

Serie Tieremissionen

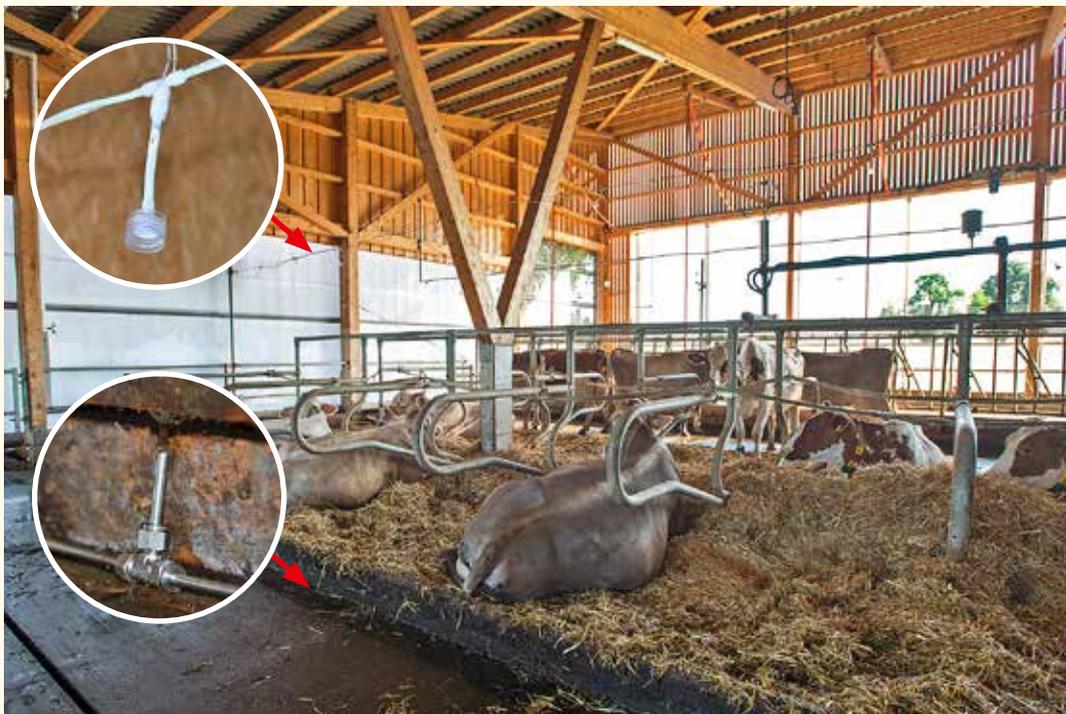
Validierung der Tracer-Ratio-Methode für Emissionsmessungen bei freier Lüftung

Sabine Schrade¹, Kerstin Zeyer², Margret Keck¹, Markus Keller¹, Michael Zähler¹ und Joachim Mohn²

¹Agroscope, 8356 Ettenhausen, Schweiz

²Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt Empa, 8600 Dübendorf, Schweiz

Auskünfte: Sabine Schrade, E-Mail: sabine.schrade@agroscope.admin.ch



Im Emissionsversuchsstall in Tänikon zeigte sich, dass sich die beiden untersuchten Tracergase ähnlich verhalten wie NH_3 , CH_4 und CO_2 . Damit lassen sich Massnahmen zur Minderung von Ammoniak- und Treibhausgasemissionen messen. (Foto: Gabriela Brändle, Agroscope)

Einleitung

Die Landwirtschaft, insbesondere die Milchviehhaltung, ist für einen Grossteil der Schweizer Ammoniak(NH_3)- und Treibhausgas(THG)-Emissionen verantwortlich. Gemäss den Umweltzielen Landwirtschaft (BAFU und BLW 2008) sind die gesamtschweizerischen NH_3 -Emissionen um rund 40 % zu reduzieren. Weiter soll die Freisetzung klimarelevanter Gase aus der Schweizer Landwirtschaft gemäss der Klimastrategie Landwirtschaft bis 2050 um ein Drittel gesenkt werden (BLW 2011). Zur Erreichung

dieser Ziele müssen erfolgversprechende Minderungs-massnahmen für Milchvieh im Praxismasstab systematisch untersucht, bewertet und schliesslich umgesetzt werden.

Die Tracer-Ratio-Methode ermöglicht die Bestimmung der Emissionen bei Ställen mit freier Lüftung sowie von Flächenquellen wie Ausläufen oder Hofdüngerlager. Ein Tracergas wird im Bereich der emittierenden Quelle zudosiert. Die umgebende Luft und das Tracergas ver-

mischen sich mit der Strömung. Da sich das Tracergas wie das emittierte Gas (NH_3 , THG) verhält, bildet es die Ausbreitung und Verdünnung des emittierenden Gases ab. Das am häufigsten eingesetzte Tracergas Schwefelhexafluorid (SF_6) ist chemisch inert, nicht toxisch und verfügt über eine tiefe und konstante Hintergrundkonzentration. Trifluormethylschwefelpentafluorid (SF_5CF_3) weist ähnliche Eigenschaften auf und kann so zusätzlich als zweites Tracergas eingesetzt werden, um beispielsweise zwei getrennte Quellen separat zu bestimmen (Schrade *et al.* 2012).

Um das Reduktionspotenzial von Minderungsmaßnahmen für die NH_3 - und THG-Emissionen verlässlich bestimmen zu können, werden bei Agroscope in Tänikon vergleichende Emissionsmessungen mit der Tracer-Ratio-Methode in einem Stall mit zwei unterschiedlichen Abteilen für Referenz und Minderungsmaßnahme durchgeführt (Mohn *et al.* 2018). Ziel der vorliegenden Studie war es zu prüfen, ob sich die beiden Tracergase SF_6 und SF_5CF_3 gleich verhalten und ob sie sich für Flächen- und Punktquellen eignen. Weiter sollte die Verfrachtung von Gasen zwischen räumlich getrennten Stallabteilen quantifiziert werden.

Material und Methoden

Emissionsversuchsstall

Der Emissionsversuchsstall von Agroscope am Standort Tänikon ist speziell für vergleichende Emissionsmessungen konzipiert. Der Stall besteht aus zwei räumlich getrennten Stallabteilen mit drei Reihen Liegeboxen mit Stroh-Mist-Matratzen für je zwanzig Kühe sowie einem Zwischenbereich für Melken, Technik, Büro und Analytik (Abb. 1). Die Längsfassaden sind flexibel mit steuerbaren Curtains (Rollvorhänge) ausgeführt. Die beiden räumlich getrennten Stallabteile ermöglichen vergleichbare Versuchsbedingungen (z. B. Klima) im Praxismasstab (Schrade *et al.* 2015).

Zudosierung der Tracergase

In den beiden Stallabteilen werden zwei unterschiedliche Tracergase SF_6 und SF_5CF_3 verwendet, um so eine allfällige Verfrachtung zwischen den Stallabteilen feststellen zu können. Die Tracergase werden über ein Rohrsystem mit kritischen Kapillaren aus Stahl (ID $30\ \mu\text{m}$) zudosiert. Diese sind 10–15 cm über den Laufflächen montiert und bilden so die emittierenden Quellen ab. Je nach Versuch erfolgt die Zudosierung nur im Stall (18 Kapillaren) oder auch im Laufhof (fünf zusätzliche Kapillaren). Die Leitungen und Kapillaren sind mit Metallprofilen vor den Tieren und vor Verschmutzung geschützt. Mit Hilfe von

Zusammenfassung

Die Tracer-Ratio-Methode dient zur Quantifizierung der Emissionen bei Ställen mit freier Lüftung. Die Empa und Agroscope entwickelten eine Tracer-Ratio-Methode mit zwei Tracergasen für vergleichende Messungen im Emissionsversuchsstall mit zwei separaten Stallabteilen. Dabei werden die Tracergase Schwefelhexafluorid (SF_6) und Trifluormethylschwefelpentafluorid (SF_5CF_3) kontinuierlich bodennah über ein Rohrsystem mit kritischen Kapillaren zudosiert. Diese bilden so die Emissionsquellen ab. Die Probenahme erfolgt räumlich verteilt über Luftsammelleitungen und kritische Kapillaren. Anschliessend werden Tracer- sowie Zielgase analysiert und die Emissionen berechnet. Systematische Validierungsversuche zeigen, dass sich die beiden Tracergase äquivalent verhalten. Das eingesetzte Prinzip zur Zudosierung und Probenahme ermöglicht die Emissionsbestimmung von Flächen- sowie Punktquellen. Zudem kann mit den beiden unterschiedlichen Tracergasen eine allfällige Gas-Verfrachtung zwischen den beiden Stallabteilen nachgewiesen und quantifiziert werden. Somit eignet sich die Tracer-Ratio-Methode zur vergleichenden Bestimmung der Emissionsreduktion von Minderungsmaßnahmen für Ammoniak sowie für die Treibhausgase Methan und Kohlendioxid.

Massenflussreglern wird ein konstanter Gasfluss der verdünnten Tracergase (2000 ppm SF_6 bzw. SF_5CF_3 in synthetischer Luft) zudosiert. Geringfügige Verunreinigungen von SF_6 im SF_5CF_3 -Tracergas (1 % SF_6 in SF_5CF_3) sind bei der Datenaufbereitung berücksichtigt.

Probenahme

Die Gasprobenahme erfolgt im weiträumigen Stallabteil über Teflonschläuche (AD 8 mm) mit kritischen Glaskapillaren (ID $250\ \mu\text{m}$) als Luftsammelprobe. Analog zur Tracergaszudosierung kann die Probenahme nur im Stall (24 Kapillaren) oder zusätzlich im Laufhof (6 Kapillaren) erfolgen. Die Kapillaren sind mit Teflon-Filtern (Dicke $5,0\ \mu\text{m}$, Durchmesser 37 mm) vor Verunreinigungen geschützt. Eine zusätzliche Gasprobenahme wird im Zwischenbereich sowie an einer Hintergrundmessstelle, die sich 30 m in der Verlängerung der Stallachse befindet, durchgeführt. Die Gasproben der einzelnen Messberei-

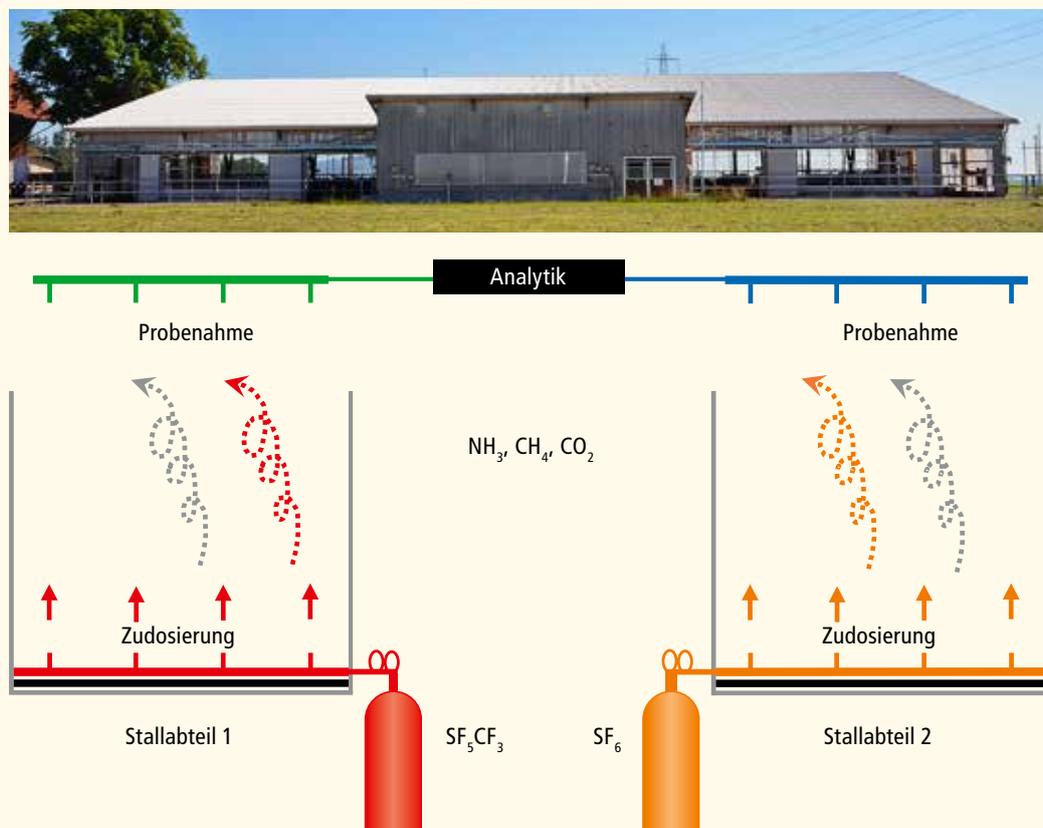


Abb. 1 | Versuchsanordnung im Emissionsversuchsstall am Agroscope-Standort Tänikon (TG). Der Stall besteht aus zwei räumlich getrennten Stallabteilen für je zwanzig Kühe sowie einem Zwischenbereich für Melken, Technik, Büro und Analytik. Die Tracergase Trifluormethylschwefelpentafluorid (SF_5CF_3) und Schwefelhexafluorid (SF_6) werden in je einem Stallabteil zudosiert. Die Tracergase bilden das Verhalten von Ammoniak (NH_3), Methan (CH_4) und Kohlendioxid (CO_2) ab.

che werden mit separaten Sammelleitungen kontinuierlich über vier teflonbeschichtete Membranpumpen angesaugt und in unterschiedliche Druckausgleichsgefäße geführt. Die Gasflüsse betragen rund 10 L/min für die Probenahme aus den Stallabteilen sowie rund 2,5 L/min für die Probenahme des Zwischenbereichs und der Hintergrundmessstelle. Mittels eines Messstellenumschalters wird jeweils ein Druckausgleichsgefäß beziehungsweise ein Messbereich für zehn Minuten beprobt, d. h. zu den Analysegeräten geleitet.

Analytik

Die Analysegeräte sind in einem klimatisierten Messanhänger im Zwischenbereich des Stalls untergebracht. Die Konzentrationen von SF_6 und SF_5CF_3 werden mit einem Gaschromatographen mit Elektronen-Einfang-Detektor mit einer Nachweisgrenze von 2 ppt (GC-ECD, 7890A, Agilent Technologies AG, Basel, Schweiz) bestimmt. Die Analyse der NH_3 -, Methan (CH_4)- und Kohlendioxid (CO_2)-Konzentrationen erfolgt mit zwei Cavaty-Ring-Down-Spektrometern (NH_3 : G2103, CH_4

und CO_2 : G2301, Picarro Inc., Santa Clara, USA). Die CH_4 - und CO_2 -Konzentrationen im Stall werden um die Variation an der Hintergrundkonzentration korrigiert. Für SF_6 (8,04 ppt; 24-h-Messwert vor Start der Zudosierung) und für SF_5CF_3 (0,15 ppt; Literaturwert nach Sturges *et al.* 2012) wird eine konstante Korrektur durchgeführt. Bei NH_3 wird jeweils rund 100 m nordwestlich vom Stall ein während vier Messtagen mit Passivsammlern erhobener Wert zur Hintergrund-Korrektur verwendet. Weitere Details und Spezifikationen zur Zudosierung, Probenahme und Analytik sind in Mohn *et al.* (2018) beschrieben.

Berechnung der Emissionen

Der Massenfluss der Zielsubstanz (\dot{m}_{Ziel}) wird anhand des Konzentrationsverhältnisses der Zielsubstanz (c_{Ziel}) und des Tracergases (c_{Tracer}) sowie des zudosierten Massenflusses des Tracergases (\dot{m}_{Tracer}) berechnet:

$$\dot{m}_{\text{Ziel}} = \frac{\dot{m}_{\text{Tracer}} \times c_{\text{Ziel}}}{c_{\text{Tracer}}} \quad (1)$$

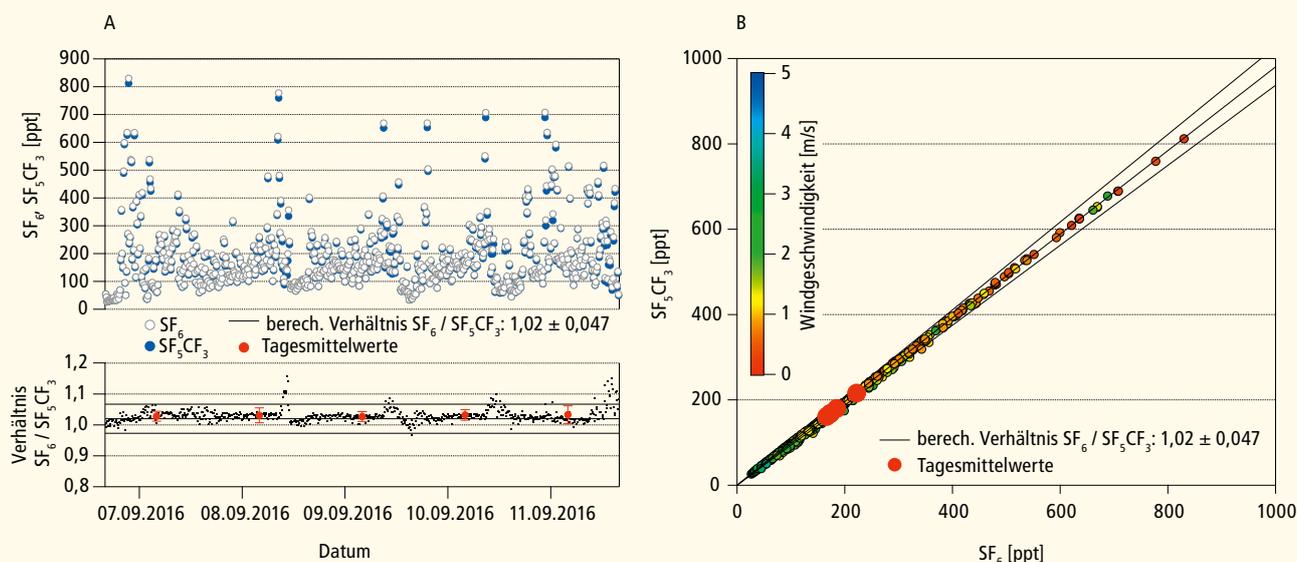


Abb. 2 | Die Ergebnisse der Versuchsvariante mit gleichzeitiger Zudosierung beider Tracergase in demselben Zudosierungssystem zeigen die Äquivalenz von SF_6 und SF_5CF_3 . Das Verdünnungsverhältnis weist eine deutliche Abhängigkeit von der Windgeschwindigkeit auf (Mohn *et al.* 2018).

Winddaten

Winddaten werden an einer Position 60 m südwestlich vom Stall in 10 m Höhe mit einem 3D-Ultraschall-Anemometer (USA-1-Scientific, METEK, Elmshorn, Deutschland bzw. Ultrasonic-Anemometer 3D, Adolf Thies GmbH & Co. KG, Göttingen, Deutschland) erhoben. Zusätzlich werden Windgeschwindigkeit und -richtung an je einer Messstelle in der Mitte der beiden Stallabteile sowie am Rand des Laufhofs jeweils in 2,5 m Höhe mit 3D-Ultraschall-Anemometern gemessen.

Validierungsversuche

Die Anwendbarkeit der Tracer-Ratio-Methode beruht auf einer Reihe von Hypothesen, die im Emissionsversuchsstall mit verschiedenen Experimenten getestet wurden:

- **Die beiden Tracergase SF_6 und SF_5CF_3 verhalten sich äquivalent:** In einem Stallabteil wurden durch das Zudosierungssystem beide Tracergase gemeinsam konstant zudosiert (150 ml/min SF_6 ; 150 ml/min SF_5CF_3 , 18 kritische Kapillaren). Dieser Versuch wurde während fünf Messtagen mit Tierbelegung durchgeführt.
- **Mit der Tracer-Ratio-Methode können Emissionen von Flächenquellen bei unterschiedlichen Lüftungsbedingungen quantifiziert werden:** In einem leeren, gereinigten Stallabteil (ohne Kühe) wurde SF_6 als Tracergas über das fest installierte Zudosierungssystem zudosiert (100 ml/min, 18 kritische Kapillaren). Die Flächenquelle wurde über ein zweites, unabhängiges Zu-

dosierungssystem in demselben Stallabteil simuliert, wobei SF_5CF_3 (100 ml/min, 18 kritische Kapillaren) als Zielsubstanz verwendet wurde. Um unterschiedliche Lüftungsbedingungen zu untersuchen, waren die Curtains während vier Tagen geschlossen und während drei Tagen geöffnet.

- **Die Tracer-Ratio-Methode eignet sich zur Bestimmung von punktförmigen Emissionsquellen:** Analog zum obigen Versuch wurde SF_6 als Tracergas verwendet und über das fest installierte Rohrsystem zudosiert (100 ml/min, 18 kritische Kapillaren). Als Punktquelle wurde SF_5CF_3 an einer Position in der Mitte des Stallbereichs zudosiert (100 ml/min, fünf kritische Kapillaren). Das Experiment wurde an drei aufeinanderfolgenden Tagen durchgeführt, wobei die Curtains geschlossen waren.
- **Eine allfällige Verfrachtung von Gasen zwischen den beiden räumlich getrennten Stallabteilen kann dank der Verwendung der beiden Tracergase aufgezeigt werden:** Dieser Versuch erfolgte in beiden Stallabteilen im Normalbetrieb (mit Kühen). Dazu wurde je eines der beiden Tracergase SF_6 und SF_5CF_3 in jeweils einem der beiden Stallabteile mit demselben Fluss (100 ml/min) während vier Tagen zudosiert. Die gemessene Konzentration des Tracergases, das im jeweils anderen Stallabteil zudosiert wurde, gibt Aufschluss über eine allfällige Verfrachtung von Gasen zwischen den beiden Stallabteilen.

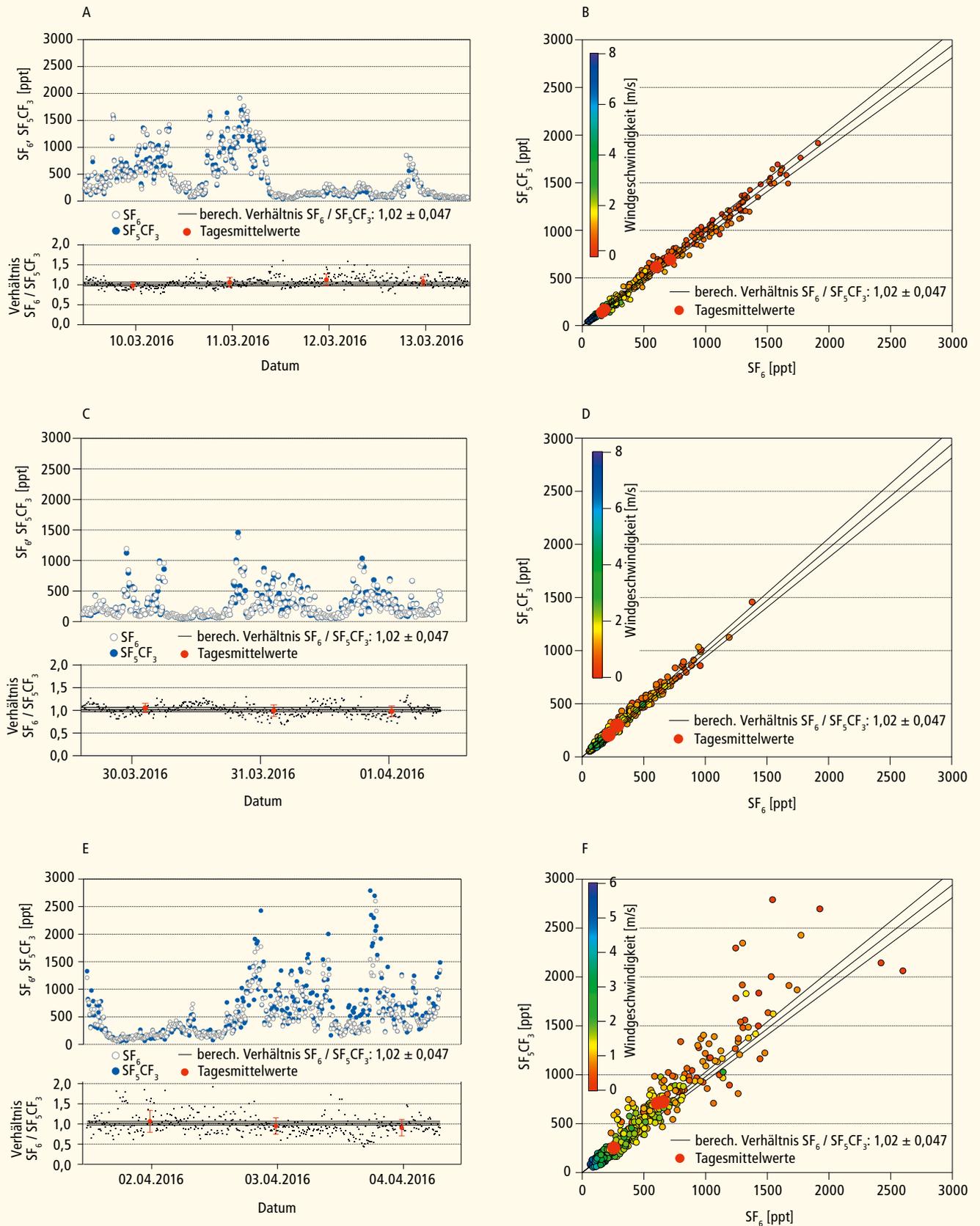


Abb. 3 | Die Ergebnisse der Versuchsvarianten zu Flächenquellen mit geschlossenen (A, B) und offenen (C, D) sowie Punktquellen mit geschlossenen Curtains (E, F) zeigen eine gute Übereinstimmung der SF_6/SF_5CF_3 -Verhältnisse mit den Vorhersagewerten. Die Variation der 10-Minuten-Einzelwerte ist jedoch deutlich grösser als die der Tagesmittelwerte (Mohn *et al.* 2018).

Resultate und Diskussion

Äquivalenz der beiden Tracergase

Die SF_6 - und SF_5CF_3 -Konzentrationen verlaufen parallel (Abb. 2 A). Variationen der Tracergas-Konzentration im Tagesverlauf lassen sich mit der Variation der Windgeschwindigkeit erklären, die zur stärkeren Verdünnung der Gase führt. Das Konzentrationsverhältnis $\text{SF}_6/\text{SF}_5\text{CF}_3$ zeigt selbst bei Betrachtung der 10-Minuten-Einzelwerte nur eine geringfügige Variabilität ($1,03 \pm 0,02$; Unsicherheitsangabe falls nicht anders erwähnt immer ± 1 SD [Standard Deviation]), die Variation der Tagesmittelwerte ist deutlich geringer ($1,03 \pm 0,002$) (Abb. 2 B). Die grössere Variabilität der 10-Minuten-Einzelwerte ist möglicherweise auf kurzzeitige Schwankungen der Tracergas-Zudosierungsflüsse oder auf Variationen der Analysenmethode zur Bestimmung der Tracergase zurückzuführen. Das gemessene Konzentrationsverhältnis $\text{SF}_6/\text{SF}_5\text{CF}_3$ stimmt sehr gut mit dem Vorhersagewert überein, der aus den zudosierten Tracergasmengen berechnet wurde ($1,02 \pm 0,05$). Die Abweichungen von Messwert und Vorhersagewert sind deutlich geringer als die abgeschätzten Unsicherheiten. Somit kann mit diesem Versuchsansatz aufgezeigt werden, dass sich die beiden Tracergase SF_6 und SF_5CF_3 äquivalent verhalten.

Eignung für Flächen- und Punktquellen

Wird das zweite Tracergas (SF_5CF_3) über ein separates Rohrsystem, als Flächen- oder Punktquelle, zudosiert, beobachtet man eine grössere Variation des $\text{SF}_6/\text{SF}_5\text{CF}_3$ -Konzentrationsverhältnisses (Abb. 3), verglichen mit der gemeinsamen Zudosierung von beiden Tracergasen über ein Zudosierungssystem (Abb. 2). Die Tagesmittelwerte des Konzentrationsverhältnisses $\text{SF}_6/\text{SF}_5\text{CF}_3$ stimmen jedoch sowohl für Flächenquellen mit geschlossenen ($1,06 \pm 0,05$, Abb. 3 A–B) oder geöffneten Curtains ($1,01 \pm 0,03$, Abb. 3 C–D) als auch für Punktquellen ($0,98 \pm 0,07$, Abb. 3 E–F) im Bereich der Unsicherheiten mit den Vorhersagewerten ($1,02 \pm 0,05$) überein. Die Variabilität der 10-Minuten-Intervalle ist erwartungsgemäss bei der Punktquelle (0,24) grösser als bei den Varianten mit Flächenquellen (geschlossene Curtains: 0,13; geöffnete Curtains: 0,12). Dies kann auf eine schlechtere Durchmischung der beiden Gase bei räumlich nicht gleichmässig verteilten Quellen zurückgeführt werden. Diese Ergebnisse stellen jedoch eher ein Worst-Case-Szenario dar, da NH_3 von der gesamten verschmutzten Lauffläche emittiert wird und in den vergleichenden Emissionsmessungen die Tracergas-Zudosierung räumlich analog erfolgt. Ebenso werden sich am Beispiel der zwanzig Kühe, die CH_4 freisetzen, die Anzahl der

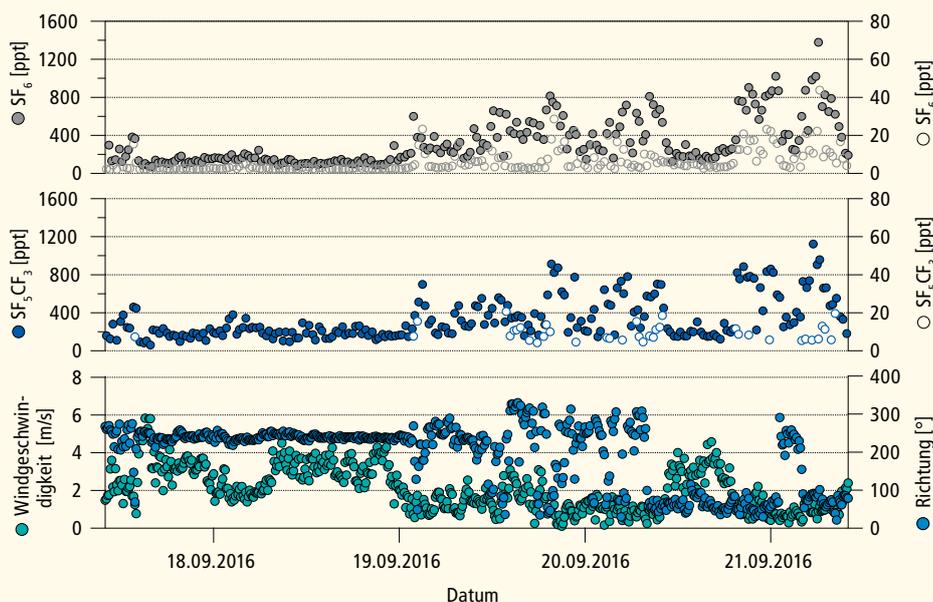


Abb. 4 | Ergebnisse zur Verfrachtung: Die Tracergaskonzentrationen im zudosierten Stallabteil (ausgefüllte Symbole) und im jeweils anderen Stallabteil (leere Symbole) zeigen bei geringen Windgeschwindigkeiten lediglich eine geringfügige Gasverfrachtung (Mohn *et al.* 2018).

Punktquellen deutlich höher sein und im Stallabteil mehr oder weniger über die gesamte Fläche verteilen. Folglich zeigen diese Versuchsvarianten, dass sich die angewandte Tracer-Ratio-Methode mit Zudosierung durch ein Rohrsystem mit kritischen Kapillaren direkt an den emittierenden Quellen und der räumlich hoch aufgelösten Luftsammelprobe in 2,5m Höhe sowohl zur Bestimmung der Emissionen von Flächenquellen bei unterschiedlichen Lüftungsbedingungen als auch für die Quantifizierung von Punktquellen eignet. Dies bestätigt Untersuchungen von Mendes *et al.* (2015), die eine gleichmässige Durchmischung des Tracergases SF₆ mit den beiden Zielsubstanzen (CO₂, NH₃) über dem Tierbereich in 2m Höhe feststellten.

Gas-Verfrachtung zwischen den Stallabteilen

Ein Vorteil der im Emissionsversuchsstall eingesetzten Tracer-Ratio-Methode ist, dass eine allfällige Verfrachtung von Gasen zwischen den Stallabteilen dank der Verwendung von zwei unterschiedlichen Tracergasen nachgewiesen und quantifiziert werden kann. Bei Windgeschwindigkeiten über 2m/s wurden in den Stallabteilen Tracergaskonzentrationen zwischen 100 und 400ppt festgestellt, während im jeweils anderen Stallabteil die Konzentrationen unter beziehungsweise im Bereich der Nachweisgrenze lagen (Abb. 4). Bei tieferen Windgeschwindigkeiten stiegen die Tracergaskonzentrationen auf Grund der geringeren Verdünnung auf über 1000ppt im Zudosierungs-Abteil respektive auf 20–40ppt im anderen Stallabteil an. Aus diesen Ergebnissen lässt sich folgern, dass die Gasverfrachtung zwischen den Stallabteilen bei höheren Windgeschwindigkeiten zu vernachlässigen ist. Bei niedrigeren Windgeschwindigkeiten kann diese zwar beobachtet werden, ist anteilmässig jedoch sehr gering.

Schlussfolgerungen

Die eingesetzte Tracer-Ratio-Methode mit den Tracergasen SF₆ und SF₅CF₃ eignet sich für eine verlässliche Bestimmung der Emissionen in einem Milchviehstall mit freier Lüftung. Die Arbeitshypothesen konnten mit den Validierungsmessungen bestätigt werden. Aus einem Experiment, bei dem SF₆ und SF₅CF₃ über ein Rohrsystem mit kritischen Kapillaren freigesetzt wurden, resultierten parallele Tagesverläufe und ein stabiles Konzentrationsverhältnis der beiden Tracergase. Dies belegt, dass sich SF₆ und SF₅CF₃ äquivalent verhalten.

Die Versuche mit Flächen- und Punktquellen zeigten, dass sich die angewandte Tracer-Ratio-Methode mit dem netzartigen Zudosierungssystem in Bodennähe und der räumlich hoch aufgelösten Luftsammelprobe in 2,5m Höhe zur Quantifizierung der Emissionen von Flächenquellen (z.B. verschmutzte Laufflächen) und Punktquellen (z.B. Kühe) eignet. Bei unterschiedlichen stallüblichen Lüftungsbedingungen stimmten die Messergebnisse gut mit den Vorhersagewerten überein.

Dank der Verwendung von zwei unterschiedlichen Tracergasen bei vergleichenden Messungen im Emissionsversuchsstall kann eine allfällige Gas-Verfrachtung zwischen den beiden räumlich getrennten Stallabteilen kontrolliert und quantifiziert werden. Die Validierungsversuche zeigten, dass die Verfrachtung von Gasen bei höheren Windgeschwindigkeiten >2 m/s zu vernachlässigen und bei tiefen Windgeschwindigkeiten <2 m/s anteilmässig sehr gering ist. ■

Riassunto**Convalidazione del metodo Tracer-Ratio per misurazioni delle emissioni in caso ventilazione naturale**

Il metodo Tracer-Ratio serve alla quantificazione delle emissioni nelle stalle con ventilazione naturale. Empa e Agroscope hanno sviluppato il metodo Tracer-Ratio con due gas traccianti per effettuare misurazioni comparative nella stalla del test delle emissioni con due compartimenti di stalla diversi. I gas traccianti esafluoruro di zolfo (SF_6) e trifluorometil pentafluoruro di zolfo (SF_5CF_3) sono immessi continuamente a livello del suolo tramite un sistema di tubazioni con tubi capillari critici. Questi rappresentano quindi le fonti di emissione. Il prelievo di campioni avviene in vari punti tramite i collettori d'aria e capillari critici. Successivamente i gas traccianti e i gas bersaglio sono analizzati e le emissioni calcolate. I tentativi di convalidazione sistematici mostrano che i due gas traccianti si comportano in maniera equivalente. Il principio applicato per il dosaggio e il prelievo di campioni permette la rilevazione delle emissioni di fonti superficiali e di quelle puntuali. Inoltre, mediante i due diversi gas traccianti, si può dimostrare e quantificare un'eventuale trasmissione di gas tra i due compartimenti della stalla. In tal modo il metodo Tracer-Ratio si presta alla determinazione comparativa della riduzione delle emissioni delle misure contenitive.

Summary**Validation of the tracer ratio method for emission measurements in naturally ventilated housing**

The tracer ratio method serves to quantify emissions in naturally ventilated animal housing systems. Empa and Agroscope have developed a tracer ratio method with two tracer gases for comparative emission measurements in Agroscope's experimental dairy housing, with its two spatially separated compartments. In this method, the tracer gases sulphur hexafluoride (SF_6) and trifluoromethyl sulphur pentafluoride (SF_5CF_3) are continuously dosed near to the floors via a tube system with critical capillaries, thus representing the emission sources. Spatially distributed sampling is performed via air manifolds and critical capillaries. Tracer and target gases are then analysed and the emissions calculated. Systematic validation trials show that both tracer gases behave equivalently. The dosing and sampling scheme allows emissions to be determined for both areal and point sources. In addition, the two different tracer gases can be used to detect and quantify any possible gas transport between the two housing compartments. Consequently, the tracer ratio method is suitable for the comparative determination of the emission-reduction potential of abatement measures.

Key words: emission, tracer ratio method, experimental dairy housing.

Literatur

- BAFU & BLW, 2008. Umweltziele Landwirtschaft. Hergeleitet aus bestehenden rechtlichen Grundlagen. *Umwelt-Wissen* 221, Bundesamt für Umwelt BAFU und Bundesamt für Landwirtschaft BLW, Bern.
- BLW, 2011. Klimastrategie Landwirtschaft – Klimaschutz und Anpassung an den Klimawandel für eine nachhaltige Schweizer Land- und Ernährungswirtschaft. Bundesamt für Landwirtschaft BLW, Bern.
- Mendes L.B., Edouard N., Ogink N.W.M., van Dooren H.J.C., Tinôco I.d.F.F. & Mosquera J., 2015. Spatial variability of mixing ratios of ammonia and tracer gases in a naturally ventilated dairy cow barn. *Biosystems Engineering* 129, 360–369.
- Mohn J., Zeyer K., Keck M., Keller M., Zähler M., Poteko J., Emmenegger L. & Schrade S., 2018. A dual tracer ratio method for comparative emission measurements in an experimental dairy housing. *Atmospheric Environment* 179, 12–22.
- Schrade S., Zeyer K., Gygax L., Emmenegger L., Hartung E. & Keck M., 2012. Ammonia emissions and emission factors of naturally ventilated dairy housing with solid floors and an outdoor exercise area in Switzerland. *Atmospheric Environment* 47, 183–194.
- Schrade S., Zähler M., Poteko J., Steiner B., Keck M., Sax M., Herzog D. & Schick M., 2015. Versuchsstall zur Entwicklung und Quantifizierung von Massnahmen zur Minderung von Emissionen. In: Bau, Technik und Umwelt in der landwirtschaftlichen Nutztierhaltung (Ed. Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft, Freising), S. 450–455.
- Sturges W.T., Oram D.E., Laube J.C., Reeves C.E., Newland M.J., Hogan C., Martinierie P., Witrant E., Brenninkmeijer C.A.M., Schuck T.J. & Fraser P.J., 2012. Emissions halted of the potent greenhouse gas SF_5CF_3 . *Atmospheric Chemistry and Physics* 12, 3653–3658.