

Open Access

Berl Münch Tierärztl Wochenschr
DOI 10.2376/0005-9366-19033

© 2020 Schlütersche
Verlagsgesellschaft mbH & Co. KG
ISSN 0005-9366

Korrespondenzadresse:
michaela.fels@tiho-hannover.de

Eingegangen: 04.10.2019
Angenommen: 19.12.2019

Online first: 30.01.2020
[http://vetline.de/open-access/
158/3216/](http://vetline.de/open-access/158/3216/)

Zusammenfassung

Summary

U.S. Copyright Clearance Center
Code Statement:
0005-9366/2020/19033 \$ 15.00/0

Institut für Tierhygiene, Tierschutz und Nutztierethologie, Stiftung Tierärztliche Hochschule Hannover¹
Institut für Boden und Umwelt, LUFA Nord-West, Oldenburg²

Luftverunreinigungen und Stallklima in einer Kaninchenzucht- und Mastanlage – Analyse möglicher Belastungen für Tiere und Umwelt

Air pollution and barn climate in a rabbit breeding and fattening housing system – Analysis of possible burdens for animals and environment

Sarah Kimm¹, Sally Luisa Rauterberg¹, Lars Broer², Julian Markus², Jochen Schulz¹, Nicole Kemper¹, Michaela Fels¹

In dieser Studie wurde das Stallklima hinsichtlich CO₂- und NH₃-Konzentrationen, Temperatur, relativer Luftfeuchte und Volumenstrom in einer zwangsbelüfteten Kaninchenzucht- und Mastanlage mit 24 Zucht- und 260 Masttierplätzen kontinuierlich über vier Durchgänge bestimmt. Exkrememente wurden täglich mittels Förderband aus der Stallanlage verbracht. Am 7., 30., 52. und 77. Tag eines jeden Durchgangs wurde zudem der Verschmutzungsgrad des Spaltenbodens anhand eines Scoresystems erfasst; zeitgleich erfolgten punktuelle Stallklimamessungen auf Tierhöhe. Weiterhin wurden die Emissionen aus der Halteanlage (CO₂, NH₃, Staub, Geruch) über sechs auf drei Jahreszeiten verteilte Wochen gemessen und Emissionsfaktoren bestimmt. Die gemessenen Gaskonzentrationen im Stall lagen bei 3,50 ± 2,10 (max. 16,00) ppm NH₃ und 644,60 ± 170,19 (max. 1736,00) ppm CO₂ und blieben unter den nach Tierschutz-Nutztierhaltungsverordnung (2014) zulässigen Maximalwerten von 20 ppm NH₃ und 3000 ppm CO₂. NH₃ stieg über die Haltephase mit zunehmender Bodenverschmutzung an. Die Emissionen unterschieden sich teilweise signifikant zwischen den Produktionsphasen Zucht und Mast und variierten über die Jahreszeiten. Im Vergleich zu anderen Nutztierarten waren die in der untersuchten Kaninchenhaltung ermittelten Emissionsfaktoren hoch (z. B. NH₃: 46,34 kg GV⁻¹ a⁻¹) und sollten zur Abschätzung von Umweltbelastungen durch Tierhaltungen Berücksichtigung finden.

Schlüsselwörter: Ammoniak, Kohlenstoffdioxid, Geruch, Staub, Emissionsfaktor

In this study, barn climate of a forced-ventilated rabbit breeding and fattening housing with 24 breeding and 260 fattening places was investigated for four batches continuously concerning CO₂- and NH₃-concentrations, temperature, relative humidity and volume flow. A manure belt removed excrements daily. Additionally, on the 7th, 30th, 52nd and 77th day of each batch, floor hygiene was assessed using a scoring system; at the same time, punctual barn climate measurements were taken at animal height. Moreover, emissions of the housing system (CO₂, NH₃, dust, odour) were recorded over six weeks distributed over three seasons and emission factors were calculated. The measured gas concentrations in the barn reached mean values of 3.50 ± 2.10 (max. 16.00) ppm NH₃ and 644.60 ± 170.19 (max. 1736.00) ppm CO₂, so remained below maximum thresholds permitted in the Animal Welfare Livestock Regulation (Tierschutz-Nutztierhaltungsverordnung 2014) of 20 ppm NH₃ and 3000 ppm CO₂. NH₃ increased over time with increasing floor pollution. In some cases, the emissions differed significantly between the production phases and varied throughout the seasons. Compared to other species, the emission factors of the investigated rabbit housing were high (for example NH₃: 46.34 kg GV⁻¹ a⁻¹) and should be taken into account when estimating the environmental impact of animal husbandry.

Keywords: ammonia, carbon dioxide, odour, dust, emission factor

Einleitung

Umweltverschmutzungen und Klimaveränderungen sind in der heutigen Zeit ein stark diskutiertes Thema und gerade Nutztierhaltungsanlagen tragen durch gas- und partikelförmige Emissionen einen nicht zu unterschätzenden Beitrag zur Umweltbelastung bei. Circa 51 % der weltweiten Emissionen an Ammoniak (NH_3) stammen aus der Tierhaltung (WBA 2015). Ammoniak wird bei Säugetieren auf feuchten, mit Exkrementen verschmutzten Oberflächen (Oldenburg 1989) und zum größten Teil in der Gülle gebildet. Das Gas hat durch vielfältige Wirkungsweisen sowohl Einfluss auf die Umwelt als auch auf den tierischen Organismus. Eine hohe Akkumulation von NH_3 in der Umwelt führt zum Beispiel zur Eutrophierung von Gewässern (Menzi et al. 2010) und zu einer gesamtheitlichen Schädigung von pflanzlichen Strukturen (Krupa 2003). Neben diesen und weiteren Umweltaspekten kann es durch seine wasser- und lipidlöslichen Eigenschaften aber auch zu histologisch nachweisbaren Veränderungen am Atmungstrakt bei Tieren führen (Gamble und Clough 1976, Johannsen et al. 1987). So konnten ab 50 ppm NH_3 bei Schweinen leichte, ab 100 ppm deutliche Symptomaten, wie Augenausfluss, Husten und Nasenausfluss, festgestellt werden (Stombaugh et al. 1969).

Dieser Effekt der Schleimhautreizung durch NH_3 kann durch Staubpartikel, welche sich beispielsweise aus Futtermittelresten, Haar- und Hautbestandteilen, Exkrementen, Desinfektionsmitteln (Kaliste et al. 2002), Antibiotika und resistenten Bakterien (Schulz et al. 2019) zusammensetzen, verstärkt werden (Donham et al. 2002).

Neben NH_3 ist Kohlenstoffdioxid (CO_2) ein weiteres Gas, welches sich in hohen Konzentrationen als Treibhausgas negativ auf die Umwelt auswirkt. Gebildet wird es zu einem Teil aus der Gülle (Ni et al. 1999) durch mikrobielle Zersetzungsprozesse (Oldenburg 1989), hauptsächlich aber durch natürliche Respiration von Tieren (Bannwarth et al. 2013). Dabei gilt zu beachten, dass bezüglich der Atmung eine weitestgehende Äquivalenz zwischen der corporalen Aufnahme von Kohlenstoff durch Photosynthese betreibende und damit CO_2 verbrauchende Futterpflanzen und der Abgabe von CO_2 durch Respiration (IPCC 2006) besteht, es also zu keiner bedeutenden Zunahme von CO_2 in der Atmosphäre in Folge von Atmungsprozessen kommt. Die direkte Emission von CO_2 aus Tierhaltungsanlagen ist mit circa 1 % nur zu einem sehr geringen Anteil an klimatischen Veränderungen der Atmosphäre beteiligt (Menzi und Steinfeld 2011). Dennoch ist CO_2 ein wichtiger Parameter zur indirekten Beurteilung der Lüftungsrate im Stall (Pedersen 1998), und seine Konzentrationsbestimmung dient der Beurteilung der Stallluftqualität.

Um die Gefahr der Umweltschädigung und Gesundheitsbelastung durch gas- und partikelförmige Klimaparameter aus Nutztierställen bewerten zu können, ist es unabdingbar, eine umfassende Kenntnis über alle in den Stallungen gebildeten Luftverunreinigungen verschiedener Tierarten zu besitzen. Die Emissionsbelastung durch Rinder-, Schweine- und Geflügelbestände wurde durch einige Studien bereits erfasst (Groot Koerkamp et al. 1998, Oldenburg 1989, Saha et al. 2014, VDI 3894-1:2011-09). Es sind in der Literatur aber nur wenige Informationen zu Emissionen aus Kaninchenställen unter Praxisbedingungen zu finden (Adell et al. 2012,

Calvet et al. 2011, Cambra-López et al. 2008, Hol et al. 2004, Michl und Hoy 1996). Weitere Untersuchungen zu dieser Thematik sind notwendig, gerade weil Kaninchen als suboptimale Stickstoffverwerter potenziell einen größeren Beitrag zur NH_3 -Entstehung leisten können (Calvet et al. 2008).

Folglich wurde in dieser Studie eine Kaninchenhaltungsanlage, welche auf der Grundlage der um spezielle Anforderungen an die Mast- und Zuchtkaninchenhaltung erweiterten Tierschutz-Nutztierhaltungsverordnung aus dem Jahr 2014 entworfen und errichtet wurde, auf unterschiedliche Weise untersucht: einerseits um Informationen über genehmigungsrelevante Emissionen von Geruch, Staub und NH_3 zu erhalten und andererseits um potenzielle Gesundheitsgefährdungen durch das Stallklima abschätzen zu können. Aufgrund dessen wurden NH_3 und CO_2 kontinuierlich im Stall erfasst und exemplarische Stallklimamessungen auf Tierhöhe unter Berücksichtigung der Fußbodenhygiene durchgeführt. Auf Grundlage der Emissionsmessungen berechnete Emissionsfaktoren wurden mit bekannten Emissionsfaktoren für andere Tierarten, bezogen auf die Großvieheinheit, verglichen. Dadurch können Emissionsbelastungen durch die Kaninchenhaltung eingeschätzt werden und bei hohen Belastungen gegebenenfalls Gegenmaßnahmen, wie zum Beispiel verbesserte Managementmaßnahmen zur schnellen Entfernung von Emissionsquellen (Pflanz 2011), vorgeschlagen werden.

Material und Methoden

Tiere, Haltungssystem, Stallgebäude

Durchgeführt wurde die Studie auf einem konventionellen Kaninchenmast- und Zuchtbetrieb in Niedersachsen, Norddeutschland. Verwendung fanden Zuchtkaninchen der Genetik HYPLUS PS 19 und Mastkaninchen der Genetik HYPLUS PS 19 x PS 59, HYPHARM S.A.S., Frankreich. Die Kaninchen wurden in einem Kombiparksystem gehalten, in welchem sowohl die Zuchtphase mit Häsinnen in Einzelhaltung (Haltungsdauer: sieben Tage ante partum bis 31. Tag post partum) als auch, nach der Ausstallung der Häsinnen, die Mastphase der Jungtiere bis zur Schlachtung (üblich 78. Lebenstag, im Winter dieser Studie 77. Lebenstag) in Großgruppen (maximal 65 Tiere) stattfand. Die Halteanlage wurde in Anlehnung an die Anforderungen der Tierschutz-Nutztierhaltungsverordnung (2014) erbaut und befand sich in einem eigens für den Versuch errichteten, hermetisch abgeschlossenen Stallraum (179,78 m³) auf zwei lufttechnisch miteinander kommunizierenden Etagen. Der Stallraum befand sich innerhalb eines größeren Gebäudes, welches zudem zur Lagerung von Geräten, Futtermitteln und Einstreu genutzt wurde. Auf jeder Etage waren zwei Reihen mit jeweils sechs Einzelbuchten angeordnet. Für die Gruppenhaltung der Masttiere wurden jeweils sechs nebeneinander befindliche Einzelbuchten einer Reihe zu einer Großbucht verbunden (Mastmodus; Abb. 1). Somit befanden sich auf jeder Etage 12 Einzelbuchten (Zuchtmodus) bzw. 2 Großbuchten (Mastmodus). Insgesamt verfügte die untersuchte Halteanlage über 24 Zuchtierplätze und 260 Masttierplätze.

Der Luftaustausch zwischen den Etagen wurde durch 8 cm breite Schlitze über die Gesamtlänge der Sei-

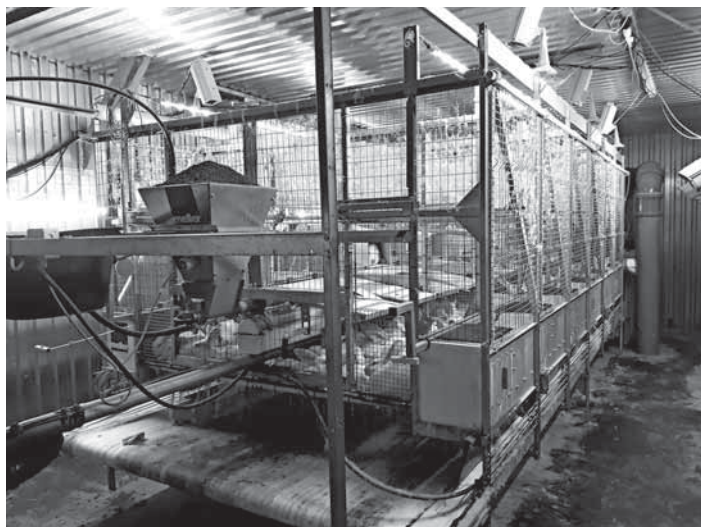


ABBILDUNG 1: Zwei Großbuchten mit je sechs Einzeleinheiten (Mastmodus) mit darunter befindlichem Treviraband zur Exkremententfernung

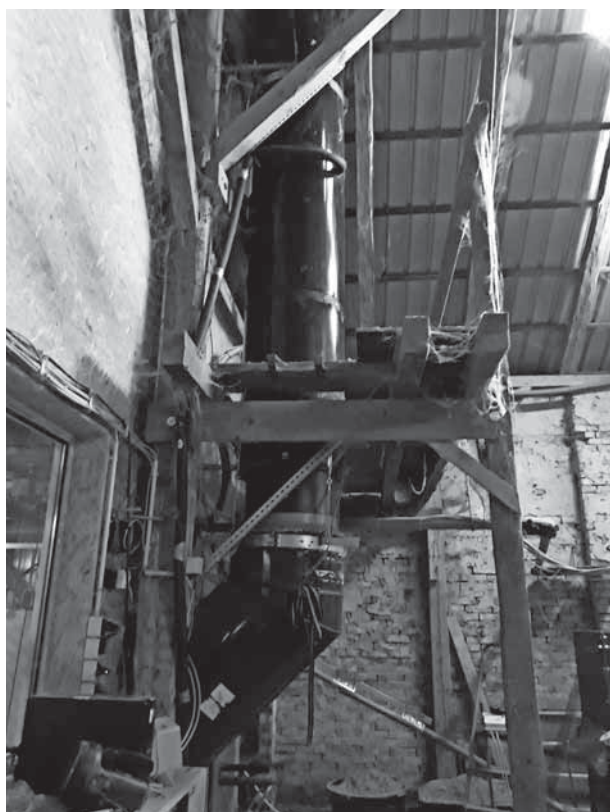


ABBILDUNG 2: Abluftschacht mit Gerüst für die Emissionsmessungen

tenränder des oberen Bodens und durch eine 189 cm lange und 57 cm breite Treppenöffnung gewährleistet. Der Stallraum war mit einer Überdruck-Zwangslüftung (Fan 1450 M 200–240 V 50 Hz, Fancom, Panningen, Niederlande) ausgestattet. Auf jeder Etage befand sich eine Zuluftöffnung. Abgeführt wurde die verbrauchte Luft über einen einzigen Abluftschacht ($d = 0,5 \text{ m}$) (Abb. 2), dessen Öffnung in der unteren Etage gegenüber der Luftzufuhr angebracht war (Abb. 2 und Abb. 3).

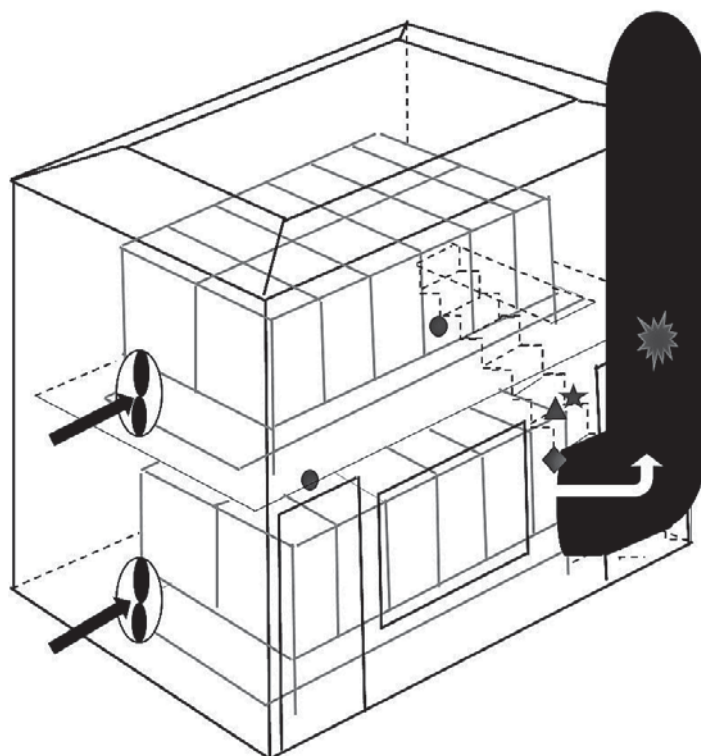


ABBILDUNG 3: Schematische Darstellung des Messstallgebäudes mit Zulufteintritt (schwarze Pfeile) und Abluftaustritt (weißer Pfeil). Messpunkte sind durch unterschiedliche Zeichen kenntlich gemacht: Messpunkt für NH_3 , CO_2 , Temperatur, Luftfeuchte und Strömungsgeschwindigkeit auf Tierhöhe in der oberen und unteren Etage (●); Messpunkt der kontinuierlichen CO_2 - bzw. NH_3 -Messungen im Stall (▲; ★); Messpunkt der kontinuierlichen Temperatur- und Luftfeuchtemessungen im Stall-/Abluftschacht (◆); Messpunkt der Emissionsmessungen (NH_3 , CO_2 , Staub, Geruch), des Volumensstroms und der Ranparameter für Staub und Geruch im Abluftschacht (✱).

Der Boden der Buchten war als Kunststoffspaltenboden (Polyoxymethylen) mit einer Spaltenbreite und einer Auftrittsfläche von jeweils 11 mm gestaltet. Den Zuchtieren standen zusätzlich zur Bodenfläche ($6237 \text{ cm}^2/\text{Tier}$) eine in 37 cm Höhe angebrachte zweite Ebene mit einer 15%-igen Perforierung (3016 cm^2), eine Nestbox gefüllt mit Holzspänen (1160 cm^2) und eine Polyvinylchlorid-Versteckröhre zur Verfügung. Zudem wurde den Tieren Nage- und Beschäftigungsmaterial in Form von Weichholz, einer Kordel und einer Futterkette angeboten. Im Mastmodus wurde jede ursprüngliche Einzelbucht um einen begehbaren Nestdeckel (1218 cm^2) und eine freie Fläche neben dem Nest (1160 cm^2) erweitert. Die Späne im Nest wurden durch einen 11 mm Spaltenboden ersetzt. Die durchschnittliche Besatzdichte in dieser Untersuchung betrug im Mastmodus 12 Tiere/ m^2 . Die Exkreme wurden täglich zwischen 9:00 Uhr und 11:00 Uhr durch ein Treviraband aus Polyethersulfon mit Polyetherbeschichtung, getrennt nach Urin und Kot, aus dem Stall verbracht und in Güllelagerstätten gelagert. Die Fütterung erfolgte ad libitum bei einem getrennten Angebot an pelletiertem Alleinfutter (laktierende

Häsinnen: Viko Fok Lapin; Masttiere: bis vier Wochen nach Absetzen Viko Safe Wissel + Aco, danach bis Mastende Viko Rendement, Hersteller aller verwendeten Futtermittel: Victoria Mengvoeders, (Niederlande) und Raufutter (Heu). Getränkt wurden die Tiere ad libitum über zwei Nippeltränken pro Einzelbucht. Die Tiergewichte wurden täglich automatisch über einen Wiegemechanismus der Halteanlage erfasst (Fancom Tierwaagen, Panningen, Niederlande). Die Häsinnen erreichten ein mittleres Gewicht pro Einzeltier von $4,8 \pm 0,1$ kg, und die Masttiere wiesen Absetzgewichte von $0,7 \pm 0,1$ kg und Mastendgewichte von $2,7 \pm 0,2$ kg auf.

Stallklima und Emissionen

Bezüglich des Stallklimas erfolgte eine kontinuierliche Messung mit viertelstündlicher Aufzeichnung von NH_3 -Konzentrationen mittels des Dol 35 Ammoniak Sensors (Dol-Sensors, Aarhus N, Dänemark; Genauigkeit laut Hersteller: 1,5 ppm oder ± 10 % des Messwerts) und von CO_2 -Konzentrationen mittels des EE 820 CO_2 -Transmitters (E+E Elektronik G.m.b.H., Engerwitzdorf, Österreich; Genauigkeit laut Hersteller im Messbereich bis 2000 ppm: $< \pm 50$ ppm + 2 % des Messwerts) über vier Produktionszyklen, entsprechend vier Jahreszeiten vom ersten bis zum 78. Lebenstag der Masttiere. Der Tag der Ausstallung zur Schlachtung pro Zyklus wurde nicht mitberücksichtigt. Der Messpunkt für diese Messungen lag in der unteren Etage des Stalls in 1,2 m Höhe über dem Boden, das heißt 0,4 m höher als der Buchtenboden, in der Nähe des Abluftaustritts (Abb. 3). Neben den kontinuierlichen Gasmessungen wurden als weitere Klimaparameter der Volumenstrom durch die Fancom ATM 50 throttling and measuring unit (Fancom BV, Panningen, Niederlande) im Abluftschacht, die Temperatur durch den Temperaturfühler Fancom SF. 7 (Fancom BV, Panningen, Niederlande) im Stall vor dem Abluftschacht, die Außentemperatur durch den Fancom SM. 7 Außentemperaturfühler (Fancom BV, Panningen, Niederlande) auf der Nordseite der Stallanlage und die relative Luftfeuchte durch den Dol-104 Feuchtefühler (Dol-sensors, Aarhus N, Dänemark) ebenfalls im Stall vor dem Abluftschacht jede Viertelstunde erfasst (Abb. 3).

Weiterhin fanden Stallklimamessungen statt, die exemplarisch die Gaskonzentrationen an CO_2 und NH_3 auf Tierhöhe darstellen sollten. Diese Messungen fanden über fünf Zucht- und Mastdurchgänge jeweils am 7., 30., 52. und 77. Tag eines Durchgangs statt. An den Messtagen wurden an zwei Messpunkten im Stall (obere und untere Etage) in unmittelbarer Umgebung der Tiere in der Mitte der Halteanlage NH_3 , CO_2 , Temperatur, Luftfeuchte und Luftgeschwindigkeit erfasst (Abb. 3). Die Messungen erfolgten für die Gase NH_3 und CO_2 mittels des Mehrgasmessgeräts Dräger X-am 2500 (Dräger, Lübeck, Deutschland), für die Temperatur und die Luftfeuchte mittels des PCB-THB 40 Datenloggers (PCE-Instruments, Meschede, Deutschland) und für die Luftgeschwindigkeit mittels des Hitzedraht-Anemometers PCE-423 (PCE-Instruments, Meschede, Deutschland).

Die Emissionsmessungen von NH_3 , CO_2 , Staub und Geruch wurden durch ein nach DIN ISO 17025 (2005-08) akkreditiertes Messinstitut (LUFÄ Nord-West, Oldenburg, Deutschland) über drei Zucht- und Mastdurchgänge entsprechend Sommer (Juni 2017 bis September 2017), Herbst (September 2017 bis Dezember 2017) und Winter (Dezember 2017 bis März 2018) durchgeführt. Die Messplanung erfolgte nach den Vorgaben des Mess-

protokolls des KTBL (2013) für zwangsgelüftete Ställe mit insgesamt sechs, mindestens sechstägigen, repräsentativ auf drei Jahreszeiten verteilten Messwochen. Daraus resultierten ungleiche Messwochenverteilungen zwischen den Produktionszyklen mit für die Zuchtphase bis zum Absetzen der Jungtiere sieben Messtagen (22.–28. Lebenstag der Jungtiere) im Sommer, sieben Messtagen (9.–15. Lebenstag) im Herbst und drei Messtagen (29.–31. Lebenstag) im Winter. In der Mastphase erfolgten sieben Messtage (50.–56. Lebenstag) im Sommer, acht Messtage (57.–63. Lebenstag) im Herbst und elf Messtage (32.–35. Lebenstag; 64.–70. Lebenstag) im Winter. Der Umfang der Messungen betrug für Geruch und Staub jeweils zwei Messtage pro Messwoche (erster und letzter Tag einer Messwoche), an denen drei Probennahmen zwischen 9:15 Uhr und 13:50 Uhr für Geruch und drei Probennahmen zwischen 9:15 Uhr und 18:03 Uhr für Staub genommen wurden. Eine Gesamtprobennahme an einem Messtag dauerte für Geruch 90 Minuten und für Gesamtstaub zwischen 165 Minuten und 510 Minuten. Die Messung der Geruchsemissionen erfolgte durch dynamische Olfaktometrie nach DIN EN 13725 (2003-07) mittels des Olfaktometers T 08 (Olfasense, Kiel, Deutschland). Die Gesamtstaubemissionen wurden in-stack durch gravimetrische Bestimmung nach den Richtlinien VDI 2066-1 (2006-11) und DIN EN 13284-1 (2002-04) mit einem isokinetischen Probennahmesystem mit 50 mm Planfilterkopfggerät (Paul Gothe, Bochum, Deutschland) erfasst. Die Wägung erfolgte mittels einer Analysewaage (Sartorius LA 230 S, Sartorius AG, Göttingen, Deutschland) mit einer Genauigkeit von 0,1 mg. Zusätzlich zu diesen Stoffen wurden zeitgleich die Randparameter Temperatur, Luftfeuchte, Luftdruck und Strömungsgeschwindigkeit durch das Multifunktions-Messgerät Driesen & Kern TSI Model 9565 Series (9565-2) (Driesen & Kern, Bad Bramstedt, Deutschland) gemessen. Während der Messperioden wurden NH_3 und CO_2 erfasst, indem jede Minute eine punktuelle Aufzeichnung der Gasmengen durch das Fourier-Transform-Infrarotspektrometer (Temet Instruments Gasmet DX 4015, Vantaa, Finnland) erfolgte. Aus den Werten der einzelnen Messpunkte wurden anschließend Halbstundenmittelwerte gebildet ($n = 707$ Halbstundenmittelwerte in der Zuchtphase und $n = 1193$ Halbstundenmittelwerte in der Mastphase). Der Messbereich für NH_3 lag dabei zwischen 0 und 49 ppm und für CO_2 zwischen 0 und 3000 ppm. Die Stellen zur Probenentnahme wurden unter Berücksichtigung der DIN EN 15259 (2008-01) so gewählt, dass homogene Strömungsverhältnisse gewährleistet waren. Die Messungen und Probennahmen von NH_3 , CO_2 , Staub und Geruch sowie die diskontinuierlichen Messungen der Abgasrandparameter für Geruch und Staub wurden im Abluftschacht in 2,5 m Höhe und 4 m vor dem Abluftaustritt nach dem Messventilator durchgeführt. Die Bestimmung der Randparameter Volumenstrom, Innentemperatur, Außentemperatur und relative Luftfeuchte für die CO_2 - und NH_3 -Emissionen wurde entsprechend der für die kontinuierlichen Stallklimagasmessungen bereits beschriebenen Methodik durchgeführt. Für die weitere Analyse der CO_2 - und NH_3 -Emissionshalbstundenmittel wurden die viertelstündlich aufgezeichneten Werte der Randparameter passend zu halbständlichen Mittelwerten umgerechnet. Da die Messungen für die Temperatur und die relative Luftfeuchte auf Höhe des Abluftschachts im Stall durchgeführt wurden, erfolgt keine

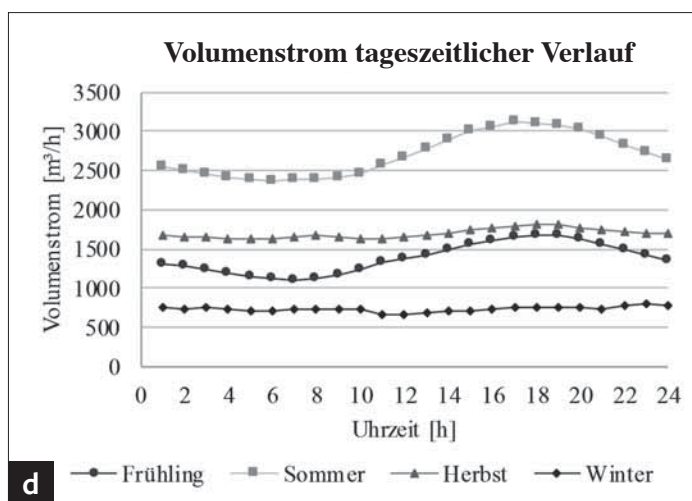
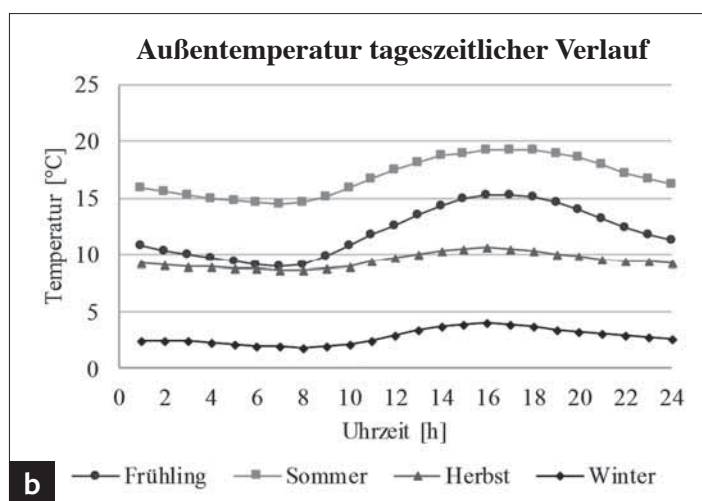
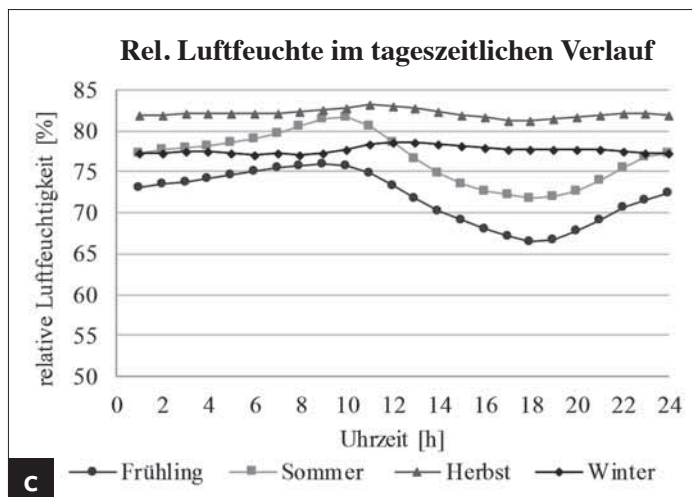
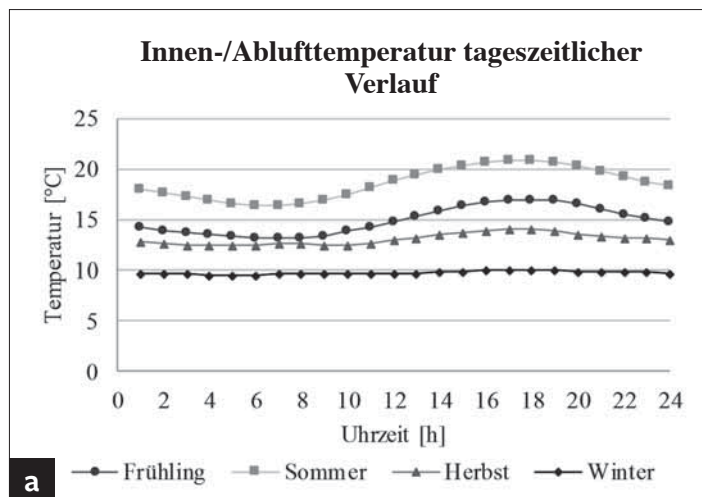


ABBILDUNG 4: Innen-/Ablufttemperatur (a), Außentemperatur (b), relative Luftfeuchte (c) vor dem Abluftschacht und Volumenstrom (d) im Abluftschacht im Tagesverlauf getrennt nach unterschiedlichen Jahreszeiten.

(a) Innen-/Ablufttemperatur
(b) Außentemperatur
(c) Relative Luftfeuchte
(d) Volumenstrom

Unterscheidung zwischen Stallinnen- und Ablufttemperatur und zwischen relativer Luftfeuchte in Stall und Abluftschacht. Normalerweise variiert die Ablufttemperatur am Messpunkt im Abluftschacht etwas im Vergleich zur Stallinnentemperatur, weil sie sich bereits an die Umgebungstemperatur angleicht (Oldenburg 1989). Da sich aber der untere Teil des Abluftschachts, an dem die Messungen erfolgten, innerhalb des Lagergebäudes, in dem das Versuchsstallgebäude errichtet wurde, befand und keinen direkten Kontakt zur Außentemperatur hatte (Abb. 2), unterschied sich die Temperatur aufgrund der geschützten Lage des Messplatzes kaum von der Stallinnentemperatur. Messpunkte, an denen in dieser Studie Messungen durchgeführt wurden, sind in Abbildung 3 skizziert.

Im Anschluss an die Messungen wurden Emissionsfaktoren, getrennt nach drei Jahreszeiten, für Geruch in Geruchseinheiten (GE) [GE⁻¹ a⁻¹], Staub [kg GE⁻¹ a⁻¹], NH₃ [kg GE⁻¹ a⁻¹] und CO₂ [kg GE⁻¹ a⁻¹] ermittelt. Dafür wurde zunächst der Massenvolumenstrom für jeden Stoff gemittelt über alle Messpunkte nach folgender Formel berechnet:

$$M = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n xi = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (V * m)$$

M: Massenvolumenstrom [kg/a]
V: Volumenstrom [m³/a]
m: Masse des jeweiligen Stoffs pro Volumeneinheit [kg/m³ bzw. für Geruch GE/m³]

TABELLE 1: Übersicht der Scorenoten von 0 bis 3 und deren Bedeutung zur Beurteilung der Fußbodenhygiene

Score	
0	sauber und trocken
1	≤ 50 % verschmutzt und trocken
2	> 50 % verschmutzt und trocken
3	feucht und verschmutzt

Daraus resultiert der Emissionsfaktor mit der Formel (VDI 3894-1, 2011-09):

$$EF = \frac{M * L}{GV}$$

EF: Emissionsfaktor [kg GV⁻¹ a⁻¹ bzw. für Geruch GE GV⁻¹ s⁻¹]

L: Leerstehzeiten pro Jahr im Stall (n = 9) wurden durch Multiplikation des EF mit dem Faktor 0,98 entsprechend den Vorschriften der VDI 3894-1 (2011-09) berücksichtigt
 GV: Großvieheinheit (500 kg)

Die GV wurde auf das Gesamtgewicht aller Tiere im Stall bezogen und nach folgender Formel, gemittelt über alle Messpunkte, berechnet:

$$GV = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{\text{Gesamtgewicht aller Tiere im Stall}}{500 \text{ kg}} \right)$$

Fußbodenhygiene

Wie die Stallklimamessungen auf Tierhöhe erfolgte auch die Beurteilung der Fußbodenhygiene in fünf aufeinanderfolgenden Durchgängen am 7., 30., 52. und 77. Lebenstag der Jung- bzw. Masttiere. Mittels eines Scoresystems von 0 (sauber und trocken) bis 3 (hochgradig verschmutzt und nass) wurden die Bodenfläche, die Fläche der erhöhten Ebene, die Fläche der Nestbox, die Röhre und im Mastmodus zusätzlich der Nestdeckel einer jeden Bucht bezüglich der Sauberkeit und Feuchtigkeit beurteilt (Tab. 1). Aus allen vergebenen Scorenoten wurde für jede Einzelbucht im Zuchtmodus bzw. für jede einzelne Einheit einer aus sechs Einzelbuchten bestehenden Großbucht im Mastmodus ein kumulativer Boniturindex (kBI) berechnet, welcher die Summe der für die unterschiedlichen Bereiche einer Einzelbucht vergebenen Scorenoten darstellte und grundsätzlich Werte von 0 bis 15 annehmen konnte.

Statistik

Es erfolgte zunächst eine deskriptive Darstellung mit Plausibilitätsprüfung und Prüfung auf Normalverteilung aller ermittelten Daten. Statistische Analysen wurden mittels des Statistikprogramms SAS Enterprise Guide 7.1 (Statistical Analysis System Institute, Cary, North Carolina, USA) durchgeführt. Unterschiede in den Gaskonzentrationen von NH₃ und CO₂, der Temperatur, der Luftfeuchte und der Luftgeschwindigkeit zwischen den Messpunkten im Tierbereich in der oberen und unteren Etage des Stalls wurden mittels Wilcoxon-Vorzeichen-Rang-Test überprüft. Unterschiede zwischen der Zucht- und der Mastphase bezüglich der Emissionen im Sommer und im Herbst wurden für Geruch und Staub ebenfalls mithilfe des Wilcoxon-Vorzeichen-Rang-Tests, für die NH₃- und CO₂-Emissionen mithilfe des Wilcoxon-Rang-Summen-Tests geprüft. Im Winter erfolgte diesbezüglich aufgrund der geringeren Datenlage in der Zuchtphase und folglich auch ungleichen Datenverteilung zwischen Zucht- und Mastphase nur eine deskriptive Analyse. Um Zusammenhänge zwischen Volumenstrom und Tiergewicht zu den Stallklimagasen NH₃ und CO₂ festzustellen, wurden Korrelationsanalysen nach Spearman durchgeführt. Unterschiede im Grad der Bodenverschmutzung zwischen den verschiedenen Messtagen wurden ebenfalls mit dem Wilcoxon-Vorzeichen-Rang-Test ermittelt.

Ergebnisse

Stallklima

Die Außentemperatur schwankte mit den Jahreszeiten und erreichte im Sommer mittlere Temperaturen von

TABELLE 2: Innen-/Ablufttemperatur, relative Luftfeuchte im Stall vor dem Abluftschacht und Volumenstrom im Abluftschacht (Mittelwerte mit Standardabweichungen) über die sechs durchgeführten Messwochen pro Jahreszeit, getrennt nach Zucht, Mast und Jahreszeit

		Innen-/Ablufttemperatur [°C]	Relative Luftfeuchtigkeit [%]	Volumenstrom [m ³ /h]
Sommer	Zucht	19,8 ± 1,9	78,1 ± 6,4	2874,1 ± 448,6
	Mast	19,3 ± 2,5	74,4 ± 5,6	2814,5 ± 490,5
Herbst	Zucht	13,3 ± 1,1	82,8 ± 4,1	1756,4 ± 156,5
	Mast	13,0 ± 2,0	80,8 ± 3,7	1662,5 ± 261,2
Winter	Zucht	9,2 ± 1,2	80,0 ± 1,2	806,0 ± 352,0
	Mast	10,4 ± 0,8	73,4 ± 6,4	617,6 ± 169,2

17,0 ± 3,1 °C, im Herbst von 9,3 ± 4,2 °C, im Winter von 2,8 ± 3,9 °C und im Frühling von 12,3 ± 6,8 °C. Die Temperaturen im Stall nahe dem Abluftschacht variierten ebenfalls mit den Jahreszeiten und erreichten im Sommer mittlere Werte von 18,7 ± 2,6 °C. Im Herbst sanken die Temperaturen auf 13,1 ± 2,5 °C, während sie im Winter mit 10,1 ± 1,4 °C ihren Tiefpunkt erreichten. Im Frühjahr stiegen die Temperaturen wieder auf 15,3 ± 5,2 °C an. Die mittlere Luftfeuchtigkeit im Stall vor dem Abluftschacht lag im Sommer bei 76,6 ± 6,6 %, im Herbst bei 81,9 ± 4,0 %, im Winter bei 77,0 ± 6,7 % und im Frühling bei 70,8 ± 8,7 %. Der Volumenstrom erreichte im Sommer durchschnittliche Werte von 2713,1 ± 509,1 m³/h, im Herbst von 1688,7 ± 313,8 m³/h, im Winter von 686,1 ± 317,6 m³/h und im Frühling von 1443,3 ± 856,8 m³/h. Tageszeitliche Verlaufskurven sind in Abbildung 4 dargestellt. Die Temperaturkurven zeigen charakteristische Anstiege und Abfälle je nach Tageszeit. Der Verlauf des Volumenstroms ist mit der Verlaufskurve der Temperatur vergleichbar, während die der relativen Luftfeuchtigkeit entgegengesetzt dazu verläuft. Die durchschnittlichen Werte der Innen-/Ablufttemperatur, der relativen Luftfeuchte und des Volumenstroms während der über sechs Messwochen stattfindenden Emissionsmessungen der LUFA Nord-West sind, getrennt nach Zucht, Mast und Jahreszeit, in Tabelle 2 ersichtlich. Die Temperatur im Stall auf Tierhöhe in der oberen Etage des Stalls war mit durchschnittlich einem Grad signifikant höher als in der unteren Etage (Etage 1: 14,7 °C ± 5,8 °C vs. Etage 2: 15,8 °C ± 5,5 °C, p < 0,05). Die Luftfeuchte auf Tierhöhe war in der oberen Etage signifikant niedriger als in der unteren Etage (Etage 1: 75,4 % ± 8,8 % vs. Etage 2: 69,5 % ± 11,1 %, p < 0,05). Die Luftgeschwindigkeit auf Tierhöhe unterschied sich in den beiden Etagen nicht (Etage 1: 0,138 m/s ± 0,04 m/s vs. Etage 2: 0,131 m/s ± 0,05 m/s, p > 0,05).

Die kontinuierlich gemessenen Konzentrationen von NH₃ und CO₂ im Stall variierten im Jahres- und Tagesverlauf. Graphen zu jahreszeitlichen und tageszeitlichen Schwankungen sind in den Abbildungen 5 und 6 zu finden. Fehlende Messpunkte im Sommerproduktionszyklus sind technisch beziehungsweise betriebsbedingt. Auffällig war der Anstieg der Konzentrationen von NH₃ und CO₂ im Verlaufe der Haltungsphase in den Sommer-, Herbst- und Wintermonaten. Dabei war der Anstieg am deutlichsten in den Wintermonaten zu erkennen. Im Gegensatz dazu sanken im Frühling die Konzentrationen von NH₃ und CO₂ während des Mastverlaufs leicht ab. Auch im tageszeitlichen Profil zeigen die Graphiken Schwankungen. Während im Frühling,

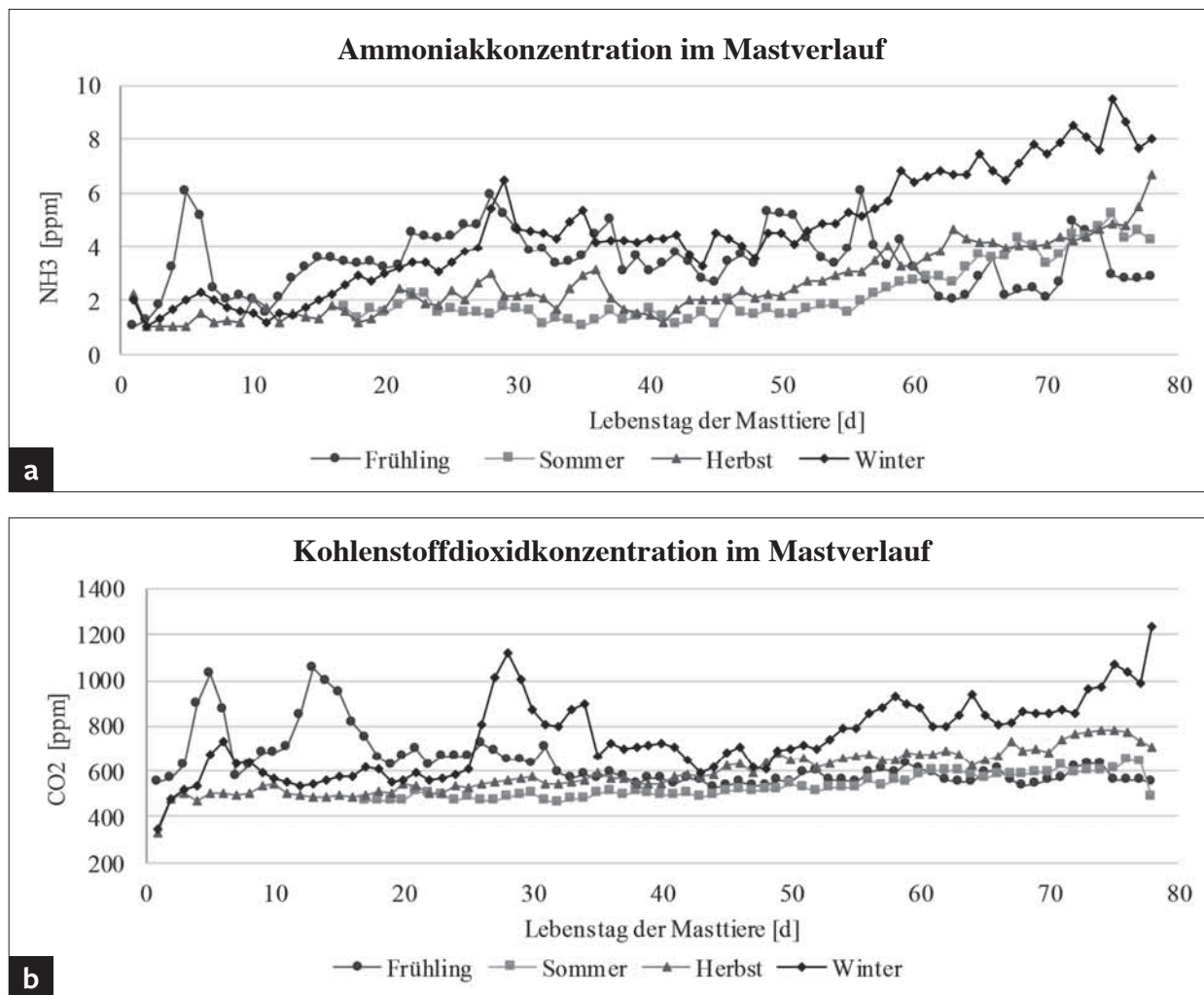


ABBILDUNG 5: Durchschnittswerte von NH₃- (a) und CO₂-Konzentrationen (b) im Produktionszyklus getrennt nach unterschiedlichen Jahreszeiten

(a) Ammoniakkonzentration im Mastverlauf
(b) Kohlenstoffdioxidkonzentration im Mastverlauf

Sommer und Herbst ähnliche Tagesvariationen der Konzentrationen von NH₃ und CO₂ ersichtlich sind, mit hohen Konzentrationen zwischen 22:00 und 9:00 Uhr und für NH₃ einem Peak zwischen 9:00 und 11:00 Uhr, unterschieden sich die tageszeitlichen Schwankungen im Winter. Im Winter stieg die NH₃-Konzentration ab 9:00 Uhr bis zu einem Höhepunkt um 12:00 Uhr an und sank dann sachte ab, bis sie um 22:00 Uhr ihren Tiefpunkt erreichte. Nachts stieg die Konzentration wieder leicht an. Die Kurve für CO₂ im Winter wies zwei Peaks zwischen 8:00 und 10:00 Uhr und zwischen 17:00 und 19:00 Uhr auf. Ansonsten zeigte sie ein relativ konstantes Niveau. Im Mittel erreichte NH₃ im Sommer Konzentrationen von $2,21 \pm 1,35$ ppm, im Herbst von $2,94 \pm 1,55$ ppm, im Winter von $5,06 \pm 2,60$ ppm und im Frühling von $3,50 \pm 1,47$ ppm. Die Konzentrationen an CO₂ schwankten von im Sommer $528,90 \pm 65,18$ ppm, über $610,93 \pm 91,50$ ppm im Herbst bis hin zu $792,41 \pm 223,07$ ppm im Winter und $618,49 \pm 118,99$ ppm im Frühling. Im Mittel über alle Jahreszeiten hinweg erreichte NH₃ einen Wert von $3,50 \pm 2,10$ (max. 16,00) ppm und CO₂ einen Wert von $644,60 \pm 170,19$ (max. 1736,00) ppm. Das Stallklima in unmittelbarer Umgebung der Tiere unterschied sich bezüglich der Gaskonzentrationen an NH₃ nicht signifikant zwischen

oberer und unterer Ebene (Etage 1: $1,67 \pm 2,59$ ppm vs. Etage 2: $1,58 \pm 2,56$ ppm, $p > 0,05$). Auch die CO₂-Konzentrationen unterschieden sich nicht signifikant zwischen den Etagen (Etage 1: $877,78 \pm 361,87$ ppm vs. Etage 2: $816,67 \pm 235,77$ ppm, $p > 0,05$). Maximale Konzentrationen auf Tierhöhe betragen 8 ppm NH₃ und 1600 ppm CO₂.

CO₂ wies eine deutlich negative Korrelation mit dem Volumenstrom ($R^2 = -0,76$; $p < 0,001$) und eine etwas schwächere, aber signifikante positive Korrelation mit dem Tiergewicht auf ($R^2 = 0,46$; $p < 0,001$). Die Korrelation zwischen NH₃ und dem Volumenstrom war negativ ($R^2 = -0,55$; $p < 0,001$). Bezüglich des Tiergewichts zeigte NH₃ eine positive Korrelation ($R^2 = 0,61$; $p < 0,001$).

Emissionen und Emissionsfaktoren

Die Konzentrationen von NH₃, CO₂, Geruch und Staub im Abluftschacht über die Zucht, Mast und Jahreszeit sind in Tabelle 3 wiedergegeben. Die Konzentrationen an NH₃ und CO₂ im Abluftschacht waren zu jeder Jahreszeit in der Mastperiode deutlich höher als in der Zuchtperiode (Sommer; Herbst: $p < 0,001$). Über alle gemessenen Wochen erreichten die NH₃-Konzentrationen in der Mastphase einen mittleren Wert von $3,34 \pm 1,49$ mg/m³ und in der Zuchtphase von $1,63 \pm 0,77$ mg/m³. Die CO₂-

Konzentrationen erreichten in der Mastphase durchschnittlich $1486,39 \pm 344,65 \text{ mg/m}^3$ und in der Zuchtphase durchschnittlich $1032,53 \pm 212,64 \text{ mg/m}^3$. Die Geruchsstoffkonzentrationen unterschieden sich zu jeder Jahreszeit zwischen Zucht- und Mastphase (Sommer; Herbst: $p < 0,05$). Dabei waren sie im Sommer und Winter höher in der Zucht- als in der Mastphase, während im Herbst in der Mastphase höhere Werte gemessen wurden (Tab. 3). Durchschnittlich erreichten die Geruchsstoffkonzentrationen in der Mast einen mittleren Wert von $79 \pm 2 \text{ GE/m}^3$ und in der Zucht von $72 \pm 2 \text{ GE/m}^3$. Die Konzentrationen an Staub waren zu keinem Zeitpunkt signifikant unterschiedlich zwischen Zucht- und Mastphase (Tab. 3). Im Mittel betragen die Konzentrationen an Staub in der Mastphase $0,09 \pm 0,06 \text{ mg/m}^3$ und in der Zuchtphase $0,07 \pm 0,08 \text{ mg/m}^3$.

Die Berechnung der auf drei Jahreszeiten bezogenen Emissionsfaktoren für diese Stallanlage ergab für NH_3 einen Wert von $46,34 \text{ kg GV}^{-1} \text{ a}^{-1}$, für CO_2 einen Wert von $24881,99 \text{ kg GV}^{-1} \text{ a}^{-1}$, für Geruch einen Wert von $59,55 \text{ GE GV}^{-1} \text{ s}^{-1}$ und für Staub einen Wert von $2,00 \text{ kg GV}^{-1} \text{ a}^{-1}$. Betrachtet man diese getrennt nach Zucht- und Mastphase, erhält man die in Tabelle 4 (eigene Untersuchungen) dargestellten Emissionsfaktoren.

Fußbodenhygiene

Der mittlere kumulative Boniturindex der Fußbodenhygiene unterschied sich zwischen den einzelnen Boniturzeitpunkten und zeigte eine steigende Tendenz über den Mastverlauf (Abb. 7). Zwischen Tag 7 und Tag 30 sowie zwischen Tag 30 und Tag 52 stieg der Verschmutzungsgrad des Bodens signifikant an ($p < 0,01$). Von Tag 52 zu Tag 77 war kein signifikanter Anstieg mehr zu verzeichnen ($p > 0,05$). Der mittlere kumulative Boni-

TABELLE 3: Mittlere Konzentrationen und deren Standardabweichungen von NH_3 , CO_2 , Geruch und Staub, getrennt nach Zucht, Mast und Jahreszeit. Signifikante Unterschiede der Konzentrationen der einzelnen Parameter zwischen Zucht und Mast wurden getrennt für Sommer und Herbst berechnet (** $p < 0,001$; * $p < 0,05$). Die Anzahl der Einzelmessungen (Geruch, Staub) bzw. der Halbstundenmittel (NH_3 , CO_2) ist mit n wiedergegeben. Die Mittelwerte und Standardabweichungen von NH_3 , CO_2 und Staub stellen arithmetische dar, von Geruch geometrische.

		NH_3 [mg/m^3]	CO_2 [mg/m^3]	Geruch [GE/m^3]	Staub [mg/m^3]
Sommer	Zucht	$1,44 \pm 0,50^{***}$ (n = 295)	$918,64 \pm 118,69^{***}$ (n = 295)	$80 \pm 1^*$ (n = 6)	$0,14 \pm 0,09$ (n = 6)
	Mast	$1,63 \pm 0,29^{***}$ (n = 290)	$1009,69 \pm 110,88^{***}$ (n = 290)	$42 \pm 1^*$ (n = 6)	$0,16 \pm 0,03$ (n = 6)
Herbst	Zucht	$1,24 \pm 0,29^{***}$ (n = 290)	$986,46 \pm 43,52^{***}$ (n = 290)	$55 \pm 2^*$ (n = 6)	$0,04 \pm 0,03$ (n = 6)
	Mast	$3,26 \pm 0,51^{***}$ (n = 341)	$1439,15 \pm 71,36^{***}$ (n = 341)	$122 \pm 1^*$ (n = 6)	$0,05 \pm 0,04$ (n = 6)
Winter	Zucht	$2,98 \pm 0,63$ (n = 122)	$1417,38 \pm 196,64$ (n = 122)	101 ± 1 (n = 3)	$0,02 \pm 0,01$ (n = 3)
	Mast	$4,26 \pm 1,47$ (n = 562)	$1761,02 \pm 220,27$ (n = 562)	91 ± 1 (n = 9)	$0,07 \pm 0,04$ (n = 9)

turindex für die unterschiedlichen Boniturzeitpunkte ist in Abbildung 7 im Vergleich zur zeitgleich auf Tierhöhe ermittelten mittleren NH_3 -Konzentration dargestellt.

Diskussion

In dieser Studie sollten Daten zum Stallklima sowie zu den Emissionen in und aus einer Kaninchenhaltungsanlage erhoben werden, um Umweltbelastungen und etwaige Wirkungen auf die Gesundheit der im Stall gehaltenen Tiere abschätzen zu können.

Die Temperatur im Stall stieg in beiden Etagen der Halteanlage im Untersuchungszeitraum nicht über die gesetzlich zugelassenen Maximalwerte an. Die Stalltemperatur darf für Kaninchen bei einer Außentemperatur von über $30 \text{ }^\circ\text{C}$ nicht dauerhaft mehr als $3 \text{ }^\circ\text{C}$ über der Außentemperatur liegen (Tierschutz-Nutztierhaltungsverordnung 2014). Die im Schnitt um $1 \text{ }^\circ\text{C}$ höhere Temperatur in der oberen Etage verglichen mit der unteren Etage war vermutlich durch die Verdrängung warmer Luft durch kalte Zuluft aufgrund ihrer Dichteunterschiede (Haas 2002) in der unteren Etage und

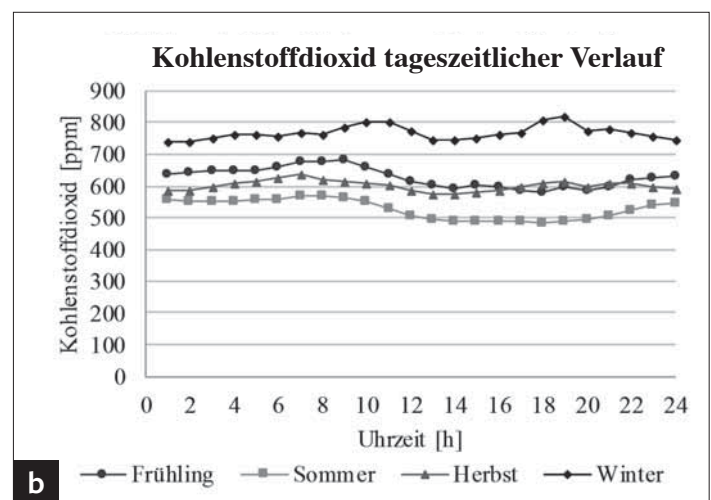
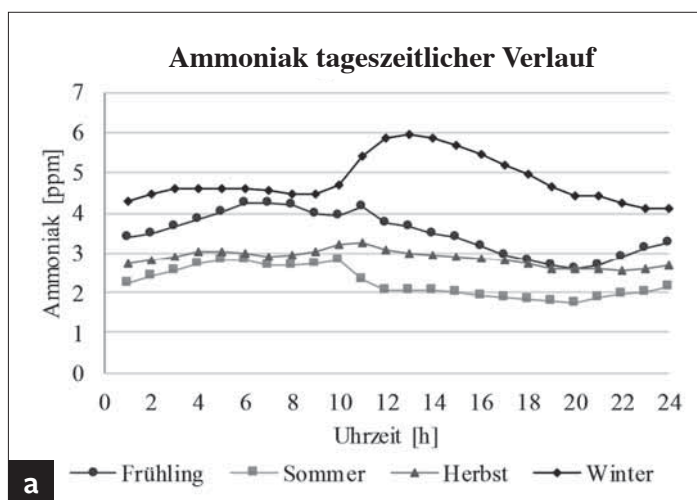


ABBILDUNG 6: NH_3 - (a) und CO_2 -Konzentration (b) im tageszeitlichen Verlauf, getrennt nach unterschiedlichen Jahreszeiten (a) Ammoniak, (b) Kohlenstoffdioxid

TABELLE 4: Emissionsfaktoren von NH₃, CO₂, Geruch und Gesamtstaub von Kaninchen pro GV (500 kg) und Jahr im Vergleich zwischen verschiedenen Studien. Die ermittelten Emissionsfaktoren pro Tierplatz in der Studie von Hol et al. (2004) wurden zur besseren Vergleichbarkeit mittels des KTBL-Großvieheinheitenrechners (KTBL 2019) auf die Großvieheinheit (500 kg) umgerechnet.

Literatur	Tierart	NH ₃ [kg GV ⁻¹ a ⁻¹]	CO ₂ [kg GV ⁻¹ a ⁻¹]	Geruch [GE GV ⁻¹ s ⁻¹]	Gesamtstaub [kg GV ⁻¹ a ⁻¹]
Eigene Untersuchungen	Häsinnen	58,78	38671,12	98,01	3,25
	Mastkaninchen	42,25	20342,51	43,90	1,72
Calvet et al. (2011)	Häsinnen	61,32	13783,86	-	-
	Mastkaninchen	37,67	12194,65	-	-
Michl & Hoy, (1999)	Häsinnen	-	-	-	-
	Mastkaninchen	2,01	-	-	-
Hol et al. (2004)	Häsinnen	57,89	-	76,68	-
	Mastkaninchen	57,14	-	123,81	-

dem damit einhergehenden Aufstieg warmer Luft im Stallraum bedingt. Die relative Luftfeuchte jedoch, die laut Tierschutz-Nutztierhaltungsverordnung im Winter bei unter 10 °C einen Wert von 70 % nicht übersteigen soll, war mit einem durchschnittlichen Wert von 75,5 % bei Temperaturen unter 10 °C zu hoch und könnte durch eine bessere Luftzirkulation mit zusätzlich vorgewärmter Luft (Emele 2013) im Winter vermindert werden. Dies ist eine Maßnahme, die Schimmelbildung reduziert und Materialien schont (Grant et al. 1989, Johansson et al. 2013, Nielsen et al. 2004).

Ammoniakkonzentrationen wurden mittels fest installierter Sensoren in 1,2 m Höhe im Stallraum in der Nähe des Abluftschachts und im Abluftschacht erfasst sowie mittels eines Handmessgerätes auf Tierhöhe gemessen. Die mittels installierter Sensoren ermittelten NH₃-Konzentrationen zeigten typische saisonale und diurnale Einflüsse (Abb. 5), die auf veränderte Luftwechselraten zurückgeführt werden können. Durch geringere Luftwechsel nachts und in der kälteren Jahreszeit kommt es in der Regel zu einer verstärkten Anreicherung des Schadgases in der Stallluft (Oldenburg 1989). Tägliche Konzentrationsanstiege zwischen 9:00 und 11:00 Uhr sind, ähnlich wie bei Schweinen (Hoff et al. 2012), auf den Zeitpunkt der Entmistung zurückzuführen. Auch inner-

halb der Mastverläufe konnte, außer in den Frühlingsmonaten, ein NH₃-Anstieg im Stallraum beobachtet werden (Abb. 5), der vermutlich, wie bei anderen Tierarten, durch die zunehmende Verschmutzung von Oberflächen im Stall durch vermehrt anfallende Exkrememente und durch die längere Verweilzeit von Exkrementablagerungen erklärt werden kann (Oldenburg 1989). Unterstützt wird diese Vermutung durch die hohe positive Korrelation zwischen Tiergewichten und NH₃-Konzentrationen im Mastverlauf sowie durch die Beobachtung, dass die Verschmutzung der Spaltenböden in dieser Studie im Laufe eines Durchgangs zunahm (Abb. 7). Die nach Tierschutz-Nutztierhaltungsverordnung (2014) entsprechende Gestaltung des Spaltenbodens mit 11 mm Spaltenweite und 11 mm Auftrittsbreite und die Errichtung einer erhöhten Ebene mit maximal 15 % Perforierung ist in diesem Zusammenhang kritisch zu hinterfragen, da dadurch offenbar kein ausreichender Abfluss bzw. Durchtritt der Exkrememente gewährleistet wurde. Eine Maßnahme zur Verringerung der NH₃-Anstiege könnte die regelmäßige Zwischenreinigung der Böden sein (Pflanz 2011). Allerdings lagen bis auf wenige Ausnahmen alle erhobenen NH₃-Messwerte unter dem nach der Tierschutz-Nutztierhaltungsverordnung (2014) vorgegebenen Wert von 10 ppm und erreichten niemals den

ABBILDUNG 7: Fußbodenhygiene (mittlerer kumulativer Boniturindex = kBI) im Vergleich zur NH₃-Konzentration (ppm) im Stall auf Tierhöhe am 7., 30., 52. und 77. Lebenstag. Signifikante Unterschiede der Fußbodenhygiene zwischen den einzelnen Boniturzeitpunkten sind durch Sterne (**) ($p < 0,01$) markiert.

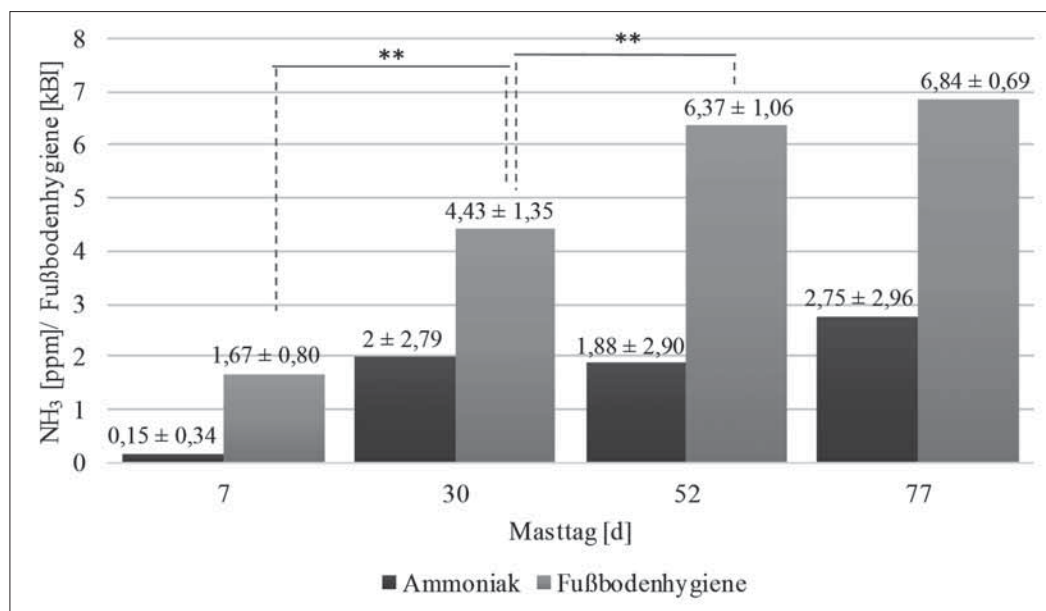


TABELLE 5: In VDI 3894-1 (2011-09) beschriebene Emissionsfaktoren verschiedener Tierarten (Rinder, Schweine und Geflügel). Da die Emissionsfaktoren in dieser Richtlinie nur auf den Tierplatz bezogen werden, wurden sie im Rahmen dieser Studie für eine bessere Vergleichbarkeit mittels des KTBL-Großvieheinheitenrechners (KTBL 2019) auf die Großvieheinheit (500 kg) umgerechnet.

Literatur	Tierart	NH ₃ (kg GV ⁻¹ a ⁻¹)	Geruch (GE GV ⁻¹ s ⁻¹)	Gesamtstaub (kg GV ⁻¹ a ⁻¹)
VDI 3894-1, (2011-09)	Rinder	4,05–13,16	12,00–30,00	0,5–1,75
	Schweine	12,50–32,40	20,00–75,00	0,91–5,33
	Geflügel	11,77–92,85	30,00–75,00	15,00–76,47

auch kurzzeitig zulässigen Maximalwert von 20 ppm. Im Vergleich lagen sogar die tagsüber im Tierbereich mittels Handmessgerät erfassten NH₃-Konzentrationen regelmäßig unter, nur selten gleichauf mit den Konzentrationen der fest installierten Sensoren. Beruhen auf diesen Ergebnissen bestand im Untersuchungszeitraum sehr wahrscheinlich keine Gesundheitsgefährdung für die Tiere im Stall durch eingeatmetes NH₃ (Stombaugh et al. 1969). Aufgrund dieser niedrigen Messwerte sind Maßnahmen zur weiteren Verminderung der NH₃-Konzentrationen nicht zwingend erforderlich. Es muss bei der Beurteilung jedoch beachtet werden, dass in größeren Produktionsstätten mit niedrigeren Volumenströmen höhere Gaskonzentrationen erwartet werden können. Die vorliegende Untersuchung wurde mit einer begrenzten Tierzahl durchgeführt, was eine allgemeingültige Aussage auch für größere Kaninchenbetriebe erschwert. Emissionsmessungen ergaben stets höhere Konzentrationen im Abluftschacht für Mast- als für Zuchttiere, bedingt durch die in der Mastphase größere im Stall befindliche Tiermasse, die längere Mastdauer als Zuchtdauer und das Managementverfahren resultierend aus dem Kombiparksystem. Während die Zuchttiere in eine gesäuberte und desinfizierte Stallanlage verbracht wurden, begann die Mast mit bereits verschmutzten Spaltenbodenstegen, die im weiteren Mastverlauf hochgradig verschmutzten. Entsprechendes gilt auch für die Emissionen von CO₂ und Staub. Die Berechnung der Emissionsfaktoren aus diesen Untersuchungen ist durch fehlende Untersuchungen im Frühjahr eingeschränkt. Die in dieser Studie gemessene geringere Temperatur und der geringere Volumenstrom im Frühjahr im Vergleich zum Sommer lassen im Frühjahr geringe Emissionen erwarten, weshalb die hier berechneten Emissionsfaktoren für Zucht und Mast eher geringfügig überschätzte Werte darstellen dürften. Bei der weiteren Beurteilung der Emissionsfaktoren muss zudem berücksichtigt werden, dass angesichts der Höhe der Luftwechselraten im Versuchsstall in anderen Kaninchenhaltungen mit anderen Lüftungssystemen auch geringere Emissionsfaktoren als die in dieser Studie berechneten ermittelt werden könnten. Die NH₃-Emissionsfaktoren in dieser Studie waren für Zuchthänsinnen etwas niedriger als in einer vorherigen Studie von Calvet et al. (2011) in Spanien und etwas höher als diejenigen von Hol et al. (2004) in den Niederlanden (Tab. 4). Die Emissionsfaktoren von Masttieren lagen ebenfalls zwischen den Werten, die von Calvet et al. (2011) und Hol et al. (2004) erhoben wurden, jedoch deutlich höher als bei Messungen von Michl und Hoy (1996) in Deutschland (Tab. 4). Unterschiede könnten sich durch unterschiedliche Lüftungsraten und, wie auch von Calvet et al. (2011) herausgestellt wurde, durch unterschiedliche Studiendesigns und

Managementmaßnahmen im Stall ergeben haben. Die Mastkaninchen von Hol et al. (2004) wurden zum Beispiel in Drahtgitterkäfigen gehalten, die Exkremente mittels Gülleband aufgefangen und Kot direkt von Urin getrennt. Die Exkremente wurden in dem Maststall dennoch nur alle neun Wochen aus dem Stallraum entfernt. Das Beispiel zeigt, dass organisatorische Maßnahmen, wie die tägliche Entmistung, NH₃-Emissionen aus Kaninchenhaltungen im Sinne des Umweltschutzes reduzieren können. Wie in dieser Studie erhoben und bereits in einer vorherigen Studie von Calvet et al. (2011) beschrieben, waren die NH₃-Emissionen von Kaninchen pro Großvieheinheit im Vergleich zu Rindern und Schweinen deutlich höher (Tab. 5), aber vergleichbar mit den Emissionsfaktoren von Geflügel. Calvet et al. (2011) vermutete, dass die hohen Emissionen von Kaninchen durch den hohen alkalischen pH-Wert des Kaninchenurins (pH > 8) zustande kommen (Kiwull-Schöne et al. 2005), da ein hoher pH-Wert die Umwandlung von Ammonium zu Ammoniak und somit die Freisetzung des Gases fördert (du Plessis und Kroontje 1964). Ursächlich dafür kann aber auch die höhere Stoffwechselrate kleiner Tiere gegenüber größeren Tieren (Feigenspan 2017) und die damit einhergehende erhöhte Produktion von Stoffwechselmetaboliten pro Kilogramm Körpergewicht sein. Trotz der hohen Emission pro Großvieheinheit bleibt die Gesamtemission pro Tierplatz vor allem von Mastkaninchen im Vergleich zur Haltung von zum Beispiel Rindern aufgrund der geringeren Körpergröße beziehungsweise Körpermasse von Kaninchen geringer. Eine Kuh im Liegeboxenlaufstall mit Fest- oder Flüssigmistverfahren (14,75 kg NH₃ TP⁻¹ a⁻¹) (VDI 3894-1, 2011) produziert zum Beispiel so viel NH₃ wie 98 Mastkaninchen (0,15 kg NH₃ TP⁻¹ a⁻¹ pro Tier). Andererseits produzieren schon 13 Zuchtkaninchen inklusive Jungtiere (1,13 kg NH₃ TP⁻¹ a⁻¹ pro Zuchtkaninchen) so viel wie eine Kuh. Auch wenn die Emissionsfaktoren in dieser Studie auch durch hohe Luft-raten beeinflusst sein könnten, bleibt angesichts der Ergebnisse vorheriger Studien festzuhalten, dass die zu erwartenden Emissionen pro Einzeltier vor allem bei Zuchttieren hoch sind und zumindest bei größeren Produktionsanlagen Umweltbelastungen und genehmigungsrelevante Konzentrationen im unmittelbaren Umfeld der Ställe auftreten könnten. Diesbezüglich sind weiterführende Untersuchungen anzuraten.

Ähnlich wie die NH₃-Konzentrationen zeigten auch die mittels fest installierter Sensoren im Stall und Abluftschacht ermittelten CO₂-Konzentrationen diurnale und saisonale Schwankungen. Die in dieser Studie erhobenen negativen Korrelationen von CO₂ in der Stallluft mit dem temperaturabhängigen Volumenstrom können auf den geringeren Luftaustausch und die erhöhte Atmung der nacht- und dämme-

rungsaktive Tiere (Jilge 1991) zurückgeführt werden (von Engelhardt et al. 2015). Zunahmen der CO₂-Konzentrationen während des Mastverlaufs können dadurch erklärt werden, dass CO₂ pro Wärmeproduktionseinheit mit Zunahme des respiratorischen Quotienten bei wachsender Körpermasse von Tieren ansteigt (Pedersen et al. 2008). Dies wird in dieser Studie durch die positive Korrelation von CO₂ mit dem Tiergewicht unterstützt. Zudem wird CO₂ aus Exkrementen freigesetzt, wobei bei regelmäßiger Säuberung etwa 10 % von der CO₂-Konzentration der Ausatemluft der Tiere (Pedersen et al. 2008), bei unregelmäßiger Entfernung von Exkrementen auch deutlich mehr (Ni et al. 1999) CO₂ entstehen kann. Daher kann auch, wie bereits für NH₃ ausgeführt, die im Mastverlauf zunehmende Bodenverschmutzung höhere CO₂-Konzentrationen fördern. Trotz der Schwankungen stiegen die CO₂-Konzentrationen sowohl bei den Messungen durch die fest installierten Sensoren als auch bei den punktuellen Messungen durch das Handmessgerät auf Tierebene nicht über die gesetzlich vorgeschriebenen Maximalwerte von 3000 ppm (Tierschutz-Nutztierhaltungsverordnung 2014) an. Bei den CO₂-Messungen muss im Gegensatz zu den NH₃-Messungen erwähnt werden, dass die Ergebnisse der Messungen auf Tierhöhe mittels Handmessgerät stets höher lagen als die Messungen durch die Stallsensoren. Da CO₂ schwerer als NH₃ ist, kam es vermutlich zur vermehrten Anreicherung von CO₂ in Bodennähe, weshalb die Stallsensoren in diesem Fall die tatsächliche Belastung im Tierbereich an CO₂ im Gegensatz zu NH₃ unterschätzten. Die in dieser Studie erhobenen Emissionsfaktoren für CO₂ lagen vor allem in der Zuchtphase deutlich höher als die von Calvet et al. (2011) (Tab. 4) in vorherigen Untersuchungen ermittelten. Ein Grund dafür ist wahrscheinlich der in die Berechnung von Emissionsfaktoren eingehende durchschnittlich höhere Volumenstrom pro Tier in dem Stallgebäude dieser Studie verglichen mit den Stallgebäuden von Calvet et al. (2011) (Zucht: 78,8 m³/h pro Tier vs. 48,5 m³/h pro Tier; Mast: 7,7 m³/h pro Tier vs. 6,4 m³/h pro Tier). Tierhaltungen tragen jedoch aufgrund der weitestgehenden Äquivalenz zwischen der corporalen Aufnahme von CO₂ und dessen Abgabe durch Atmung keinen großen Beitrag zur Umweltbelastung bei (IPCC 2006).

Weitere umweltrelevante Substanzen, die in dieser Studie erfasst wurden, sind Staub und Geruch. Staubmassen, bestimmt durch gravimetrische Messverfahren, lagen in beiden Produktionsphasen teilweise unter der für die Waage angegebenen Bestimmungsgrenze zur Massenbestimmung von Staub. Die Konzentrationen lagen in jeder Jahreszeit in einem sehr geringen Bereich (0,02–0,16 mg/m³ [Tab. 3]). Ähnliche Resultate wurden von Kaliste et al. (2002) unter Laborbedingungen bei Kaninchen erhoben (< 0,01–2,3 mg/m³). Bezogen auf die Großvieheinheit lagen die berechneten Staubemissionsfaktoren deutlich niedriger als die aus Geflügelhaltungen, etwas höher als aus Rinderhaltungen und in der gleichen Größenordnung, wie die Faktoren aus Schweinehaltungen (Tab. 5). Da die Großvieheinheiten in üblichen Schweine- und Rinderhaltungen in der Regel jedoch deutlich höher sind, kann von geringeren Staubbelastungen in der Umgebung von üblichen Kaninchenhaltungen im Vergleich zu anderen Tierarten ausgegangen werden. So betrug in Deutschland bei der Viehzählung im Jahr 2018 laut

dem statistischen Bundesamt die durchschnittliche Anzahl an Tieren pro Betrieb bei Milchkühen 65, bei Mastschweinen 628 und bei Legehennen 21805 Tiere (Statistisches Bundesamt [Destatis] 2019). Umgerechnet nach dem KTBL-Großvieheinheitenrechner (KTBL 2019) entspricht das 78,0 GV Milchkühe, 81,6 GV Mastschweine und 74,1 GV Legehennen pro Betrieb. Im Vergleich dazu bestand der Betrieb, auf dem die Untersuchungen dieser Studie durchgeführt wurden, inklusive dem Versuchsstall aus insgesamt circa 6000 Masttieren und 600 Zuchttieren, entsprechend 12,6 GV Masttieren und 8,0 GV Zuchttieren und gehörte damit bereits zu einem der größten Kaninchenfleischerzeugungsbetriebe in Deutschland.

Geruchsemissionen werden durch zahlreiche Parameter, wie tageszeitlich abhängige Fütterungen, Tieraktivitäten, Entmistungen und, gerade bei menschengestützter Olfaktometrie, durch individuelle subjektive Geruchserlebnisse beeinflusst (Brose und Hartung 2001). Bei einer punktuellen Geruchsmessung durch einen Olfaktometer, wie sie in dieser Studie erfolgte, sind Variationen im Jahres- und Tagesverlauf nicht gänzlich berücksichtigt und Fehlinterpretationen daher nicht auszuschließen (Brose und Hartung 2001). Um Einflussfaktoren auf die Geruchsentstehung, auch im Vergleich zwischen Zucht und Mast, zu charakterisieren, ist eine größere Anzahl an Messungen als in der vorliegenden Studie durchgeführt, erforderlich. Dennoch wurden für eine grobe Einschätzung Geruchsemissionsfaktoren in dieser Studie erhoben und mit Emissionsfaktoren aus einer früheren Studie von Hol et al. (2004) (Tab. 4) verglichen. Die Emissionsfaktoren waren in der Zuchtphase in dieser Studie höher, in der Mastphase aber deutlich niedriger als die von Hol et al. (2004) ermittelten. Eine Ursache für die höheren Geruchsemissionsfaktoren in der Mastphase bei Hol et al. (2004) war möglicherweise der bereits beschriebene höhere NH₃-Emissionsfaktor, da NH₃ zu den Geruchsstoffen zählt (Oldenburg 1989) und höhere Konzentrationen normalerweise stärker wahrgenommen werden. Der Emissionsfaktor für Geruch lag insgesamt in der Zuchtphase höher als bei anderen Tierarten, in der Mastphase war er vergleichbar mit Schweinen und Geflügel (Tab. 5). Die Ausbreitungen von Gerüchen spielen im Genehmigungsverfahren von Tierhaltungen eine wichtige Rolle, da aber in üblichen Kaninchenhaltungen geringere Großvieheinheiten eingestellt sind und die Emissionsfaktoren in Ställen mit niedrigeren Lüftungsraten geringer, als hier beschrieben, sein könnten, kann davon ausgegangen werden, dass Abstände zur Wohnbebauung in Bezug auf Gerüche eine geringere Rolle spielen.

Schlussfolgerung

Das Ziel dieser Studie war, durch Messungen von Stallklimaparametern in und Emissionen aus einer Kaninchenhaltungseinrichtung potenzielle Gefahren für die Gesundheit der im Stall lebenden Kaninchen sowie für die Umwelt abschätzen und bewerten zu können. Die CO₂-Konzentrationen ließen auf einen ausreichenden Luftaustausch schließen. Die im Stall und Tierbereich gemessenen NH₃-Konzentrationen ließen auf keine gesundheitliche Belastung für die Tiere schließen, dennoch könnten die Konzentrationen

durch regelmäßige Säuberung des Spaltenbodens bzw. eine veränderte Gestaltung der Spaltenweiten und Auftrittsbreiten noch weiter verringert werden. Die Gesamtemission im Verhältnis zu anderen Tierarten spielte in dieser Kaninchenhaltung mit den gegebenen Luftvolumenströmen und einer begrenzten Tierzahl kaum eine Rolle. Die Emissionsbelastung pro Großvieheinheit bezüglich aller untersuchten Stoffe zeigte jedoch, dass ein genehmigungsrelevanter Umwelteintrag durch Kaninchenhaltungsanlagen nicht auszuschließen ist. Weitere Studien mit höheren Tierzahlen und unterschiedlichem Lüftungsmanagement sollten sich anschließen, um die Ergebnisse aus dieser Pilotanlage abzusichern.

Conflict of interest

Es bestehen keine geschützten, finanziellen, beruflichen oder anderen persönlichen Interessen an einem Produkt, Service und/oder einer Firma, welche die in diesem Manuskript dargestellten Inhalte oder Meinungen beeinflussen könnten.

Ethische Anerkennung

Die Autoren erklären, dass die Experimente streng nach den internationalen Tierschutzrichtlinien durchgeführt wurden. Alle Tiere wurden nach EU- und nationalem Recht gehalten („Tierschutzgesetz“ [Tierschutzgesetz 2006] und der „Verordnung zum Schutz landwirtschaftlicher Nutztiere und anderer zur Erzeugung tierischer Produkte gehaltener Tiere bei ihrer Haltung“ (Tierschutz-Nutztierhaltungsverordnung 2006)). Diese Studie wurde vom Tierschutzbeauftragten der Tierärztlichen Hochschule Hannover, Stiftung, geprüft und genehmigt (Aktenzeichen: TVO-2018-V-55). Die Autoren versichern, während des Entstehens der vorliegenden Arbeit die allgemeingültigen Regeln Guter Wissenschaftlicher Praxis befolgt zu haben.

Funding

Diese Arbeit wurde im Rahmen des Projektes „Entwicklung und Erprobung eines tier- und umweltgerechten, innovativen Haltungssystems für Mast- und Zuchtkaninchen unter Praxisbedingungen (Rabbit welfare comfort housing – Low emission; Rawecoh – Le) durchgeführt. Die Förderung erfolgte über das Netzwerk EIP Agrar & Innovation Niedersachsen. Dieses Netzwerk läuft unter dem Dach der ELER-Fördermaßnahme „Europäische Innovationspartnerschaft – Produktivität und Nachhaltigkeit in der Landwirtschaft (EIP Agri)“. Ziel dieser Fördermaßnahme ist die Weiterentwicklung der Landwirtschaft bei verbessertem Umwelt- und Ressourcenschutz.

Autorenbeitrag

Konzeption oder Design der Arbeit: MF, LB, JM.
Datenerhebung: LB, JM, SK, SLR.
Datenanalyse und -interpretation: SK, JS, MF.
Manuskriptentwurf: SK.

kritische Revision des Artikels: MF, JS, SLR, LB, JM, NK.
endgültige Zustimmung der für die Veröffentlichung vorgesehenen Version: SK, SLR, LB, JM, JS, NK, MF.

Literatur

- Adell E, Calvet S, Torres AG, Cambra-López M (2012):** Particulate matter concentrations and emissions in rabbit farms. *World Rabbit Sci* 20: 1–11.
- Bannwarth H, Kremer BP, Schulz A (Hrsg.) (2013):** Atmung. In: Basiswissen Physik, Chemie und Biochemie: Vom Atom bis zur Atmung – für Biologen, Mediziner und Pharmazeuten. Springer Berlin Heidelberg, Germany, 421–436.
- Brose G, Hartung E (2001):** Dynamik der Geruchsfreisetzung aus einem Schweinestall – Teil 1. Methodische Umsetzung mit Olfaktometrie und „elektronischer Nase“. *Agrartechnische Forschung* 7 (6): 105–110.
- Calvet S, Cambra-López M, Estellés Barber F, Torres AG (2011):** Characterization of the indoor environment and gas emissions in rabbit farms. *World Rabbit Sci* 19: 49–61.
- Calvet S, Cambra-López M, Estellés Barber F, Torres AG (2008):** Experimental Balance to estimate efficiency in the use of nitrogen in rabbit breeding. *World Rabbit Sci* 16: 205–211.
- Cambra-López M, Úbeda-Sánchez Y, Torres AG (2008):** Characterization of airborne particulate matter from intensive rabbit farms: concentration and emission. In: *Agricultural and biosystems engineering for a sustainable world. International Conference on Agricultural Engineering. Hersonissos, Crete, Greece 2008*, P-086 ref.21.
- DIN EN 13284-1 (2002-04):** Emissionen aus stationären Quellen – Ermittlung der Staubmassenkonzentration bei geringen Staubkonzentrationen – Teil 1: Manuelles gravimetrisches Verfahren (EN 13284-1:2001).
- DIN EN 13725 (2003-07):** Luftbeschaffenheit – Bestimmung der Geruchsstoffkonzentration mit dynamischer Olfaktometrie (EN 13725:2003).
- DIN EN 15259 (2008-01):** Luftbeschaffenheit – Messung von Emissionen aus stationären Quellen – Anforderungen an Messstrecken und Messplätze und an die Messaufgabe, den Messplan und den Messbericht (EN 15259:2007).
- DIN ISO 17025 (2005-08):** Allgemeine Anforderungen an die Kompetenz von Prüf- und Kalibrierlaboratorien (ISO 17025:2005).
- Donham KJ, Cumro D, Reynolds S (2002):** Synergistic effects of dust and ammonia on the occupational health effects of poultry production workers. *J Agromedicine* 8: 57–76.
- du Plessis MCF, Kroontje W (1964):** The Relationship between pH and Ammonia Equilibria in Soil. *Soil Sci Soc Am J* 28: 751–754.
- Emele J (2013):** Möglichkeiten der Prophylaxe anhand von Managementoptimierung: Positivbeispiele verschiedener Geflügelhaltungen: Broiler. In: Rackwitz R, Pees M, Aschenbach J, Gäbel G (Hrsg.), LBH: 7. Leipziger Tierärztekongress – Tagungsband 1. Lehmanns Media GmbH, Berlin, Germany, 370–372.
- Feigenspan A (2017):** Energiestoffwechsel. In: *Prinzipien der Physiologie*. Springer Spectrum, Berlin, Heidelberg, Germany.
- Gamble MR, Clough G (1976):** Ammonia build-up in animal boxes and its effect on rat tracheal epithelium. *Lab Anim* 10: 93–104.
- Grant C, Hunter CA, Flannigan B, Bravery AF (1989):** The moisture requirements of moulds isolated from domestic dwellings. *Int Biodeterior* 259–284.
- Groot Koerkamp PWG, Metz JHM, Uenk GH, Phillips VR, Holden MR, Sneath RW, Short JL, White RPP, Hartung J, Seedorf J, Schröder M, Linkert KH, Pedersen S, Takai H, Johnson JO, Wathes CM (1998):** Concentrations and Emissions of Ammonia in Livestock Buildings in Northern Europe. *J Agric Engng Res* 70: 79–95.

- Haas U (2002):** Physik für Pharmazeuten und Mediziner: Ein Lehrbuch für alle Studierenden mit Physik als Nebenfach. Wissenschaftliche Verlagsgesellschaft mbH Stuttgart, Stuttgart, Germany.
- Hoff SJ, Bundy DS, Nelson MA, Zelle BC, Jacobson LD, Heber AJ, Ni J, Zhang Y, Koziel JA, Beasley DB (2012):** Emissions of Ammonia, Hydrogen Sulfide, and Odor before, during, and after Slurry Removal from a Deep-Pit Swine Finisher. *J Air Waste Manag Assoc* 56: 581–590.
- Hol JMG, Scheer A, Ogink NWM (2004):** Onderzoek naar de ammoniak- en geuremissie van stallen LX: stal voor voedsters en vleeskonijnen. Report No. 219, Agrotechnology & Food Innovations B.V., Wageningen University, The Netherlands.
- IPCC (2006):** IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Intergovernmental Panel on Climate Change, NGGIP Publications, IGES, Japan.
- Jilge B (1991):** The rabbit: a diurnal or a nocturnal animal? *J Exp Anim Sci* 34: 170–183.
- Johannsen U, Erwerth W, Menger S, Neumann R, Mehlhorn G, Schimmel D (1987):** Experimentelle Untersuchungen zur Wirkung einer chronischen aerogenen Schadgasbelastung des Saugferkels mit Ammoniak unterschiedlicher Konzentrationen 3. Mitteilung: Licht- und elektronenmikroskopische Untersuchungen zur Pathologie und Pathogenese der chronischen aerogenen Ammoniakschädigung des Respirationsapparates beim Ferkel. *J Vet Med Series B* 34(1–10): 260–273.
- Johansson P, Bok G, Ekstrand-Tobin A (2013):** The effect of cyclic moisture and temperature on mould growth on wood compared to steady state conditions. *Build Environ* 65: 178–184.
- Kaliste E, Linnainmaa M, Meklin T, Nevalainen A (2002):** Airborne contaminants in conventional laboratory rabbit rooms. *Lab Anim* 36: 43–50.
- Kiwull-Schöne H, Kalhoff H, Manz F, Kiwull P (2005):** Food mineral composition and acid-base balance in rabbits. *Eur J Nutr* 44: 499–508.
- Krupa SV (2003):** Effects of atmospheric ammonia (NH₃) on terrestrial vegetation: a review. *Environ Pollut* 124: 179–221.
- KTBL (2019):** Großvieheinheitenrechner 2.1. Verfügbar unter: <https://daten.ktbl.de/gvrechner/gvHome.do#start> (Zuletzt geprüft: 23.07.2019).
- KTBL (2013):** Vorgehensweise zur Ermittlung repräsentativer Emissionsfaktoren – Messprotokoll für zwangsgelüftete Stallsysteme – Beispiel Mastschweine. KTBL-Messprotokoll.
- Menzi H, Oenema O, Burton C, Shipin O, Gerber P, Robinson T, Franceschini G (2010):** Impacts of intensive livestock production and manure management on the environment. In: Henning S, Harold AM, Fritz S, Laurie EN (eds.), *Livestock in a changing landscape*. Island Press, Washington DC, 139–164.
- Menzi H, Steinfeld H (2011):** Weltweite Entwicklungen und Auswirkungen der Nutztierhaltung auf Klima und Umwelt. In: KTBL (Hrsg.), *Emissionen aus der Tierhaltung. Treibhausgase, Umweltbewertung, Stand der Technik*. KTBL-Schrift 491, Darmstadt, Germany, 11–23.
- Michl R, Hoy S (1996):** Results of continuous measuring of gases in rabbit keeping by using multigas-monitoring. *Berl Munch Tierarztl Wochenschr* 109: 340–343.
- Ni J-Q, Vinckier C, Hendriks J, Coenegrachts J (1999):** Production of carbon dioxide in a fattening pig house under field conditions. II. Release from the manure. *Atmos Environ* 33: 3697–3703.
- Nielsen KE, Holm G, Uttrup LP, Nielsen PA (2004):** Mould growth on building materials under low water activities. Influence of humidity and temperature on fungal growth and secondary metabolism. *Int Biodeterior Biodegradation* 54: 325–336.
- Oldenburg J (1989):** Geruchs- und Ammoniak Emissionen aus der Tierhaltung. KTBL-Schrift 333, Darmstadt, Germany.
- Pedersen S, Blanes-Vidal V, Joergensen H, Chwalibog A, Haeusermann A, Heetkamp MJW, Aarnink AJA (2008):** Carbon Dioxide Production in Animal Houses: A Literature Review. *Agric Eng Int CIGR Ejournal* (X), BC 08 008.
- Pedersen S, Takai H, Johnsen JO, Metz JHM, Koerkamp PWGG, Uenk GH, Phillips VR, Holden MR, Sneath RW, Short JL, White RP, Hartung J, Seedorf J, Schroder M, Linkert KH, Wathes CM (1998):** A comparison of three balance methods for calculating ventilation rates in livestock buildings. *J Agric Eng Res* 70: 25–37.
- Pflanz W (2011):** Emissionsminderungsmaßnahmen in der Schweinehaltung. In: KTBL (Hrsg.), *Emissionen aus der Tierhaltung. Treibhausgase, Umweltbewertung, Stand der Technik*. KTBL-Schrift 491, Darmstadt, Germany.
- Saha CK, Ammon C, Berg W, Fiedler M, Loebisn C, Sanftleben P, Brunsch R, Amon T (2014):** Seasonal and diel variations of ammonia and methane emissions from a naturally ventilated dairy building and the associated factors influencing emissions. *Sci Total Environ* 468–469: 53–62.
- Schulz J, Kemper N, Hartung J, Janusch F, Mohring SAI, Hamscher G (2019):** Analysis of fluoroquinolones in dusts from intensive livestock farming and the co-occurrence of fluoroquinolone-resistant *Escherichia coli*. *Sci Rep* 9: 5117.
- Statistisches Bundesamt (Destatis) (2019):** Verfügbar unter: https://www.destatis.de/DE/Themen/Branchen-Unternehmen/Landwirtschaft-Forstwirtschaft-Fischerei/Tiere-Tierische-Erzeugung/_inhalt.html#sprg238652 (Zuletzt geprüft: 13.08.2019).
- Stombaugh DP, Teague HS, Roller WL (1969):** Effects of Atmospheric Ammonia on the Pig. *J Anim Sci* 28(6): 844–847.
- Tierschutz-Nutztierhaltungsverordnung (2014):** (TierSchNutztV) Anforderungen an das Halten von Kaninchen. In: Fünfte Verordnung zur Änderung der Tierschutz-Nutztierhaltungsverordnung, Bonn, Germany.
- Tierschutz-Nutztierhaltungsverordnung (2006):** (TierSchNutztV) Tierschutz-Nutztierhaltungsverordnung in der Fassung der Bekanntmachung vom 22. August 2006 (BGBl. I S. 2043), die zuletzt durch Artikel 3 Absatz 2 des Gesetzes vom 30. Juni 2017 (BGBl. I S. 2147) geändert worden ist.
- Tierschutzgesetz (2006):** (TierSchG) Tierschutzgesetz in der Fassung der Bekanntmachung vom 18. Mai 2006 (BGBl. I S. 1206, 1313), das zuletzt durch Artikel 1 des Gesetzes vom 17. Dezember 2018 (BGBl. I S. 2586) geändert worden ist.
- VDI 2066-1 (2006-11):** Messen von Partikeln - Staubmessungen in strömenden Gasen - Gravimetrische Bestimmung der Staubbelastung. Kommission Reinhaltung der Luft im VDI und DIN (Hrsg.), Beuth Verlag GmbH, Berlin.
- VDI 3894-1 (2011-09):** Emissionen und Immissionen aus Tierhaltungsanlagen - Haltungsverfahren und Emissionen - Schweine, Rinder, Geflügel, Pferde. Kommission Reinhaltung der Luft im VDI und DIN (Hrsg.), Beuth Verlag GmbH, Berlin.
- von Engelhardt W, Breves G, Diener M, Gäbel G (2015):** Physiologie der Haustiere, Georg Thieme Verlag.
- WBA Wissenschaftlicher Beirat Agrarpolitik beim BMEL (2015):** Wege zu einer gesellschaftlich akzeptierten Nutztierhaltung. Gutachten. Berlin.

Korrespondenzadresse

Dr. Michaela Fels
 Stiftung Tierärztliche Hochschule Hannover
 Institut für Tierhygiene, Tierschutz und Nutztierethologie
 Bischofsholer Damm 15 (Gebäude 116)
 30173 Hannover
 michaela.fels@tiho-hannover.de