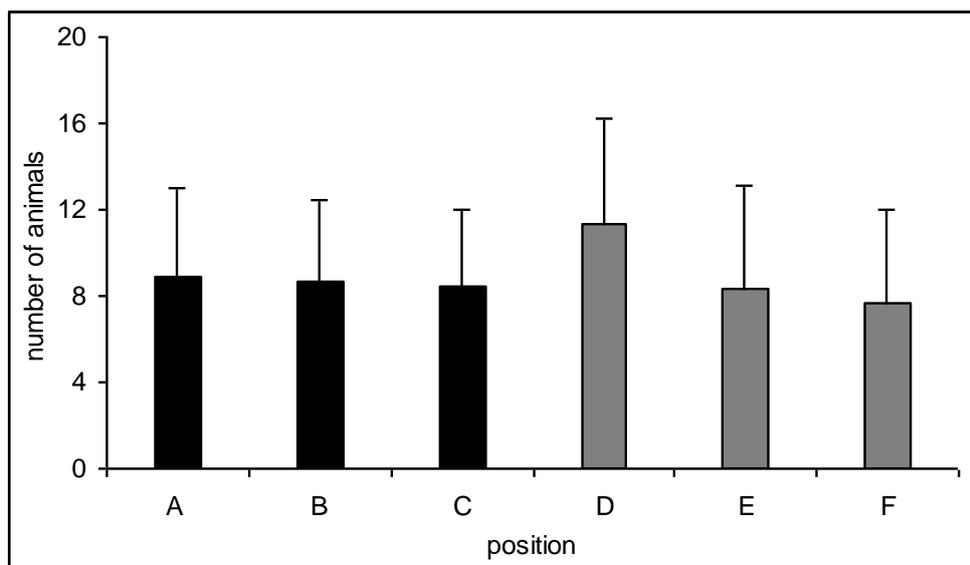


Abbildung 26: Verteilung der Tiere über 24 Stunden. Schwarze Balken zeigen die Anzahl Tiere im Bereich des Futtertisches, graue Balken im Bereich der Liegeboxen an (unterschiedliche Buchstaben zeigen einen statistisch signifikanten Unterschied der Mittelwerte an).

Tabelle 16: Mittlere Anzahl Tiere über 24 Std. auf der Futtertisch- und Liegeboxseite (* = $p \leq 0,05$)

Stallbereich	Anzahl Tiere	sign.
Futtertisch	8,7 ± 3,8	*
Liegeboxen	9,1 ± 4,9	

Abbildung 26 und Tabelle 16 zeigen die mittlere Verteilung der Tiere über 24 Stunden in den einzelnen Stallsektoren. Die Abbildung zeigt eine statistisch signifikant höhere Belegung des Kontrollsektors D mit durchschnittlich 11,3 Tieren und eine signifikant niedrigere Belegung des gereinigten Sektors F auf Seiten der Liegeboxen mit durchschnittlich 7,7 Tieren. Dies

bestätigt die gravimetrischen Messungen des Sektors D in Kapitel 4.3.1.2, jedoch nicht die des Sektors F.

Der Unterschied zwischen der mittleren Anzahl der Tiere auf der Seite der Liegeboxen und der Seite des Futtertisches ist zwar statistisch signifikant, mit einer Differenz von 0,4 jedoch sehr gering. Da bei den Messungen der Ammoniakemissionen jedoch immer dieselbe Anzahl Wiederholungen auf beiden Seiten durchgeführt wurde, hat dieses Ungleichgewicht keine Auswirkung auf die Messergebnisse.

Abbildung 27 zeigt die Belegungsdichte des Stalls durch die Tiere in den Zeiträumen zwischen Reinigung und Messung (2, 4 und 6 Stunden dazwischen). Es wird deutlich, dass die Verteilung der Tiere über die einzelnen Stallsektoren und Zeiträume inhomogen ist. Zwei Stunden nach der Reinigung gibt es einen signifikanten Unterschied zwischen dem Kontrollsegment D (10,2 Tiere) und den gereinigten Segmenten E (7,1 Tiere) und F (4,3 Tiere). Vier Stunden nach der Reinigung und vor der Messung zeigt sich ebenfalls in Sektor D (9,9 Tiere) eine höhere Tierdichte und in Sektor F eine niedrigere Dichte mit 6,2 Tieren. Sechs Stunden nach der Reinigung zeigt sich eine signifikant höhere Tierzahl in gereinigten Bereich B am Futtertisch (9,7 Tiere) im Vergleich zum Segment F mit nur 6,7 Tieren.

Die statistische Untersuchung zeigt zudem einen signifikanten Zusammenhang ($p=0,039$) zwischen dem Ort des Stallsegmentes und der Zeitdauer der Messung.

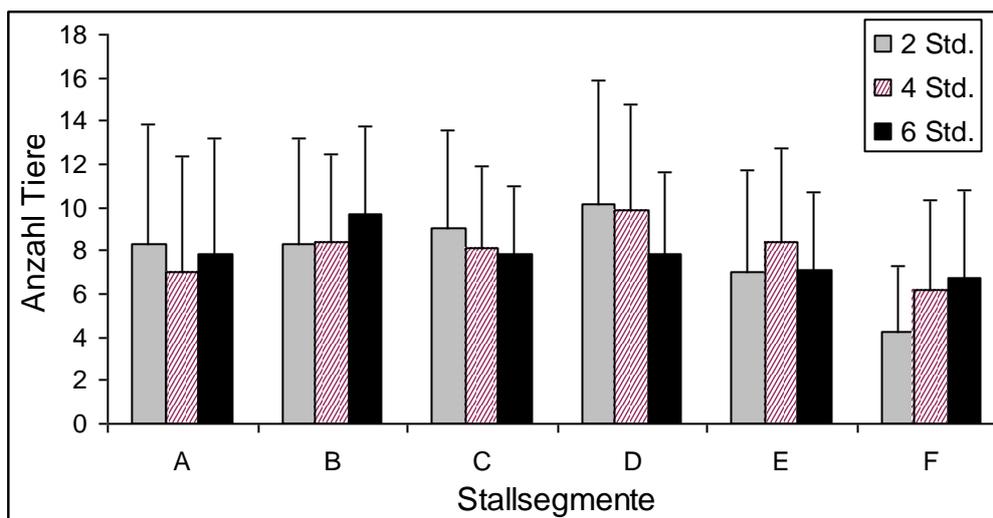


Abbildung 27: Anzahl der Tiere Zwischen der Reinigung und der Messung zu den unterschiedlichen Zeitvarianten an den individuellen Beprobungsorten ($p = 0,05$)

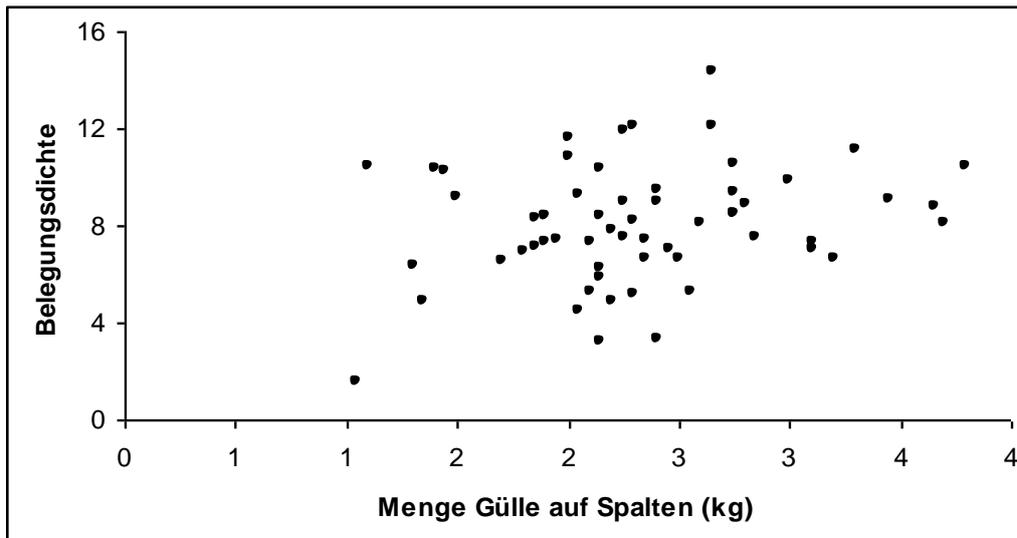


Abbildung 28: Zusammenhang zwischen Menge Gülle auf Spalten und Belegungsichte

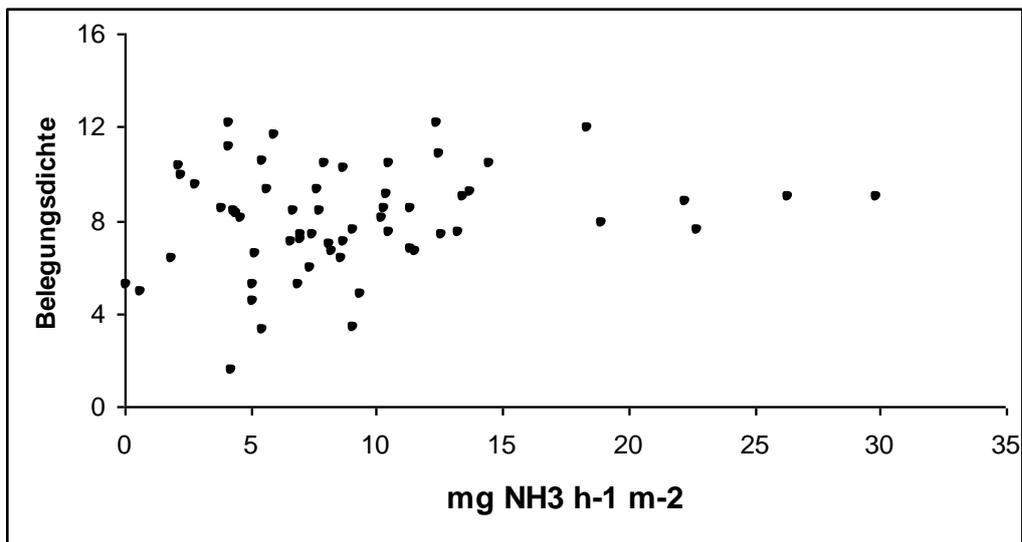


Abbildung 29: Zusammenhang zwischen Menge NH₃ von Spalten und Belegungsichte

Zwar gibt es einen signifikanten Unterschied in der Tierbelegung der einzelnen Stallsegmente zu den unterschiedlichen Messzeitpunkten (Abbildung 27). Dennoch kann zwischen der Belegungsichte der einzelnen Stallsektoren und der Menge Gülle auf den Spalten bzw. den Ammoniakemissionen kein statistischer Zusammenhang gefunden werden (Abbildung 28 und Abbildung 29).

Dies spricht auf einen nur sehr geringen Einfluss der unterschiedlichen Belegungsichten in den individuellen Stallsektoren auf die Messungen der Ammoniakemissionen.

6 Versuchsstand

Um die individuelle Reinigungswirkung der einzelnen Reinigungselemente des Cleanmeleons 3 zu untersuchen, wurde ein spezieller Versuchsstand (2,0 m x 1,2 m x 0,7 m) entwickelt. Mit diesem Stand konnten die einzelnen Elemente Gummischieber, Räumsterne, Hochdruck-Wasserreinigung sowie eine zusätzliche Lufttrocknung untersucht werden, wobei der Gummischieber Grundelement des Reinigungsaggregats war und zusätzlich erst die Räumsterne und dann die Hochdruckreinigung zugeschaltet wurden. Folgende Varianten wurden getestet:

Tabelle 17: Reinigungsvarianten Versuchstand

Verschmutzung der Spalten	Versuchszeitraum	Variante	Reinigung	n =
Künstlich, durch „Tauchen“	12.09.10 – 08.10.10	G	Gummischieber	16
	12.09.10 – 08.10.10	GR	Gummischieber + Räumsterne	16
	12.09.10 – 01.09.10	GRH	Gummischieber + Räumsterne + Hochdruckreinigung	12
	04.09.10 – 08.10.10	GRH L	Gummischieber + Räumsterne + Hochdruckreinigung + Luftdrucktrocknung	4
	12.09.10 – 08.10.10	K	„Kontrollspalte“ = keine Reinigung	16
Natürlich, direkt aus Stall	11.10.10 – 29.10.10	G	Gummischieber	12
	11.10.10 – 29.10.10	GR	Gummischieber + Räumsterne	12
	11.10.10 – 22.10.10	GRH	Gummischieber + Räumsterne + Hochdruckreinigung	8
	25.10.10 – 29.10.10	GRH L	Gummischieber + Räumsterne + Hochdruckreinigung + Luftdrucktrocknung	4
	11.10.10 – 29.10.10	K	„Kontrollspalte“ = keine Reinigung	12

Die zu reinigende Spalte konnte mit dem Hoftrac in einen Schlitten und damit manuell unter eine Aufhängung mit den variablen Reinigungselementen gefahren werden. Dabei befand sich die Spaltrichtung orthogonal zur Laufrichtung des Versuchstandes. Die Aufhängung war so konstruiert, dass das Aggregat mit den Reinigungselementen über in Parallelogramm nach oben frei beweglich war. Somit lastete nur das Eigengewicht des Aggregats auf der Spalte. Variabel konnte zum fest eingebauten Gummischieber (1 cm tiefer als die Oberkante der Spalte gelagert) eine Walze mit Räumsternen angebaut und die Hochdruckreinigung zugeschaltet werden (Kränzle Quadro 1200 TS T, vier Düsen, 5 cm über der Spaltenoberfläche, Druck: 110 bar, Winkel: 40°). Für die Variante GRHL wurde zudem nach der Nassreinigung mit Luftdüsen (fünf Düsen, 7 cm über der Spaltenoberfläche, Druck: 8 bar) die Spalte nachgetrocknet, indem überschüssiges Wasser von der Spalte geblasen wurde. Das Reinigungsaggregat wurde immer zweimal (jeweils einmal von beiden Seiten der Versuchsspalte) über die zu reinigende Spalte gefahren, um die Innenseiten der Spalte von beiden Richtungen reinigen zu können.

Der Antriebsmotor für den Schlitten mit den angebauten Reinigungselementen lief mit $n = 34 \text{ min}^{-1}$ und entspricht einer Überfahrgeschwindigkeit von 0,3 km/h.



Eintauchen der Versuchsspalten



Versuchsstand mit Hochdruckreiniger und Abtropfgestell



Reinigungsvariante GR



Reinigungsvariante GRH

Abbildung 30: Behandlung (Verschmutzung der Spaltenelemente und unterschiedliche Anordnungen von Reinigungselementen auf dem Versuchsstand

6.1 Künstlich verschmutzte Spalten

Die Verschmutzung des Spaltenbodens innerhalb des Stalls ist durch die Tiere bedingt willkürlich und inhomogen. Um vergleichbare und wiederholbare Bedingungen schaffen zu können, wurden die Spalten für diesen Versuch künstlich verschmutzt. Für die künstliche Verschmutzung der Spalten wurde wöchentlich ein 400l-Behälter mit Gülle aus dem Güllelager unter den Spalten befüllt. Der Versuch wurde über vier Wochen durchgeführt, wobei in jeder Woche vier Wiederholungen an vier aufeinander folgenden Tagen durchgeführt, wobei in jeder Woche Variante G, GR und K (n=16) durchgeführt wurde. Variante GRH (n=12) wurde in den ersten drei Wochen und Variante GRHL (n=4) in der letzten Woche durchgeführt.

Während der Lagerung über die jeweils vier hintereinander folgenden Messtage einer Woche wurde der Behälter mit einer Plane und einem Deckel abgedeckt, um Ammoniakverluste so gering wie möglich zu halten. Tabelle 18 gibt die Messwerte für die verwendete Gülle am ersten und letzten Tag der viertägigen Messreihe pro Woche an. Die NH_4^+ -N-Gehalte weisen keine nennenswerten Veränderungen zwischen dem jeweils ersten und vierten Messtagen pro Woche auf.

Tabelle 18: Gülle auf den künstlich verschmutzten Spaltenelementen

Messtag	Charge Gülle	Messtag	pH	TS (%)	Ges.-N (% in TS)	NH ₄ ⁺ -N (% in TS)
12.09.2010	1	1	7,4	9,0	4,1	1,8
15.09.2010	1	4	7,3	8,7	4,4	1,9
20.09.2010	2	1	7,4	9,7	3,8	1,4
23.09.2010	2	4	7,6	9,6	4,0	1,5
27.09.2010	3	1	7,6	8,4	4,1	1,6
30.09.2010	3	4	7,3	8,6	4,2	1,5
03.10.2010	4	1	7,4	10,0	4,2	1,6
06.10.2010	4	4	7,6	10,1	4,0	1,6

Pro täglichen Messdurchgang wurde pro Variante G, GR, GRH (bzw. GRHL) und K jeweils ein hochdruckgereinigtes Spaltenelement komplett in die vorher durch umrühren homogenisierte Gülle eingetaucht und auf Abtropfgestellen für 45 min zwischengelagert. Durch das Abtropfen wurde sichergestellt, dass durch den Transport bedingte Gülleverluste während des Wiegens und des Reinigungsvorganges vermieden wurden. Mithilfe einer Walze, an welcher zwei Abstandshalterringe mit dem Durchmesser von 0,5 cm angebracht waren, wurde die Gülleauflage auf den Spalten bei jeder Spalte auf 0,5 cm reduziert und somit eine gleichmäßige Güllebedeckung sicher zu stellen. Dieses „Walzen“ fand sofort nach dem Ablegen der verschmutzten Spalte auf dem Abtropfgestell statt.

Wie auch bei den vorhergehenden Versuchen (s. Kapitel 4.3.1.2) wurden die Spalten mithilfe der Hängewaage gewogen, um das Gewicht der Gülle auf den Spalten zu erfassen. Die hochdruckgereinigten Spalten wurden direkt vor der Verschmutzung (ohne Gülle), direkt vor der Reinigung und direkt nach der Reinigung durchgeführt.

Die durchschnittliche Menge Gülle auf den verschmutzten Spalten betrug $3,0 \pm 0,3$ kg bevor sie gereinigt wurden.

Die Messungen der Ammoniakemissionen verliefen über 24 Stunden analog zu den vorhergehenden Messungen (beschrieben in Kapitel 4.3.1.1).

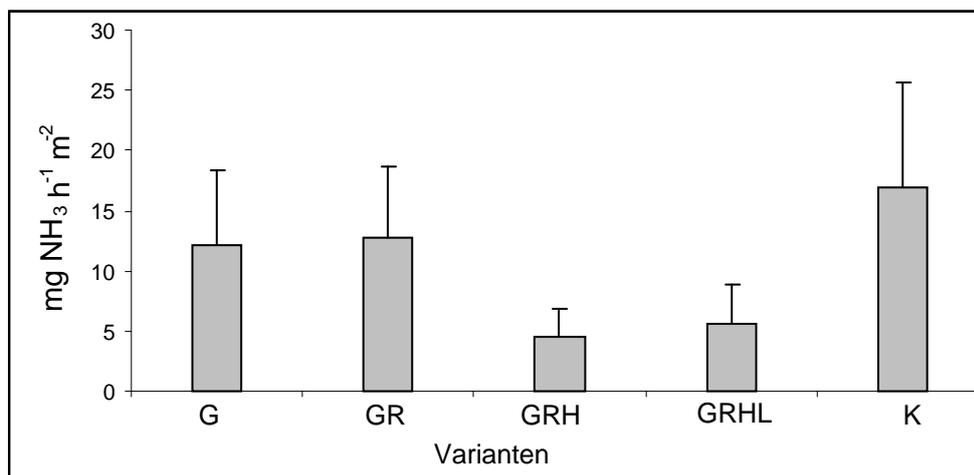


Abbildung 31: Ammoniakemissionen von den künstlich verschmutzten Spalten (p= 0,05)

Die Ammoniakemissionen von den künstlich verschmutzten Spalten sind nach der Reinigung gegenüber der Kontrollvariante deutlich reduziert. Am effektivsten erwies sich die Nassreinigung mit Gummischieber, Räumsternen und Hochdruckreiniger mit einem mittleren Wert von $4,5 \text{ mg NH}_3 \text{ h}^{-1} \text{ m}^{-2}$ im Vergleich mit einem Mittelwert von $17,0 \text{ mg NH}_3 \text{ h}^{-1} \text{ m}^{-2}$ von den ungereinigten Kontrollspalten. Die „trockene“ Reinigung nur mit dem Gummischieber (G) bzw. mit dem Gummischieber und den Räumsternen (GR) ergaben Messwerte von $12,2 \text{ mg NH}_3 \text{ h}^{-1} \text{ m}^{-2}$ bzw. $12,8 \text{ mg NH}_3 \text{ h}^{-1} \text{ m}^{-2}$. Dies zeigt im Fall der

künstlich gereinigten Spalten keinen positiven Effekt der Räumsterne auf die Ammoniakemission. Die Variante GRHL, bei der überschüssiges Wasser von der Spalte geblasen wurde zeigt im Vergleich zu Variante GRH (ohne Trocknung) ebenfalls keinen positiven Effekt auf die Ammoniakemissionen.

Tabelle 19 zeigt die Reinigungswirkung auf die verschmutzten Spalten im Vergleich zu den ungereinigten Kontrollspalten in Prozent. Hier wird deutlich, dass Reinigungsvariante GRH die Ammoniakemissionen um 67,0 % senkt, während die „trockenen“ Reinigungsvarianten G und GR die Emissionen nur um jeweils 28,3 % und 24,5 % senken.

Tabelle 19: Reinigungswirkung auf die Ammoniakemissionen von den unterschiedlich verschmutzten Spalten

Reinigungsvariante	Reinigungswirkung auf NH ₃ -Emissionen von Spalten (%)	
	Künstliche Verschmutzung	Natürliche Verschmutzung
G	28,3	19,8
GR	24,5	11,6
GRH	73,6	36,0
GRHL	67,0	40,0

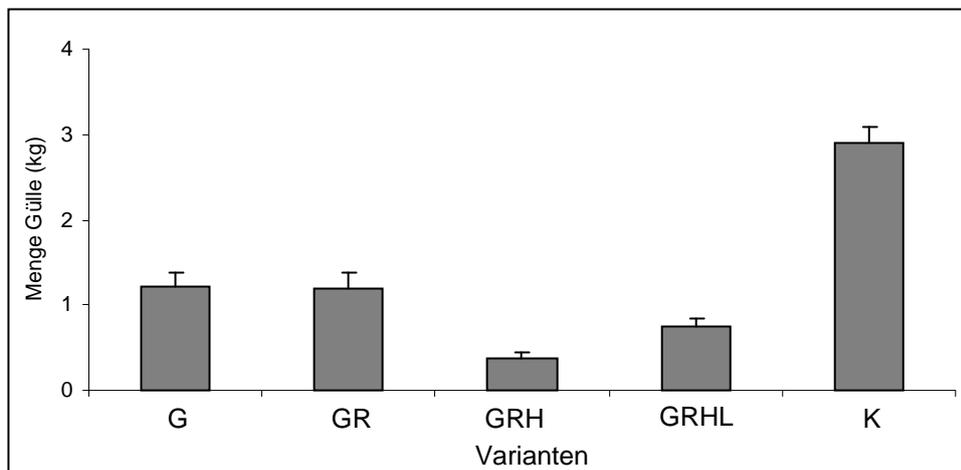


Abbildung 32: Menge Gülle auf den künstlich verschmutzten Spalten nach der Reinigung (p= 0,05)

Die Werte aus den gravimetrischen Messungen in Abbildung 33 zeigen wie auch schon die Ammoniakwerte eine deutliche Reduktion der Menge Gülle auf den künstlich verschmutzten Versuchsspalten durch die Reinigung. Verglichen mit der Menge Gülle auf den Kontrollspalten (3,0 kg) ist die Menge Gülle auf den Spalten bei der Reinigungsvariante C (0,4 kg) um 87,3 %. Auch bei den Varianten A und B wird bereits über die Hälfte der auf der Spalte anhaftenden Gülle durch die Reinigung beseitigt (siehe Tabelle 20).

Die höheren Emissions- und Güllewerte bei der Reinigungsvariante C+ (Trocknung) verglichen mit C sind versuchsbedingte Abweichungen. Dennoch kann davon ausgegangen werden, dass eine Trocknung durch Druckluft direkt nach der Reinigung keinen positiven Effekt auf die Spaltenreinigung hat.

Tabelle 20: Reinigungswirkung auf die Menge Gülle auf den unterschiedlich verschmutzten Spalten

Reinigungsvariante	Reinigungswirkung auf die Menge Gülle auf den Spalten (kg)	
	Künstliche Verschmutzung	Natürliche Verschmutzung
G	58,1	25,6
GR	58,6	42,9
GRH	87,3	45,8
GRHL	74,5	35,4

6.2 Natürlich verschmutzte Spalten

Durch die künstliche Verschmutzung der Spalten wurden wiederholbare Bedingungen geschaffen, indem die einzelnen Spaltenelemente immer mit ca. derselben Menge Gülle verschmutzt wurden. Im Stall selber findet die Verschmutzung der Spalten jedoch nicht mit homogener Gülle, sondern mit Kot, Harn und Einstreumaterial statt, welches sich in unterschiedlicher Höhe und Intensität auf dem Boden und zwischen den Spalten ablagert. Diese inhomogene Verschmutzung kann künstlich nur schwer simuliert werden. Daher wurden, trotz der hohen Varianz der Verschmutzung der Spaltenelemente zusätzliche Reinigungsversuche mit diesen natürlich verschmutzten Spalten durchgeführt.

Der Versuch wurde über drei Wochen durchgeführt. Pro Woche wurden, wie beim vorhergehenden Versuch mit den künstlich verschmutzten Spalten, vier Wiederholungen an vier aufeinander folgenden Tagen durchgeführt, wobei in jeder Woche Variante G, GR und K (n=12) durchgeführt wurde. Variante GRH (n=8) wurde in den ersten zwei Wochen und Variante GRHL (n=4) in der letzten Woche durchgeführt.

Die verschmutzten Spalten wurden für diesen Versuch direkt vor der Reinigung aus dem Stall entnommen und vor, wie auch nach der Reinigung gewogen.

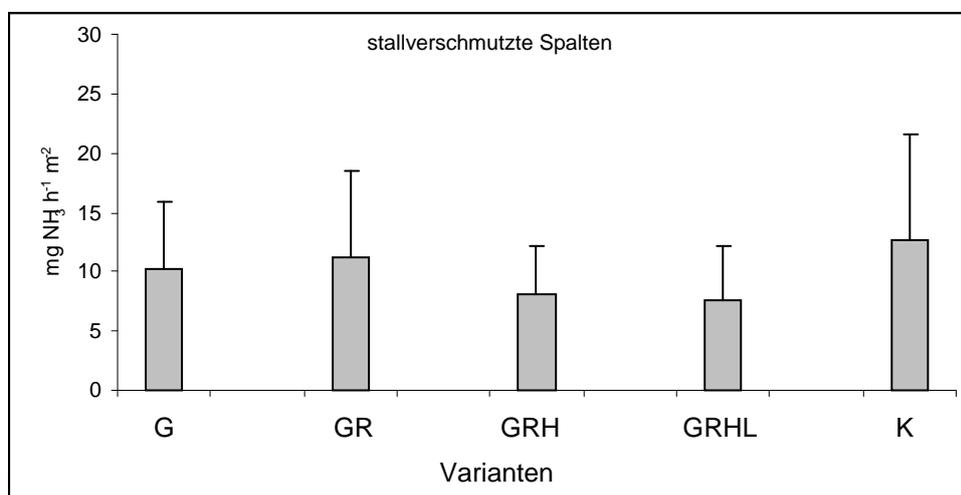


Abbildung 33: Ammoniakemissionen der natürlich verschmutzten Spalten (p= 0,05)

Die Ammoniakemissionen der natürlich stallverschmutzten Spaltenelemente, welche mit den unterschiedlichen Varianten gereinigt wurden, zeigen im Vergleich zu den künstlich verschmutzten Spalten geringere Emissionswerte von 7,6 mg NH₃ n⁻¹ m⁻² (Variante GRHL) bis 12,7 mg NH₃ n⁻¹ m⁻² (ungereinigte Kontrollvariante)

Im Vergleich zu der unbehandelten Kontrollvariante der natürlich verschmutzten Spalten zeigen die gereinigten Varianten keine statistisch signifikanten Unterschiede. Zwar ergeben sich bei den Varianten GRH und GRHL jeweils ein Reinigungseffekt von 36,0 % und 40,0 %,

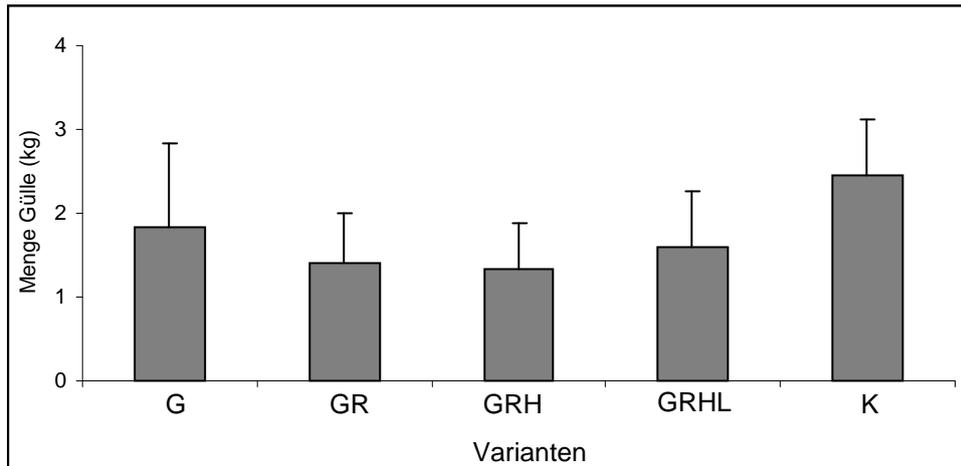


Abbildung 34: Menge Gülle auf den natürlich verschmutzten Spalten nach der Reinigung ($p=0,05$)

Die geringeren Ammoniakemissionen von den natürlich verschmutzten Spalten im Vergleich zu den künstlich verschmutzten Spalten bestätigen sich auch in der geringeren Menge Kot, welche vor der Messung auf den Spalten gefunden wurde (Abbildung 34). Die einzelnen Reinigungsvarianten zeigen hier einen positiven mechanischen Reinigungseffekt, welcher signifikant verschieden zu der Menge Gülle auf den ungereinigten Kontrollspalten ist. Jedoch zeigt sich kein signifikanter Unterschied zwischen den einzelnen Reinigungsvarianten. Dennoch scheint tendenziell bei Variante B ein Vorteil durch die Räumsterne vorzuliegen, welche einen mechanischen Reinigungseffekt von 42,9 % aufweisen (siehe Tabelle 20). Die Variante GRH, mit der zusätzlichen Hochdruckreinigung hat einen Reinigungseffekt von 63,9 %. Die Gülle auf den natürlich verschmutzten Spalten weist eine festere Konsistenz (Konsistenz-Note: $2,75 \pm 0,8$) auf als die flüssigere Gülle auf den künstlich verschmutzten Spaltenelementen (Konsistenz-Note: 1) und kann daher besser zwischen den Spaltenräumen haften, weswegen sich mit den Räumsternen eine bessere Reinigungswirkung ergibt als ohne sie.

6.3 Empfehlung für die Weiterentwicklung des Reinigungsgerätes

Basierend auf den dargestellten Versuchsergebnissen und praktischen Erfahrungen im Versuch werden können folgende Empfehlungen zur Weiterentwicklung des Reinigungsgeräts gemacht werden:

- Die verwendeten Düsen zur Hochdruckreinigung sollten gegen ebenfalls Wasser sparende Düsen mit höherer Prallwirkung (Energie) ausgetauscht werden, um einen besseren Reinigungseffekt im Zwischenspalt zu erreichen
- Als Alternative zum vorhandenen Antriebsaggregat sollten kleiner und leichtere Varianten geprüft werden und außerdem eine Kombination des Reinigungsaggregats mit mobilen Reinigungsrobotern erwogen werden
- Um Verluste bei der Energieübertragung (Hydraulik) zu minimieren, könnte ein direkter Antrieb der Hochdruckpumpe am Reinigungsaggregat durch Elektro- oder kleine Verbrennungsmotoren erfolgen

7 Fazit

7.1 Reinigungswirkung auf die Ammoniakemissionen

Die mechanische oberflächliche Reinigung des Spaltenbodens ist nach einer Abtrocknungsphase zufrieden stellend. Wenn der Spaltenboden während der Weidesaison bei höheren Temperaturen abtrocknen kann, kommt es zu einer Reduktion der Ammoniakemissionen um 43,8 % vier Stunden nach der Reinigung.

Jedoch verbleibt ein großer Teil der Gülle an den Seitenrändern der Spaltschlitze. Dies führt zu einer ungenügenden Reduktionswirkung direkt nach der Reinigung. Auch führt die zusätzliche Wasserzufuhr zu einer verminderten Emissionsreduktion durch die erhöhte biologische Aktivität. Auch die Vermischung von Harn und Kot begünstigt eine erhöhte Ureaseaktivität, was zu einem verspäteten Reinigungseffekt führt. Im Winter findet sich daher eine auf die Emissionen positiv wirkende Reinigungswirkung erst nach vier Stunden, welche nach sechs Stunden durch die erneute Verschmutzung der Laufflächen durch die Tiere schon wieder aufgehoben wird.

Der Versuchsstand und die Simulation der einzelnen Reinigungselemente zeigten, dass die Reinigung mit den Räumsternen eine Reduktion der Menge Gülle auf den Spalten ergibt, wenn die Viskosität der Gülle nicht zu niedrig ist. Dies ist bei natürlich verschmutzten Spaltenböden für normal der Fall. Der Einsatz der Hochdruckreinigung hingegen zeigte nur einen positiven Reinigungseffekt wenn die Gülleviskosität niedrig ist und somit von den Spalten gespült werden kann.

8 Literatur

- BMELV. 2003. Agrarbericht der Bundesregierung 2003. Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten, Bonn.
- Braam, C. R., M. C. J. Smits, H. Gunnink, and D. Swierstra. 1997. Ammonia Emission from a Double-Sloped Solid Floor in a Cubicle House for Dairy Cows. *Journal of Agricultural Engineering Research* 68:375-386.
- Döhler, H., B. Eurich-Menden, U. Dämmgen, B. Osterburg, M. Lüttich, A. Bergschmidt, W. Berg, and R. Brunsch. 2002. TEXTE 05/02. BMVEL/UBA-Ammoniak-Emissionsinventar der deutschen Landwirtschaft und Minderungsszenarien bis zum Jahr 2010. Umweltbundesamt, Berlin.
- Elzing, A. and G. J. Monteny. "Modeling and experimental determination of ammonia emissions rates from a scale model dairy-cow house." *TRANS.AM.SOC.AGRIC.ENG.* 40.3 (1997): 721-26.
- Elzing, A. and G. J. Monteny. 1997b. Ammonia emission in a scale model of a dairy-cow house. *TRANS. AM. SOC. AGRIC. ENG.* 40:713-720.
- Hamelin, L., S. Godbout, R. Thériault, and S. P. Lemay. 2010. Evaluating ammonia emission potential from concrete slat designs for pig housing. *Biosystems Engineering* 105:455-465.
- Kroodsma, W., J. W. H. Huis in 't Veld, and R. Scholtens. 1993. Ammonia emission and its reduction from cubicle houses by flushing. *Livestock Production Science* 35:293-302.
- Lindvall, T., O. Noren, and L. Thyselius. "Odor reduction for liquid manure systems." *TRANS.AM.SOC.AGRIC.ENG.* 17.3 (1974): 508-12.
- Määttä, J., H. R. Kymäläinen, M. Hellstedt, R. Mahlberg, R. Kuisma, L. Salparanta, M. Löjja, A. Talibachew, K. R. Hurme, A. Uusi-Rauva, A. C. Ritschkoff, and A. M. Sjöberg. 2008. Properties and cleanability of new and traditional agricultural surface materials. *Agricultural and Food Science* 17:210-226.
- Macuhová, J., S. Enders, R. Peis, S. Gutermann, M. Freiberger, and B. Haidn. 2008. Untersuchung zur Optimierung des Stallklimas in Außenklimaställen für Milchvieh. Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft, Freising.
- Misselbrook T., Webb J, Chadwick D., Ellis S, Pain B. Gaseous emissions from outdoor concrete yards used by livestock. *Atmospheric Environment* 2001 Nov;35(31):5331-5338.
- Muck R.E. 1982, „Urease Activity in Bovine Feces“, *Journal of Dairy Science* 65, Nr. 11 (November 1982): 2157-2163.
- Muck, R.E. and B.K. Richards, „Losses of manurial nitrogen in free-stall barns“, *Agricultural Wastes* 7, Nr. 2 (1983): 65-79.
- Navaratnasamy, M., I. Edeogu, and J. Feddes. "Comparison of a wind tunnel and vented flux chamber in measuring odour emission rates." *Canadian Biosystems Engineering / Le Genie des biosystems au Canada* 51 (2009).

- Ndegwa, P. M., Y. K. Vaddella, A. N. Hristov, and H. S. Joo. 2009. Measuring concentrations of ammonia in ambient air or exhaust air stream using acid traps. *J Environ Qual* 38:647-653.
- Ngwabie, N. M., K. H. Jeppsson, S. Nimmermark, C. Swensson, and G. Gustafsson. 2009. Multi-location measurements of greenhouse gases and emission rates of methane and ammonia from a naturally-ventilated barn for dairy cows. *Biosystems Engineering* 103:68-77.
- Pfadler, W. 1981. Ermittlung optimaler Funktionsmasse von Spaltenböden in Milchviehlaufställen. Arbeitskreis Forschung und Lehre der Max-Eyth-Gesellschaft (MEG).
- Phillips, V. R., M. R. Holden, R. W. Sneath, J. L. Short, R. P. White, J. Hartung, J. Seedorf, M. Schröder, K. H. Linkert, S. Pedersen, H. Takai, J. O. Johnsen, P. W. G. Groot Koerkamp, G. H. Uenk, R. Scholtens, J. H. M. Metz, and C. M. Wathes. 1998. The Development of Robust Methods for Measuring Concentrations and Emission Rates of Gaseous and Particulate Air Pollutants in Livestock Buildings. *Journal of Agricultural Engineering Research* 70:11-24.
- Rotz, C. A. 2004. Management to reduce nitrogen losses in animal production. *Journal of Animal Science* 82:E119-E137.
- Trampler, W. 2002. Fütterung. Milchviehfütterung im ökologischen Landbau. U. Schumacher, Seite 96, ed. Bioland Verlags GmbH, Mainz.