

Mohamed Samer, Merike Fiedler, Christiane Loebzin, Werner Berg, Hans-Joachim Müller, Manfred Gläser, Christian Ammon, Peter Sanftleben und Reiner Brunsch,

# Tracergasmethode zur Bestimmung der Lüftungsrate eines frei gelüfteten Milchviehstalls

Zur Untersuchung der Lüftungsraten in einem frei gelüfteten Milchviehstall wurden während der Sommer- und Winterhalbjahre von 2006 bis 2010 neunundzwanzig Praxisversuche durchgeführt. Die Luftwechselraten (LWR) wurden mit der Tracergasmethode (TGM) und der CO<sub>2</sub>-Bilanzierung als Referenzmethode (RM) bestimmt. Bei allen Feldversuchen fanden kontinuierliche Messungen der Gaskonzentrationen (NH<sub>3</sub>, CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> und N<sub>2</sub>O) inner- und außerhalb des Stallgebäudes statt. Zusätzlich wurden mehrere Freisetzungsversuche des Tracergases <sup>85</sup>Kr durchgeführt und die radioaktiven Impulse während der Ausbringung innerhalb des Stallgebäudes gemessen. Die TGM wurde dabei hinsichtlich des Ortes der Gasausbringung sowie der Berechnungsmethode bewertet.

## Schlüsselwörter

Tracergasmethode, CO<sub>2</sub>-Bilanzierung, Lüftungsrate, Gasförmige Emissionen

out inside and outside the building. Additionally, <sup>85</sup>Kr tracer gas experiments were performed inside the building during every field experiment. The TGT was evaluated with respect to the gas release location and the calculation method.

## Keywords

Tracer gas technique, CO<sub>2</sub>-balance, ventilation rate, gaseous emissions

## Abstract

Samer, Mohamed; Fiedler, Merike; Loebzin, Christiane; Berg, Werner; Müller, Hans-Joachim; Gläser, Manfred; Ammon, Christian; Sanftleben, Peter and Brunsch, Reiner

Tracer gas technique to estimate the ventilation rate through a naturally ventilated dairy barn

Landtechnik 66 (2011), no. 4, pp. 286–288, 2 tables, 5 references

Twenty nine field experiments were carried out to study the ventilation rate in a naturally ventilated dairy barn during summer and winter seasons from 2006 to 2010. The air exchange rates (AER) were determined by the tracer gas technique (TGT), and the CO<sub>2</sub>-balance was set as reference method (RM). During each field experiment, continuous measurements of the gaseous concentrations (NH<sub>3</sub>, CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> and N<sub>2</sub>O) were carried

■ Überhöhte NH<sub>3</sub>-Emissionen tragen zu Eutrophierung und Versauerung bei. CH<sub>4</sub> und N<sub>2</sub>O sind Treibhausgase (THG) mit dem 23- bzw. 296-fachen Erderwärmungspotenzial von CO<sub>2</sub> [1]. Daher wird die Verringerung dieser Emissionen angestrebt. Dieses setzt jedoch eine Quantifizierung gasförmiger Emissionen aus Stallgebäuden voraus. Insbesondere die Quantifizierung gasförmiger Emissionen aus frei gelüfteten Ställen ist, besonders im Bezug der LWR, kompliziert und weist große Messunsicherheiten auf. Daher sollten die etablierten Methoden zur Bestimmung der Lüftungsrate verbessert und weiterentwickelt werden [2].

Ziel dieses Beitrags ist es, die besten Kombinationen aus unterschiedlichen Einflussfaktoren zur Berechnung der Luftwechselrate bei Sommer- und Wintermessungen mit der Tracergasmethode gegenüber der CO<sub>2</sub>-Bilanzierung als Referenzmethode zu bestimmen.

## Methoden

Die Untersuchungen fanden in einem Milchviehstall in Mecklenburg-Vorpommern statt. Der Liegeboxenlaufstall ist frei gelüftet und bietet Platz für 364 Kühe. Die Messungen wurden in zweiwöchigen Perioden je Jahreszeit durchgeführt. Dabei wurden die Konzentrationen der Gase CO<sub>2</sub>, NH<sub>3</sub>, CH<sub>4</sub> und N<sub>2</sub>O mit einem Multigasmonitor (INNOVA 1312) kontinuierlich an acht

gleichmäßig verteilten Messpunkten (MP) innerhalb und an vier außerhalb des Stalls gemessen. Innerhalb jeder Versuchsperiode wurden fünf bis sechs Luftwechsellmessungen mit dem radioaktiven Isotop Krypton-85 als Tracer durchgeführt. Das Tracergas wurde im Stall freigesetzt, um mithilfe der Abklingmethode die Luftwechselrate zu bestimmen. Die radioaktiven Impulse wurden während jeder Ausbringung mit 20 Zählrohren (ZR) mit einer Abtastrate von 1 Hz aufgezeichnet. Die Luftwechselrate ist dann das Resultat einer exponentiellen Beziehung zwischen den Impulsen und der Zeit. Die Freisetzung des Tracergases innerhalb des Stalls wurde örtlich variiert: (1) als Linienquelle in der Mittelachse des Gebäudes über den Futtertisch, (2) als Linienquelle auf der windzugewandten Seite des Gebäudes über den Laufgang, (3) als Punktquelle. Anschließend wurde für jede Ausbringungsart vier Berechnungsarten des  $\alpha$ -Werts ( $\alpha$  ist der Luftwechsel je Sekunde, berechnet aus den Impulsen eines Zählrohres) verglichen: (1) durchschnittlicher  $\alpha$ -Wert ausgewählter Zählrohre, (2) durchschnittlicher  $\alpha$ -Wert aller Zählrohre, (3)  $\alpha$ -Wert berechnet aus der Summe der Impulse ausgewählter Zählrohre sowie (4)  $\alpha$ -Wert berechnet aus der Summe der Impulse aller Zählrohre. Der Emissionsmassenstrom aus dem Stallgebäude wurde als Produkt der Konzentrationsdifferenz zwischen emittierter und frischer Luft und des Volumenstroms (Produkt der LWR und dem Stallvolumen) berechnet. Es wurde mit der Pearson-Korrelationsanalyse überprüft, ob ein linearer Zusammenhang der berechneten LWR mit der RM besteht und entsprechende lineare Regressionsmodelle berechnet. Mittels eines ANOVA-Modells wurde getestet, auf welche Einflussfaktoren die Abweichungen der TGM gegenüber der RM zurückzuführen sind.

## Ergebnisse

Die besten Faktorkombinationen mit den höchsten  $R^2$ -Werten und zuverlässigsten Parameterschätzwerten waren für die Mes-

sungen in der Sommerperiode (1) die Freisetzung als Linienquelle über den Futtertisch bei Berücksichtigung der Summe der Impulse aller Zählrohre ( $R^2 = 0,94; 1,63 \pm 0,14$ ) sowie für die Messungen in der Winterperiode (2) die Punktausbringung bei Berücksichtigung der Summe der Impulse aller Zählrohre ( $R^2 = 0,91; 1,19 \pm 0,15$ ). Die durchschnittlichen gasförmigen Emissionen laut RM betragen während der Sommermessungen 124, 538, 45 610 und 28  $\text{g d}^{-1} \text{GV}^{-1}$ , jeweils für  $\text{NH}_3$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{CO}_2$  und  $\text{N}_2\text{O}$ . Im Winterhalbjahr beliefen sich die Emissionen auf durchschnittlich 64, 348, 42 760 und 39  $\text{g d}^{-1} \text{GV}^{-1}$ . Als Emissionsfaktoren ergeben sich daraus nach RM Werte von 34,4, 161,7, 16 127 und 123  $\text{kg yr}^{-1} \text{GV}^{-1}$ , jeweils für  $\text{NH}_3$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{CO}_2$  und  $\text{N}_2\text{O}$  als Durchschnittswerte aus den Sommer- und Wintermessungen.

## Diskussion

Die gleichmäßige Dosierung der Freisetzung von  $^{85}\text{Kr}$  wurde als Linienquelle entlang des südlichen Laufganges und im Vergleich dazu als Linienquelle entlang des Futtertisches und als Punktquelle im Stall vorgenommen. Der südliche Laufgang wurde dabei wegen der vorherrschenden Hauptwindrichtungen Süd und Südwest gewählt, da die von dort in den Stall eindringende Frischluft eine bessere Durchmischung mit  $^{85}\text{Kr}$  und eine bessere Verteilung im Stall erwarten ließ. Dies wurde durch die Aufzeichnungen der ZR bestätigt, da alle 20 ZR das Tracergas während der Ausbringung über den Laufgang nachwiesen, während im Vergleich dazu bei Ausbringung über den Futtertisch nur 15 ZR und bei Ausbringung an einem festen Punkt nur 10 ZR auf den Tracer ansprachen. Dieses Konzept stimmt mit den von [3] getroffenen Aussagen überein. Die Ergebnisse der Untersuchung zeigen bei der am besten geeigneten Kombination der Einflussfaktoren eine Überschätzung der Luftwechselrate gegenüber der RM um das etwa 1,63-fache während der Sommer- und um das etwa 1,19-fache während der Wintermessungen. Ein Grund für die Überschätzung kann darauf zurück-

Tab. 1

Luftwechselraten und gasförmige Emissionen nach beiden Methoden während vier Sommerhalbjahre  
Table 1: Air exchange rates and gaseous emissions by both methods through 4 summer seasons

| Experiment                | LWR/AER   |           | $\text{NH}_3$<br>$\text{g d}^{-1}\text{GV}^{-1}/\text{g d}^{-1} \text{AU}^{-1}$ |            | $\text{CH}_4$<br>$\text{g d}^{-1}\text{GV}^{-1}/\text{g d}^{-1} \text{AU}^{-1}$ |            | $\text{CO}_2$<br>$\text{g d}^{-1}\text{GV}^{-1}/\text{g d}^{-1} \text{AU}^{-1}$ |              | $\text{N}_2\text{O}$<br>$\text{g d}^{-1}\text{GV}^{-1}/\text{g d}^{-1} \text{AU}^{-1}$ |           |
|---------------------------|-----------|-----------|---|------------|---|------------|---|--------------|--|-----------|
|                           | TGM/TGT   | RM        | TGM/TGT   | RM         | TGM/TGT   | RM         | TGM/TGT   | RM           | TGM/TGT  | RM        |
| 1                         | 64        | 90        | 342   | 481        | 1104  | 1552       | 82684   | 116275       | 55   | 77        |
| 2                         | 42        | 23        | 218   | 120        | 625   | 342        | 50696   | 27762        | 37   | 20        |
| 3                         | 185       | 41        | 537   | 119        | 2418  | 536        | 201345  | 44622        | 137  | 30        |
| 4                         | 61        | 51        | 117   | 98         | 665   | 556        | 63819   | 53357        | 46   | 38        |
| 5                         | 79        | 59        | 224   | 167        | 865   | 646        | 80579   | 60179        | 63   | 47        |
| 6                         | 25        | 30        | 61  | 73         | 355   | 427        | 28326   | 33992        | 14   | 17        |
| 7                         | 27        | 18        | 103   | 68         | 557   | 371        | 35262   | 23509        | 16   | 10        |
| 8                         | 106       | 53        | 295   | 148        | 1605  | 803        | 136843  | 68421        | 71   | 36        |
| 9                         | 51        | 26        | 168   | 86         | 922   | 470        | 66392   | 33847        | 35   | 18        |
| 10                        | 76        | 36        | 247   | 117        | 1068  | 506        | 89184   | 42245        | 52   | 25        |
| 11                        | 97        | 49        | 128   | 65         | 685   | 346        | 100790  | 50914        | 67   | 34        |
| 12                        | 29        | 27        | 70  | 65         | 355   | 330        | 34601   | 32215        | 20   | 18        |
| 13                        | 20        | 19        | 66  | 63         | 323   | 307        | 26490   | 25166        | 13   | 12        |
| 14                        | 18        | 20        | 64  | 71         | 307   | 341        | 23429   | 26033        | 12   | 13        |
| <b>Mittelwert/Average</b> | <b>63</b> | <b>39</b> | <b>189</b>  | <b>124</b> | <b>847</b>  | <b>538</b> | <b>72889</b>  | <b>45610</b> | <b>46</b>  | <b>28</b> |

Tab. 2

Luftwechselraten und gasförmige Emissionen nach beiden Methoden während drei Winterhalbjahre

Table 2: Air exchange rates and gaseous emissions by both methods through 3 winter seasons

| Experiment                | LWR/AER |    | NH <sub>3</sub><br>g d <sup>-1</sup> GV <sup>-1</sup> /g d <sup>-1</sup> AU <sup>-1</sup> |     | CH <sub>4</sub><br>g d <sup>-1</sup> GV <sup>-1</sup> /g d <sup>-1</sup> AU <sup>-1</sup> |     | CO <sub>2</sub><br>g d <sup>-1</sup> GV <sup>-1</sup> /g d <sup>-1</sup> AU <sup>-1</sup> |        | N <sub>2</sub> O<br>g d <sup>-1</sup> GV <sup>-1</sup> /g d <sup>-1</sup> AU <sup>-1</sup> |    |
|---------------------------|---------|----|---|-----|---|-----|---|--------|--|----|
|                           | TGM/TGT | RM | TGM/TGT   | RM  | TGM/TGT   | RM  | TGM/TGT   | RM     | TGM/TGT  | RM |
|                           | 1       | 39 | 33  | 59  | 50  | 432 | 363   | 51 694 | 43 440   | 53 |
| 2                         | 37      | 31 | 56  | 47  | 450   | 378 | 49 523  | 41 616 | 51   | 42 |
| 3                         | 31      | 26 | 47  | 39  | 374   | 314 | 43 897  | 36 888 | 42   | 36 |
| 4                         | 45      | 38 | 63  | 53  | 416   | 350 | 57 207  | 48 072 | 62   | 52 |
| 5                         | 39      | 33 | 51  | 43  | 328   | 276 | 51 265  | 43 080 | 53   | 45 |
| 6                         | 18      | 15 | 43  | 36  | 418   | 351 | 30 816  | 25 896 | 21   | 18 |
| 7                         | 14      | 12 | 35  | 29  | 352   | 295 | 26 304  | 22 104 | 17   | 15 |
| 8                         | 17      | 14 | 50  | 42  | 399   | 335 | 30 274  | 25 440 | 20   | 17 |
| 9                         | 20      | 17 | 47  | 40  | 346   | 291 | 32 558  | 27 360 | 27   | 22 |
| 10                        | 17      | 14 | 41  | 35  | 337   | 283 | 29 702  | 24 960 | 23   | 19 |
| 11                        | 61      | 51 | 153   | 128 | 465   | 390 | 77 483  | 65 112 | 72   | 60 |
| 12                        | 55      | 46 | 121   | 102 | 414   | 348 | 69 429  | 58 344 | 65   | 54 |
| 13                        | 88      | 74 | 206   | 173 | 741   | 623 | 110 956   | 93 240 | 101  | 84 |
| 14                        | 41      | 35 | 48  | 40  | 369   | 306 | 53 521  | 44 976 | 48   | 40 |
| 15                        | 38      | 32 | 126   | 106 | 377   | 317 | 48 638  | 40 872 | 44   | 37 |
| <b>Mittelwert/Average</b> | 37      | 31 | 76  | 64  | 415   | 348 | 50 884  | 42 760 | 47   | 39 |

geführt werden, dass auch zwischen verschiedenen Bereichen innerhalb des Gebäudes Luft ausgetauscht wird [4].

Die gasförmigen Emissionen wurden mithilfe der durch die RM berechneten LWR bestimmt. Darüber hinaus wurden die Emissionsfaktoren als Durchschnittswerte aus den Sommer- und Wintermessungen berechnet, um repräsentativere Werte für das ganze Jahr zu erhalten. Dennoch könnten die tatsächlichen Emissionsfaktoren sich wegen der unterschiedlichen klimatischen und mikroklimatischen Bedingungen in Frühling, Sommer, Herbst und Winter von den berechneten unterscheiden. Der durchschnittliche Emissionsfaktor für NH<sub>3</sub> betrug in der vorliegenden Untersuchung 45,8 kg a<sup>-1</sup> Kuh<sup>-1</sup>, was den von [3] dargestellten Werten entspricht. Demgegenüber gaben [5] den konstanten Emissionsfaktor für NH<sub>3</sub> mit 15,79 kg a<sup>-1</sup> Kuh<sup>-1</sup> an, einem Drittel des von uns berechneten Wertes.

### Schlussfolgerung

Die Berechnung des Luftwechsels mithilfe der TGM führte zu besseren Ergebnissen wenn der Luftwechsel aus der Summe der Impulse statt der Mittelwert der  $\alpha$ -Werte bestimmt wurden. Die Einbeziehung aller Zählrohre scheint zum einen die beste Repräsentation der Luftbewegung wiederzugeben und benötigt zum anderen auch einen geringen Berechnungsaufwand. Die Freisetzung des Tracergases über den Laufgang resultierte in einer besseren Ansprache aller Zählrohre, was auf eine bessere Vermischung mit der Luft und eine bessere Verteilung des Gemisches im Stall hindeutet. Die statistische Analyse konnte diesen Vorteil jedoch nicht bestätigen. Aus diesem Grund sind weitere Versuche notwendig, um die visuell feststellbare Verbesserung statistisch abzusichern. Die TGM ist vielversprechend, überschätzt aber in der derzeitigen Durchführungsweise

noch den Luftwechsel im Vergleich zur Referenzmethode. Auf der anderen Seite hat die CO<sub>2</sub>-Bilanz-Methode mehrere Fehlerquellen. Daher ist die Weiterentwicklung der Methode notwendig, wobei besonderes Augenmerk auf die Art und Weise der <sup>85</sup>Kr-Freisetzung, den Ausbringungsort im Stall und die Berechnungsmethode gelegt werden muss.

### Literatur

- [1] IPCC (2007): Klimaänderung 2007: Verminderung des Klimawandels. Beitrag der Arbeitsgruppe III zum Vierten Sachstandsbericht des Zwischenstaatlichen Ausschusses für Klimaänderung. B. Metz, O.R. Davidson, P.R. Bosch, R. Dave, L.A. Meyer (Hrsg.), Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA., pp. 841 ff.
- [2] Müller, H.J.; Möller B. (1998): Weiterentwickelte Luftwechselmeßtechnik mit Tracer-Anwendung in Tierhaltungen. Landtechnik, 53(5), S. 326-327
- [3] Snell, H.; Seipelt, F.; van den Weghe, H. (2003): Ventilation rates and gaseous emissions from naturally ventilated dairy houses. Biosystems Engineering 86(1), S. 67-73
- [4] Sherman, M.H. (1989): On the estimation of multizone ventilation rates from tracer gas measurements. Building and Environment 24(4), pp. 355-362
- [5] TA-Luft (2002): Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit. <http://www.taluft.com/taluft20020730.pdf>, Zugriff am 27.04.2011

### Autoren

**Dr. Mohamed Samer** ist Wissenschaftler, **Dr. Merike Fiedler** ist Wissenschaftlerin, **Dr. Werner Berg** ist kommissarischer Abteilungsleiter, **Dr. Hans-Joachim Müller** ist Wissenschaftler i. R., **Dr. habil. Manfred Gläser** ist Nuklearphysiker i. R., **Dr. Christian Ammon** ist technischer Angestellter, Abteilung Technik in der Tierhaltung, **Prof. Dr. Reiner Brunsch** ist Wissenschaftlicher Direktor des Leibniz-Institutes für Agartechnik Potsdam-Bornim (ATB), Max-Eyth-Allee 100, 14469 Potsdam; **Christiane Loebis** ist technischer Angestellter der Landesforschungsanstalt für Landwirtschaft und Fischerei MV, Wilhelm-Stahl-Allee 2, 18196 Dummerstorf, Deutschland, **Peter Sanftleben** ist Direktor der Landesforschungsanstalt für Landwirtschaft und Fischerei MV, Wilhelm-Stahl-Allee 2, 18196 Dummerstorf, Deutschland.

E-Mail: msamer@atb-potsdam.de