

Validierung der Tracergasmethode zur Luftvolumenstrombestimmung

Till Schneider, Wolfgang Büscher und Oliver Wallenfang

Institut für Landtechnik, Rhein. Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn

Bei der Bestimmung der Emissionsmassenströme aus Tierhaltungsanlagen ist neben der Konzentration des zu untersuchenden Stoffes die Messung der Luftvolumenströme notwendig. Bei frei gelüfteten Ställen stehen Tracergasmethode zur Verfügung, mit denen anhand der Verdünnung einer Indikatorgaskonzentration auf die Luftvolumenströme geschlossen werden kann. In dieser Untersuchung wurde die Abklümmethode an Messventilatormessungen in einem zwangsgelüfteten Hähnchenmaststall validiert.

Schlüsselwörter

Luftvolumenstrom, Tracergas, Messventilator

Einleitung

Die Immissionsprognose wird in Genehmigungsverfahren für Neubauten und Umbauten von Tierställen immer wichtiger. Voraussetzung für eine belastbare Ausbreitungsmodellierung ist die solide Kenntnis der Emissionsquellstärken. Für die Bestimmung der Emissionsmassenströme von Gasen, Geruch oder Stäuben müssen sowohl Konzentrationsmessungen als auch Messungen der Luftvolumenströme erfolgen. Für die Messungen in zwangsgelüfteten Ställen stehen einfache und genaue Methoden, wie z.B. die Messung mit kalibrierten Messventilatoren zur Verfügung. Im Gegensatz dazu stellt die Bestimmung der Luftvolumenströme in frei gelüfteten Ställen ein großes methodisches Problem dar. Da eine direkte Ermittlung meist nicht möglich ist, bedient man sich so genannter Bilanzierungsmethoden. Der Stall wird als ein System betrachtet, in dem es Quellen und Senken eines Stoffes gibt. Neben der Lüftung als Quelle bzw. Senke von Stoffen, müssen stallinterne Faktoren berücksichtigt werden. (z.B. Tiere, Stoffumsatz in den Exkrementen und Einstreu).

Grundlagen

Auf Basis der Massenbilanz eines Stoffes ergibt sich folgende Differentialgleichung, die die Grundlage für die Tracergasmethode darstellt:

$$\dot{V}_{Fr}c_{Fr} - \dot{V}_{Fo}c_{Fo} + \dot{m}_Q - \dot{m}_S = V \cdot \dot{c}_i \quad (1)$$

Bei der Bilanzierung können systemeigene Massen- bzw. Energieströme zur Hilfe genommen werden. In diesem Zusammenhang sind die CO₂-Bilanzierung oder die Wärmebilanzierung zu nennen. Das kalkulatorische Problem bei der Nutzung systemeigener Stoffe, ist die korrekte Abschätzung der Quellen und Senken im Stall. So beeinflusst die Schätzung der CO₂-Quellen im Stall (Tiere, Einstreu etc.) den Fehler bei der Kalkulation des Luftwechsels erheblich [1].

Die Tracergasmethode machen sich die gleichen Prinzipien der Bilanzierung zunutze, jedoch werden im System nicht vorkommende Stoffe (Gase) eingesetzt. Damit fällt eine Unsicherheit der Kalkulation der Stoffquellen weg. Zu den in der Praxis eingesetzten Tracergasen gehören z.B. Schwefelhexafluorid (SF₆) oder Krypton 85. Nach [2] sollte ein Tracergas u.a. folgende Eigenschaften aufweisen:

- ungiftig und ohne Gesundheitsgefährdung im eingesetzten Konzentrationsbereich und bei notwendiger Einwirkzeit,
- chemisch inert, stabil, geruchs- und geschmacklos,
- von Einrichtungsgegenständen nicht adsorbierbar,
- nicht brennbar, nicht explosiv,
- üblicherweise nicht oder nur in nicht relevanter Konzentration in der Raumluft und der Umgebung vorhanden,
- möglichst kein Bestandteil der Außenluft,
- leicht und gut vermischbar mit Luft.

Die theoretische Grundlage für die Tracergasmethode erhält man durch Umformung der Gleichung (1) zu Gleichung (2) unter der Bedingung, dass der Volumenstrom der Frischluft dem Volumenstrom der Fortluft entspricht ($\dot{V}_{Fo} = \dot{V}_{Fr} = \dot{V}$) [3].

$$\dot{m}_Q - \dot{m}_S - \dot{V}(c_{Fo} - c_{Fr}) = V \cdot \dot{c}_i \quad (2)$$

Durch Umformung der Gleichung (2) lassen sich die folgenden Tracergasmethode ableiten:

- Abklingmethode,
- Anstiegsmethode,
- Methode der konstanten Tracergasinjektion und
- Methode der konstanten Tracergaskonzentration.

Im Folgenden soll nur auf die in den eigenen Untersuchungen zum Einsatz gekommene Abklingmethode eingegangen werden. Eine Übersicht über die verschiedenen Bilanzierungsmethoden gibt [3].

Bei der Abklingmethode wird nach einmaliger Tracergasdosierung die Gaszufuhr abgeschaltet. Das exponentielle Abklingverhalten der Gaskonzentration dient dann als Grundlage für die Bestimmung des Luftvolumenstroms. Nach Abschalten der Tracergasdosierung gelten nach [3] folgende Bedingungen:

- Keine Quelle des Gases vorhanden ($\dot{m}_Q = 0$),
- keine Senke ist vorhanden; das Gas ist inert ($\dot{m}_S = 0$),
- vollständige Durchmischung des Tracergases mit der Stallluft ($c_i(t) = c_{Fo}(t)$),
- die Gaskonzentration in der Frischluft für $t > 0$ ist gleich Null ($c_{Fr} = 0$) und
- zur Zeit $t = 0$ herrscht im Raum die Anfangskonzentration $c_{t=0}$.

Dann ergibt sich durch Integration aus Gleichung (2):

$$c_i(t) = c_{t=0} \cdot e^{-\frac{\dot{V}}{V}t} \quad (3)$$

Der Term $(\frac{\dot{V}}{V})$ im Exponenten entspricht dann der Luftwechselzahl (n). Dieser kann bei bekanntem Raumvolumen in den Volumenstrom mit der gebräuchlichen Einheit [$\text{m}^3 \text{h}^{-1}$] umgerechnet werden.

Die Abklingmethode zeigt einen zeitlichen Ausschmitt der Lüftungsraten. Sie ist keine kontinuierliche Messmethode, sondern gibt nur die Luftwechsel-

raten zur Zeit des Abklingens der Konzentration an; über den Abklingzeitraum findet eine Mittelwertbildung statt.

Die Bedingung der vollständigen Durchmischung des Tracergases mit der Stallluft wird als besonders problematisch angesehen [4]; vor allem Totzonen – in denen nur ein geringer Austausch mit der umgebenden Luft stattfindet – und Kurzschlussströmungen – bei denen die Zuluft auf dem kürzesten Weg wieder aus den Fortluftöffnungen herausströmt – werden als große Fehlerquellen benannt [4].

Vorteile der Methode liegen in dem geringen Bedarf an Tracergas. Daneben ist der Messaufbau relativ einfach.

Untersuchungsgegenstand

Vor dem Einsatz der Tracergasmethode in frei gelüfteten Ställen, in denen eine Überprüfung der Übereinstimmung der Methode mit anerkannten Methoden nicht möglich ist, sollte die Abklingmethode an der Referenzmethode mit Messventilatoren in einem zwangsgelüfteten Hähnchenmaststall validiert werden. Die Messventilatormethode gilt als eine sehr genaue und günstige Referenzmethode zur Bestimmung des Volumenstroms bei zwangsgelüfteten Gebäuden [5].

Beschreibung des Versuchstalles

Bei dem Versuchstall handelte es sich um einen in der Praxis üblichen Hähnchenmaststall mit einer Länge von 74,8 m, einer Breite von 17,3 m, einer Traufhöhe von 3 m sowie einer Firsthöhe von 5,3 m. Das Stallvolumen beträgt damit 5370 m^3 .

Da die Lüftungseinstellungen während des Versuchs variabel gestaltet werden sollten, wurde die Messung im Servicezeitraum bei leerem Stall durchgeführt. Bei der Lüftung handelt es sich um eine Unterdrucklüftung, deren Abluftkamine entlang der Firstachse verteilt angeordnet sind. Von den Abluftventilatoren sind 12 Stück ein/aus geregelt, während ein Ventilator in der Drehzahl variabel gesteuert werden kann. Je nach Lüftungsintensität werden die einzelnen Ventilatoren zu- oder abgeschaltet. Der variable Ventilator stellt dann die Stufenlosigkeit her. Die laufenden Ventilatoren sind gleichmäßig über die Stalllänge verteilt. Ist ein Ventilator ausgeschaltet, so schließt sich die Klappe im Abluftkamin. Auf

diese Weise kann ein Falschlufteintritt durch die Kamine bzw. ein zusätzlicher Lüftungseffekt durch Thermik weitgehend ausgeschlossen werden. Im Praxisbetrieb steuert ein Lüftungscomputer (DOL 36) der Firma Skov A/V (Dänemark) die Lüftungsintensität nach Innentemperatur und relativer Luftfeuchtigkeit. Während des Versuches wurde auf manuelle Steuerung umgeschaltet, um konstante Lüftungsverhältnisse auf den verschiedenen Lüftungsstufen zu garantieren.

Die Zuluft wird durch handelsübliche Lüftungsklappen zugeführt. Über beide Seiten des Stalles sind diese in regelmäßigen Abständen angeordnet. Die Öffnungen der Klappen werden an die Lüftungseinstellungen der Ventilatoren angepasst. Die Außenseite des Stalles ist vor den Zuluftklappen mit Windschutzblechen versehen, um einen Windeinfluss auf die Lüftung weitgehend auszuschließen. Der Stallinnenraum war während der Messungen bis auf die in der Hähnchenmast üblichen 6 Tränkelinien und 4 Futterbahnen komplett leer. Deren Volumen kann in Relation zum Gesamtvolumen vernachlässigt werden.

Einsatz der Messventilatoren

Zum Einsatz kam ein in ein 1 m langes Stück Abluftkamin montierter Messventilator. Der Kamin hat einen Innendurchmesser von 630 mm, wie die im Stall eingesetzten Kamine. Der Messventilator wurde vor dem Einsatz auf einem DLG-Prüfstand kalibriert. In **Bild 1** ist die Kalibrierkurve dargestellt. Die Drehfrequenz des passiv angetriebenen Flügelrades wird dabei mit Hilfe eines berührungslosen Kontakt-

schalters gezählt. Der Messventilator wurde von oben in den Diffusor des Abluftkamines gesetzt (**Bild 2**). Zwischen dem Ventilator und dem Messventilator bestand ein Abstand von 2,5 m. Dadurch kann eine turbulente Strömung am Messventilator nicht ausgeschlossen werden; dies kann einen Einfluss auf die Messgenauigkeit des Messventilators haben.



Bild 2: Messventilator im Abluftkamin

Der Messventilator wurde nacheinander auf jeden Kamin gesetzt, wobei auf ein bündiges Anliegen der Messeinheit auf dem Kamin geachtet wurde. Bei den Lüftungseinstellungen 100 %, 75 %, 50 %, 25 % und 10 % wurde dann der Volumenstrom bestimmt, der von jedem einzelnen Abluftkamin transportiert wird. Aus der Addition der Einzelvolumenströme ergibt sich dann der Gesamtvolumenstrom. In **Bild 3** sind die Volumenströme bei verschiedenen Lüftungseinstellungen dargestellt.

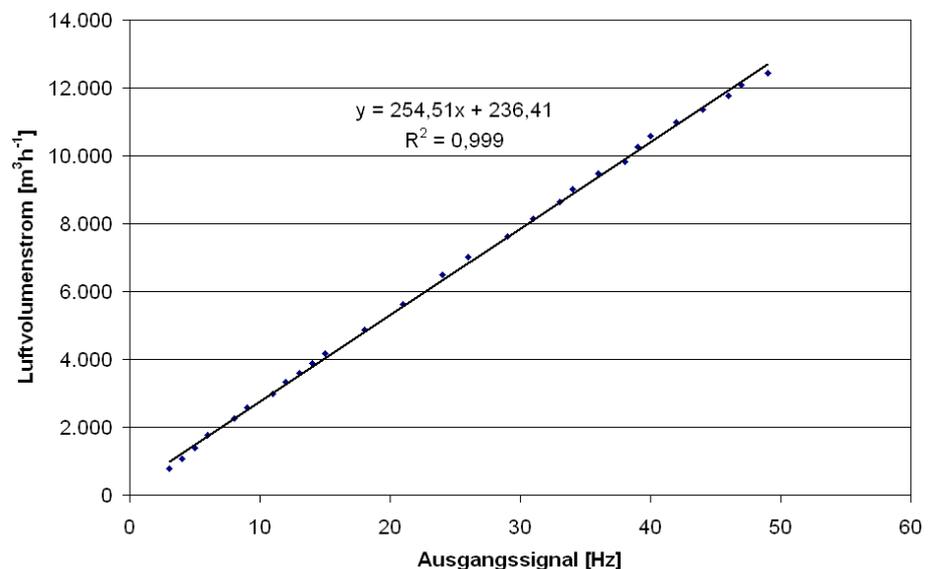


Bild 1: Kalibrierkurve des Messventilators, ermittelt auf einem Ventilatorprüfstand der DLG-Prüfstelle

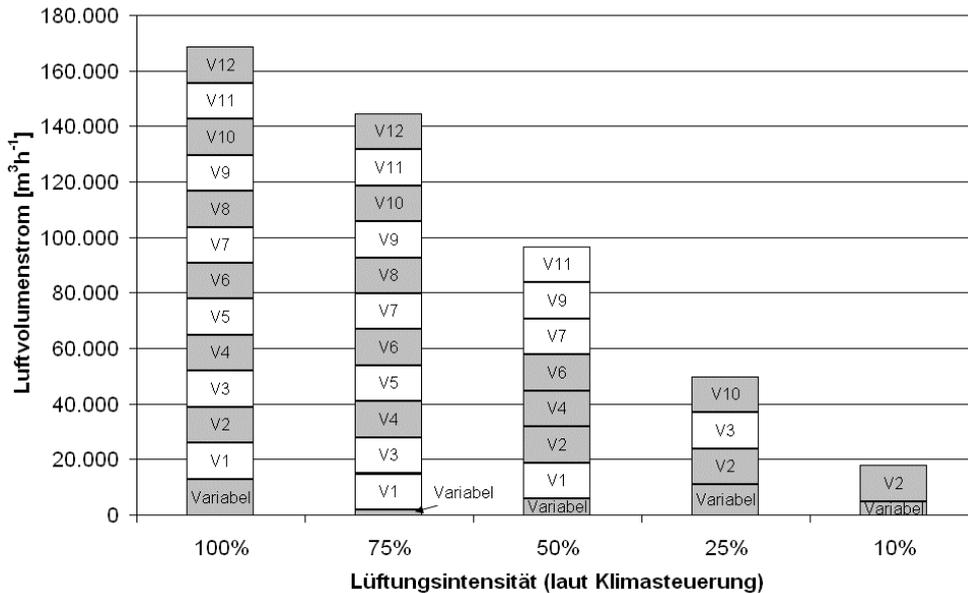


Bild 3: Luftvolumenstrom als Summe der Volumenströme der einzelnen Ventilatoren (V1 bis V12 & Variabel)

Einsatz der SF₆-Tracergasmethode

Vor dem Einsatz der Tracergasmethode wurde die Luftströmung im Stall mit einem Nebelgenerator sichtbar gemacht. Es zeigte sich, dass die Luft nach Eintritt in den Stall von beiden Seiten des Stalles in Wirbeln Richtung Firstachse strömt. Es erfolgte eine gute Durchmischung der Stallluft mit dem Nebel, ohne dass Kurzschlussströmungen sichtbar wurden. Diese Bedingung ist Voraussetzung für die angewendete SF₆-Abklingmethode.

Zur Injektion des Tracergases wurde auf beiden Seiten des Stalls ein Kaskadenschlauchsystem verlegt. Etwa alle 9 m wurde eine Schlauchöffnung in der Nähe der Zuluftklappen installiert. So wurde insgesamt an 16 Stellen das Tracergas eindosiert. **Bild 4** zeigt die Lage der Dosier- und Probennahmepunkte im Stallquerschnitt.

Das Schlauchsystem war mit einer Mischkammer verbunden, in welche das Tracergas SF₆ und Stickstoff eindosiert wurden. Es wurde eine SF₆-Stickstoffmischung benutzt, da sich diese leichter mit der Stallluft mischt als reines SF₆, das eine höhere Dichte hat als Luft.

Die Absaugung und Probenahme der Stallluft erfolgte in der Firstachse des Stalles ca. 0,8 m unterhalb der Ventilatoröffnungen. Die Schlauchenden wurden an den mittleren Tränkelinien befestigt und mit dem vorhandenen Seilsystem bis unter die Decke gezogen. So erfolgte die Probenahme an 6 Punkten - im Abstand von ca. 12 m - in unmittelbarer Nähe der Abluftöffnungen. Durch die Probenahme an mehreren Messstellen werden mögliche Lüftungsfehler, die zu einer nicht vollständigen Durchmischung des Tracergases mit der Stallluft führen können, ausgeglichen. Das Schlauchsystem

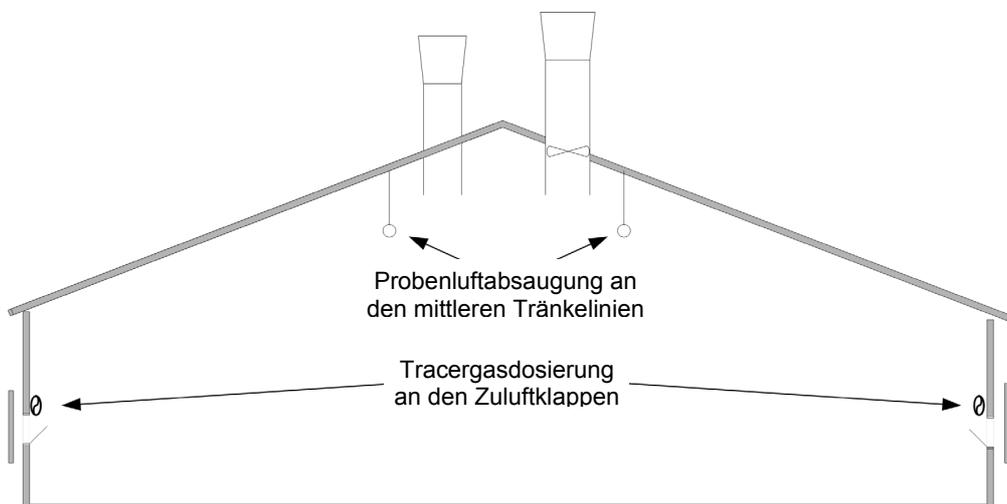


Bild 4: Stallquerschnitt und Lage der Dosier- und Probennahmepunkte für die Tracergasmethode

bestand aus PE-Schläuchen mit einem Innendurchmesser von 4 mm. Bei der Installation des Kaskadenschlauchsystems wurde darauf geachtet, dass die Schlauchlängen zu jeder Messstelle gleich waren, um eine gleichmäßige Probenahme zu erreichen. Eine Membranpumpe förderte die Probenluft mit einem Volumenstrom von 15 l min^{-1} aus dem Schlauchsystem in eine Messkammer, aus der das SF_6 -Messgerät die Probenluft entnahm. Die Messkammer hatte ein Volumen von 50 ml, sodass eine mittlere Verweildauer der Probenluft in der Messkammer von 0,2 s erreicht wurde. Die Zeit vom Eintreten der Luft in das Schlauchsystem bis zum Erfassen durch das Messgerät betrug bei einer Gesamtschlauchlänge von 250 m 13 s.

Zur Bestimmung der SF_6 -Konzentration wurde ein modifiziertes Leakmeter 200 (Meltron Qualitek Messtechnik GmbH heute: USON, Neuss,) eingesetzt. Der Nachweis erfolgt mit einem Elektron-Capture-Detector (ECD). Das Gerät ist als Lecksuchgerät konzipiert und verfügt damit über eine hohe zeitliche Auflösung (1 Sekunde). So werden auch bei hohen Luftwechselraten eindeutige Abklingkurven aufgezeichnet. Eine kontinuierliche Messung und Aufzeichnung der Messwerte ist durch eine Erweiterung des Gerätes möglich. Hinter dem Vorverstärker des Gerätes befindet sich ein Spannungsfrequenzwandler, dessen Ausgang eine dem Detektorsignal proportionale Frequenz ausgibt; diese wird zur Auswertung direkt abgegriffen. Das Signal kann von einem PC aufgezeichnet werden. Diese Modifizierung führt zu einer Nachweisgrenze von 5 ppt.

Die aufgezeichnete Frequenzänderung ist proportional zur SF_6 -Konzentrationsänderung [6], weswegen auf eine Umrechnung verzichtet werden kann. Da die Berechnung des Luftwechsels auf einem Konzentrationsverhältnis basiert, ist es unerheblich, ob mit den Frequenzwerten oder mit den Konzentrationsangaben gerechnet wird. Dies erspart im praktischen Einsatz die aufwendige Kalibrierung des Gerätes vor jedem Einsatz.

Die Eindosierung erfolgte bis zu einer Frequenzänderung von max. 3500 Hz; das entspricht einer SF_6 -Konzentrationen in der Stallluft von ca. 0,6 ppm.

Um eine Nullwertkorrektur vornehmen zu können, wird das Gerät auf eine Nulllinie kalibriert, indem vor und nach der Messung Reinluft in die Messkammer gepumpt wird.

Die Messungen erfolgten für die Lüftungsintensitäten von 100 %, 50 % und 25 %. Es wurden jeweils drei Wiederholungen vorgenommen. Da in den drei Lüftungsstufen sehr gute Übereinstimmungen festgestellt wurden, wurde auf eine Messung der Stufen 75 % und 10 % verzichtet.

Auswertung der Messdaten

Zur Bestimmung des Luftwechsels wurde aus den aufgezeichneten Daten die exponentiell verlaufende Abklingkurve von dem Bereich der Eindosierung getrennt und mit der Nulllinie korrigiert. Zu diesem Zweck wurde an die Messwerte der Reinluftproben eine Regressionsgerade angepasst, die dann von den Stallluftmesswerten während der Gaskonzentrationsänderung subtrahiert wurde. An die korrigierten Messwerte wurde dann mit dem Statistikprogramm Origin 7.0 eine exponentielle Funktion mit der Form $c_i(t) = c_{t=0} \cdot e^{-nt}$ (Nach Gleichung (3)) angepasst (**Bild 5**). Das im Exponenten enthaltene n entspricht der Luftwechselrate. Durch Multiplikation der Luftwechselrate mit dem Stallvolumen ergibt sich dann der Luftvolumenstrom. Die Luftwechselrate ist z.B. für: $n = 0,00875 \text{ s}^{-1} = 31,5 \text{ h}^{-1}$. Daraus ergibt sich für den untersuchten Stall ein Luftvolumenstrom von $\dot{V} = 31,5 \text{ h}^{-1} \cdot 5370 \text{ m}^3 = 169.155 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$.

Ergebnisse und Diskussion

In **Tabelle 1** sind die Ergebnisse der Messungen mit dem Messventilator und der Tracergasmethode dargestellt. Wie in den Ergebnissen der Tracergasmethode deutlich wird, besteht ein hohes Maß an Wiederholbarkeit der Messungen bei so konstanten Bedingungen, wie sie im zwangsgelüfteten Stall vorhanden sind. Die Abweichungen der Wiederholungen liegt unter 2,5 % der Luftwechselraten. Die gute Übereinstimmung der einzelnen Ergebnisse ist auf folgende Ursachen zurückzuführen:

- Die Vielzahl von Dosier- und Probennahmepunkten im Stall führt zu einer guten Mischung der Stallluft mit dem Tracergas sowie zu einer gleichmäßigen Mischprobe, die dem Messgerät zugeführt wird.
- Durch das Messintervall von einer Sekunde kann der Konzentrationsverlauf des Tracergases kontinuierlich erfasst werden; das führt zu eindeutigen exponentiellen Abklingkurven.

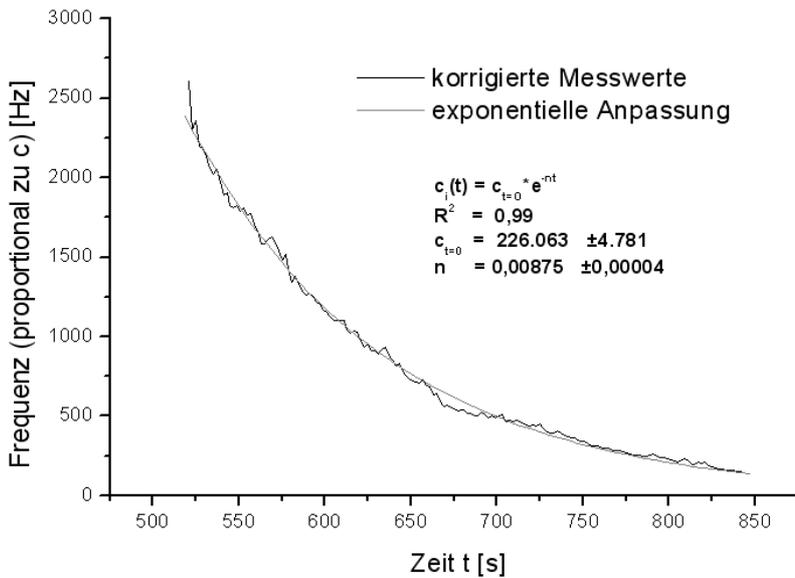


Bild 5: Tracergasabklingkurve mit exponentieller Anpassung (Tracergasmessung 3 bei Lüftungsintensität von 100%)

Tabelle 1: Luftwechselzahl n [h^{-1}] durch unterschiedliche Messmethoden bestimmt

Lüftungseinstellung	Messventilator [h^{-1}]	Tracergas Mittelwert [h^{-1}]	Tracergas 1 [h^{-1}]	Tracergas 2 [h^{-1}]	Tracergas 3 [h^{-1}]
100 %	31,4 ± 1,7	30,9 ± 3,1	30,4	30,9	31,5
50 %	18,0 ± 1,0	17,8 ± 1,8	18,25	17,4	17,6
25 %	9,3 ± 0,5	9,3 ± 0,9	9,4	9,18	9,18

- Durch das Anpassen der Abklingfunktion an die Messwerte mit Hilfe eines Statistikprogramms konnte eine hohe Wiederholbarkeit bei der Auswertung der Messdaten erreicht werden.

Die Ergebnisse der Vergleichsmessungen zeigen eine gute Übereinstimmung der beiden Methoden (**Bild 6**). Mit der Tracergasmethode wird die Luftwechselzahl im Vergleich zur Messventilatormethode um maximal 1,4 % unterschätzt.

Fehleranalyse

Trotz der gezeigten Deckung der beiden Messmethoden, sind Messfehler der Methoden nicht auszuschließen.

Die Fehlerrechnung nach dem Gaußschen Fehlerfortpflanzungsgesetz ergibt für die Messventilatormethode einen relativen Gesamtfehler von 5,5 %. Dieser ist auf folgende mögliche Fehlerquellen zurückzuführen:

- Der Messventilator bildet ein Strömungshindernis im Abluftkamin, der von dem Ventilator überwunden werden muss. Dabei beziffern [5] eine Unter-

schätzung des Volumenstroms von 2 bis 5 %. In der „worst-case“-Betrachtung wird von einem von einem Fehler von 5 % ausgegangen.

- Beim Ablesen der Digitalanzeige des Messventilators kann durch schwankende Anzeigewerte ein Fehler entstehen. Dieser wird auf 2 % geschätzt.
- Die Kalibrierkurve des Messventilators zeigt eine hohe lineare Anpassung an die gemessenen Werte ($R^2 = 0,999$). Trotzdem können durch Unterschiede im Luftdruck Fehler entstehen. Diese werden auf 1 % geschätzt.

Die Fehlerrechnung für die Tracergasmethode ergibt einen relativen Gesamtfehler von 10,1 %. Folgende Fehlerursachen wurden dabei berücksichtigt:

- Durch die Wahl der Gasdosier- und Messpunkte kann ein relativ großer Fehler entstehen. Die Dosierpunkte haben vor allem einen Einfluss auf die vollständige Durchmischung des Tracergases mit der Stallluft. Da die vollständige Vermischung des Gases mit der Stallluft eine Grundlage der Abklingmethode ist, ist die Injektion des Gases an möglichst vielen Orten, gleichmäßig über den Stall verteilt, durchzuführen.

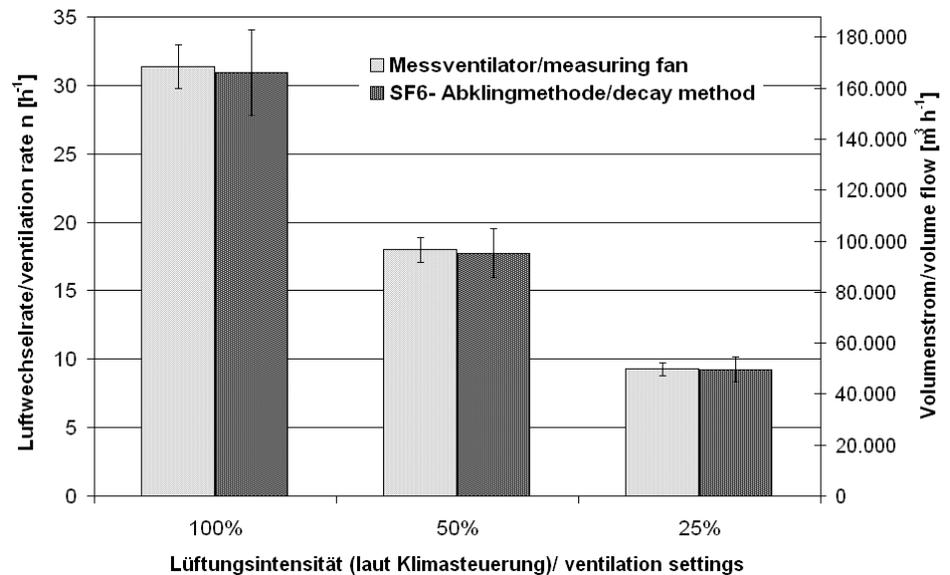


Bild 6: Vergleich der Messmethoden bei verschiedenen Lüftungseinstellungen

- Die Probenahmepunkte sollen das Konzentrationsgeschehen des gesamten Raums widerspiegeln. Es werden Abweichungen von bis zu 10 % für die konstante Tracergasmethode und Konzentrationsmessungen in der Nähe der Abluft beschrieben [7]. In weiteren Untersuchungen wird von Fehlern von bis zu 15 % berichtet [4]. Modellsimulationen ergaben durchschnittliche Abweichungen von 30 % zu CFD-Simulationen [8]. Hier wurden die Messstellen gleichmäßig im Raum angeordnet.
- In der aktuellen Untersuchung wird der Fehler auf 10 % geschätzt, da Mischproben in der Nähe der Abluftöffnungen genommen wurden.
- Bei der Auswertung und Berechnung der Luftwechselrate müssen aus den Rohdaten der Gaskonzentrationsmessung die exponentiellen Teile der Kurve von den für die Auswertung unbedeutenden Teilen getrennt werden, um eine exponentielle Anpassung vornehmen zu können. Dabei hängt es von der subjektiven Beurteilung des Bearbeiters ab, welcher Teil der Kurve als bedeutend einzustufen ist. Der entstehende relative Fehler wird dabei auf 1 % geschätzt.
- Die exponentielle Anpassung liefert Bestimmtheitsmaße von 0,99. Für die Parameter werden absolute Fehler angegeben, die unter 1 % der Parameter liegen. Daher wird ein Fehler von 1 % angenommen.

Zusätzlich zu den Fehlern der beiden Messmethoden kommt der Fehler, der beim Bestimmen der Stallmaße (Stallvolumen) entsteht. Um die beiden Methoden vergleichen zu können, muss entweder der

vom Messventilator gemessene Luftvolumenstrom zur Luftwechselrate, oder die mit Hilfe der Tracergasmethode bestimmte Luftwechselrate zum Luftvolumenstrom umgerechnet werden. Bei der Bestimmung der Stallmaße wird der mögliche absolute Fehler auf 0,1 m geschätzt, was einem relativen Fehler für das Stallvolumen von 2 % entspricht.

Fazit und Ausblick

Für diesen zwangsgelüfteten Stall konnte eine sehr gute Übereinstimmung der Messmethoden demonstriert werden. Die idealen Bedingungen hinsichtlich der Strömungs- und Mischungsverhältnisse im Stall bewirkten die gute Wiederholbarkeit der Messungen. Das eingesetzte SF₆-Messgerät ist vor allem durch die hohe zeitliche Auflösung sehr gut für die Messungen geeignet. Der zeitliche und materielle Aufwand ist für diese Messungen relativ gering.

Da es keine Referenzmethoden zur Validierung der Tracergasmethode in frei gelüfteten Ställen gibt, musste diese in einem zwangsgelüfteten Stall durchgeführt werden. Eine einfache Übertragung der Ergebnisse auf Ställe mit freier Lüftung ist nicht möglich, da sich die Luftströmungen im Stall stark unterscheiden. Die Luftströmung frei gelüfteter Ställe unterliegt den klimatischen Einflüssen von Außen und ist damit weniger gerichtet als die Luftströmung in zwangsgelüfteten Ställen. Vor allem die Bedingung der vollständigen Vermischung des Tracergases mit der Stallluft kann nicht grundsätzlich vorausgesetzt werden. Daneben ist eine eindeutige Festlegung der Lüftungsöffnungen als Zuluft- bzw. Abluftöffnung

zum Teil nicht möglich. Dies führt zu hohen Anforderungen an die Dosierung des Tracergases, an die Probennahme der Stallluft, sowie die Auswertung der Messwerte [8].

Hinsichtlich der Übertragbarkeit der Methode auf frei gelüftete Ställe ist weiterer Forschungsbedarf vorhanden.

Literatur

- [1] HINZ, T.; K.-H. KRAUSE; H.J. MÜLLER: Luftwechselraten in Louisiana-Ställen. LANDTECHNIK 50 (1995), H. 4, S. 232 – 233
- [2] VDI 4300, Blatt 7: Messungen von Innenraumluftverunreinigungen, Bestimmung der Luftwechselzahl in Innenräumen. (2001) Beuth-Verlag, Berlin
- [3] MÜLLER, H.J.: Bilanzmethoden zur Luftvolumenstromermittlung in frei gelüfteten Ställen. In: Messmethoden für Ammoniak-Emissionen, KTBL-Schrift 401 (2001); KTBL (Hrsg.), Darmstadt
- [4] BARBER, E.M.; J.R. OGILVIE: Interpretation of tracer gas experiments in ventilation research. J. AGRIC. ENGN. RES. 30 (1984): S. 57-63
- [5] BÜSCHER, W.; S. NESER; A. GRONAUER: Messmethoden zur Luftvolumenstromermittlung in zwangsgelüfteten Ställen. In: Messmethoden für Ammoniak-Emissionen, KTBL-Schrift 401 (2001); KTBL (Hrsg.), Darmstadt
- [6] WITTKOWSKI, M.: Experimentelle Verifikation von zeitaufgelösten atmosphärischen Ausbreitungsmodellen mittels Tracergasmeßtechnik. Diplomarbeit, Physikalisches Institut, Universität Bonn (2000), BONN-IB-2000-20
- [7] DEMMERS, T.G.M.; V.R. PHILLIPS; L.S. SHORT; L.R. BURGESS; R.P. HOXEY; C.M. WATHES: Validation of ventilation rate measurement methods and the ammonia emission from naturally ventilated dairy and beef buildings in the United Kingdom. J. AGRIC. ENGN. RES. 79 (2001), S. 107-116
- [8] BREHME, G.: Quantifizierung des Luftvolumenstromes in frei gelüfteten Rinderställen mit Hilfe der Kompartimentierungsmethode zur Bestimmung umweltrelevanter Emissionsmassenströme. Dissertation, Forschungsbericht Agrartechnik (VDI-MEG 365), Göttingen, 2000

Formelverzeichnis

Formelzeichen	Bezeichnung	Einheit
c_i	Massenkonzentration in der Raumluft	[g m ⁻³]
c_{Fr}	Massenkonzentration in der Frischluft	[g m ⁻³]
c_{Fo}	Massenkonzentration in der Fortluft	[g m ⁻³]
$c_{t=0}$	Massenkonzentration zum Zeitpunkt t = 0	[g m ⁻³]
\dot{c}_i	Änderungsgeschwindigkeit der Massenkonzentration im Raum	[g m ⁻³ s ⁻¹]
\dot{m}_Q	Massenstrom durch Quellen	[g s ⁻¹]
\dot{m}_S	Massenstrom durch Senken	[g s ⁻¹]
t	Zeit	[s]
V	Stallluftvolumen	[m ³]
\dot{V}	Volumenstrom	[m ³ s ⁻¹]
\dot{V}_{Fr}	Frischluftvolumenstrom	[m ³ s ⁻¹]
\dot{V}_{Fo}	Fortluftvolumenstrom	[m ³ s ⁻¹]

Autoren

Dipl.-Ing. agr. Till Schneider
 Rhein. Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn
 Institut für Landtechnik
 Nussallee 5
 53115 Bonn
 Tel.: +49/(0)228/73-2392
 Fax: +49/(0)228/73-2596
 E-Mail: till-schneider@uni-bonn.de
www.uni-bonn.de

Dr. rer. nat. Oliver Wallenfang
 (Anschrift siehe T. Schneider)
 Tel.: +49/(0)228/73-2588
 Fax: +49/(0)228/73-2596
 E-Mail: [wallenfang@uni-bonn.de](mailto:wallengang@uni-bonn.de)

Prof. Dr. agr. habil. Wolfgang Büscher
 (Anschrift siehe T. Schneider)
 Tel.: +49/(0)228/73-2396
 Fax: +49/(0)228/73-2596
 E-Mail: buescher@uni-bonn.de