

Karl-Heinz Krause, Torsten Hinz und Stefan Linke

# Messung der Ammoniakemission und Bestimmung des Emissionsfaktors in der Tierproduktion

Teil 1: Legehennenstall als Beispiel eines zwangsgelüfteten Systems

Ammoniakmessungen in einem Stall dienen nicht nur der Erfassung des Systemverhaltens, sondern auch der Bestimmung von Quelldaten für Ausbreitungsberechnungen. Ammoniakmessungen haben gegenüber den Messungen von Geruch, Staub und Keimen den Vorteil, dass sie für den Messzeitraum im Prinzip auf geschlossene Zeitreihendarstellungen führen. Zeitreihen eines Jahres sind nur möglich, sofern der Messaufwand dafür finanziell abdeckt ist. In Anbetracht der hohen Kosten und der Vielfalt an Stallsystemen stellt sich immer wieder die Frage, ob nicht verkürzte Zeitreihen ausreichen, um Schlussfolgerungen treffen zu können. In vorliegender Untersuchung eines Legehennenstalles wird gezeigt, wie aus einer auf wenige Tage begrenzten Zeitreihe Emissionsaussagen in Bezug auf die Messzeit und das Jahr möglich sind – bei allen Unzulänglichkeiten der Messung.

## Schlüsselwörter

Legehennenhaltung, Ammoniakmessungen, Emissionsbestimmung, Datenaufbereitung für Ausbreitungsrechnungen

## Keywords

laying hen husbandry, measurements of ammonia, determination of emission, preparation of data with regard to dispersion simulations

## Abstract

Krause, Karl-Heinz; Hinz, Torsten and Linke, Stefan

calculations. In contrast to measurements of odour, dust and germs, ammonia measurements, in principle, have the advantage to lead to self-contained time series. The measurements even could be expanded to last for a year, if the financial support is granted. Due to the high costs and the large variety of stables the question arises, whether it is possible to come to conclusions on the basis of shortened time series. For the given case of a laying hen husbandry it is shown how it is possible to generate emission statements on the basis of a time series of only a few days. This applies both for the measuring time span and the whole year – despite measuring deficiencies.

## Measuring of ammonia emission and determination of an emission factor in animal production

Part 1: Laying hen husbandry as an example of a forced ventilated animal house

Landtechnik 66 (2011), no. 5, pp. 337–341, 6 figures, 2 tables, 6 references

Ammonia measurements in animal houses do not only serve for characterization of the system behavior but also for generation of boundary conditions for atmospheric dispersion

■ Die Ammoniakmessungen im Abluftschacht eines Legehennenstalles (**Abbildung 1**) wurden im März 2011 vorgenommen. Die Messungen erfolgten im Abluftschacht, da nur hier Emissionen freigesetzt werden. Die Legehennen wurden in einer Voliere, Natura Nova Typ 260 TWIN, mit Portal gehalten. Die Messungen erfolgten kontinuierlich über zwei Tage.

Zur Bestimmung des emittierten Massenstromes ist es notwendig, Konzentration und Volumenstrom zeitgleich an dem selben Ort zu messen. Die Konzentrationen wurden mit dem Innova 1302 Multigasmonitor gemessen. Das Messprinzip bei der Ammoniakkonzentration erlaubt es, quasi kontinuierliche Messungen durchzuführen.

Abb. 1



Die Volumenstrommessung darf in diesem Fall als rudimentär bezeichnet werden: Sie nutzt die visuelle Aufzeichnung vom Stallklimacomputer, angegeben als Prozentsatz vom maximalen Luftdurchsatz. Die prozentuale Anzeige des Gerätes wurde mit der Konzentrationsmessung synchronisiert.

Die Stallklimaauslegung ist an der DIN 18910 ausgerichtet [1]. Das bedeutet, dass die Stallinnentemperatur der Außenlufttemperatur durch Lüftung „nachgefahren“ wird. Die Stallinnentemperatur lag während der Untersuchung um ca. 4 °C über der Außentemperatur.

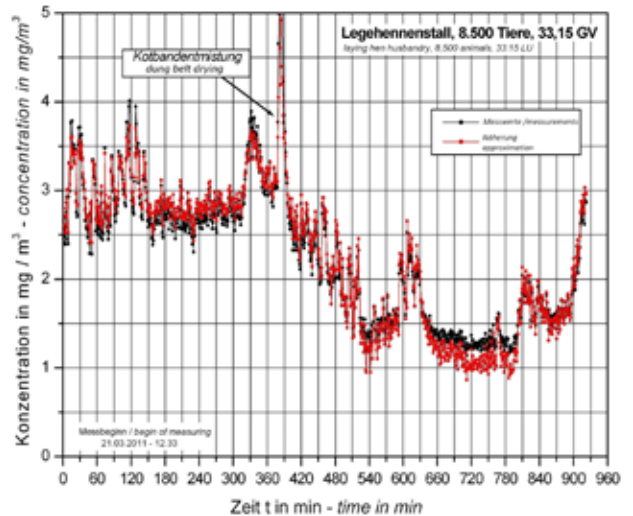
**Abbildung 2** gibt die Zeitreihe für die Konzentrationsmessung (schwarze Kurven und Punkte) wieder. Die Ammoniakkonzentration ist mit einer Zeitrates von 3 Minuten aufgezeichnet worden. Der Kurvenverlauf weist Schwankungen auf, wobei maximale Konzentrationen bei der Kotbandreinigung festzustellen waren. Die Kotbandentmistung stellt insofern eine Störgröße dar, da die erhöhte Konzentration an Ammoniak nicht von Tieraktivitäten herrührt. Sie führt auch nicht zu höheren Lüftungsraten, sondern ist systemtypisch. Im Vergleich zu anderen Haltungsvarianten müssen diese Einflüsse mit berücksichtigt werden.

Mithilfe einer Approximation kann man sich der Messkurve nähern (rote Kurven und Punkte). Der Approximation liegen dabei Kausalitäten zugrunde, die im Gegensatz zur Zeitreihe eine „Weiterbehandlung“ der Ausgangsdaten erlauben. Der alte Grundsatz: „Messen - Analysieren - Bewerten“ wird hier angewendet.

### Datenanalyse

Die aufgezeichneten Zeitreihen von Konzentration und Volumenstrom (**Abbildung 2**) lassen sich nicht fortschreiben, da man das aktuelle Zeitverhalten nicht vorhersehen kann. Die Zeitreihen geben jedoch Aufschluss darüber, wie sich andere Größen zueinander verhalten und wie häufig solche Situatio-

Abb. 2



Zeitreihe für die Konzentrationsmessung von Ammoniak sowie Approximation

Fig. 2: Time series for ammonia measurements and approximation

nen auftreten. Mit anderen Worten: die Zeitabhängigkeit wird zugunsten einer Häufigkeitsverteilung bestimmter Größen aufgehoben. Dimensionsanalysen [2] führen zu der Aussage, dass sich das Emissionsverhalten auf zwei dimensionslose Kenngrößen reduzieren lässt:

a) die dimensionslose Masse  $C_0 V_R / M_T$  und

b) die dimensionslose Konzentration  $X = C_B / C_0 - 1$ .

Mit der Bezeichnung „Massenverhältnis“ bzw. „Konzentrationsverhältnis“ kann der Begriff der Dimensionslosigkeit näher gekennzeichnet werden.

- $C_0$  steht für die Konzentration an Ammoniak im Abluftschacht, hier angegeben in mg/m<sup>3</sup>
- $V_R$  kennzeichnet das innere Stallvolumen in m<sup>3</sup>
- $M_T$  gibt die Tiermasse in kg an, wobei die übliche Bezeichnung in Großvieheinheiten (1 GV = 500 kg) hier aus Gründen der Vollständigkeit mitaufgeführt wird
- $C_B$  steht für die Ammoniakkonzentration in Bodennähe, ebenfalls in mg/m<sup>3</sup> angegeben

$C_B$  beschreibt das eigentliche stallinterne Emissionsverhalten. Über die Massenbilanz für einen Stallraum kann man  $C_B$  und  $C_0$  auch mit der Produktionsrate  $K$  und der Lüftungsrate  $N$  in Zusammenhang bringen. Danach gilt:

$$\frac{N}{K} = \frac{C_B}{C_0} - 1 \quad (\text{Gl. 1})$$

mit

$$N = \frac{\dot{V}_0}{V_R} \quad \text{und} \quad K = \frac{k}{V_R} \quad (\text{Gl. 2a, b})$$

$k$  gibt die Produktionsrate an Ammoniak an, z.B. ausgedrückt durch das Produkt Emissionsfläche multipliziert mit der Austrittsgeschwindigkeit an Ammoniak.

Die Abluftkonzentration  $C_0$  wächst auf die Größe der Bodenkonzentration  $C_B$  an, wenn entweder die Lüftungsrate  $N$

gegen 0 strebt oder K unendlich groß wird. In beiden Fällen haben die Tiere keine Überlebenschance im Stall. Folglich sind N und K endliche Werte.

**a) Substitutionsverfahren**

Für den mittleren Emissionsmassenstrom über ein Jahr steht die Beziehung:

$$\overline{M}_0 = \frac{1}{t_{Jahr}} \int_0^{t_{Jahr}} C_{0,i}(t) \dot{V}_0(t) dt \tag{Gl. 3}$$

Da die Zeitreihen (t) nicht vollständig zur Integration vorliegen, kann man diese durch eine Summation über i klassierte Wertepaare ersetzen:

$$\overline{M}_0 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n C_{0,i} V_{0,i} \tag{Gl. 4}$$

Bei der Zwangslüftung orientiert sich die Klassierung  $a_i$  an der Sommerlüftungsrate, dem maximalen Volumenstrom, mit  $i = 1 \dots 5$ :

$$\dot{V}_{0,i} = a_i \dot{V}_{0,max} \tag{Gl. 5}$$

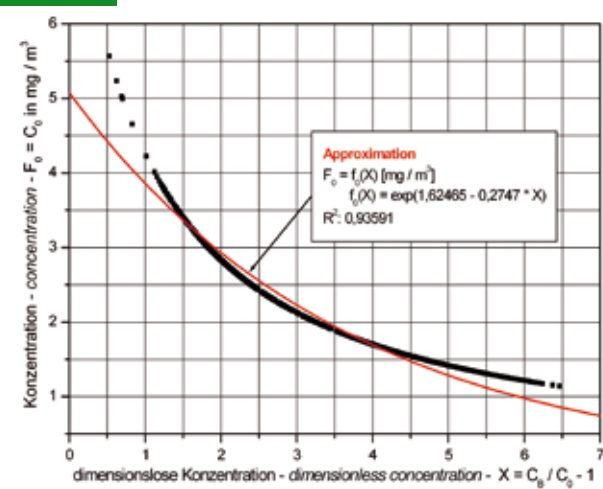
Die Auftretenshäufigkeit  $H_i$  der Volumenstromklassen führt letztlich zum mittleren Emissionsmassenstrom für das Jahr ( $n = 5$ )

$$\overline{M}_0 = \frac{\dot{V}_{0,max}}{n} \sum_{i=1}^n C_{0,i} a_i H_i \tag{Gl. 6}$$

Um den klassierten Volumenströmen die zur Massenstrombildung notwendige Konzentration  $C_{0,i}$  nach **Abbildung 3** zuzuordnen, werden die Klassengrenzen der jeweils dimensionslosen Konzentration X zugewiesen.

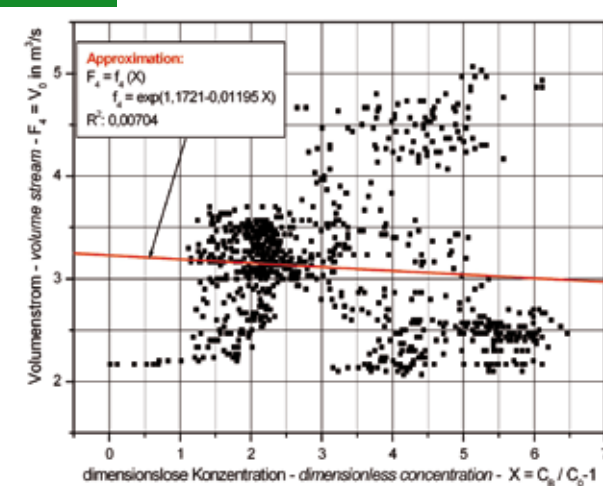
Es zeigt sich aber, dass die Klassengrenzen der Volumenströme bei der Transformation auf  $X_i$  nicht abgefangen werden können (**Abbildung 4**). Dies zeigt sich z.B. bei  $i = 1$  mit  $0,1 \times 1400 \text{ m}^3/\text{h} / 3600 \text{ s/h} = 1,29 \text{ m}^3/\text{s}$ , bei  $i = 2$  mit  $2,58 \text{ m}^3/\text{s}$  und auch bei  $i = 4$  und  $i = 5$  (**Tabelle 1**). Dies bedeutet, dass die Messzeitreihen nicht ausreichen, um das Gesamtjahresgeschehen in einem funktionalen Zusammenhang über X darzustellen. Wären in den untersuchten Märzstunden kalte Nacht- und sehr warme Tagesstunden aufgetreten, hätte sich ein anderes Bild ergeben. Die zeitliche Mittelung über den Messzeitraum ist lediglich als Episode im Jahresgeschehen zu sehen. Dies wird in **Abbildung 5** deutlich, in der der Emissionsmassenstrom als Funktion des Volumenstromes dargestellt ist. Die Messpunkte dienen der Ermittlung des Emissionsmassenstromes. Wenn alle Volumenstromklassen besetzt sind, dann ist auch die Häufigkeit ihres Auftretens erfasst. Wenn Messpunkte aber nur bereichsweise vorliegen, kann die Integration des Massenstromes und das Einbringen der Auftretenshäufigkeit nur bereichsweise erfolgen. Besonders wenn wichtige Bereiche nicht besetzt sind, ist dies unbefriedigend. Weitere Messkampagnen sind deswegen erforderlich. Der Blick sollte dabei auf das Schließen der Datenlücken gerichtet sein.

**Abb. 3**



Ammoniakkonzentration in Abhängigkeit von der dimensionslosen Konzentration X.  $F_0$  gibt die Approximationsfunktion an  
Fig. 3: Ammonia concentration versus the dimensionless concentration X.  $F_0$  determines the approximation function

**Abb. 4**



Volumenstrom in Abhängigkeit von der dimensionslosen Konzentration X.  $F_4$  gibt die Approximationsfunktion an  
Fig. 4: Volumetric flow rate versus the dimensionless concentration X.  $F_4$  determines the approximation function

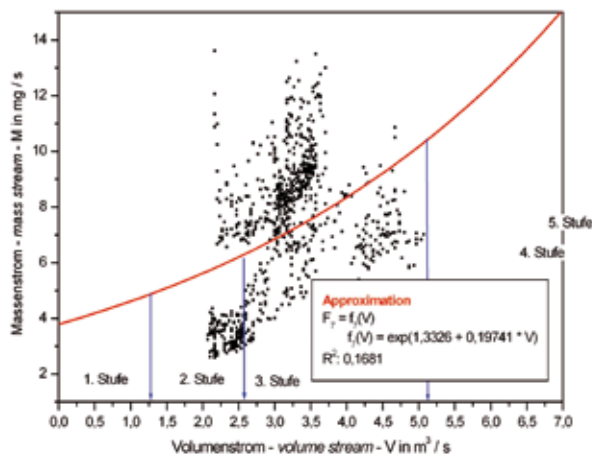
**Tab. 1**

Rechenschritte zur Bestimmung des mittleren Emissionsmassenstromes,  $a = 1,3326$  und  $b = 0,1974$

Table 1: Calculation steps for determination of the average emission mass flow,  $a = 1.3326$  and  $b = 0,1974$

| i        | $H_i$ | $a_i$ | $A_i$ | $B_i$ | $M_{0,i}$<br>mg/s | $M_{0,i} H_i$<br>mg/s |
|----------|-------|-------|-------|-------|-------------------|-----------------------|
| 1        | 0,1   | 0,1   | 0     | 1,29  | 1,1089784         | 0,1108978             |
| 2        | 0,2   | 0,2   | 1,29  | 2,58  | 1,4155026         | 0,2831005             |
| 3        | 0,4   | 0,4   | 2,58  | 5,16  | 4,1816452         | 1,6726581             |
| 4        | 0,2   | 0,8   | 5,16  | 10,30 | 18,482386         | 3,6964772             |
| 5        | 0,1   | 1     | 10,3  | 12,89 | 19,329321         | 1,9329321             |
| $\Sigma$ | 1     |       |       |       |                   | <b>7,696066</b>       |

Abb. 5



Emissionsmassenstrom in Abhängigkeit vom Volumenstrom.  
 $F_7$  gibt die Approximationsfunktion an  
 Fig. 5: Emission mass flow rate versus the volumetric flow rate.  
 $F_7$  denotes the approximation function

### b) Extrapolationsverfahren

Um die anfallenden Emissionen aus der Legehennenhaltung einordnen zu können, kann der bereichsweise ermittelte Emissionsmassenstrom schnell Auskunft geben. Der mittlere Emissionsmassenstrom für das Jahr ergibt sich aus der Summation der klassierten, d. h. bereichswisen, Massenströme und ihrer Auftrenshäufigkeit  $H_i$ . Die bereichswisen Massenströme bestimmen sich aus der Integration ihrer Approximationsfunktion  $F_7$  (**Abbildung 5**).

$$\overline{\dot{M}}_0 = \frac{1}{5} \sum_{i=1}^5 \dot{M}_{0,i} H_i \quad (\text{Gl. 7})$$

Für die klassierten bzw. bereichswisen Massenströme erhält man:

$$\dot{M}_{0,i} = \int_{A_i}^{B_i} \exp(a + b\dot{V}_{0,i}) d\dot{V}_{0,i} = -\frac{1}{b} [\exp(a + bA_i) - \exp(a + bB_i)] \quad (\text{Gl. 8})$$

und somit

$$\dot{M}_{0,i} = \frac{1}{5b} \sum_{i=1}^5 H_i [\exp(a + bA_i) - \exp(a + bB_i)] \quad (\text{Gl. 9})$$

Unter Berücksichtigung von  $1/(5b) = 1,01312$  in Gl. (9) beläuft sich der emittierte mittlere Jahresemissionsmassenstrom nach dem Extrapolationsverfahren auf 7,7 mg/s. Der Mittelwert aus der gemessenen Zeitreihe beträgt 7,05 mg/s. Untersuchungen von 2007 bis 2009 bestätigen die Größenordnung, zeigen aber die großen Schwankungen im praktischen Betrieb [6]. Somit ergibt sich in Bezug auf die Tiermasse von  $M_T = 33,15$  GV für den Emissionsfaktor ein Wert von  $f_{e,VTI} = 2,35 \cdot 10^{-4}$  g/(s GV). Die Emissionsangaben in der RL VDI 3894 weisen von der Gruppenhaltung mit belüftetem Kotband bis zur Bodenhaltung mit Kotgrube eine Spannweite von  $f_{e,VDI} = 3,25 \cdot 10^{-4}$  g/(s GV) bis  $2,6 \cdot 10^{-3}$  g/(s GV) auf, wobei die Umrechnung vom

Tierplatz (Tp) auf die Tiermasse mittels der Beziehung  $1 \text{ Tp} = 3,9 \cdot 10^{-3} \text{ GV}$  erfolgt. Der Wert  $f_{e,VTI}$  liegt unterhalb der Grenzen von  $f_{e,VDI}$ .

### Bewertung

Die unter a) bei der Datenanalyse dargestellte Vorgehensweise erlaubt es, die Messzeitreihen in angemessener Form abzubilden und in Abhängigkeit von dem dimensionlosen Konzentrationsverhältnis  $X$  darzustellen. Wenn  $X$  alle Randbedingungen, wie sie sich bei den klassierten Volumenströmen ergeben, ebenfalls erfasst, lassen sich Aussagen zum Jahresemissionsverhalten auch über verkürzte Messzeitreihen gewinnen. Im gegebenen Fall wird offengelegt, warum eine verkürzte Messreihe sich nicht als zielführend erweist. Die unter b) der Datenanalyse aufgezeigte Variante – den Massenstrom über den klassierten Volumenstrom auf der Basis bereichswiser Daten zu ermitteln – beinhaltet immer das Risiko, in der Extrapolation zu fehlerhaften Aussagen zu kommen. Allerdings ist es äußerst schwierig, Daten hinsichtlich ihrer Entstehungsgeschichte nachzuverfolgen. In [5] finden sich Angaben zu Messungen in einem Broilerbetrieb und einem Rinderbetrieb. Die Auswertung erfolgte nach dem hier dargelegten Schema a) bei einer ausreichenden Spannbreite der Daten.

Dass das nicht immer der Fall sein muss, zeigen die Ergebnisse (**Abbildung 3–5**). Da der Substitutionsansatz in vielen Untersuchungen verschiedener Tierarten Anwendung gefunden hat [2], ist aus Vergleichszwecken an dem Ansatz festgehalten worden.

Das unter a) verwendete Substitutionsverfahren ist in einfacher Form in dem Modell DEMAP [4] enthalten. Danach ergibt sich für die Konzentration der über die Dimensionsanalyse gewonnene Zusammenhang:

$$\frac{C_0 \dot{V}_R}{M_T} = \exp(A + BX) \quad \text{mit} \quad X = \frac{C_B}{C_0 - 1} = \frac{N}{K} \quad (\text{Gl. 10})$$

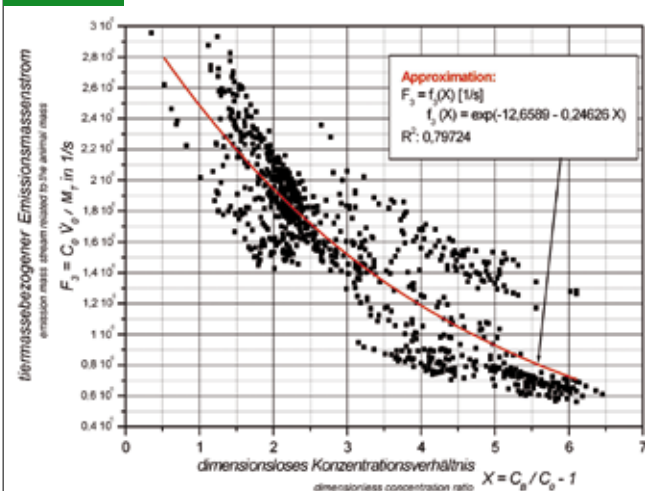
Daraus folgt für den tiermassebezogenen Emissionsmassenstrom die Beziehung:

$$\frac{C_0 \dot{V}_0}{M_T} = N \exp(A + BX) \quad (\text{Gl. 11})$$

Hätte man die Messungen, wie sie in **Abbildung 2** zu sehen sind, als repräsentativ für das Jahr angesehen, dann lässt sich der Zusammenhang nach Gl.11 auch quantifizieren, wie in **Abbildung 6** dargestellt. Man kommt auf die Parameter  $A = -12,6589$  und  $B = -0,2463$ . Gl.11 stellt in Verbindung mit den ermittelten Parametern die „charakteristische Emissionsfunktion“ für den untersuchten Stall dar. Ein Blick auf **Tabelle 2** lässt erkennen, dass sich die Daten in die Untersuchungsergebnisse aus anderen Stallungen einreihen. Die Parameter  $A$  und  $B$  variieren bei den unterschiedlichen Tierhaltungen für Geruch und Ammoniak.

Für zwangsgelüftete Systeme erweist sich die Emission als fast unabhängig von den meteorologischen Parametern. Dem Temperatureinfluss wird durch die stallinterne Lüftungssteue-

Abb. 6



Tiermassebezogener Emissionsmassenstrom  $F_3$  für Ammoniak in Abhängigkeit vom dimensionslosen Konzentrationsverhältnis  $X$   
 Fig. 6: Mass stream  $F_3$  of emission of ammonia related to the animal mass versus the dimensionless ratio of concentration

Tab. 2

Werte für A und B

Table 2: Values of A and B

| A   |   | B   |   |
|---|---|---|---|
| Ammoniak<br>Ammonia<br>[mg/m <sup>3</sup> ] | Geruch/Odour<br>[GE/m <sup>3</sup> ]/[OU/m <sup>3</sup> ] | Ammoniak<br>Ammonia<br>[mg/m <sup>3</sup> ] | Geruch/Odour<br>[GE/m <sup>3</sup> ]/[OU/m <sup>3</sup> ] |
| Putenstall/Turkey stable                    |   |   |   |
| -13,65                                      | -11,75  | -0,1133                                     | -0,0154   |
| Rinderstall/Cattle stable                   |   |   |   |
| -14,31                                      | -12,24  | -0,1344                                     | -0,0323   |
| Schweinstall/Pig stable                     |   |   |   |
| -14,08                                      | -10,44  | -0,2251                                     | -0,1466   |

rung im Hinblick auf die tierphysiologischen Erfordernisse nach der DIN 18910 Rechnung getragen. Das gelingt bei der freien Lüftung nur dann, wenn ein Überangebot an atmosphärischem Luftmassenstrom gegeben ist. In der freien Lüftung kann man also zunächst nur einseitig reagieren. Eine Luftmassenspeicherung an kalter Luft in der Nacht stellt in den Anrainerstaaten des Mittelmeeres in Rinderställen eine pauschale Entlastung für einige Tagesstunden mit hoher Temperatur dar.

Vergleicht man die hier in Ansatz gebrachten Verfahrenswesen miteinander, dann ist der Methode nach a) stets der Vorzug zu geben. Der Grund liegt in der Kausalität des Ansatzes. Der emittierte Massenstrom ergibt aus den mit den Lüftungs-raten verfrachteten stallinternen Produktionsraten. Im Prinzip stellt sich dieses als Ausdruck des Massenerhaltungssatzes dar. Er gilt für alle domestizierten Tierarten gleichermaßen, sodass es nicht wunder nimmt, dass man dieselbe Modellstruktur für

das Emissionsverhalten benutzen kann, siehe Gl. 11. Was dabei besonders wichtig ist und den gravierenden Unterschied zu anderen Ansätzen der direkten Zeitreihenverarbeitung ausmacht, ist die Unabhängigkeit von den meteorologischen Zeitreihen. Die Ortsabhängigkeit in Form der Meteorologie vor Ort ist ausgeblendet. Dieses ist in den Datensätzen der RL VDI 3894 [3] nicht der Fall. Dennoch erklärt man die Daten für allgemein gültig. Das mag im Sinne der Rechtssicherheit akzeptabel sein, ist aber physikalisch nicht nachvollziehbar.

Sind andere Stallformen als üblich mit Zwangslüftung geplant, dann lässt sich mithilfe der Simulationstechnik die angesprochene stallspezifische Funktion ermitteln.

Durch die Mittlung der Größen  $X$  in Gl. 11 über das Jahr und über die Lüftungsrate mit ihrer relativen Auftretenshäufigkeit  $H_i$  kommt man schließlich zu dem Emissionsfaktor

$$f_e = \frac{C_0 V_0}{M_T} = \sum_i^n H_i N_i \exp(A + BX) \quad (\text{Gl. 12})$$

den man als Konstante in den Ausbreitungsrechnungen nutzen kann. Bei frei gelüfteten Systemen der Tierhaltung ist dieses nicht mehr der Fall.

Im Teil 2 des Gesamtbeitrages wird auf simulationstechnischem Weg das Emissionsverhalten und damit das komplexe Ableitverhalten eines Boxenlaufstalles dargelegt.

## Schlussfolgerungen

Mit wenigen Messungen, die über alle Lüftungsvariationen eines Jahres verteilt aufgenommen wurden, lassen sich mithilfe des gezeigten Emissionsmodells DEMAP Aussagen über das Jahresemissionsgeschehen eines Stalles treffen.

## Literatur

- [1] DIN 18910-1 (2004): Wärmeschutz geschlossener Ställe. Wärmedämmung und Lüftung, Teil 1: Planungs- und Berechnungsgrundlagen für geschlossene zwangsbelüftete Ställe. DIN Deutsches Institut für Normung e.V.
- [2] Müller, H.-J.; Krause, K.-H. (2002): Geruchsemissionen und -immissionen aus der Tierhaltung (Beurteilungsgrundlagen und Ableitung von Emissionsminderungsmaßnahmen). Vorläufiger Endbericht
- [3] VDI 3894, Blatt 1, Entwurf (2009): Emissionen und Immissionen aus Tierhaltungsanlagen. Haltungsverfahren und Emissionen. Schweine, Rinder, Geflügel, Pferde. Beuth Verlag GmbH, Berlin
- [4] Krause, K.-H.; Linke, S. (2011): Emission behaviour of open stables. XXXIV CIOSTA CIGR V Conference 2011, 29.6.-1.7.2011, Wien
- [5] Röske, M. (2009): Ammoniakemission aus der Tierhaltung. Praktikumsbericht. Fachhochschule Zittau/Görlitz
- [6] Hinz, T.; Winter, T.; Linke, S. (2010): Luftfremde Stoffe in und aus verschiedenen Haltungssystemen für Legehennen - Teil 1: Ammoniak. Landbauforschung 3(60), S. 139-150

## Autoren

**Dr.-Ing. Karl-Heinz Krause** und **Dr.-Ing. Torsten Hinz** sind wissenschaftliche und **Stefan Linke** ist technischer Mitarbeiter am Johann Heinrich von Thünen-Institut (vTI), Bundesforschungsinstitut für Ländliche Räume, Wald und Fischerei, Bundesallee 50, 38116 Braunschweig, E-Mail: karlheinz.krause@vti.bund.de, torsten.hinz@vti.bund.de, stefan.linke@vti.bund.de