

# Wie beeinflusst Auslaufhaltung die Ammoniakemissionen aus Mastschweinställen?

Ulrike Wolf, Brigitte Eurich-Menden, Gianna Dehler, Alexej Smirnov, Dieter Horlacher

Die landwirtschaftliche Tierhaltung verursacht Ammoniakemissionen. Bisher wurden nur wenige Messungen zur Quantifizierung der Ammoniakemissionen aus freigelüfteten Mastschweinställen mit Auslauf durchgeführt. In dieser Studie werden jährliche Ammoniakemissionsraten und -faktoren (bezogen auf die TAN-Ausscheidung) für frei gelüftete Mastschweinställe mit unterschiedlich gestalteten Ausläufen vorgestellt. Im Rahmen des Forschungsprojekts „Ermittlung von Emissionsdaten für die Beurteilung der Umweltwirkungen der Nutztierhaltung“ (EmiDaT) wurden über den Verlauf eines Jahres Ammoniakemissionsmessungen an acht Mastschweinställen an verschiedenen Standorten in Deutschland vorgenommen. Die Betriebe unterschieden sich hinsichtlich der Bodengestaltung im Auslauf: planbefestigt und eingestreut oder Spaltenboden. Zwischen den beiden Auslaufvarianten wurde kein statistisch absicherbarer Unterschied in der Höhe der Ammoniakemissionsraten nachgewiesen. Die mittlere jährliche Ammoniakemissionsrate liegt bei  $2,6 \text{ kg NH}_3\text{-N TP}^{-1} \text{ a}^{-1}$ . Mastschweinställe mit Auslauf, so wie im Projekt „EmiDaT“ untersucht, sind hinsichtlich der  $\text{NH}_3$ -Emissionsraten generell nicht schlechter zu bewerten als zwangsgelüftete Ställe.

## Schlüsselwörter

Emissionen, Ammoniak, Mastschweinställe, Auslauf, Emissionsrate, Emissionsfaktor

Deutschland hat sich im Rahmen europäischer Abkommen zur Luftreinhaltung (RL EU 2016) verpflichtet, vorgegebene Emissionsgrenzwerte einzuhalten und die jährlichen Stickstoffemissionen aus unterschiedlichen Sektoren, so auch der Landwirtschaft, zu berichten. Die Tierhaltung ist mit einem Anteil von ca. 70% ein Hauptverursacher der gesamten Ammoniak( $\text{NH}_3$ )-Emissionen. Quellen von  $\text{NH}_3$ -Emissionen sind Stallanlagen sowie die Lagerung und Ausbringung von Wirtschaftsdüngern (Gülle, Festmist etc.).

Für die Abschätzung der jährlichen  $\text{NH}_3$ -Emissionen nach Tierart, Produktionsrichtung und Halungsverfahren werden aktuelle Jahresemissionsraten benötigt. Die bisher in Deutschland verwendeten Jahresemissionsraten für Ammoniak (VDI 2011) beruhen auf älteren Untersuchungen, teilweise noch aus den 1990er-Jahren und sind meist Konventionswerte. Es ist daher sinnvoll, diese Konventionswerte aufgrund veränderter Produktionsbedingungen und besserer messtechnischer Möglichkeiten systematisch zu überprüfen und zu aktualisieren. Ergänzend sind Halungsverfahren zu erfassen, z.B. Ställe mit Auslauf für Mastschweine, für die keine oder nur wenige Untersuchungsergebnisse vorliegen und bei denen für den Auslauf pauschale Zuschläge auf die Emissionen angesetzt werden.

Im Projekt „Ermittlung von Emissionsdaten für die Beurteilung der Umweltwirkungen der Nutztierhaltung“ (EmiDaT) wurden  $\text{NH}_3$ -Emissionsraten aus frei gelüfteten Mastschweinställen mit Aus-

lauf in verschiedenen Regionen Deutschlands ermittelt. Ziel der Erhebungsuntersuchung war die Abschätzung der  $\text{NH}_3$ -Emissionen aus Mastschweineeställen mit unterschiedlicher Auslaufgestaltung (planbefestigter und eingestreuter Auslauf; Auslauf mit Spaltenboden). Außerdem wurde im Rahmen des Projektes der bislang verwendete Ammoniakemissionswert für geschlossene, zwangsgelüftete Ställe auf Plausibilität überprüft.

## Material und Methoden

### Untersuchte Haltungssysteme und Standorte

Ammoniakemissionen aus Mastschweineeställen mit Auslauf (freie Lüftung) wurden bei zwei Hal- tungsvarianten untersucht: 1. eingestreuter planbefestigter Auslauf (Plan); 2. Auslauf mit Spalten- boden (Spalte). Die Untersuchungsställe wurden so ausgewählt, dass in der näheren Umgebung kei- ne weiteren bedeutenden  $\text{NH}_3$ -Emissionsquellen vorzufinden waren. Die Ställe waren weitgehend freistehend, sodass eine gute Durchströmung der Stallanlagen gegeben war. Bei den ausgewählten Betrieben war das Einhalten der guten fachlichen Praxis im Betriebsmanagement gewährleistet.

Die Varianten „Plan“ und „Spalte“ unterscheiden sich in der baulichen Ausführung des Stallsys- tems sowie in der Gestaltung des Auslaufs mit bzw. ohne Einstreu.

Variante „Plan“: Mastschweineeställe mit planbefestigtem, eingestreutem Auslauf. Die Lüftung im geschlossenen Stall erfolgte über Fenster/Türen sowie über die Durchgänge in den freigelüfteten Auslauf bzw. Stall. Die Auslaufflächen waren bei den Messungen bei drei der vier Betriebe zu 100% eingestreut, bei einem Betrieb wurden 50% der Gesamtauslauffläche eingestreut. Die Entmistung der Ausläufe erfolgte bei allen vier Betrieben manuell (Hofschlepper) und mindestens 2-mal pro Woche.

Variante „Spalte“: freigelüftete Außenklimaställe, im Inneren des Stalls Liegekisten mit Deckel; Ausläufe mit Spaltenböden. Die Regulierung der Lüftung des Innenbereichs erfolgte über Curtains und Durchgänge in den Auslauf bzw. Stall. Zwei der vier Betriebe waren mit Unterflurschiebern aus- gestattet, die Entmistung unter den Spalten erfolgte täglich. Bei den anderen beiden Betrieben erfolgte das Ablassen der Gülle aus dem Kanal unter den Spalten des Auslaufs regelmäßig und bei Bedarf.

Ferner unterschieden sich die Ställe der beiden Varianten bezüglich der baulichen Gestaltung der Auslaufüberdachung. Der Überdachungsanteil der Ausläufe variierte von 50 bis 100%. Ein Betrieb hatte als bauliche Alternative zur Auslaufüberdachung ein Sonnensegel angebracht.

Für die Varianten „Plan“ bzw. „Spalte“ wurden jeweils vier repräsentative Praxisställe ausgesucht und in den Ausläufen die Ammoniakemissionen ermittelt. Die Lage der Betriebe ist in Abbildung 1 gezeigt.



Abbildung 1: Standorte der 8 untersuchten Mastschweine­ställe in Deutschland

Die Fütterung der Mastschweine war in allen Betrieben 1- bis 3-phasig und entsprach den Fütterungsempfehlungen nach DLG (2021). Es kann daher bei ähnlichen tierischen Leistungen von vergleichbaren Mengen an Stickstoff(N)-Ausscheidungen je Mastschwein ausgegangen werden.

Die Messungen wurden von 2019 bis 2021 durchgeführt. Zusammenfassende Informationen zu den untersuchten Betrieben sind in den Tabellen 1 und 2 aufgeführt.

Tabelle 1: Übersicht der untersuchten Mastschweine­ställe für die Variante „Plan“

Merkmal	Bezugs­einheit	Variante „Plan“ Betriebe			
		P1	P2	P3	P4
<b>Gebäude und Tiere</b>					
Baujahr	Jahr	2006, Umbau 2015	2000	2016	2006
Tierplätze (TP)	Anzahl	204	120	200	600
Rasse	-	Hybrid x Pietrain	Hybrid x Pietrain x Duroc	Dt. Hybrid x Pietrain	90% CH LR <sup>1)</sup> x Pietrain; 10% Duroc x Iberico
Mastverfahren		rein-raus	rein-raus	kontinuierlich	kontinuierlich
Belegzeit im Stall	Tage	345	345	365	365
Fläche/TP gesamt <sup>2)</sup>	m <sup>2</sup>	2,4	1,6	1,1	1,7

Fortsetzung der Tabelle auf nächster Seite

Merkmal	Bezugs- einheit	Variante „Plan“ Betriebe			
		P1	P2	P3	P4
<b>Auslauf</b>					
Bodengestaltung Auslauf	-	planbefestigt mit Einstreu	planbefestigt mit Einstreu	planbefestigt mit Einstreu	planbefestigt mit Einstreu
Fläche/Tier Auslauf MW <sup>3)</sup>	m <sup>2</sup>	1,3	0,8	0,5	0,7
Anordnung Auslauf am Gebäude	-	einseitig	einseitig	einseitig	beidseitig
Anteil Überdachung	%	50	100	100	100
<b>Management</b>					
Einstreu Bucht im Stall <sup>4)</sup>	-	komplett eingestreut	Minimaleinstreu	Minimaleinstreu	Minimaleinstreu
Einstreu Auslauf	-	50% eingestreut	komplett eingestreut	komplett eingestreut	komplett eingestreut
Art der Einstreu	-	Stroh	Stroh	Stroh	Stroh
Bodenreinigung Auslauf	-	Hofschlepper	Hofschlepper	Hofschlepper	Hofschlepper
Reinigungsfrequenz	-	3-mal wöchentlich	2-mal wöchentlich	2-mal wöchentlich	2-mal wöchentlich
Art des Futters/ Anzahl Phasen	-	Trockenfutter/ 1	Breifutter/ 2	Trockenfutter/ 1	Trockenfutter/ 3
<b>Mittlere Jahresemissionsraten</b>					
NH <sub>3</sub> -N	kg TP <sup>-1</sup> a <sup>-1</sup>	4,2	3,5	3,8	1,4

<sup>1)</sup> Landrasse. <sup>2)</sup> Bezogen auf die Anzahl genehmigter Tierplätze. <sup>3)</sup> Mittelwert über alle Messwochen (MW).

<sup>4)</sup> Minimaleinstreu = Beschäftigungsmaterial.

Tabelle 2: Übersicht der untersuchten Mastschweineeställe für die Variante „Spalte“

Merkmal	Bezugs- einheit	Variante „Spalte“ Betriebe			
		S1	S2	S3	S4
<b>Gebäude und Tiere</b>					
Baujahr	Jahr	2017	Stall 1: 2017, Stall 2: 2019	Stall 1: 2016, Stall 2: 2020	2002; Umbau 2019
Tierplätze (TP)	Anzahl	408	995	1296	64
Rasse	-	Dt. Hybrid x Pie- train x Duroc	SH <sup>1)</sup> x Pietrain; BW Hybrid <sup>2)</sup> x Pietrain	Dt. Hybrid	db. Viktoria x Pietrain
Mastverfahren	-	kontinuierlich	kontinuierlich	kontinuierlich	rein-raus
Belegzeit im Stall	Tage	365	365	365	345
Fläche/TP gesamt <sup>3)</sup>	m <sup>2</sup>	1,7	1,3	1,2	1,6

Fortsetzung der Tabelle auf nächster Seite

Merkmal	Bezugs- einheit	Variante „Spalte“ Betriebe			
		S1	S2	S3	S4
<b>Auslauf</b>					
Bodengestaltung Auslauf	-	50% plan- befestigt mit Einstreu; 50% Spalte	Spalte	Spalte	Spalte
Fläche/Tier Auslauf MW <sup>4)</sup>	m <sup>2</sup>	1,1	0,4	0,5	0,6
Anordnung Auslauf am Gebäude	-	einseitig	einseitig	einseitig	einseitig
Anteil Überdachung	%	75	50	0 <sup>5)</sup>	100
<b>Management</b>					
Einstreu Bucht im Stall <sup>6)</sup>	-	Minimaleinstreu Liegekiste	Minimaleinstreu Liegekiste	Minimaleinstreu Liegekiste	Minimaleinstreu Liegekiste
Einstreu Auslauf	-	planbefestigter Teil eingestreut	-	-	-
Art der Einstreu	-	Stroh	Stroh	Stroh	Stroh
Bodenreinigung Auslauf	-	Hofschlepper planbefestigt/ Unterflurschieber Spalte	manuell oberflur; Unterflurschieber	manuell oberflur; Güllekanal nach Durchgang	manuell oberflur; Güllekanal nach Durchgang
Reinigungsfrequenz	-	eingestreuter Be- reich: 1-mal wöchentlich Unterflur- schieber: 1-mal täglich	oberflur: nach Bedarf; Unterflur- schieber: 2-mal täglich	nach Bedarf	oberflur: 1-mal täglich
Art des Futters/ Anzahl Phasen	-	Breifutter/ 2	Breifutter/ 2	Trockenfutter/ 3	Trockenfutter/ 2
<b>Mittlere Jahresemissionsraten</b>					
NH <sub>3</sub> -N	kg TP <sup>-1</sup> a <sup>-1</sup>	3,5	1,4	2,1	0,9

<sup>1)</sup> Schwäbisch-Hällische. <sup>2)</sup> Baden-Württembergisches Hybridschwein <sup>3)</sup> Bezogen auf die Anzahl genehmigter Tierplätze. <sup>4)</sup> Mittelwert über alle Messwochen (MW). <sup>5)</sup> Sonnensegel über gesamtem Auslauf. <sup>6)</sup> Minimaleinstreu = Beschäftigungsmaterial

## Berechnung von „Total Ammonical Nitrogen“ in den Ausscheidungen

„Total Ammonical Nitrogen“ (TAN = NH<sub>3</sub>-N + NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N) bezeichnet den potenziell schnell in ammoniakalischen Stickstoff umsetzbaren Stickstoffanteil in den Ausscheidungen, d. h. auch Harnstoff in den Exkrementen. Die Berechnung der Menge an TAN in der Ausscheidung erfolgte nach KTBL (2014). Hierbei wird in einem Stoffflussmodell der aufgenommene Futterstickstoff in Abhängigkeit von Verdaulichkeit und tierischer Leistung dem durch Harn und Kot ausgeschiedenen Stickstoff zugeordnet. Unter Verwendung von TAN-Anteilen in den Exkrementen (5–20% TAN im Kot bzw. 60–95% TAN im Harn bezogen auf den jeweiligen Gesamtstickstoffgehalt) können in Abhängigkeit von Fütterungsregime und tierischer Leistung mittlere TAN-Gehalte in den Exkrementen berechnet werden. Für die hier untersuchten Mastverfahren betragen die berechneten TAN-Anteile an der Gesamt-N-Ausscheidung ca. 76%. Die EEA (2019) geht von einem mittleren TAN-Anteil von ca. 70% aus.

### Emissionsmessungen in frei gelüfteten Ausläufen

An jedem Standort wurden in mindestens sechs Messwochen, verteilt über das Jahr, Emissionsmessungen im Auslauf durchgeführt. Für die Messungen wurde ein standardisiertes Messprotokoll mit einheitlichen Messroutinen in Anlehnung an VERA (2018) angewandt.

Die Ventilations- und Emissionsraten der Ausläufe wurden mit der Tracer-Ratio-Methode bestimmt (VERA 2018). Die Zudosierung des Tracers sowie die Gasprobennahme zur Bestimmung von  $\text{NH}_3$  und  $\text{SF}_6$  wurde nur im Auslaufbereich vorgenommen (Abbildung 2). Während der Untersuchungen wurde im Auslauf ein Tracergas (hier Schwefelhexafluorid,  $\text{SF}_6$ ) mit konstantem Volumenstrom zudosiert. Diese Zudosierung erfolgte in der Auslaufbucht an den Gitterabtrennungen im Bodenbereich über Düsen, die so angebracht waren, dass sie von den Mastschweinen nicht beschädigt wurden. Aufgrund unterschiedlicher baulicher Gegebenheiten und Managementroutinen der Betriebe war eine individuelle Anpassung der Dosiertechnik erforderlich. Im Messraum der freigelüfteten Ausläufe wurde über den Zudosierungspunkten des Tracergases Luft über eine Sammelleitung in ca. 1,8 m Höhe angesaugt (Abbildung 2) und zu einer Mischprobe vereint. Die Konzentration des Tracergases wurde mittels GC-ECD, die Ammoniakkonzentration mit einem FTIR bestimmt. Die Messung der Tracergaskonzentration erfolgte in der Regel alle 20 Minuten. Die Bestimmung der Ammoniakkonzentration in der Umgebungsluft (Hintergrundkonzentration) erfolgte mit Passivsammlern und nachfolgender nasschemischer Analyse. Die Verschmutzung des Bodens im Innen- und im Außenbereich der Ställe wurde während der Messwochen regelmäßig bonitiert und fotografisch dokumentiert.

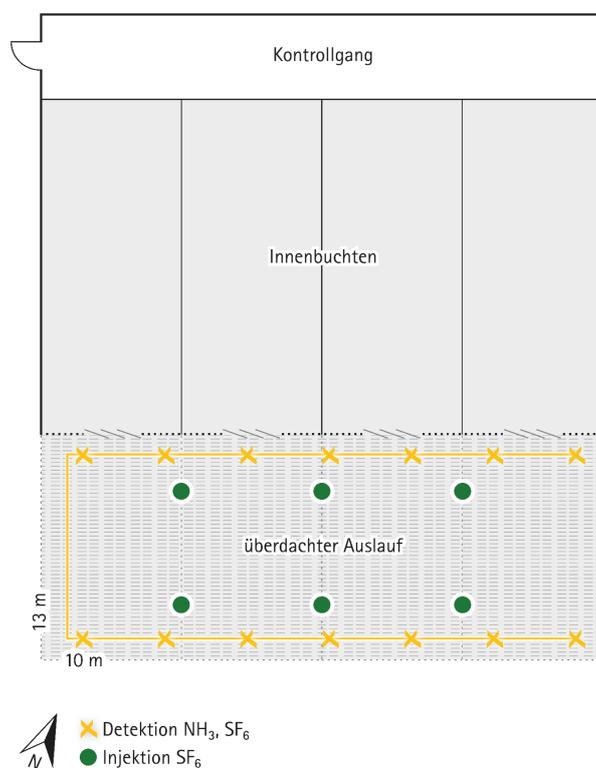


Abbildung 2: Schematischer Messaufbau für einen Betrieb der Variante „Spalte“. Im Bereich des (überdachten) Auslaufs erfolgte die bodennahe Zudosierung des Tracergases  $\text{SF}_6$  (grüne Punkte), die Probennahme zur Konzentrationsbestimmung von  $\text{SF}_6$  und  $\text{NH}_3$  erfolgte in dem darüberliegenden Messraum mittels Sammelleitung (gelb markiert).

Meteorologische Daten (Temperatur, Luftfeuchte, Windgeschwindigkeit, Windrichtung etc.) wurden mit einer Wetterstation in Stallnähe erhoben. Nach Qualitätsprüfung und Plausibilisierung aller erhobenen Daten erfolgte in einer Datenbankanwendung eine zeitliche Zuordnung (maximal eine Minute Abweichung) der gemessenen Gaskonzentrationen ( $\text{NH}_3$ ) im Auslauf mit den Zudosierungsraten des Tracergases ( $\text{SF}_6$ ).

### Berechnung von Emissions- und Ventilationsraten

Die Berechnung der Volumenströme und der  $\text{NH}_3$ -Emissionsraten erfolgte auf Basis der Massenbilanzgleichung der Tracer-Ratio-Methode und ist exemplarisch für die Bezugseinheit  $\text{m}^3 \text{h}^{-1}$  (Volumenstrom) bzw.  $\text{g h}^{-1}$  (Emissionsrate) in Gleichung 1a und 1b dargestellt:

$$VR = \frac{E_{\text{SF}_6}}{\Delta C_{\text{SF}_6}} \quad (\text{Gl. 1a})$$

$$E_{\text{NH}_3} = \frac{\Delta C_{\text{NH}_3}}{\Delta C_{\text{SF}_6}} \cdot E_{\text{SF}_6} \quad (\text{Gl. 1b})$$

mit

$E_{\text{NH}_3}$  = Emissionsrate  $\text{NH}_3$  in  $\text{g h}^{-1}$

$E_{\text{SF}_6}$  = Emissionsrate  $\text{SF}_6$  in  $\text{g h}^{-1}$

$\Delta C_{\text{NH}_3}$  =  $\text{NH}_3$ -Konzentrationsdifferenz (Auslaufluft - Hintergrund) in  $\text{g m}^{-3}$

$\Delta C_{\text{SF}_6}$  =  $\text{SF}_6$ -Konzentrationsdifferenz (Auslaufluft - Hintergrund) in  $\text{g m}^{-3}$

VR = Ventilationsrate in  $\text{m}^3 \text{h}^{-1}$

Die Berechnung der Emissionsfaktoren ist in Gleichung 2 exemplarisch für die Bezugseinheit „Tierplatz und Jahr“ dargestellt:

$$EF_{\text{NH}_3} = \frac{E_{\text{NH}_3(\text{TP},a)}}{\text{TAN-Menge}} \quad (\text{Gl. 2})$$

mit

$EF_{\text{NH}_3(\text{TP},a)}$  = Emissionsfaktor, dimensionslos ( $0 \leq EF_{\text{NH}_3(\text{TP},a)} \leq 1$ )

$E_{\text{NH}_3(\text{TP},a)}$  = Emissionsrate in  $\text{kg NH}_3\text{-N TP}^{-1} \text{a}^{-1}$

TAN-Menge = Menge an TAN im Exkrementanfall in  $\text{kg TAN}_{\text{excr}} \text{TP}^{-1} \text{a}^{-1}$

Als Hintergrundkonzentrationen wurden die über den jeweiligen Messzeitraum gemittelten Ammoniakkonzentrationen aus den Passivsammlern verwendet. Da  $\text{SF}_6$  normalerweise in der Umgebungsluft kaum nachzuweisen ist (ca. 10 ppt Stoffmengenanteil, NOAA 2023) und Voruntersuchungen zeigten, dass die  $\text{SF}_6$ -Konzentrationen unterhalb der Nachweisgrenze lagen, wurde die  $\text{SF}_6$ -Konzentration der Umgebungsluft als null angenommen.

Um unterschiedliche Witterungsbedingungen, insbesondere Temperaturbereiche, im Jahresverlauf abbilden zu können, erfolgten die Messungen mehrfach über das Jahr verteilt in allen Jahreszeiten. Außerdem wurden die Messperioden so gelegt, dass verschiedene Abschnitte der Mastzyklen, d. h. unterschiedliche Tiermassen, erfasst wurden.

Die Berechnungsergebnisse der Einzelmesszeitpunkte wurden zunächst zu arithmetischen Stundenmittelwerten aggregiert. Zur Berechnung der Jahreswerte für die Emissionsraten erfolgte eine Gewichtung der Stundenmittelwerte auf Basis der Häufigkeiten der langjährigen Temperaturstundenmittelwerte von einer dem jeweiligen Untersuchungsstandort nahegelegenen Wetterstation (DWD 2020). Ergänzend erfolgte eine Gewichtung der berechneten  $\text{NH}_3$ -Emissionsraten auf eine mittlere Lebendmasse der Mastperiode der Tiere von 67 kg auf Basis einer sigmoidalen Wachstumskurve für die Mastperiode. Des Weiteren wurden die jeweiligen Belegzeiten im Stall bei der Berechnung der Jahresemissionsraten proportional berücksichtigt. Die ermittelten  $\text{NH}_3$ -Emissionsraten aus dem Auslauf wurden für das gesamte Haltungsverfahren „Außenklimastall mit Auslauf“ verwendet.

Die für Temperatur und Lebendmasse gewichteten Jahresmittelwerte der  $\text{NH}_3$ -Emissionsraten der jeweiligen Standorte wurden in die Varianten „Plan“ und „Spalte“ gruppiert. Die Prüfung auf signifikante Unterschiede zwischen den Varianten erfolgte nach Varianzanalyse (ANOVA) mit einfachem t-Test.

### Emissionsmessungen bei zwangsgelüfteten, geschlossenen Ställen

Die Berechnung von mittleren jährlichen  $\text{NH}_3$ -Emissionsraten aus zwangsgelüfteten Ställen in Norddeutschland erfolgte auf Basis von Daten zur Überprüfung der Abluftreinigungsanlagen der LUFÄ Nord-West. Die Volumenstromerfassung sowie die  $\text{NH}_3$ -Konzentrationsmessungen der Luft wurden in den Abluftkaminen der geschlossenen Ställe durchgeführt. Angaben zu Fütterung, Haltungsform und Anzahl der Tiere während der Messungen sind Tabelle 3 zu entnehmen. Das Platzangebot pro Tier entsprach mit  $0,75 \text{ m}^2$  den Mindestanforderungen der Tierschutz-Nutztierhaltungsverordnung. Die Sommer- und Winterluftraten lagen gemäß DIN EN 18910 je nach mittlerem Tiergewicht bei 36 bis  $98 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1} \text{ Tier}^{-1}$  bzw. 14 bis  $51 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1} \text{ Tier}^{-1}$ . Insgesamt konnten die Datensätze von 8 Standorten im Zeitraum zwischen 2005 und 2017 für verschiedene Jahreszeiten mit über 22.000 Einzelmesswerten ausgewertet werden.

Tabelle 3: Übersicht der untersuchten zwangsgelüfteten, geschlossenen Mastschweinställe

Merkmal	Betrieb							
	1	2	3	4	5	6	7	8
Anzahl Tiere <sup>1)</sup>	312	1.158	3.740	520	1.276	1.512	189	960
Mastverfahren	rein-raus	kontinuierlich	rein-raus	kontinuierlich	rein-raus	rein-raus	rein-raus	kontinuierlich
Anzahl Fütterungsphasen	2	3	2	2	6	2	2	3
RAM <sup>2)</sup> -Fütterung	k. A. <sup>3)</sup>	ja	k. A. <sup>3)</sup>	k. A. <sup>3)</sup>	ja	k. A. <sup>3)</sup>	k. A. <sup>3)</sup>	ja
Mittlere jährliche $\text{NH}_3$ -N-Emissionsrate in $\text{kg TP}^{-1} \text{ a}^{-1}$	2,9	3,3	2,1	2,6	2,3	3,8	2,4	2,8

<sup>1)</sup> Zum Zeitpunkt der Messungen. <sup>2)</sup> RAM = rohprotein- und phosphorarmes Mastfutter. <sup>3)</sup> k. A. = keine Angabe.

Über die gemessenen  $\text{NH}_3$ -Konzentrationen im Rohgas und dem direkt mit Messventilatoren ermittelten Volumenstrom wurden die  $\text{NH}_3$ -Frachten errechnet. Anschließend erfolgte unter Einbeziehung der Anzahl der Masttage pro Jahr, der Tierzahl zum Zeitpunkt der Messung und des mittleren Tiergewichts die Berechnung der  $\text{NH}_3$ -Emissionsraten ( $\text{kg NH}_3\text{-N TP a}^{-1}$ ). Dabei wurden für alle Betriebe 330 Masttage pro Jahr angenommen. Um die Vergleichbarkeit der unterschiedlichen Betriebe zu erzielen, wurde außerdem eine Gewichtsnormierung auf eine mittlere Lebendmasse von 67 kg vorgenommen.

## Ergebnisse

### Ammoniakemissionen – frei gelüftete Ställe mit Auslauf

Zur Darstellung der  $\text{NH}_3$ -Emissionsraten der Einzelmessungen wurden die Stundenmittelwerte auf Jahreswerte hochgerechnet. Diese variieren sowohl zwischen den einzelnen Betrieben als auch innerhalb der Messwochen (Abbildung 3). Dies ist einerseits bedingt durch verschiedene Reinigungsregime und Verschmutzungsgrade der Ausläufe, andererseits durch die unterschiedlichen Temperaturbedingungen und Lebendmassen im Jahresverlauf.

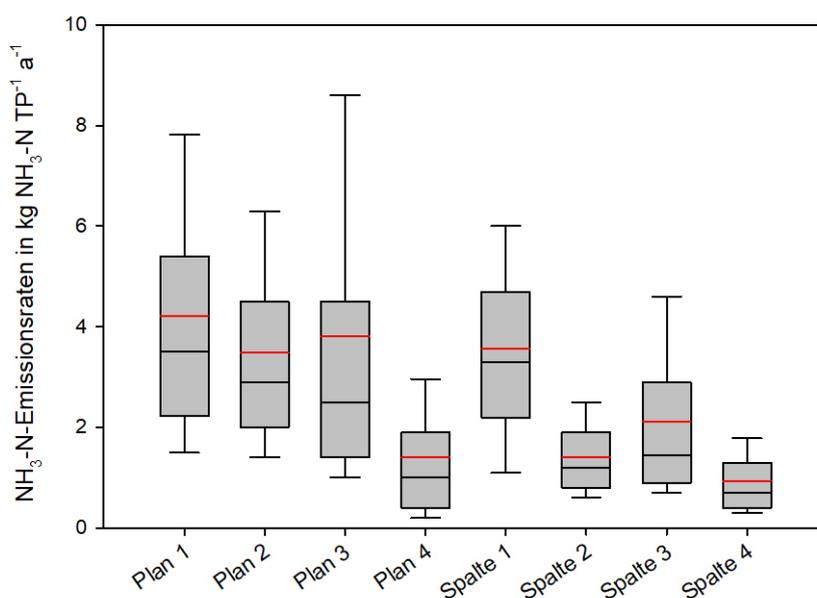


Abbildung 3: Ammoniakemissionsraten ( $\text{kg NH}_3\text{-N TP}^{-1} \text{a}^{-1}$ ) für die untersuchten Varianten „Plan“ und „Spalte“ berechnet auf Basis von ungewichteten Stundenmittelwerten. Die rote und die schwarze Linie kennzeichnen das arithmetische Mittel bzw. den Median (TP = Tierplatz).

In Tabelle 4 sind die verwendeten Bezugseinheiten und Bezugswerte aufgeführt. Wie zu entnehmen, kann bei Mastschweinen von einer mittleren N-Ausscheidung von  $11,0 \text{ kg TP}^{-1} \text{a}^{-1}$  ausgegangen werden.

Tabelle 4: Verwendete Bezugseinheiten und Bezugswerte für die Ergebnisse der Mastschweineställe mit Auslauf

	Bezugseinheit	Bezugswert
Mittlere Tiermasse Mastschwein (LM = Lebendmasse) über Mastperiode	kg LM	67
Großvieheinheit (GV)	kg LM	500
1 Mastschwein = 1 Tierplatz (TP)	GV	0,1336
Mittlere Zuwachsrates Mastschwein	g LM d <sup>-1</sup>	791
Mittlere TAN-Menge in Exkrementen	kg TAN <sub>excr</sub> TP <sup>-1</sup> a <sup>-1</sup>	8,5
Mittlere N-Ausscheidung	kg N TP <sup>-1</sup> a <sup>-1</sup>	11,0
Anzahl Betriebe mit Auslauf	n	8

Die berechneten mittleren temperatur- und lebendmassegewichteten jährlichen  $\text{NH}_3$ -Emissionsraten sind in Tabelle 5 aufgeführt. Die Emissionsraten betragen für die Variante „Plan“  $3,2 \text{ kg NH}_3\text{-N TP}^{-1} \text{ a}^{-1}$ , für die Variante „Spalte“  $2,0 \text{ kg NH}_3\text{-N TP}^{-1} \text{ a}^{-1}$ . Zwischen den beiden Varianten konnte kein statistisch signifikanter Unterschied für die gewichteten jährlichen  $\text{NH}_3$ -Emissionsraten nachgewiesen werden (Tabelle 5). Der Mittelwert aus beiden Varianten beträgt  $2,6 \text{ kg NH}_3\text{-N TP}^{-1} \text{ a}^{-1}$  (Tabelle 6).

Tabelle 5: Temperatur- und lebendmassegewichtete jährliche  $\text{NH}_3$ -Emissionsraten der Untersuchungsvarianten „Plan“ und „Spalte“. Emissionsraten mit denselben Buchstaben unterscheiden sich nicht signifikant (t-Test,  $p > 0,05$ ; TP = Tierplatz)

Variante	Emissionsrate $\text{kg NH}_3\text{-N TP}^{-1} \text{ a}^{-1}$
Plan	3,2 <sup>a</sup>
Spalte	2,0 <sup>a</sup>

Wie aus Tabelle 6 zu entnehmen, beträgt der mittlere  $\text{NH}_3$ -N-Emissionsfaktor der beiden Varianten bezogen auf die berechneten TAN-Menge  $0,31 \text{ kg NH}_3\text{-N kg TANexcr}^{-1}$ .

Tabelle 6: Mittelwert, Standardabweichung und Median der temperatur- und lebendmassegewichteten  $\text{NH}_3$ -N-Emissionsraten und  $\text{NH}_3$ -N-Emissionsfaktoren berechnet für alle untersuchten Mastschweineställe mit Auslauf („Plan“ + „Spalte“;  $n = 8$ )

	$\text{NH}_3\text{-N-Emissionsraten in kg a}^{-1}$		$\text{NH}_3\text{-N-Emissionsfaktoren bezogen auf}$	
	GV	TP	TAN-Menge in Exkrementen (TANexcr)	N-Menge in Exkrementen (Nexcr)
Mittelwert (arithmetisch)	19,9	2,6	0,31	0,24
Standard- abweichung	9,9	1,3	0,15	0,12
Median	21,0	2,8	0,32	0,25

### Ammoniakemissionen – geschlossene, zwangsgelüftete Mastschweineställe

In Tabelle 7 sind die verwendeten Bezugseinheiten und Bezugswerte für die untersuchten geschlossenen Ställe mit Zwangsbelüftung aufgeführt.

Tabelle 7: Verwendete Bezugseinheiten und Bezugswerte für die Ergebnisse der zwangsgelüfteten, geschlossenen Mastschweineställe

	Bezugseinheit	Bezugswert
Mittlere Tiermasse Mastschwein über Mastperiode (LM = Lebendmasse)	kg LM	67
Großvieheinheit (GV)	kg LM	500
1 Mastschwein = 1 Tierplatz (TP)	GV	0,1336
Anzahl Betriebe mit Vollspalten	n	8

Wie aus Tabelle 8 zu entnehmen, beträgt die berechnete mittlere lebendmassegewichtete jährliche  $\text{NH}_3$ -Emissionsrate  $2,8 \text{ kg NH}_3\text{-N TP}^{-1} \text{ a}^{-1}$  (mittlere Tiermasse über die Mastperiode:  $67 \text{ kg Lebendmasse}$ ). Genaue Daten für die mittlere tägliche Zuwachsrates ( $\text{g LM d}^{-1}$ ), die mittlere jährliche N-Ausscheidung ( $\text{kg N TP}^{-1} \text{ a}^{-1}$ ) und die mittlere jährliche TAN-Ausscheidung in den Exkrementen

(kg TAN<sub>excr</sub> TP<sup>-1</sup> a<sup>-1</sup>) lagen für die Betriebe nicht vor. Es ist davon auszugehen, dass die Kennwerte des Produktionsverfahrens im Bereich eines Standardmastvorgangs lagen.

Tabelle 8: Mittelwert, Standardabweichung und Median der temperatur- und lebendmassegewichteten NH<sub>3</sub>-N-Emissionsraten und NH<sub>3</sub>-N-Emissionsfaktoren berechnet für alle untersuchten zwangsgelüfteten, geschlossenen Mastschweineeställe (n = 8)

	NH <sub>3</sub> -N-Emissionsraten in kg a <sup>-1</sup>	
	GV	TP
Mittelwert (arithmetisch)	21,0	2,8
Standardabweichung	3,7	0,5
Median	20,2	2,7

## Diskussion

Die berechnete mittlere jährliche NH<sub>3</sub>-Emissionsrate der Haltungssysteme mit Auslauf liegt mit 2,6 kg NH<sub>3</sub>-N TP<sup>-1</sup> a<sup>-1</sup> zwischen der nach VDI (2011) ausgewiesenen Emissionsrate von 3 kg NH<sub>3</sub>-N TP<sup>-1</sup> a<sup>-1</sup> für zwangsgelüftete Ställe mit Vollspaltenböden und der Emissionsrate von Außenklimaställen ohne Auslauf von 2 kg NH<sub>3</sub>-N TP<sup>-1</sup> a<sup>-1</sup>. Die Emissionsraten nach VDI (2011) sind als Konventionenwerte zu verstehen, da die Emissionsrate für Außenklimaställe auf Basis von Untersuchungen u. a. von Niebaum (2001) an Außenklimaställen ohne Ausläufe (Emissionsraten von 1,3 bzw. 1,9 kg NH<sub>3</sub>-N TP<sup>-1</sup> a<sup>-1</sup> bei 330 Stalltagen) abgeleitet wurde. In der Genehmigungspraxis werden Ställe mit Auslauf momentan mit einem Aufschlag von 30 % zu dem entsprechenden VDI-Wert versehen (LANDESAMT FÜR UMWELT BRANDENBURG 2020).

Der Vergleich der Konventionenwerte nach VDI (2011) mit den Ergebnissen der EmiDaT-Untersuchungen ist nur bedingt möglich, da sich die Emissionsraten auf unterschiedliche Bilanzierungsräume bzw. Haltungsverfahren beziehen: geschlossene, zwangsgelüfteten Ställe ohne Auslauf (3 kg NH<sub>3</sub>-N TP<sup>-1</sup> a<sup>-1</sup>; VDI 2011) sowie Außenklimaställe ohne Auslauf (2 kg NH<sub>3</sub>-N TP<sup>-1</sup> a<sup>-1</sup>, VDI 2011). Die Ergebnisse der hier präsentierten Studie beziehen sich aber auf das Haltungssystem „Stall mit freigelüftetem Auslauf“.

Ergänzend zu den dargestellten NH<sub>3</sub>-Emissionsraten ermöglicht die Angabe der NH<sub>3</sub>-N-Emissionen als Emissionsfaktoren bezogen auf die mittlere N- bzw. TAN-Ausscheidung pro Tier bzw. Tierplatz und Zeiteinheit (Tabelle 3) deren Verwendung im Rahmen von Emissionsinventaren (DÄMMGEN et al. 2010, EEA 2019, SOMMER et al. 2019) oder zur betriebsindividuellen Abschätzung von Ammoniakemissionen.

## Ammoniakemissionen – Temperatureinfluss

Ammoniakemissionen unterliegen einer natürlichen Dynamik, abhängig von äußeren Faktoren wie der Anfallmenge an Kot und Harn, der Ausbreitung oder flächigen Verbreitung der Exkremente, der oberflächlichen Luftströmung, der Temperatur etc. Auf Tierhaltungsbetrieben hat neben den vorher genannten Faktoren und den baulichen Faktoren, wie Flächengrößen oder Bodengestaltung, auch das Stallmanagement einen Einfluss auf die NH<sub>3</sub>-Emissionen.

Der Einfluss der Temperatur auf die NH<sub>3</sub>-Freisetzung ist eingehend untersucht (HEMPEL et al. 2016, MONTENY 2000, NI 1999, SANCHIS et al. 2019, YE et al. 2011). Höhere Luft- und insbesondere Oberflächentemperaturen begünstigen NH<sub>3</sub>-Emissionen (YE et al. 2011, MONTENY 2000). In der

vorliegenden Studie konnte dieser Temperatureffekt jedoch nicht bei allen untersuchten Betrieben eindeutig nachgewiesen werden. Ursache hierfür war vermutlich vor allem das Betriebsmanagement (Tabelle 1 und 2), das den Einfluss der Temperatur auf die gemessenen  $\text{NH}_3$ -Emissionen überlagerte.

Unter der Annahme, dass die (Außen-)Lufttemperatur vor allem die Temperatur der Harnpfützen und des im Stroh gebundenen Harns beeinflusst, wurden die Stundenmittelwerte auf Basis der Häufigkeiten der langjährigen Temperaturstundenmittelwerte von einer dem jeweiligen Untersuchungsstandort nahegelegenen Wetterstation normiert (DWD 2020). Dadurch werden zu häufige Messungen an überdurchschnittlich warmen Tagen im Vergleich zum langjährigen Mittel weniger stark gewichtet. Dies führt zu realistischeren Ergebnissen bezogen auf die Gesamtjahremissionen an Ammoniak.

### Ammoniakemissionen – Einfluss der Auslauffläche

Die Ausläufe der acht untersuchten Ställe mit Auslaufflächen von 0,4 bis 1,3  $\text{m}^2$  pro Tier wurden messtechnisch erfasst. Die regelmäßig durchgeführte Verschmutzungsbonitur der Buchten im Auslauf und im Stallgebäude zeigte, dass die Tiere Kot und Harn nahezu ausschließlich im Auslauf absetzen (Abbildung 4 und 5). Der Beitrag von Ammoniakemissionen aus den Stallgebäuden ist daher bei den untersuchten Ställen als gering einzustufen. Die ermittelten Ammoniakemissionsraten aus dem Auslauf wurden somit für das gesamte Haltungsverfahren „Stall mit frei gelüftetem Auslauf“ verwendet.



Abbildung 4: Außenauslauf als planbefestigte Bucht mit Stroheinstreu der Variante „Plan“; der Kotplatz ist am Gitter zur Nachbarbucht im Auslauf angelegt (© KTBL)

In der Regel verschmutzen die Tiere nicht den gesamten Auslauf, sondern legen einen Kotplatz an (Abbildung 4). Diese räumlich begrenzte Verschmutzung der Auslaufflächen wurde mehrfach beschrieben (MIELKE et al. 2015, GILHESPY et al. 2009, Ivanova-Peneva 2008). Insbesondere bei längsrechteckigen Ausläufen konnte die Trennung von Liege- und Kot- bzw. Urinier- und Aktivitätsbereich beobachtet werden. Ammoniak wird aus dem Harnstoff in den Exkrementen, insbesondere Urin, unter Einwirkung des Enzyms Urease gebildet. Das Anlegen von Kotplätzen spielt daher eine entscheidende Rolle für die zu erwartende Wirkung bezüglich  $\text{NH}_3$ -Emissionsminderung. Durch das Anlegen von Kot-/Urinierbereichen wird die potenziell emittierende Fläche mit Urinpfützen auch bei

größeren Ausläufen begrenzt, wodurch die Emissionen im Vergleich zur ganzflächigen Verschmutzung mit Urinpfüten vermindert werden. Für die untersuchten Mastschweinställe konnte daher kein linearer Zusammenhang zwischen der jeweiligen Größe des Auslaufs und der  $\text{NH}_3$ -Emissionsrate ermittelt werden. Auch AARNINK et al. (2015) fanden in einer Untersuchung von Mastschweinställen mit verschiedenen Auslaufgrößen keinen Zusammenhang zwischen  $\text{NH}_3$ -Emissionen und zur Verfügung stehender Stallfläche je Tier. Insgesamt kommt der verschmutzten Fläche hinsichtlich der  $\text{NH}_3$ -Emissionen eine entscheidende Rolle zu, da durch die oberflächliche Verschmutzung eine direkte  $\text{NH}_3$ -Freisetzung ermöglicht wird (AARNINK 2015). Das Management der Auslaufflächen ist daher von großer Bedeutung. Regelmäßige Reinigung und ein Trockenhalten der Flächen vermindert die  $\text{NH}_3$ -Freisetzung. Neben diesen Managementmaßnahmen kann eine Auslaufüberdachung helfen, die Flächen trocken zu halten.



Abbildung 5: Innenbereich als planbefestigte Bucht mit Stroheinstreu der Variante „Plan“ (© KTBL)

### Ammoniakemissionen – Einfluss von Bodengestaltung und Reinigung

Zwischen den Stall- bzw. Auslaufvarianten konnte kein statistisch signifikanter Unterschied hinsichtlich der mittleren jährlichen  $\text{NH}_3$ -Emissionsraten ermittelt werden (Tabelle 5). Die Streuung der  $\text{NH}_3$ -Emissionsraten der untersuchten Ställe lässt sich teilweise auf die Reinigungshäufigkeiten, insbesondere der Entmistungen, zurückführen.

Die Auslaufvariante „Spalte“ zeigt bei drei der vier untersuchten Ställe eine  $\text{NH}_3$ -Emissionsrate die im Bereich der Außenklimaställe ohne Auslauf nach VDI (2011) liegt. Aber auch bei der Variante „Plan“ gibt es einen Betrieb, der diese niedrige Emissionsrate erreicht. Durch konsequentes Einstreu- und Reinigungsmanagement in Kombination mit einer Harnableitung können die  $\text{NH}_3$ -Emissionen auch in eingestreuten Auslaufsystemen niedrig gehalten werden.

Grundsätzlich verringert eine regelmäßige Reinigung verschmutzter Bereiche, also das Entfernen von Kot und Harn, potenzielle  $\text{NH}_3$ -Emissionsquellen. Bei planbefestigten, eingestreuten Bereichen ist die Verwendung ausreichender Mengen an Einstreu ebenfalls entscheidend (GILHESPY et al. 2009, MISSELBROOK und POWELL 2005). Laut KTBL (2014) liegt die empfohlene Einstreumenge zur vollständigen Bindung des Harns bei Mastschweinen in Abhängigkeit der Tageszunahme bei 0,8 bis 1,0 kg

TP<sup>-1</sup> d<sup>-1</sup>. Dieser Wert ist als Mittel über die Mastperiode zu verstehen. Auf der Kontrolle der Einstreumenge liegt beim Betriebsmanagement daher ein besonderer Fokus.

Einstreumaterialien können die NH<sub>3</sub>-Emissionen auf verschiedene Weise beeinflussen. Zum einen ist die physikalische Struktur des Einstreumaterials wichtig, da diese das Ausmaß beeinflusst, in dem Urin durch die Einstreu adsorbiert wird. Zum anderen werden Emissionen verringert, wenn die Urinstellen durch eine Einstreuschicht vor Luftturbulenzen geschützt sind und die dadurch entstehenden längeren Diffusionswege die Gasübertragung an die Einstreuoberfläche vermindern. Wenn die Urinstellen jedoch die Oberfläche der Einstreu betreffen, kann die vergrößerte Oberfläche zu einem Anstieg der Emissionen führen.

Bei Ausläufen mit Spaltenboden wird durch das rasche Abfließen des Urins in den darunterliegenden Güllekanal eine kurzfristige Trennung der Exkremente in Kot und Harn gefördert. Dies führt zu einer trockeneren Bodenoberfläche, wodurch generell die NH<sub>3</sub>-Freisetzung verringert wird. Bei hohen Lufttemperaturen und starker Einstrahlung kann es durch die damit verbundene erhöhte Verdunstung zum Antrocknen und je nach Tierbesatz und Auslaufgröße zum Verstopfen der Spalten kommen. Folglich ist eine regelmäßige Reinigung der perforierten Oberfläche erforderlich. Weiterhin ist ein rascher Abtransport der Gülle unter den Spalten in ein externes, möglichst geschlossenes Güllelager zur Emissionsreduktion notwendig (CHOWDHURY et al. 2014). Eine Trennung von Kot und Harn unter den Spalten mit Harnrinnen und Unterflurschiebern kann als Emissionsminderungsmaßnahme in der Praxis angewendet werden (LACHANCE et al. 2005).

### **Ammoniakemissionen aus zwangsgelüfteten Ställen**

Durch die Auswertung der Messdaten aus geschlossenen, zwangsgelüfteten Ställen konnte der bisherige Konventionswert von 3 kg NH<sub>3</sub>-N TP<sup>-1</sup> a<sup>-1</sup> (VDI 2011) durch aktuelle Produktionsdaten überprüft und aktualisiert werden. Die ermittelte Emissionsrate von 2,8 kg NH<sub>3</sub>-N TP<sup>-1</sup> a<sup>-1</sup> zeigt einen Querschnitt verschiedener Fütterungsregime (Anzahl der Fütterungsphasen) und optional von rohprotein- und phosphorarmem Mastfutter (RAM-Fütterung). Eine Abschätzung der möglichen Auswirkung der Fütterung auf die Höhe der NH<sub>3</sub>-Emissionen konnte mangels Datengrundlage nicht durchgeführt werden.

### **Schlussfolgerungen**

Mit dem Projekt „EmiDaT“ wurde eine Datengrundlage zur Berechnung von NH<sub>3</sub>-Emissionsraten aus Ställen geschaffen, die auf einheitlichen Messmethoden und Auswerterroutinen beruht. Ziel dieser Datenerhebung war die Ermittlung des Status quo der NH<sub>3</sub>-Emissionen bei Haltungssystemen mit Auslauf für Mastschweine. Für die Praxisbetriebe konnte eine mittlere jährliche Emissionsrate berechnet werden. Allerdings konnten aufgrund des geringen Stichprobenumfangs einzelne Einflussgrößen auf die NH<sub>3</sub>-Emissionen, wie Reinigungshäufigkeit oder bauliche Gegebenheiten (z. B. Auslaufüberdachung), nicht näher untersucht werden. Mastschweinställe mit Auslauf, so wie im Projekt „EmiDaT“ untersucht, sind hinsichtlich NH<sub>3</sub>-Emissionsraten generell nicht schlechter zu bewerten als zwangsgelüftete Ställe. Die Datenauswertung von geschlossenen, zwangsgelüfteten Mastschweinställen mit aktuellen Produktionsbedingungen ergab etwas niedrigere NH<sub>3</sub>-Emissionsraten als die bisher verwendeten Konventionswerte.

## Literatur

- Aarnink, A. J. A.; Hol, J. M. G.; Nijieboer, G. M.; Mosquera, J. (2015): Ammoniakemissie uit varkenstallen met uitloop. Livestock Research Rapport 868, Wageningen
- Chowdhury, A.; Rong, L.; Feilberg, A.; Petersen, A. P. (2014): Review of ammonia emissions from a pig house slurry pit and outside storage: Effects of emitting surface and slurry depth. The Danish Environmental Protection Agency, Strandgade 29, Copenhagen
- Dämmgen, U.; Haenel, H.-D.; Rösemann, C.; Eurich-Menden, B.; Döhler, H. (2010): Derivation of TAN related ammonia emission factors in pig production. *Landbauforschung Volkenrode* 60(4), S. 241–248
- DLG (2021): DLG-Merkblatt 463: Fütterung und Tierwohl beim Schwein, Teil A: Futter, Fütterung und Faserstoffversorgung
- DWD (Climate Data Center) (2020): Vieljährige Stationsmittelwerte für die Klimareferenzperiode 1981–2010 für aktuellen Standort und Bezugsstandort. [https://opendata.dwd.de/climate\\_environment/CDC/observations\\_germany/climate/multi\\_annual/](https://opendata.dwd.de/climate_environment/CDC/observations_germany/climate/multi_annual/), Zugriff am 21.01.2020
- EEA (European Environment Agency) (2019): EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook: technical guidance to prepare national emission inventories. <https://doi.org/10.2800/293657>
- Gilhespy, S. L.; Webb, J.; Chadwick, D. R.; Misselbrook, T. H.; Kay, R.; Camp, V. et al. (2009): Will additional straw bedding in buildings housing cattle and pigs reduce ammonia emissions? *Biosystems Engineering* 102(2), pp. 180–189, <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2008.10.005>
- Hempel, S.; Saha, C. K.; Fiedler, M.; Berg, W.; Hansen, C.; Amon, B.; Amon, T. (2016): Non-linear temperature dependency of ammonia and methane emissions from a naturally ventilated dairy barn. *Biosystems Engineering* 145, pp. 10–21, <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2016.02.006>
- Ivanova-Peneva, S.; Aarnink, A. J. A.; Verstegen, M. W. A. (2008): Ammonia emission from organic housing systems with fattening pigs. *Biosystems Engineering* 99, pp. 412–422
- KTBL (2014): Festmist- und Jaucheanfall. *KTBL-Schrift* 502, Darmstadt, S. 30–46
- Lachance, I.; Godbout, S.; Lemay, S. P.; Larouche, J.-P.; Pouliot, F. (2005): Separation of Pig Manure Under Slats: to Reduce Releases in the Environment! ASAE Paper No. 054159, <https://doi.org/10.13031/2013.19914>
- Landesamt für Umwelt Brandenburg (2020): Ammoniakemissionsfaktoren Tierhaltungsanlagen: <https://mluk.brandenburg.de/sixcms/media.php/9/Ammoniakemissionsfaktoren-Tiere-Biogas-Wirtschaftsduenger.pdf>, Zugriff am 10.02.2022
- Mielke, G.; Bussemas, R.; Clauß, M.; Linke, S.; Weißmann, F.; Georg, H. (2015): Der Auslauf in der ökologischen Schweinemast: Verschmutzungsverteilung und Ammoniakemissionen. In: Am Mut hängt der Erfolg: Rückblicke und Ausblicke auf die ökologische Landbewirtschaftung, 13. Wissenschaftstagung Ökologischer Landbau, Eberswalde, S. 512–515
- Misselbrook, T. H.; Powell, J. M. (2005): Influence of Bedding Material on Ammonia Emissions from Cattle Excreta. *Journal of dairy science* 88(12), pp. 4304–4312, [https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(05\)73116-7](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(05)73116-7)
- Monteny, G. J. (2000): Modelling of ammonia emissions from dairy cow houses. IMAG report, Wageningen
- NOAA (2023): Trends in Atmospheric Sulfur Hexafluoride. National Oceanic & Atmospheric Administration, U.S. Department of Commerce, [https://gml.noaa.gov/ccgg/trends\\_sf6/](https://gml.noaa.gov/ccgg/trends_sf6/), Zugriff am 20. März 2023
- Ni, J. (1999): Mechanistic Models of Ammonia Release from Liquid Manure: A Review. *J. Agric. Engng Res.*, pp. 1–17
- Niebaum, A. (2001): Quantifizierung gasförmiger Emissionen aus quer gelüfteten Außenklimaställen für Mastschweine mit Hilfe der Tracergas-Technik. VDI-MEG 370, Dissertation, Georg-August-Universität Göttingen
- RL EU (2016): Richtlinie (EU) 2016/2284 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 14. Dezember 2016 über die Reduktion der nationalen Emissionen bestimmter Luftschadstoffe, zur Änderung der Richtlinie 2003/35/EG und zur Aufhebung der Richtlinie 2001/81/EG
- Sanchis, E.; Calvet, S.; Del Prado, A.; Estellés, F. (2019): A meta-analysis of environmental factor effects on ammonia emissions from dairy cattle houses. *Biosystems Engineering* 178, pp. 176–183, <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2018.11.017>

Sommer, S.G.; Webb, J.; Hutchings, N.D. (2019): New Emission Factors for Calculation of Ammonia Volatilization from European Livestock Manure Management Systems. *Frontiers in Sustainable Food Systems* 3, pp. 1–9, <https://doi.org/10.3389/fsufs.2019.00101>

VDI (2011): Emissionen und Immissionen aus Tierhaltungsanlagen – Haltungsverfahren und Emissionen Schweine, Rinder, Geflügel, Pferde. VDI Richtlinie 3894, Blatt 1

VERA (2018): VERA Test Protocol for Livestock Housing and Management Systems, Version 3:2018–09. [https://www.vera-verification.eu/app/uploads/sites/9/2019/05/VERA\\_Testprotocol\\_Housing\\_v3\\_2018.pdf](https://www.vera-verification.eu/app/uploads/sites/9/2019/05/VERA_Testprotocol_Housing_v3_2018.pdf), Zugriff am 15. Januar 2019

Ye, Z.; Zhu, S.; Kai, P.; Li, B.; Blanes-Vidal, V.; Pan, J. et al. (2011): Key factors driving ammonia emissions from a pig house slurry pit. *Biosystems Engineering* 108(3), pp. 195–203, <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2010.12.001>

## Autoren

**Dr. Ulrike Wolf, Dr. Brigitte Eurich-Menden, Gianna Dehler, Alexej Smirnov und Dr. Dieter Horlacher** sind wissenschaftliche Mitarbeiter am Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V., Bartningstr. 49, 64289 Darmstadt, E-Mail: [u.wolf@ktbl.de](mailto:u.wolf@ktbl.de)

## Danksagung

Die Förderung erfolgt aus Mitteln des Zweckvermögens des Bundes bei der Landwirtschaftlichen Rentenbank, Frankfurt am Main.

Wir danken den Mitgliedern der KTBL-Arbeitsgruppe „EmiDaT“ für die fachliche Unterstützung im Projekt. Weitere Informationen zum Projekt finden sich unter <https://www.ktbl.de/themen/emidat>.